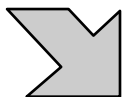


# **ACTA DE LA XLVI REUNIÓN DE TRABAJO**

**VOLUMEN 11  
AÑO 2024**

**ASOCIACIÓN ARGENTINA DE ENERGÍAS  
RENOVABLES Y AMBIENTE**



**Asociación Argentina de  
Energías Renovables y Ambiente**

## **ACTA DE LA XLVI**

# **REUNIÓN DE TRABAJO**

**Vol. 11 Año 2024  
ISBN 978-987-29873-1-2  
Secciones 1 a 9**

### **ASADES**

**Asociación Argentina de  
Energías Renovables y  
Ambiente**

#### **COMISIÓN DIRECTIVA**

**Presidente:** Pablo Dellicompagni

**Secretaria:** Rita Mónica Abalone

**Tesorera:** Judith Franco

**Vocales:** Marcos Hongn, Carlos Cadena

#### **COMISIÓN REVISORA DE CUENTAS**

Aein Salvo

Mariana Tamasi

Mariela Videla

#### **COMISIÓN DE PUBLICACIONES**

##### **Directora**

Martínez Bogado, Mónica

##### **Consejo Editorial**

Cadena, Carlos

#### **COMITÉ EDITORIAL**

Graciela Viegas, Jélica Esparza, Guillermina Re, Ismael Eyra, Pedro Chevez, Jorge Barral, Alba Lema, Mariana Tamasi, Julio Durán, Mariela Videla, Sonia Esteban, Andrés Díaz, Rocío Guido, Santiago Fondoso Ossola, Marcos Hongn, Camila Gea Salim, Aien Salvo, Juan Francisco Linares, Rodrigo Alonso-Suárez, María José Denegri, Verónica Javi, Camila Binda, Mónica Pasculli, Pablo Dellicompagni, Martín Zoloff Michoff

#### **COMISIÓN ORGANIZADORA**

**Facultad de Arquitectura, Planeamiento y Diseño de la Universidad Nacional de Rosario:** Gabriel Chiarito, Daniela Chiarito, Eugenia Turdó, Florencia Paletto, Jorge Vazquez, Patricia Mosconi, Alejandra Monti, Delfina Gonzalez

**Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario:** Rita Abalone, Cristina Cervera, Sergio Junco.

**Universidad Tecnológica Nacional, Regional Rosario:** Juan Salerno, Pablo Rullo, Jorge Chevez

#### **COMITÉ CIENTÍFICO**

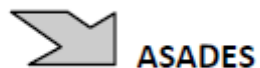
Graciela Viegas, Gustavo San Juan, Jorge Barral, Julio Durán, Mariana Tamasi, Rafael Oliva, Sonia Esteban

#### **APOYO TÉCNICO INFORMÁTICO**

Tolaba, Miguel - Troviano, Mauricio

## **COMITÉ EVALUADOR**

Noelia Alchapar, Daniela Cortizo, Lucas Gastón Rodríguez, Sebastián Miguel, Guillermo Gonzálo, Silvana Flores Larsen, Marcos Hongn, Juan Martín Hümoller, Ezequiel Rossi, Ramiro Rodríguez, Fabiana Gennari, Fernando Marino, Gabriel Correa, Carlos Cadena, Jorge Raúl Barral, Johan Sarache Piña, Pedro Chevez, Carlos Alberto Díscoli, María Celeste Gardey Merino, Camila Binda Galindez, Gustavo Barea, Magdalena Camacho Roberts, David Elsinger, Miguel Ángel Condorí, Alejandro Javier Krautner, Jorge Fernández, María Luciana Giglio, María Emilia García Schilardi, Marta Edith Yajnes, Diego Velázquez, Vicente Capuano, María Victoria Barros, Judith Ada Franco, Joaquín Sarmiento, Rocío Rodríguez Soler, Julio César Durán, Guillermo Spina, Bárbara Masseilot, Víctor Luque, María Laura Boutet, Guillermina Re, Nicolás Di Lalla, Andrés Emanuel Díaz, Gustavo Alberto San Juan, Marta Susana Cisterna, Carolina Ganem, Betina Cardoso, Celina Filippín, Graciela Melisa Viegas, Laura Gatto, Diego Petrucci, Silvia Ana Carla Cravero, Fernando Florentín Tilca, Luis Odicino, Mary Flor Cesare, Fabiana Noelia Altobelli, Aien Weni Salvo, Roque Pedace, Carlos Eduardo Mora Fresca, Pablo Dellicompagni, Mariana Birche, Claudia Martínez, María de la Paz Diulio, Jorge Vázquez, Luciano Dicroce, Ayelén María Villalba, Claudia Pilar, Gabriela Polliotto, Yanina Sánchez, Fernando Ramos Martins, Facundo Orte, Olga Vilela, Julián Alejandro Lell, María José Denegri, Germán Salazar, Jorge Esteban Colman Lerner, Marcos Politti, Edgardo Sambrano, Rosana Aristegui, Manuel Platino, Mauricio Samper, María José Lavorante, Federico Vivas, Herminia Alías, Jorge Chemes, Facundo González, Eduardo Manzano, Rajmat Ajmat, Andrés Martin, Sebastián Garita, Cecilia Rasuk, Pablo Bahamonde, Dora Mendoza, Viviana Noelia Quiroga, Nicolás Martín Clauser, Ester Sonia Esteban, Alba Lema, Anahí Lanson, Javier Horacio Zizzias, Irene Judith De Paul, Alejandro Luis Hernández, Rita Abalone, Claudio Bolzi, Daniel Raggio, Luis Vera, Juan Plá, Adriano Moehleck, Izete Zanesco, Alejandro Zitzer, Javier Schmidt, Marcelo Bertossi, Elielza Moura Barbosa, Andrés Firman, Jorge A. González, Néstor Castro, Federico Nores Pondal, Jorge Mario Morsetto, Rodolfo Stoll, Pablo Daniel Galimberti, Damián Ramajo, María Isabel Rita Pontín, Juan Martín Lucchini, María del Socorro Vilte



Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente - ASADES

Acta de la XLVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (volumen 11), Rosario, Santa Fé, 29 de octubre al 1 de noviembre de 2024.

Rosario, noviembre de 2024



## ÍNDICE

### 1. ARQUITECTURA AMBIENTALMENTE CONSCIENTE Y HÁBITAT

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| CAPACIDAD AISLANTE TÉRMICA DE NUEVOS PRODUCTOS CEMENTICIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN BASADOS EN RESIDUOS: DESAFIOS EXPERIMENTALES<br>Yajnes, Marta; Becerra Araneda, Abraham; Busnelli, Roberto; Niemetschek, Sebastián; Aranda, Yanina; Mateo, Federico; Cervera, Cristina; Abalone, Rita                           | 8  |
| ¿CAMBIOS EN LA ZONA DE CONFORT TÉRMICO? ESTUDIO DE CAMPO DE CONFORT TÉRMICO Y CALIDAD DEL AIRE EN ESCUELAS PÚBLICAS DE MONTEVIDEO<br>Maria Noel López Salgado, Magdalena Camacho, Lucia Gutiérrez, Lucía Pereira                                                                                                | 19 |
| ANÁLISIS DE TEMPERATURAS INTERIORES EN PERIODO INVERNAL EN EDIFICIO DE VIVIENDA EN ALTURA CUMPLIMENTANDO NORMAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN ROSARIO, ARGENTINA<br>Patricia Mosconi, Jorge Vázquez, Nora Díaz, Marcelo Graziani, Federico Vázquez Mosconi, Melina Duca, Franco Nocioni, Agustina Martínez Chaher | 31 |
| MATERIALES AISLANTES TÉRMICOS NO CONVENCIONALES: UN ANÁLISIS DEL MICELIO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE EN LA CONSTRUCCIÓN<br>Maira Terraza, Noelia Liliana Alchapar, Ayelén Villalba, Pablo Postemsky                                                                                                             | 43 |
| SUFRIMIENTO TÉRMICO EN BARRIOS POPULARES DEL PARTIDO DE LA PLATA. AUDITORÍA TÉRMICA OBJETIVA Y SUBJETIVA<br>Graciela Melisa Viegas, Jesica Belén Esparza, David Doucet, Gustavo Alberto San Juan                                                                                                                | 55 |
| CAPACIDAD DE RETENCION DE AGUA DE LLUVIA EN TECHOS VERDES EXTENSIVOS CON DIFERENTE MATERIAL DRENANTE. ESTUDIOS EN LA CIUDAD DE BUENOS AIRES, ARGENTINA<br>María José Leveratto                                                                                                                                  | 68 |

### 2. ENERGÍA SOLAR: APLICACIONES TÉRMICAS, AGRÍCOLAS, QUÍMICAS E INDUSTRIALES

|                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| SISTEMAS SOLARES DE CALENTAMIENTO DE AGUA SANITARIA. APRENDER DE LAS EXPERIENCIAS<br>Alejandra Ise, Luciana Clementi, Silvina Carrizo, Sol Sierra, José Luis Berdolini, Italo Bove, Luciana Martin, Salvador Gil                   | 79  |
| EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE SISTEMAS HÍBRIDOS SOLARES FOTOVOLTAICOS/ BIOGÁS CONECTADOS A LA RED: CASO DE ESTUDIO DE PUJATO NORTE, SANTA FE<br>Juan P. Cecchini, Luis E. Venghi, Luis I. Silva, Brenda Ledesma, Ernesto E. Coutiers | 91  |
| ESTUDIO TEÓRICO DE UN DESALINIZADOR POR HUMIDIFICACIÓN - DESHUMIDIFICACIÓN TIPO OACW PARA APLICACIONES RURALES EMPLEANDO ENERGÍA SOLAR<br>Emilio S. Scozzina Unterholzner, Luís H. Vera, Héctor G. Lorenzo, Osvaldo M. Díaz        | 103 |

### **3. ENERGÍA SOLAR: CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA**

GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN LA CIUDAD AUTÓNOMA DE BUENOS AIRES: ANÁLISIS DE CINCO AÑOS DE IMPLEMENTACIÓN (2019-2024) **114**  
Pablo Bahamonde, Alejandro Aroca Bavich, Alan Bjerring

AVANCES EN PROYECTOS DE INVERSIÓN PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA DISTRIBUIDA CON SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN LA CNEA **126**  
Julio C. Durán, Ismael Eyras, Juan Plá, Mariela Videla, Alejandro Krautner, Claudio G. Bolzi, Juan I. Pérez, Mónica Martínez Bogado

### **4. ENERGÍA EÓLICA, GEOTÉRMICA, MAREOMOTRIZ, HIDRÁULICA, BIOMASA Y BIOGÁS**

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DEL SUELO CON UN SERPENTÍN NO CONVENCIONAL EN SAN LUIS, ARGENTINA **138**  
Valentín Antonio Stefanini; Víctor Daniel Nazario; Ronio Guaycochea

### **5. USO EFICIENTE Y RACIONAL DE LA ENERGÍA**

ANÁLISIS DEL CONSUMO ELÉCTRICO DE UNA GRANJA AVÍCOLA DE LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS, ARGENTINA **150**  
Francisco Fernandez, Santiago Ortman, Luis Silva, Cristian de Angelo

AHORRO DE ENERGÍA EN CALENTAMIENTO DE AGUA SANITARIA: USO DE TIMER EN TERMOTANQUES ELÉCTRICOS **160**  
Pablo Romero, Jorge Fiora, Luciana Oddo, Walter Silvero, Cristian Carri, Italo Bove, Salvador Gil

SIMULACIONES CON ANSYS CFD Y ENERGYPLUS DE UN CULTIVO DE TOMATE EN UN INVERNADERO DE LA CIUDAD DE LA PLATA **169**  
Natalia Muñoz, Pablo Demetrio, Santiago Aguilar, Erica Sánchez

### **6. TECNOLOGÍAS ASOCIADAS A LAS ENERGÍAS RENOVABLES**

R161 Y R134A: COMPARACIÓN DE 2 FLUIDOS REFRIGERANTES DESDE EL PUNTO DE VISTA TERMODINÁMICO, TÉCNICO, AMBIENTAL TECNOLOGÍAS PARA GENERACIÓN UNDIMOTRIZ: ACTUALIDAD Y DESAFÍOS **179**  
Pablo Martina, Raquel Aeberhard, M Laura Canteros y Franco Milich

DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN GENERADOR TERMOELÉCTRICO CON EVAPORADOR CERÁMICO PARA POTENCIALES APLICACIONES EN COMUNIDADES AISLADAS **188**  
Pérez Sardi Lucio, Boccaccini Luis y Martín Juan P.

ENVEJECIMIENTO Y ENERGÍA SOLAR EN LA PUNA **200**  
Cadena Carlos y Acosta Delicia

DESARROLLO Y CALIBRACIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA LA MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL AGUA **213**  
Costilla Lucas R. A., Domínguez Dante O., Vilste María S., Curkovic Gustavo J. y Martínez Carlos C.

ESTUDIO COMPARATIVO DE PROGRAMAS DE PIV PARA EL ANÁLISIS DE CONVECCIÓN NATURAL EN UNA CAVIDAD RECTANGULAR CALENTADA LATERALMENTE **224**  
Sosa Matías, Vilte María, Dominguez Dante y Martínez Carlos

## **7. RADIACIÓN SOLAR Y CLIMA**

ANÁLISIS DE RADIACIÓN SOLAR DIFUSA MEDIDA USANDO BANDA SOMBREADORA. CASO DE ESTUDIO: CIUDAD DE SALTA **236**  
C. López Ruiz, G. Salazar, R. Ledesma, J. Galdiño

ANALISIS DE LA CALIDAD DE MEDICIONES DE IRRADIANCIA SOLAR EN PLANO HORIZONTAL (GHI) Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS MODELOS DE GHI EN CONDICIONES DE CIELO CLARO PARA DOS SITIOS EN LA PROVINCIA DE SALTA **249**  
N.Rivera Lera, G. Salazar, A. Laguarda

## **8. ENERGÍAS RENOVABLES Y SOCIEDAD**

UNA MIRADA SOCIOTÉCNICA AL PERMER EN LA QUEBRADA DE LAS CONCHAS (SALTA, ARGENTINA, 2023) **261**  
Genaro Vilte , Sofía Govetto , Facundo Pérez Machado , Carlos Cadena , Emiliano Villagra Yurovich y Facundo González



## **CAPACIDAD AISLANTE TÉRMICA DE NUEVOS PRODUCTOS CEMENTICIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN BASADOS EN RESIDUOS: DESAFÍOS EXPERIMENTALES**

**Yajnes, Marta <sup>(1)(2)</sup>; Becerra Araneda, Abraham <sup>(1)(2)</sup>; Busnelli, Roberto <sup>(1)(2)</sup>; Niemetschek, Sebastián <sup>(1)</sup>; Aranda, Yanina <sup>(1)</sup>; Mateo, Federico <sup>(3,4)</sup>; Cervera, Cristina <sup>(3)</sup>; Abalone, Rita <sup>(3,4)</sup>**

(1) Universidad de Buenos Aires; Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo; Centro Experimental de la Producción.

(2) Universidad Nacional de San Martín; Escuela de Hábitat y Sostenibilidad; Instituto de Arquitectura y Urbanismo; Matlab.

(3) Fac. de Cs. Exactas Ingeniería y Agrimensura (UNR) Rosario. Argentina

(4) Instituto de Física Rosario (IFIR/CONICET-UNR) Rosario. Argentina

**RESUMEN:** Este trabajo interdisciplinario estudia la conductividad térmica de nuevos productos y sistemas cementicios para la construcción basados en residuos de diferente origen, tipo y forma. Estos residuos provienen de los sectores de demolición, textil y plástico. Estos productos fueron desarrollados y fabricados en dos centros de investigación y testeados en un laboratorio de un tercer centro. Primero, se estimaron conductividades térmicas utilizando datos reportados en la norma IRAM 11601:2002 y mediciones experimentales previas a productos similares a los estudiados en este trabajo. Luego, se aprovecharon estas estimaciones para enriquecer la discusión sobre la conductividad térmica medida experimentalmente de los dos productos estudiados. Este procedimiento fue útil para el diseño preliminar de las dosificaciones de los productos estudiados. Las materialidades de ambos productos son diversas y no tradicionales porque combinan residuos de diferente origen que han sido poco estudiados cuando se mezclan. Además, este procedimiento ayudó a abordar desafíos experimentales encontrados cuando se ensayan materialidades no tradicionales con procedimientos pensados para productos tradicionales. Por ende, el mismo ayudó a adaptar productos no tradicionales a lo tradicional, a fin de respetar lineamientos y así alcanzar conclusiones que habilitan la continuidad de este trabajo interdisciplinario y colaborativo. Se destaca la vinculación entre diferentes universidades y la colaboración de equipamiento, creatividad y conocimientos que potencia las capacidades de los centros de investigación.

**Palabras clave:** ensayos experimentales, residuos, conductividad térmica, nuevos productos, cemento.

### **INTRODUCCIÓN**

Este trabajo corresponde a una presentación conjunta desde tres universidades públicas donde se combinan sus potencialidades y equipamiento disponible desde el desarrollo y fabricación de nuevos productos hasta la caracterización en laboratorio de la capacidad aislante térmica de estos productos con potencial para aplicarse en envolventes edilicias. El leitmotiv del presente trabajo trata sobre cómo la colaboración entre diferentes instituciones y saberes pueden aportar para sobrepasar los desafíos técnicos encontrados durante la caracterización de componentes constructivos no tradicionales de las envolventes edilicias. De esta forma se diversifican y fortalecen las opciones de materiales y productos nuevos no tradicionales, especialmente aquellos que incorporan residuos y que cumplen con objetivos simultáneos de mejorar las envolventes aportando confort, permitir la reducción de consumo de energía

para ello y reducir el envío de residuos a destino final de vertederos y rellenos sanitarios. La respuesta de los productos no tradicionales es compleja y difícil de anticipar porque carecen de literatura que aborde sus comportamientos y porque ciertos métodos pensados para productos y materialidades tradicionales poseen dificultades para estudiar estas nuevas materialidades y productos. Dentro de esta complejidad, se optó por un material cementicio para proteger las materialidades que provienen de residuos. Es conocido el rol protector frente al fuego que le otorga el cemento a las mezclas, como se aprecia en los resultados de ensayos de densidad óptica de humos y propagación de llama de productos cementicios basados en residuos textiles y plásticos como el EPS. Yajnes et al (2022). Yajnes et al (2021).

## **OBJETIVOS**

### ***General***

Abordar los desafíos metodológicos que surgen con la medición de la conductividad térmica de productos y sistemas cementicios basados en múltiples residuos no tradicionales para envoltentes en construcción.

### ***Específicos***

1. Estudiar la conductividad térmica de dos nuevos productos cementicios para la construcción basados en una selección de residuos sólidos urbanos RSU (EPS por su potencial de aporte a la aislación térmica), residuos de construcción y demolición RCD (cascotes de mampostería por el volumen de residuos generados en el área de trabajo) y en residuos industriales textiles RINES (por no tener un circuito potente de reinserción productiva y potencial para aislación térmica y acondicionamiento acústico de expertice de una de las autoras del trabajo a partir de su tesis de maestría en Gestión Ambiental Metropolitana UBA), que fueron desarrollados en dos centros de investigación UBA UNSAM.
2. Evaluar la eficacia para estimar la conductividad térmica de estos productos compuestos correlacionando mediciones experimentales y estimaciones de la conductividad térmica.

## **METODOLOGÍA**

### ***Productos estudiados***

Los productos estudiados en este trabajo son pensados, desarrollados y elaborados en dos centros de investigación de universidades públicas del Área Metropolitana de Buenos Aires. Ambos productos combinan la experticia de arquitectos, ingenieros, diseñadores y estudiantes pasantes de ambas instituciones académicas. Estos productos reinseren en la cadena productiva RCD residuos de construcción y demolición (cascotes de mampostería), RSU sólidos urbanos (EPS de embalajes y restos de obra) y RINES industriales no especiales (textiles). Un producto corresponde a la placa TEXACEM®, una placa cementicia que incluye residuos textiles de fibras acrílicas provenientes de residuos de la tejeduría plana denominados orillo y falso orillo, residuos que se generan por el propio proceso productivo y no es posible reducirlos. Las placas se fabrican en dos medidas (aunque puede hacerse on demand): 40 cm x 60 cm x 3,2 cm y 33 cm x 57 cm x 3,2 cm, según el sistema constructivo en que se apliquen y si su función sea para aislación térmica o acondicionamiento acústico. La idea de la placa surgió de la tesis final de una maestría en gestión ambiental de UBA cursada por una de las autoras de este trabajo y se desarrolló en los dos centros de investigación referidos.

El otro producto corresponde al Sistema LADRILLÓN, se trata de un bloque cementicio de 39 cm x 19 cm x 11 cm, para uso en muros no portantes debido a su resistencia a la compresión promedio de 4 MPa, medida en los laboratorios de hormigón de INTI. Este bloque se compone por tres capas: dos capas superficiales de 1 cm de espesor de mortero de cemento, a la cara destinada al exterior se le incluye colorante en la mezcla, con dosificación 1:3; y una capa interna denominada alma, compuesta por cemento como aglomerante, y arena, cascotes y EPS como agregados finos y gruesos. La dosificación

del alma es de 1:1:1:3,75 (cemento, arena, cascote de mampostería, EPS), medidos en peso para todos los componentes excepto el EPS que se mide en litros, por su liviandad no sería fidedigno incluir por peso, por kilo de cemento. La proporción de agua es aproximadamente del 50% del peso del cemento si la arena tiene poca o nula humedad, de lo contrario se reduce. Este bloque es un desarrollo de unos de los centros (UBA). Un dato significativo de este sistema es que con la sola adición de una placa de roca yeso estándar de 12,5 mm pegada alcanzó una resistencia al fuego de FR120 ensayado en el horno certificado del INTI, dato que suma al valor intrínseco del producto analizado.

## Conductividad térmica de los productos estudiados

### Según cálculos predictivos

Previo a los ensayos experimentales, se estimó la conductividad térmica de los productos y de sus partes constituyentes utilizando una correlación entre el tipo de material y la densidad aparente. La correlación se hizo comparando a los valores de conductividad térmica aportados por la norma IRAM 11601:2002 (para hormigones con EPS virgen y otros aislantes). Se sugirió esta correlación debido al buen ajuste entre los valores de conductividad térmica de esta norma IRAM y las mediciones experimentales previas reportadas en Mercader-Moyano, P et al. (2016 y 2017) y Yajnes, M et al. (2022). Se construyó una curva “tipo de material” frente a “densidad aparente” utilizando los datos aportados por la norma IRAM 11601:2002 (ver Fig. 1). En esta curva se incluyeron los valores de conductividad térmica previamente medidos para morteros con EPS reciclado y triturado del Sistema LADRILLÓN (ver línea verde en Fig. 1) Tales probetas tuvieron densidades de 632 y 710 kg/m<sup>3</sup> para dosificaciones de 1:5 y 1:7 (cemento: EPS triturado), respectivamente. La pieza de menor densidad tuvo una conductividad térmica de 0,17 W/(m.K) y la otra, 0,18 W/(m.K). Estos resultados se ajustaron a las conductividades térmicas de hormigones con EPS virgen para tales densidades (ver línea azul y verde, Fig. 1). Esto sugiere que la conductividad térmica de un producto cementicio con EPS depende más de su densidad aparente que del origen y forma (virgen esférica frente a reciclado triturado) del EPS.

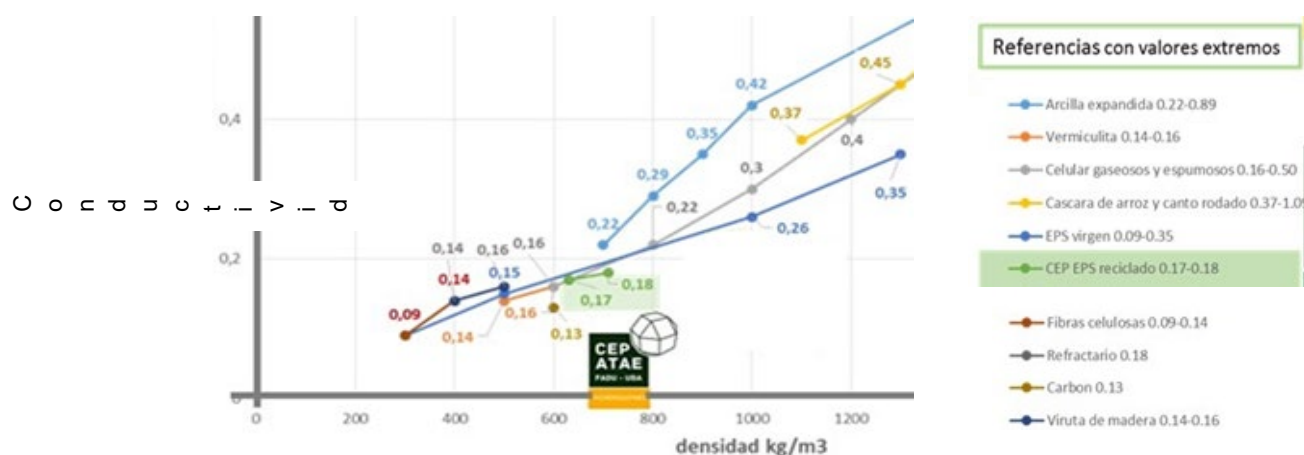


Figura 1 : Gráfica comparativa de valores de conductividad térmica según Norma Iram 11601:2002 y valores obtenidos en laboratorio del INTI, desarrollo de los arquitectos Yajnes y Tartaglia. Fuente: autoría propia.

Utilizando la correlación anterior, se estimó que el alma del Sistema LADRILLÓN constituida por hormigón con EPS reciclado, arena y cascotes de mampostería con una densidad aparente cercana a 1000 kg/m<sup>3</sup> tendría una conductividad térmica de 0,26 W/(m.K), ver Fig. 2. El contenido de cascote en esta alma es minoritario comparado al de EPS reciclado.

| Material                            | Densidad aparente<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Conductividad térmica<br>(W/m·K) |
|-------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|
| Hormigón con poliestireno expandido | 300                                       | 0,09                             |
|                                     | 500                                       | 0,15                             |
|                                     | 1000                                      | 0,26                             |
|                                     | 1300                                      | 0,35                             |

Figura 2: Extracto de la Norma IRAM 11601 para Hormigones con poliestireno expandido.

La Fig. 3 resume los valores de la conductividad térmica y la resistencia térmica global del Sistema LADRILLÓN tricapa y de cada una de sus capas. Los valores para las capas interna y externa fueron medidos experimentalmente previamente. En cambio, para el alma de hormigón con EPS y cascotes se utilizó el valor extraído de la Fig 2. Para estudiar el efecto de la humedad, los cálculos se realizaron con dos variantes de humedad de los morteros (6 y 10%). Se observa que tanto la conductividad térmica como la resistencia térmica varían un 0,55% cuando cambia la humedad.

|                                            | densidad<br>aparente | espesor | conductividad<br>térmica | resistencia        |
|--------------------------------------------|----------------------|---------|--------------------------|--------------------|
| detalle de cada capa                       | kg/m <sup>3</sup>    | mts     | W(m.K)                   | m <sup>2</sup> K/W |
| mortero interior MC 1:3 humedad 6%         | 2000                 | 0,01    | 1,13                     | 0,009              |
| supuesto hormigon EPS y cascote 1:1:1:3,75 | 1000                 | 0,09    | 0,26                     | 0,346              |
| mortero exterior MC 1:3 humedad 6%         | 2000                 | 0,01    | 1,13                     | 0,009              |
|                                            |                      |         | total                    | 0,364              |
|                                            |                      |         |                          |                    |
|                                            | densidad<br>aparente | espesor | conductividad<br>térmica | resistencia        |
| detalle de cada capa                       | kg/m <sup>3</sup>    | mts     | W(m.K)                   | m <sup>2</sup> K/W |
| mortero interior MC 1:3 humedad 10%        | 2100                 | 0,01    | 1,3                      | 0,008              |
| supuesto hormigon EPS y cascote 1:1:1:3,75 | 1000                 | 0,09    | 0,26                     | 0,346              |
| mortero exterior MC 1:3 humedad 10%        | 2100                 | 0,01    | 1,3                      | 0,008              |
|                                            |                      |         | total                    | 0,362              |
|                                            |                      |         |                          |                    |
| promedio esperado                          |                      | 0,11    | 0,304                    | 0,362              |

Figura 3: Cálculo de Resistencia térmica analítica del Sistema LADRILLON, para dos valores de humedad en morteros. Fuente: Autoría propia.

### Según medición experimental

La medición experimental de las propiedades térmicas de los dos productos de construcción abordados en este trabajo se realizaron en un laboratorio de una universidad pública de una provincia vecina que citamos en adelante como Laboratorio A, usando un equipo medidor de flujo de calor Fox LaserComp (FOX 801) diseñado según las normas ASTM C518 e ISO 8301 que emplean métodos de estado estacionario (rango de conductividad térmica: 0,001 - 0,35 W/mK). Incluye transductores de flujo de calor de capa fina patentados, mediciones digitales de espesor y control de la temperatura con respuesta. El instrumento está calibrado de fábrica por Laser Comp, Inc. utilizando 1450b NIST SRM (Standard Reference Material of the National Institute of Standards and Technology) y una muestra de EPS (poliestireno expandido) de alta precisión probado y certificado por NIST (ASTM C1132, 1995).

Las probetas (dimensiones máximas: 76,2 cm x 76,2 cm x 30,4 cm), se colocan entre las dos placas en la cámara de ensayo. La placa superior es móvil y se ajusta, automática o manualmente al espesor de la



muestra, que se mide in situ (dimensiones del área de medición: 25,4 cm x 25,4 cm). Se fija una diferencia de temperatura entre ambos lados de la muestra controlando las temperaturas de las placas planas (rango de temperatura: -10°C - 65°C).

Para el ensayo de la placa TEXACEM® se fabricó una pieza de 70 cm x 70 cm x 5 cm, prestando especial atención a lograr una superficie plana por requerimiento del equipo de medición. Esta pieza consumió 7,20 kilos de cemento, 1,80 kilos de residuos textiles (50/50% entre orillo y falso orillo cortados como usualmente se emplean en tiras de 7 a 7,5 cm de largo en un ancho estándar sin modificar) y 12,60 litros de agua. Para el primer enrasado del producto, se emplearon 0,400 kg de cemento, 0,100 kg de textiles y 0,70 litros de agua. En este caso los textiles se cortaron en pequeños trozos de 1 cm máximo de largo.

La muestra de placa TEXACEM® se fabricó el día 4 de mayo de 2024 con un primer enrasado y posteriormente el día 11 de mayo se procedió al segundo enrasado, Fig. 4. Para el segundo enrasado se emplearon 0,500 kg de cemento, 0,125 kg de textiles y 0,875 litros de agua, con los mismos cortes que el primer enrasado. En este caso se incorporaron 200 gramos de ferrite color negro. Luego, se pesó el módulo con fechas 22 y 29 de mayo y 5 y 12 de junio hasta llegar a un peso estabilizado de 12,25 Kg y una densidad de 450 kg/m<sup>3</sup>.



*Figura 4: Placa recién desmoldada, detalle desnivel y enrasados con masilla y final con masilla de placas de roca yeso y masilla. Fuente: Autoría propia.*

Durante el mes de julio de 2024 se realizaron 3 ensayos con 5 repeticiones por ensayo en el laboratorio A. Se fijaron las temperaturas de la placa fría en 10°C y la placa caliente en 35°C. En la Tabla 1 se presentan los resultados de las mediciones obtenidas.

*Tabla 1. Resultados ensayo placa TEXACEM®*

| Ensayo | $\lambda$ (W/mK) | Espesor Medido (mm) | R (m <sup>2</sup> C/W) | K (W/m <sup>2</sup> C) |
|--------|------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| E1     | 0,1584           | 51,00               | 0,3219                 | 3,0158                 |
| E2     | 0,1582           | 50.98               | 0,3222                 | 3,1031                 |
| E3     | 0,1582           | 51.05               | 0,3226                 | 3,0989                 |

Para el ensayo de conductividad térmica del Sistema LADRILLÓN, se preparó un módulo especial de 60 cm x 60 cm x 11 cm, respetando las capas del Sistema, ver Fig 5.



*Figura 5: Placa Sistema LADRILLÓN en el equipo de medición en laboratorio A. Fuente: Autoría propia.*

Durante el mes de julio de 2024 se realizaron 3 ensayos con 5 repeticiones por ensayo en el laboratorio A. Se fijaron las temperaturas de la placa fría en 10°C y la placa caliente en 35°C. En la Tabla 2 se presentan los resultados de las mediciones obtenidas.

*Tabla 2. Resultados ensayo placa Sistema LADRILLÓN*

| Ensayo | $\lambda$ (W/mK) | Espesor Medido (mm) | R (m <sup>2</sup> C/W) | K (W/m <sup>2</sup> C) |
|--------|------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| E1     | 0,4174           | 117,86              | 0,2823                 | 3,5414                 |
| E2     | 0,4174           | 117,86              | 0,2823                 | 3,5414                 |
| E3     | 0,4175           | 117,86              | 0,2823                 | 3,5423                 |

### ***Comparación de mediciones experimentales***

Las mediciones experimentales realizadas en el laboratorio A, se compararon con mediciones de la conductividad térmica realizadas en los laboratorios de INTI. Estos ensayos siguieron el método de ensayo de las propiedades de la transmisión del calor en régimen estacionario mediante el medidor de Gradiente Térmico, de acuerdo a los lineamientos establecidos en las Normas: ISO 8301:2010 (Thermal insulation. Determination of steady-state thermal resistance and related properties. Heat flow meter apparatus); ASTM C518:2017 (Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and

Thermal Transmission Properties by means of the Heat Flow Meter Apparatus); IRAM 1860:2002:2002 (Materiales aislantes térmicos. Método de ensayo de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario, mediante el aparato de medición del flujo de calor). La temperatura media durante el ensayo fue 20 °C y se midió sobre una placa de 30 cm x 30 cm x 5 cm, es decir, una superficie de 0,09 m<sup>2</sup>.

Para los ensayos en INTI, se realizó un acondicionamiento higrotérmico de las placas ensayadas. Al inicio, se determinó el peso (M1) de la probeta en condiciones de recepción. Luego, se inició el proceso de secado a una temperatura de 60°C ±5°C, hasta que se verifique la constancia en la masa, que ocurrió luego de 144 horas. Seguidamente se introdujo la muestra en el equipo de medición.

Se ensayaron muestras planas en ambos laboratorios para luego comparar los resultados finales. Para la muestra TEXACEM®, el requerimiento de planitud se alcanzó incorporando un enrasado final con masilla para placas de roca yeso. Es decir, se tuvo que añadir una capa de material ajena al producto a fin de cumplir esta solicitud experimental. Para la muestra del Sistema LADRILLÓN, el requerimiento de planitud se alcanzó pasando inicialmente un disco flap con amoladora para nivelar la superficie externa, Fig 6, y luego tapando los poros con masilla para placas de roca yeso con ferrite. Este procedimiento especial que finalizó 15 días después de la fabricación de la muestra fue necesario debido a la presencia de algunas protuberancias debido al agregado grueso EPS triturado.



Figura 6: Placa recién desmoldada y detalle flapeo de grumos y enrasado final con masilla. Fuente: Autoría propia.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Sistema LADRILLÓN

Luego de 15 ensayos a muestras del Sistema LADRILLÓN en el laboratorio A, se midió una conductividad térmica promedio de 0,4174 W/m.K y una resistencia térmica promedio de 0,2823 m<sup>2</sup>.K/W. Con estos datos, se realizó el siguiente desglose conociendo los valores de conductividad térmica que le corresponden a las capas superficiales del sistema con una humedad de 10%, y ajustando los espesores nominales de las muestras. Para obtener el valor de conductividad térmica sólo del alma de hormigón de EPS y cascotes de la muestra de este sistema, al valor obtenido de la resistencia térmica total de la muestra (0,2823 m<sup>2</sup>.K/W) se le restó el valor conocido de la resistencia térmica de las capas superficiales. Se estimó así que la conductividad de la capa de hormigón con EPS y cascote alcanza un valor de 0,35 W/m.K, ver Fig. 7.

|                                     | densidad aparente | espesor | conductividad termica | resistencia |
|-------------------------------------|-------------------|---------|-----------------------|-------------|
| detalle de cada capa                | kg/m3             | mts     | W(m.K)                | m2K/W       |
| mortero interior MC 1:3 humedad 10% | 2100              | 0,013   | 1,3                   | 0,010       |
| hormigon EPS y cascotes 1:1:1:3,75  | 1000              | 0,092   | <b>0,35</b>           | 0,263       |
| mortero exterior MC 1:3 humedad 10% | 2100              | 0,013   | 1,3                   | 0,010       |
|                                     |                   |         | total                 | 0,283       |
|                                     |                   |         |                       |             |
| Resultado obtenido                  |                   | 0,118   | 0,417                 | 0,283       |

*Figura 7: Cálculo de conductividad para el hormigón de EPS y cascote a partir del resultado de resistencia obtenida por el Sistema LADRILLÓN en el Laboratorio A. Fuente: Autoría propia.*

Ubicando el resultado obtenido de la conductividad térmica de 0,35 W(m.K) para el alma del Sistema LADRILLÓN en las tablas de la norma IRAM 11601:2002, se observa que se ubica entre los valores para densidad de 1000 kg/m3 tanto del hormigón de EPS 0,26 W(m.K) (ver Fig 2) y del hormigón de arcilla expandida 0,42 W(m.K). Este resultado es coherente con la composición del cascote de mamposterías de 0,34 W(m.K). No se consideraron los valores de hormigones ladrillo triturado, que podrían tener más afinidad material con el residuo incorporado, porque la normativa solo hace referencia a densidades más altas. Ver Fig. 8.

|                                           |             |             |
|-------------------------------------------|-------------|-------------|
| Hormigón de ladrillo triturado            | 1600        | 0,76        |
|                                           | 1800        | 0,93        |
| Hormigón normal con escoria de alto horno | 2200 a 2400 | 1,40        |
| Hormigón de arcilla expandida             | 700         | 0,22        |
|                                           | 800         | 0,29        |
|                                           | 900         | 0,35        |
|                                           | 1000        | <b>0,42</b> |
|                                           | 1400        | 0,57        |
|                                           | 1600        | 0,89        |

*Figura 8: Extracto de la Norma IRAM 11601:2002 para Hormigones de arcilla expandida*

Resumiendo, los resultados obtenidos se refleja ambos casos de diferente forma:

Sistema LADRILLON: se aprecia que el hormigón desarrollado en base a la incorporación de EPS y cascotes, ambos provenientes de recuperación de RSU y RCD, alcanzan un valor de conductividad promedio de los valores de Normas IRAM 11601:2002 para hormigones de EPS y de arcilla expandida para iguales densidades de 1000 kg/m3.

### **Placa TEXACEM®**

La Fig. 10 muestra que la placa TEXACEM® alcanzó una densidad de 699 kg/m3 cuando se añadió la capa niveladora en su superficie. La conductividad térmica medida en el laboratorio de INTI fue 0,106 W/(m.K) y en el Laboratorio A fue 0,1582 W/(m.K). El valor medido en INTI fue muy cercano al valor de conductividad térmica de un tablero de partículas aglomeradas en general (ver Fig. 11). Esto demuestra que la correlación entre densidad y conductividad térmica observada para el Sistema LADRILLÓN cementicio con EPS con otros productos similares (ver Figs. 1 y 2) también se observa para estas placas donde el material dominante es el residuo textil. Por lo tanto, el cálculo predictivo de la conductividad térmica utilizando la tabla de tableros de partículas aglomeradas en general de la Norma

IRAM 11601:2002 (Fig.11) fue una buena aproximación de esta propiedad. Esto vuelve a esta tabla útil para el diseño preliminar de dosificaciones de productos que incluyan residuos textiles con cemento como la placa TEXACEM®.

La diferencia de la conductividad térmica medida entre los laboratorios podría deberse a dos factores:

- El diferente proceso de acondicionamiento de la muestra nivelada antes de su posicionamiento dentro del equipo de medición.
- La presencia de masilla para placas de yeso en la capa niveladora también podría ampliar esta diferencia debido a la alta retención de humedad del material.

La nivelación de las muestras fue necesaria debido a la rugosidad y poca planitud de muestras que incorporan materias no tradicionales (residuos textiles y de EPS). Tal característica de superficie que es intrínseca de materialidades residuales con geometrías y tamaños diversos se vuelve una complicación cuando se utilizan ensayos y equipamiento pensado para estudiar materialidades tradicionales homogéneas basadas en cemento.

| Identificación del Laboratorio | Masa de la Probeta |                | Cambio Relativo de Masa de la Probeta |
|--------------------------------|--------------------|----------------|---------------------------------------|
|                                | M <sub>1</sub>     | M <sub>2</sub> |                                       |
| C - 24001 - 21                 | 3,87kg             | 3,50kg         | 10,57%                                |

Ensayo de Conductividad térmica.

| Material:                               |                         | Mortero alivianado con agregados de fibras textiles |
|-----------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------|
| Identificación del usuario              |                         | Placa Htex1                                         |
| Identificación del laboratorio          |                         | CT-24001-21                                         |
| Espesor promedio de la muestra          |                         | 0,054 m                                             |
| Densidad aparente de la muestra         |                         | 699,0 kg/m <sup>3</sup>                             |
| Temperatura media a ensayar 20°C        |                         |                                                     |
| Caudal térmico                          |                         | 47,0 W/m <sup>2</sup>                               |
| Temperatura                             | Placa Caliente          | 31,8 °C                                             |
|                                         | Placa Fría              | 7,9 °C                                              |
|                                         | Diferencia entre placas | 23,9 °C                                             |
|                                         | Media de ensayo         | 19,9 °C                                             |
| Conductividad térmica de la muestra (λ) |                         | 0,106 W/(m.K)                                       |

Figura 10: Resumen de resultados obtenidos en los laboratorios de INTI para la muestra TEXACEM®.

| Material                                      | Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> ) | Conductividad térmica (W/m.K) |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|
| Tableros de partículas aglomeradas en general | 200                                    | 0,060                         |
|                                               | 300                                    | 0,069                         |
|                                               | 400                                    | 0,078                         |
|                                               | 500                                    | 0,087                         |
|                                               | 600                                    | 0,090                         |
|                                               | 700                                    | 0,11                          |
|                                               | 800                                    | 0,13                          |
|                                               | 900                                    | 0,15                          |
|                                               | 1000                                   | 0,17                          |

Figura 11: Extracto de la Norma IRAM 11601:2002 para tableros de partículas aglomeradas en general.

Sin la capa niveladora, la placa TEXACEM® tuvo una densidad aproximada de 450 kg/m<sup>3</sup>. Para esa densidad, la conductividad térmica de la placa TEXACEM® en función de su materialidad y tipología (asociada a tableros de partículas aglomeradas) podría ser cercana a 0,082 W(m.K), según el valor reportado por la Norma IRAM 11.601:2002 para este tipo de producto con tal densidad, ver Fig. 11.

## CONCLUSIONES

Se estudió una metodología para estimar la conductividad térmica de un nuevo producto cementicio para construcción correlacionando su densidad con las curvas densidad-conductividad térmica de la Norma IRAM 11601:2002. Esta metodología que tiene en cuenta la tipología del producto fue útil para el diseño preliminar de dosificaciones para productos no tradicionales que incluyan residuos.

La medición de la conductividad térmica de estos productos no tradicionales requirió un proceso de adaptación porque los procedimientos y estándares disponibles están pensados para productos tradicionales que cuentan con una experiencia acumulada de uso y estudio.

Esta adaptación requirió añadir materialidades exógenas al producto no tradicional para respetar los requerimientos de superficie de los equipos de medición. Los potenciales impactos de estas materialidades en la conductividad térmica del producto no tradicional serán evaluados en futuros trabajos gracias a la vinculación entre los centros de investigación que hicieron posible este trabajo.

Las condiciones que se requieren de las muestras a partir de las limitaciones / características de las máquinas no implican de forma alguna que no se puedan diseñar y por consecuencia ensayar materiales que tengan caras no planas, ya que la característica de un producto responde a múltiples causas y el desafío de la investigación es conocer los valores de respuesta térmica para el producto diseñado.

La vinculación entre diferentes universidades, se sostiene que es un antecedente muy valioso avanzar más allá de la participación en jornadas y eventos, el poder compartir equipamiento, creatividad y conocimientos potenciando las capacidades de las diferentes casas de estudio. Es importante desafiar los obstáculos que implican la distancia, el uso de diferentes materiales y dispositivos para ensayos.

Como aporte final sostenemos que este trabajo indaga sobre un aspecto que consideramos relevante: la producción de alternativas a los materiales térmicos petróleo dependientes. Para ello se procura utilizar materiales tradicionales de fácil arraigo en la construcción y disponibles en el mercado independientemente del lugar de trabajo como el cemento. En especial en el caso del Sistema Ladrillon de muros no portantes se busca un equilibrio entre una buena respuesta del conjunto a las solicitaciones de compresión requerida por Normas Iram de 3 Mpa. para bloques de hormigón no portante – se alcanzó un valor de 4 Mpa - con un aporte a la aislación térmica del conjunto que estará principalmente cubierta por un material propiamente aislante.

## FUENTE DE FINANCIACION y ROL DE CADA UNIVERSIDAD

Desarrollo de productos con ensayos en laboratorio INTI: Proyecto de investigación UBACYT 20020190100089BA Yajnes, financiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica UBA.

Espacios de trabajo y sostén de los RRHH intervinientes: Las tres Universidades intervinientes. UBA UNSAM y UNR.

Equipamiento de medición y sus RRHH de Laboratorio A: Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación y Dirección Provincial de Gestión para el Desarrollo y la propia Universidad en donde se encuentra el equipo: Universidad Nacional de Rosario, Fac. de Cs. Exactas Ingeniería y Agrimensura e Instituto de Física Rosario (IFIR/CONICET-UNR)



## AGRADECIMIENTOS

A las fuentes de financiación mencionadas y a los pasantes, alumnos y voluntarios de investigación que hacen posibles los desarrollos universitarios, así como las industrias que aportan sus residuos.

## REFERENCIAS

- IRAM 11601 (2002), Aislamiento térmico de edificios Métodos de cálculo Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario
- ISO 10456 (2007), Building materials and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values
- Mercader-Moyano, P., Yajnes, M. E., & Caruso, S. I. (2016). Experimental characterisation of a cement-based compound with recycled aggregates and EPS from rehabilitation work. *Revista de la Construcción. Journal of Construction*, 15(3), 97-106.
- Mercader-Moyano, P., Requena García-de-la-Cruz, M. V., & Yajnes, M. E. (2017). Development of new eco-efficient cement-based construction materials and recycled fine aggregates and Eps from Cdw. *The Open Construction & Building Technology Journal*, 11(1).
- Yajnes, M; Becerra, A; Berardino, M; Bruzzo, A; Caruso, S; B; Busnelli, R; Aranda, Y. (2022) XXXVI Jornadas de Investigación y XVIII Encuentro Regional de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, SI + Categorías. Paper. “Caracterización como herramienta educativa y promotora de desarrollo sostenible: ensayos de anticipación”.
- Yajnes, M; Caruso, S; Busnelli, R, Tosi, L, Becerra, A; Coviello A, (2021) Rehabilitación y ampliación sostenible de edificios a partir de la gestión de residuos de construcción y demolición, industriales textiles y biomateriales. Caso merendero "Los amigos", CICSE FADU UBA ETSA US.

## THERMAL INSULATION CAPACITY OF NEW CEMENT PRODUCTS FOR CONSTRUCTION BASED ON WASTE: EXPERIMENTAL CHALLENGES

### ABSTRACT

This interdisciplinary work studies the thermal conductivity of new cementitious building products and systems based on wastes of different origin, type and form. These wastes come from the demolition, textile and plastic sectors. These products were developed and manufactured in two research centers and tested in a laboratory of a third center. First, thermal conductivities were estimated using data reported in IRAM 11601:2002 and previous experimental measurements of products similar to those studied in this work. Then, these estimates were used to enrich the discussion on the experimentally measured thermal conductivity of the two products studied. This procedure was useful for the preliminary design of the dosages of the products studied. The materialities of both products are diverse and non-traditional because they combine residues of different origin that have been little studied when mixed. In addition, this procedure helped to address experimental challenges encountered when testing non-traditional materialities with procedures intended for traditional products. Therefore, it helped to adapt the non-traditional to the traditional, in order to respect guidelines and thus reach conclusions that enable the continuity of this interdisciplinary and collaborative work. The linkage between different universities and the collaboration of equipment, creativity and knowledge that enhances the capabilities of the research centers are highlighted.

**KEY WORDS:** experimental tests, waste, thermal conductivity, new products, cement.

## **¿CAMBIOS EN LA ZONA DE CONFORT TÉRMICO? ESTUDIO DE CAMPO DE CONFORT TÉRMICO Y CALIDAD DEL AIRE EN ESCUELAS PÚBLICAS DE MONTEVIDEO**

**María Noel López<sup>1</sup>, Magdalena Camacho<sup>1</sup>, Lucía Gutierrez<sup>1</sup>, Lucía Pereira<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Área de Clima y Confort - Departamento de Ambiente Construido – Instituto de Tecnologías – Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo (FADU) – Universidad de la República (UdelaR)  
Tel (+598) 24085799 e-mail: marialop@fadu.edu.uy

**RESUMEN:** Los seres humanos actuales, pasamos muchas horas del día en ambientes cerrados, por esto es que el confort térmico y la calidad del aire interior tienen implicancias para la salud y el desempeño de las personas. Se estima que una persona pasa el orden del 90% de su vida en un ambiente cerrado, lo que ha quedado fuertemente evidenciado en la pandemia por COVID-19, mostrando su relevancia en los espacios cerrados como salones de clase. El estudio busca evaluar el confort higrotérmico y la calidad del aire en las escuelas. La metodología empleada fue de auditoría ambiental, organizada en dos componentes: (i) objetivo, (mediciones); y (ii) subjetivo, (encuesta de percepción). Desde marzo de 2023 hasta la actualidad se han medido interiormente: temperatura de bulbo seco, humedad relativa y CO<sub>2</sub> en seis salones de clases de cuatro escuelas públicas en Montevideo, obteniéndose el Porcentaje de Personas en Disconfort (PPD), Voto Medio Previsto (PMV) y Porcentaje de Insatisfechos (PI) y Voto Medio (MV). Se comparan las condiciones neutrales recogidas en las normas ISO7730 y ASHRAE 55 con los índices calculados con 384 encuestas de percepción. Los resultados arrojaron bajo porcentaje de aceptabilidad principalmente debido a la mala calidad de aire.

**Palabras clave:** confort térmico, calidad del aire, escuelas

### **INTRODUCCIÓN**

La arquitectura surge de la necesidad de crear espacios interiores que ofrezcan mejores condiciones que las exteriores para el desarrollo de las actividades humanas. Estudiar el confort térmico y la calidad del aire es fundamental para arquitectos e ingenieros para diseñar espacios ambientalmente adecuados y en equilibrio entre las condiciones externas e internas, ya que impacta directamente en la productividad y satisfacción de los usuarios con el espacio. La calidad del ambiente interior tiene implicancias para la salud de las personas debido al alto porcentaje de horas de vida desarrolladas en ambientes cerrados. Se estima que una persona pasa del orden del 90% de su vida en un ambiente cerrado, ya sea público o privado (Cincinelli y Martellini 2017). En particular, en las escuelas públicas de Uruguay las infancias pasan entre 4 y 7.5 horas diarias. El impacto de la calidad del ambiente interior ha quedado fuertemente evidenciado en la pandemia por COVID-19, mostrando la relevancia de la calidad del aire en los espacios cerrados como salones de clase y oficinas, así como, en particular, la importancia de la ventilación en estos ambientes. Se trata de una temática profundamente interdisciplinar. Este artículo surge de un estudio interdisciplinario sobre calidad del aire interior, involucrando investigadores del área de la salud, microbiología, arquitectura e ingeniería ambiental, mecánica y eléctrica, con el objetivo de desarrollar herramientas de diagnóstico y generar conocimiento sobre la relación entre la salud, la calidad del aire, el confort térmico y la ventilación, contribuyendo al cuidado de las personas.

En este trabajo sólo se presentarán los datos vinculados a confort térmico y calidad del aire. Cabe señalar que a nivel nacional no se cuenta con relevamientos ni análisis previos como los planteados, ni tampoco existen estándares de confort para espacios escolares, aunque existen antecedentes en otras partes del mundo, Gallego Sánchez-Torija et al (2022). Implementar estudios de campo donde se identifiquen los



niveles reales de los parámetros ambientales involucrados, así como comparar los niveles alcanzados con los establecidos por la normativa internacional, es de importancia para poder generar estrategias de diseño que contribuyan a mejorar las condiciones habitables de los edificios existentes y para los futuros proyectos.

El confort térmico es un fenómeno complejo en el que intervienen parámetros interiores y exteriores del ambiente, pero también la percepción que tiene el sujeto de ese ambiente. La satisfacción térmica de una persona con un ambiente interior depende entonces de diversas variables. El confort térmico es definido por la ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017) y la ISO estándar 7730 (ISO, 2005) como el "estado de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico", siendo uno de los factores que incide en esta satisfacción la condición de balance térmico del cuerpo, es decir, cuando realizando cierta actividad (metabolismo y trabajo) no se experimenta una acción adicional para corregir la energía que produce el cuerpo internamente. En confort existen dos enfoques conceptuales y normativos: uno clásico o del modelo analítico y otro adaptativo (ASHRAE, 2017). El modelo analítico surge de estudios de laboratorios de hombres sanos realizando una actividad sedentaria y se basa en una escala para predecir el confort a través del Voto Medio Previsto (PMV, por sus siglas en inglés) y el Porcentaje de Personas Insatisfechas (PPD, por sus siglas en inglés). Las normas ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017) y ISO estándar 7730 (ISO, 2005), a través de este modelo analítico, relacionan el confort térmico de un grupo de individuos con una escala de sensación térmica donde el nivel -3 corresponde a frío y +3 a calor, índice PMV, y se puede relacionar este valor con el PPD, teniendo como valor mínimo un 5%.

Este modelo ha sido puesto en duda debido a su incapacidad para predecir de manera precisa el confort en edificios ventilados naturalmente, como es el caso de las escuelas públicas de Montevideo. Desde hace algunos años, varios estudios internacionales con enfoque en confort adaptativo (Wagner et al., 2007; de Dear y Brager, 1998) muestran además que el voto subjetivo de los ocupantes en edificios enfriados a través ventilación natural o pasiva no se corresponde con una temperatura interior límite. Sin embargo, se demuestra que existe dependencia de la temperatura exterior bajo condiciones transitorias, estableciendo una fuerte dependencia estadística de las neutralidades térmicas ( $T_n$ ) para los niveles medios de temperatura del aire exterior. Dicho de otro modo, la temperatura de confort está fuertemente relacionada con la temperatura exterior media registrada para personas en edificios con acondicionamiento natural. Para el enfoque adaptativo el principio básico dice que: "si ocurre un cambio tal que produce disconfort, las personas reaccionan tendiendo a restablecer su confort" (de Dear y Brager, 1998). Diversos estudios (van Hoof, 2008) han demostrado que al tomar en cuenta ambos enfoques, y no limitar el estudio solo a lo que hacen referencia las normas, trae numerosas ventajas en estudios de campo para analizar la aceptabilidad real de los usuarios, lo que no necesariamente se logra en las temperaturas indicadas por las normas para el modelo analítico.

La zona de confort (zona en donde la mayoría de los ocupantes manifiestan un grado de satisfacción con el ambiente que los rodea) es definida por instituciones nacionales e internacionales que estiman los valores admisibles en las normas. En Uruguay, Picción et al. (2010) proponen para Montevideo una zona de confort térmico adaptativo, en base a estudios de campo en edificios educativos terciarios, que en invierno va de 18 a 24 °C y en verano de 20 a 26 °C. Sin embargo, en ningún caso se estudia la franja etaria de niños entre 4 y 12 años. Otros estudios internacionales que nos anteceden muestran que la sensación térmica de confort que indican los estudiantes en edificios educativos ventilados naturalmente es más elevada que la propuesta por las normas (Liang et al., 2012; Montoya y San Juan, 2018).

En lo que respecta a calidad del aire, las concentraciones de CO<sub>2</sub> son un indicador de cuán probable es estar expuesto a patógenos respiratorios exhalados por otros (Pessacq y Taire, 2024). Según Remion et al. (2019) los métodos basados en la concentración de CO<sub>2</sub> son muy utilizados para evaluar la ventilación natural. Autores como Pessacq y Taire (2024) demuestran cómo en aulas donde se utilizó una ventilación natural continua, los valores de CO<sub>2</sub> se mantuvieron por debajo de los valores límites recomendados o fluctuando alrededor del mismo, y en aulas donde la ventilación natural fue segmentada, durante intervalos cortos de tiempo, se registraron valores muy altos de concentración de CO<sub>2</sub>. El método de evaluación de la calidad del aire por este indicador se ha utilizado en campañas de corta duración o extendidas en el tiempo, destacando las siguientes referencias en estudios en salones de clase: Batterman

et al. (2017), Johnson et al. (2018)), Bartyzel et al. (2020), Hou et al. (2023), Schibuola y Tambani (2020), Mingui  n et al. (2020), Jones et al. (2020).

Los estudios de campo de niveles de confort permiten tener en cuenta la existencia o no del equilibrio térmico entre el cuerpo humano y el ambiente que lo rodea (el espacio de las aulas escolares) y la subjetividad de las personas. Es necesario, entonces, la concreción de un diseño arquitectónico adecuado, que brinde parámetros y factores con los cuales generar soluciones correctas. La importancia de identificar los niveles reales de los parámetros ambientales involucrados y compararlos con los niveles alcanzados respecto de los establecidos por la normativa internacional es poder arribar a conclusiones y recomendaciones que guíen el diseño actual y futuro.

Este artículo surge del proyecto Calidad del Aire Interior, seleccionado en la convocatoria 2022 del programa Núcleos Interdisciplinarios del Espacio Interdisciplinario de la Universidad de la República y que est   conformado por docentes de varias facultades, se inició en marzo 2023 y finalizar   en agosto 2025. El alcance del proyecto va más allá de los resultados presentados en este artículo, los cuales son solo una parte de un esfuerzo mayor.

## OBJETIVOS

Los objetivos de este estudio de campo fueron: 1. Relevar las condiciones de temperatura, humedad y CO<sub>2</sub> mediante mediciones in situ, en distintas aulas de dos edificios educativos bajo las condiciones climáticas de invierno y verano en Montevideo. 2. Evaluar la sensación de los usuarios en relación a estos parámetros, mediante encuestas de percepción de confort y calidad del aire. 3. Analizar la percepción de confort en base al indicador de Voto Medio y Porcentaje de Insatisfechos. 4. Comparar estos resultados con los diferentes enfoques internacionales, en particular el PMV y el PPD.

## METODOLOGÍA

A continuación, se presenta la metodología desarrollada en esta investigación, la cual se llevó a cabo de forma experimental en agosto y diciembre de 2023, en condiciones climáticas de invierno y verano respectivamente, en seis aulas de nivel primaria (niños y niñas entre 6 y 12 años), en la ciudad de Montevideo. Durante el estudio se abordaron tres aspectos: usuario, edificio y clima, mediante una auditoría ambiental. Por una parte, se efectuaron encuestas a los usuarios sobre los aspectos relativos al confort térmico y calidad del aire, tales como temperatura, humedad, movimiento del aire, percepción de olores, y se relevaron las posibilidades de adaptación personal y cambios de conducta y control de dispositivos que tenían los ocupantes. De forma simultánea a las encuestas, se realizaron mediciones in situ de las condiciones de temperatura y humedad del aire exterior e interior, y registro de los niveles de CO<sub>2</sub> interiores. Posteriormente, se contrastaron los resultados de las encuestas de confort con indicadores internacionales. Adicionalmente se estudiaron las características tipológicas de los edificios (características de la envolvente, vinculación y distribución de espacios y patrones de usos de los espacios).

### *Caracterización climática*

Según la clasificación de K  ppen a Uruguay le corresponde la clasificación climática cfa; c por ser templado húmedo; f, debido a que tiene precipitaciones durante todo el año, a, porque la temperatura del mes más cálido es superior a 22  C. Según la norma de Zonificación Climática UNIT 1026:99 (UNIT, 1999) Montevideo se localiza en la latitud -34  50' y pertenece a la zona templada fría. De acuerdo a las normales climatológicas de Uruguay, para Montevideo la temperatura media en el período frío es de 10,5   C, la mínima media es 6,5  C y la máxima media es 14,8  C. En cambio, para el período caluroso la temperatura media es 22,3  C, la mínima media es 17,4  C y la máxima media es 27,5  C. Se debe aclarar que los días en que se efectuaron las tareas de campo, la temperatura estaba por encima de la normal climatológica en el período frío y por debajo de ésta en el caluroso. Los parámetros ambientales exteriores durante las tres semanas anteriores a la realización de encuestas y mediciones interiores en el mes de agosto fueron: temperatura media del aire de 12,79   C, humedad relativa de 76%, y una velocidad promedio de viento de 4.8 m/s según datos medidos y contrastados con el portal de datos de *Weather*

*Underground.* Para el mes de diciembre la temperatura media fue de 20,7°C, la humedad relativa 83% y una velocidad promedio del viento de 4,8m/s según datos medidos y contrastados con el portal de datos de *Weather Underground*.

### ***Descripción de los edificios***

El edificio 1 es el centro educativo que ocupa en la mañana la Escuela N°121 “Dr. Evaristo Ciganda” con alrededor de 200 estudiantes, mientras que en la tarde es la Escuela N°3 “Francia” con 310 estudiantes. Este edificio fue construido en 1934 y ampliado en varias oportunidades, teniendo un total de más de 2200 m<sup>2</sup>, ver Figura 1. Los locales que se analizaron fueron el 6, 9 y 10, seleccionando los mismos en función de las edades de los niños y su posibilidad de respuesta a las encuestas de percepción. El edificio 2, es el centro educativo que ocupa la Escuela N°32 “Simón Bolívar” en el turno de la mañana y la Escuela N°83 “Dr. Martín R. Echegoyen” por la tarde”, fue construida en 1897 y ampliada en varias oportunidades, teniendo un total de más de 2400 m<sup>2</sup>, ver Figura 2. Los locales que se analizaron fueron el 2, 6 y 21. Entre los dos turnos hay más de 800 niños que concurren a estas escuelas. Las escuelas estudiadas tienen en común su materialidad, con un sistema constructivo de pilares y losas de hormigón armado con muros compuestos de ladrillos y ticholos revocados. Las aulas de ambos edificios tienen un diseño de ventilación natural unilateral, aunque en algunos casos se puede abrir a las circulaciones internas. Se efectuó además un relevamiento de las principales características de los locales analizados, ver Tabla 1.



*Figura 1: Planta del edificio 1 e imagen de fachada. Fuente: Elaboración propia*



*Figura 2: Planta del edificio 2 e imagen de fachada. Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 1: Resumen de las características de los locales estudiados en cada edificio. Fuente: Elaboración propia*

| Datos generales:                                                | Edificio 1  |         |         |               |         |         | Edificio 2   |     |     |              |      |     |
|-----------------------------------------------------------------|-------------|---------|---------|---------------|---------|---------|--------------|-----|-----|--------------|------|-----|
|                                                                 | Escuela N°3 |         |         | Escuela N°121 |         |         | Escuela N°32 |     |     | Escuela N°83 |      |     |
|                                                                 | salones     |         |         | salones       |         |         | salones      |     |     | salones      |      |     |
|                                                                 | 6           | 9       | 10      | 1             | 6       | 10      | 2            | 6   | 21  | 2            | 6    | 21  |
| Orientación solar de las ventanas                               | NO          | SE      | NO      | SE            | NO      | NO      | NO           | SE  | NO  | NO           | SE   | NO  |
| volumen (m3)                                                    | 174         | 168     | 168     | 174           | 168     | 168     | 168          | 168 | 170 | 168          | 168  | 170 |
| m3/persona                                                      | 7,6         | 7,0     | 6,7     | 7,3           | 7,0     | 7,6     | 6,7          | 8,4 | 7,7 | 6,0          | 15,3 | 8,1 |
| Existencia de AA                                                | Sí          | Sí      | Sí      | Sí            | Sí      | Sí      | No           | No  | No  | No           | No   | No  |
| Posibilidad de regular sistema de calefacción y/o refrigeración | docente     | docente | docente | docente       | docente | docente | No           | No  | No  | No           | No   | No  |
| Cantidad de encuestas invierno                                  | 23          | 24      | 25      | 24            | 24      | 22      | 25           | 20  | 22  | 28           | n/d  | 21  |
| Cantidad de encuestas verano                                    | n/d         | n/d     | n/d     | n/d           | n/d     | n/d     | 25           | 20  | 22  | 25           | 11   | 21  |

### ***Diseño de la muestra***

La muestra poblacional se diseñó en función de la cantidad de escolares totales de aproximadamente 1310, con un nivel de confianza del 95% y un intervalo de confianza del 5%. La muestra diseñada requería 298 personas; sin embargo, se superó este número en la primera tanda con 384 encuestas realizadas a estudiantes escolares de Montevideo que utilizan regularmente el edificio y que hubieran permanecido en el local desde 30 minutos antes de la encuesta.

### ***Diseño del instrumento de medición y de encuesta***

Se monitorean las principales variables del ambiente interior, en el período caluroso y el frío. El registro de la temperatura de bulbo seco y humedad relativa del aire interior se realizó mediante registradores autónomos Onset-Hobo H8 ubicados en el centro del local y para temperatura de bulbo seco y humedad relativa del aire exterior se utilizó el registrador Hobo H8pro. Paralelamente, parte del equipo más grande del proyecto creó dispositivos de bajo costo para medir concentración de CO<sub>2</sub>, temperatura del aire y humedad relativa, utilizando placas micro:bit. Estos dispositivos están vinculados a la red de datos Ceibal, lo que permite que los niños y niñas puedan visualizar los valores registrados desde sus “ceibalitas” (notebooks que se entregan a todos los escolares públicos uruguayos).

Las encuestas de confort se realizaron a través del cuestionario que se presenta en la Figura 3. El cuestionario fue cuidadosamente diseñado a partir del realizado por Trebilcock et al. (2017) y adaptado para la población objetivo, habiendo realizado múltiples pruebas previas a su implementación. Además, se consultó a las docentes para asegurar su aplicabilidad con los niños y niñas. Tras este proceso recurrente, el cuestionario final quedó estructurado en cinco secciones con un total de ocho preguntas. Las secciones consideradas en la estructura de la encuesta fueron las siguientes: A. Datos para completar los investigadores; B. Sensación del ambiente interior del espacio (escala gráfica y escrita) basadas en la escala subjetiva de siete puntos contenida en la ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017); C. Información del participante (edad y sexo); D. Preferencia del ambiente interior del espacio (escala gráfica y escrita) y E. Información de la calidad del aire (preguntas de percepción). En la Figura 4 se muestra la actividad en un aula durante el proceso de encuesta y monitoreo.

Fecha: \_\_\_\_\_ Hora: \_\_\_\_\_ Escuela: \_\_\_\_\_ Salón: \_\_\_\_\_ Edad: \_\_\_\_\_ Sexo: \_\_\_\_\_

1-¿Cómo sentís la temperatura del salón en este momento? Coloca un tick ( ☐ ) en la frase que te parece más apropiada

|                          |                          |                          |                          |                          |                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Muy frío                 | Frío                     | Un poco frío             | Agradable                | Un poco caluroso         | Caluroso                 | Muy caluroso             |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

2-Coloca un tick ( ☒ ) en la frase que te parece más apropiada:

Me gustaría que el salón estuviese más frío ☐ \*\*

Me gustaría que el salón estuviese un poco más frío ☐ \*

Me gustaría que el salón estuviese igual ☐

Me gustaría que el salón estuviese un poco más caluroso ☐ \*

Me gustaría que el salón estuviese más caluroso ☐ \*\*

3. En este momento ¿Sientes que la temperatura del salón es agradable?

Sí ☐  No ☐ 

4. En este momento, ¿qué vestimenta tienes? Marca todas las que corresponda

Túnica ☐ 

un abrigo ☐ 

pantalón ☐ 

calza ☐ 

pollera ☐ 

camiseta manga larga ☐ 

camiseta manga corta ☐ 

buzo de lana ☐ 

buzo de algodón ☐ 

medias can-can ☐ 

medias ☐ 

champions ☐ 

botas ☐ 

5.¿Qué hacías antes de escribir esta encuesta?

 Actividades en clase (leer, escribir, etc.) ☐

 Gimnasia ☐

 Jugar/correr en el recreo ☐

 Descansar en el recreo ☐

 Comer sentado ☐

6¿Se perciben olores desagradables en la clase?

Muy seguido ☐

A veces ☐

de vez en cuando ☐

nunca ☐

7-En el aula, percibe corriente de aire (tipo viento):

Sí ☐ No ☐

8-En el aula, la corriente de aire:

Molesta mucho ☐ molesto ☐ molesto un poco ☐ no me molesta ☐

Figura 3: Encuestas de confort térmico. Fuente: modificada de Trebilcock et al. (2017)



Figura 4: Niños y niñas contestando encuesta en una de las aulas. Fuente: Elaboración propia

### Evaluación de confort y calidad del aire

La evaluación de confort se realizó de acuerdo a la norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017). En de Dear et al. (1998) la toma de datos de monitoreo se clasifica en: Clase III; II y I. Para esta investigación se siguen los criterios Clase II: se registran al momento de la encuesta los parámetros ambientales interiores (temperatura del aire, humedad relativa) y se determinan la tasa metabólica y resistencia de la ropa, datos necesarios para el cálculo de la Temperatura Efectiva Estándar (SET por sus siglas en inglés),

PMV y PPD. Mientras que los registros de temperatura y humedad se realizaron según lo antes mencionado, para la resistencia de la ropa y la tasa metabólica, se estiman los valores correspondientes a partir de lo declarado en las encuestas, para la primera en base al reporte ASHRAE RP-462 (Schiller et al, 1988) y para la segunda según valores de la norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017) y ISO estándar 7730 (ISO, 2005). La percepción de la calidad del aire se evaluó indirectamente a través del porcentaje de estudiantes que manifiestan percibir olores desagradables (PO) en clase (pregunta 6). En el entendido de que es un indicador más sencillo de comprender por toda la franja etaria de niños que las corrientes de aire. Para realizar el análisis de los resultados de la encuesta, se calculó el Voto Medio (MV por sus siglas en inglés), que refleja el promedio de los votos registrados en relación a la aceptabilidad (escala de los 7 valores de Fanger) respecto de la temperatura del aire al momento de contestar la encuesta (pregunta 1). Adicionalmente, para calcular el porcentaje de personas que se encuentran disconformes con el ambiente (PI por sus siglas en inglés), se calculó el porcentaje total de los encuestados que manifestaron valores de -3, -2, +2 y +3 a partir de los votos de percepción térmica del recinto por cada usuario (pregunta 2), es decir se contabilizaron los resultados que expresan la preferencia por un ambiente más cálido o más fresco independiente del valor respondido, y sin tomar en cuenta la calidad del aire ni las personas que no le harían cambios a la temperatura.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### *Índices de PMV, PPD, MV y PI*

Se calcularon los índices PMV y PPD para las aulas analizadas utilizando los registros de temperatura y humedad relativa obtenidos en las instancias de monitoreo higrotérmico. Se consideraron los datos anatómicos detallados en la Tabla 2. Los valores del nivel de vestimenta (Clo) se definieron por período en base a las encuestas realizadas en los días específicos (Tabla 3), mientras que la velocidad del viento fue determinada según datos medidos. El peso y la talla se determinaron a partir de los datos para los niños uruguayos de las tablas de la Organización Mundial de la Salud (OMS), disponibles en los carnets de salud de los niños uruguayos.

*Tabla 2: Datos anatómicos y de variables ambientales registradas.*

| Aula            | Edad (años) | Peso promedio * (kg) | talla promedio * (m) | período frío                           |                                        |                                  | período caluroso                     |                                        |                                  |
|-----------------|-------------|----------------------|----------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|
|                 |             |                      |                      | Temperatura a bulbo seco interior (°C) | Humedad relativa interior promedio (%) | Mediciones de CO2 promedio (ppm) | Temperatura bulbo seco interior (°C) | Humedad relativa interior promedio (%) | Mediciones de CO2 promedio (ppm) |
| Escuela 3: 6    | 11          | 35,0                 | 1,45                 | 18,6                                   | 62,8                                   | 629,0                            | -                                    | -                                      | -                                |
| Escuela 3: 9    | 11          | 35,0                 | 1,45                 | 16,5                                   | 66,0                                   | 720,0                            | -                                    | -                                      | -                                |
| Escuela 3: 10   | 9           | 27,5                 | 1,32                 | 19,4                                   | 55,5                                   | 642,0                            | -                                    | -                                      | -                                |
| Escuela 121: 1  | 9           | 27,5                 | 1,32                 | 19,0                                   | 79,0                                   | 1269,0                           | -                                    | -                                      | -                                |
| Escuela 121: 6  | 8           | 25,0                 | 1,27                 | 20,3                                   | 80,0                                   | 441,0                            | -                                    | -                                      | -                                |
| Escuela 121: 10 | 10          | 31,5                 | 1,39                 | 20,0                                   | 81,0                                   | 936,0                            | -                                    | -                                      | -                                |
| Escuela 32: 2   | 7           | 22,5                 | 1,21                 | 19,0                                   | 80,0                                   | 736,0                            | 22,3                                 | 63                                     | 980,0                            |
| Escuela 32: 6   | 8           | 25,0                 | 1,27                 | 20,0                                   | 80,0                                   | 456,0                            | 23                                   | 72                                     | 1100,0                           |
| Escuela 32: 21  | 11          | 35,0                 | 1,45                 | 18,0                                   | 80,0                                   | 425,0                            | 23,4                                 | 72                                     | 998,0                            |
| Escuela 83: 2   | 7           | 23,0                 | 1,21                 | 20,9                                   | 79,0                                   | 889,2                            | 24,6                                 | 76                                     | 756,0                            |
| Escuela 83: 6   | 11          | 35,0                 | 1,45                 | -                                      | -                                      | -                                | 24,6                                 | 83                                     | 1111,0                           |
| Escuela 83: 21  | 10          | 31,5                 | 1,39                 | 16,5                                   | 73,0                                   | 424,0                            | 16,5                                 | 73                                     | 687,0                            |

\* según datos OMS aplicados a Uruguay

Tabla 3: Vestimenta promedio y tasa metabólica relevada

| Días de cálculo  | Tasa metabólica promedio (MET) | Vestimenta promedio (clo) |
|------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Período caluroso | 1,00                           | 0,60                      |
| Período frío     | 1,00                           | 1,37                      |

Tabla 4: Cálculos de índices PMV, PPD y resultados de encuestas in situ MV, PI y PO.

| Aula            | PERÍODO FRÍO      |        |                   |        |        | PERÍODO CALUROSO  |        |                   |        |        |
|-----------------|-------------------|--------|-------------------|--------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|--------|
|                 | Cálculo por norma |        | Encuestas in situ |        |        | Cálculo por norma |        | Encuestas in situ |        |        |
|                 | PMV               | PPD    | MV                | PI     | PO     | PMV               | PPD    | MV                | PI     | PO     |
| Escuela 3: 6    | -0,53             | 11,0 % | -0,50             | 65,0 % | 78,0 % | -                 | -      | -                 | -      | -      |
| Escuela 3: 9    | -1,00             | 26,0 % | -0,50             | 67,0 % | 71,0 % | -                 | -      | -                 | -      | -      |
| Escuela 3: 10   | -0,39             | 8,0 %  | 0,50              | 76,0 % | 92,0 % | -                 | -      | -                 | -      | -      |
| Escuela 121: 1  | -0,35             | 7,0 %  | 1,00              | 33,0 % | 71,0 % | -                 | -      | -                 | -      | -      |
| Escuela 121: 6  | -0,03             | 5,0 %  | -0,50             | 46,0 % | 75,0 % | -                 | -      | -                 | -      | -      |
| Escuela 121: 10 | -0,10             | 5,0 %  | 0,50              | 41,0 % | 27,0 % | -                 | -      | -                 | -      | -      |
| Escuela 32: 2   | -0,34             | 7,0 %  | 0,50              | 36,0 % | 36,0 % | -1,01             | 26,0 % | 1,00              | 36,0 % | 36,0 % |
| Escuela 32: 6   | -0,10             | 5,0 %  | 0,50              | 40,0 % | 34,0 % | -0,70             | 15,0 % | 0,50              | 40,0 % | 85,0 % |
| Escuela 32: 21  | -0,57             | 12,0 % | 0,50              | 50,0 % | 52,0 % | -0,56             | 12,0 % | 0,50              | 50,0 % | 50,0 % |
| Escuela 83: 2   | 0,10              | 5,0 %  | 0,50              | 57,1 % | 75,0 % | -0,10             | 5,0 %  | 0,70              | 76,0 % | 56,0 % |
| Escuela 83: 6   | -                 | -      | -                 | -      | -      | -0,05             | 5,0 %  | 0,50              | 63,6 % | 64,0 % |
| Escuela 83: 21  | -0,95             | 24,0 % | 1,00              | 78,6 % | 50,0 % | -3                | 99,0 % | 0,80              | 54,5 % | 73,0 % |

Los resultados para el período frío muestran que en todos los casos, excepto uno, el PMV presenta niveles levemente por debajo del 0, lo que se relaciona con una tendencia a una leve sensación de frío, pero que solo en un caso alcanza el límite inferior (-1.0) del rango de confort, entrando en la categoría de disconfort de levemente frío. El máximo PPD se corresponde con este caso, alcanzando el 26% de los usuarios. Por su parte, las encuestas realizadas indican que de los once salones evaluados tres tienen un MV de -0,5, seis de 0,5, y dos de 1, lo que muestra que a diferencia de los cálculos obtenidos por norma en ocho salones la tendencia es levemente hacia el disconfort por calor. El porcentaje de insatisfechos que arrojan las encuestas es notablemente superior al de la norma, entre 33% y 78,6%. Para el período caluroso el PMV indica en todos los casos valores inferiores al 0, con dos de los seis casos evaluados para este período con categoría de disconfort por frío, uno en levemente fresco (-1,01) y uno en frío (-3), correspondiendo con un PPD de 26% en el primer caso y 99% en el segundo. Las encuestas realizadas in situ muestran sin embargo que en todos los casos el MV está por encima del 0, correspondiendo con una tendencia al leve disconfort por calor, incluso en los dos casos que por norma mostraban disconfort por frío. El PI para estas mediciones indica entre un 40% y un 76%. En general se obtuvo una diferencia entre el PMV y la aceptabilidad real del usuario MV. Los resultados de la encuesta de satisfacción realizada a los usuarios muestran que existe una preferencia hacia los ambientes o condiciones más frescos que los definidos por Fanger para la época de invierno o la de verano. Esto puede explicarse en parte por las dificultades para instrumentar mecanismos de control personal como ser abrir las ventanas y por el hecho de que, al tratarse de una ventilación unilateral, los flujos de aire se concentran cerca de la ventana. Los mayores porcentajes de disconfort se dan en el edificio 1, en parte se explicaría por las dificultades de accionamiento de ventanas y/o contar con la posibilidad de encender el aire.



## Concentración CO<sub>2</sub>

De los registros de CO<sub>2</sub>, en la Tabla 2 se presentan los niveles promedio registrados durante la realización de la encuesta. Se observa como en el 30% de los casos el valor de la concentración de CO<sub>2</sub> está próximo o por encima de los 1.000 ppm, valor recomendado por UNE-EN 16798-5-1(AENOR, 2018). La evaluación de percepción de olores desagradables, Tabla 4, muestra que en 15 de las 18 evaluaciones se registran más del 50% de estudiantes insatisfechos.

Para complementar la evaluación de la calidad del aire, se presenta un resumen de los principales resultados obtenidos que pertenecen a este proyecto. En la Figura 5 se muestra la variación en la concentración de CO<sub>2</sub> para un día de invierno en una de las aulas evaluadas. Se puede observar que las concentraciones durante las horas de ocupación del aula, superan la mayor parte del tiempo los 1.000 ppm recomendados. Se puede visualizar que, en el horario de la tarde, cuando las temperaturas exteriores son elevadas, los niveles de CO<sub>2</sub> son menores y más variables, lo que probablemente se relacione con la ventilación del aula. Constatando la importancia de esta estrategia para mejorar las condiciones del ambiente interior.

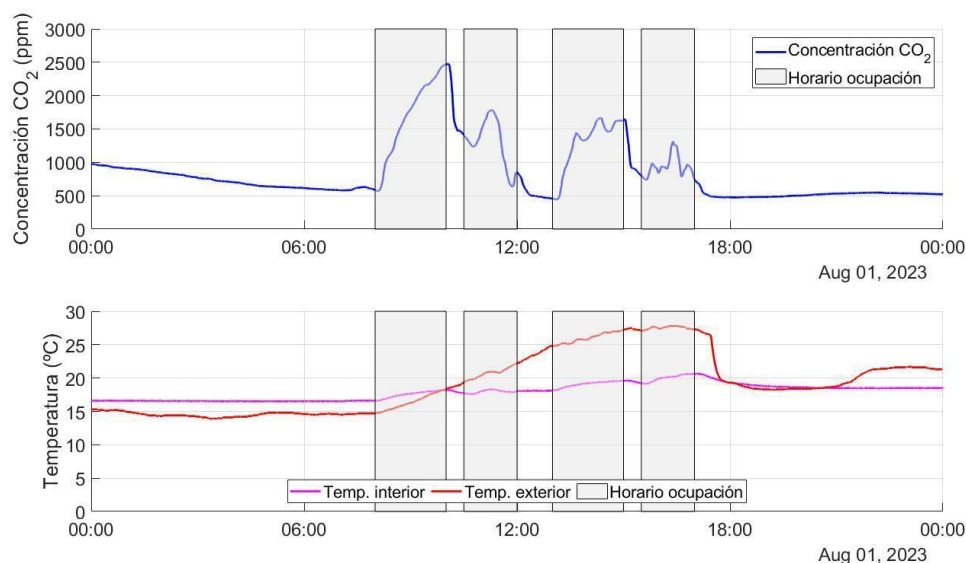


Figura 5: Mediciones de CO<sub>2</sub>. Fuente: elaboración del grupo de trabajo del proyecto Calidad del aire interior

## CONCLUSIÓN

El estudio de campo a partir de la realización de las encuestas de confort nos permitió recoger información relacionada a la real percepción del ambiente térmico de cada uno de los usuarios de las aulas mostrando la subjetividad del confort térmico. Por otro lado, gracias a las mediciones de campo realizadas en el período frío y caluroso de Montevideo, fueron calculados los índices PMV y PPD para todas las aulas, resultados que fueron contrastados con los de las encuestas. Fue importante establecer que existe una tendencia generalizada, en todos los edificios estudiados para época de invierno, en preferir una temperatura menor que lo previamente establecido en estudios anteriores para adultos (Picción et al., 2010), esto se acerca a lo expresado por Trebilcock et al.(2017) y Almagro-Lidón et al. (2024), estos últimos señalan que los niños son más tolerantes a las temperaturas más bajas que los adultos, pero están menos adaptados a las temperaturas más altas en comparación con los adultos. Los índices usualmente utilizados (PMV y PPD) para evaluar el grado de satisfacción térmica no explican los porcentajes reales de confort obtenidos en los edificios estudiados. Por lo tanto, la sensación de neutralidad térmica (ni frío, ni calor) de las normas, no coincide necesariamente con la sensación de confort o de preferencia térmica de los usuarios reales. Los mayores porcentajes de confort térmico, evaluados en términos de sensación y preferencia, corresponden al edificio con locales naturalmente ventilados sin aire acondicionado. En parte esto se explicaría por las bajas expectativas térmicas que tienen los estudiantes, así como la aclimatación que realizan constantemente. La edad de la construcción y las tecnologías incorporadas no suponen una mejor percepción de los usuarios.



La evaluación de calidad del aire realizada no permite relacionar directamente la percepción de olores con los niveles de CO<sub>2</sub>, aunque en ambos casos los registros muestran que las aulas presentan deficiencias en la calidad del aire.

Los resultados obtenidos nos llevan a plantear las siguientes interrogantes: ¿existen cambios en la zona de confort térmico de los niños respecto a las de los adultos en nuestro contexto?, ¿es posible desde el diseño mejorar en conjunto el confort térmico y la calidad del aire? El modelo de confort térmico adaptativo descrito en la Norma ASHRAE 55 es el método más comúnmente aplicado en la evaluación del confort térmico en los edificios. Este modelo, sin embargo, se estableció sobre una base de datos global de 21.000 mediciones tomadas principalmente en edificios de oficinas y era aplicable principalmente para investigar el confort térmico de los adultos. Los niños en general tienen un metabolismo más alto, una pérdida de calor más rápida y una mayor sensibilidad al cambio en la temperatura de neutralidad o confort en comparación con la de los adultos. Debido a la variación de la capacidad termorreguladora en función de la edad, el confort térmico de niños y adolescentes también puede variar significativamente del de los adultos, (Guiraldes. y Ventura-Juncá, 2002). Por lo tanto, este estudio permite iniciar el proceso hacia un modelo de confort adaptativo específicamente para niños y adolescentes basado en observaciones de campo, para proporcionar un mecanismo para evaluar el confort térmico interior de los estudiantes en edificios escolares.

La aceptabilidad registrada de temperaturas más bajas de confort respecto a los adultos son resultados alentadores para desarrollar la estrategia de ventilación natural en las aulas escolares, en el entendido que mejoran tanto la sensación de confort térmico como la calidad del aire. De las características térmicas del ambiente, la velocidad del aire y su patrón de movimiento resultan ser los parámetros con mayor influencia sobre la percepción térmica de los usuarios, (Schiavon y Melikov, 2008; Su et al., 2009), la ventilación natural es además un factor fundamental para controlar los niveles de CO<sub>2</sub> dentro de los locales. Por tanto, resulta destacable el impacto que puede tener el diseño arquitectónico permitiendo la adecuada estrategia de ventilación natural, que mejore las condiciones ambientales interiores en aulas escolares.

## AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) que financió esta investigación como proyecto de Núcleo Interdisciplinario de 2022. A las instituciones que permiten la realización del estudio de campo en sus instalaciones y a los niños que brindan su tiempo y colaboración. A los compañeros investigadores de las distintas instituciones.

## REFERENCIAS

- Almagro-Lidón, M., Pérez-Carramiñana, C., Galiano-Garrigós, A., y Emmitt, S. (2024). Thermal comfort in school children: Testing the validity of the Fanger method for a Mediterranean climate. *Building and Environment*, 253(111305), 111305. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111305>
- ASHRAE. (2017). *Standard 55: 2017, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. S.l.: [https://ashrae.iwrapper.com/ViewOnline/Standard\\_55-2017](https://ashrae.iwrapper.com/ViewOnline/Standard_55-2017).
- Bartyzel, J., Zięba, D., Nęcki, J., y Zimnoch, M. (2020). Assessment of ventilation efficiency in school classrooms based on indoor–outdoor particulate matter and carbon dioxide measurements. *Sustainability*, 12(14), 5600. <https://doi.org/10.3390/su12145600>
- Batterman, S., Su, F.-C., Wald, A., Watkins, F., Godwin, C., y Thun, G. (2017). Ventilation rates in recently constructed U.S. school classrooms. *Indoor Air*, 27(5), 880–890. <https://doi.org/10.1111/ina.12384>
- Cincinelli, A., y Martellini, T. (2017). Indoor Air Quality and Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(11), 1286. <https://doi.org/10.3390/ijerph14111286>
- de Dear, R., y Brager, G. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *UC Berkeley: Center for the Built Environment*. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>
- Gallego Sánchez-Torija, J., Arranz, B. ., Oteiza, I., Alonso, C., y Martín-Consuegra, F. (2022). Evaluación del confort térmico y la calidad de aire en centros docentes públicos en Madrid. Estudio

- de tres casos durante un año. *Informes De La Construcción*, 74(567), e456. <https://doi.org/10.3989/ic.87607>
- Guiraldes, E., y Ventura-Juncá, P. (2002). Manual de pediatría. Santiago: Editorial Universidad Católica de Chile.
- Hou, D., Wang, L., Katal, A., Yan, S., Zhou, L., Wang, V., Vuotari, M., Li, E., y Xie, Z. (2023). Development of a Bayesian inference model for assessing ventilation condition based on CO<sub>2</sub> meters in primary schools. *Building Simulation*, 16(1), 133–149. <https://doi.org/10.1007/s12273-022-0926-8>
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT). (1999). Zonificación Climática. UNIT 1026. Montevideo, Uruguay. Montevideo, Uruguay
- International Standards Organization - ISO 7730. (2005). *Moderate Thermal Environments: Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort*. Switzerland
- Jones, E., Young, A., Clevenger, K., Salimifard, P., Wu, E., Luna, M. L. y Allen, J. (2020). Healthy schools: risk reduction strategies for reopening schools. *Harvard TH Chan School of Public Health Healthy Buildings program*
- Johnson, D. L., Lynch, R. A., Floyd, E. L., Wang, J., y Bartels, J. N. (2018). Indoor air quality in classrooms: Environmental measures and effective ventilation rate modeling in urban elementary schools. *Building and Environment*, 136, 185-197
- Liang, H. H., Lin, T. P., y Hwang, R. L. (2012). Linking occupants' thermal perception and building thermal performance in naturally ventilated school buildings. *Applied Energy*, 94, 355–363. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2012.02.004>
- Minguillón, M. C., Querol, X., Alastuey, A., Riediker, M., Felisi, J. M., Garrido, T., ... y Carslaw, N. (2020). Guide for ventilation towards healthy classrooms.
- Montoya, O., y San Juan, G. (2018). Calidad Ambiental de las aulas de colegios en el trópico: evaluación subjetiva y objetiva del confort térmico, visual y sonoro. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 22, 49–60. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/108099>
- Pessag, N. L., y Taire, D. (2024). Ventilación de espacios educativos en el contexto de COVID-19 en Puerto Madryn, Argentina. *Meteorológica*, 49, 028. <https://doi.org/10.24215/1850468xe028>
- Picción, A. M., Camacho, M., Cheirasco, G., López Salgado, M. N., y Milicua, S. (2010). Estudio de campo sobre las condiciones de confort térmico y visual en edificios de enseñanza públicos en clima templado. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 14.
- Remion, G., Moujalled, B., y El Mankibi, M. (2019). Review of tracer gas-based methods for the characterization of natural ventilation performance: Comparative analysis of their accuracy. *Building and Environment*, 160(106180), 106180. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106180>
- Schiavon, S., y Melikov, A. K. (2008). Energy saving and improved comfort by increased air movement. *Energy and Buildings*, 40(10), 1954-1960. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.05.001>
- Schiller, G.; Arens, E.; Bauman, F.; Benton, C.; Fountain, M.; Doherty, T. (1988), “A Field Study of Thermal Environments and Comfort in Office Buildings”, ASHRAE Transactions, Vol. 94, Part 2
- Schibuola, L., y Tambani, C. (2020). Indoor environmental quality classification of school environments by monitoring PM and CO<sub>2</sub> concentration levels. *Atmospheric Pollution Research*, 11(2), 332-342.
- Su, X., Zhang, X., y Gao, J. (2009). Evaluation method of natural ventilation system based on thermal comfort in China. *Energy and Buildings*, 41(1), 67-70. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.07.010>
- Trebilcock, M., Soto-Muñoz, J., Yañez, M., y Figueroa-San Martín, R. (2017). The right to comfort: A field study on adaptive thermal comfort in free-running primary schools in Chile. *Building and Environment*, 114, 455-469. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.036>
- Asociación Española de Normalización - AENOR (2018) Norma UNE-EN 16798-5-1:2018 Eficiencia energética de los edificios. Ventilación de los edificios. Parte 5-1: Métodos de cálculo de las demandas energéticas de los sistemas de ventilación y de acondicionamiento de aire (Módulos M5-6, M5-8, M6-5, M6-8, M7-5, M7-8). Método 1: Distribución y generación. España
- van Hoof, J. (2008). Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all? *Indoor Air*, 18(3), 182–201. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2007.00516.x>
- Wagner A., Gossauer E., Moosmann C., Gropp T. y Leonhart R. (2007). *Thermal comfort and workplace occupant satisfaction—Results of field studies in German low energy office buildings*. Energy and Buildings 39, 758–769.

## **CHANGES IN THE THERMAL COMFORT ZONE? FIELD STUDY OF THERMAL COMFORT AND AIR QUALITY IN PUBLIC SCHOOLS IN MONTEVIDEO.**

**ABSTRACT:** Thermal comfort and air quality in indoor environments have implications for people's health and performance because we spend many hours of life in closed environments. It is estimated that a person spends around 90% of their life in a closed environment. This has been strongly evidenced in the COVID-19 pandemic, showing its relevance in closed spaces such as classrooms. The study seeks to evaluate hygrothermal comfort and air quality in schools. The methodology used was an environmental audit, organized into two components: (i) objective, (measurements); and (ii) subjective, (perception survey). From March 2023 to the present, dry bulb temperature, relative humidity and CO<sub>2</sub> have been measured internally in six classrooms of four public schools in Montevideo, obtaining the Percentage of People in Discomfort (PPD), Predicted Average Vote (PMV), and Percentage of Dissatisfied (PI) and Average Vote (MV). The neutral conditions included in the ISO7730 and ASHRAE55 standards are compared with the indices calculated with the 384 perception surveys. The results showed a low percentage of acceptability mainly due to poor air quality.

**Keywords:** thermal comfort, air quality, education

## **ANÁLISIS DE TEMPERATURAS INTERIORES EN PERIODO INVERNAL EN EDIFICIO DE VIVIENDA EN ALTURA CUMPLIMENTANDO NORMAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN ROSARIO, ARGENTINA.**

**Patricia Mosconi<sup>1</sup>; Jorge Vazquez<sup>1</sup>; Marcelo Graziani<sup>1</sup>; Nora Díaz<sup>1</sup>; Franco Nocioni<sup>1</sup>; Melina Duca<sup>1</sup>; Federico Vazquez<sup>1</sup>; Agustina Martínez Chaher<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Centro de Estudios del Ambiente Humano, Facultad de Arquitectura, Planeamiento y Diseño. UNR.  
Riobamba 220 bis – 2000 – Rosario

Tel. 0341-4808532 – Fax 0341-4808533 e-mail: [piremos@gmail.com](mailto:piremos@gmail.com)

**RESUMEN:** Se presenta el análisis de la evolución de la temperatura interior en período invernal en un departamento de un edificio de PH localizado en el Área Central de la ciudad de Rosario, Argentina. La tipología de la envolvente edilicia corresponde a un edificio entre medianeras con balcón y su materialidad cumple las exigencias de la Ordenanza 8757 de limitación de demanda energética en las construcciones de la ciudad de Rosario. La orientación es este-oeste, cuenta con ventilación cruzada y se encuentra sin ocupantes, es decir, no hay aportes de calor sensible y latente. Se analiza la variación de temperatura interior y la incidencia de la inercia térmica en las condiciones de confort interior y se las compara con los registros climáticos suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional (Aeropuerto) y los correspondientes al Instituto de Física Rosario (IFIR, CONICET). Los registros de temperatura y radiación solar son confrontados en función de la localización de la toma de datos: área periurbana, suburbana y urbana. La exigencia de optimización de la envolvente de todas las nuevas construcciones superiores a 300 m<sup>2</sup>, como estrategia pasiva, demuestra que se logran condiciones de confort interior mediante el incremento de la resistencia térmica de los componentes de la envolvente.

**Palabras clave:** temperaturas interiores, confort, normas, eficiencia energética, edificios

### **INTRODUCCIÓN**

La actual situación energética mundial es el resultado de la combinación de diversas tensiones económicas, políticas, tecnológicas, sociales y ambientales, que confluyen en un complejo panorama de crisis y ajustes cíclicos, especialmente del petróleo. En estas condiciones, en pleno siglo XXI, persiste un modelo energético asimétrico y excluyente, con una elevada dependencia de combustibles tradicionales, como la leña, en las poblaciones más pobres del planeta, que no tienen acceso a otros combustibles para cubrir sus necesidades básicas. Para la población en general y para los políticos en particular, la energía no se percibe como un problema. Su disponibilidad a mediano y largo plazo, así como los impactos del modelo de consumo energético vigente, no están presentes cuando se proyecta una nueva urbanización o cuando se rehabilitan otras existentes.

En este contexto, la producción del hábitat debiera organizarse considerando los recursos materiales ambientalmente más eficientes, a partir de procesos energéticamente eficaces y socialmente efectivos, que vayan de la materia a los materiales y de éstos a su montaje, buscando alcanzar la mayor vida útil global posible, siendo este un proceso sistémico con los demás insumos proyectuales, en la búsqueda de la significación social de un hábitat comprometido con la relación individuo-sociedad-naturaleza. (Di Bernardo E, 2015).

Las regulaciones y certificaciones edilicias surgieron como un instrumento para minimizar el consumo de energía y de emisiones de gases contaminantes, mejorar la eficiencia energética, y promover una mayor transparencia con respecto al uso de energía en las edificaciones. En América Latina, más del

80% de las iniciativas existentes evalúan la eficiencia edilicia a partir de la demanda energética y del cumplimiento de valores admisibles para indicadores, mientras el 20% estima la misma a partir del consumo energético.

La ciudad de Rosario en general, y el Área Central en particular, están experimentando un proceso de transformación impactante caracterizado por la construcción masiva de nuevos edificios o la remodelación de edificios existentes. De hecho, los problemas asociados a la densificación del tejido en áreas centrales demandan para su solución la determinación de pautas claras y controles impuestos por las autoridades pertinentes que garanticen el cumplimiento de la normativa y la protección de la calidad urbana frente a las acciones de los distintos sectores involucrados en la construcción de la ciudad. Las tipologías edilicias en el área central de Rosario evidencian un total desinterés en términos de habitabilidad cuantitativa y cualitativa. El significativo impacto social asociado a la dependencia funcional de crecientes consumos de energía en el contexto de la crisis generada por el agotamiento de los recursos de origen fósil, el incremento de la huella de carbono y el cambio climático, han determinado la necesidad, por parte del ejecutivo municipal, de aprobar proyectos de ordenanzas dirigidos al uso de energías alternativas y el ahorro energético en edificios. (Mosconi et al. 2012)

En este contexto, en la ciudad de Rosario, se reglamentó la Ordenanza N° 8757/11 en el año 2011 con el fin de optimizar las condiciones de habitabilidad y de reducir el creciente consumo energético producido por las modalidades de diseño y materialidad de las tipologías edilicias predominantes. Esta norma, de implementación progresiva, incorpora al Reglamento de Edificación de la ciudad, la Sección “Aspectos Higrotérmicos y Demanda Energética de las Construcciones”, avanzando en la regularización de las variables constructivas con incidencia en los consumos energéticos de climatización y el alcance de estándares mínimos de confort en los edificios. (Seffino et al. 2011)

La misma plantea, en el Artículo 3, que la normativa técnica exigible a cumplimentar, será la indicada en el Anexo I y Normas IRAM (Instituto Argentino de Racionalización de Materiales). Cabe destacar que la mencionada Ordenanza Municipal es la primera y única normativa sobre eficiencia energética que tiene aplicación efectiva en el país, desde julio de 2013 a la fecha. (Municipalidad de Rosario, 2011). El Documento Básico de la misma establece los siguientes límites cuantitativos a considerar:

- Parámetros higrotérmicos de diseño óptimos a adoptar para la zonificación geográfica de la ciudad de Rosario
- Valores máximos admisibles de Transmitancia Térmica para los diferentes elementos componentes de los cerramientos.
- Verificaciones de las condiciones de condensación superficial e intersticial en los cerramientos.
- Valores máximos admisibles de Factor de Exposición Solar (Fes) para cerramientos semitransparentes según orientaciones.
- Limitación de la permeabilidad del aire exterior en las carpinterías.
- Demanda energética para calefacción del edificio.
- Demanda energética para refrigeración del edificio.

Actualmente, la Ordenanza sólo verifica los parámetros higrotérmicos de diseño óptimos a adoptar, el Factor de Exposición Solar según orientación de cerramiento semitransparente y los valores máximos admisibles de Transmitancia Térmica para los diferentes elementos componentes de los cerramientos.

El trabajo tiene como premisa evaluar el vector energético como variable determinante de los patrones de asentamiento urbano e indaga las consecuencias ambientales de la compactación urbana y edilicia del Área Central de la Ciudad de Rosario. Con la finalidad de plantear un método operativo para el estudio de los efectos directos de la implementación de la Ordenanza 8757, se presenta- el análisis de la eficiencia termo-energética, ya abordado en estudios anteriores, de una unidad habitacional correspondiente a un edificio localizado en el Área Central, cuya envolvente responde a la tipología “en altura - entre medianeras - semitransparente - con balcón”. (Mosconi P., Bracalenti L. et al 2021)

## DESARROLLO

El Plan de Reordenamiento Urbanístico del Área Central y Primer Anillo Perimetral de la ciudad de Rosario, expresa adhesión a los modelos urbanos compactos, los cuales, si bien son potencialmente menos insustentables que los modelos dispersos por su lógica de relación entre suelo disponible, densidades, infraestructura y servicios urbanos, pueden desvirtuarse si en la práctica no se logran condiciones que garanticen una adecuada habitabilidad en base a criterios de diseño y construcción eficientes. De hecho, durante 2007, el Municipio presentó una propuesta de carácter exclusivamente formal y limitadamente espacial focalizada en aspectos morfológicos de continuidad urbana sin contemplar variables esenciales que hacen al metabolismo urbano, resiliencia y calidad de vida.

En este sentido y en el contexto de las disciplinas que operan sobre el ambiente construido, la Función de Eficiencia Ambiental del Hábitat, resulta una herramienta útil para definir el comportamiento ambiental de los edificios y organizar, en un marco lógico y desde el proceso proyectual, las variables inherentes a cada etapa del proceso edilicio. La noción de eficiencia ambiental resulta menos abstracta y más operativa que la usualmente utilizada de “Desarrollo Sustentable”, considerando la imprecisión de esta última dada la dificultad para determinar efectivamente un escenario como meta y un horizonte temporal suficientemente largo para las generaciones futuras.

Se evalúa la performance energética teniendo en consideración la función de Eficiencia Ambiental del Hábitat (EAH). (Di Bernardo E. 2009, 2013).

$$EAH = f (CAP, CAMyR, CAF, CADyR, VU, SR)$$

CAP: Costo ambiental de Producción

CAMyR: Costo ambiental de Mantenimiento y Rehabilitación

CAF: Costo ambiental de Funcionamiento

CADyR: Costo ambiental de Demolición y Reciclado

VU: Vida útil

SR: Satisfacción residencial

No es una función veritativa del tipo  $F(x)$ , sino una función descriptiva que relaciona la Eficiencia Ambiental de las distintas etapas de un proceso edilicio. A mayor vida útil para una dada inversión inicial de recursos naturales, mayor eficiencia ambiental. La adecuada reducción de los flujos de energía y masa no renovable y el aprovechamiento de recursos renovables en el funcionamiento y mantenimiento edilicio, mejoran la eficiencia ambiental del sistema. La incidencia de los costos de funcionamiento a lo largo de la vida útil de las construcciones es muy relevante y redundante en las condiciones de habitabilidad interior, dependiendo de la disponibilidad económica del usuario para paliar con tecnología y energía las deficiencias de diseño y materialización edilicia.

En trabajos anteriores, se han analizado conjuntos de viviendas sociales que si cumplimentaran la Ord. 8757, se obtendrían ahorros potenciales en el consumo de gas natural (Gcal) en un rango comprendido entre 30% y 45%, según las tipologías analizadas, siendo el valor medio ponderado para todo el edificio en conjunto del 37.6%. En dicho análisis se han confrontado las materialidades usualmente utilizadas en la construcción con las exigidas por la Ordenanza. (Mosconi P., Bracalenti L., et al 2022)

Se abordan en este estudio variables inherentes al funcionamiento higrotérmico, determinantes del consumo energético de acondicionamiento invernal. En tal sentido, los criterios de diseño y las características de las envolventes edilicias cobran un rol relevante, por lo que la optimización del proyecto y de la materialización es la estrategia viable para reducir la demanda de energía. (Mosconi P. et al 2015, 2021)

## METODOLOGÍA

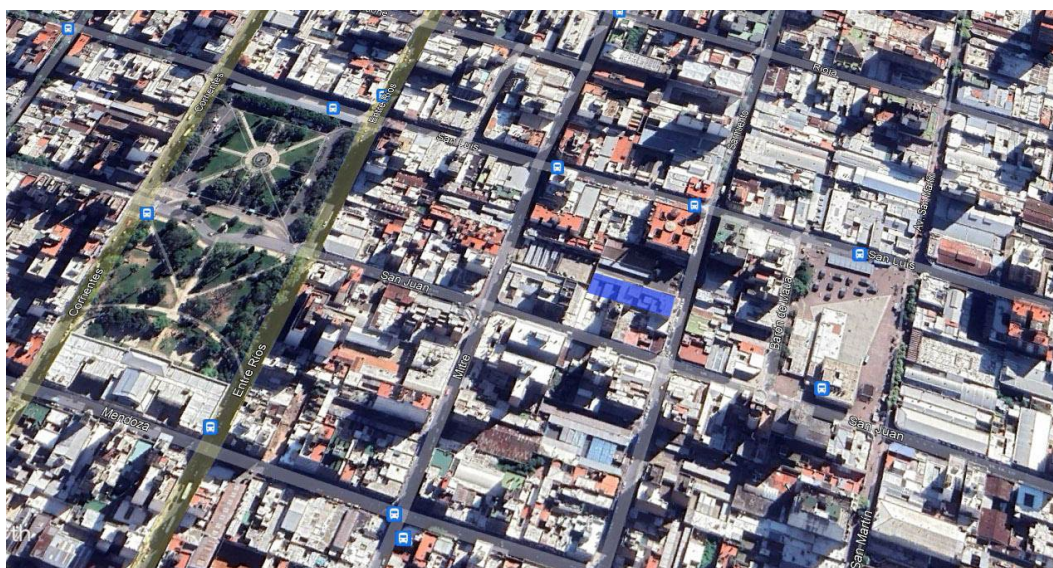
Desde el punto de vista metodológico, la eficiencia ambiental es considerada una variable compleja dependiente. Se aplica el estudio de caso como forma de investigación cuantitativa que se adecua

particularmente a la comprensión de los fenómenos existentes en el ambiente construido. El razonamiento utilizado es inductivo, y por lo tanto empirista, comenzando con la observación del estudio de caso, para finalmente formular conclusiones. (Samaja, 1993). La conceptualización y el tratamiento se hacen desde la perspectiva de la investigación de campo utilizando instrumentos característicos de recogida y análisis de datos relativos a fenómenos físico-espaciales. Se aborda el análisis de una tipología de envolventes edilicias a partir de la configuración y la materialidad de las envolventes arquitectónicas y su incidencia en el comportamiento termo-energético edilicio. Se selecciona un edificio entre medianeras en lotes angostos y profundos, en dos bloques, tipología característica de la construcción del Área central de la ciudad en los últimos 50 años.

## CASO DE ESTUDIO

La ciudad de Rosario se encuentra ubicada, de acuerdo a la Norma IRAM 11603 en la zona bioclimática IIIa Templado cálido, con veranos relativamente calurosos y temperaturas medias comprendidas entre 20° C y 26° C, con máximas medias mayores a 30° C, sólo en la faja de extensión Este-Oeste. El invierno no es muy frío y presenta valores medios de temperatura entre 8° C y 12° C, y valores mínimos rara vez inferiores a 0° C. Las amplitudes térmicas pueden ser mayores a 14° C.

La tipología seleccionada se encuentra en el Área Central, en la manzana delimitada por las calles Sarmiento (Este), San Juan (Sur), San Luis (Norte) y Mitre (Oeste). Sobre calle Sarmiento, se evidencia la continuidad del casco histórico tradicional y nuevas edificaciones de viviendas y comerciales. En calle San Juan, se registra un proceso de transformación y sustitución edilicia de construcciones comerciales históricas por nuevos emprendimientos. Calle San Luis mantiene su impronta de corredor comercial con un intenso tráfico vehicular donde se localiza un intercambiador de transporte público a escala local y regional, la Plaza Sarmiento. Calle Mitre presenta un perfil eminentemente comercial. (Figura 1).



*Figura 1: Vista aérea sector (en azul se indica el edificio analizado)*

El edificio, construido entre los años 2016 y 2020, corresponde a la tipología, “Semitransparente entre medianeras con balcón”. Está ubicado en un terreno de 17 m de ancho por 59,38 m de profundidad y está compuesto de dos bloques de planta baja y siete pisos. Su fachada principal está orientada al Este (calle Sarmiento) entre San Luis y San Juan. En planta baja, se ubican el hall de acceso con doble núcleo de circulación vertical (una para cada bloque), un local comercial y la entrada a una cochera para 22 vehículos. En cada bloque se disponen 3 departamentos de 2 dormitorios cada uno.

El departamento tiene una superficie cubierta exclusiva de 51m<sup>2</sup> y 6m<sup>2</sup> de superficie semicubierta (balcón). Está ubicado en el sexto piso del bloque interno (contrafrente al centro de manzana con balcón orientado al Oeste). La superficie total de la envolvente expuesta es de 55m<sup>2</sup> y está compuesta por el



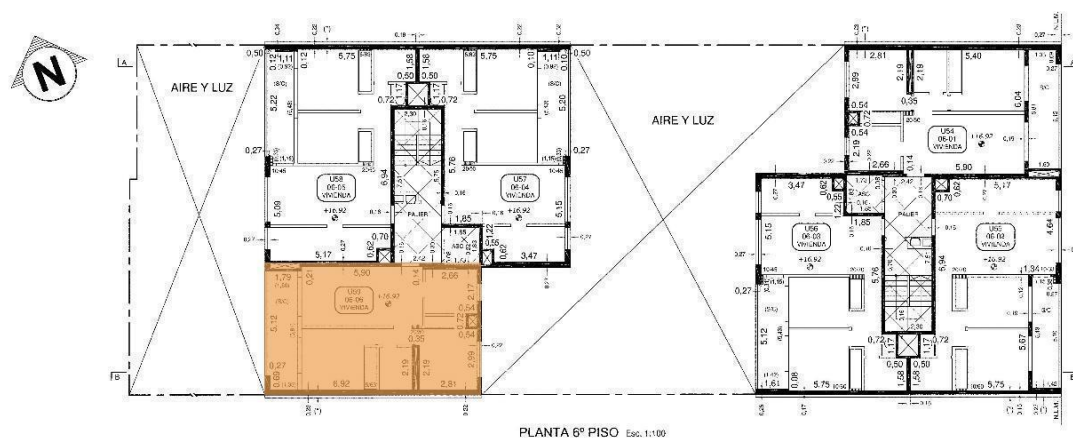
muro medianero orientado al Sur, el frente Oeste, el cual tiene una relación vidriado/opaco del 35% y el frente al Este (hacia un aire y luz) con un valor del 20%. Comparte un muro divisorio al Norte con el departamento vecino y dos entresijos con departamentos en la planta inferior y superior.

La elección del caso responde, por un lado, a su representatividad en cuanto a su morfología y materialidad, que cumplimenta los requisitos de la Ord. 8757, y por otro, sin ocupación, situación favorable para explorar el comportamiento pasivo del volumen interior. (Figuras 2, 3, 4 y 5)

Se realiza una campaña de mediciones de la temperatura interior y su fluctuación, la cual depende de las variables climáticas exteriores y de las características termofísicas de la envolvente térmica. No se registran aportes de calor sensible y latente por ocupación. Es decir, se controlan las variables de estudio y las protecciones solares durante el período de mediciones. Se considera la ventilación permanente obligatoria por la normativa de ENARGAS de 200 mm<sup>2</sup> en cocina.



*Figura 2: Imágenes edificio en construcción y finalizado*



*Figura 3: Ubicación departamento en el edificio*



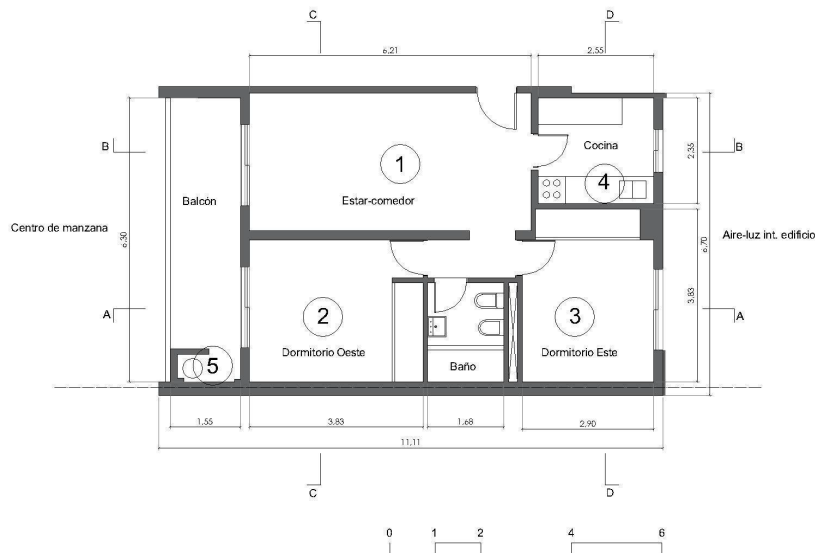


Figura 4: Planta con puntos de medición

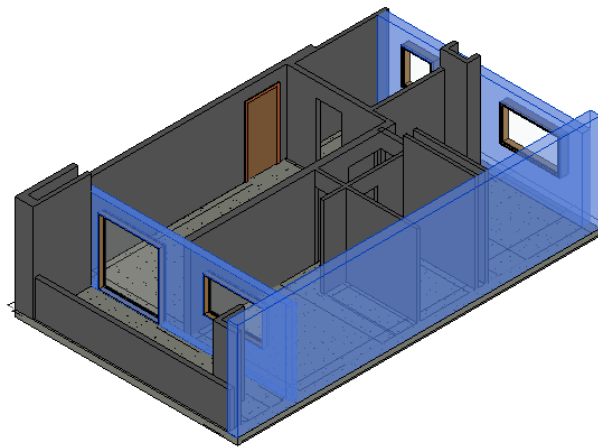


Figura 5: Axonometría de la unidad analizada

### Materialidad constructiva de la Envolvente

Los planos verticales de la envolvente, presentan las siguientes características termofísicas:

El muro medianero Sur (0,30 m) está compuesto por 0,12 m de ladrillos vistos macizos, 25 mm. EPS de 15 Kg/m<sup>3</sup>, barrera de vapor, 0,12 m de ladrillos cerámicos huecos, revoque y yeso al interior. El muro de cerramiento Este (0,245 m) presenta 0,12 m de ladrillos vistos macizos, 35 mm EPS de 15 Kg/m<sup>3</sup>, barrera de vapor, 0,05 m de ladrillo de panderete, revoque y yeso al interior. Los muros de cerramiento al Oeste (0,185 m) se componen de mortero de cemento al exterior, 0,15 m de ladrillo de hormigón celular (HCCA) y yeso al interior. Todos los cerramientos opacos cumplen los valores máximos admisibles de transmitancia térmica ( $K_{adm} \text{ muros} = 0,74 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Las aberturas verifican los valores de transmitancia y Factor de Exposición Solar: Vidrio simple con cortinas de enrollar exteriores con  $K_{adm}$  de 2,8 W/m<sup>2</sup>K y Factor de Exposición Solar ( $F_{es}$ ) de 0,08 para las orientaciones Este y Oeste. No se registran transferencias térmicas por techo y piso porque la unidad está localizada en un piso intermedio, sin exposición de dichas superficies con el exterior.

### RESULTADOS

Se realiza una campaña de mediciones de la evolución de temperaturas interiores y el comportamiento térmico de la envolvente entre los días 15 de mayo y 15 de junio de 2024. Para tal fin, se instalaron 5 dispositivos marca Novus TagTemp USB, uno en cada local y en el exterior, de acuerdo a la ubicación en planta en figura 4, situados a 1m del nivel de piso, con registros cada hora. (Figura 6)



Figura 6: Puesta en marcha de la campaña de mediciones

Se presentan los registros del periodo completo donde se muestran las temperaturas exteriores suministradas por el Servicio Meteorológico Nacional (Rosario Aero) y la fluctuación de la temperatura interior. Se desprende que la variación de temperatura interior se encuentra en el 50% del período completo cercana al límite inferior de la zona de confort y dentro de la misma en el tiempo restante. (Figura 7)

Los valores de temperatura exterior son correlacionados con los obtenidos por la Estación Meteorológica del IFIR/CONICET (ubicado sobre la barranca del río Paraná), y SMN Rosario Aero (aeropuerto). Se visualiza que la temperatura exterior mínima registrada por el SMN (área suburbana) es de aproximadamente 8°C inferior a la medida en el área urbana densamente edificada mientras que para la temperatura exterior máxima dicho valor es de 3° C. Se detecta que la menor rugosidad de la superficie de las áreas suburbanas influye en mayores amplitudes térmicas diarias. (Figura 8).

En un trabajo anterior se analizó la relación entre la intensidad de la “isla de calor” denominado  $\Delta U-R$  (diferencia de temperaturas mínimas urbanas y rurales), y el tamaño de la ciudad (Oke 1983), donde se verificó la existencia del fenómeno de “isla de calor” en ese sector urbano. Se pudo corroborar que el  $\Delta U-R$  correspondiente a las temperaturas mínimas diarias del período de verano fue de 5,24° C mientras que para el período invernal es de 6.91° C. (Di Bernardo E. y Vazquez J. 1995). Nuevamente se constata la reducción del potencial de enfriamiento de la masa construida por la excesiva superficie pavimentada, por lo que no llega a enfriarse "totalmente" durante las horas de la noche.

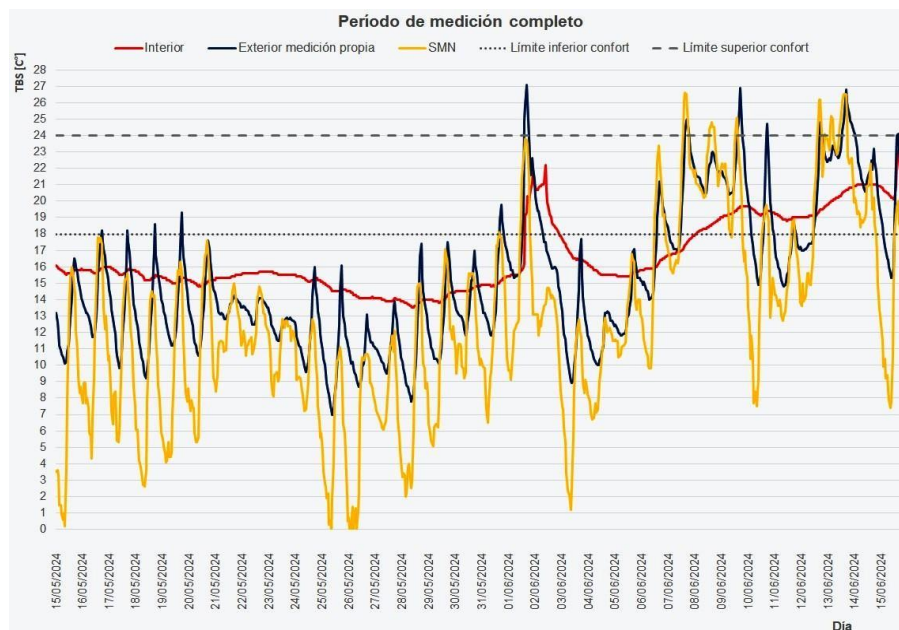


Figura 7: Periodo de medición completo y zona de confort

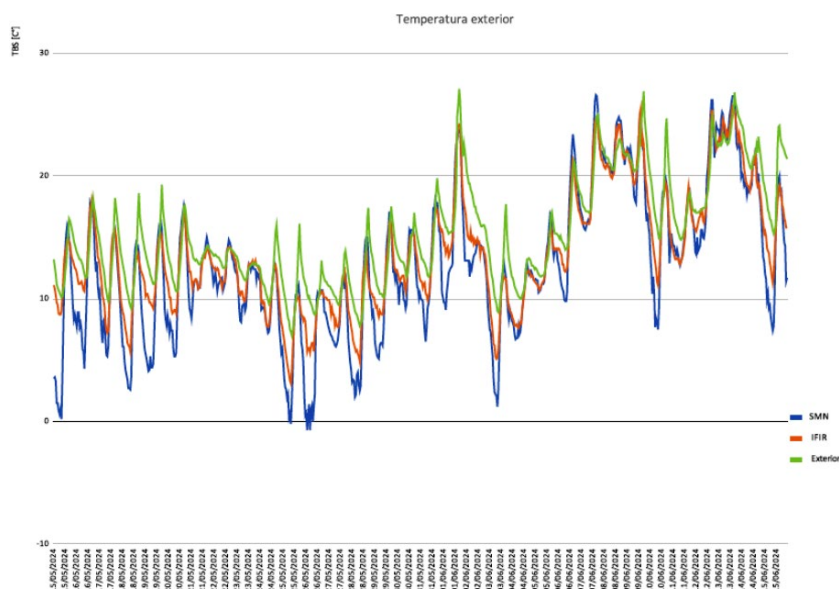


Figura 8: Comparación de temperaturas exteriores registradas en el departamento, SMN e IFIR

Se detectan evoluciones diversas de las temperaturas interiores con respecto a la zona de confort durante el invierno. Se correlaciona la evolución de temperaturas exteriores registradas por SMN Rosario Aero (área periurbana), por el IFIR/CONICET (área suburbana) y los relevados en el caso de estudio (área urbana). (Figura 9)

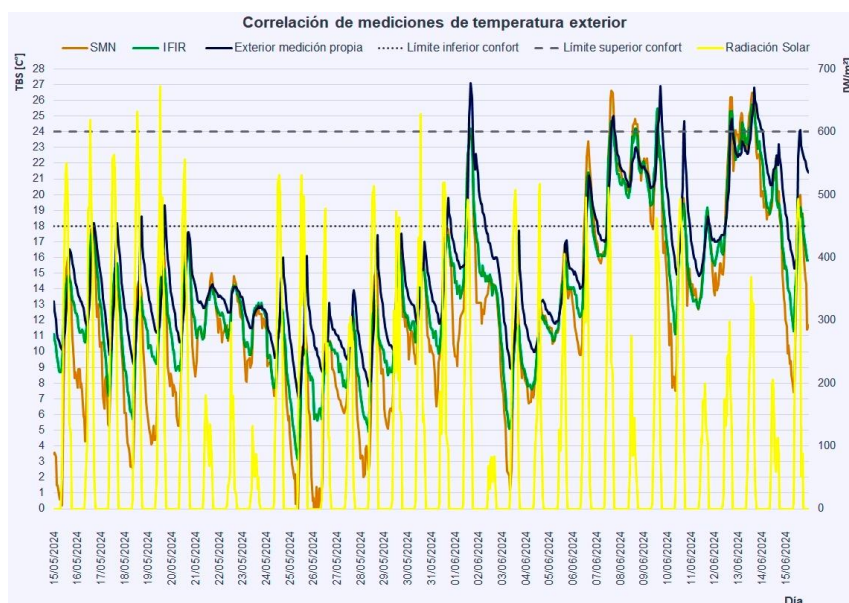


Figura 9: Comparación de datos de temperaturas exteriores registradas en el departamento, SMN e IFIR, radiación solar y zona de confort

Para una mayor comprensión de las amplitudes térmicas e influencia de la masa e inercia térmica se seleccionan dos períodos del registro total: a) valores de temperatura exterior e interior relativamente bajas, próximo al límite inferior de la zona de confort y, b) valores de temperaturas interiores dentro de la zona de confort.

a) **Período 1:** comprendido entre el 19 y 22 de mayo

Durante este período, la temperatura exterior mínima varía entre los 10,8°C y 13,5°C y la máxima entre los 14,2°C y 19,3°C. La radiación solar oscila entre 150 W/m<sup>2</sup> y 675 W/m<sup>2</sup>. De la confrontación de los datos se visualiza que las temperaturas interiores oscilan aproximadamente entre 14,9°C y 16°C. Se

verifica que las temperaturas interiores registradas se encuentran cercanas al límite inferior de la zona de confort ( $18^{\circ}\text{C}$ ), por lo cual, un escaso aporte de energía auxiliar sería suficiente para lograr condiciones adecuadas de habitabilidad interior. Esta situación obedece a la influencia de la inercia térmica, al retardo y amortiguamiento producido por el efecto de la masa térmica. (Figuras 10 y 11)

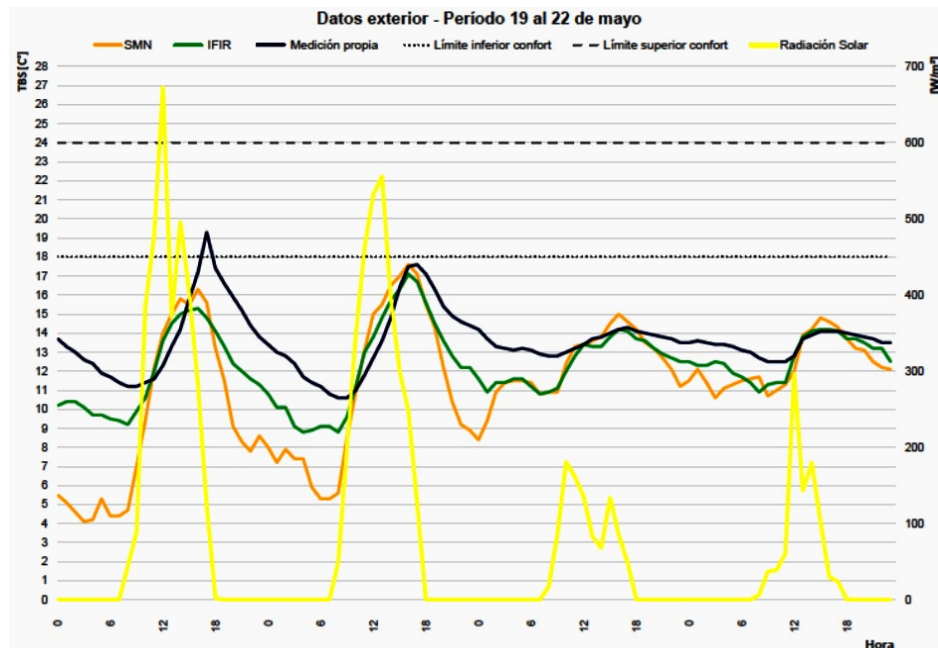


Figura 10: Datos climáticos exteriores según Rosario Aero, IFIR y mediciones propias.

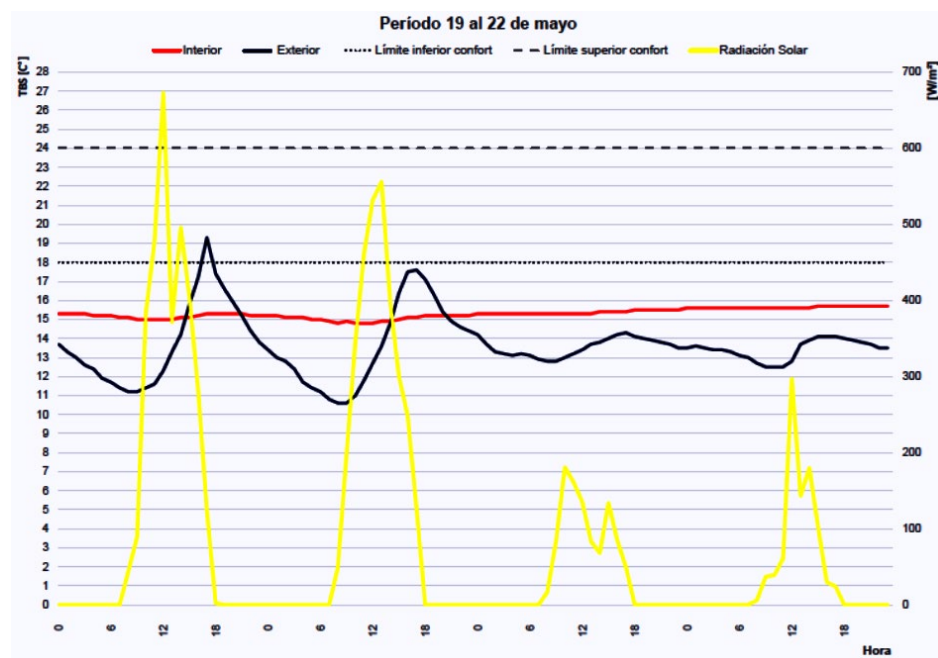


Figura 11: Evolución de radiación solar, temperatura exterior e interior

b) **Período 2:** comprendido entre el 31 de mayo y 6 de junio

Durante este período, la radiación solar oscila entre  $525\text{W}/\text{m}^2$  y  $75\text{W}/\text{m}^2$ , valores inferiores al analizado previamente. La temperatura exterior mínima varía entre los  $9^{\circ}\text{C}$  y  $11,9^{\circ}\text{C}$  y la máxima entre los  $17,9^{\circ}\text{C}$  y  $27^{\circ}\text{C}$ . Se verifica que las temperaturas interiores registradas se encuentran entre  $4$  y  $5^{\circ}\text{C}$  por encima del límite inferior de la zona de confort ( $18^{\circ}\text{C}$ ), durante los días 1 y 2 de junio. De la confrontación de los datos se visualiza que las temperaturas interiores oscilan entre  $14,9^{\circ}\text{C}$  y  $22,2^{\circ}\text{C}$ . (Figuras 12 y 13)



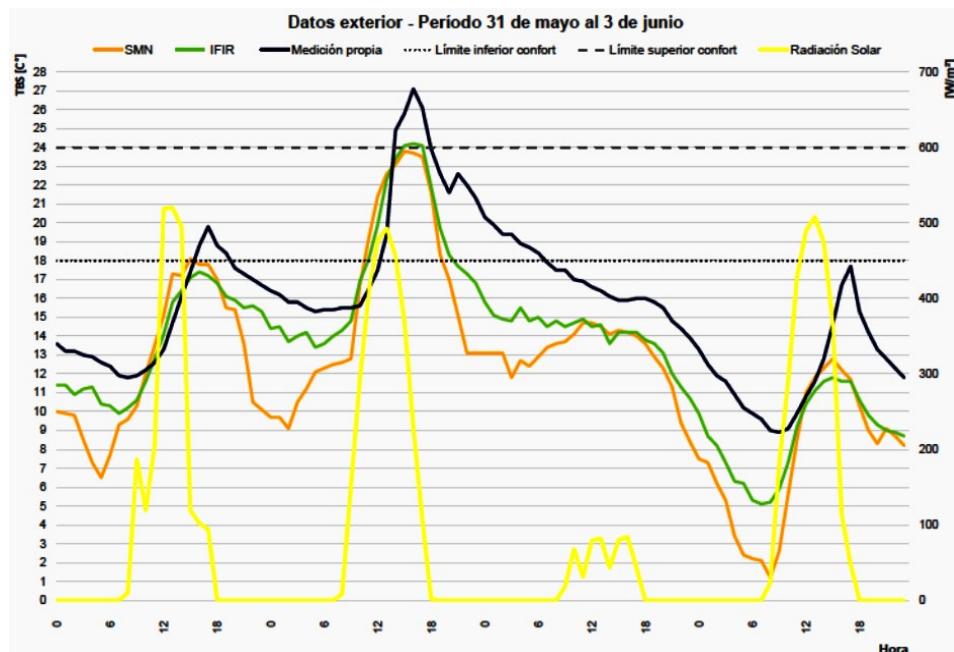


Figura 12: Datos climáticos exteriores según Rosario Aero, IFIR y mediciones propias.

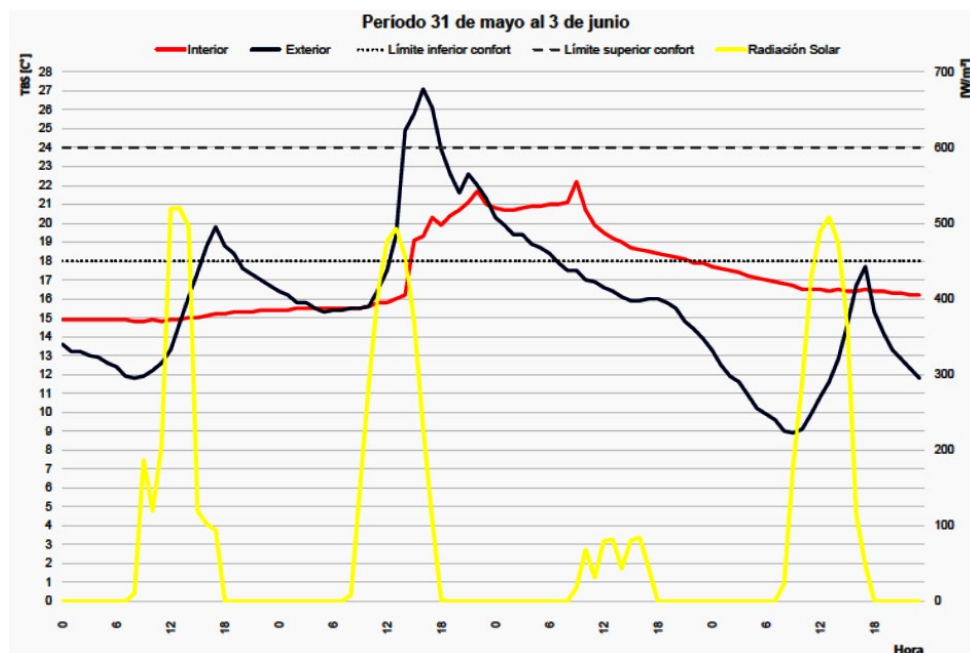


Figura 13: Evolución de radiación solar, temperaturas exteriores e interiores

## CONCLUSIONES

El indispensable ahorro energético ante el acelerado agotamiento de los recursos, la reducción de costos de funcionamiento edilicio en el marco de la crisis económica actual, la optimización de las condiciones de habitabilidad, asociadas al acondicionamiento térmico en el contexto del calentamiento global, se evidencian como propósitos indiscutibles para una adecuada relación sociedad y naturaleza.

La Municipalidad de Rosario cuenta con una herramienta normativa que aporta concretamente al logro de estos objetivos, como queda explicitado en el presente estudio. La Ord. 8757 es de carácter prescriptivo, es decir, implementa el control indirecto de la demanda energética de los edificios mediante la limitación de los parámetros característicos de los cerramientos que componen su envolvente. Es de destacar que esta Ordenanza fue pionera y ejemplo para el diseño de normas de eficiencia energética en otras ciudades argentinas. La misma ha sido progresivamente “ajustada” para facilitar su cumplimiento

por parte de los agentes constructores, respecto de la disponibilidad de distintos tipos de carpinterías, vidriados con diferentes prestaciones y nuevos materiales opacos en el mercado local, factores estos que condicionan los resultados de su aplicación.

Si se focaliza en las modalidades de densificación y extrema compactación en el Área Central, se desprende que en las tipologías de envolventes edilicias más “representativas”, son los planos verticales los que cobran protagonismo en relación a los horizontales. Por tal motivo, las envolventes han de ser analizadas en cuanto al factor de forma, la resistencia térmica, la exposición solar, las protecciones, las orientaciones, para luego evaluar el comportamiento higrotérmico interior y por ende su demanda energética. De allí que, un adecuado manejo de la piel del edificio es sin dudas la estrategia pasiva más eficiente desde el punto de vista energético. Estimar que, la implementación de sistemas activos de energías renovables representa la solución para una transición energética en entornos urbanos, sin antes optimizar el diseño ambientalmente consciente, conlleva a una simplificación.

Los casos de estudio son útiles para analizar las distintas variables involucradas en el proceso de construcción y funcionamiento de edificios, relacionadas con la tecnología, el potencial de ahorro energético, el mercado inmobiliario, y las respuestas implementadas por la industria de la construcción; y las relativas a las políticas públicas en materia urbanística y habitacional, mediante las cuales se establecen los criterios y las pautas que orientan los procesos de construcción del Hábitat.

El análisis realizado permite corroborar la importancia del incremento de la resistencia térmica como estrategia pasiva de confort interior y ahorro de energía y su incidencia en lograr condiciones de habitabilidad con mínimo aporte de energía auxiliar. Se prevé continuar con las campañas de mediciones para otras tipologías edilicias y en período estival para cuantificar la demanda energética en las construcciones como alternativa para la mitigación de las causas y efectos del cambio climático y como herramienta para la eficiencia ambiental urbana y arquitectónica.

#### **FUENTES DE FINANCIAMIENTO:**

Los sensores Novus TagTemp USB utilizados durante la campaña de mediciones fueron adquiridos con subsidios otorgados por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNR al proyecto de investigación PID-UNR "Eficiencia Ambiental Urbana y Edilicia. Uso de suelo, habitabilidad y consumo de energía en sectores urbanos y edificios de la ciudad de Rosario" radicado en el CEAH, FAPyD, UNR.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen especialmente al Ing. Federico Mateo, integrante del Instituto de Física Rosario, (IFIR/CONICET) por el acceso a los datos climáticos de la correspondiente Estación Meteorológica.

#### **REFERENCIAS**

- Di Bernardo, E. (2009) “Variables a considerar en la función de eficiencia ambiental de las tecnoestructuras del hábitat”. IV Jornadas de la Asociación Argentina Uruguaya de Economía Ecológica ASAUEE, CD ROM ISBN 978-987-22038-4-9, Universidad Nacional de General Sarmiento, Buenos Aires 1ª ed.
- Di Bernardo, E., (2013) “Propuesta para establecer un patrón de referencia de eficiencia ambiental urbano-edilicia”. Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 1, pp. 05.97-05.104, 2013, ISBN 978-987-29873-0-5, Argentina.
- Di Bernardo E. (2015), “La producción del hábitat humano en el contexto actual.”, N° 03, Facultad de Arquitectura, Planeamiento y Diseño, Universidad Nacional de Rosario, Argentina, págs. 114-119, Ed. Revista A&P Continuidad.
- Di Bernardo, E. y Vazquez, J. (1995). Influencia de la masa térmica en la evolución de temperaturas urbanas. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente - AVERMA, (1), 59–66. Recuperado a partir de <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/2655> 18va. Reunión de

- trabajo de ASADES, Actas Tomo I Sección 04. Radiación solar y clima, pp 59-66, San Luis, Octubre de 1995.
- Mosconi P., Bracalenti L., Vazquez J., Perone D., Graziani M., Duca M. y Nocioni F., (2022) “Análisis de los efectos directos de la implementación de la Ordenanza 8757. Transiciones energéticas en el parque construido de Rosario”, Creta XII, CONGRESO REGIONAL DE TECNOLOGÍA EN ARQUITECTURA: “Desafíos de las Tecnologías en Arquitectura. Diseño, Trabajo y Ambiente”. XII Congreso Regional, FAPyD, UNR, <https://creta.fapyd.unr.edu.ar/>
- Mosconi P., Bracalenti L., Omelianiuk S. y Vandale J. (2012) “Tendencias arquitectónicas en el Área Central de la ciudad de Rosario: Exploración de los impactos ambientales”, 1er. Congreso Latinoamericano de Ecología Urbana, ISSN: 978-987-28177-0-1, pp. 1398-1406, UNGS, Argentina.
- Mosconi, P.; Bracalenti L., Perone D.; Vazquez J.; Mateos L.; Graziani M.; Duca M., Nocioni F., Cremonte J. y Giaccone M. (2021) “Estudio preliminar del efecto de la normativa vigente para la limitación de la demanda energética en edificios de la Ciudad de Rosario, Argentina”, XXXIX ENCUENTRO ARQUISUR - XXIV CONGRESO ARQUISUR, Santiago - Chile, ISBN 978-987-754-290-5, (Modalidad Virtual), pp. 1435/1447, <http://arquisur.org/congreso-2021>
- Municipalidad de Rosario, Ordenanza 8757/2011 “Aspectos Higrotérmicos y Eficiencia Energética de las Construcciones”. Disponible en: <https://www.rosario.gob.ar/normativa/ver/visualExterna.do?accion=verNormativa&idNormativa=75004>
- Oke T. R. (1984) "Urban Climatology and the Tropical City: an introduction"; Proc. of the Technical Conference "Urban Climatology and its application with special regards to tropical areas", WMO, Mejico, Nov. 1984, pp. 1-25.
- Samaja, J. (1993). “Epistemología y Metodología. Elementos para una teoría de la investigación científica”. Ed. Eudeba.
- Seffino R., Cortés A., Di Bernardo E, Pisani A, Mosconi, P. y Vazquez J. (2011) “Incorporación de aspectos higrotérmicos y demanda energética de las construcciones en Ordenanza Municipal de Rosario. Verificación de su aplicación en un edificio en altura del Área Central”, Vol. 15 Año 2011 ISSN 0329-5184, XXXIV Reunión de Trabajo de la Asociación de Energías Renovables y Ambiente. XX Encuentro de la Sección Argentina de la Asociación Internacional para la Educación en Energía Solar, Santiago del Estero, Argentina.

## **ANALYSIS OF INTERIOR TEMPERATURES IN WINTER PERIOD IN A HIGH-RISE HOUSING BUILDING COMPLYING ENERGY EFFICIENCY STANDARDS IN ROSARIO, ARGENTINA**

### **ABSTRACT**

The analysis of interior temperature behavior in winter period of an apartment located in a high-rise building of the Central Area Rosario city, Argentina, is presented. Building construction complies with the requirements of Ordinance 8757 that restricts energy demand in Rosario City. Building envelope corresponds to a dwelling between party walls, east-west facades and a balcony. The unit is cross-ventilated and unoccupied, then, there is no contribution of sensible and latent heat to the interior space. Temperature variations and thermal inertia incidence on indoor comfort conditions are analyzed. These values are compared with the data provided by the National Meteorological Service (Rosario Airport) and those collected by Rosario Physics Institute (IFIR, CONICET). Temperature and solar radiation records are contrasted with periurban, suburban and urban areas. Building envelope optimization can be considered as an effective passive strategy. This study demonstrates that interior comfort conditions can be achieved by increasing thermal resistance in new constructions over 300 m<sup>2</sup> according to ordinance mandatory character.

**Keywords:** interior temperatures, comfort, norms, energy efficiency, building.



## **MATERIALES AISLANTES TÉRMICOS NO CONVENCIONALES: UN ANÁLISIS DEL MICELIO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE EN LA CONSTRUCCIÓN**

**Maira Terraza<sup>1</sup>, Noelia Alchapar<sup>1</sup>, Ayelén Villalba<sup>1</sup>, Pablo Postemsky<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

<sup>2</sup>Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS) – CONICET/UNS  
e-mail: [mterraza@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:mterraza@mendoza-conicet.gob.ar)

**RESUMEN:** El presente estudio explora la viabilidad de materiales aislantes térmicos no convencionales, con un enfoque específico en aquellos basados en micelio, en el contexto de la transición hacia prácticas constructivas más sostenibles. La investigación revisa el desempeño térmico de materiales aislantes no convencionales y emergentes, revelando que los materiales basados en micelio ofrecen propiedades térmicas comparables o superiores a las de los aislantes convencionales como la lana de vidrio y el poliestireno expandido, con una reducción en el impacto ambiental. Los biomateriales a base de micelio, producidos a partir de residuos agroindustriales, presentan una conductividad térmica competitiva. Los resultados sugieren que estos materiales son una alternativa viable para mejorar la sostenibilidad en la construcción, alineándose con las tendencias actuales en la bioeconomía y la gestión de recursos.

**Palabras clave:** Aislantes térmicos, construcción sostenible, eficiencia energética, bioeconomía, materiales a base de micelio, materiales no convencionales

### **INTRODUCCIÓN**

La transición energética ha emergido como un imperativo global en respuesta al cambio climático y la necesidad de garantizar la sostenibilidad energética a largo plazo. A nivel mundial, en 2021, el sector edilicio representó el 30% del consumo mundial de energía final y el 27% de las emisiones totales del sector energético. Con una huella de carbono distribuida en: 8% en el uso de combustibles fósiles, 19% en la generación de electricidad y calefacción y 6% en la manufactura de materiales de construcción (IEA - Agencia Internacional de Energía, 2022). Es por esto que la industria de la construcción se encuentra en un punto de inflexión, la creciente demanda de vivienda sumada al agotamiento de los recursos naturales y las preocupaciones ambientales, exigen soluciones innovadoras. (Madurwar *et al.*, 2013; Mouton *et al.*, 2023; Sartori y Hestnes, 2007)

En Argentina, el sector edilicio demanda el 36% de los recursos, ubicándose como el sector con mayores consumos del total de la energía primaria y secundaria destinada a consumo final (sin incluir los usos no energéticos) (Ministerio de Economía, 2022). El 27% de los mencionados consumos corresponde a destino residencial. En este contexto, dos de los pilares fundamentales que se plantean actualmente en el país desde la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) son la edificación sostenible y el uso racional y la eficiencia energética (CNEA, 2024). En este contexto, la IEA llama a disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> vinculadas al funcionamiento y la construcción de edificios, haciendo foco sobre las envolventes edilicias como medida de ahorro energético, priorizando el uso de tecnologías flexibles, más eficientes y limpias, especialmente en las estrategias de acondicionamiento térmico. La inclusión de aislamiento térmico disminuye hasta en un 35% el consumo energético en edificios en su etapa de uso (Alchapar y Correa, 2015; Sadineni *et al.*, 2011). Si bien los materiales aislantes de mayor uso, como lana de vidrio, lana de roca, poliestireno expandido y poliuretano, son eficientes desde el punto de vista termo-acústico, su producción supone una importante fuente de contaminación a la atmósfera

(Ajabli *et al.*, 2023; Albir Ribera *et al.*, 2021). En consecuencia, se está avanzando cada vez más en el desarrollo de propuestas de aislamiento térmico con enfoque sustentable.

En este marco, el objetivo de este estudio es analizar las propiedades de los materiales aislantes térmicos no convencionales, focalizando en los materiales basados en micelio. Se propone un análisis comparativo del desempeño térmico de los mismos. Este trabajo forma parte inicial de un plan de beca doctoral financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET): “Desarrollo y caracterización de sistemas aislantes termo-acústicos edilicios a partir de biomasa de residuos vitivinícolas bioligada con micelio de hongos”.

## METODOLOGÍA

Este trabajo consta de una revisión de materiales aislantes no convencionales. Se llevó a cabo un relevamiento de dichos materiales disponibles en el mercado y de bibliografía de investigaciones recientes, con aplicación en la industria de la construcción. Dentro de este grupo se hizo especial hincapié en los basados en micelio.

La búsqueda bibliográfica incluyó literatura académica, catálogos de empresas fabricantes de aislantes ecológicos y bibliografía gris, la cual incluye patentes, informes técnicos y catálogos entre otras. Se utilizaron en los motores de búsqueda palabras claves en inglés y en español y operadores booleanos de búsqueda: “insulation materials” AND “unconventional” OR “sustainable” OR “novel” AND “building” OR “construction”; “aislante” OR “aislamiento” AND “sostenible” OR “ecológico” “no convencional”. En la búsqueda específica de materiales basados en micelio se utilizaron como palabras claves “mycelium” OR “fungus”/“fungi”/“fungal” AND “biocomposites”/ “composites” OR “foam”, AND “building” OR “construction” OR “thermalinsulation”.

Se utilizó como criterio de inclusión a la base de datos, aquellas fuentes que reportan información sobre densidad y conductividad térmica de los aislantes. Adicionando, que su objetivo fuese la aplicación en la industria de la construcción. Esta restricción resultó especialmente importante en el caso de los biocompuestos de micelio, debido a la gran variedad de aplicaciones que están siendo investigadas. Además, se incluyó la búsqueda de tipologías de construcción en seco en las cuales se estén aplicando estos nuevos materiales o bien sea viable su implementación.

## RESULTADOS

En la búsqueda de alternativas sostenibles y eficientes para la construcción, los materiales aislantes no convencionales se presentan como un recurso cada vez más implementado e investigado para favorecer la transición hacia métodos de construcción más respetuosos con el medio ambiente. Se los considera *no convencionales* por no ser comercializados masivamente o bien por encontrarse en una etapa de prototipo o pre-comercial, en muchos casos sus propiedades se encuentran en estudio para lograr mejores resultados antes de ser introducidos al mercado. Estos productos suelen ser fabricados utilizando fuentes naturales u obtenidos de las industrias de procesamiento. Otras fuentes incluyen productos reciclados o subproductos de plantas industriales (Asdrubali *et al.*, 2015; Schiavoni *et al.*, 2016)

Los materiales derivados de fuentes recicladas y naturales, como la celulosa, las lanas naturales, y residuos agroindustriales, no solo prometen una reducción significativa en la huella de carbono, sino que también ofrecen propiedades térmicas y mecánicas comparables o superiores a los materiales aislantes tradicionales como por ejemplo la lana de vidrio y el poliestireno expandido (EPS). El uso de papel reciclado, fibras de cáñamo, y la recuperación de tecnologías como las lanas de oveja, entre otros, ha demostrado ser efectivo en la creación de soluciones de aislamiento térmico. Además, en diversos países se está promoviendo desde grupos de investigación la integración de residuos agrícolas en materiales de construcción como parte de estrategias para manejar estos desechos de una forma menos nociva para el medio ambiente (Asdrubali *et al.*, 2015; Madurwar *et al.*, 2013; Sangmesh *et al.*, 2023) En este escenario, a nivel nacional se están desarrollando diversas tecnologías innovadoras para aprovechar residuos e implementarlos en sistemas constructivos. Un ejemplo de esto es el “sistema constructivo 3C”, un sistema conformado por PET reutilizado que actualmente cuenta con aprobación para su implementación en distintas localidades, entre ellas la Ciudad de Mendoza (Ciudad de Mendoza,

2024). Otros desarrollos en relación a esta temática son, por un lado, las tejas de caucho reciclado utilizando NFU - Neumáticos Fuera de Uso diseñados por (Sánchez Amono *et al.*, 2021) y por otro lado ladrillos de PET reciclado y tableros aglomerados de plásticos (Gaggino y Arguello, 2014), todos desarrollados en el Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE). Estos últimos no se incluyeron en la base de datos por no ser específicamente materiales aislantes.

En línea con lo mencionado, durante esta última década ha emergido una tendencia hacia el desarrollo de tecnologías de biofabricación que implican la utilización de microorganismos vivos ya sea como materia prima o como parte del proceso de producción. Un ejemplo de ello es el empleo de diversas especies de hongos que se alimentan de desechos orgánicos, utilizando el micelio resultante como material inerte luego de una etapa de postprocesado. Esto proporciona otra alternativa para procesar las fibras naturales mediante el metabolismo propio de los hongos. En este relevamiento se recopilieron datos de 48 materiales “no convencionales” en sus diferentes presentaciones, obteniendo una muestra (n) de 72. Del total del relevamiento, 23 son materiales desarrollados a base de micelio (*micomateriales*). (Tabla 1)

*Tabla 1. Materiales aislantes no convencionales. Fuente: elaboración propia*

| MATERIAL                                              | DENSIDAD<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) | k<br>W/mK | TIPO                       | PAÍS DE<br>ORIGEN | MARCA / AUTOR                     |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------|----------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Algodón                                               | 30                               | 0,034     | Fibras naturales vegetales | España            | Abriga Nature (2024)              |
|                                                       | 40                               | 0,033     | Fibras naturales vegetales | España            | Abriga Nature (2024)              |
|                                                       | 50                               | 0,033     | Fibras naturales vegetales | España            | Abriga Nature (2024)              |
|                                                       | 60                               | 0,032     | Fibras naturales vegetales | España            | Abriga Nature (2024)              |
| Cáñamo                                                | 37                               | 0,039     | Fibras naturales vegetales | Países Bajos      | Hempflax (2024)                   |
|                                                       | 40                               | 0,04      | Fibras naturales vegetales | España            | Cannabric (2024)                  |
| Cáñamo + aglomerantes +<br>cascarillas                | 30                               | 0,048     | Fibras naturales vegetales | Austria           | Korjenic <i>et al.</i> (2011)     |
|                                                       | 82                               | 0,039     | Fibras naturales vegetales | Austria           | Korjenic <i>et al.</i> (2011)     |
| Cáñamo + poliéster                                    | 20                               | 0,039     | Materiales compuestos      | España            | Logrotex (2024)                   |
| Cascarilla de arroz bioligado con<br>fibras vegetales | 195                              | 0,065     | Fibras naturales vegetales | Colombia          | Cadena y Bula (2002)              |
|                                                       | 150                              | 0,046     | Fibras naturales vegetales | Tailandia         | Panyakaew <i>et al.</i><br>(2008) |
|                                                       | 175                              | 0,056     | Fibras naturales vegetales | Tailandia         | Panyakaew <i>et al.</i><br>(2008) |
| Celulosa                                              | 34                               | 0,035     | Fibras naturales vegetales | Argentina         | CelulosaPro (2024)                |
|                                                       | 55                               | 0,039     | Fibras naturales vegetales | Argentina         | CelulosaPro (2024)                |
|                                                       | 33                               | 0,039     | Fibras naturales vegetales | Argentina         | Magoal (2024)                     |
|                                                       | 60                               | 0,04      | Fibras naturales vegetales | Argentina         | Magoal (2024)                     |
|                                                       | 62                               | 0,042     | Fibras naturales vegetales | Argentina         | Magoal (2024)                     |
| Celulosa + PET + Algodón                              | 38                               | 0,036     | Materiales compuestos      | España            | Logrotex (2024)                   |
| Colchones radiculares de avena y<br>cebada            | 130                              | 0,035     | Fibras naturales vegetales | Chile             | Rootman (2024)                    |
| Corcho expandido negro                                | 130                              | 0,04      | Fibras naturales vegetales | España            | Cannabric (2024)                  |
| Corcho natural                                        | 190                              | 0,042     | Fibras naturales vegetales | Italia            | Artimestieri (2024)               |
|                                                       | 150                              | 0,042     | Fibras naturales vegetales | Italia            | Artimestieri (2024)               |
|                                                       | 140                              | 0,043     | Fibras naturales vegetales | España            | Abriga Nature (2024)              |
| Fibra de cáñamo y Kenaf                               | 80                               | 0,038     | Fibras naturales vegetales | Italia            | Artimestieri (2024)               |
|                                                       | 40                               | 0,035     | Fibras naturales vegetales | Italia            | Artimestieri (2024)               |
| Fibra de coco                                         | 100                              | 0,043     | Fibras naturales vegetales | España            | Abriga Nature (2024)              |
| Fibra de coco + resina urea-<br>formaldehído          | 311                              | 0,076     | Materiales compuestos      | Tailandia         | Panyakaew <i>et al.</i><br>(2008) |
| Fibras de algodón                                     | 20                               | 0,037     | Fibras naturales vegetales | España            | Logrotex (2024)                   |
| Fibras de algodón + poliéster                         | 30                               | 0,034     | Materiales compuestos      | España            | Geopannel (2024)                  |
|                                                       | 40                               | 0,033     | Materiales compuestos      | España            | Geopannel (2024)                  |

|                                                                                                      |        |       |                              |                |                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|------------------------------|----------------|-------------------------------|
| Fibras de cáñamo + Fibras de algodón + Fibras de lino                                                | 30     | 0,038 | Fibras naturales vegetales   | España         | Cannabric (2024)              |
| Fibras de coco + poliéster                                                                           | 30     | 0,043 | Materiales compuestos        | España         | Logrotex (2024)               |
| Fibras de madera                                                                                     | 110    | 0,038 | Fibras naturales vegetales   | Alemania       | Gutex (2024)                  |
|                                                                                                      | 50     | 0,036 | Fibras naturales vegetales   | Alemania       | Gutex (2024)                  |
| Fibras textiles                                                                                      | 45     | 0,034 | Fibras sintéticas recicladas | España         | Geopannel (2024)              |
| Lana de ovino                                                                                        | 40,55  | 0,044 | Fibras naturales animales    | Argentina      | Zanovello, L. (2019)          |
|                                                                                                      | 30     | 0,032 | Fibras naturales animales    | Italia         | Artimestieri                  |
|                                                                                                      | 100    | 0,04  | Fibras naturales animales    | España         | Logrotex (2024)               |
| Lana de ovino + poliéster                                                                            | 13,5   | 0,04  | Materiales compuestos        | España         | Logrotex (2024)               |
|                                                                                                      | 20     | 0,04  | Materiales compuestos        | España         | Logrotex (2024)               |
| Lana de poliéster                                                                                    | 10     | 0,052 | Fibras sintéticas recicladas | Argentina      | Durlock (2024)                |
|                                                                                                      | 10     | 0,054 | Fibras sintéticas recicladas | Argentina      | Durlock (2024)                |
|                                                                                                      | 7,5    | 0,065 | Fibras sintéticas recicladas | Colombia       | Gyplac (2024)                 |
| Micelio ( <i>cepa no especificada</i> ) + paja, miscanthus y lino                                    | 97,1   | 0,051 | Materiales compuestos        | Países Bajos   | Koh <i>et al.</i> (2022)      |
| Micelio ( <i>Ganoderma lucidum</i> ) + arena de playa                                                | 205,3  | 0,07  | Materiales compuestos        | Alemania       | Schritt <i>et al.</i> (2021)  |
| Micelio ( <i>Ganoderma lucidum</i> ) + fibras de celulosa                                            | 373    | 0,085 | Materiales compuestos        | Países Bajos   | Gauvin <i>et al.</i> (2021)   |
| Micelio ( <i>Ganoderma lucidum</i> ) + paja de colza                                                 | 156    | 0,057 | Materiales compuestos        | Países Bajos   | Gauvin <i>et al.</i> (2022)   |
| Micelio ( <i>Ganoderma lucidum</i> ) + paja de trigo 10mm                                            | 134    | 0,053 | Materiales compuestos        | Turquía        | Gezer <i>et al.</i> (2024)    |
| Micelio ( <i>Ganoderma lucidum</i> ) + paja de trigo 10mm                                            | 137    | 0,052 | Materiales compuestos        | Turquía        | Gezer <i>et al.</i> (2024)    |
| Micelio ( <i>Ganoderma lucidum</i> ) + sustrato agotado                                              | 183,2  | 0,064 | Materiales compuestos        | Alemania       | Schritt <i>et al.</i> (2021)  |
| Micelio ( <i>Ganoderma resinaceum</i> ) + Miscanthus                                                 | 144,65 | 0,088 | Materiales compuestos        | Luxemburgo     | Dias <i>et al.</i> (2021)     |
| Micelio ( <i>Ganoderma resinaceum</i> ) + paja de trigo                                              | 57     | 0,081 | Materiales compuestos        | Reino Unido    | Xing <i>et al.</i> (2018)     |
| Micelio ( <i>Ganoderma sp.</i> ) + cáñamo                                                            | 120    | 0,039 | Materiales compuestos        | Estados Unidos | Ecovative (2024)              |
| Micelio ( <i>Hongo podr. Blanca de Alaska</i> ) + aserrín de abedul (5 mm)                           | 165    | 0,05  | Materiales compuestos        | Estados Unidos | Yang <i>et al.</i> (2017)     |
| Micelio ( <i>Hongo podr. Blanca de Alaska</i> ) + aserrín de abedul (5 mm)                           | 265    | 0,062 | Materiales compuestos        | Estados Unidos | Yang <i>et al.</i> (2017)     |
| Micelio ( <i>Hongo podr. Blanca de Alaska</i> ) + aserrín de abedul (5 mm) 4 semanas + de incubación | 160    | 0,05  | Materiales compuestos        | Estados Unidos | Yang <i>et al.</i> (2017)     |
| Micelio ( <i>Hongo podr. Blanca de Alaska</i> ) + aserrín de abedul (5 mm) 4 semanas + de incubación | 280    | 0,07  | Materiales compuestos        | Estados Unidos | Yang <i>et al.</i> (2017)     |
| Micelio ( <i>Megasporoporia minor</i> ) + paja de trigo                                              | 62     | 0,079 | Materiales compuestos        | Reino Unido    | Xing <i>et al.</i> (2018)     |
| Micelio ( <i>Oxyporus latermarginatus</i> ) + paja de trigo                                          | 51     | 0,078 | Materiales compuestos        | Reino Unido    | Xing <i>et al.</i> (2018)     |
| Micelio ( <i>Pleurotus arcularius</i> ) + aserrín de abedul                                          | 105    | 0,055 | Materiales compuestos        | Canadá         | Wimmers <i>et al.</i> (2022)  |
| Micelio ( <i>Pleurotus ostreatus</i> ) + paja de trigo 10mm                                          | 131    | 0,048 | Materiales compuestos        | Turquía        | Gezer <i>et al.</i> (2024)    |
| Micelio ( <i>Pleurotus ostreatus</i> ) + paja de trigo 10mm                                          | 141    | 0,051 | Materiales compuestos        | Turquía        | Gezer <i>et al.</i> (2024)    |
| Micelio ( <i>Trametes suaveolens</i> ) + aserrín de abedul                                           | 73,9   | 0,051 | Materiales compuestos        | Canadá         | Wimmers <i>et al.</i> (2022)  |
| Micelio ( <i>Trametes versicolor</i> ) + chips de cáñamo                                             | 99     | 0,04  | Materiales compuestos        | Bélgica        | Elsacker <i>et al.</i> (2019) |

|                                                         |     |       |                              |           |                               |
|---------------------------------------------------------|-----|-------|------------------------------|-----------|-------------------------------|
| Micelio ( <i>Trametes versicolor</i> ) + fibras de lino | 135 | 0,057 | Materiales compuestos        | Bélgica   | Elsacker <i>et al.</i> (2019) |
| Micelio ( <i>Trametes versicolor</i> ) + paja de trigo  | 94  | 0,042 | Materiales compuestos        | Bélgica   | Elsacker <i>et al.</i> (2019) |
| PET + Poliéster                                         | 12  | 0,068 | Fibras sintéticas recicladas | España    | Logrotex (2024)               |
|                                                         | 25  | 0,068 | Fibras sintéticas recicladas | España    | Logrotex (2024)               |
|                                                         | 83  | 0,068 | Fibras sintéticas recicladas | España    | Logrotex (2024)               |
| PET reciclado                                           | 213 | 0,053 | Fibras sintéticas recicladas | Argentina | Becerra y Busnelli (2021)     |
| Yute + poliéster                                        | 30  | 0,046 | Materiales compuestos        | España    | Logrotex (2024)               |

### ***Materiales no convencionales***

En general estos materiales no son buenos conductores del calor, presentan un valor medio de conductividad de 0,05 W/mK (Tabla 2) lo que los hace adecuados para ser aplicados como materiales aislantes, ya que de acuerdo a algunos autores son aceptables valores límites entre 0,07 y 0,05 W/mK para este tipo de aplicación (Ordoñez García, 2016; Sangmesh *et al* 2023). La densidad es una propiedad que presenta un elevado coeficiente de variabilidad (C.V.) (80%). Esta propiedad es una de las más ensayadas, debido a que es determinante en el comportamiento físico y mecánico de los materiales. Esta variabilidad evidencia el estado de desarrollo incipiente y la investigación en curso sobre los materiales, especialmente aquellos de origen natural. Estos materiales y sus propiedades intrínsecas (como la conductividad) aún están siendo investigados para optimizar su rendimiento en aplicaciones constructivas. Los estudios están enfocados en experimentar con diferentes composiciones, como las proporciones de fibras, combinaciones de materiales, tamaños de partículas y aplicaciones más o menos compactas, por ejemplo, y los procesos de producción para mejorar sus propiedades y su performance en este tipo de aplicaciones.

*Tabla 2. Estadísticos descriptivos de los materiales recopilados en Tabla 1. Fuente: elaboración propia*

| VARIABLE                      | n  | MEDIA | Desviación Estándar (D.E.) | C.V. (%) | MÍNIMO | MÁXIMO |
|-------------------------------|----|-------|----------------------------|----------|--------|--------|
| Conductividad (W/mK)          | 72 | 0,05  | 0,01                       | 29,34    | 0,03   | 0,09   |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 72 | 95,04 | 76,54                      | 80,54    | 7,5    | 373    |

Para facilitar el análisis, se agruparon los materiales en 4 categorías generales según su origen:

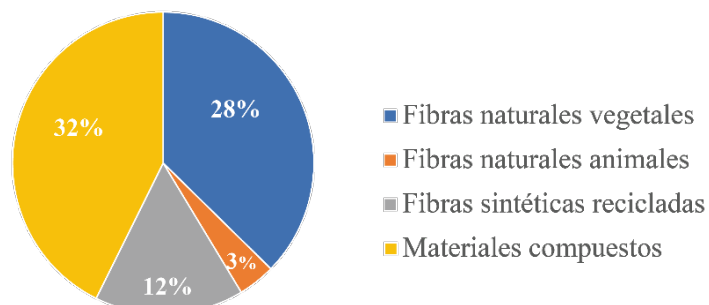
-*Fibras naturales vegetales*, donde se incluyeron los basados en algodón, arroz, cáñamo, celulosa, coco, corcho, fibras de madera y fibras naturales combinadas, como los paneles de yute+lino+cáñamo.

-*Fibras naturales animales*, en las que se incluye la lana de ovino

-*Fibras sintéticas recicladas*: compuesta por combinaciones de poliéster, poliestireno tereftalato (PET), y fibras textiles recicladas

-*Materiales compuestos*: en esta categoría se incluyen los biocompuestos a base de micelio y materiales que combinan fibras naturales con fibras sintéticas.

El mayor porcentaje de los materiales relevados está conformado por materiales compuestos (32%) (Figura 1), como se mencionó anteriormente, esta categoría también incluye fibras naturales vegetales, ya sea como sustrato para proveer la matriz de crecimiento (en el caso de los micomateriales) o en combinación con fibras sintéticas. En general, las fibras naturales son utilizadas como aditivos para materiales tradicionales de construcción, como el concreto y el poliéster, para mejorar sus propiedades térmicas.



*Figura 1: Categorización de materiales de Tabla 1 según su origen. Fuente: elaboración propia.*

El siguiente porcentaje más alto (28%) está dado por las fibras naturales vegetales, en línea con la tendencia de revalorizar residuos agroindustriales. Esto aporta a las economías regionales dado que en cada territorio se busca aprovechar los residuos generados en la producción local. Estudios realizados en países asiáticos, por ejemplo, buscan aprovechar los residuos de la producción del arroz (cascarilla) (Panyakaew *et al*, 2008). Si tenemos en cuenta la presencia de fibras naturales en ambas categorías -*fibras naturales vegetales y materiales compuestos*-, se puede afirmar que el 60% de los materiales relevados en este estudio están compuestos por esta materia orgánica de origen lignocelulósico, reforzando la tendencia de producción de materiales de construcción sostenibles de origen vegetal.

A pesar de que las fibras naturales como materia prima pueden obtenerse a bajo costo en los lugares donde son producidas, por ser principalmente residuos agrícolas, unos de los puntos débiles de este tipo de materiales son los elevados costos de producción y los precios de comercialización respecto a los materiales tradicionales. Esta diferencia se atribuye al incipiente desarrollo industrial que poseen los métodos productivos (Kumar *et al.*, 2020; Sangmesh *et al*, 2023). Otro de los puntos débiles es que suelen mostrar una mayor sensibilidad a la humedad en relación a los materiales convencionales, pues son más higroscópicos que los derivados del petróleo y minerales cementicios (Abu-Jdayil *et al.*, 2019; Korjenic *et al.*, 2011).

Respecto a la categoría *fibras naturales animales* el único material que se detectó en la búsqueda fue la lana de ovino. Esta posee características físicas ventajosas como su capacidad higrotérmica y su alta resistencia mecánica. Esto sumado a su baja demanda energética y emisiones de carbono durante su producción la convierten en una excelente alternativa de aislamiento sostenible para la construcción.(Zanovello y Cardoso, 2019; Kumar *et al*, 2020). Es uno de los materiales más eficientes relevados (Tabla 1) registrando el valor más bajo de k de la muestra analizada (0,032 W/mK).

En el caso de las *fibras naturales vegetales* se observa que el algodón iguala el valor mínimo de k que posee la lana de ovino. Este material presenta valores de k en un rango entre 0,032 y 0,038 W/mK (Tabla 1). Estos últimos resultados son menores a los relevados por Asdrubali *et al* (2015) y Kumar *et al* (2020) (0,039-0,044 W/mK) y pertenecen en su totalidad a paneles aislantes que se comercializan actualmente en el mercado europeo. La conformación de estos paneles está dada por fibras de algodón puro obtenido como subproducto de esta industria (Logrotex, 2024). En algunos casos se utilizan en combinación con otras fibras poliméricas como las de PET y poliéster reciclado y en otros casos se encuentran presentes en los paneles conformados por fibras recicladas de desechos de la industria textil (Logrotex, 2024). Otro de los materiales destacados dentro de las fibras naturales es el cáñamo, siendo el material con más presencia en esta categoría, representando el 36% del total. Es una de las fibras naturales que cuenta con más adopción y difusión en el mercado de la construcción. La mayor cantidad de datos son obtenidos de empresas que comercializan subproductos de este cultivo para ser aplicados en esta industria. Con frecuencia es comercializado a granel, en formato ladrillo o bloque, en tableros y mantos (Artimestiéri, 2024; Cannabric, 2024). Además, en el conjunto de materiales analizados, el cáñamo se presenta como sustrato de producción de hongos en la categoría de materiales compuestos (Ecovative, 2024). Estos materiales presentan valores de k en el rango de 0,035 y 0,048 W/mK (Tabla 1). En estudios llevados a cabo por Sangmesh *et al*, 2023 y Schiavoni *et al*, 2016 se los ubica en un rango más amplio entre 0,038 y 0,06 W/mK. Cabe mencionar que algunas investigaciones han reportado que la fibra de cáñamo y la lana de oveja tienen un valor idéntico de conductividad térmica a una densidad dada. (Madurwar *et al.*, 2013; Schiavoni *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2020)

En este estudio se consideraron *materiales compuestos* los que combinan fibras de distintos orígenes y también los materiales biofabricados. Cuando se combinan las fibras naturales y sintéticas se da origen a un tipo de material llamado biocompuesto. En relación a esto se ha informado de una reducción del valor de conductividad térmica a medida que aumenta el contenido de fibras naturales en los paneles. (Sangmesh *et al* 2023). Los materiales biofabricados, como los basados en micelio fúngico, están conformados por materia prima vegetal unido biológicamente a través del crecimiento de organismos vivos. El micelio, la estructura vegetativa de los hongos, ha emergido como una posibilidad prometedora para la producción de nuevos materiales debido a su capacidad para crecer y consolidarse en una variedad de sustratos naturales, creando biocompuestos con buenas propiedades físicas. Estos tienen potencial para su aplicación como aislantes termoacústicos, presentando propiedades térmicas y

mecánicas similares a espumas como el EPS y tableros de madera, aunque varían significativamente dependiendo del hongo utilizado, el tipo de sustrato y su proceso de fabricación (Appels *et al.*, 2019; Feijóo-Vivas *et al.*, 2021; Girometta *et al.*, 2019; Jones *et al.*, 2020). Además, las tecnologías aislantes basadas en biomateriales miceliados incorporan baja energía en su producción, lo que las convierte en una alternativa relevante para promover el ahorro energético (Torres-Rivas *et al.*, 2021). Estos materiales presentan un amplio rango de conductividad con valores que van desde 0,033 W/mK a 0,88 W/mK (Tabla 1).

De forma general, al analizar los valores de  $k$  de toda la muestra, se observa que los datos atípicos de la Figura 2 (a) pertenecen en su totalidad a la categoría de materiales compuestos. Estos elevados valores de  $k$  pertenecen a biocompuestos a base de micelio, desarrollados por Gauvin *et al* (0,085 W/mK) y Dias *et al* (0,088 W/mK). Si bien los datos mencionados son de compuestos de micelio, esto solo representa el 9% del total de estos materiales analizados en este estudio (Tabla 1). Al observar los datos de densidad también se presentan datos atípicos (Figura 2b). Nuevamente se destacan como datos atípicos los reportados por Gauvin *et al*, 2022 (373 kg/m<sup>3</sup>) y se agregan los tableros de fibra de coco aglomerados con polímeros sintéticos (311 kg/m<sup>3</sup>). Además, este último también presenta valores de conductividad térmica por encima de la media aceptable para aislación: se reportan datos de  $k$  de 0,076 W/mK (Panyakaew *et. al*, 2008) (Tabla 1).

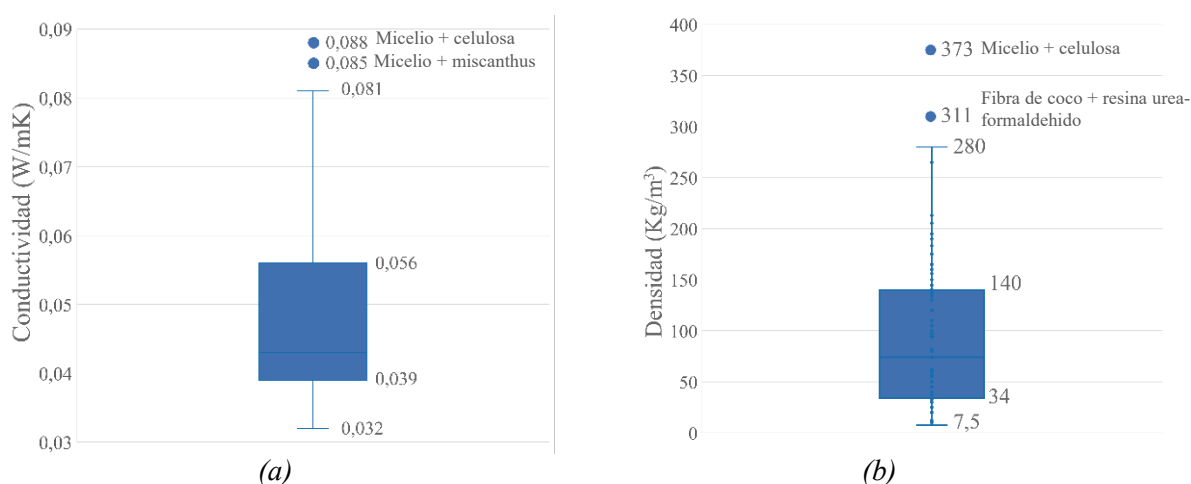


Figura 2: Box plot de materiales en Tabla 1. (a) Valores de conductividad, (b) Valores de densidad. Fuente: elaboración propia

Respecto al análisis de *materiales no convencionales*, excluyendo los biofabricados con micelio, se detecta que en general estos materiales presentan valores de conductividad baja, con una media de 0,04 W/mK (Tabla 3) y densidades bajas, con un valor medio de 71 kg/m<sup>3</sup>. El 58% posee valores de densidad en el rango de 30 a 100 kg/m<sup>3</sup>.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de los materiales no convencionales (sin micomateriales). Fuente: elaboración propia

| VARIABLE                      | n  | MEDIA | D.E. | C.V.(%) | MÍNIMO | MÁXIMO |
|-------------------------------|----|-------|------|---------|--------|--------|
| Conductividad (W/mK)          | 49 | 0,04  | 0,01 | 25,14   | 0,03   | 0,08   |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 49 | 70,89 | 64,2 | 90,57   | 7,5    | 311    |

### **Materiales a base de micelio**

#### **Estudio y tecnología de biomateriales fúngico.**

En la última década se ha incrementado el número de investigaciones y empresas con base tecnológica relacionadas a la producción de micomateriales, desarrollando protocolos de cultivo y proporcionando bases de datos con propiedades esperadas según la especie de hongo utilizada y el tipo de sustrato. Empresas pioneras como Ecovative (ecovative.com) y MycoWorks (mycoworks.com) patentaron en Estados Unidos los primeros procesos de producción de biomateriales fúngicos, en los años 2007 y 2013 respectivamente, utilizando sustratos a base de fibras flexibles (cáñamo, maíz y paja de cereales) obteniendo excelentes resultados respecto al comportamiento térmico y mecánico. Además, estas



empresas lograron industrializar el proceso productivo montando fábricas para producir a gran escala (Ecovative, 2024). En otras regiones, como Europa, el desarrollo de esta tecnología es incipiente a nivel comercial, pero en el ámbito académico es un tema de interés. Numerosas investigaciones han presentado avances significativos que respaldan su aplicabilidad. Recientemente, en el año 2023, Ecovative abrió el acceso a su patente al mercado europeo con el objetivo de fomentar la investigación y aplicación de este tipo de materiales. A nivel nacional, el desarrollo de esta tecnología está cobrando relevancia. Actualmente se están presentando los primeros resultados de mediciones realizadas a materiales producidos con tecnología local. Un ejemplo de esto es el desarrollo de paneles multicapas elaborados con micelio de hongos y residuos de cartón realizados en el CEVE por Fernández *et al.*, (2022), revalorizando residuos regionales reduciendo costos y distancias relacionadas a la logística.

Un aspecto fundamental, señalado por diversos investigadores, es la importancia de innovar en el proceso y los métodos de fabricación para optimizar los tiempos de producción (una de las debilidades del material) y la densidad final como característica principal del material resultante. En este sentido, el acondicionamiento del sustrato permite evaluar la colonización con distintos tamaños y formas de las partículas, las cuales tienen incidencia directa no solo en la apariencia final del material sino también en las propiedades mecánicas de estos biocompuestos (Attias *et al.*, 2019; Elsacker *et al.*, 2019; Jones *et al.*, 2020).

Existen diversas aplicaciones para estos materiales en las tecnologías constructivas actuales. Entre los desarrollos recientes, se destacan: el formato espumas (MBF por sus siglas en inglés, *mycelium based foams*), compuestos tipo sándwich (MBSCs) (Jiang *et al.*, 2016), y como placas realizadas mediante un proceso de prensado en frío y caliente (Appels *et al.*, 2019). En relación con esta última estrategia se reportan mejoras en las propiedades mecánicas, pero también conlleva un aumento en la densidad especialmente en el método de prensa caliente donde este valor se incrementa hasta tres veces. Dado que la densidad y la conductividad térmica están interrelacionadas, este método es adecuado cuando se busca optimizar la resistencia estructural, aunque puede no ser la mejor opción para mejorar las propiedades térmicas. No obstante, el prensado sigue siendo una metodología en estudio, con resultados que evidencian aplicaciones prometedoras.

En términos de propiedades térmicas, los biomateriales constituyen un escenario favorable respecto a su implementación en sistemas de aislación. En el review realizado por Jones *et al.* (2020) se registran valores de conductividad en un rango entre 0,04 y 0,18 W/mK. Estos antecedentes proporcionan una base sólida para continuar optimizando los protocolos de cultivo y las propiedades, ajustando características como la densidad y porosidad, las cuales tienen influencia directa en el comportamiento térmico de los materiales (Cortés-Cely, 2015; Cuitiño-Rosales *et al.*, 2019). En general, los micomateriales relevados en este estudio exhiben una conductividad térmica baja, lo que los convierte en eficientes aislantes térmicos con un valor medio de  $k$  de 0,06 W/mK (Tabla 4). Investigaciones realizadas por Ecovative presentan los valores de conductividad más bajos (0,039 W/mK). Elsacker *et al.* (2019) desarrollaron materiales aislantes basados en micelio con niveles de  $k$  similares (0,04 W/mK) (Tabla 1). Los valores detallados previamente y registrados en este trabajo demuestran que los micomateriales pueden alcanzar niveles de aislamiento térmico comparables a los de algunos aislantes tradicionales como el poliestireno expandido (0,037 W/mK) y la lana de roca (0,04 W/mK) (IRAM - Instituto Argentino de Normalización, 2002). Sumado a esto, utilizando como sustratos materiales que por sí mismos poseen buenas propiedades aislantes, por ejemplo, el cáñamo procesado en diversas granulometrías, se obtienen materiales con buen rendimiento, con valores de  $k$  de 0,04 W/mK en promedio (Tabla 1). Esto indica que las propiedades térmicas se ven influidas también por el tipo de sustrato.

Con una densidad media de 146 kg/m<sup>3</sup> los materiales de micelio son un 105 % más densos que el resto de los materiales del relevamiento (media: 71 kg/m<sup>3</sup>). El 56% de los micomateriales tienen densidades entre 90 y 160 kg/m<sup>3</sup>. Respecto a la conductividad se detectó un incremento del 50% (Tabla 4).

Tabla 4. Estadísticos descriptivos de los materiales a base de micelio. Fuente: elaboración propia

| VARIABLE                      | n  | MEDIA  | D.E.  | C.V. (%) | MÍNIMO | MÁXIMO |
|-------------------------------|----|--------|-------|----------|--------|--------|
| Conductividad (W/mK)          | 23 | 0,06   | 0,01  | 24,38    | 0,04   | 0,09   |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 23 | 146,48 | 76,47 | 52,21    | 51     | 373    |

Al analizar la conductividad térmica de los materiales miceliados en relación con los otros materiales de la muestra, se observa que el primer grupo presenta un rango de valores más amplio, alcanzando un máximo de 0,088 W/mK (Figura 3a) en comparación con 0,076 W/mK del segundo grupo (Figura 3b). El 75% de los materiales basados en micelio presentan niveles de  $k$  aceptables para un aislante térmico (inferiores a 0,07 W/mK), mientras que en el segundo grupo el 98% corresponde a valores de  $k$  inferiores a 0,07 W/mK. Cabe destacar que el rango de valores de  $k$  de materiales a base de micelio relevados en el presente estudio (0,039 - 0,088 W/mK) es menor que el declarado por Jones *et al.* (2020) (0,04 - 1,8 W/mK), lo cual pone en evidencia que esta tecnología ha sido mejorada en los últimos años.

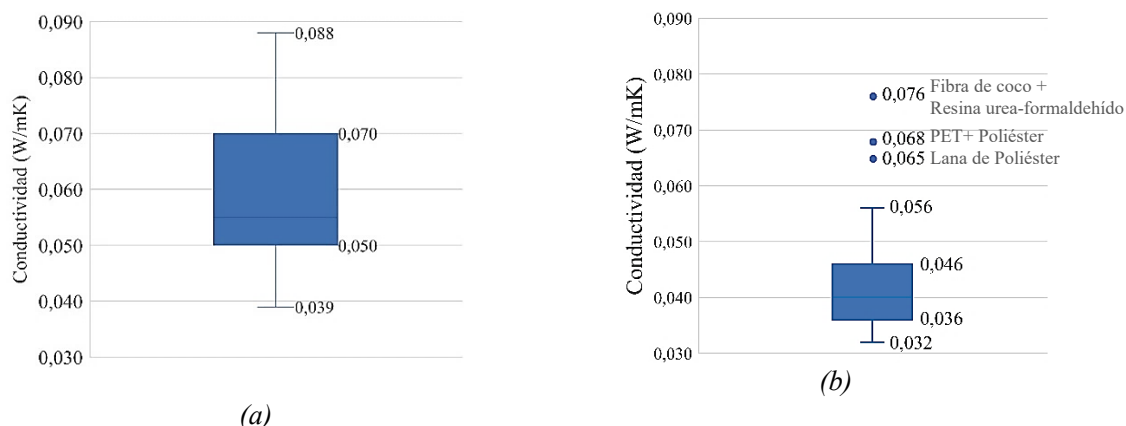


Figura 3: Box plot, Valores de conductividad (a) materiales a base de micelio (b) no convencionales (sin micelio). Fuente: elaboración propia

### Especies de hongos utilizadas en la producción de biomateriales

La producción de este tipo de materiales es realizada utilizando hongos de pudrición blanca como *Ganoderma*, *Pleurotus* y *Trametes*, y sus variantes de cepas. En coincidencia con relevamientos realizados por Aiduang *et al.*, 2022 la especie de mayor representatividad en este relevamiento es *Ganoderma*, el 43% de la muestra corresponde a este género. Esto sumado a su conocida velocidad de colonización superior a otros géneros favorece a su elección como la especie más viable para utilizar en la producción de aislantes térmicos entre las listadas.

Los hongos del género *Ganoderma* poseen condiciones que permiten que puedan ser cultivados en amplia variedad de sustratos, teniendo esto influencia en las propiedades finales del material resultante. El sustrato, su calidad y procesamiento es una variable determinante en el desempeño del material. Asimismo, los materiales fabricados con *Ganoderma* y cáñamo tienen la conductividad térmica más baja alcanzada (0,039 W/mK). Los compuestos realizados por Gezer y Kuştaş (2024) utilizando un sustrato liviano (paja de trigo) presentan valores de  $k$  de 0,052 W/mK a 0,053 W/mK y densidades de 134 y 137 kg/m<sup>3</sup>, mientras que Elsacker (2019) utilizando fibras de lino, obtuvo densidades similares (135 kg/m<sup>3</sup>) y valores de  $k$  de 0,057 W/mK con la especie *Trametes*. (Tabla 1)

Otra posibilidad de elaboración es la reutilización de sustrato de producción de otros hongos (sustrato agotado). Schrit (2021) realizó biocompuestos con sustrato agotado y sustratos de partícula más fina - arena de playa- con densidades de 183,2 kg/m<sup>3</sup> y 205,3 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Al presentar un formato de material más denso que los mencionados con anterioridad, obtuvo valores de  $k$  de 0,064 W/mK para el sustrato agotado y 0,070 W/mK para la arena de playa. Mientras que Dias *et al.*, (2021), utilizando fibras de *Miscanthus*, registró la conductividad más elevada de la muestra (0,088 W/mK), para valores de densidad de 144 kg/m<sup>3</sup>. Investigaciones realizadas por Yang *et al.*, (2017) presentan valores de  $k$  similares a los mencionados previamente (0,05 W/mK) con un hongo de podredumbre blanca originario de Alaska experimentando con los periodos de incubación. Se utilizó aserrín como sustrato, el cual genera una estructura más compacta en comparación a las fibras naturales utilizadas por otros autores. El material desarrollado registra una densidad de 160 kg/m<sup>3</sup>.

En este sentido, investigaciones recientes indican que es posible modificar las propiedades de estos materiales a través de herramientas de la biotecnología o bien mediante la adición de componentes estructurantes, por ejemplo, los materiales desarrollados con fibra (como la paja de trigo) son más resistentes mecánicamente (Appels *et al.*, 2019, Jones *et al.*, 2020). El comportamiento frente a la humedad en los materiales está influenciado por la calidad de la fibra: un mayor contenido de celulosa,

por ejemplo, aumenta la higroscopicidad, mientras que una mayor proporción de lignina y ceras de cubiertas vegetales lo hace más hidrofóbico. La biodegradación en el diseño incrementa la higroscopicidad al abrir las fibras, el micelio puede presentar un comportamiento higroscópico en el sustrato e hidrofóbico en la superficie expuesta al aire.

## CONCLUSIÓN

En general los materiales no convencionales presentan valores de conductividad térmica competitivos con nivel medio de  $k$  de 0,05 W/mK. Sin embargo, la mayoría de estos materiales aún enfrentan desafíos relacionados con los costos de producción y la sensibilidad a la humedad, factores que deben ser considerados al seleccionar materiales para aplicaciones específicas en construcción. En los últimos años se han incrementado las investigaciones de estas tecnologías, lo cual permite mejorar el desempeño y facilitar su adopción en el mercado. Específicamente de los materiales basados en micelio se observó que muestran un desempeño térmico competitivo con valores de conductividad dentro de un rango aceptable de 0,039 a 0,088 W/mK y una media de 0,06 W/mK. Se presenta como una alternativa efectiva que en los últimos años está logrando resultados cada vez más eficientes. Esto queda demostrado si comparamos el rango de valores de  $k$  presentado por Jones *et al.*, 2020 (0,04 - 1,8 W/mK) y el rango obtenido en este estudio (0,039 a 0,088 W/mK). Al utilizar residuos agroindustriales y aprovechar el crecimiento biológico de hongos, estos materiales reducen la dependencia de recursos no renovables. Además, el desarrollo del biomaterial con recursos regionales contempla dos aspectos de la bioeconomía: la oportunidad de generar valor agregado en origen y la posibilidad de reducir impactos en la huella de carbono asociados a la movilización de biomasa. El género *Ganoderma*, en particular, ha mostrado comportamiento eficaz en comparación a otras especies. No obstante, la variabilidad en sus propiedades influenciadas por la especie de hongo, el tipo de sustrato y los métodos de producción destaca la necesidad de continuar con investigaciones para optimizar las propiedades y procesos de fabricación.

## REFERENCIAS

- Abu-Jdayil, B., Mourad, A. H., Hittini, W., Hassan, M., y Hameedi, S. (2019). Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview. En *Construction and Building Materials* (Vol. 214, pp. 709-735). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.102>
- Abriga Nature. Aislamientos naturales y sostenibles. En *AbrigaNature*. Recuperado de <https://www.abriganature.com/aislamientos-naturales-y-sostenibles/> el 12 de junio de 2024.
- Aiduang, W.; Chanthaluck, A.; Kumla, J.; Jatuwong, K.; Srinuanpan, S.; Waroonkun, T.; Oranratmanee, R.; Lumyong, S.; Suwannarach, N. (2022) Amazing Fungi for Eco-Friendly Composite Materials: A Comprehensive Review. *J. Fungi* (Vol8, 842). <https://doi.org/10.3390/jof8080842>
- Ajabli, H., Zoubir, A., Elotmani, R., Louzazni, M., Kandoussi, K., y Daya, A. (2023). Review on Eco-friendly insulation material used for indoor comfort in building. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 185). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113609>
- Albir Ribera, A., Carlos Lerma, E., y Mas Tomás, A. (2021). Análisis de materiales sostenibles, ciclo de vida y su aplicación en la construcción. Universitat Politècnica de Valencia.
- Alchapar, N. L., y Correa, E. N. (2015). Comparison of the performance of different facade materials for reducing building cooling needs. *Eco-efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs: Design, Properties and Applications*, 155-194. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-380-5.00006-6>
- Appels, F. V. W., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., Jansen, K. M. B., Dijksterhuis, J., Krijgsheld, P., y Wösten, H. A. B. (2019). Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Materials & Design*, 161, 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.027>
- Artimestiéri. Panel de aislamiento térmico y acústico. En *Artimestiéri*. Recuperado de <https://store.artimestieri.com> el 10 de octubre de 2023
- Asdrubali, F., D'Alessandro, F., y Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
- Attias, N., Danai, o., Abitbol, T., Tarazi, E., Ezov, N., Pereman, I. y Grobman, Y. (2019) Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis, *Journal of Cleaner Production*, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119037>
- Busnelli, R., y Becerra, A. (2021). Caracterización de nuevos aislantes para envolventes arquitectónicas con materiales no tradicionales. *Revista Ingeniería De Obras Civiles*, 11(1), 14-24. <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/article/view/2778>

- Cannabric. Catálogo. En Cannabric. Recuperado de <http://www.cannabric.com/catalogo/> el 10 de octubre de 2023.
- Ciudad de Mendoza. (23 de mayo del 2024). *La ciudad aprobó un nuevo sistema de cerramiento sustentable*. Ciudad de Mendoza. Recuperado de <https://ciudaddemendoza.gob.ar/2024/05/23/la-ciudad-aprobo-un-nuevo-sistema-de-cerramiento-sustentable/> el 24 de mayo de 2024.
- Comisión Nacional de Energía Atómica. *Las 9 claves para la transición energética y tecnología nuclear*. Argentina.gob.ar. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/cnea/destacados/transicion-energetica-y-tecnologia-nuclear/las-9-claves-para-la-transicion> el 28 de junio de 2024.
- Cortés-Cely, O. (2015). Propiedades que definen los materiales resilientes en arquitectura. *Revista de Tecnología*, 14, 117-126.
- Cuitiño-Rosales, M. G., Rotondaro, R., y Esteves, A. (2019). Aportes para el análisis comparativo del comportamiento higrotérmico y mecánico de los materiales de construcción con tierra. *Revista de Arquitectura*, 22(1). <https://doi.org/10.14718/revarq.2020.2348>
- Dias, P. P., Jayasinghe, L. B., y Waldmann, D. (2021). Investigation of Mycelium-Miscanthus composites as building insulation material. *Results in Materials*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2021.100189>
- Ecovative. *Foams* en Ecovative. Recuperado de <https://www.ecovative.com/foams/> el 12 de mayo de 2024.
- Elsacker E, Vandeloock S, Brancart J, Peeters E, De Laet L, (2019). Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. *PLoS One*, 14(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213954>
- Feijóo-Vivas, K., Bermúdez-Puga, S. A., Hernán-Rebolledo, Figueroa, J. M., Zamora, P., y Naranjo-Briceño, L. (2021). Fungal mycelium-bioproducs development: A new material culture and its impact on the transition to a sustainable economy. En *Bionatura* (Vol. 6, Número 1, pp. 1637-1652). Universidad Católica del Oriente (UCO) <https://doi.org/10.21931/RB/2021.06.01.29>
- Fernández, N., Gaggino, R., Kreiker, J., y Positieri, M. J. (2022). Revalorización de residuos de cartón y papel para la producción de biopolímeros dentro del paradigma de economía circular con aplicación en el campo del hábitat. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 5(2), 2362-2369. <https://doi.org/10.34188/bjaerv5n2-076>
- Gaggino, R., y Arguello, G. R. (2014). Building components made from recycled plastics. *Key Engineering Materials*, 600, 615-627. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.600.615>
- Gauvin, F., Tsao, V., Vette, J., y Brouwers, H. J. H. (2022). Physical Properties and Hygrothermal Behavior of Mycelium-Based Composites as Foam-Like Wall Insulation Material. *Bio-Based Building Materials*, 1, 643-651. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/cta.1.643>
- Geopannel. Insulating boards: Acoustic and thermal. En Geopannel. Recuperado de <https://geopannel.com/en/textile/insulating-boards-acoustic-thermal/> el 15 de mayo de 2024.
- Gezer, E. D., y Kuştaş, S. (2024). Acoustic and Thermal Properties of Mycelium-based Insulation Materials Produced from Desilicated Wheat Straw - Part B. *BioResources*, 19(1), 1348-1364. DOI: 10.15376/biores.19.1.1348-1364
- Girometta, C., Picco, A. M., Dondi, D., Savino, E., Baiguera, R. M., Babbini, S., Cartabia, M., y Pellegrini, M. (2019). Physical-Mechanical and Thermo dynamic Properties of Mycelium-Based Biocomposites: A Review. *Sustainability*, 11. <https://doi.org/10.20944/preprints201810.0541.v1>
- HempFlax. Hemp insulation. En HempFlax. Recuperado de <https://www.hempflax.com/en/applications/construction/hemp-insulation/> el 12 de junio de 2024.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). (2002). *IRAM 11601:2002 - Aislantes térmicos de edificios*.
- International Energy Agency (IEA). *Buildings*. Recuperado de <https://www.iea.org/energy-system/buildings> el 21 de noviembre de 2023
- Jiang, L., Walczyk, D., McIntyre, G., y Chan, W. K. (2016). Cost modeling and optimization of a manufacturing system for mycelium-based biocomposite parts. *Journal of Manufacturing Systems*, 41, 8-20. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.07.004>
- Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., y John, S. (2020). Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. En *Materials and Design* (Vol. 187). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108397>
- Koh, C. H., Gauvin, F., Schollbach, K., y Brouwers, H. J. H. (2022). Investigation of material characteristics and hygrothermal performances of different bio-based insulation composites. *Construction and Building Materials*, 346. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128440>
- Korjenic, A., Petráněk, V., Zach, J., y Hroudová, J. (2011). Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings*, 43(9), 2518-2523. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.012>
- Kumar, D., Alam, M., Zou, P. X. W., Sanjayan, J. G., y Memon, R. A. (2020). Comparative analysis of building insulation material properties and performance. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 131). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038>
- Logrotex. Productos: Aislantes. En Logrotex. Recuperado de <https://www.logrotex.com/productos/aislantes> el 11 de junio de 2024.
- Magoal. Aislante de celulosa. Recuperado de <https://magoal.com.ar/> el 15 de junio de 2024.



- Madurwar, M. V., Ralegaonkar, R. V., y Mandavgane, S. A. (2013). Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review. En *Construction and Building Materials* (Vol. 38, pp. 872-878). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.011>
- Ministerio de Economía (2022). *Balances energéticos*. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/econom%C3%ADa/energ%C3%ADa/planeamiento-energetico/balances-energeticos> el 19 de junio de 2024
- Mouton, L., Allacker, K., y Röck, M. (2023). Bio-based building material solutions for environmental benefit over conventional construction products – Life cycle assessment of regenerative design strategies (1/2). *Energy and Buildings*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112767>
- Ordoñez García, A. (2016). Effects of Architectural Design Variables on Energy and Environmental Performance of Office Buildings. Universitat Rovira i Virgili. Repositorio TDR. Tesis Doctorales en Red <http://hdl.handle.net/10803/395212>
- Panyakaew, S., y Fotios, S. (2008). Agricultural Waste Materials as Thermal Insulation for Dwellings in Thailand: Preliminary Results.
- Sadineni, S. B., Madala, S., y Boehm, R. F. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3617-3631. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.07.014>
- Sánchez Amón, M. P., Halimi, C., Alchapar, N., Gaggino, R., y Correa Cantaloube, É. (2021). Coloración de tejas de caucho y plástico reciclado y su respuesta opto-térmica. *Métodos & Materiales*, 11, 34-42. [revistas.ucr.ac.cr/index.php/materiales](http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/materiales)
- Sangmesh, B., Patil, N., Jaiswal, K. K., Gowrishankar, T. P., Selvakumar, K. K., Jyothi, M. S., Jyothilakshmi, R., y Kumar, S. (2023). Development of sustainable alternative materials for the construction of green buildings using agricultural residues: A review. En *Construction and Building Materials* (Vol. 368). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130457>
- Sartori, I., y Hestnes, A. G. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and Buildings*, 39(3), 249-257. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001>
- Schiavoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., y Asdrubali, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 62, pp. 988-1011). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>
- Schritt, H., Vidi, S., y Pleissner, D. (2021). Spent mushroom substrate and sawdust to produce mycelium-based thermal insulation composites. *Journal of Cleaner Production*, 313. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127910>
- Torres-Rivas, A., Pozo, C., Palumbo, M., Ewertowska, A., Jiménez, L., y Boer, D. (2021). Systematic combination of insulation biomaterials to enhance energy and environmental efficiency in buildings. *Construction and Building Materials*, 267, 120973. <https://doi.org/10.1016/J.conbuildmat.2020.120973>
- Wimmers, G., Klick, J., Tackaberry, L., Zwiesigk, C., Egger, K., & Massicotte, H. (2019). Fundamental studies for designing insulation panels from wood shavings and filamentous fungi. *BioResources*, 14(3), 5506-5520
- Xing, Y., Brewer, M., El-Gharabawy, H., Griffith, G., y Jones, P. (2018). Growing and testing mycelium bricks as building insulation materials. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 121(2). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/121/2/022032>
- Yang, Z., Zhang, F., Still, B., White, M., y Amstislavski, P. (2017). Physical and Mechanical Properties of Fungal Mycelium-Based Biofoam. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(7). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001866](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001866)
- Zanovello, L., y Cardoso, M. B. (2019). Utilización de lana de oveja de bajo valor como aislante térmico en la Patagonia, Argentina. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 44, 49-57.

## UNCONVENTIONAL THERMAL INSULATING MATERIALS: AN ANALYSIS OF MYCELIUM AS A SUSTAINABLE ALTERNATIVE IN CONSTRUCTION

**ABSTRACT:** This study explores the viability of unconventional thermal insulating materials, focusing on those based on mycelium, within the context of transitioning to more sustainable construction practices. The research evaluates the thermal performance of these emerging materials, showing that mycelium-based insulators offer thermal properties comparable to or better than conventional insulators such as fiberglass and expanded polystyrene, with a lower environmental footprint. Mycelium-based biomaterials, made from agro-industrial waste, exhibit competitive thermal conductivity. The results indicate that these materials represent a viable alternative for enhancing sustainability in construction, aligning with current trends in bioeconomy and resource management.

**Keywords:** Thermal insulation; sustainable construction; energy efficiency; bioeconomy; mycelium-based materials; unconventional building materials.

## **SUFRIMIENTO TÉRMICO EN BARRIOS POPULARES DEL PARTIDO DE LA PLATA. AUDITORÍA TÉRMICA OBJETIVA Y SUBJETIVA**

**Graciela Melisa Viegas<sup>1</sup>, Jesica Belén Esparza<sup>1</sup>, David Doucet<sup>1</sup>, Gustavo Alberto San Juan<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido- Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas- Universidad Nacional de La Plata (IIPAC-CONICET-UNLP)  
Tel. 0221-423 6587 int 250 –e-mail: [gachiviegas@yahoo.com.ar](mailto:gachiviegas@yahoo.com.ar)

**RESUMEN:** Los grupos sociales vulnerables enfrentan desigualdades económicas, laborales, así como también mayores riesgos ambientales. Pero también se enfrentan a una mayor exposición a situaciones climáticas extremas, con una menor capacidad de reacción y protección frente a ellas, lo que resulta en situaciones de sufrimiento térmico. El mismo se define en función de la exposición a temperaturas extremas, la vulnerabilidad individual y, particularmente, a los factores socioculturales como la pobreza, la falta de servicios básicos, la falta de cohesión social y la escasa protección laboral. Se buscará cuantificar las temperaturas extremas a las que se ven expuestos habitantes de dos barrios populares del Partido de La Plata, utilizando una metodología objetiva (auditoría higrotérmica y de ventilación) para evaluar a qué temperaturas externas e internas se ven expuestos los habitantes de las viviendas en barrios populares en comparación con áreas centrales del Partido; y una metodología subjetiva (encuestas) para reconocer qué perciben subjetivamente de dichas condiciones. Este trabajo ha permitido concluir que la población con la cual se viene trabajando, se encuentra expuesta a un nivel de sufrimiento térmico que exacerba la desigualdad ambiental y socio habitacional a la que se ven expuestas, agravado por una percepción subjetiva particular.

**Palabras clave:** sufrimiento social- vulnerabilidad- auditoría objetiva y subjetiva

### **INTRODUCCIÓN**

Los grupos sociales vulnerables enfrentan diferentes tipos de desigualdades. Nos referimos a las diferencias en los ingresos económicos, en las condiciones laborales, en las situaciones de hábitat a partir de un mayor nivel de exposición a riesgos ambientales. Esta situación produce la afectación de la población a diferentes enfermedades derivadas de dichos riesgos. Tal es el caso de la exposición a situaciones tóxicas definida como "sufrimiento ambiental" (Auyero, 2008), un elemento adicional que agrava su contexto de vulnerabilidad. Se trata de la desigualdad en cuanto a la exposición a la contaminación de grupos vulnerables, debido a una distribución desigual de las cargas ambientales en la sociedad (Bullard, 2000). Pero también podemos considerar la desigualdad ambiental en cuanto a la exposición a situaciones climáticas extremas, que también se presenta en forma disímil sobre los distintos territorios y grupos sociales.

De acuerdo con Rosenkranz, la población urbana del planeta llegará a 3.500 millones de personas en 2050 y un 45% de ella "vivirá bajo condiciones de calor extremas", lo que significa "un aumento de ocho veces en el número de residentes urbanos que enfrentan estrés por calor sostenido"<sup>1</sup>. En este sentido, la exposición a situaciones climáticas extremas de los grupos vulnerables se caracteriza por una menor capacidad de reacción y protección, lo que resulta en situaciones de sufrimiento social (Marino y Faas, 2020). En este sentido definimos el sufrimiento térmico como la exposición a temperaturas extremas (propiciando el estrés térmico), en correlación con las vulnerabilidades individuales (población vulnerable, embarazo, comorbilidades y discapacidades) y, particularmente, los factores socioculturales

---

<sup>1</sup> <https://www.pagina12.com.ar/535411-como-adaptar-las-ciudades-al-calor-extremo-y-al-cambio-clima>.

como la pobreza, la falta de servicios básicos, la falta de cohesión social y la escasa protección laboral (Vasquez et al., 2021). De acuerdo con Boix, directora del Programa Ciudades del CIPPEC, “el calor no le pega a todos igual”, afecta principalmente a los niños y niñas, adultos mayores, personas que tienen alguna inmunosupresión y embarazadas<sup>2</sup>. Pero, además, el calor extremo produce un especial perjuicio en hogares y familias de bajos recursos y se observa que en los asentamientos de la ciudad se siente un calor mucho mayor, porque suele haber menos vegetación, más hacinamiento y problemas o falta de conexión a servicios esenciales como el agua o electricidad.

### ***Vulnerabilidad y estrés térmico***

El cambio climático, asociado a un aumento sostenido de las temperaturas medias en la Tierra, genera una serie de cambios concatenados en el ambiente que nos rodea (IPCC, 2021). Entre sus manifestaciones más evidentes, y de acuerdo con los pronósticos científicos, se espera un incremento en la frecuencia e intensidad de los fenómenos climáticos extremos como por ejemplo las altas temperaturas, tormentas y lluvias intensas y sequías prolongadas (NASA, 2023). En la actualidad, el 14% de la población urbana mundial enfrenta temperaturas extremas, y en las ciudades puede haber hasta 10 grados más que en las áreas periurbanas. Estos problemas representan una amenaza significativa para las poblaciones más vulnerables, quienes tienen menor capacidad para soportar los impactos adversos (Smith y Vivekananda, 2020). Las diferencias térmicas intraurbanas han sido estudiadas por diversos investigadores a nivel mundial, focalizando en los consecuentes efectos sobre la demanda energética y la condición de confort ambiental, tal como se observa en los trabajos de Verdonck et al. (2011), Brousse et al. (2016), Sosa; Correa; Cantón (2016). Allí se realizan aproximaciones teóricas o empíricas sobre las condiciones térmicas de distintas zonas urbanas, a partir de simulación numérica como de mediciones experimentales del comportamiento térmico de corredores o sectores urbanos, buscando el diagnóstico para apuntar al mejoramiento del confort ambiental. En la mayoría de los casos, los registros no referencian diferencias entre poblaciones del sector formal, y aquellas que habitan territorios de vulnerabilidad.

El estrés por calor o frío es el resultado de la interacción entre los factores ambientales, la actividad física realizada y las características de la vestimenta utilizada. No solo las altas temperaturas ambientales contribuyen al estrés térmico; factores como el hacinamiento, la falta de ventilación en espacios cerrados y la humedad relativa elevada también representan peligros significativos para la salud (Parsons, 2014).

Los pronósticos indican que estos eventos serán cada vez más frecuentes en el futuro cercano, lo que resalta la necesidad de implementar acciones preventivas y de control a nivel comunitario. Aunque es crucial promover medidas individuales como la hidratación adecuada y el uso de ropa apropiada, desde una perspectiva del hábitat y la vivienda, es fundamental prestar atención a las condiciones estructurales de las viviendas y sus entornos urbanos como una forma cotidiana de protección frente al clima, especialmente entre los grupos más vulnerables (Thorsson et al., 2014).

En este contexto surge el siguiente interrogante: ¿Cómo es la exposición de la población más vulnerable a las situaciones climáticas extremas? Particularmente este trabajo aborda la situación expuesta en barrios populares del Partido de La Plata, donde se presentan condiciones diversas de informalidad urbana y precariedad en el acceso a servicios y las condiciones socio-habitacionales. El objetivo de este artículo es evaluar por un lado a qué temperaturas extremas (frío y calor) externas e internas se ven expuestos los habitantes de las viviendas en barrios populares ubicados en sectores de periferia urbana en comparación con áreas centrales del Partido, y por otro, qué perciben subjetivamente de dichas condiciones. El aporte radica en el estudio de la problemática de la exposición climática extrema en las distintas áreas urbanas profundizando en el concepto de “sufrimiento térmico” de sectores populares. Las diferencias térmicas intraurbanas han sido asociadas a los efectos de la isla de calor producida por el contexto antropizado del centro urbano consolidado, sin embargo, aquí se pone en evidencia, que a partir del cambio climático, los sectores urbanos periféricos abiertos y poco consolidados, también sufren las condiciones climáticas extremas. Esta metodología (cuali-cuantitativa) podría generalizarse en otras comunidades de similares características, considerando las situaciones ambientales particulares

---

<sup>2</sup> Boix, M. V.; Saez Reale, A., “El calor importa: ¿Cómo y por qué debemos adaptar nuestras ciudades a los desafíos que trae?”. <https://www.cippec.org/textual/como-debemos-adaptar-nuestras-ciudades-a-los-desafios-que-trae-e-l-calor/>



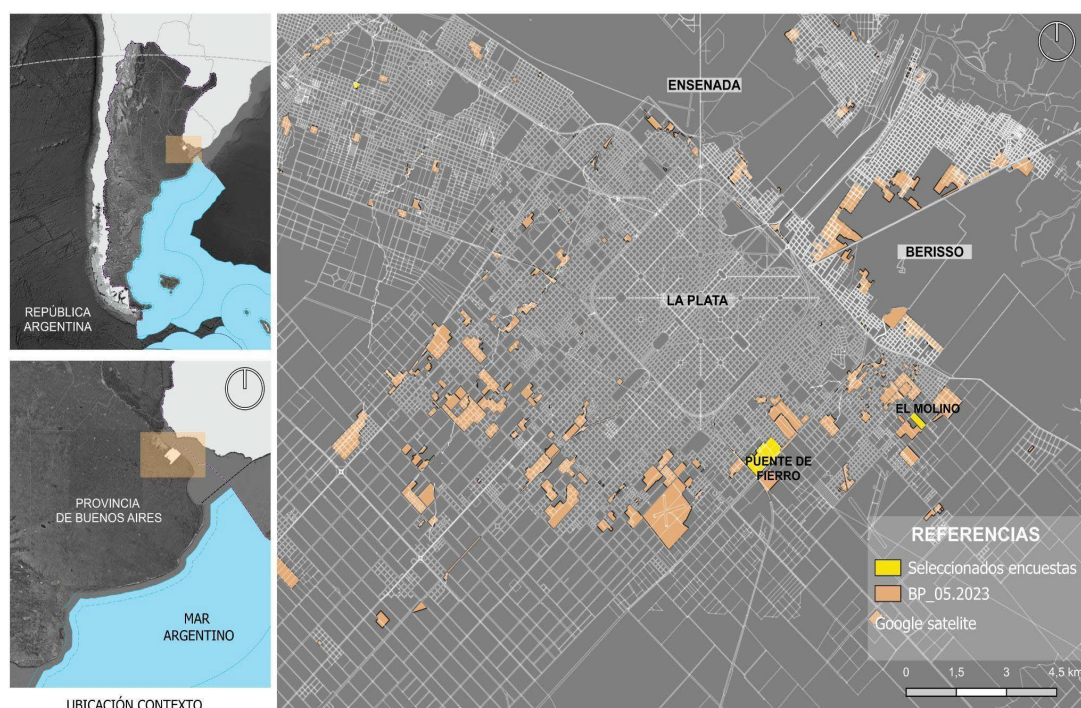
a las que ellas se vean expuestas (tales como sismos, inundaciones, incendios, huracanes, por mencionar algunos ejemplos).

### ***Caso de Estudio***

El Partido de La Plata se encuentra ubicado al noreste de Buenos Aires. El partido integra el “Gran La Plata” -GLP- (junto con los partidos de Berisso y Ensenada), que cuenta con 933.397 habitantes y se asienta sobre un sistema de llanura el cual se encuentra atravesado por una serie de arroyos y canales subsidiarios que desembocan en el Río de La Plata, lo que representa una situación de fragilidad hídrica. Paralelamente, en el GLP existen en la actualidad 203 barrios populares (ReNaBaP, 2024) con distinto grado de consolidación e integración respecto al centro urbano (casco urbano consolidado) (ver Figura 1). Respecto a la situación climática, de acuerdo con la Norma IRAM 11.603, la ciudad de La Plata corresponde a la Zona Bioambiental “Templada Cálida”, limitada por las isolíneas TEC: 24,6°C y 22,9°C, y particularmente a la Subzona Bioambiental “B”, con amplitudes térmicas menores que 14°C. La estación La Plata Aero realizó una cuantificación climática que promedia datos de los últimos 62 años. En ella se registran valores máximos para los meses de enero y febrero entre 39,5°C y 40°C, mientras que, en los meses más fríos (junio y julio), temperaturas mínimas máximas de -5,7°C. Un evento particular ocurrió en el año 2023, cuando se registró la mayor cantidad de períodos de temperaturas extremas en verano (diez eventos) e invierno (seis eventos) desde 1961.

### ***Temperatura extrema en Barrios Populares del GLP***

Como se mencionó anteriormente, la temperatura extrema en sectores periféricos también se ha modificado. En este trabajo en particular, se aborda un estudio particularizado de dos barrios populares del GLP: Puente de Fierro y El Molino, ubicados en el sureste del casco urbano de la ciudad de La Plata. Las dinámicas de ocupación del suelo en este sector de la ciudad, se han ido estructurando a partir de dos vías principales de circulación: avenidas 7 y 13 y en torno a dos importantes centralidades históricas de la ciudad, como lo son las localidad de Villa Elvira y Altos de San Lorenzo.



*Figura 1: Barrios donde se realizaron las mediciones. Contexto Provincial y Nacional. Elaboración propia*

Como el resto de la ciudad, en un intersticio (tierras vacantes) ha tomado lugar el origen de dichos barrios populares. El barrio El Molino se sitúa en la localidad de Villa Elvira, está constituido entre 8 y 10 manzanas y presenta consolidación baja. En el mismo, existe un Centro Comunal, conocido como "Comedor Oga Guazú", una huerta urbana y un espacio verde destinado a ferias y encuentros vecinales. Si bien la accesibilidad desde y hacia el centro de la ciudad es fluida, al interior del barrio la accesibilidad

(infraestructura de calle, cordones y cunetas) es deficiente. El estado de las viviendas es precario, pero con cierta terminación constructiva lo que permite su mejoramiento. Para este trabajo en particular, se han desarrollado mediciones en construcciones consolidadas.

El barrio Puente de Fierro se sitúa en la localidad de Altos de San Lorenzo. Con una extensión aproximada de 30 manzanas y 1500 familias, constituye uno de los barrios con mayor extensión, consolidación y densificación del partido. En el barrio existe un Centro Comunal, conocido como "Comedor Expropiemos El Futuro", en el cual se realizan diferentes acciones sociales (acopio, producción y entrega de alimentos, reuniones y festividades barriales, ayuda comunitaria escolar, entre otras cosas). El barrio es extenso y su complejidad se encuentra acompañada por diversas situaciones socio económicas. En cuanto a la accesibilidad, si bien es de fácil acceso desde el centro de la ciudad, ciertos sectores quedan anegados en momentos de lluvias intensas, ya que su infraestructura es deficiente. El estado de las viviendas es variado, y se pueden encontrar viviendas precarias, muy precarias y en buen estado. Es un barrio en constante crecimiento, por lo tanto, siempre es variable en su extensión y consolidación. Para este trabajo en particular, se han desarrollado mediciones en construcciones consolidadas.

## METODOLOGÍA

En base al relevamiento bibliográfico realizado en la introducción, es posible establecer las variables críticas que pueden influir en el sufrimiento térmico de los habitantes de los barrios populares. *i. Sufrimiento térmico-ambiental (exposición a):* inundaciones, suelos extractivos (canteras), basurales, contaminantes aéreos y/o terrestres, calor/frío extremo (a partir de mediciones urbanas en los barrios), inexistencia de sombreado (vegetación y/o cubiertas acordes), inexistencia de fuentes públicas de refrescamiento. *ii. Sufrimiento térmico - socio habitacional:* población vulnerable (menores de 14 años, mayores de 65 años, personas embarazadas, personas con discapacidades, entre otras); población con problemáticas de salud de base; deficiencia en la envolvente edilicia de la vivienda (aislamiento, infiltraciones), temperaturas de confort y concentración de CO<sub>2</sub> al interior de la vivienda (a partir de mediciones residenciales), cortes eléctricos sistemáticos por falla en el sistema de instalación eléctrica, existencia de veredas y calles impermeables. *iii. Sufrimiento térmico percepción subjetiva:* del frío, del calor, de la iluminación y el asoleamiento, de la ventilación de los espacios.

En este sentido, para analizar las variables enunciadas, se recurre a una metodología cuali-cuantitativa que permite desagregar y medir las problemáticas influyentes en el sufrimiento térmico ambiental, socio-habitacional y perceptivo. Para ello, se realizaron auditorías térmicas urbanas en dos sectores diferentes de la ciudad y en viviendas localizadas en dichos (temperatura, humedad, concentración de CO), y relevamiento de las condiciones habitacionales, las cuales fueron cotejadas con evaluaciones subjetivas presentes en una encuesta realizada en 2022 y con entrevistas realizadas a los habitantes durante la instalación de los equipos. La encuesta tuvo como fin un relevamiento realizado de manera interdisciplinaria y participativa con diferentes actores (investigadores, estudiantes, referentes barriales, organizaciones sociales, extensionistas) que fue utilizado como base para la selección de las dos viviendas representativas del sector, cuyas familias deseaban conocer, en mayor profundidad, las condiciones de habitabilidad, pudiendo otorgar además, información subjetiva (de funcionamiento y confort higrotérmico) sobre sus viviendas.

Las auditorías se realizaron tanto en el ambiente exterior de los centros comunales, como en el interior de dos viviendas privadas. En la figura 2 se observan las características funcionales y constructivas del barrio y las viviendas, así como su ubicación en el territorio. Ambas viviendas son de tipo compacto, y presentan una envolvente que no cumple con los estándares de IRAM. Asimismo, se observan hendiduras en la envolvente. Las viviendas se calefaccionan con radiador eléctrico.

En lo referente a la auditoría cuantitativa se utilizó equipamiento específico, tal como micro-adquisidores de datos de registro de humedad relativa, temperatura, estación meteorológica, solarímetro, equipamiento de medición de calidad del aire (contenido de CO<sub>2</sub> como parámetro que indica el grado de ventilación del espacio). Se utilizaron los siguientes equipos de medición y toma de registros: *i. Dispositivos "Data logger" marca HOBO, serie MX2300* (sellados para mediciones al exterior). Rango



de temperaturas ( $-40^{\circ}\text{C}$  /  $70^{\circ}\text{C}$ ), con precisión de  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$  (entre el rango:  $0^{\circ}\text{C}$  a  $70^{\circ}\text{C}$ ). Rango de HR entre 0% a 100% ( $-40^{\circ}\text{C}$  y  $70^{\circ}\text{C}$ ). Las resoluciones de medición son de  $0,03^{\circ}\text{C}$  a  $25^{\circ}\text{C}$  de temperatura y de 0,03% para el caso de la HR; *ii. Dispositivos "Data logger" marca HOBO, serie U12.* Medición de temperaturas ( $-20^{\circ}\text{C}$  /  $70^{\circ}\text{C}$ ), con precisión de  $\pm 0,35^{\circ}\text{C}$  (entre el rango:  $0^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$ ). Rango de HR 5% a 95%, con una precisión en la medición de  $\pm 2,5\%$  (entre el rango: 10% a 90%). Las resoluciones de medición son de  $0,03^{\circ}\text{C}$  a  $25^{\circ}\text{C}$  de temperatura y de 0,03% para el caso de la HR.; *iii. Dispositivos para registro de concentración de Dióxido de Carbono en el aire marca HT2000.* Sin Autonomía eléctrica. Este dispositivo requiere conexión constante a red eléctrica (220V) para su correcto funcionamiento, lo que provoca dificultades en barrios populares porque sufren cortes eléctricos sistemáticos debido a la deficiencia en las infraestructuras y conexiones.

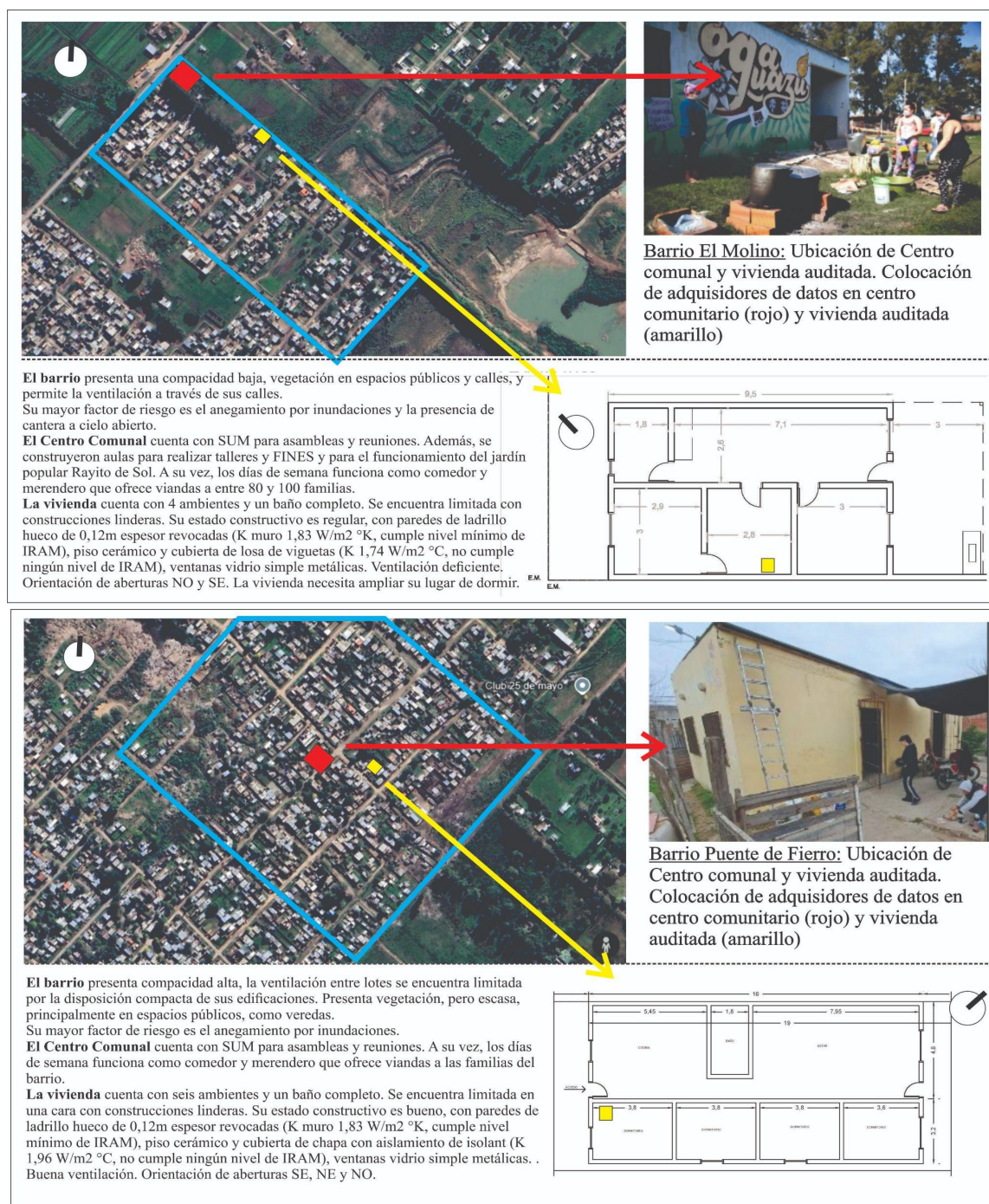


Figura 2: Condiciones del barrio y la vivienda, localización de adquirentes de datos, caracterización edilicia. Elaboración propia

Con respecto a la auditoría subjetiva, la misma se realizó previamente a la colocación del equipamiento. A nivel general, se realizaron 72 encuestas puerta a puerta a las referentes de hogares de entre 30 y 50 años (las cuales fueron respondidas en un 90% por mujeres, es decir, jefas de familia). Ellas por lo general, son las encargadas de realizar las tareas de cuidado en el hogar. La encuesta se estructura a partir de 6 (seis) ejes que aportan información social, edilicio-constructiva, de funcionamiento, de confort, de seguridad, de saneamiento entre otras variables.

Respecto al estado social, se cuantificó la cantidad de integrantes, las edades y ocupaciones, y se consultó sobre los problemas de salud recurrentes en la familia. Asimismo, se consultó por las características constructivas de la vivienda, así como los modos de uso. Se realizaron planos de las viviendas. La encuesta permitió conocer percepciones respecto al confort higrotérmico a partir de las siguientes preguntas: i. ¿Cuál es el sector de la envolvente (paredes, pisos, techos, ventanas) por donde entra más calor (verano) y/o frío (invierno) ?; ii. ¿En qué parte de la casa (cocina, comedor, dormitorios) hace más calor (verano)/frío (invierno) ?; iii. ¿En qué momento del día (mañana, tarde, noche) hace más calor (verano)/frío (invierno); iv. ¿Entra sol a la vivienda en invierno? ¿por dónde?; v. ¿Hay ventilación cruzada?; vi. ¿Hay problemas de humedad?; vii. ¿Hay filtraciones de agua? Dichas preguntas permitieron reconocer la situación integral sobre el uso, funcionamiento y estado constructivo de la vivienda. Asimismo, se consultó: ¿Qué tipo y cantidad de equipamientos y fuente de energía utiliza para calefaccionar y refrigerar?

## RESULTADOS

Los resultados se organizan de acuerdo al análisis de las variables expuestas al comienzo de la metodología: i. Variables ambientales; ii. Variables socio habitacionales; iii. Variables de Percepción subjetiva.

### *Variables Ambientales*

Como se ha mencionado anteriormente, la situación ambiental de los barrios populares de la ciudad de La Plata constituye un factor de riesgo socio habitacional profundo. Entre las condiciones generales de los barrios, se puede mencionar la frecuencia de inundaciones por el desborde de ríos o canales, o bien por simples lluvias para las cuales no se cuenta con la infraestructura adecuada; accidentes por deslizamientos de tierra en canteras o pérdidas de vida por ahogamiento en las mismas, presencia de pequeños y grandes basurales por la deficiencia en el sistema de recolección de residuos, contaminación por los desechos tóxicos industriales que llegan a las cunetas con agua estancada, produciendo enfermedades respiratorias y en la piel; construcción de viviendas en torno a torres de alta tensión, vías de ferrocarril, autopistas u otros. Esta situación se incrementa cuando las altas o bajas temperaturas afectan la calidad de vida de los habitantes. En este contexto, la situación habitacional se agudiza frente al estado de las viviendas, en donde la envolvente de pisos, techos y paredes no son lo suficientemente adecuadas para paliar las temperaturas extremas.

En relación a los barrios populares relevados, y en donde se lleva a cabo la medición de las viviendas, se analizan sus condiciones ambientales: i. *Barrio Puente de Fierro*, la mayoría de las calles son de tierra, aunque algunas han sido mejoradas en los últimos meses con asfalto. Es un barrio que se anega e inunda, ya que las casas y calles se encuentran más bajas respecto a la cantera ubicada en las inmediaciones del lugar. La cantera se presenta como un área de importante fragilidad territorial y ambiental ya que es un reservorio de escombros y basura, además de provocar desprendimientos de tierra e inundaciones con frecuencia; ii. *Barrio El Molino*, si bien se accede por una calle asfaltada, mayoritariamente sus calles son de tierra, lo que imposibilita el acceso y la circulación los días de lluvias extremas. Respecto al abastecimiento de servicios básicos de infraestructura, el barrio cuenta con red de energía eléctrica, pero no cuenta con red de gas natural, red cloacal y solo hay red de agua potable sobre una de las arterias principales. La recolección de residuos habituales se realiza a partir del acopio en container que se encuentran ubicados en puntos estratégicos del barrio. Asimismo, existe una cantera en el barrio, lo que profundiza el factor de riesgo ambiental.

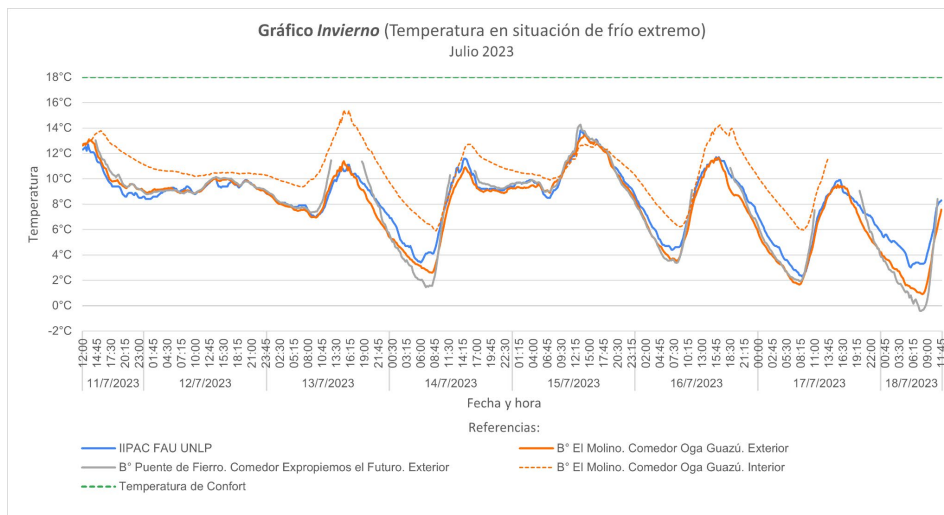


Figura 3: Registros de temperaturas exteriores en situación de frío extremo de invierno (11/07/2023 al 18/07/2023) en tres localizaciones: en zona central (IIPAC-FAU UNLP), en Barrio El Molino y Barrio Puente de Fierro. Elaboración propia

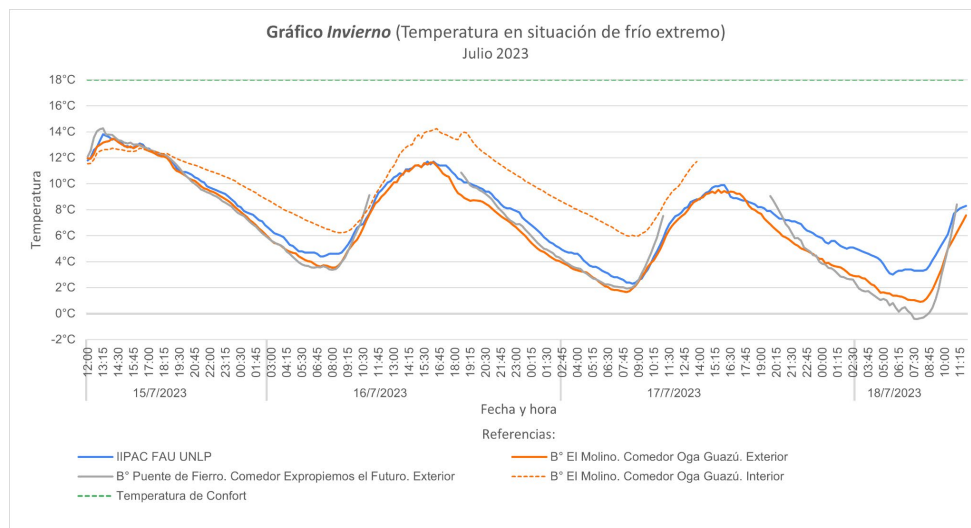


Figura 4: Selección de registros de temperaturas exteriores en situación de frío extremo de invierno durante tres días (15/07/2023 a 18/07/2023). Elaboración propia

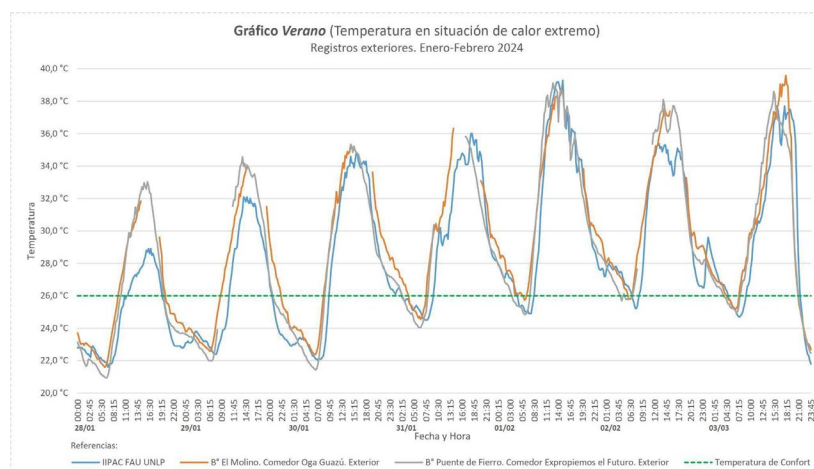


Figura 5: Registros de temperaturas exteriores en situación de calor extremo de verano (28/01/2024 al 03/02/2024) en tres localizaciones: zona central (IIPAC-FAU UNLP), en Barrio el Molino y Barrio Puente de Fierro. Elaboración propia



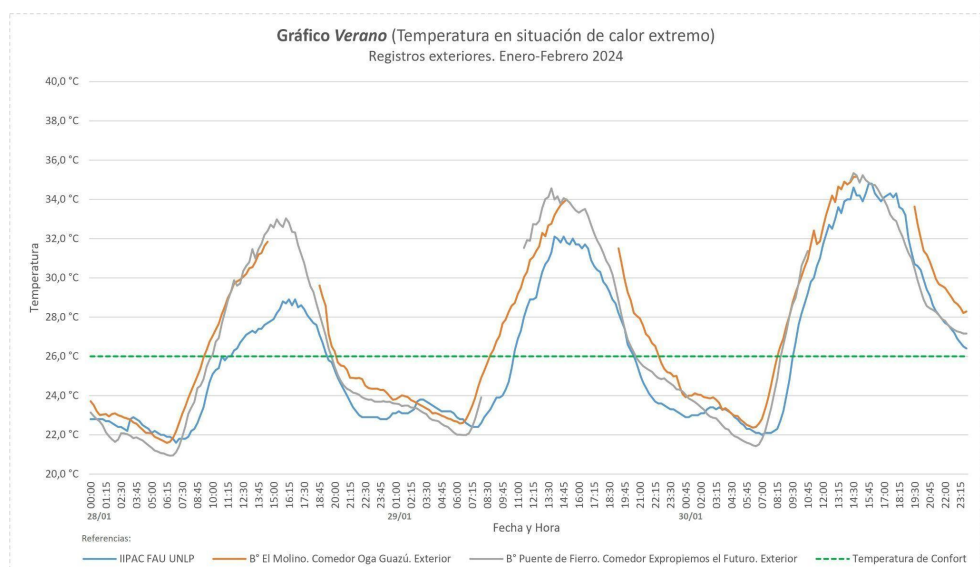


Figura 6: Selección de registros de temperaturas exteriores en situación de calor extremo de verano durante tres días (28/01/2024 a 30/01/2024). Elaboración propia

En las figuras 3, 4, 5 y 6 se analizan las mediciones de las temperaturas exteriores a nivel urbano en los dos barrios, en comparación con las realizadas en un punto del centro de la ciudad. En ambos barrios populares se detectó que las temperaturas fueron más bajas en el invierno respecto del centro consolidado. Para los días de frío extremo, en comparación con el registro en el área urbana consolidada, resultan aún más extremas, registrándose entre 2 y 4 grados menos que en el área central. Respecto al período cálido, las temperaturas fueron más elevadas en verano. Para los días de calor extremo, en comparación con el registro en el área urbana consolidada, resultaron aún más extremas, registrándose entre 2 y 4 grados más que en el área central.

### Variables socio habitacionales

A continuación, se caracteriza a la población, las viviendas relevadas y se analizan las mediciones higrotérmicas y de ventilación residenciales en el interior de dos viviendas seleccionadas, respecto a los registros exteriores.

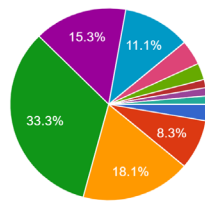
*Composición del hogar:* i. Más del 60% de las familias son de 4 integrantes, indicando la presencia predominante de familias extensas, característica esencial para comprender la dinámica social y familiar y crucial al diseñar estrategias específicas para mejorar las condiciones de habitabilidad, considerando las necesidades particulares; ii. La mayoría de las viviendas están habitadas por una familia, aunque se destaca la necesidad de viviendas nuevas en el 10% de la población (ver Figura 7).

*Condiciones de salud de base en las familias:* El 38,6% enfrentan problemas de salud recurrentes, los cuales refieren a enfermedades respiratorias, y el 42,8% enfermedades crónicas. Entre las enfermedades podemos mencionar (asma, broncoespasmos, bronquiolitis), enfermedades autoinmunes, alergias, discapacidades, diabetes, problemas cardíacos, gastrointestinales, hipertensión, entre otras (Figura 8). Además, el 49,3% de las familias informa haber experimentado la enfermedad COVID-19, sin contar con las condiciones mínimas de aislamiento. Este dato refleja el impacto significativo de la pandemia en estas comunidades y destaca la importancia del análisis de la conformación de las viviendas, así como estrategias de apoyo para aquellas familias afectadas. En el 46,4% de las familias, hay personas experimentando dolores físicos derivados de los esfuerzos de trabajo, demostrando la importancia de considerar las condiciones laborales para prevenir problemas de salud asociados.

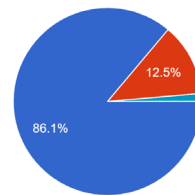
*Tipología de vivienda:* Mayoritariamente las viviendas son de tipo compacto, lo que indica una concentración funcional para hacer un eficiente uso de recursos, mientras que el 15% son alargadas, permitiendo mejor aprovechamiento del clima. La disposición en planta de las viviendas revela que el 91,4% se desarrolla en planta baja, aunque un gran porcentaje utiliza la losa de hormigón como cubierta para una posterior ampliación en altura.



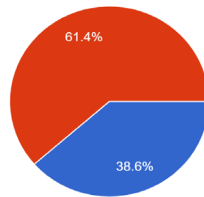
A. ¿Cuántas personas conviven en esta vivienda?  
72 respuestas



B. ¿Cuántas familias conviven en la vivienda?  
72 respuestas



A. ¿Hay problemas de salud recurrentes?  
70 respuestas



Enfermedades crónicas/recurrentes  
70 respuestas

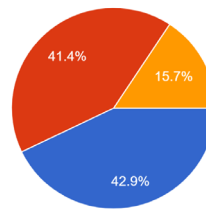
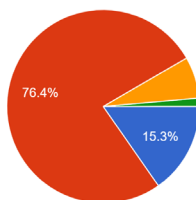


Figura 8: Resultados encuesta Composición de hogares y Problemas de salud recurrente. Elaboración propia

A. ¿Cómo son las viviendas? \*criterio generalizador  
72 respuestas



B. ¿Cuántos pisos?  
70 respuestas

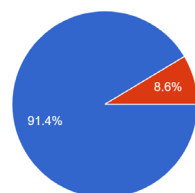


Figura 9: Resultados de la encuesta Tipología de vivienda y altura. Elaboración propia

Además de los resultados cuantitativos, las familias plantean que las viviendas están en proceso de construcción (no finalizadas), que mayoritariamente necesitan ampliarse, que fueron desarrolladas por autoconstrucción, y que sus sistemas constructivos predominante son poco eficientes en término de resistencia al frío o calor, y que utilizan mayoritariamente gas de garrafa para cocinar. En cambio utilizan electricidad, leña y carbón para calefaccionar y calentar el agua. Por otro lado, de acuerdo a lo relevado, el 70,1% de las familias tiene árboles o al menos un árbol en el exterior de sus viviendas. Esto aporta beneficios ambientales y ayuda a la climatización de las viviendas proporcionando sombra, contribuyendo a la calidad de vida.

A continuación, se registra la situación interior de las viviendas para el período frío. En la figura 10 se observa la temperatura interior de dos viviendas (una en cada barrio) y en la figura 11 se analizan las temperaturas interiores y la concentración de dióxido de carbono de dos viviendas del mismo barrio durante el período donde se acondicionó térmicamente dicho espacio. De acuerdo a lo registrado en las viviendas, en los dos barrios las mismas no alcanzan el nivel de confort de 18°C (presentan máximas entre 10 y 16 °C, figura 10) a pesar de estar incorporando calefacción auxiliar en el espacio, y además, los niveles de concentración de CO<sub>2</sub> son extremadamente altos (máximos de entre 4000 y 6000 ppm), superando los límites establecidos de 1000 ppm (figura 11).

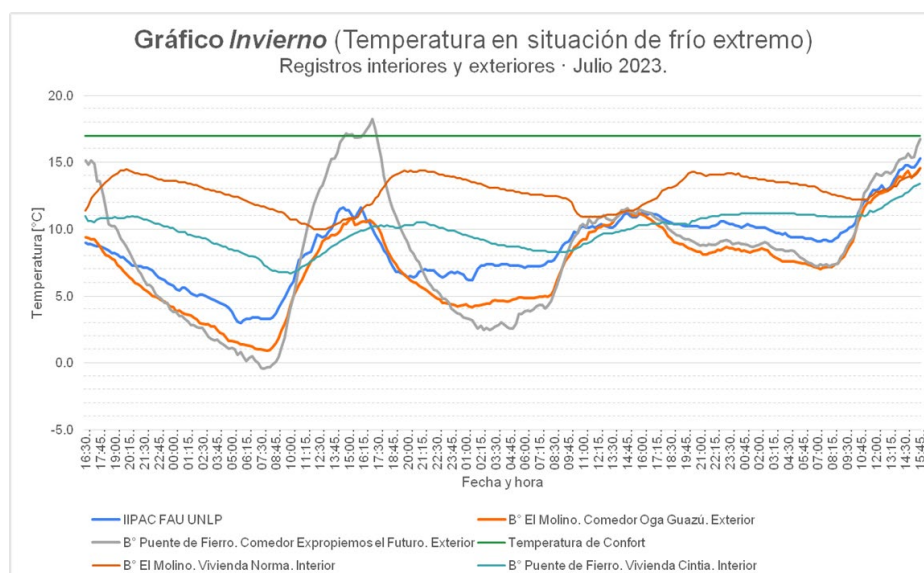


Figura 10: Registros de temperatura exterior e interior en dos viviendas (una de cada barrio), durante tres días de invierno (17/07/2023 a 20/07/2023). Elaboración propia

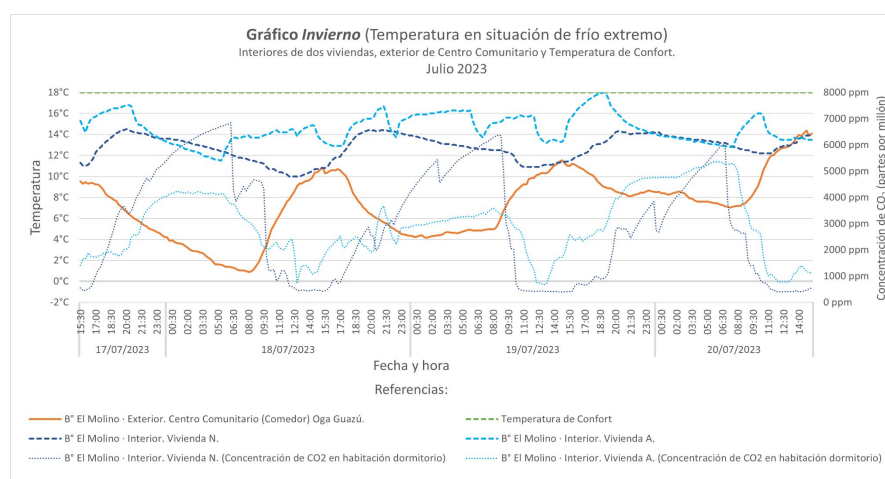


Figura 11: Registros de temperatura exterior e interior y concentración de dióxido de carbono en el aire en dos viviendas del mismo barrio, durante tres días de invierno (17/07/2023 a 20/07/2023). Elaboración propia

### Variables percepción subjetiva

Finalmente se evaluó la percepción de las familias de ambos barrios respecto al confort higrotérmico: i. frío y calor; ii. asoleamiento; iii. ventilación (figura 12).

i. Frío/calor: la mayoría percibe más frío en el estar- comedor y tanto frío como calor en los dormitorios. Respecto a los cerramientos de la envolvente, se percibe frío de manera similar por toda la envolvente (pared, techo, piso, ventanas y hendidias<sup>3</sup>) y calor mayoritariamente por paredes y techos.

ii. Asoleamiento: dos tercios de las familias perciben el ingreso del sol en invierno, mientras que un tercio de ellas manifiesta no percibirlo. Más de la mitad percibe que el sol ayuda a calentar el interior de la vivienda. Sin embargo, objetivamente las viviendas no tienen tal ingreso solar al interior.

iii. Ventilación: la mayoría de las familias tienen viviendas con ventanas que se pueden abrir, y en la mayoría de los ambientes, dos tercios de las familias expresan que la vivienda tiene ventilación cruzada. Y que se ventila mucho. Sin embargo, dos tercios de las familias no cuentan con rejillas de ventilación ni en cocinas ni en lavaderos, elementos clave para asegurar las condiciones de calidad del aire en ambientes donde se produzca combustión de gas o biomasa.

<sup>3</sup> intersticios entre dos o más elementos que conforman la envolvente

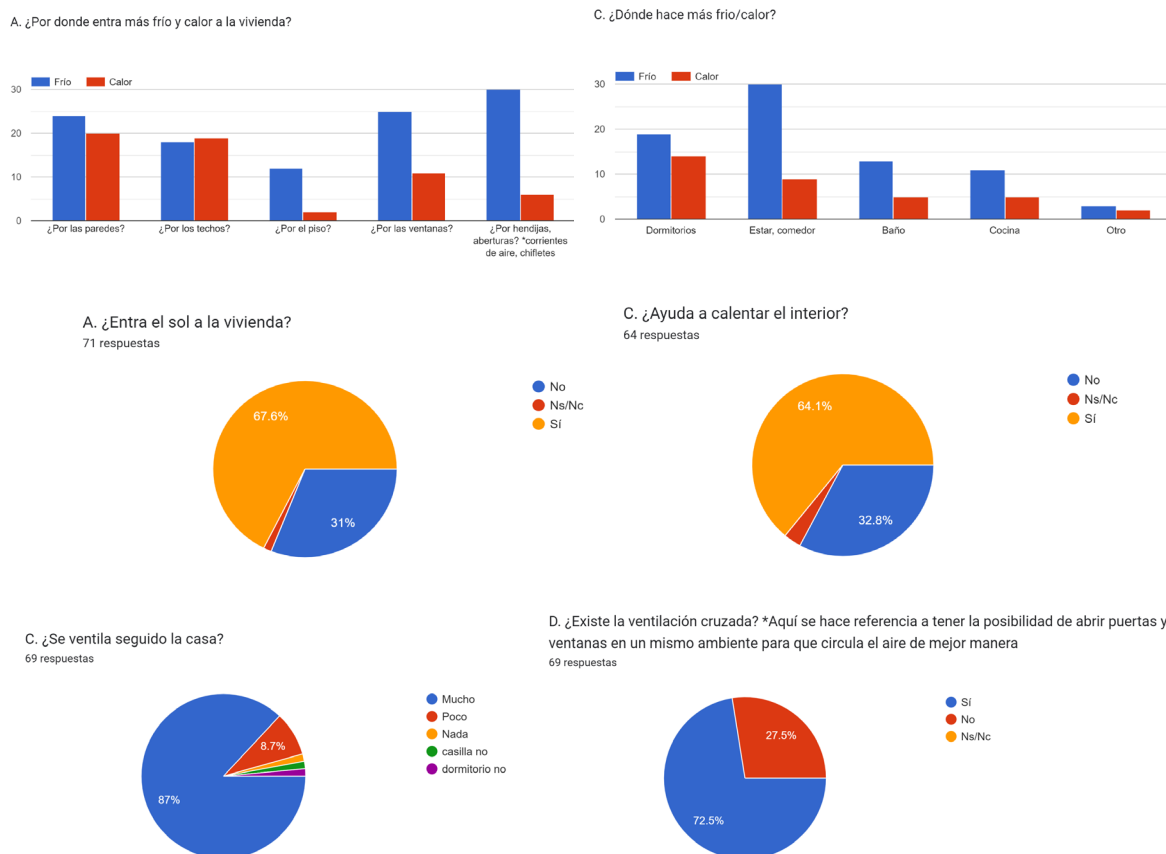


Figura 12: Percepción subjetiva del frío (invierno) y calor (verano), asoleamiento y ventilación. Elaboración propia

## CONCLUSIONES

En la actualidad, la exposición a situaciones climáticas extremas es una problemática cada vez más recurrente y los pronósticos dicen que continuará aumentando. De acuerdo con la bibliografía, los grupos más vulnerables serán los más afectados y debemos abordar estrategias para reducir la desigualdad que esto genera.

Este trabajo ha permitido concluir que las poblaciones con las cuales se viene trabajando, se encuentran expuestas a un nivel de sufrimiento ambiental y térmico que exacerba su condición desigual. Respecto a su contexto ambiental se ven expuestas a inundaciones y están próximas a una cantera a cielo abierto que pone en riesgo sobre todo a niñas, niños y jóvenes. Con respecto a las condiciones climáticas podemos concluir que las familias que habitan las viviendas analizadas se encuentran expuestas a situaciones externas respecto al frío y al calor más desfavorables que en un área central del Partido de La Plata tomada como referencia. Esta situación es más notable en el verano que en el invierno, asociado también a una evaluación realizada en un invierno no muy frío (julio de 2023). Se requerirán nuevas auditorías para evaluar esta situación en el futuro, en veranos e inviernos con períodos extremadamente calurosos o fríos.

Las familias en el barrio son numerosas, y en algunos casos, varias familias comparten una vivienda, lo que produce condiciones de hacinamiento. En relación a la salud, el 50% de las familias se ven afectadas por situaciones de salud recurrentes como por ejemplo problemas respiratorios que acrecientan el nivel de sufrimiento. Respecto a las viviendas, presentan condiciones de “base” que indican que los materiales no son adecuados en términos de aislamiento térmico, y no presentan buenas condiciones de estanqueidad. Respecto a la temperatura interior, se encuentra por fuera de los límites brindados por los parámetros de confort. En cuanto a la calidad de aire al interior de las viviendas, en los casos en que calefaccionan locales (dormitorios) escasamente ventilados, se presentan elevados niveles de CO<sub>2</sub>,

situación que afecta el bienestar y la salud de sus habitantes. Sin embargo, los habitantes consideran que tienen buena ventilación en las viviendas.

La situación descrita requiere de propuestas que puedan mejorar las condiciones mencionadas y reducir el nivel de sufrimiento térmico. A nivel general, se describen propuestas recomendadas por expertos en casos similares: i. desarrollar “infraestructura verde”, que permita incorporar más vegetación (árboles, “espacios verdes”, espacios de césped, jardines comunitarios), utilizar vegetación nativa de fácil mantenimiento en corredores verdes (podrían reducir hasta 4 grados); ii. utilizar las infraestructuras azules, a través de corredores fluviales, fuentes, bebederos, y recuperar las posibilidades de incorporar piletas públicas en clubes de barrios; iii. a nivel edilicio y urbano pueden ser los techos fríos para reducir la absorción térmica por parte de las cubiertas (utilizando colores claros), colores claros en calles y veredas que reduzcan las temperaturas del entorno urbano, utilizar métodos alternativos de sombreado como toldos o marquesinas.

El presente trabajo expone la necesidad de avanzar en la elaboración de una escala de medición cualitativa y cuantitativa que permita dimensionar el grado de desigualdad de la población más vulnerable, que se enfrenta a situaciones climáticas que no pueden afrontar por su condición de desigualdad ambiental, social habitacional y su percepción subjetiva. Para ello se espera elaborar índices que permitan medir y comparar con la situación de la población que se localiza en el centro urbano. Esta información podría colaborar en una correcta gestión del riesgo en esta población, frente a la repetición de situaciones climáticas extremas como olas de calor o de frío.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO Y AGRADECIMIENTOS

Financian CONICET-UNLP-ANPCyT. Agradecemos especialmente a la comunidad del Barrio El Molino y Puente de Fierro, así como a las familias que han decidido participar en esta investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Auyero, J. (2008). *Toxic Exposures: Contested Illnesses and the Environmental Health Movement*. New York University Press.
- Brousse, O. et al. Wudapt: an efficient land use producing data tool for mesoscale models? Integration of urban LCZ in WRF over Madrid. *Urban Climate*, v. 17, p. 116-134, 2016.
- Bullard, R. D. (2000). *Dumping in Dixie: Race, Class, and Environmental Quality*. Westview Press.
- IPCC. (2021). *Sixth Assessment Report: Climate Change 2021*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible en línea.
- Marino, E., & Faas, A. J. (2020). Disasters and Vulnerability: How strong is the link? *Annual Review of Anthropology*, 49, 251-266.
- NASA. (2023). *Global Climate Change: Vital Signs of the Planet*. NASA's Goddard Institute for Space Studies. Disponible en línea.
- Parsons, K. (2014). *Human thermal environments: The effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance*. CRC Press.
- Registro Nacional de Barrios Populares (ReNaBaP) (2024). Observatorio de Barrios Populares, Ministerio de Economía, República Argentina.
- Smith, D., & Vivekananda, J. (2020). *A Climate of Conflict: The Links Between Climate Change, Peace, and War*. *International Alert*.
- Sosa, M. B., Correa, E.; Cantón, M. Morfología Urbana y Comportamiento Térmico de Canales viales: desarrollo de un modelo predictivo para temperaturas máximas. *Revista Urbano*, v. 33, p. 66-75, 2016a.
- Thorsson, S., et al. (2014). The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the hot, dry city of Phoenix, Arizona. *International Journal of Biometeorology*, 58(2), 203-215.
- Vasquez, J., et al. (2021). Socio-environmental vulnerabilities to climate change in the urban areas of Latin America. *Global Environmental Change*, 68, 102284.
- Verdonck, M. et al. Influence of Neighbourhood Information on ‘Local Climate Zone’ Mapping in Heterogeneous Cities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 62, p. 102- 113, 2011.

## **THERMAL SUFFERING IN LOW-INCOME NEIGHBORHOODS OF LA PLATA DISTRICT. OBJECTIVE AND SUBJECTIVE THERMAL AUDIT**

**ABSTRACT:** Vulnerable social groups face economic and employment inequalities, as well as greater environmental risks. But they also face greater exposure to extreme weather situations, with a lower capacity to react and protect against them, resulting in situations of thermal suffering. It is defined based on exposure to extreme temperatures, individual vulnerability and, in particular, sociocultural factors such as poverty, lack of basic services, lack of social cohesion and poor working protection. The aim is to quantify the extreme temperatures to which residents of two popular neighborhoods in La Plata City are exposed, using an objective methodology (hygrothermal and ventilation audit) to assess the external and internal temperatures to which residents of homes in popular neighborhoods are exposed, compared to central areas of the City; and a subjective methodology (surveys) to identify what they subjectively perceive of these conditions. This work has allowed us to conclude that the population with which we have been working is exposed to a level of thermal suffering that exacerbates the environmental and socio-housing inequality to which they are exposed, aggravated by a particular subjective perception.

**Key words:** social suffering -vulnerability - objective and subjective audit.

## **CAPACIDAD DE RETENCION DE AGUA DE LLUVIA EN TECHOS VERDES EXENSIVOS CON DIFERENTE MATERIAL DRENANTE. ESTUDIOS EN LA CIUDAD DE BUENOS AIRES, ARGENTINA**

**Maria Jose Leveratto**

Centro de Investigación Hábitat y Energía, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo,  
Universidad de Buenos Aires

Tel. 01154772275 e-mail: marialeveratto@gmail.com

**RESUMEN:** Este trabajo tiene como objetivo evaluar la capacidad de retención de escorrentía de techos verdes con bajo espesor de sustrato y diferentes materiales drenantes como herramienta para reducir riesgos de inundación frente al cambio climático. Para ello se realizan mediciones en bandejas ubicadas en una azotea de Buenos Aires, Argentina donde se instalan tres sistemas de techos verdes con la misma composición de sustrato y cubierta vegetal utilizando en cada una un drenante distinto entre los disponibles en el mercado local. Durante un año se monitorean 43 eventos, incluidas dos lluvias de más de 70 mm. Los resultados muestran que techos extensivos pueden reducir un 100% de escorrentía pluvial. Bajo fuertes lluvias en períodos cortos, los tres sistemas colapsan ya que al superar los 50 mm en 24 horas, ninguno puede retener agua extra. Luego de una jornada de tiempo seco en verano, los tres sistemas recuperan su capacidad máxima. La retención acumulada anual promedio es del 68%. El tipo de drenaje tiene poca influencia, aunque las geomantas tienen una eficacia menor. Finalmente se destaca que en Buenos Aires, techos verdes extensivos con 40 mm. de profundidad de sustrato pueden sobrevivir todo el año sin riego ni mantenimiento.

**Palabras clave:** techos verdes, cambio climático, retención de lluvia, sistemas urbanos de drenaje sostenible

### **INTRODUCCION**

Como parte de las llamadas soluciones basadas en la naturaleza, los techos verdes pueden definirse como infraestructuras verdes multipropósito (Ju Young et al., 2015) ya que contribuyen a la mejora de distintos problemas urbanos entre los que se incluyen el incremento de biodiversidad (Wang et al., 2022), la mitigación de islas de calor (Leveratto et al., 2014, Rosatto et al., 2022) y el control de riesgos de inundación debido a su capacidad de retener agua de lluvia y ralentizar su llegada a la red pluvial (Rosatto et al., 2013; Carter y Rasmussen 2007).

Los techos verdes son sistemas que permiten el crecimiento de vegetación en la parte superior de una estructura impermeable de cubiertas, terrazas o azoteas de edificios (Agencia de Protección Ambiental - APrA, 2014). Según sus características pueden agruparse en tres categorías o tipos: los intensivos, los semi intensivos y los extensivos. Los techos verdes extensivos son sistemas autosustentables, con especies vegetales adaptadas a condiciones extremas que pueden desarrollarse en sustratos de menos de 15 cm de espesor sin requerir más riego que el proporcionado por las lluvias (Green Roof Organization-GRO, 2021). Cumplen una función prioritaria de mejoramiento ambiental, son livianas y de bajo mantenimiento (Landscape Development and Landscaping Research Society – FLL, 2018).

Debido al poco espesor de sustrato, los techos verdes extensivos tienen bajo peso, lo que los hace particularmente aptos para su incorporación en edificios existentes. Es por este motivo que la mayoría



de los trabajos de investigación se concentran en el estudio de sistemas extensivos que además tienden a resultar más económicos que los techos de tipo intensivo (Rezende Leite y Pereira Antunes, 2023). Los sistemas de techos verdes se configuran a partir de una capa impermeable y antiraíces inferior, una capa drenante, sustrato y cobertura vegetal. La capa drenante es la que permite el escurrimiento del agua de lluvia hacia la red pluvial y en algunos casos funciona también como reservorio de humedad durante periodos secos (Toronto Green Roof Construction Standard, 2017).

La capacidad de retener, drenar y evaporar agua de los techos verdes está influenciada por múltiples variables, tanto climáticas como de diseño (Yongwei et al., 2018). Entre las variables climáticas son de importancia el volumen e intensidad de lluvia caída en un cierto tiempo, el periodo de sequía previo, los niveles de radiación solar, la temperatura y la velocidad de viento del sitio donde se encuentra ubicado el techo verde. Las variables de diseño incluyen la selección y tamaño de la vegetación, las dimensiones y pendiente del techo, la composición y profundidad del sustrato y el tipo de drenante utilizado.

## **METODO**

En este marco y en un contexto de cambio climático donde se esperan precipitaciones más intensas y frecuentes en muchas regiones de la Argentina (Barros y Camilloni, 2016), este trabajo tiene como objetivo analizar la capacidad de retención de agua de lluvia de techos verdes extensivos con sustratos de muy poco espesor que pudieran ser instalados sobre cubiertas planas de edificios existentes en el área metropolitana de Buenos Aires. Se compara además el desempeño de tres diferentes materiales drenantes disponibles en nuestro país para evaluar si existen variaciones en el desempeño de cada uno de ellos y valorar el impacto de este tipo de techos verdes como estrategia de adaptación frente a eventos de lluvias intensas.

Las mediciones se realizan en una terraza urbana de baja altura en la Ciudad de Buenos Aires. El sitio se encuentra en un área residencial de media densidad distante aproximadamente 4000 metros del Observatorio Central Buenos Aires dependiente del Servicio Meteorológico Nacional (OCBA-SMN).

Para evaluar la capacidad de retención de agua de lluvia de techos extensivos de muy bajo peso se instalan tres bandejas iguales, armadas con todas las capas que conforman el sistema. Se repiten en los tres casos las mismas características constructivas, el tipo de sustrato y vegetación solo modificándose el material utilizado como capa drenante. Una cuarta bandeja de iguales dimensiones se mantiene vacía ya que se utiliza como referencia del total de volumen de lluvia caída durante cada evento. El agua descargada se recolecta en contenedores ubicados bajo las bandejas para luego de cada evento de lluvia medir el volumen acumulado durante cada uno de ellos.

Para el registro de milímetros agua caída y ocurrencia de eventos de precipitaciones se utilizan los datos aportados por el OCBA-SMN y se verifican con los valores obtenidos en la bandeja de referencia.

### ***Características de las bandejas***

Las bandejas utilizadas se arman con placas cementicias rígidas. Cuentan con un desagote en su cara inferior con pendiente de un 2%. Se recubren en todos sus lados con material impermeable y cada una de ellas se coloca sobre un contenedor plástico que retiene y almacena el agua sobrante, como puede observarse en la figura 1. Las bandejas tienen 40 cm de lado y una altura de 20cm, cubriendo una de superficie 0,16 m<sup>2</sup>.



*Figura 1: Bandejas con contenedor para retener agua durante cada evento de lluvias.*

### ***Características constructivas de los tres sistemas***

Como ya se mencionó, en las tres bandejas se instalan tres sistemas de techos verdes de iguales características en cuanto impermeabilización, dimensiones y pendiente de desagüe, tipo y espesor de sustrato y misma cobertura vegetal inicial, dejando como única diferencia entre ellas la solución adoptada como capa drenante.

La composición del sustrato utilizado corresponde a la recomendada para techos verdes extensivos, con un contenido de material inorgánico de aproximadamente el 80% y un 20% de material orgánico (Barbaro et al., 2017). Es un sustrato liviano, estable y de buena capacidad drenante. Con el objetivo de lograr un sistema de muy bajo peso, el espesor del sustrato se establece en 40mm, teniendo en cuenta experiencias previas que indican es posible la supervivencia de vegetación sin riego artificial bajo condiciones climáticas similares a las esperables en Buenos Aires (Voyde et al., 2010). Es importante destacar también que al disminuir el espesor del sustrato, la variación en la capacidad de retención y ralentización de agua del sistema no es estadísticamente significativa (Wong y Jim 2014) cuando por ejemplo mediciones para lluvias de más de 25 mm muestran que incrementos de un 1% en el espesor del sustrato aumentan solamente en un 0,04% la capacidad de retención de agua de lluvia de un techo verde (Xinzhu, 2021).

Como cobertura vegetal se seleccionan especies comúnmente utilizadas en techos verdes extensivos simples y disponibles en el mercado local. Se utilizan dos variedades de sedum, el sedum mexicanum y el reflexum y la nativa portulaca grandiflora como se observa en la figura 2. Esta cobertura vegetal se complementa con la colocación superficial de piedra pómez (pometina) para favorecer la retención de agua de lluvia. El armado de las bandejas se realiza en invierno, periodo más conveniente para la implantación de la vegetación.



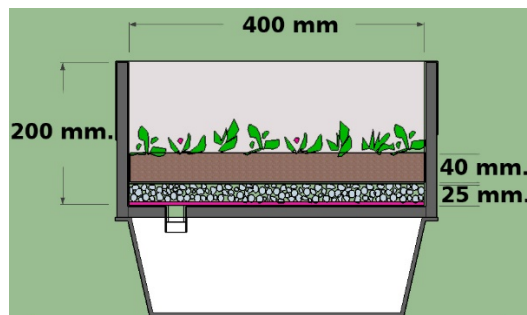
*Figura 2: Especies vegetales utilizadas en las tres bandejas.*

El peso de los tres sistemas de techos estudiados saturados de humedad es de aproximadamente 70kg/m<sup>2</sup>., lo que los hace muy sencillos de incorporar sobre techos ya existentes sin poner en riesgo la capacidad de soporte de la estructura portante.

### ***Características de los tres drenantes utilizados***

Para realizar este estudio se utilizaron drenantes comunes en el mercado argentino, cada uno de ellos con características particulares en cuanto a espesor, costo y forma de instalación. A continuación se describen los materiales usados y el modo de colocación en las bandejas:

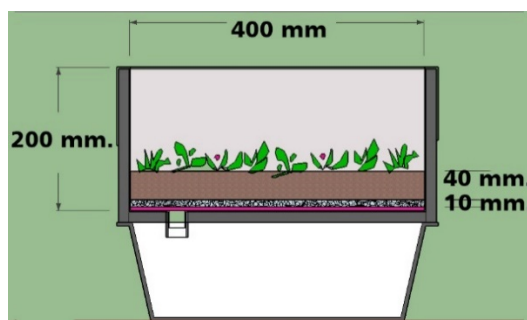
- **Drenante Bandeja 1:** Piedra pómez (Pometina®). Roca mineral liviana de estructura alveolar expandida naturalmente a partir de cenizas volcánicas. Espesor del drenante: 25 mm.



*Figuras 3 y 4: piedra pómez y su ubicación en el sistema*

En la figura 3 se muestra una imagen de la piedra pómez utilizada como material drenante en la bandeja 1 y su ubicación en corte puede observarse en la figura 4. En este primer caso el espesor total del sistema es de 75 mm. sin incluir la altura variable de la vegetación. La capa inferior representa la membrana impermeable que garantiza el escurrimiento de agua de lluvia hacia el desagote previsto y su almacenamiento en el contenedor.

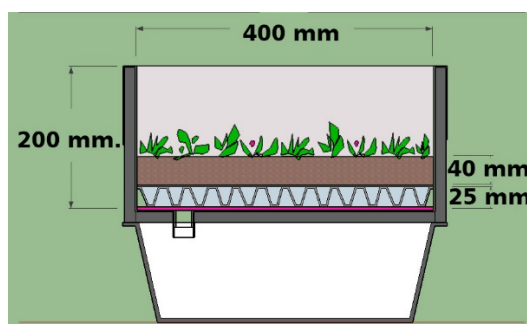
- **Drenante Bandeja 2:** Geomanta tridimensional (MacDrain® 2L 20.2). Espesor: 10 mm.



*Figuras 5 y 6: Geomanta y su ubicación en el sistema*

En la bandeja 2 se utiliza como drenante una manta conformada por filamentos plásticos termosoldados a dos capas de geotextiles, como se muestra en la figura 5. Este drenante permite obtener un sistema de 50 mm de espesor total, sin incluir la altura variable de la vegetación como se observa en la figura 6.

- **Drenante Bandeja 3:** Placa plástica termoconformada Floradrain FD 25-E ®. Espesor: 25 mm.



*Figuras 7 y 8: Detalle del material utilizado y corte mostrando su ubicación en el sistema*



En la tercera bandeja se utilizan placas plásticas termoformadas con concavidades para retener el agua y aperturas de aireación y difusión en base a poliolefina reciclada, como se muestra en la fotografía de la figura 7. El espesor total del sistema se observa en el corte de la figura 8 y es de 75 mm sin incluir la altura variable de la vegetación. Un espesor similar al sistema utilizado en la bandeja 1 con pometina

### **Mediciones**

Las mediciones se obtienen a lo largo de un año entre el 14 de junio de 2019 y el 1 de julio del año 2020. En total se cuenta con datos de 43 eventos de lluvias. Luego de cada evento de lluvia se retiran los cuatro contenedores plásticos ubicados bajo cada bandeja y se registra la cantidad de agua almacenada en cada uno de ellos.



*Figura 9: contenedores retirados luego de un evento de lluvias*

La bandeja vacía de referencia representa el 100% de agua drenada durante cada evento de lluvias. Los volúmenes acumulados en cada uno de los tres contenedores bajo las bandejas con techo verde representan comparativamente el porcentaje de retención obtenido y reflejan -si las hubiera- las diferencias en capacidad de retención debidas a la utilización de distintos sistemas drenantes.

Para establecer el volumen de agua caída, la cantidad de días previos sin lluvia y para estimar la humedad esperable en los sistemas de techos verdes, se utilizan los registros de precipitaciones del OCBA-SMN.

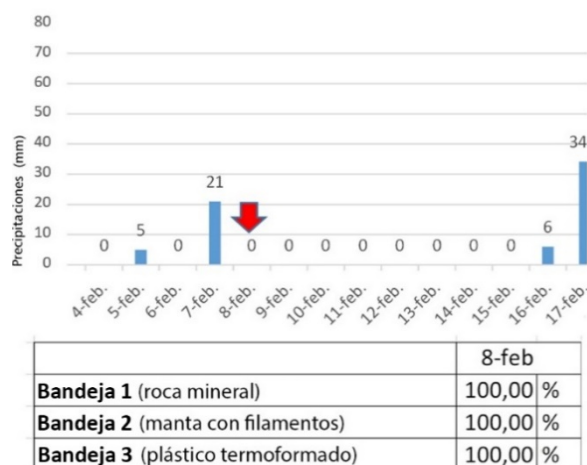
### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Los resultados obtenidos se organizan según la capacidad de retención de agua de lluvia registrada en cada medición. Con este criterio se dividen los resultados en tres grupos: Eventos en los que los sistemas retuvieron más del 80% de la lluvia caída (alta capacidad de retención), eventos en que los sistemas retienen entre el 80% y el 30% de la lluvia caída (retención media) y un tercer grupo que reúne los eventos en que se obtienen retenciones menores al 10% (saturación del sistema). A partir de este agrupamiento, se analizan y comparan los volúmenes de lluvia caída en cada evento, la época del año, la cantidad de días previos sin precipitaciones y se detecta si existen diferencias entre los tres sistemas drenantes utilizados.

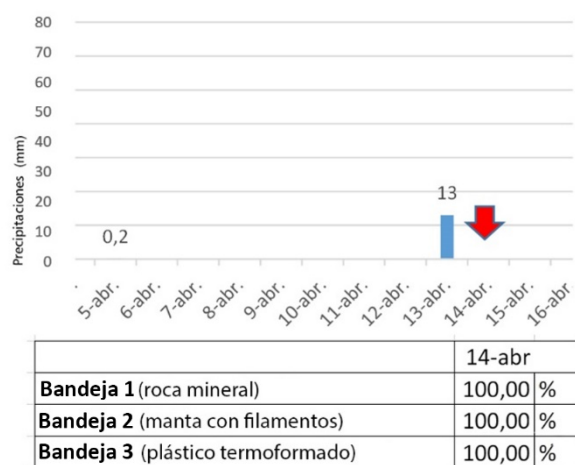
Los resultados más significativos se describen a continuación y se sintetizan en gráficos y tablas para facilitar su interpretación. Las flechas en los gráficos indican la fecha en las que se realizan las mediciones y la tabla inferior que acompaña cada gráfico indica el porcentaje de retención de agua de lluvia registrado en cada uno de las mediciones.

### ***Alta capacidad de retención de agua de lluvia***

El registro de mayor retención total de lluvias es en el mes de febrero cuando los tres sistemas retienen al 100% un total de 21mm de agua según se grafica en la figura 10. En esta ocasión se producen lluvias leves durante la noche del día 5 de febrero, luego el día 6 se presenta soleado y con altas temperaturas, y el día 7 llueve nuevamente durante la tarde y noche. El segundo máximo registro se grafica en la figura 11 y se obtiene durante el mes de abril, cuando los tres sistemas retienen el 100% del agua caída frente a una lluvia de 13mm. En este caso luego de una semana sin precipitaciones y con los sustratos secos.



*Figura 10: Resultados mediciones mes de febrero, retención del 100%*



*Figura 11: Resultados mediciones mes de abril, retención del 100%*

En base a estos registros puede afirmarse que los tres tipos de techos verdes analizados tienen la capacidad de retener, en condiciones de verano al menos 21 mm de lluvia. En condiciones de verano se verifica un incremento en la capacidad de retención de los tres sistemas. Estos resultados indicarían que los sustratos de poco espesor se secan más rápidamente y bajo esas condiciones todo el sistema recupera en periodos cortos su capacidad máxima de retención de agua. Según los registros medidos este incremento es de aproximadamente un 60%.

### ***Muy baja o nula retención de agua de lluvia***

A continuación se analizan dos casos en que los tres sistemas de techos verdes saturan su capacidad de retención de agua de lluvia, uno durante el mes de marzo graficado en la figura 12 y otro en condiciones de invierno y graficado en la figura 13.

En el primer caso, luego de 12 días sin precipitaciones, el 8 de marzo comienza a llover intermitentemente hasta el día 11 a la mañana, registrándose un total de 11mm de lluvias. En estas condiciones los tres sistemas retuvieron el total (100%) del agua caída. A partir del mediodía del día 11 de marzo las lluvias se hacen muy intensas. Se realiza una medición durante la tarde, y en estas condiciones los tres sistemas han reducido su capacidad de retención de agua a aproximadamente la mitad. Continúa lloviendo toda la noche y el día 12 luego de haber caído 79,3 mm de lluvia los tres sistemas de techos verdes se encuentran saturados y ya no aportan a la retención de agua pluvial.

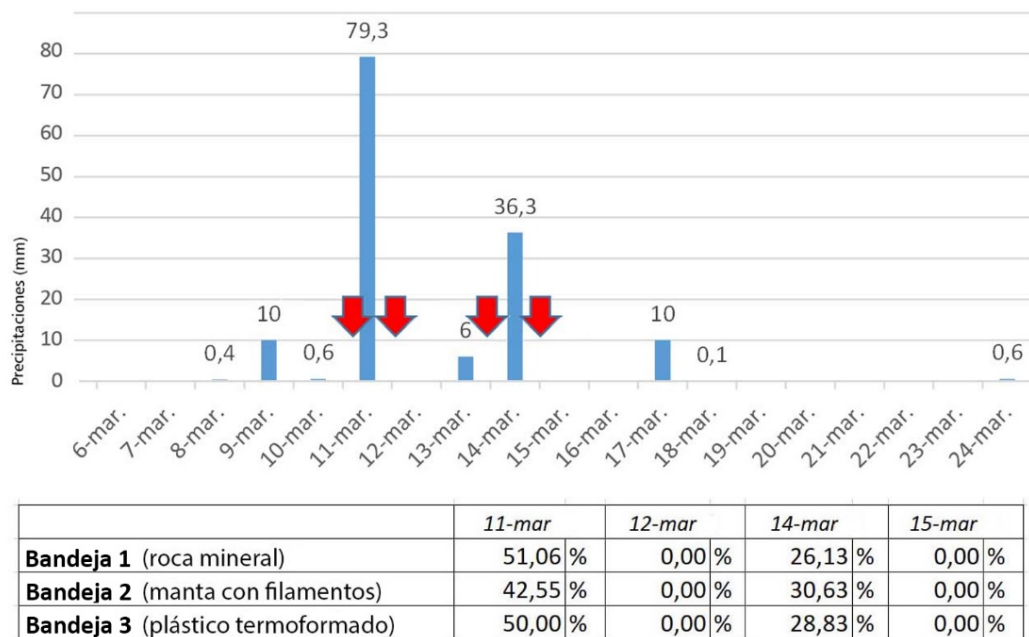


Figura 12: Resultados mediciones mes de marzo retención nula (0%)

El segundo caso corresponde al periodo invernal, cuando se registran tres días de precipitaciones intensas en el mes de junio. Luego de lloviznas los días 6 y 11 y de precipitaciones de 7mm la jornada del 13 de junio, el día 14 se realizan mediciones. Como puede observarse en la tabla de la figura 13, en estas condiciones solo el sistema con drenante de geomanta y filamentos ha reducido su capacidad de retención de agua en un 17%, los otros dos drenantes continúan conteniendo el total del agua caída. Continúa lloviendo intensamente durante los días 15, 16 y 17 de junio y como consecuencia de casi 160mm. de precipitaciones, los tres sistemas de techos verdes se encuentran colapsados. Luego de cinco días con cielo nublado, el 24 de junio vuelven a registrarse 9mm. de lluvias durante la mañana. Mediciones realizadas a la tarde muestran una capacidad de retención de agua que varía entre aprox. 39 y 47% según el sistema drenante utilizado, resultando el de placas plásticas termoformadas el de mayor eficiencia.

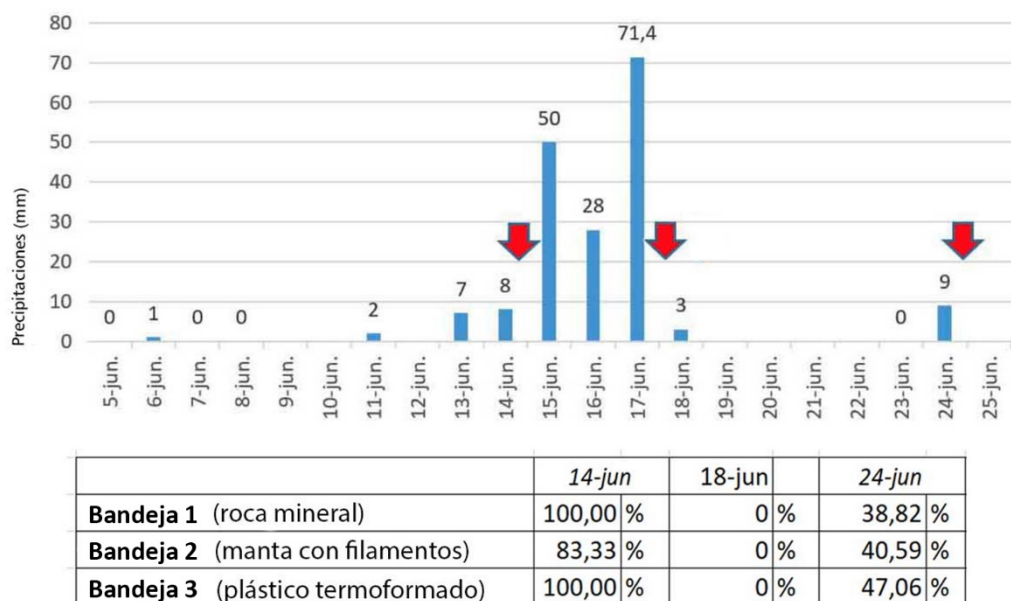


Figura 13: Resultados mediciones mes de junio retención nula (0%)



Los resultados obtenidos en este caso evidencian que los techos verdes estudiados tienen una limitada capacidad de retención de agua de lluvia frente a eventos extremos, y que en condiciones de invierno con cielo cubierto aun luego de varios días sin precipitaciones, los sustratos continúan húmedos y no alcanzan a recuperar valores altos de retención de lluvias.

## RESULTADOS

Finalmente y recopilando el análisis de todos los datos obtenidos en las distintas mediciones a lo largo del año, los resultados de este estudio indican que:

- La retención promedio anual de los tres sistemas es del 68%. Este valor se encuentra dentro de los registrados por estudios previos para techos verdes extensivos de características similares que reportan valores de entre 50 y 78% de retención de lluvia (Berghage et al., 2009; Carter and Rasmussen, 2007; Mentens et al., 2006; Villarreal and Bengtsson, 2005).
- Con sustrato seco y frente a lluvias de entre 30 y 45 mm los sistemas de techos verdes retienen aproximadamente entre el 70 y 60% del agua caída.
- Cuando las lluvias exceden los 50mm en 24 horas ninguno de los sistemas analizados puede retener más agua de lluvia y dejan de tener impacto.
- Luego de 24 horas con clima seco y soleado en verano, los tres sistemas estudiados recuperan su máxima capacidad de retención de agua. Coincidiendo con otros estudios que han reconocido que la capacidad de retención de agua de lluvia tiene una correlación positiva respecto de la cantidad de días con clima seco que precedan a las precipitaciones (Zhang et al., 2015, Liu et al., 2019).
- Si bien el tipo de drenante utilizado tiene poca influencia en la capacidad de retención de agua del sistema, las placas termoformadas y la roca mineral presentan un comportamiento similar, las mantas con filamentos plásticos resultan entre un 5 y 10% menos eficientes en promedio.
- Aunque no ha sido objeto de este trabajo, vale señalar que la vegetación implantada sobre el sistema de techo verde con drenante de placas termoformadas presenta mayor crecimiento y vitalidad que la implantada sobre los otros sistemas drenantes. Esta mayor cobertura podría incrementar la capacidad de retención pluvial del techo en cuestión.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que la capacidad de retención de lluvias en techos verdes extensivos con sustratos de muy poco espesor es variable y se relaciona directamente con la cantidad de agua caída en un cierto período de tiempo y con los niveles de humedad previos del sistema. En los meses de verano la recuperación de la capacidad máxima es más rápida, ya que mayores temperaturas y radiación solar aceleran el proceso de secado del sistema.

Si bien la capacidad promedio anual de retención de agua de lluvia obtenida en este estudio alcanza el 68%, este valor no representa el comportamiento de los sistemas en situaciones críticas, ni en eventos extremos. Las mediciones realizadas muestran que una vez saturados, los techos verdes funcionan de manera similar a un techo tradicional, y que solo luego de un periodo sin lluvias de duración variable y según porcentajes de humedad relativa y niveles de radiación solar disponible, vuelven a recuperar su capacidad de retención de agua.

Es entonces importante destacar que los sistemas de techos verdes tienen una capacidad limitada de respuesta frente a tormentas fuertes en períodos de tiempos cortos. En el caso particular de los que cuentan con sustratos de muy poco espesor, cuando las lluvias superan los 50mm, la capacidad de retención de agua de lluvia es nula.

En un contexto de cambio climático en el que se espera un incremento en eventos extremos, estos resultados refuerzan la necesidad de entender a los techos verdes como parte de una estrategia integral en la que se combinan distintas soluciones de infraestructura verde para la mitigación de riesgos de inundación. Siendo la combinación de techos verdes con otras soluciones una alternativa que mejora y da robustez al manejo de agua de lluvia en ciudades.

Respecto de las diferencias obtenidas al modificar el tipo de material drenante utilizado, puede concluirse que si bien el sistema de placas termoformadas tiene una mayor capacidad de retención de agua, en promedio las diferencias no son significativas. Pero vale aclarar que esta mayor capacidad de retención de humedad da como resultado un mejor crecimiento de la vegetación, lo que redundaría a lo largo del tiempo en un incremento en la retención y ralentización pluvial debido a un mayor sistema radicular y de cobertura superficial.

Finalmente es importante destacar que este estudio ha podido demostrar que en la Ciudad de Buenos Aires es posible la implantación y supervivencia de techos verdes de muy bajo peso sin requerimientos de riego artificial o fertilización, siempre y cuando se seleccionen los sustratos correctos y se utilicen especies vegetales adecuadas a las condiciones ambientales del sitio donde deberán desarrollarse.

## REFERENCIAS

Agencia de Protección Ambiental – AprA (2014). Cubiertas Verdes en Edificios Públicos. Experiencia y recomendaciones para su instalación en la Ciudad de Buenos Aires. Dirección General de Estrategias Ambientales, Ministerio de Ambiente y Espacio Público, Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. <http://www.buenosaires.gob.ar/agenciaambiental/cambioclimatico/publicaciones>

Barbaro, L.; Soto, M. S.; Sisaro, D., Karlanian, M. y Stancanelli, S. (2017). Sustratos para techos verdes sustentables (extensivos) 1ra. Edición Ediciones INTA. Instituto de Floricultura. CNIA. ISBN 978-987-521-875-8 (digital) ISBN 978-987-521-876-5 (impreso)

Barros, V. y Camilloni, I. (2016). La Argentina y el Cambio Climático. De la Física a la Política. Buenos Aires: EUDEBA.

Berghage, R.D., Beattie, D.J., Jarrett, A.R., Thuring, C., Rezaei, F. (2009). Green roofs for stormwater runoff control. In: National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development (Ed.). US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.

Carter, T.L., Rasmussen, T.C. (2007). Hydrologic behavior of vegetated roofs. J. Am. Water Resour. Assoc. 42, 1261–1274. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb05299.x>.

Landscape Development and Landscaping Research Society - FLL-. (2018) Green Roof Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs. 6ta edición.

Green Roof Organisation - GRO (2021) The GRO Green Roof Code. [www.greenrooforganisation.org](http://www.greenrooforganisation.org) ISBN: 978-1-5272-8739-6

Ju Young L., Min Jung L. y Mooyoung, H. (2015). A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs, Journal of Environmental Management, Volume 152

Leveratto, M.J., González Otharán, F., Fernández Bados, O., Propati, M., Reobo, M. y Satelier, J. (2014) Cubiertas verdes como herramienta para la mitigación de isla de calor en áreas urbanas de la Ciudad de Buenos Aires. 5to Congreso Internacional Solar Cities 2014, Buenos Aires, Argentina. pp 127-137.

Liu, W., Feng, Q., Chen, W., Ravinesh C. D. (2019). The influence of structural factors on stormwater runoff retention of extensive green roofs: new evidence from scale-based models and real experiments, Journal of Hydrology, Volume 569, Pages 230-238, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.066>.

- Liu W., Feng Q., Engel, B. A. y Zhang, X. (2023). Cost-effectiveness analysis of extensive green roofs for urban stormwater control in response to future climate change scenarios, *Science of The Total Environment*, Volume 856, Part 1, 159127, ISSN 0048-9697
- Mentens, J., Raes, D. y Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century, *Landscape and Urban Planning*, Volume 77, Issue 3. Pages 217-226, ISSN 0169-2046, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>.
- Rezende Leite, F, y. Pereira Antunes, M. L, (2023), Green roof recent designs to runoff control: A review of building materials and plant species used in studies, *Ecological Engineering*, Volume 189, 2021069V24, ISSN 0925-8574, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106924>.
- Rosatto, H.; Meyer, M.; Laureda, D.; Cazorla, L.; Barrera, D.; Gamboa, P.; Villalba, G.; Bargiela, M.; Pruzzo, L.; Rodríguez Plaza, L.; Mazzeo, N.; Caso, C.; Rocca, C.; Hashimoto P.; Kohan, D.; Quaintenne, E. (2013). Eficiencia en la retención del agua de lluvia de Cubiertas Vegetadas de tipo “Extensivo” e “Intensivo”. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina*. 45(1): 169-183.
- Rosatto, H, Waslavsky Lattuada, M. A., Leveratto, M: J., Laureda, D.A., Bargiela, M. y Botta, G. F. (2022) Green Roofs: Influence of Moisture Content of the Substrate in the Thermal Regulation of a Building in CABA - Argentina". *Acta Scientific Nutritional Health* 6.9: 55-66.
- Toronto Green Roof Construction Standard, Supplementary Guidelines (2017). Office of the Chief Building Official, Toronto Building, City of Toronto. [www.toronto.ca/greenroofs](http://www.toronto.ca/greenroofs)
- Villarreal, E.L. y Bengtsson, L. (2005). Response of a sedum green-roof to individual rain events. *Ecological Engineering* 25 (1), 1–7
- Voyde E., Fassman, E y Simcock, R. (2010). Hydrology of an extensive living roof under sub-tropical climate conditions in Auckland, New Zealand, *Journal of Hydrology*, Volume 394, Issues 3–4, Pages 384-395, ISSN 0022-1694 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.09.013>
- Wang, L., Wang, H., Wang, Y. (2022). The relationship between green roofs and urban biodiversity: a systematic review. *Biodivers Conserv* 31, 1771–1796. <https://doi.org/10.1007/s10531-022-02436-3>
- Wong, G. K.L. y Jim C.Y. (2014). Quantitative hydrologic performance of extensive green roof under humid-tropical rainfall regime, *Ecological Engineering*, Volume 70, Pages 366-378, ISSN 0925-8574, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.025>.
- Zheng, X., Zou, Y., Lounsbury, A. W. Wang, C. y Wang, R. (2021) Green roofs for stormwater runoff retention: A global quantitative synthesis of the performance, Resources, Conservation and Recycling, Volume 170, 2021, 105577, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105577>.
- Yongwei G., Dingkun, Y., Xing Fang and Junqi Li (2018) Factors Affecting Runoff Retention Performance of Extensive Green Roofs *MDPI Water* 2018, 10, 1217; doi:10.3390/w10091217
- Zhang, Q., Liping Miao, Xiaoke Wang, Dandan Liu, Liang Zhu, Bing Zhou, Jichao Sun, Jingtao Liu, J. (2015). The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution, *Landscape and Urban Planning*, Volume 144, Pages 142-150, ISSN 0169-2046, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.08.017>.

## **WATER RETENTION CAPACITY OF EXTENSIVE GREEN ROOFS WITH DIFFERENT DRAINAGE SYSTEMS. STUDIES IN BUENOS AIRES, ARGENTINA**

**ABSTRACT:** This work aims to evaluate runoff retention capacity of green roofs with low substrate thickness and different drainage materials as a tool to reduce flood risks in a context of climate change. For this purpose, measurements were taken on trays located on a rooftop in Buenos Aires, Argentina, where three green roof systems with the same substrate and vegetation cover composition were installed,

each one using a different drainage material from those available in the local market. During one year, 43 events are monitored, including two rainfalls of more than 70 mm. Results show that extensive roofs can reduce 100% of rainfall runoff. Under heavy rainfall in short periods, all three systems collapse because when exceeding 50 mm in 24 hours, none can hold extra water. After a day of dry weather in summer, all three systems recover their maximum capacity. The average annual cumulative retention is 68%. The type of drainage has little influence, although geomats have a lower efficiency. Finally, it is noted that in Buenos Aires, extensive green roofs with 40 mm substrate depth can survive all year without irrigation or maintenance.

**Key words:** Green roofs, climate change, water retention capacity, sustainable urban drainage systems.

## **SISTEMAS SOLARES DE CALENTAMIENTO DE AGUA SANITARIA. APRENDER DE LAS EXPERIENCIAS**

**Alejandra Ise<sup>1,2</sup>, Luciana Clementi<sup>2,3</sup>, Silvina Carrizo<sup>1,2</sup>, Sol Sierra<sup>2,3</sup>, José Luis Berdolini<sup>1</sup>, Italo Bove<sup>4</sup>, Luciana Martín<sup>1</sup>, Salvador Gil<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Centro de Estudios sobre Territorio, Energía y Ambiente (TEAM). Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. Junín

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

<sup>3</sup> Centro de Estudios Sociales de América Latina (CESAL). Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Tandil

<sup>4</sup> Instituto de Física. Facultad de Ingeniería. Universidad de la República. Uruguay

<sup>5</sup> Escuela de Ciencia y Tecnología. Universidad Nacional de San Martín. Buenos Aires

E-mail: [italobove@gmail.com](mailto:italobove@gmail.com)

**RESUMEN:** Este trabajo tiene como objetivo identificar y analizar beneficios y barreras encontrados en la incorporación de energía solar térmica para la producción de agua caliente sanitaria (ACS) en el sector doméstico. Asimismo, se discute brevemente el uso de sistemas de ACS con bombas de calor, que pueden aportar ahorros similares a los sistemas solares térmicos. Entre los principales aprendizajes de las iniciativas relevadas, se destaca la necesidad de proporcionar información y capacitación a usuarios e instaladores y técnicos de su mantenimiento, así como desarrollar un sistema de posventa que provean garantías extendidas y seguros que hagan más simple y asequible su correcto uso y mantenimiento. Considerar estos aspectos contribuiría a la apropiación social de esta tecnología.

**Palabras clave:** termotanques solares, calentamiento de agua sanitaria, experiencias en Argentina, barreras

### **INTRODUCCIÓN**

En la transición energética, el aprovechamiento de fuentes renovables evoluciona de manera diferente, dependiendo de los recursos y las formas de apropiación de las tecnologías. La energía solar térmica se destaca por sus posibilidades de uso en condiciones climáticas y geográficas diversas, para brindar servicios variados tales como calefacción, cocción, climatización de piscinas y producción de agua caliente sanitaria (ACS). En Argentina diversos programas han propiciado el uso de equipos de ACS solares. (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019; Carrizo et al., 2022).

El objetivo de este trabajo es identificar y analizar beneficios y barreras encontrados en la incorporación de energía solar térmica para producción de ACS a nivel domiciliario. Para ello se estudian diversas experiencias nacionales e internacionales que permiten comprender qué favorece u obstaculiza la apropiación sostenible de la tecnología. El trabajo se apoya en la perspectiva socio-técnica de las transiciones, la cual permite comprender los procesos de cambio en términos sistémicos combinando tecnologías, infraestructuras, regulaciones y prácticas sociales (Geels, 2002; Smith y Stirling, 2010; Bergman, 2013). Desde esta mirada, es posible identificar obstáculos a la apropiación de las tecnologías renovables (Sovacool et al., 2011; Gil et al., 2014; Wyllie et al., 2018); entre ellos, los socio-culturales y socioeconómicos. De este modo, la energía solar es analizada como tecnología social; como tal, comprende productos, técnicas y/o metodologías desarrolladas en interacción con la comunidad, que tienen el potencial de ofrecer soluciones de transformación social (Dagnino et al., 2004; Garrido y Lalouf, 2010).

Dos partes estructuran el trabajo. La primera aborda experiencias internacionales que han conseguido expandir la incorporación de tecnología solar térmica en viviendas y los estímulos a su difusión en Argentina. La segunda, analiza las barreras que frenan al sector a nivel mundial, y con foco en Argentina.

## METODOLOGÍA

Este trabajo se realizó en el marco de proyectos científicos de investigación multidisciplinarios con eje en la transición energética y la expansión de las tecnologías renovables en Argentina y el mundo. El trabajo adopta una estrategia metodológica basada en la triangulación de datos y de técnicas. Según Denzin (1978), la triangulación de datos implica el análisis de diferentes fuentes de datos sobre el mismo fenómeno o evento. La triangulación de técnicas remite a la combinación de métodos y técnicas cualitativas y cuantitativas para paliar las limitaciones o debilidades de cada una de ellas, representando una herramienta de comparación y contraste de resultados (Ávila et al; 2019). En este trabajo se analizó información secundaria proveniente de informes, documentos y bibliografía especializada nacional e internacional. Paralelamente se analizaron datos primarios relevados a través de entrevistas a informantes clave, y observación, realizados en trabajos de terreno entre los años 2015 y 2023, en distintas provincias: Chaco (Resistencia y Fontana), Corrientes (Corrientes), Jujuy (San Salvador de Jujuy, Alfarcito y Susques), Santa Fe (Rosario, Roldán, San Carlos Sud), Buenos Aires (Pergamino, Junín, Bragado, Tandil, Juan E. Barra, Adolfo González Chaves) y Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Los entrevistados incluyeron, desde la oferta: a fabricantes nacionales de termotanques solares, proveedores de equipos importados e instaladores; desde la demanda: a usuarios residenciales. Su selección se realizó de manera intencional, procurando la heterogeneidad geográfica, y la diversidad de actividades y roles. Se realizaron entrevistas de tipo no estructuradas con preguntas organizadas en torno a grandes ejes temáticos. Para los actores de la oferta los ejes fueron: estado actual del sector solar térmico argentino y mundial; principales dificultades, obstáculos identificados para la adopción social de la tecnología; perspectivas futuras del sector. Para los usuarios residenciales, las entrevistas se focalizaron en: factores que actuaron como impulsores, oferta y asesoramiento técnico recibido, experiencia de uso y mantenimiento de la tecnología; servicio posventa recibido; balance de la experiencia y expectativas a futuro. Las entrevistas se realizaron en contexto de trabajos de terreno, en las provincias mencionadas, acompañadas de observación *in situ*. Los testimonios se registraron mediante notas de campo y se tomaron registros fotográficos. La información recolectada permitió conocer en profundidad la problemática de la adopción de la tecnología, los estímulos y obstáculos y el estado de situación nacional y regional. Posteriormente, en sucesivas sesiones de intercambio entre integrantes del equipo y actores del sector solar térmico (fabricantes, instaladores, usuarios), realizadas entre noviembre de 2023 y mayo de 2024 en forma virtual, se puso en discusión la revisión de literatura nacional e internacional sobre la tecnología solar térmica y su desarrollo, y se analizó material gubernamental.

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

Actualmente, hay varias opciones para sistemas de Agua Caliente Sanitaria (ACS). Los más comunes son los calentadores de agua con tanque de acumulación, conocidos como termotanques, que utilizan gas natural, propano, electricidad, energía solar térmica o bombas de calor (BC). El agua se calienta mediante estos métodos y se almacena en un tanque aislado térmicamente. Los calentadores de agua convencionales, aunque asequibles y simples, no son muy eficientes. En muchos casos, el consumo pasivo de energía, que oscila entre 1,5 y 7,5 kWh/día, supera al consumo necesario para calentar el volumen de agua utilizado. Por ejemplo, para calentar 180 litros de agua, suficiente para una familia de tres personas, se requieren unos 5 kWh en el AMBA (Iannelli et al., 2016). En los sistemas a gas, este consumo pasivo se debe al uso de pilotos, mientras que en los termotanques eléctricos está relacionado con el mantenimiento de la temperatura del agua almacenada. Según la Encuesta Nacional de Gastos de los Hogares (INDEC, 2022), el 73% de los equipos de ACS en Argentina tiene algún tipo de consumo pasivo. Es decir, en los sistemas convencionales de ACS, los consumos pasivos varían entre el 30% al 65% del consumo total de los equipos. (Iannelli et al., 2017). Además de los consumos pasivos, los sistemas de calentamiento convencionales tienen eficiencias que varían entre el 75% (quemadores a gas) al 95% (resistencias eléctricas). Estos dos factores limitan fuertemente la eficiencia de los sistemas convencionales de ACS. Si bien los sistemas más eficientes, como los solares térmicos o los que operan con BC, son más respetuosos con el medio ambiente, requieren una inversión inicial mayor debido a su complejidad y costos elevados. Además, dado que algunas ineficiencias, como los consumos pasivos,



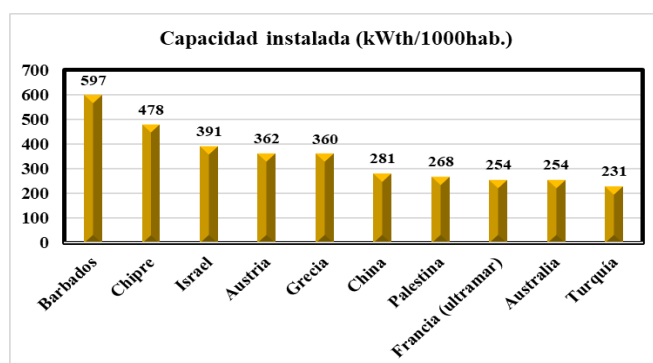
también pueden afectar estos últimos sistemas más eficientes, es necesario un diseño muy atento y cuidadoso para evitarlos (Iannelli et al., 2017; Juanico y Bove, 2021).

Los sistemas solares térmicos pueden ser de calentamiento directo o indirecto. En los primeros, los colectores solares calientan directamente el agua utilizada en el hogar, haciéndolo más simple y asequible para este propósito. Son en general más económicos, pero con riesgo de congelamiento, oxidación y acumulación de sarro en zonas de aguas duras. En los segundos, el módulo solar calienta un líquido caloportador, en general mezcla de agua con glicol, a través del cual se transfiere el calor al agua del tanque, por medio de un intercambiador de calor. Para buena parte de Argentina, éstos tienen mejores prestaciones, pero un costo mayor que los anteriores, del orden de un 50% a 100% a los de calentamiento directo. Por su parte, los colectores solares pueden ser de placa plana (formados por una caja o gabinete -con o sin cubierta- que contiene tubos por los cuales circula el fluido a calentar); o de tubos evacuados (tubos de vidrio concéntricos, soldados entre sí, en cuyo interior se ha hecho vacío) (Secretaría de Gobierno de Energía, 2019).

Para garantizar el suministro de ACS durante todo el año, los sistemas solares requieren un sistema de apoyo convencional para los períodos sin sol (noches, días nublados, etc.). Estos sistemas combinados se denominan híbridos. Para maximizar la eficiencia y la prestación del servicio de ACS de los sistemas híbridos es esencial considerarlos en su totalidad para evaluar su rendimiento y optimizar el uso de la energía solar, así como de las fuentes convencionales. Algunas limitaciones en los equipos complementarios, como los consumos pasivos de pilotes, temperaturas de *seteo* altas (temperatura a la que se fija el agua en el tanque), o el mantenimiento en los termotanques, pueden reducir significativamente los ahorros de energía convencional (Iannelli et al, 2016; Iannelli et al., 2017; Romero et al., 2024). Actualmente, en Argentina, los costos de los sistemas de ACS con Bombas de Calor, y los solares térmicos de calentamiento indirecto, incluyendo su instalación, son muy similares.

### ***Trayectorias de expansión***

La tecnología solar térmica se ha ido expandiendo por numerosos lugares del mundo, a lo largo del siglo XX. Fue popular en California a partir de la década de 1920, habiéndose desarrollado allí los primeros dispositivos. Luego se multiplicó su uso en otros Estados, como el de Florida, donde el recurso solar es considerable. La gran accesibilidad a los combustibles derivados del petróleo y la construcción de grandes represas a partir de los años 1930, que hizo bajar el precio de la electricidad, pusieron freno a esa expansión. Además, los precios de los equipos solares aumentaron, en consonancia con los costos del cobre y de la mano de obra. Otro momento de auge de la energía solar térmica tuvo lugar con las crisis del petróleo en los años 1970 y el inicio de políticas públicas a su favor. No obstante, estos incentivos, su expansión declinó cuando bajaron nuevamente los precios del petróleo, frenando el nuevo ciclo de desarrollo (Berenbaum y Datta, 2020).



*Figura 1: Capacidad instalada total en 2022 en colectores solares por cada 1000 habitantes.*

*Fuente: elaboración propia en base a IEA, 2024.*

Por otra parte, en China, Europa y algunos países de Medio Oriente, esta tecnología ha tenido una adopción más constante y continuada. En 2022, en el mundo, mientras China concentra la mayor capacidad instalada en colectores solares térmicos en términos absolutos (396332 MWth), países como

Barbados, Chipre e Israel reúnen la mayor potencia instalada por cada 1000 habitantes (IEA, 2024) (Figura 1). En estos países se dio continuidad a los incentivos al sector (Thomas, 2023). En 2022, a los nuevos incrementos en el precio de la energía fósil y los conflictos geopolíticos entre Rusia y Europa, se suma la necesidad de disminuir las emisiones de carbono, mediante el uso de fuentes renovables. Además, la lucha contra la pobreza energética ha motivado su aprovechamiento en distintos sitios, por parte de múltiples gobiernos, de la industria y de la sociedad (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019). De hecho, en años recientes, esta tecnología se implementó en varios barrios de viviendas sociales en Argentina.

En cuanto a los mecanismos de incentivo, China cuenta con políticas públicas de promoción e incentivos económicos a la utilización de energía solar térmica. La innovación tecnológica, la necesidad de resguardo frente a escasez de energía y la aceptación social de la tecnología también contribuyeron a su adopción (Liu y Liu, 2013). En Francia, la energía solar térmica se usa considerablemente para calefacción, y junto con China, se posicionó entre los países líderes en esta aplicación en espacios urbanos. Para 2022, el país aumentó su mercado de sistemas híbridos, que generan tanto calor como electricidad y emplean bombas de calor en edificios residenciales (IEA, 2022). Para estimular la adopción de la solar térmica, se implementan programas tales como *MaPrimeRénov*, que incluye una ayuda al recambio de artefactos para ACS (Ministère de l'Economie, des Finances et de la Souveraineté Industrielle et Numérique, 2024). Israel, tras los déficits durante el primer *shock* petrolero de la década de 1970, impulsó el aprovechamiento masivo de la energía solar térmica para ACS, de la que ya era fabricante. Así logró que para principios de la década de 1980 el 60% de la población usara esta tecnología. Desde 2020, más del 90% de los hogares en Israel cuentan con calentadores de agua solares (Wang et al., 2015; Berenbaum y Datta, 2020).

En América Latina, Barbados impulsó su uso para reducir la dependencia de los combustibles fósiles estableciendo incentivos fiscales, incorporación obligatoria en obras públicas y opciones crediticias por parte de instituciones financieras y distribuidores de la tecnología. Adicionalmente, los fabricantes prometían reembolsar el 100% del valor del equipo si el agua no alcanzaba una temperatura determinada (Navntoft, 2018). Así, ha logrado que más del 60% de los habitantes posea un equipo solar para ACS (Navntoft, 2018). Algo similar se realizó en Hawái, donde se ofrecían reembolsos a los consumidores, condicionados a una inspección un año después de la instalación, lo que logró mejorar la fiabilidad de los sistemas. Se constata evidencia en la región de una mayor adopción de la tecnología solar térmica en aquellos países que han desarrollado la fabricación nacional, como Barbados, Brasil y México. En Uruguay es bajo el porcentaje de equipos de fabricación nacional, aunque se destaca el desarrollo de las Especificaciones Técnicas Uruguayas, que definen los requisitos que deben cumplir los equipos de ACS, y la exigencia de que el diseño y la instalación sean supervisadas por un responsable técnico de la instalación (Navntoft, 2018).

En Argentina, el desarrollo de la energía solar térmica tiene una trayectoria de más de 40 años. Desde la década de 1970, grupos de investigación avanzan en diferentes trabajos de experimentación y fabricantes desarrollan prototipos (Follari y Fasulo, 1998). En el siglo XXI, la tecnología solar térmica experimenta su mayor crecimiento. Para el análisis en el tiempo y la distribución espacial de la producción, servicios y uso de energía solar térmica resultan claves los datos publicados por el INTI - Instituto Nacional de Tecnología Industrial- producto del Censo realizado (Sabre et al., 2019; Sabre et al., 2021).

Los datos correspondientes al censo 2019 reflejan una industria solar térmica en expansión. En ese año se contaban en el país 217 empresas dedicadas al sector solar térmico, y se comercializaron 57076m<sup>2</sup> de colectores para ACS y 40777m<sup>2</sup> de colectores sin cubierta para climatización de piscinas. Ello representa el doble de superficie cubierta con equipos solares térmicos con respecto al Censo de 2017 (Sabre et al., 2021). De los equipos vendidos en el país, 22% son de origen nacional; mientras que el 78% son importados, la mayoría provenientes de China. El 85% de los sistemas son compactos (15% restante son partidos y forzados) y el 70% corresponden a la tecnología de tubos de vacío (30% restante de placa plana). Las ventas de equipos para ACS importados aumentaron un 71% entre 2017 y 2019 (Sabre et al., 2021). Paralelamente, la capacidad de fabricación de la industria nacional de equipos para ACS se

incrementó en un 85%, pasando de 33698 m<sup>2</sup> en 2017 a 62374m<sup>2</sup> en 2019. Mientras que en 2017 se fabricaron en Argentina 9.200 equipos para ACS, en 2019 fueron 12.600, lo que representa un incremento del 37%. La producción nacional proviene de una veintena de pequeñas empresas (de hasta 9 empleados), localizadas en su mayoría en provincia de Buenos Aires (6), pero también en Córdoba (3), Santa Fe (3), Mendoza (3), San Juan (2), San Luis (1), Salta (1), Chaco (1) y Jujuy (1).

En 2009 el INTI creó la Plataforma de Energía Solar Térmica para medición, evaluación y ensayo, simulando las condiciones de usos y otras características de los equipos solares térmicos. Allí se trabajó con el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), en la elaboración de las normas para colectores solares térmicos: Res. N° 520 y 753 de la Secretaría de Comercio de la Nación. En 2018 el INTI se convirtió en el certificador, a nivel nacional de las competencias laborales de los instaladores de equipos de energía solar térmica, siguiendo la norma internacional ISO/IEC 17.024 (INTI, 2018). La promoción de la tecnología, la refuerza el PRODIST (s.f.) -Programa de Desarrollo de la Industria Solar Térmica-, de la Secretaría de Industria y Desarrollo Productivo, que busca impulsar la fabricación nacional y ampliar la capacidad instalada (Arraña et al., 2022). A su vez, en colaboración con el Ministerio de Desarrollo Territorial y Hábitat, se propuso incorporar equipos solares nacionales a las viviendas sociales. Así, se previó equipar 60.000 viviendas del programa nacional Casa Propia (s.f.).

Desde provincias y municipios se han tomado medidas para apoyar el aprovechamiento de energía solar térmica para ACS (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019; Carrizo et al., 2022). Algunas pretenden la obligatoriedad del uso de equipos solares, especialmente en edificaciones nuevas, edificios públicos, y/o han lanzado incentivos para su adquisición. La Ciudad Autónoma de Buenos Aires incentiva la energía solar para producción eléctrica, calefacción y ACS (Ley 4024/2011). Entre Ríos establece la incorporación obligatoria y progresiva de sistemas solares para ACS en los proyectos de construcción y/o readecuación de edificaciones públicas (Ley 10.635/2018). Córdoba declaró de interés los sistemas solares para ACS, así como la fabricación e instalación de éstos, la investigación y el desarrollo (Ley 10.573/2018). Santa Fe, con su programa “Un sol para tu techo”, Salta, con su plan “Sol en casa” y Jujuy con el programa “Con el sol ahorramos”, han promovido facilidades crediticias para la adquisición y/o instalación de tecnología solar para ACS en viviendas. A nivel municipal, Venado Tuerto (Ordenanza 3633/2008) y Rosario (Ordenanza 8784/2011) han sido pioneros al sancionar ordenanzas de impulso a la incorporación de la tecnología solar térmica para ACS. A ellos se sumaron luego otros municipios como Santa Fe (Ordenanza 11867/2012), Córdoba (Ordenanza 12302/2014), Rafaela (Ordenanza 4826/2016), y Godoy Cruz (Ordenanza 6664/2017).

Iniciativas individuales y colectivas de actores públicos, privados, asociaciones civiles u organizaciones sin fines de lucro favorecen el uso de la energía solar térmica (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019). El PERMER -Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales- a lo largo del siglo XXI, ha promovido las energías renovables en distintas provincias, brindando, entre otros, el servicio de ACS a poblaciones dispersas (Ibañez Martín et al., 2020). El PAMI (s.f.) -Programa de Asistencia Médica Integral- también ha instalado equipos solares en viviendas de personas que dependían de la leña como combustible en sus hogares. Por ejemplo, a partir de un diagnóstico sobre servicios energéticos instaló sistemas solares térmicos en 20 viviendas de Susques, Jujuy. Otros ejemplos incluyen a la Fundación EcoAndina (s.f.) en los denominados “Pueblos solares” en Jujuy; FOVISEE (s.f.) -Foro de Vivienda Sustentabilidad y Energía-, evaluando el impacto social de colectores solares en un barrio de la localidad bonaerense de Moreno y en Villa 31, Ciudad de Buenos Aires. Progresivamente, los equipos de ACS solares pasan a integrar los paisajes urbanos y rurales de Argentina.

### ***Barreras en el camino***

Hasta la primera década del siglo XXI, la energía solar térmica era la opción más económica y eficiente para ACS, pero con la sostenida caída de los precios de los sistemas fotovoltaicos (PV) y el desarrollo de los calentadores de agua con bomba de calor (*Heat Pumps Water Heaters* o HPWH) a precios asequibles, estas tecnologías compiten en costo y eficiencia con los sistemas solares térmicos de ACS. (Our World in Data, 2024; Institute for Sustainable Technologies, 2023). Así lo demuestra la tendencia de la nueva capacidad instalada. Mientras la instalación de colectores solares térmicos en el mundo

ascendió a comienzos del siglo XXI, encontró un pico en el año 2013, a partir del cual la cantidad de colectores nuevos desciende (Figura 2). Por otra parte, esta misma figura muestra cómo los sistemas fotovoltaicos (PV) tuvieron un desarrollo mucho más explosivo y sostenido en el tiempo.

En Argentina, el aprovechamiento de la energía solar térmica para ACS presenta obstáculos de diferentes tipos: institucionales, regulatorios, técnicos, socio-económicos. Existen varios proyectos institucionales, donde se instalaron sistemas solares térmicos para ACS en viviendas, como el caso de las provincias de Jujuy, Santa Fe, Buenos Aires, y el Barrio Música de CABA (García Huamani, 2019; Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019). El relevamiento y análisis de iniciativas promovidas por programas estatales y de instalaciones de usuarios particulares que procuran aprovechar la energía solar térmica para satisfacer demandas domiciliarias en distintos sitios del país, muestra déficits y problemas que repercuten en su sostenibilidad (Carrizo et al., 2022). Dichas dificultades pueden detectarse en diferentes momentos, tanto en la concepción de los programas o proyectos, durante la implementación de las instalaciones, como así también en el uso y mantenimiento del equipamiento. Los problemas se registran tanto en instalaciones individuales, como en experiencias realizadas colectivamente.

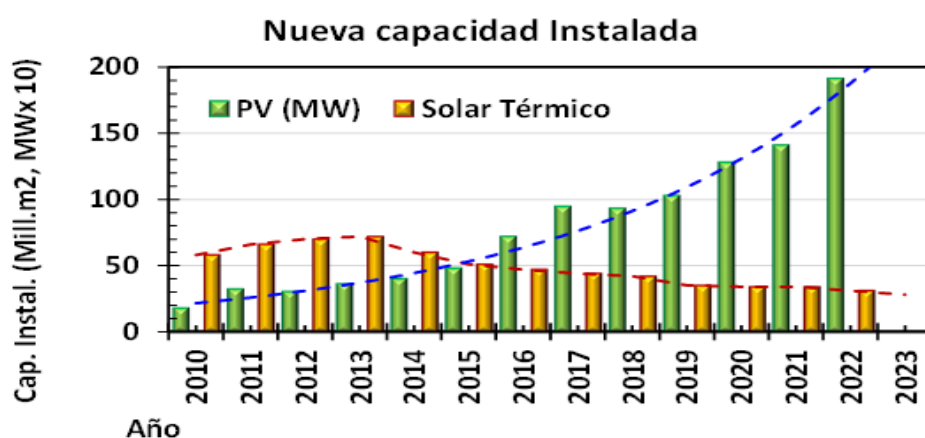


Figura 2. Nueva capacidad instalada en el mundo. Solar térmico (millones de m<sup>2</sup>, por año). Fotovoltáica instalada (MW). Fuente: elaboración propia en base a datos publicados por [iea-shc.org](https://www.iea-shc.org) y [Our World in Data](https://www.ourworldindata.org).

En el marco de trabajos de campo, realizados entre los años 2015 y 2023, en distintas provincias: Chaco (Resistencia y Fontana), Corrientes (Corrientes), Jujuy (San Salvador de Jujuy, Alfarcito y Susques), Santa Fe (Rosario, Roldán, San Carlos Sud), Buenos Aires (Pergamino, Junín, Bragado, Tandil, Juan E. Barra, Adolfo González Chaves) y Ciudad Autónoma de Buenos Aires, se realizaron más de 40 entrevistas no estructuradas a: fabricantes nacionales de tecnología, proveedores, instaladores, y usuarios domiciliarios de la tecnología solar térmica. Éstos últimos incluyeron casos de instalaciones colectivas, como parte de un programa de equipamiento de viviendas y casos de experiencias particulares. Entre las experiencias colectivas se visitaron y se realizaron entrevistas en: Barrio Bomberos Voluntarios en Bragado; Barrio Mugica, CABA; instalaciones en Jujuy, Chaco, Corrientes, Santa Fe, y Buenos Aires en el marco de programas provinciales de equipamiento de viviendas con sistemas solares térmicos. Las preguntas se organizaron en torno a grandes ejes temáticos. Para los actores de la oferta los ejes fueron: estado actual del sector solar térmico argentino y mundial; principales dificultades, obstáculos identificados para la adopción social de la tecnología; perspectivas futuras del sector. Para los usuarios residenciales, las entrevistas se focalizaron en: factores que actuaron como impulsores, oferta y asesoramiento técnico recibido, experiencia de uso y mantenimiento de la tecnología; servicio posventa recibido; balance de la experiencia y expectativas a futuro.

El crecimiento de la capacidad solar térmica para ACS, a nivel mundial, contrasta con el crecimiento de la capacidad fotovoltaica, que ha sido sostenido desde los años 1990, y muestra relación con sus costos. Mientras los precios de la PV se han reducido en el tiempo, los costos de la solar térmica han ascendido (Figuras 3a y b). Esto se debe en parte a que la tecnología de los sistemas solares para calentar agua no está tan estandarizada como los paneles PV, su escala de fabricación es asimismo limitada y está distribuida por todo el mundo en pequeña escala. Por último, el incremento en los costos de las materias primas, como cobre, aluminio, vidrios, hace que su costo sea poco elástico y volátil.

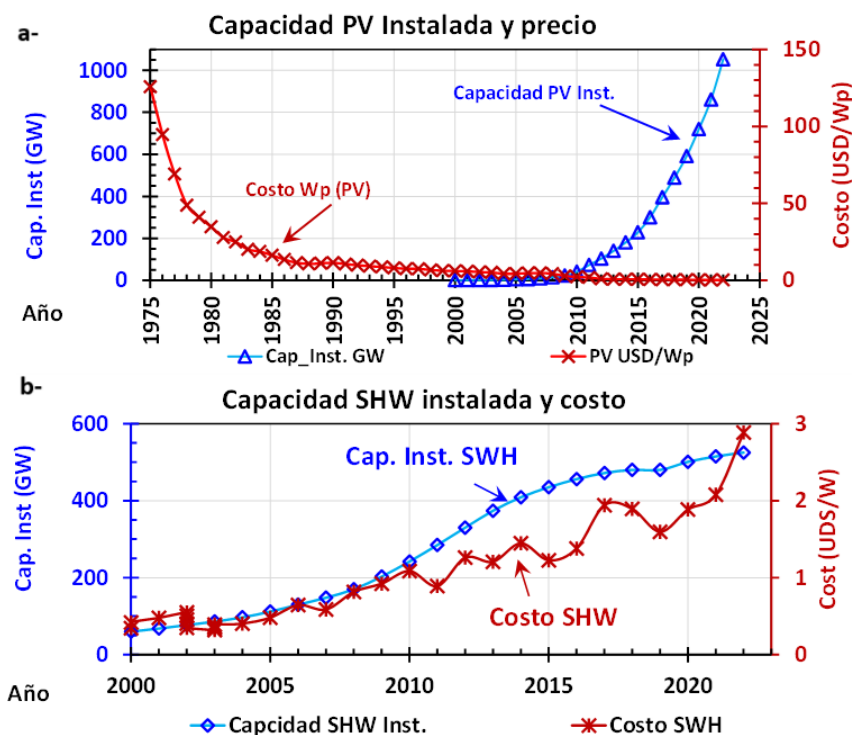


Figura 3a: variación de la capacidad PV instalada y precio de la tecnología en función del tiempo. (Our World in Data, 2024). Figura 3b: variación de la capacidad de los sistemas SHW y precios por  $W$  en los EE.UU. (AEE - Institute for Sustainable Technologies, 2023).

Entre las experiencias particulares, relevadas en las provincias mencionadas, se recupera el testimonio de una familia bonaerense (matrimonio con tres hijas). El mismo fue seleccionado ya que resulta representativo de testimonios recurrentes entre los usuarios residenciales de las localidades incluidas en el estudio, además de presentar variedad de problemas, tanto en la instalación, como en el uso y mantenimiento posterior, lo que lo vuelve ilustrativo de las barreras que aún restar sortear para contribuir a la adopción masiva de la tecnología. La mencionada familia bonaerense, con motivación ambiental e interés técnico-económico en 2017, decide invertir en un termotanque solar. Una empresa de la región instalaría el equipo, nacional, de placa plana y sistema indirecto, que se conectó con un calefón a gas convencional, que aportaría la energía adicional. Tras la instalación comenzó un largo camino de dificultades para lograr un uso efectivo y confortable del equipamiento (Figura 4).

El primer inconveniente resultó la salida de agua caliente por otros grifos del lavadero y patio, que se atribuyó a un error en la instalación por falta de correspondencia entre los planos sanitarios y lo existente, lo que requirió reformas en la vivienda para que el calefón tuviera una provisión de agua exclusiva. El segundo inconveniente fue la falta de salida de agua, ante la necesidad de eliminar burbujas de vapor que se formaban los días de calor, en el interior del sistema. Esto requirió la colocación de un tubo de venteo, que faltó inicialmente. Se constataron problemas y riesgos en la temperatura del agua, debido a que también había faltado la instalación de una válvula mezcladora. Nuevas complicaciones aparecieron con el uso y mantenimiento. Al tercer año, comenzó a percibirse una pérdida de rendimiento del equipo, que se asoció a un faltante de líquido agua-glicol, como resultado de la falta de uso del termotanque

durante el período de vacaciones. El proceso de aprendizaje y reforma continuó, ya que, en 2021, el propietario de la vivienda tomó conocimiento de que el calefón que complementa al colector solar debe ser apto solar. Además de la colocación de la llave mezcladora, otra mejora pendiente sería renovar periódicamente el revestimiento aislante de los caños en el techo. Los cambios en las prácticas y hábitos que requirió la instalación del calefón sin piloto, apto solar fueron recibidos de diferente forma por los integrantes de la familia.



Figura 4: Síntesis de las dificultades y acciones en el empleo de un termotanque solar en una vivienda familiar. Fuente: Elaboración propia.

En instalaciones residenciales realizadas en el marco de experiencias colectivas, a partir de observación directa, y recolectando testimonios a través de entrevistas a los usuarios, se detectaron varios problemas de funcionamiento, y/o en el uso de la tecnología. Muchos de ellos por falta de capacitación al usuario sobre el manejo de la tecnología. Por ejemplo, en Jujuy, los equipos solares instalados en viviendas sociales no tenían sistema de apoyo convencional. La mayoría de los testimonios de los usuarios destacan el hecho de que en los días nublados y fríos los equipos dejaban de dar agua caliente, cuando más lo necesitaban. Muchos de ellos no entendían la razón y culpaban de esto a la tecnología solar. Además, las entrevistas y visitas realizadas en terreno permitieron observar que la mayoría de estos sistemas dejaron de funcionar en menos de un año de vida. Ello convoca a reflexionar sobre la necesidad no sólo de financiar la adquisición e instalación de estos equipos, sino sobre todo el mantenimiento adecuado por al menos diez años.

A partir de las experiencias individuales y colectivas relevadas –en las provincias de Jujuy, Chaco, Corrientes, Santa Fe, Buenos Aires y Ciudad Autónoma de Buenos Aires- y los testimonios recolectados mediante entrevistas, se analizaron sus principales dificultades. En todas se identificaron problemas. En la mayoría de ellas se detectan dos o más de los siguientes inconvenientes:

#### **Problemas técnicos**

- Escasa o nula capacitación al usuario sobre las posibilidades y limitaciones de la tecnología: Programas de equipamiento de viviendas, realizados en un corto período de tiempo, no han incluido la capacitación al usuario. Los entrevistados muestran desconocer características básicas de los equipos.



Manifiestan, por ejemplo: “no tenemos agua caliente a la mañana” (usuario de Barrio Bomberos Voluntarios, Bragado).

- Instalaciones mal orientadas o incompletas realizadas por personas sin suficiente conocimiento. La observación directa permite comprobar orientación inadecuada, que no maximiza la exposición al sol, sobre las que se proyectan sombras (Figura 5A) o bien, instalaciones con elementos faltantes o adecuaciones necesarias para un uso óptimo (figura 5B).
- Diseño y dimensionamiento inadecuado que resulta en incompatibilidades entre el equipamiento instalado y los sistemas de abastecimiento (Figura 5B).

#### Barreras económicas

- Falta de acceso a beneficios crediticios o financiación adecuada: la mayoría de los usuarios entrevistados destaca la falta de opciones crediticias. Del mismo modo, instaladores refieren que la inversión requerida, sobre todo en el contexto macroeconómico argentino, dificulta el acceso a la tecnología.
- Políticas públicas que no consideran factores contextuales o socio-territoriales, requisitos burocráticos que no se ajustan a la realidad socioeconómica de los usuarios. Por ejemplo, residentes rurales dispersos a los que se les exige trasladarse a la capital provincial a fin de inscribirse para ser beneficiarios de un programa de micro-créditos.

#### Desafíos en el mantenimiento

- Falta de consideración de condiciones locales, como el tipo de agua, que puede afectar la eficiencia de los sistemas instalados. Usuarios de algunas localidades (Tandil, Bragado) manifiestan problemas por acumulación de sarro.
- Asesoramiento técnico insuficiente sobre equipos necesarios, instalación y mantenimiento. Por ejemplo, desconocimiento sobre la necesidad de usar calefones apto solar, o la inclusión de válvulas mezcladoras. En las experiencias de Bragado, Juan E. Barra y A. Gonzalez Chaves, al ser interrogados sobre el haber recibido mantenimiento posterior, los usuarios responden negativamente.

#### Barreras institucionales o regulatorias

- Problemas con el *derecho al sol*, donde construcciones vecinas o árboles afectan la insolación de los sistemas solares. Mecanismos legales para la resolución de estos conflictos. (Figura 5A).
- Expansión o reasignación de la edificación inhabilitando el equipamiento (Figura 5C)
- Falta de información al momento de la transferencia de propiedad.



5.A. Tandil, Buenos Aires. 2017



5.B. Pergamino, Buenos Aires. 2023.



5.C. Roldán, Santa Fe. 2022.

*Figura 5. Mosaico de experiencias con dificultades en el empleo de tecnología solar térmica para calentamiento de agua sanitaria domiciliar en Argentina. Fuente: Tomadas en diferentes jornadas de campo por los autores del trabajo.*

## CONCLUSIONES

En Argentina, como en otros países, el consumo de ACS es el segundo consumo en importancia en el sector residencial, después del acondicionamiento térmico. Sin embargo, en las familias sin acceso a redes de gas natural, el consumo asociado al ACS es el principal consumo de estas familias. (Zavalía Lagos, et al., 2022). De ahí su relevancia en el sistema energético nacional. Los sistemas solares de

ACS, al igual que aquellos que usan bombas de calor para producir ACS, tienen la potencialidad de reducir notablemente los gastos asociados a la producción de ACS, en un 60% al 70% (Iannelli et al., 2016). Sin embargo, existen distintas barreras que frenan la expansión de estas tecnologías. Por un lado, la inexistencia de un marco institucional y legal, normas simples y efectivas de evaluación de su eficiencia y funcionalidad, sumado a la falta de una agencia dedicada a su promoción y regulación. Por otro lado, existen barreras económicas y financieras. El alto costo inicial de estos equipos desalienta su uso, además de la escasez de créditos adecuados. En ese sentido, los equipos convencionales tienen ventajas en estos dos últimos aspectos. Otra barrera importante que se identifica en las experiencias colectivas analizadas es la no realización de mantenimiento y seguimiento posterior del funcionamiento de los equipos, lo que tiende a generar malestar en los usuarios y a retrasar la aceptación social de estas tecnologías. De nuevo, aquí los equipos convencionales tienen ventajas notables. Se observan barreras socioculturales, ligadas a la falta de información sobre la tecnología o de un asesoramiento adecuado para el usuario, como a problemas de planificación o instrumentación de planes.

Frente al contexto de inconvenientes en la tecnología solar térmica, las bombas de calor de ACS pueden resultar una alternativa competitiva. Esta tecnología se ofrece en Argentina desde hace algunos años, a un costo comparable al de equipos solares térmicos de sistema indirecto; aunque bastante más alto en comparación con un calefón o termotanque convencional. La ventaja respecto de la tecnología solar estaría en la sencillez de la instalación, similar a un termotanque eléctrico. Como contrapartida, la oferta de productos de origen nacional es escasa, lo cual podría ser una dificultad en caso de desperfectos o averías que demandaran servicios técnicos y repuestos. A pesar de la gran eficiencia energética de las bombas de calor para calentamiento de agua sanitaria, el empleo de esta tecnología se encuentra principalmente más extendido para el acondicionamiento térmico de los ambientes.

Una mirada integral en la formulación de políticas y la estrategia comunicativa sobre la tecnología resultarían fundamentales para facilitar su difusión y apropiación. Es clave que las personas puedan comprender las posibilidades y limitaciones de los equipamientos, manejen su uso en forma adecuada, y modifiquen sus hábitos para optimizar las prestaciones de los mismos. En este sentido formar personal para tareas de instalación y mantenimiento se muestra importante para asegurar un uso óptimo de los equipos, así como contar con servicios de asesoramiento, mantenimiento, seguros y garantías, que permitan una utilización fácil y asequible de los mismos.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

La investigación se enmarca en el Proyecto de Investigación Plurianual 2021-2024 “Oportunidades de transición ecológica y solidaria del siglo XXI. Alternativas de energización territorial en Argentina” (11220200102273CO) bajo la dirección de Silvina Carrizo, financiado por el CONICET.  
<https://convocatorias.conicet.gov.ar/wp-content/uploads/sites/3/IF-2021-85081432-APN-DCPCONICET-1.pdf>

## REFERENCIAS

- Arraña, I., Bertinat, P., Chemes, J., Di Ruscio, N., y Garrido, S. (2022). Políticas públicas implícitas y explícitas para la transición energética en la Argentina: El caso del Programa de Desarrollo de la Industria Solar Térmica (PRODIST). *Prácticas de Oficio. Investigación y reflexión en Ciencias Sociales*, (29), 39-53.
- Avila, H. F., González, M. M., & Licea, S. M. (2019). La triangulación metodológica como método de la investigación científica: Apuntes para una conceptualización. *Didasc@lia: didáctica y educación*, 10(4), 137-146.
- Bergman, N. (2013). Why is renewable heat in the UK underperforming? A socio-technical perspective. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 227(1), 124-131
- Berenbaum, D., y Datta, M. (2020). ¿Por qué los calentadores de agua solares no son más populares en los EE. UU., incluso en estados favorables a la energía solar como California? Recuperado de <https://ichi.pro/es/por-que-los-calentadores-de-agua-solares-no-son-mas-populares-en-los-ee-uu-57360637089345> [consulta: 17 de julio de 2024]

- Casa Propia (s.f.) <https://www.argentina.gob.ar/habitat/casapropia>
- Carrizo, S; Villalba, S; Zavalía, R; Gil, S (2022) Eficiencia energética, prácticas sostenibles para la inclusión energética. *Petrotecnica* 1, Pp 24-33
- Dagnino, R; Brandao, F. C; y Novaes, H. T. (2004). Sobre o marco analítico conceitual da Tecnologia Social, en VV. AA., *Tecnología Social: uma estratégia para o desenvolvimento*, Fundação Banco do Brasil y Rede da Tecnología Social, Brasília.
- Denzin, N, K. (1978). *The research act. A theoretical introduction to sociological methods*. McGraw-Hill.
- Follari, J. y Fasulo, A. (1998). Veinte años con los calefones solares argentinos. *Energías Renovables y Medio Ambiente* (5) 1-6
- FOVISEE (s.f.). Foro de Vivienda Sustentabilidad y Energía. <https://fovisee.org/>
- Fundación EcoAndina (s.f.). <https://www.ecoandinafundacion.org/>
- García Huamani, C.C. (2019), *Uso de termotanques solares para el calentamiento de agua de viviendas sociales de la provincia de Jujuy (Argentina)*, Trabajos fin de máster Universidad Complutense de Madrid
- Garrido, S., Lalouf, A. (2010). Energía solar térmica para la resolución de problemas sociales. Una trayectoria socio-técnica (1974-2010). XXII Jornadas de historia económica Asociación Argentina de Historia Económica. Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research policy*, 31(8-9), 1257-1274.
- Gil, S., Prieto, R., y Iannelli, L. (2014). Barreras para el Desarrollo de la Energía Solar Térmica en Argentina-Amortización de los equipos solares híbridos. In 5 Congreso Internacional Solar Cities. *Energía en las ciudades: innovación frente al cambio climático*.
- Iannelli, L; Prieto, R; Gil, S (2016). Eficiencia en el calentamiento de agua. Consumos pasivos en sistemas convencionales y solares híbridos. *PETROTECNIA*, LV(3) 586-595. <https://www.petrotecnica.com.ar/agosto16/sinPublic/Eficiencia.pdf>
- Iannelli, L; Prieto, R; y Gil, S (2017). *Eficiencia en el calentamiento de agua caliente sanitaria en Argentina*. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, ASADES, Vol. 39, pp. 21 - 29, 2017
- Ibañez Martín, I; Guzowski, C; y Maidana, F (2020) Pobreza energética y exclusión en Argentina: mercados rurales dispersos y el programa PERMER Reflexiones vol.99 n.1, San Pedro de Montes de Oca. <http://dx.doi.org/10.15517/rr.v99i1.35971>
- IEA Solar heating and cooling programme (sitio web) <https://www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide>
- IEA (2022). Informe Solar Heat Worldwide 2022. Programa de Colaboración Tecnológica en Calefacción y Refrigeración Solar. Recuperado de [www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide](https://www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide) [consulta: 2 de julio de 2024].
- IEA (2024). Informe Solar Heat Worldwide 2024. Recuperado de <https://www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide> [consulta: 26 de julio de 2024].
- INDEC (2022). Encuesta Nacional de Gastos de los Hogares 2017-2018- Energía. [Online] [https://www.indec.gob.ar/ftp/cuadros/sociedad/engho\\_2017\\_2018\\_uso\\_energia.pdf](https://www.indec.gob.ar/ftp/cuadros/sociedad/engho_2017_2018_uso_energia.pdf)
- Institute for Sustainable Technologies AEE (2023) <https://www.aee-intec.at/index.php?lang=en>
- INTI (2019). Censo Nacional Solar Térmico 2018: informe período 2017. Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- INTI (2018) Argentina cuenta con sus primeros instaladores de sistemas solares térmicos certificados. Prensa INTI. Recuperado de: <https://www.inti.gob.ar/noticias/23-metrologia-y-calidad/1133-argentina-cuenta-con-sus-primeros-instaladores-de-sistemas-solares-termicos-certificados>
- Juanico, L; y Bove, I (2021). Efficient Heating of Sanitary Water With Heat Pump. *ENERLAC*. Vol. V. N0:1. Pag.94 – 104, June, 2021.
- Liu, L; y Liu, J. (2013). Why is China the World's Leader of Solar Water Heater Production and Consumption? *American Journal of Environmental Science*, 9 (2): 182-187.
- Ministère de l'Economie, des Finances et de la Souveraineté Industrielle et Numérique (2024). MaPrimeRénov': la prime pour la rénovation énergétique. Recuperado de [economie.gouv.fr](https://economie.gouv.fr)
- Navntoft, L. C. (2018). Calentadores de agua solares. Estudio de casos de normas de calidad, procedimientos de verificación e instrumentos de información al consumidor para calentadores de agua solares en países de América Latina y el Caribe. Fundación Bariloche
- Our World in Data (sitio web) <https://ourworldindata.org/>

- PAMI (s.f.) Programa de Asistencia Médica Integral. <https://www.pami.org.ar/>
- PRODIST (s.f.). Programa de Desarrollo de la Industria Solar Térmica. <https://www.argentina.gob.ar/produccion/industria-sostenible/programa-de-desarrollo-de-la-industria-solar-termica-prodist>
- Romero, P., Fiora, J., Oddo, L., Silvero, W., Carri, C., Bove, I., y Gil, S. (2024). Ahorro de Energía en Calentamiento de Agua Sanitaria: Uso de Timer en Termotanques Eléctricos, Enviado a la XLVI Reunión de ASADES Rosario- Octubre 2024.
- Sabre, M.; Bornancin M.; Pescio F.; Chiaravalloti A.; Cordi M.; Lunardelli G.; Quiroga, L. (2019). Censo Nacional Solar Térmico 2018: informe período 2017 1a ed. General San Martín: Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Recuperado de [https://censost.inti.gob.ar/docs/censo\\_energia\\_solar\\_termica2017.pdf](https://censost.inti.gob.ar/docs/censo_energia_solar_termica2017.pdf) [consulta: 15 de julio de 2024]
- Sabre, M.; Pereira, G.; Medel, N.; Pescio, F.; Chiaravalloti, A.; Bornancin, M.; Cordi, M.; Lunardelli, G. y Quiroga, L. (2021). Censo Nacional Solar Térmico 2020: período 2019. General San Martín: Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Recuperado de <https://censost.inti.gob.ar/docs/censo-solar-termico-2020.pdf> [consulta: 12 de julio de 2024]
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (2019). Propuestas de implementación de energías renovables en viviendas sociales para la generación de energía eléctrica distribuida y solar térmica. Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda.
- Secretaría de Gobierno de Energía (2019). Introducción a la energía solar térmica; contribuciones de Fabián Garreta ... [et al.]; coordinación general Romero, I; 1a ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
- Smith, A. y Stirling, A. (2010). The politics of social-ecological resilience and sustainable socio-technical transitions. *Ecology and society*, 15(1).1-13
- Saravia, L. (2007). La energía solar en la Argentina, Petrotecnia. Instituto Argentino del Petróleo y Gas. 56-65
- Sovacool, B. K., D'Agostino, A. L., y Bambawale, M. J. (2011). The socio-technical barriers to Solar Home Systems (SHS) in Papua New Guinea: "Choosing pigs, prostitutes, and poker chips over panels". *Energy Policy*, 39(3), 1532-1542.
- Thomas, M. (2023). 90% of Homes in Israel Have a Solar Water Heater. Why Don't More Americans Use Them? Recuperado de <https://www.distilled.earth/p/90-of-homes-in-israel-have-a-solar> [consulta: 17 de julio de 2024]
- Wang, Z., Yang, W., Qiu, F., Zhang, X., y Zhao, X. (2015). Solar water heating: From theory, application, marketing and research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (41) 68-84.
- Wyllie, J. O., Essah, E. A., y Ofetotse, E. L. (2018). Barriers of solar energy uptake and the potential for mitigation solutions in Barbados. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (91) 935-949.
- Zavallá Lagos, R; Iannelli, L; Gil, S. (2022). Anatomía del Consumo Residencial Argentino-Uso racional y eficiente del acondicionamiento térmico de viviendas. *Futuros ENERGIA -N. Coppari, S. Jensen, M. Iglesias y V. Cañadas (Edit.)*145-172. Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias y Fundación, UNSAM.

## **SOLAR THERMAL SYSTEMS FOR DOMESTIC HOT WATER. LEARNING FROM EXPERIENCES**

**ABSTRACT** This work aims to identify and analyze benefits and barriers to the incorporation of solar thermal energy for domestic hot water (DHW) production at the household level. Additionally, we briefly discuss the use of DHW systems with heat pumps, which can offer savings similar to those of solar thermal systems. Key lessons from the identified initiatives highlight the need to provide information and training to users and installers, as well as developing an after-sales service system that includes extended warranties and insurance to ensure proper operation and maintenance. This could contribute to the social appropriation of the technology.

**Keywords:** solar water heaters, domestic hot water, experiences in Argentina, barriers

## **EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE SISTEMAS HÍBRIDOS SOLARES FOTOVOLTAICOS/BIOGÁS CONECTADOS A LA RED: CASO DE ESTUDIO DE PUJATO NORTE, SANTA FE**

**Juan P. Cecchini<sup>1</sup>, Luis E. Venghi<sup>1</sup>, Luis I. Silva<sup>1</sup>, Brenda Ledesma<sup>2</sup>, Ernesto E. Coutsiars<sup>3,4</sup>**

<sup>1</sup>Centro de Investigación y Transferencia de Rafaela CONICET-UNRAf, Rafaela

<sup>2</sup>Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Córdoba

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta, Salta, Argentina

<sup>4</sup>Calden Consultoría SRL, Villa Allende, Córdoba, Argentina

e-mail: [juanp.cecchini@unraf.edu.ar](mailto:juanp.cecchini@unraf.edu.ar)

**RESUMEN:** En el presente trabajo se presenta un sistema híbrido de energía conformado por paneles solares fotovoltaicos, por un generador de biogás y por la red eléctrica pública para abastecer eléctricamente a la comunidad de Pujato Norte. Se plantean los costos de emplazamiento, operativos y de mantenimiento del sistema con una proyección de 25 años y se fijó como restricción un mínimo de renovables del 50 %. La viabilidad económica se evaluó utilizando el software HOMER Pro frente a diferentes caudales y precios de los residuos a procesar y sus ratios de gasificación. Los resultados mostraron que la mejor configuración es un generador de biomasa de 50 kW, y una planta fotovoltaica de 501 kW la cual satisfará la demanda promedio de carga de 4.109 kWh por día aportando a la red un 50,2 % de energías renovables. El costo inicial de este sistema es de aproximadamente USD 997.029 y el costo de la energía para esta configuración será de 0,184 USD/kWh, que es mayor que la situación actual en la que la red es la fuente principal de energía, pero en contrapartida se produce un ahorro del 41 % en las emisiones de CO<sub>2</sub>.

**Palabras clave:** energía solar, RSU, residuos ganaderos, biogenerador, sistema híbrido conectado, HOMER Pro.

### **INTRODUCCIÓN**

La calidad de un servicio eléctrico, que involucra las interrupciones y su tiempo de duración, representa un desafío en los sistemas de distribución en Latinoamérica. Los problemas de calidad de servicio eléctrico pueden ser el resultado de diversas causas como la capacidad de generación inadecuada por la falta de centrales eléctricas, infraestructura con líneas de transmisión y distribución obsoletas, mantenimiento deficiente, entre otras cosas. En consecuencia, se producen microcortes o cortes completos en una parte importante de una región, que traen aparejados impactos económicos y sociales negativos como la imposibilidad de trabajar, deterioro de equipos, desperdicio de productos y malestar general.

Otra causa que exacerba el problema es que los sistemas energéticos existentes en la actualidad para abastecimiento de emergencia, se basan principalmente en combustibles fósiles, que producen emisiones y contribuyen al calentamiento global. Para contrarrestar esta problemática, se necesitan de políticas sustentables mediante el uso de fuentes de energía renovables (en inglés: Renewable Energy Sources, RES) tales como la energía hidroeléctrica, solar, eólica y biomasa. Particularmente en la región centro de la Argentina, la energía solar y la biomasa se perfilan como los recursos renovables con mayor potencialidad (Bellini et al., 2005; Tang et al., 2021). La energía solar fotovoltaica (en inglés PV) ha tenido un desarrollo significativo debido a los avances tecnológicos que implican una reducción en sus costos nivelados de producción. Otras RES como la biomasa ha ganado terreno, debido a que la



disponibilidad de este recurso es un indicador de la potencial viabilidad de generación de energía con esta fuente (Bhattacharjee y Dey, 2014).

Para abordar este desafío, este estudio propone un sistema híbrido de suministro de energía que combina energía solar fotovoltaica, y biogás para proporcionar una fuente de energía sostenible a una localidad del interior de la República Argentina, en conjunto a la red eléctrica pública (GRID). La energía solar fotovoltaica, es una fuente de energía renovable y limpia, y se utilizará para generar electricidad durante el día. Además, el biogás, producido a partir de desechos que provienen de diversas fuentes como los residuos sólidos urbanos (RSU) de la localidad, los desperdicios de tambos, feedlots y actividades ganaderas, servirán como combustible complementario para generar electricidad durante la noche y en períodos de baja radiación solar. Asimismo, se aborda indirectamente otra problemática actual que es el aprovechamiento y uso sustentable de los residuos tanto domiciliarios como de actividades productivas. Para evaluar la viabilidad técnica y económica del sistema propuesto se empleó el software HOMER Pro, una herramienta de diseño y análisis de sistemas energéticos híbridos. Este software permitió determinar la configuración óptima del sistema, incluyendo la capacidad de los componentes (paneles solares, generador de biogás). Los resultados de este estudio proporcionarán información valiosa para la toma de decisiones sobre la implementación de sistemas híbridos de suministro de energía en la región, promoviendo el desarrollo sostenible y la calidad de vida de los habitantes.

## METODOLOGÍA

### *Caso de Estudio*

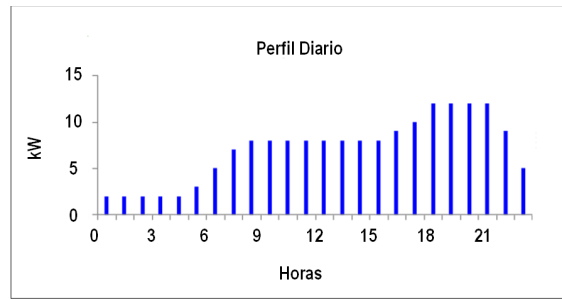
Características del lugar seleccionado: si bien la electrificación de la región cuenta con acceso a la red de distribución eléctrica, la calidad del servicio no es de un estándar adecuado. La localidad de Pujato Norte está situada en 31° 31,2' S y 60° 55,6' W. El clima en esta zona es templado continental, con veranos cálidos y húmedos e inviernos fríos y secos. La precipitación anual promedio es de unos 1000 mm, distribuida de manera relativamente uniforme a lo largo del año. El viento predominante es del noroeste, especialmente durante el verano, la velocidad promedio es de unos 10 km/h, pero puede aumentar considerablemente durante las tormentas. En esta área propuesta hay alrededor de 750 personas que viven en forma definitiva y de manera transitoria. En donde la actividad comercial consiste en un par de pequeños negocios y una planta de tratamiento de agua potable y comercializadora de bebidas. Además, las actividades económicas son las mismas que predominan en la región: agricultura, ganadería y aves de corral, las cuales proporcionan residuos tales como maderas, forestales, estiércol, etc.

**Demanda Energética:** la localidad mencionada tiene una demanda energética diaria máxima de 4109 kWh/día y un factor de carga de 0,34. En la Tabla 1 se muestra una tabla con el consumo energético mensual/anual desglosado por tipo de consumidor. La demanda principal proviene de consumidores residenciales del pueblo y de los alrededores, y también en menor grado por comercios, industria y actividades agropecuarias. Como puede notarse, casi un 85 % de la carga total anual proviene de las categorías residencial y rural que en su mayoría corresponden a viviendas. Se considera que la curva de carga es bastante similar a la del resto de las ciudades y poblados de la provincia de Santa Fe y de la Argentina (Jurado et al., 2021). Se asume que la carga sintética a partir de un perfil comunitario proporcionado por el HOMER es una aproximación bastante realista del perfil de carga a analizar (Figura 1a). En la Figura 1b se muestra como varían los perfiles de carga diario escalados por mes que fueron calculados considerando el consumo energético detallado en la Tabla 1, donde se puede apreciar que la tendencia del consumo durante todo el año se mantiene prácticamente sin cambios.

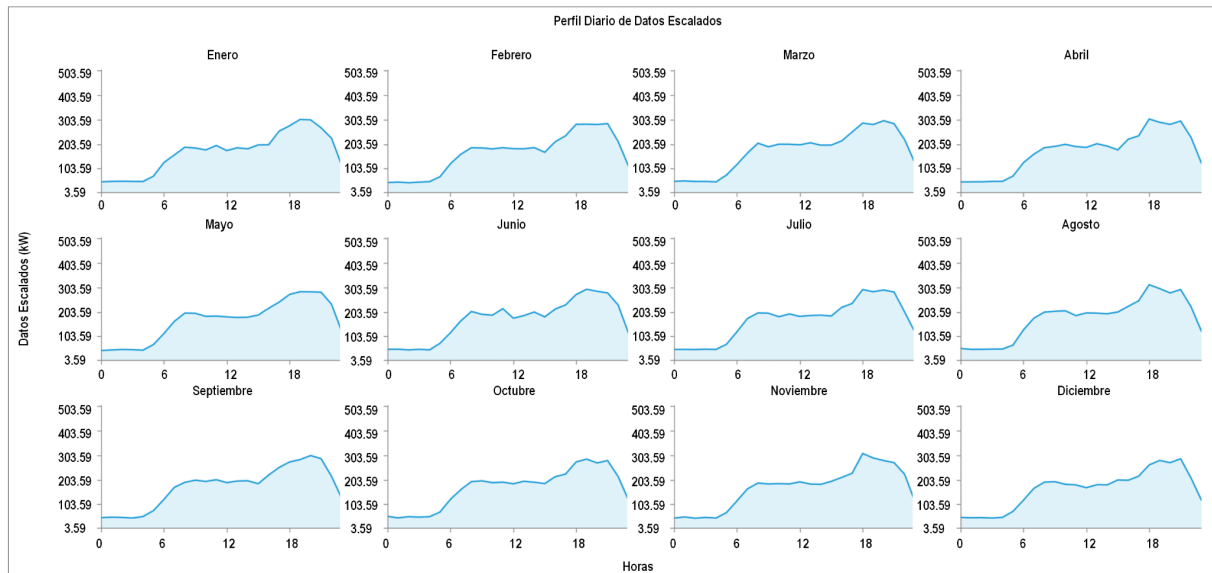
*Tabla 1: Consumo eléctrico mensual desglosado por categoría según el ente provincial regulador de energía (EPE).*

| Categoría                             | Carga (kWh)       |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   | Total Anual por Categoría |
|---------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
|                                       | Enero             | Febrero           | Marzo             | Abril             | Mayo              | Junio             | Julio             | Agosto            | Septiembre        | Octubre           | Noviembre         | Diciembre         |                           |
| Residencial                           | 47.775,00         | 61.871,00         | 65.931,75         | 69.992,50         | 61.826,25         | 53.660,00         | 52.834,50         | 52.009,00         | 48.962,50         | 45.916,00         | 39.797,50         | 33.679,00         | 634.255,00                |
| Comercial                             | 2.985,50          | 1.667,50          | 1.523,75          | 1.380,00          | 1.239,00          | 1.098,00          | 1.692,75          | 2.287,50          | 3.116,25          | 3.945,00          | 4.124,25          | 4.303,50          | 29.363,00                 |
| Industrial                            | 7.111,00          | 9.007,00          | 8.690,75          | 8.374,50          | 7.829,50          | 7.284,50          | 6.609,00          | 5.933,50          | 5.773,00          | 5.612,50          | 5.413,75          | 5.215,00          | 82.854,00                 |
| Alumbrado Público                     | 7.723,25          | 7.767,00          | 7.706,50          | 7.646,00          | 7.607,25          | 7.568,50          | 7.604,75          | 7.641,00          | 7.658,75          | 7.676,50          | 7.678,00          | 7.679,50          | 91.957,00                 |
| ONG                                   | 19,75             | 17,50             | 19,50             | 21,50             | 20,50             | 19,50             | 24,50             | 29,50             | 28,00             | 26,50             | 24,25             | 22,00             | 273,00                    |
| Autoridades                           | 1.829,75          | 880,00            | 882,00            | 884,00            | 1.010,50          | 1.137,00          | 1.446,75          | 1.756,50          | 2.820,50          | 3.884,50          | 3.332,00          | 2.779,50          | 22.643,00                 |
| Rural (Rural, Residencial, Jubilados) | 54.318,50         | 53.925,00         | 55.330,50         | 56.736,00         | 53.558,25         | 50.380,50         | 50.084,25         | 49.788,00         | 47.915,50         | 46.043,00         | 50.377,50         | 54.712,00         | 623.169,00                |
| <b>Total Mensual</b>                  | <b>121.762,75</b> | <b>135.135,00</b> | <b>140.084,75</b> | <b>145.034,50</b> | <b>133.091,25</b> | <b>121.148,00</b> | <b>120.296,50</b> | <b>119.445,00</b> | <b>116.274,50</b> | <b>113.104,00</b> | <b>110.747,25</b> | <b>108.390,50</b> | <b>1.484.514,00</b>       |





(a)



(b)

Figura 1: Perfil de carga diario usado en HOMER: (a) Línea de base (b) Escalado diario desglosado por mes

### Evaluación de Recursos

Energía Solar: el sitio seleccionado tiene un buen acceso solar con aproximadamente unas 2.500 horas de sol al año y en promedio equivale a 4,82 kWh/m<sup>2</sup>/día. La Figura 2 muestra la irradiación horizontal global solar horaria del sitio seleccionado. Esta cantidad se obtiene sumando la radiación del haz (también llamada irradiancia normal directa) y la irradiancia difusa (Rohani y Nour, 2014; Homer Energy, 2016). También se muestra un parámetro conocido como índice de claridad que representa la claridad de la atmósfera, es decir, la relación entre la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra y la radiación solar que llega a la parte superior de la atmósfera. La radiación solar que llega a la superficie de la Tierra es menor que la radiación que llega a la parte superior de la atmósfera debido a la humedad, el polvo, las nubes o incluso las diferencias de temperatura en la atmósfera inferior. Estos datos fueron tomados desde la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). En particular, el mes de enero tiene la radiación diaria más alta correspondiente a la estación estival, mientras que la radiación más baja ocurre durante julio durante la estación invernal. En base a los datos de la radiación solar mensual y global de la localidad, se demuestra que este recurso presenta un alto potencial para su uso como fuente de energía en la región. Además, como el índice de claridad se mantiene constante a un valor aproximado de 0,55 a lo largo del año, es posible predecir el cálculo energético.

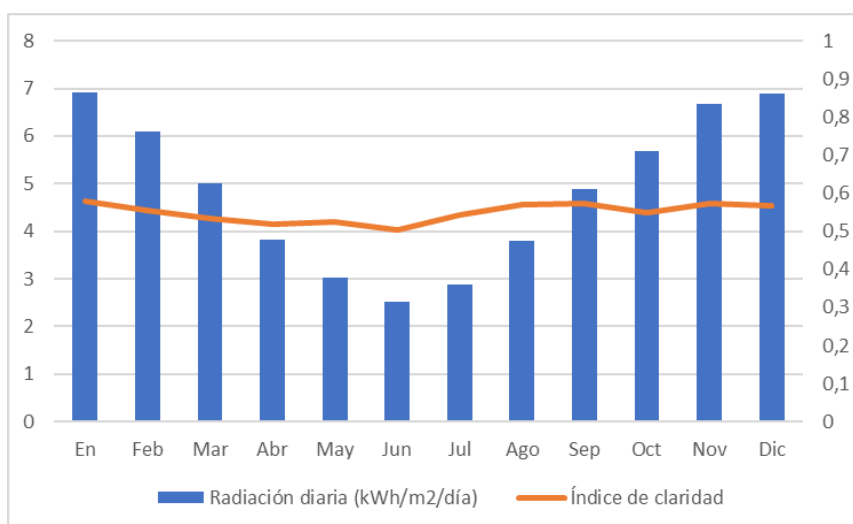


Figura 2: Radiación solar mensual e índice de claridad de Pujato Norte.

Biogás: la provincia de Santa Fe no solo cuenta con una gran diversidad de fuentes de biomasa con potencial destino energético sino también que presenta un carácter superavitario de recursos para ese potencial fin. Las fuentes son diversas y en el informe presentado por la FAO (2018) se detallan y contabilizan cada una de ellas, en este trabajo y por una cuestión de reducción de costos de flete solo incluiremos: estiércol vacuno de las zonas aledañas y RSU orgánicos previamente separados generados en el pueblo.

La composición del biogás comprende: 50-70 % de metano ( $\text{CH}_4$ ), 30-50 % de dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), y trazas de ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), y la densidad es alrededor de  $1,15 \text{ kg/m}^3$ . Valores típicos caloríficos inferiores rondan entre los  $21\text{-}24 \text{ MJ/m}^3$  (Rahman et al., 2014; Al-Najjar et al., 2022).

Residuos Sólidos Urbanos (RSU): la caracterización de los residuos se estimó según los datos nacionales obtenidos en la bibliografía (Martínez Waltos, 2021), estos corresponden a residuos orgánicos en un porcentaje entre el 50 % y 60 % debido a restos de comida, jardín, papel y cartón: 20-30 %, plásticos: 8-12 %, vidrios: 5-7 %, metales: 2-3 %, otros: 2-3%.

El gobierno comunal realiza constantes esfuerzos para que la separación de residuos se realice. El aporte comunitario es la opción más económica, sin embargo, tiene la desventaja de que una mala separación puede resultar en una tasa de rechazo del 17 % en los residuos separados (Singh y Basak, 2022). Para evitar esto, luego de la recolección, se completa la separación con intervención de trabajadores comunales. Para el procesamiento se utilizan dos líneas, una para los residuos húmedos y otra para los secos. Los residuos secos se envían a una planta de reciclado, mientras que los residuos húmedos, entre ellos los biodegradables, se utilizarán para la producción de biogás. Según datos estimativos se generan 1 kg de residuos por habitante por día, considerando un 52 % de basura orgánica cuya humedad es del 70 %, para una población de 750 habitantes, es decir, una cantidad neta de biomasa seca proveniente de RSU de 0,117 toneladas/día.

Residuos Ganaderos: en cuanto al departamento de Las Colonias, donde está ubicado el pueblo, según el informe de la FAO (2018), cuenta con una oferta de residuos húmedos de  $315.578 \text{ tn/año}$ , provenientes de tambos, feedlots bovinos y establecimientos porcinos, entre otros.

## DISEÑO Y ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA

El sistema de energía híbrido está compuesto por un generador electrógeno de biogás, y paneles fotovoltaicos (PV) conectados a la red eléctrica pública. Cabe mencionar que el generador de biogás se conecta directamente a la red mediante un bus de corriente alterna (CA), mientras que los paneles fotovoltaicos se conectan a un bus de corriente continua (CC) y luego acceden al bus de CA a través de un convertidor, tal como se muestra en el diagrama de la Figura 3. Este sistema de energía híbrido

abastecerá el perfil de carga descrito contrarrestando los efectos negativos causados por inestabilidades en el suministro, bajas o subidas de tensión, y distorsión o ruido eléctrico en las señales de suministro.

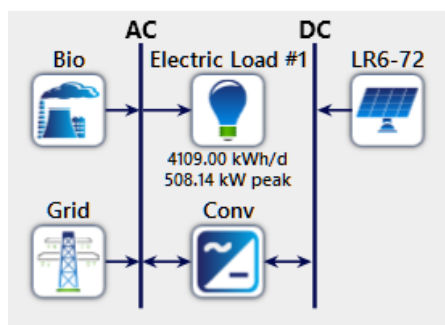


Figura 3: Arquitectura de un sistema de energía híbrido.

### Generador a Biogás

A partir de la disponibilidad abundante de residuos como se consideró anteriormente se planteó su uso como materia prima para la generación energética en un biogenerador (BG), al mismo tiempo atacando la problemática de los desechos de manera sustentable y ecológica. A partir de los residuos se puede extraer la energía mediante tecnologías de conversión termoquímicas (como gasificadores acoplados a motores) o biológicas (digestores). Durante el proceso de digestión anaeróbica de materia orgánica en un digestor se transforma la biomasa en metano (Kasaeian et al., 2019). Luego, el biogás generado puede ser utilizado directamente en motores de combustión interna o purificado para su inyección en la red de gas natural. Para la elección de la tecnología de conversión según Al-Najjar et al. (2022), la digestión anaeróbica es generalmente preferible en proyectos de pequeña escala con biomasa de alto contenido orgánico, ya que es un proceso biológico relativamente simple y económico. En cambio, por su parte la gasificación es más adecuada para proyectos a gran escala o cuando se requiere un mayor control sobre la composición del gas producido.

Con algunas modificaciones, se puede utilizar un generador diésel convencional como BG. El costo de un BG recién modificado (por kW) incluye el costo de la modificación, el transporte y la instalación, el purificador y el desecante, así como el costo del sistema de control. A este costo se debe sumar el del biodigestor y el del tanque de almacenamiento del biogás generado. El costo de inversión, reemplazo, operación y mantenimiento de este sistema de generación por biogás es de USD 900 por kW y USD 0,10 por hora respectivamente (Das et al., 2017; Mohammed et al., 2017). El generador está conectado a la red eléctrica a través del bus de CA y la vida útil proyectada es de 20.000 horas de trabajo (Li et al., 2020). Por lo tanto, mantener en funcionamiento el generador de manera continua e indefinida resultará en frecuentes reemplazos a lo largo de la vida útil del proyecto. Para evitar esto se programó el trabajo del biodigestor en un horario nocturno de 20:00 hs. a 7:00 hs. cuando no hay generación fotovoltaica, de esta manera también se reduce el costo neto actual del sistema debido a que se reducen los costos de operación tal como se demostró en Ogunwo (2022). El costo total de funcionamiento del generador se calcula en función del tiempo invertido durante el año. Rango de búsqueda de potencia: 0, 10, 20, 50, 100, 200, 500 kW. Se fijó 0,015 USD/kWh al precio de biogás ya que puede variar dependiendo de la variación en la materia prima y el costo de manejo (Khan et al., 2014).

### Paneles fotovoltaicos

En este estudio, el panel solar elegido es el LONGi Solar LR6-72 con una potencia nominal de 0,350 kW y una eficiencia del 18,1%. Su costo de capital es de USD 1800/kW, y se supone el mismo costo por el reemplazo, el costo de operación y mantenimiento de los mismos es de USD 50 por año, para un periodo de 25 años, consistente con la vida útil del activo. En base a estos paneles, se realizaron los cálculos con factores de reducción configurados por defecto en un 80 %. Finalmente, la producción de energía esperada por el sistema de paneles se expresa en la siguiente Ec. (1):

$$E_{spv}(t) = G(t) \times \eta_{spv} \times A \quad (1)$$

donde:

$G(t)$  = irradiancia horaria en kWh/m<sup>2</sup>  
 $\eta_{spv}$  = eficiencia del panel fotovoltaico  
 $A$  = área de los módulos fotovoltaicos.

Para el caso de querer calcular la energía generada a lo largo de un año, en lugar de la irradiancia horaria  $G(t)$ , vamos a usar una irradiancia media  $G_{med} = 1560$  kWh/m<sup>2</sup>/año. Por lo que, para el panel bajo análisis que tiene un área de 2 m<sup>2</sup> vemos que esos 350W van a generar unos 564,72 kWh/año.

### **Convertidor**

Debido a que los paneles solares generan una salida de CC y la carga considerada se abastece de CA, es necesario utilizar un convertidor CC/CA (Inversor). Esto posibilita que la carga sea abastecida por los paneles cuando la red eléctrica presenta algún desperfecto, y por la red eléctrica y biodigestor cuando los paneles no generen o presenten algún desperfecto. Por esta razón, el tamaño del convertidor se elige en función del valor pico de la demanda, mientras que la potencia nominal del inversor ( $P_{inv}(t)$ ) se calcula de la siguiente manera (Ec. 2) (Singh et al., 2016).

$$P_{inv}(t) = P_L^m(t)/\eta_{inv} \quad (2)$$

donde:

$\eta_{inv}$  = eficiencia del inversor.  
 $P_L^m(t)$  = potencia pico de la demanda

El costo de capital y de reposición del convertidor, ambos se consideran como USD/kW 100 (Hasan, 2019) y el costo de operación de 0,1 USD/kW/año (Akhtari y Baneshi, 2019). La vida útil del convertidor es de 25 años, con una eficiencia del inversor del 95 %.

### **Red Eléctrica**

La matriz energética de Argentina se basa principalmente en combustibles fósiles, con un 85 % de participación en la generación de electricidad en 2024. Los principales combustibles no renovables utilizados son el gas natural (53 %), el petróleo (31,3 %) y el carbón (1,6 %). El 15 % restante de la generación está conformado por la biomasa (5,8 %), la hidroelectricidad (3,2 %), la energía nuclear (2,6 %) seguida de la energía eólica y la energía solar (2,3 %) (Polígono, 2024). Las tarifas de energía en Argentina están subsidiadas para la mayoría de los consumidores residenciales y comerciales. Sin embargo, en los últimos años se han implementado medidas para reducir los subsidios, lo que ha provocado un aumento gradual tarifario. Las tarifas actuales varían según la región, la categoría social y el tipo de consumo del usuario, además de las continuas correcciones del valor de la moneda local con respecto al dólar. El precio de la electricidad varía según: tipo de hogar, zona, cantidad consumida y actividad, en promedio para el consumo residencial es de alrededor de USD 0,06 por kWh, mientras que para el consumo industrial es de alrededor de USD 0,10 por kWh (EPE, n/d). En base a estos criterios, en este modelo implementado en HOMER se introdujo un valor de USD 0,10 por kWh para la compra desde la red eléctrica y un valor de USD 0,05 por kWh para la venta hacia la red eléctrica, asumiendo 1 USD = 1000 ARS. Además, como restricción al sistema híbrido de generación propuesto, se fijó un 50 % mínimo de energías renovables, por lo tanto, como máximo el otro 50 % puede ser comprado a la red.

### **Parámetros económicos**

Considerando que a una mejor economía mayor sostenibilidad, HOMER Pro evalúa el sistema óptimo utilizando diferentes parámetros económicos en los que se incluyen: Costo Presente Neto (del inglés NPC), Costo Nivelado de la Energía (del inglés LCOE), Costo de Capital (CAPEX) y Costo de Salvamento (Al-Najjar et al., 2022). La vida útil del proyecto se considera de 25 años con una tasa de descuento nominal (NDR) del 21,4 % y una tasa de inflación del 2,3 %.

La tasa de descuento se realizó de acuerdo a Coutsiars et al. (2022), siguiendo una metodología de cálculo con las siguientes características:

- Costo promedio ponderado de capital (WACC del inglés)
- Modelo de fijación de precios de activos de capital (Capital Asset Pricing Model, CAPM)
- Modelo de fijación de precios de activos de capital para deuda (CAPM de deuda)

La tasa se calcula, y se utiliza en el flujo de fondos, en términos nominales, en dólares norteamericanos y después de impuestos. La inflación considerada se obtiene como un promedio de las proyecciones de inflación de la referencia según U.S. Federal Open Market Committee & Federal Reserve Bank of St. Louis (2024).

### ***Análisis de sensibilidad***

El análisis de sensibilidad monitorea el efecto de ciertas variables. Se asignan diferentes valores a estas variables dentro de un rango determinado para evaluar su influencia en el sistema. En este estudio, tal como se detalla en la Tabla 2, se analizaron diferentes caudales diarios de residuos a tratar 1; 5 y 10 toneladas/día, considerando de este modo el incremento de la actividad futura. Por ejemplo, se mejora la logística de recolección de residuos de lugares más alejados. De este modo también aumentan los costos de fletes, para ello se previeron diferentes precios que van desde 0 a 5 USD/ton. También se consideró la variación del factor o ratio de gasificación (f), que depende del tipo de residuos a tratar y su capacidad de producir biogás. Considerando únicamente residuos sólidos municipales (RSU) y estiércol vacuno como sustratos, se establecieron las siguientes tasas de producción de biogás: 0,074 m<sup>3</sup> por kg de RSU seco y 0,037 m<sup>3</sup> por kg de estiércol vacuno (Karmaker et al., 2018). Asumiendo una densidad promedio del biogás de 1,15 kg/m<sup>3</sup>, se calcularon los ratios de gasificación resultantes: 0,0851 para estiércol vacuno y 0,04255 para RSU. Estos factores permiten estimar la cantidad de biogás producida a partir de una determinada masa de cada tipo de residuo.

*Tabla 2: Datos de entrada de biomasa incluyendo RSU y desperdicios de ganado vacuno*

| Parámetro                                  | Valor                                  |
|--------------------------------------------|----------------------------------------|
| Biomasa de alimentación                    | 1*; 5; 10 ton/día                      |
| Precio                                     | USD 0; 1; 2; 3; 4; 5                   |
| Contenido de carbono                       | 50 %                                   |
| Factor de gasificación                     | 0,04255; 0,0851 kg biogás/ kg biomasa. |
| Valor Calorífico Inferior (LHV) del biogás | 21 MJ/kg                               |

\*Se considera un mínimo de 1 ton/día fácilmente alcanzable con el caudal estimado de RSU y residuos ganaderos de la zona.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### ***Sensibilidad***

El sistema fue analizado y optimizado considerando los parámetros de sensibilidad enfocados en la biomasa previamente descritos como la variación en el suministro de biomasa y características de la misma que se reflejan en el ratio de gasificación y el precio. Como resultado de las simulaciones realizadas en HOMER se generaron dos configuraciones factibles con biogenerador y sin biogenerador, ya que la posibilidad de abastecer el sistema únicamente con biogás es limitada.

A partir de los resultados se puede resaltar que al aumentar la cantidad de biomasa los costos operativos y el LCOE varían entre USD/año 93.398 y 114.484 y entre USD/kWh 0,174 y 0,183 respectivamente. El NPC varía entre USD 1.527.609 y 1.740.813 y el CAPEX entre 997029.4 USD y 1.114.296 USD. En todos los sistemas la fracción renovable apenas sobrepasa el 50 %. Como era de esperar la producción de kWh está fuertemente ligada al caudal de biomasa disponible y a mayor ratio de gasificación se obtiene mayor cantidad de energía de los residuos. Aumentando el caudal de residuos también se observa la disminución del NPC, LCOE y CAPEX.

Cuando el precio de la biomasa se encuentra en los 5 USD/ton y un  $f = 0,0426$ , la arquitectura del sistema más conveniente no utiliza biogenerador, cubriendo toda la demanda con paneles solares y la energía comprada a la red. Lo mismo ocurre para precios mayores.

A caudales de 1 ton/día de residuos el aporte eléctrico es mínimo que dependiendo del  $f$  será 0,380 % o 0,777 % y los sistemas analizados son casi idénticos (utilícese o no el biogenerador). A medida que el caudal aumenta a 5 ton/día y 10 ton/día el porcentaje de producción eléctrica mediante biogás y, dependiendo de los parámetros  $f$  y precio de la tonelada de biomasa, se puede incrementar hasta 4,2 % y 8,6 % respectivamente, incrementando también la capacidad nominal del generador.

### Optimización del Sistema

Del análisis realizado anteriormente se obtuvo que el escenario que comprende PV/Bio/Grid con un caudal de 10 ton/d, precio de USD/ton y  $f = 0,0851$  resultó ser el mejor sistema híbrido para alimentar el pueblo. Percibe el NPC más bajo con USD 1.527.609 y un LCOE de USD/kWh 0,1738. El costo operativo del sistema es de USD 99.892 y costo de capital de USD 997.029. En la Figura 4 se observa cómo influyen tanto el caudal como el costo de la biomasa en el CAPEX en la condición más desfavorable de generación de gas con  $f = 0,0426$ . El proyecto se abarata al aumentar el caudal de residuos a procesar y al disminuir el precio de la tonelada.

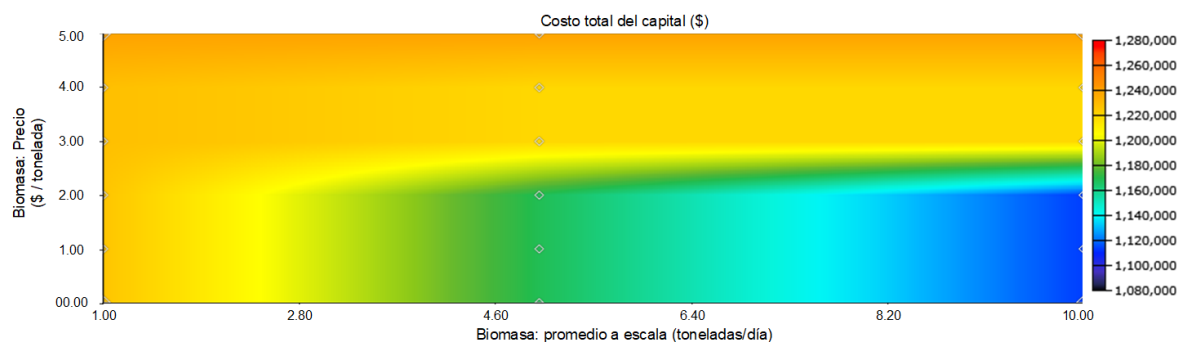


Figura 4: Gráfico de superficie del Costo total de Capital en función del caudal de la biomasa (ton/día) y su precio (USD/ton).

El flujo de caja se muestra en la Figura 5, donde se observa el mayor costo en el primer año debido a la planta fotovoltaica y el resto de los años de vida del proyecto el costo principal es el operativo de la red (por compras a la red), como puede observarse al limitar el uso del biogenerador a los horarios nocturnos aumenta el tiempo de vida y reduce los costos de reemplazo (Boghdady et al., 2021). Por otro lado, se puede ver que una mayor producción de la energía mediante el biogenerador reduciría los costos, no obstante, la limitación impuesta fue de 10 ton/día.

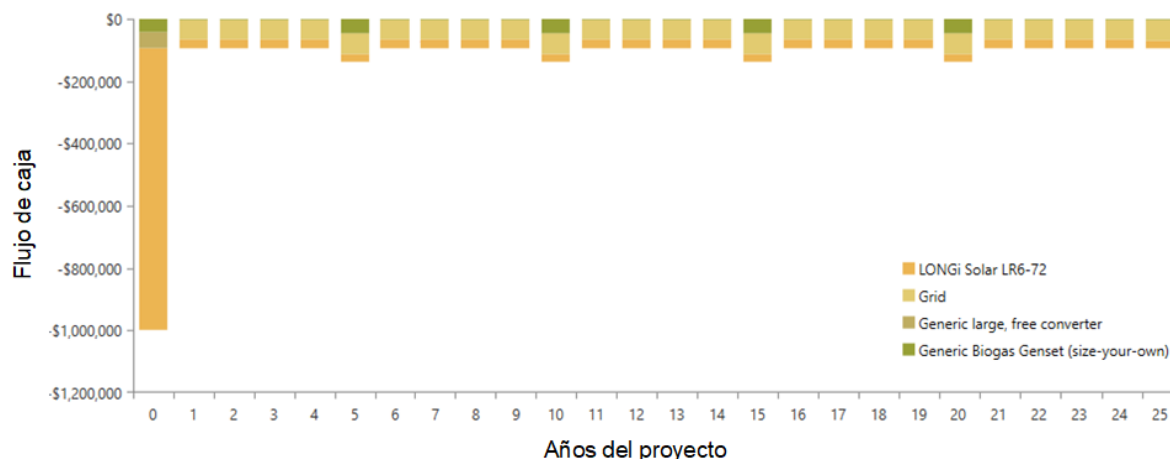


Figura 5: Flujo de caja nominal por componente.



La configuración resultante consta de un módulo fotovoltaico de 501 kW, un generador de biogás de 50 kW e inversores de 494 kW de capacidad. La producción de energía que se muestra en la Figura 6, resultó del 42,9% (724.581 kWh/año) de los paneles, del biogenerador 8,6% (145.179 kWh/año) y las compras a la red representaron un 48,6% (820.925 kWh/año).

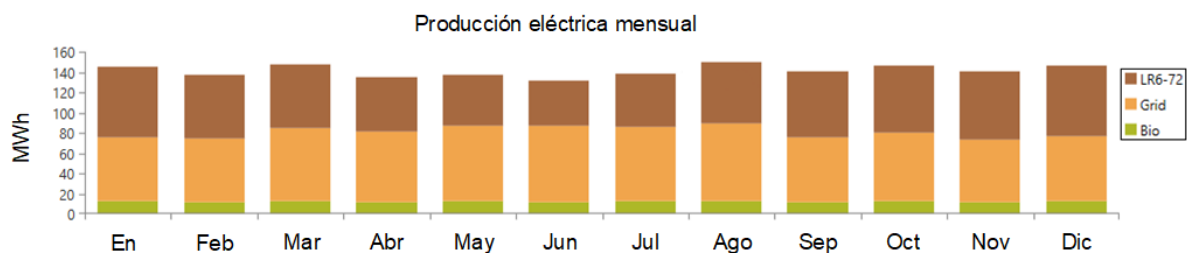


Figura 6: Producción eléctrica media mensual del sistema híbrido fotovoltaico/bio-generador

### Análisis de Emisión

La Tabla 3 muestra un resumen de las emisiones. La emisión de CO<sub>2</sub> para el sistema óptimo de PV/Bio/Grid es de 427.749 kg CO<sub>2</sub>/año y un factor de emisión de 0,2503 kg CO<sub>2</sub>/kWh mientras que para el sistema PV/Grid con iguales condiciones de caudal, f y precio de biomasa las emisiones de CO<sub>2</sub> fueron de 378.888 kg CO<sub>2</sub>/año y un factor de emisión de 0,2035 kg CO<sub>2</sub>/kWh. Esa diferencia en los factores se atribuye a la emisión propia del biogenerador, no obstante, utilizando solo la red como alimentación se generan 947.864 kg CO<sub>2</sub>/año resultando en un factor de emisión de 0,632 kg CO<sub>2</sub>/kWh. Al comparar el factor de emisión obtenido en este sistema híbrido con el del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) de Argentina en 2023 (0,429 kg CO<sub>2</sub>/kWh), se observa una diferencia significativa, lo cual con la producción del sistema optimizado se obtendría un total de 725.303,86 Kg CO<sub>2</sub>/año. Esta discrepancia puede atribuirse principalmente a la composición de la matriz energética, que en el modelo simulado podría estar dominada por fuentes fósiles como el carbón o el gas natural, y a las simplificaciones inherentes a las simulaciones, como la eficiencia de las plantas, las pérdidas en la transmisión y distribución, y las condiciones climáticas. En cualquier caso, es importante destacar que el factor de emisión obtenido del sistema híbrido resulta inferior tanto al obtenido del SEIN como a la red simulada por HOMER.

Tabla 3: Emisión de GEI del sistema optimizado

| Compuesto           | Valor   | Unidades |
|---------------------|---------|----------|
| Dióxido de Carbono  | 427.749 | kg/año   |
| Monóxido de Carbono | 7,3     | kg/año   |
| Dióxido de Azufre   | 1.826   | kg/año   |
| Óxidos de Nitrógeno | 897     | kg/año   |

### CONCLUSIONES

La energía solar y la biomasa son recursos sostenibles con mucho margen de desarrollo en la República Argentina específicamente en el área central del país. El pueblo en estudio cuenta con un enorme potencial para implementar y fusionar diversas fuentes de energía renovable, lo que permitiría reducir significativamente los costos operativos de su sistema energético ante posibles picos de consumo. En este estudio se plantearon dos objetivos: 1) Disminuir la dependencia de la red a partir del uso de las fuentes renovables locales y 2) Mitigar el impacto ambiental de los residuos sólidos urbanos y el estiércol mayoritariamente vacuno, transformándolos en una fuente de energía renovable y a la vez solucionando un problema ambiental.

La radiación solar promedio anual en la ubicación es de 4,82 kWh/m<sup>2</sup>/día y la producción anual promedio de estiércol de animales de la granja es de aproximadamente supera ampliamente las toneladas diarias utilizadas como base de cálculo para este estudio.

El sistema de energía híbrido conectado a la red fotovoltaico-biomasa fue modelado y analizado por el software de simulación HOMER. El diseño más adecuado con alto valor económico incluye paneles fotovoltaicos de 501 kW, generador de biomasa de 50 kW e inversor con 49496 kW de capacidad. Potencialmente se puede producir suficiente electricidad para satisfacer la demanda de carga del lugar con un 50,2 % de fracción renovable.

El costo inicial de este sistema es de aproximadamente 997.029 dólares estadounidenses, lo que es bastante alto si se compara con el caso de utilizar la red eléctrica en la situación actual. Del mismo modo si se compara con el costo de la energía que es 0,1738 USD/kWh contra 0,10 USD/kWh que es el costo que se paga localmente a la distribuidora. No obstante, además de disminuir la dependencia de la red como fuente principal existen otros factores que no se cuantifican en este análisis, como las externalidades sociales, ambientales o estratégicas que la inversión podría generar para la comunidad y que justificaría la adopción del mismo.

#### Trabajos futuros

Como trabajos futuros se pretende:

1. Optimizar el proceso logístico para adecuar el dimensionamiento de la planta de tratamiento de residuos.
2. Cuantificar factores no tangibles como los sociales y ambientales.

### FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Este trabajo fue realizado gracias al financiamiento otorgado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y por el Centro de Investigación y Transferencia (CIT) Rafaela de responsabilidad compartida correspondiente a la Universidad Nacional de Rafaela (UNRaf) y CONICET.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración del Dr. Carlos Ramiro Rodríguez (UNC) y la Dra. Andrea Beltramone (UTN-CONICET).

### REFERENCIAS

- Akhtari M. R., Baneshi M. (2019). Techno-economic assessment and optimization of a hybrid renewable co-supply of electricity, heat and hydrogen system to enhance performance by recovering excess electricity for a large energy consumer. *Energy Convers. Manag.*, 188, 131-141.
- Al-Najjar H., Pfeifer C., Al Afif R., El-Khozondar H. J. (2022). Performance Evaluation of a Hybrid Grid-Connected Photovoltaic Biogas-Generator Power System. *Energies*, 15, 3151. <https://doi.org/10.3390/en15093151>
- Bellini M., Bonini M. P., Dallo M., Garreta F., Navntoft C., y Vejrup P. (2005). Mapa de recursos energéticos alternativos de la República Argentina. Primera versión, aprovechamiento de energía eólica y solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9, 27-30.
- Bhattacharjee S., y Dey A. (2014). Techno-economic performance evaluation of grid integrated PV-biomass hybrid power generation for rice mill. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7, 6-16.
- Boghdady T. A., Alamer A. J., Yousef M. M., Elshafee A. M., Hassan M. A. M., Seif A. M. (2021). Technical and economic study of powering poultry farm in Egypt using PV-biomass on-grid energy generation system: Case study. *WSEAS Transactions on Power Systems*, 16, 67–77. <https://doi.org/10.37394/232016.2021.16.7>
- Coutsiers E., Gea M., Rodríguez, R. (2022). Estimación de la tasa de costo de capital para proyectos de energía renovable en Latinoamérica. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 26, 369–380.
- Das B. K., Hoque N., Mandal S., Pal T. K., Raihan, M. A. (2017). A techno-economic feasibility of a stand-alone hybrid power generation for remote area application in Bangladesh. *Energy (Oxford, England)*, 134, 775–788. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.024>

- Empresa Provincial de la Energía, EPE. (n.d.). EPE Usuarios. Recuperado de <https://www.epe.santafe.gov.ar/institucional/usuarios> el 9 de agosto de 2024.
- FAO (2018). Análisis espacial del balance energético derivado de biomasa. Metodología WISDOM. Provincia de Santa Fe. Documentos Técnicos, 8.
- Hasan M. R. (2019). Feasibility study to design a Biogas-Photovoltaic hybrid system for electricity generation in vicinity to urban areas in Bangladesh. (Tesis de maestría). Halmstad University.
- Homer Energy. (2016). HOMER® Pro V3.7 User Manual [Manual de usuario]. Recuperado de <https://homerenergy.com/pdf/HOMERHelpManual.pdf>.
- Jurado A., Vinson E., y Nicchi F. (2021). Demand statistical characterization of low voltage users in Argentinian distribution networks for distributed generation studies purposes. CIRED 2021 - The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. <https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/icp.2021.1773>
- Kasaecian A., Rahdan P., Rad M. A. V., Yan W. M. (2019). Optimal design and technical analysis of a grid-connected hybrid photovoltaic/diesel/biogas under different economic conditions: A case study. *Energy Conversion and Management*, 198(111810), 111810. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111810>
- Karmaker A. K., Ahmed M. R., Hossain M. A., Sikder M. M. (2018). Feasibility assessment & design of hybrid renewable energy based electric vehicle charging station in Bangladesh. *Sustainable Cities and Society*, 39, 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.035>
- Khan E. U., Mainali B., Martin A., Silveira S. (2014). Techno-economic analysis of small scale biogas based polygeneration systems: Bangladesh case study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.03.004>
- Li J., Liu P., Li Z. (2020). Optimal design and techno-economic analysis of a solar-wind-biomass off-grid hybrid power system for remote rural electrification: A case study of west China. *Energy*, 208, 118387. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118387>
- Martínez Waltos, F. (2021). Informe del estado del ambiente 2020. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación. [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/iea\\_2020\\_digital.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/iea_2020_digital.pdf)
- Mohammed M., Egyir I. S., Donkor A. K., Amoah P., Nyarko S., Boateng K. K. y Ziwu, C. (2017). Feasibility study for biogas integration into waste treatment plants in Ghana. *Egyptian Journal of Petroleum*, 26(3), 695–703. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.10.004>
- Ogunwo D. T. (2022). Techno-economic feasibility of electrifying food markets in Nigeria with biogas hybrid mini-grids. *Cal Poly Humboldt theses and projects*. 577. <https://digitalcommons.humboldt.edu/etd/577>
- Polígono. (2024). Conoce cómo se conforma la matriz energética argentina. Recuperado de <https://poligono.com.ar/2024/05/30/conoce-como-se-conforma-la-matriz-energetica-argentina/> el 26 de septiembre de 2024.
- Rahman M. M., Hasan M. M., Paatero J. V., Lahdelma R. (2014). Hybrid application of biogas and solar resources to fulfill household energy needs: A potentially viable option in rural areas of developing countries. *Renewable Energy*, 68, 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.030>
- Rohani G. y Nour M. (2014). Techno-economical analysis of stand-alone hybrid renewable power system for Ras Musherib in United Arab Emirates. *Energy (Oxford, England)*, 64, 828–841. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.065>
- Singh A., Basak P. (2022). Conceptualization and techno-economic evaluation of municipal solid waste based microgrid. *Energy (Oxford, England)*, 238(121711), 121711. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121711>
- Singh S., Singh M., Kaushik S. C. (2016). Feasibility study of an islanded microgrid in rural area consisting of PV, wind, biomass and battery energy storage system. *Energy Conversion and Management*, 128, 178–190. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.046>
- Tang Q., Wu J., Xiao J., Zhou F., y Wu X. (2021). A Case Study of Renewable Energy Resources Assessment Results in Argentina. In 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC) (pp. 1-5). IEEE.
- U.S. Federal Open Market Committee & Federal Reserve Bank of St. Louis. (2024, March 20). FOMC Summary of Economic Projections for the Personal Consumption Expenditures Inflation Rate, Central Tendency, Midpoint [PCECTPICTM]. Retrieved August 8, 2024, from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis: <https://fred.stlouisfed.org/series/PCECTPICTM>

**PERFORMANCE EVALUATION OF GRID-CONNECTED SOLAR  
PHOTOVOLTAIC/BIOGAS HYBRID SYSTEMS: CASE STUDY OF PUJATO NORTE,  
SANTA FE.**

**ABSTRACT** This paper presents a hybrid energy system consisting of photovoltaic solar panels, a biogas generator and the public electricity grid to supply electricity to the community of Pujato Norte. The costs of location, operation and maintenance of the system are proposed with a projection of 25 years and a minimum renewable energy restriction of 50 % was set. The economic viability was evaluated using HOMER against different flow rates and prices of the waste to be processed and their gasification ratios. The results showed that the best configuration is a 50 kW biomass generator, and a 501 kW photovoltaic plant will satisfy the average load demand of 4,109 kWh per day, providing 50.2% of renewable energy to the grid. The initial cost of this system is approximately USD 997,029 and the energy cost for this configuration will be USD 0.184/kWh, which is higher than the current situation where the grid is the main source of energy, but in return there is a 41 % saving in CO<sub>2</sub> emissions.

**Keywords:** solar energy, MSW, livestock waste, biogenerator, grid-connected hybrid system, HOMER.

## **ESTUDIO TEÓRICO DE UN DESALINIZADOR POR HUMIDIFICACIÓN - DESHUMIDIFICACIÓN TIPO OACW PARA APLICACIONES RURALES EMPLEANDO ENERGÍA SOLAR**

**Emilio S. Scozzina Unterholzner<sup>1</sup>, Luís H. Vera<sup>1</sup>, Héctor G. Lorenzo<sup>1</sup>, Osvaldo M. Díaz<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Termodinámica y Máquinas Térmicas - Facultad de Ingeniería - Universidad  
Nacional del Nordeste – Av. Castelli 1230 – Resistencia, Chaco – CP: 3500

e-mail: [emilio\\_scozzina@hotmail.com](mailto:emilio_scozzina@hotmail.com)

**RESUMEN:** La creciente demanda de agua potable ha impulsado la búsqueda de métodos sostenibles y eficientes para la desalinización. Los métodos convencionales, como la ósmosis inversa y la evaporación multietapa, presentan limitaciones en su aplicación a pequeña escala, especialmente en áreas rurales con acceso limitado a energía eléctrica. Este artículo explora la desalinización por Humidificación-Deshumidificación utilizando un sistema cerrado con calentamiento de agua mediante energía solar. El análisis se centró en los parámetros de desempeño, revelando una fuerte influencia de la temperatura del agua de entrada al humidificador, la relación de caudales másicos de agua y aire, y la temperatura del aire de ingreso. Se encontró que los puntos de máximo rendimiento energético y producción requieren alturas de empaque superiores a 40 m. La variabilidad climática afecta negativamente a estos sistemas, por lo que se recomienda la implementación de componentes adicionales para mantener temperaturas constantes y operar en puntos donde la altura de empaque sea menor.

**Palabras clave:** energía solar, humidificación – deshumidificación, desalinización.

### **INTRODUCCIÓN**

Un sistema descentralizado de purificación de agua a pequeña escala ( $<100 \text{ m}^3/\text{día}$ ) es una de las soluciones para producir agua dulce para pequeñas comunidades, sobre todo en lugares remotos que no están conectados a la red eléctrica o a la red de distribución de agua. El uso de la energía solar o de fuentes de calor residual es apropiado para estos sistemas de producción de agua. (Sharqawy et al., 2014) Las tecnologías que se disponen en el mercado (osmosis inversa, evaporación flash multietapas y múltiples efectos) son difíciles de adaptar a estas exigencias y generalmente conlleva a un aumento de costo de producción de agua desalinizada (Scozzina et al, 2023), por lo que estas empiezan a competir con otras tecnologías de desalinización que son fácilmente adaptables a pequeñas escalas, a fuentes de energía alternativas y a un costo menor. Entre ellas se destaca la desalinización por Humidificación - Deshumidificación (HDH) del aire.

La desalinización por HDH es una alternativa a las técnicas habituales de desalación, y destaca por no necesitar una fuente de alta temperatura ni una bomba de vacío para provocar la evaporación. Esta tecnología utiliza aire atmosférico para transportar el vapor de agua de un humidificador a un deshumidificador. (Dias et al., 2020) El humidificador consta de: una boquilla rociadora de agua salada sobre un material de empaque, que promueve la transferencia calor y masa con el aire. El deshumidificador se emplea para la condensación del vapor de agua presente en el aire húmedo. Las bombas y los ventiladores se utilizan para circular agua salina y aire, respectivamente. (Qasem y Lawal, 2020). Este proceso puede clasificarse en cuatro categorías en función de la configuración del ciclo: ciclo de aire cerrado y agua abierta (CAOW, por sus siglas en ingles), ciclo de aire cerrado y agua

cerrada (CACW), ciclo de aire abierto y agua abierta (OAOW) y ciclo de aire abierto y agua cerrada (OACW). La configuración del ciclo del aire se clasifica en ciclo de aire abierto y ciclo de aire cerrado en función de si el aire procedente del deshumidificador se rechaza o fluye de vuelta al humidificador. Del mismo modo, la configuración del ciclo del agua se clasifica en ciclo de agua abierta y ciclo de agua cerrada en función de si la salmuera concentrada en el humidificador se rechaza o vuelve a entrar en el sistema. (Ling et al., 2020; Scozzina et al., 2023)

Los ciclos abiertos en agua, OAOW y CAOW, son los más estudiados en la literatura debido a que la temperatura del agua que ingresa al deshumidificador está limitada por la temperatura de la fuente de agua salina, la cual suele ser igual o inferior a la temperatura del aire ambiente. Cuanto más baja es esta temperatura, mayor es la cantidad de masa de agua condensada, lo que incrementa la producción de agua desalinizada. Sin embargo, como contraparte, el rechazo de calor del agua salina a la salida del humidificador, junto con la baja producción de agua desalinizada (solo el 4% del agua salina que ingresa logra desalinizarse, según Sharqawy et al., 2014), afecta negativamente la eficiencia energética del sistema.

Por otro lado, los ciclos cerrados en agua, como OACW y CACW, aprovechan el calor del agua salina a la salida del humidificador y lo reintegran al sistema a través del deshumidificador. En estos ciclos, la cantidad de agua condensada está determinada por la eficiencia del humidificador: una mayor eficiencia implica una menor temperatura del agua que ingresa al deshumidificador, lo que resulta en una mayor producción de agua desalinizada; mientras que una menor eficiencia conlleva el efecto contrario.

Varios estudios (Xu et al., 2019; Zubair et al., 2018; Huang et al., 2019; Tariq et al., 2018) han investigado estos ciclos y, en algunos casos, han demostrado un rendimiento energético superior en comparación con los ciclos abiertos convencionales. Sin embargo, esta ventaja energética disminuye a medida que aumenta la salinidad del agua, según lo reportado por Zubair et al. (2018) y Ling et al. (2020).

Otros autores (Li et al., 2014; Antar y Sharqawy, 2013; Yamal y Solmus, 2008; El-Agouz et al., 2015; Li y Zhang, 2016) realizaron estudios experimentales y teóricos utilizando energía solar como fuente de calor. Estos estudios indicaron que existe un punto máximo en el que la producción de agua se maximiza, el cual depende en gran medida de factores como la efectividad del humidificador y del deshumidificador, la temperatura del agua salina que ingresa al humidificador, la temperatura del aire de ingreso, y los caudales máscos de agua y aire. Aunque este punto máximo ha sido ampliamente estudiado en los sistemas de ciclo abierto, existe una laguna en la literatura en cuanto a su comprensión en ciclos cerrados.

Por esta razón, se plantea como motivación el estudio teórico de un sistema de desalinización HDH con la configuración OACW, que utilizará energía solar térmica para calentar el agua de ingreso al humidificador. El objetivo final es caracterizar el sistema en diferentes condiciones de funcionamiento, utilizando parámetros de eficiencia específicos para estos sistemas, y establecer bases y criterios para el pre-dimensionamiento de los mismos.

## **METODOLOGÍA**

La Fig. 1 es un dibujo esquemático de un HDH – OACW con calentamiento de agua. El funcionamiento del mismo inicia con la entrada del aire atmosférico (I) y el agua salina (3) al humidificador. El contacto del aire con el agua salina provoca evaporación de esta por lo que el aire aumenta su temperatura y su contenido de humedad absoluta (II). Para extraer el vapor de agua, contenida dentro del aire, se procede a provocar la condensación dentro del deshumidificador donde se produce el intercambio de calor con el agua salina que se encuentra a menor temperatura (1) la cual proviene de la mezcla con el agua salina rechazada del humidificador y con el agua del pozo (p) que es la de reposición. El agua salina absorbe



la energía calorífica del aire, elevando así su temperatura (2) e inmediatamente pasa por el colector solar para elevar, nuevamente, su temperatura a (3). Al final del proceso, en el deshumidificador, el aire se lo rechaza al ambiente (estado III) y se obtiene agua desalinizada (pw).

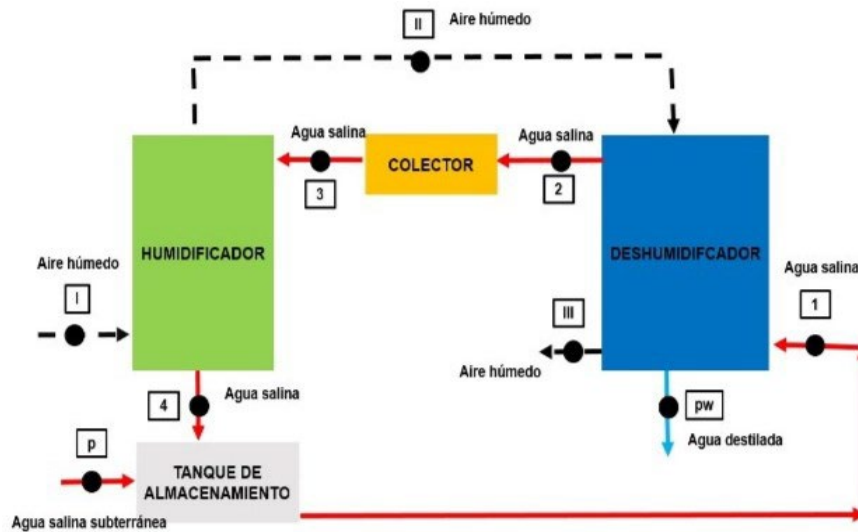


Figura 1: Esquema de un HDH del tipo OACW.

Las hipótesis del cálculo son:

- El ciclo opera en condiciones estacionarias.
- Los componentes del ciclo están perfectamente aislados térmicamente.
- No se consideran la energía requerida para el bombeo y ventiladores, debido a que es muy baja a comparación de la energía térmica que se suministra el sistema.
- La humedad relativa del aire de salida del humidificador y deshumidificador es del 100 %.
- No se considera los efectos de la salinidad.
- Para los cálculos se considerará que la presión de trabajo es la atmosférica normal al nivel del mar (101,325 kPa)
- El aire y el vapor de agua se considera como gases ideales.
- La temperatura del agua salina a la salida del humidificador y la temperatura del agua salina a la entrada del deshumidificador, serán iguales. Esta hipótesis es correcta siempre y cuando la tasa de evaporación sea baja.
- La temperatura del agua salina a la entrada del humidificador no debe superar los 60 °C. Esto es por las limitaciones del modelo matemático que se empleará para modelizar el humidificador. (Kloppers y Kröger, 2005)
- El calor específico del agua se lo considera constante a un valor de 4,181 [kJ/kg K]

Se analizará cada componente con un balance de masa y energía como lo establece la primera ley de la termodinámica (Cengel et al., 2019). Sin embargo, deben conocerse algunos otros parámetros para analizar matemáticamente el ciclo para luego evaluar su desempeño. Estos parámetros son, la temperatura del agua salina y del aire al ingreso del humidificador, humedad relativa del aire del ingreso del humidificador, efectividad del humidificador y deshumidificador. Este último parámetro es definido como la variación real de entalpía respecto a la variación máxima posible de entalpía para un intercambiador simultáneo de calor y masa. (Narayan et al., 2010) Las ecuaciones para cada componente son:

### Ecuaciones del humidificador

El aire seco es una mezcla de gases (oxígeno, nitrógeno, argón), pero, generalmente, posee un cierto contenido de pequeñas cantidades de agua en forma de vapor. El conjunto entre el aire seco y el vapor de agua se denomina aire húmedo y su entalpía se puede calcular mediante la Ec. (1) como la suma de la entalpía de aire seco y la entalpía del agua.

$$h = cp_{aire} * T + X * (cp_{agua} * T + r) \quad (1)$$

donde:

$h$  = entalpía de aire húmedo por masa de aire seco [kJ/kg]

$cp_{aire}$  = calor específico del aire [kJ/kg K]

$cp_{agua}$  = calor específico del agua [kJ/kg K]

$X$  = humedad absoluta por masa de aire seco [kg/kg]

$T$  = temperatura en el cual se encuentra la mezcla [°C]

$r$  = calor latente de vaporización del agua [kJ/kg]

Las Ec. (2), (3), (4) permiten calcular el calor específico del aire, calor latente de vaporización del agua y la humedad absoluta. (ASHRAE, 1997)

$$cp_{aire} = 0,0000004 * T^2 + 0,0000185 * T + 1,0042144 \quad (2)$$

$$r = - 2,4336 * T + 2503 \quad (3)$$

$$X = 0,622 * \frac{P_{sat}}{P_{aire}} \quad (4)$$

donde:

$P_{sat}$  = presión de saturación del aire húmedo [Pa]

$P_{aire}$  = presión del aire seco [Pa]

En las Ec. (2), (3) la temperatura debe ser ingresada en unidades de grados Celsius para obtener como resultado en unidades kJ/kg°C y kJ/kg.

La presión de saturación del aire húmedo se calcula con la siguiente ecuación (Ec. 5) (ASHRAE, 1997),

$$P_{sat} = 6,0679 * 10^{-11} * T^5 - 4,6109 * 10^{-9} * T^4 + 8,0108 * 10^{-7} * T^3 + 7,0812 * 10^{-7} * T^2 + 5,4027 * 10^{-4} * T + 6,0871 * 10^{-3} \quad (5)$$

En la ecuación anterior, se debe tener en cuenta que la temperatura debe ser ingresada en la unidad de grados Celsius (°C) para obtener como resultado la presión en unidades ‘bar’ (1 bar son 100.000 Pa).

Siguiendo con la nomenclatura de la Fig. 1, se expone las ecuaciones del balance de energía (Ec. 6) y de masa (Ec. 7),

$$m_a * h_I + m_3 * h_3 = m_a * h_{II} + m_4 * h_4 \quad (6)$$

donde:

$h_I$  = entalpía del aire húmedo por masa de aire seco a la entrada del humidificador [kJ/kg]

$h_{II}$  = entalpía del aire húmedo por masa de aire seco a la salida del humidificador [kJ/kg]

$h_3$  = entalpía específica del agua salina que ingresa al humidificador [kJ/kg]

$h_4$  = entalpía específica del agua salina a la salida del humidificador [kJ/kg]

$m_a$  = masa de aire seco [kg]

$m_3$  = masa de agua salina que ingresa al humidificador [kg]

$m_4$  = masa de agua salina que sale del humidificador [kg]

$$m_3 - m_4 = m_{ev} = m_a * (X_{II} - X_I) \quad (7)$$

donde:

$m_{ev}$  = masa de agua evaporada [kg]

$X_I$  = humedad absoluta del aire húmedo por masa de aire seco a la entrada del humidificador [kg/kg]

$X_{II}$ = humedad absoluta del aire húmedo por masa de aire seco a la salida del humidificador [kg/kg]

La eficiencia del humidificador está definida como (Ec. 8) (Narayan et al., 2010)

$$Ef_h = \text{máx.} \left( \frac{h_{II} - h_I}{h_{II,ideal} - h_I}, \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4,ideal}} \right) \quad (8)$$

donde la entalpía ideal del aire de salida se calcula cuando el aire de salida está totalmente saturado a la temperatura de entrada del agua, mientras que la entalpía ideal del agua salina de salida es cuando su temperatura es igual a la temperatura de bulbo seco del aire de entrada.

Dentro del humidificador hay un ‘empaquete’ que mejora las características de transferencia de calor y masa. Con el objetivo de determinar la altura del empaque se modelizará el humidificador con la teoría de Merkel que se emplea ampliamente para torres de enfriamiento y humidificadores. La deducción de la ecuación y las hipótesis que emplea esta teoría no se abordará en este estudio para ello recurra a la siguiente bibliografía Treybal (1980) y Sharqawy et al. (2014). La Ec. (9) se obtiene el número de Merkel (Me), que es coeficiente adimensional que no dice que tan difícil es efectuar el proceso de transferencia de calor y masa, cuanto mayor sea este, mayor será la altura del empaque, caso contrario, será menor.

$$Me = cp_{agua} * \int_{T_4}^{T_3} \frac{dT}{h_{sat} - h} \quad (9)$$

donde:

$h_{sat}$  = entalpía del aire saturado por masa de aire seco [kJ/kg]

$T_3$  = temperatura del agua salina a la entrada del humidificador [°C]

$T_4$  = temperatura del agua salina a la salida del humidificador [°C]

Se utilizará las características del empaque de Sharqawy et al. (2014), cuya ecuación se ve expresada como, (Ec. (10))

$$Me = 2.049 * MR^{-0.779} * Z^{0.632} \quad (10)$$

donde:

MR = relación de mezcla, razón de caudal másico de agua salina por caudal másico de aire seco [adimensional]

Z = altura del empaque [m]

### ***Ecuaciones del deshumidificador***

Siguiendo con la nomenclatura de la Fig. 1, se expone las ecuaciones del balance de energía (Ec. 11) y de masa (Ec. 12),

$$m_a * h_{II} + m_1 * h_1 = m_a * h_{III} + m_2 * h_2 + m_{pw} * h_{pw} \quad (11)$$

donde:

$h_{III}$  = entalpía de aire húmedo por masa de aire seco a la salida del deshumidificador [kJ/kg]

$h_1$  = entalpía específica del agua salina que ingresa al deshumidificador [kJ/kg]

$h_2$  = entalpía específica del agua salina a la salida del deshumidificador [kJ/kg]

$h_{pw}$  = entalpía específica del agua desalinizada [kJ/kg]

$m_{pw}$  = masa de agua desalinizada [kg]

$m_1$  = masa de agua salina que ingresa al deshumidificador [kg]

$m_2$  = masa de agua salina que sale del deshumidificador [kg]

$$m_{pw} = m_a * (X_{II} - X_{III}) \quad (12)$$

donde:

$X_{III}$  = humedad absoluta del aire húmedo por masa de aire seco a la salida del deshumidificador [kg/kg]

De manera similar, a la Ec. (8), la eficiencia del deshumidificador está definida como (Ec. 13), (Narayan et al., 2010)

$$Ef_{dh} = \text{máx.} \left( \frac{h_{II} - h_{III}}{h_{II} - h_{III,ideal}}, \frac{h_2 - h_1}{h_{2,ideal} - h_1} \right) \quad (13)$$

### ***Ecuación de la fuente de calor***

Esta fuente se encargará de elevar la temperatura del agua de salida del deshumidificador hasta la temperatura deseada a la entrada del humidificador, su ecuación se ve expresada como (Ec. 14),

$$Q = cp_{agua} * MR * m_a * (T_3 - T_2) \quad (14)$$

donde:

$T_2$  = temperatura de salida del agua salina del deshumidificador [°C]

### ***Resolución del modelo matemático***

Las Ecs. (1-14), se programaron en un software informático y por métodos iterativos se resolvieron con tolerancias  $10^{-6}$ . Se empleó el método numérico de Simpson 1/3, con una cantidad máxima de división de intervalos de 100000, para resolver la integral de Merkel. Finalizada la simulación se procede a calcular parámetros de desempeño usualmente empleados para caracterizar esta tecnología: 1) GOR, Relación de ganancia de salida (Gain-Output-Ratio), es la razón del caudal másico de agua desalinizada multiplicada por el calor latente de vaporización, a la temperatura  $T_{III}$ , sobre la potencia térmica entregada (Ec 14); 2) RR, Tasa de recuperación (Recovery Rate), es la razón del caudal másico del agua desalinizada sobre el caudal másico del agua salina (Ec. 15).

$$GOR = \frac{(m_{pw} * r)}{Q} \quad (14)$$

$$RR [\%] = \frac{(m_{pw} * 100)}{m_1} \quad (15)$$

## **RESULTADOS**

Se simuló el comportamiento del desalinizador a diferentes condiciones de funcionamiento para observar el desempeño de éste. Los parámetros que se decidieron estudiar fueron: la temperatura de agua salina al ingreso al humidificador, humedad relativa y temperatura de aire a la entrada del humidificador, razón de caudal másico de agua salina sobre caudal másico de aire y las eficiencias del humidificador y deshumidificador

### ***Efecto de la humedad relativa y la temperatura de aire a la entrada del humidificador***

En la Fig. 2 se presentan los parámetros de desempeño del desalinizador, GOR y RR, en función de diferentes relaciones de mezcla (MR), humedad relativa y aire de ingreso, manteniendo constante la temperatura de entrada del agua salina al humidificador en 60 °C y las eficiencias del humidificador y deshumidificador en 0,9. La curva del RR muestra un máximo de aproximadamente 4,4 % en un MR de 2,5, disminuyendo a medida que el MR aumenta. El incremento de la temperatura del aire que ingresa al humidificador,  $T_i$ , provoca dos efectos en la curva: un desplazamiento hacia la derecha y una reducción de este máximo. Aunque la humedad relativa tiene un efecto significativo antes de alcanzar el máximo, su influencia es menor una vez que se supera dicho punto. Un comportamiento similar se

observa en la curva del GOR, cuyo máximo también se encuentra en un MR de 2,5, alcanzando un valor aproximado de 4,5.

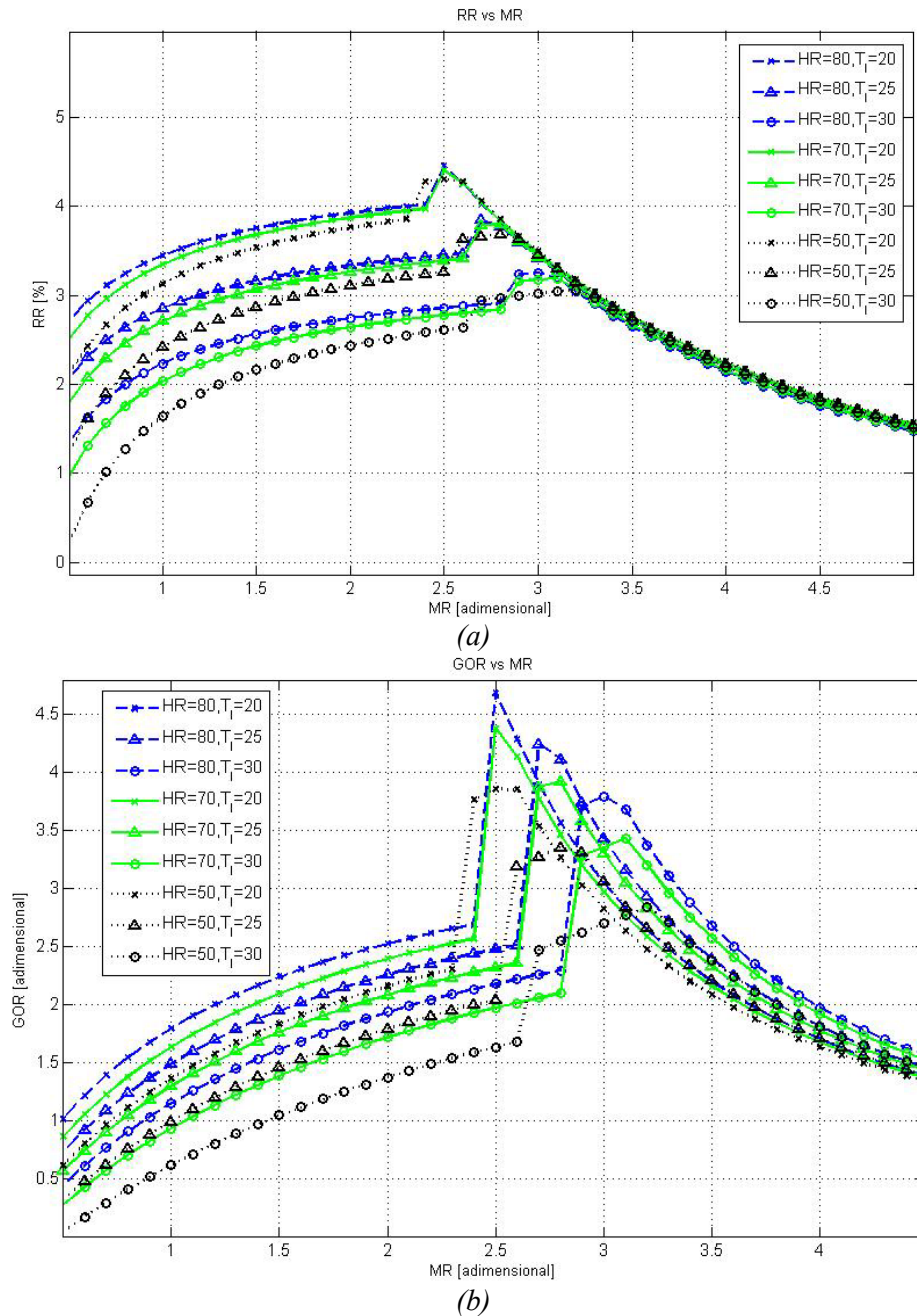


Figura 2: Variación de los parámetros de desempeño del HDH-OACW a diferentes temperaturas y humedades relativas al ingreso del humidificador manteniendo fijo  $T_3=60^\circ\text{C}$ ,  $E_{f_h}=E_{f_{dh}}=0,9$ . (a) RR vs MR (b) GOR vs MR

### Efecto de la eficiencia del humidificador y deshumidificador

En la Fig. 3 se presentan los parámetros de desempeño del desalinizador, GOR y RR, en función de diferentes eficiencias de deshumidificación ( $E_{f_{dh}}$ ) y humidificación ( $E_{f_h}$ ), manteniendo constantes: la temperatura de entrada del agua salina al humidificador en  $60^\circ\text{C}$ , el MR en 2,5, y la temperatura y humedad relativa del aire de ingreso al humidificador en  $25^\circ\text{C}$  y 65 %, respectivamente. Ambas curvas se ven afectadas negativamente cuando alguno de estos dos parámetros disminuye, siendo el RR el más sensible. En contraste, el GOR muestra menor variación en su valor a bajas eficiencias de deshumidificación, independientemente de la eficiencia del humidificador

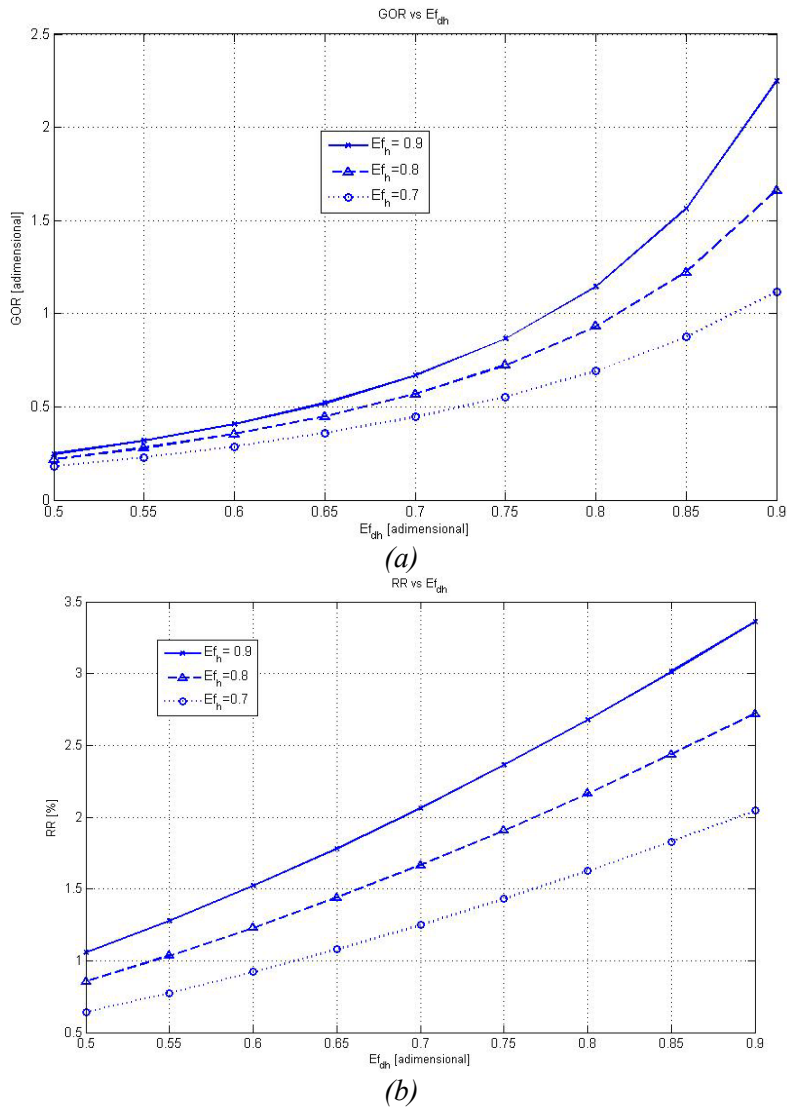


Figura 3: Variación de los parámetros de desempeño del HDH-OACW a diferentes eficiencias del humidificador y deshumidificador manteniendo fijo  $T_3 = 60^\circ\text{C}$ ,  $MR = 2,5$ ,  $T_1 = 25^\circ\text{C}$  y Humedad Relativa = 65%. (a) GOR vs MR (b) RR vs MR

#### Efecto de la temperatura del agua salina que ingresa al humidificador

En la Figs. 4 (a) y (b) se muestran los parámetros de desempeño del desalinizador, GOR y RR, en función de diferentes relaciones de mezcla (MR) y temperaturas de ingreso del agua salina, manteniendo constante la temperatura y la humedad relativa del aire de ingreso en  $25^\circ\text{C}$  y 80 %, así como las eficiencias del deshumidificador ( $E_{f_{dh}} = 0,9$ ) y del humidificador ( $E_{f_h} = 0,85$ ). Ambas curvas se ven afectadas negativamente con la disminución de la temperatura del agua salina, experimentando un desplazamiento de sus máximos hacia la izquierda.

Por otro lado, en las Figs. 4 (c) y (d) se analiza el comportamiento del número de Merkel y la altura necesaria del empaque para diferentes valores de MR. El número de Merkel aumenta exponencialmente a medida que se aproxima al MR en el que se alcanzan los valores máximos de GOR y RR, lo que se debe a que el aire húmedo sale del humidificador a temperaturas cercanas a la del agua salina de ingreso. Este incremento exponencial repercute en la altura necesaria del empaque para llevar a cabo el proceso, alcanzando valores máximos de aproximadamente 43,5 m.



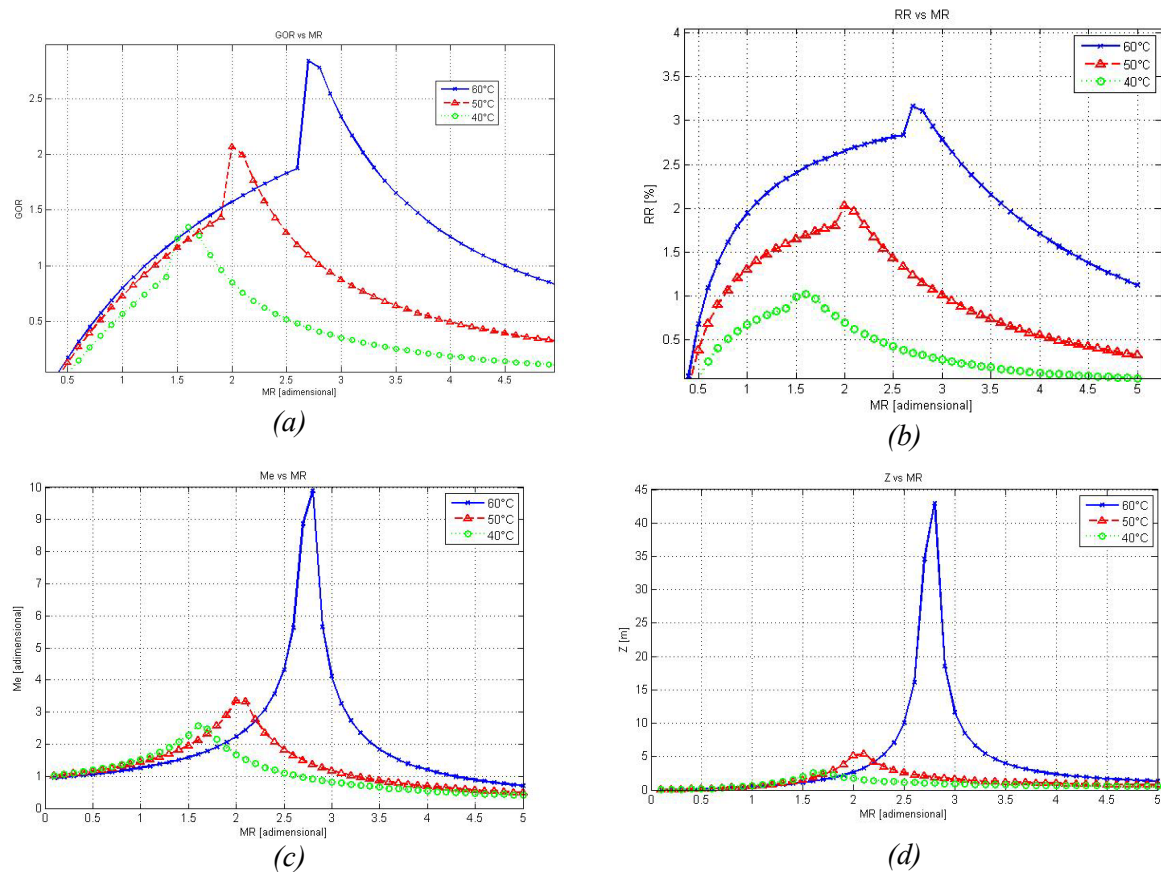


Figura 4: Variación de los parámetros de desempeño del HDH-OACW a diferentes temperaturas de agua salina a la entrada del humidificador manteniendo fijo  $T_i = 25^\circ\text{C}$ , Humedad relativa = 80%  $E_{fh} = 0,85$ ,  $E_{dh} = 0,9$ . (a) GOR vs MR (b) RR vs MR (c) Me vs MR (d) Z vs MR

## CONCLUSIONES

Se analizó el comportamiento de un desalinizador por Humidificación-Deshumidificación con la configuración OACW mediante balances de masa y energía, integrando el concepto de eficiencia en equipos que intercambian simultáneamente calor y masa.

El desalinizador alcanzó valores máximos de GOR ( $\sim 4,5$ ) y RR ( $\sim 4\%$ ) a costa de una altura de empaque superior a 40 m. Estos valores pueden verse fuertemente influenciados por la temperatura del agua salina al ingreso del humidificador; una reducción de  $60^\circ\text{C}$  a  $50^\circ\text{C}$  en esta temperatura disminuye la altura necesaria en un 88,5 %, pero conlleva un rendimiento energético menor y una producción reducida de agua desalinizada. Un efecto similar se observa con el incremento de la temperatura del aire de ingreso al humidificador.

Se concluye que los parámetros predominantes en el desempeño óptimo de esta configuración son: la temperatura del agua salina a la entrada del humidificador, la razón de caudal másico de agua salina respecto al caudal másico de aire seco, la temperatura del aire de ingreso al humidificador y las eficiencias de los equipos (humidificador y deshumidificador). Para lograr una eficiencia térmica y de producción máximas, se requieren alturas de empaque significativas, lo que podría resultar poco rentable en ubicaciones aisladas sin infraestructura eléctrica y vial adecuada. Por ello, se recomienda operar en puntos ligeramente alejados de la eficiencia máxima, generalmente con caudales más bajos de agua, pero manteniendo el caudal de aire seco constante.

Además, factores como la temperatura ambiente y la disponibilidad de energía solar pueden afectar negativamente la producción, siendo la disponibilidad de energía solar el factor más influyente. Es

esencial implementar un tanque de almacenamiento de agua caliente para mantener la temperatura del agua salina lo más constante posible.

## REFERENCIAS

- ASHRAE (1997). *Ashrae Handbook – Fundamentals*. (1ra edición), pp.851, ASHRAE Editors 6:1-3, 244-251.
- Cengel Y. A., Boles M. A. Kanoglu M. (2019). *Termodinámica* (9na edición). Mc Graw Hill.
- Dias de Carvalho M., Selia dos Reis Coimbra J., Silva Miranda Lemos T., Alguilar Bellido J. D., Oliveira Siquiera A. M., (2020). A review of humidification-dehumidification desalination systems, *International Journal of Research*. <https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v8.i5.2020.225>
- El-Agouz S.A., Abdo A., El-Samadony Y.A.F, Khalil A. (2015) Solar water desalination using an air bubble column humidifier. *Desalination* (372) 7 - 16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2015.06.010>
- Huang X., Ke T, Li Y., Liu W., Yu X. (2019). Thermodynamic analysis of a two-stage humidification–dehumidification system with reflux configuration. *Energy Convers Manage* (197). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111872>
- Kloppers J. C., Kröger D. G. (2005). Cooling towers performance evaluation: Merkel, Poppe and e-NTU Methods of Analysis. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* (127). <https://doi.org/10.1115/1.1787504>
- Li G.P., Zhang L.Z. (2016). Investigation of a solar energy driven and hollow fiber membrane-based humidification–dehumidification desalination system. *Applied Energy* (177), 393-408. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.113>
- Li X., Li H., Yuan G., Wang Z., Xu Z. (2014) Experimental study on a humidification and dehumidification desalination system of solar air heater with evacuated tubes. *Desalination* (351), 1 – 8 <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.07.008>
- Ling X., Huang X., Ke T., Li Y., Liu W., Yu X. (2020). Pressure drop modeling and performance optimization of a humidification–dehumidification desalination system, *Applied Energy* (258) <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114065>
- Narayan G.P., Lienhard J.H., Mistry K.H., Sharqawy M.H., Zubair S.M. (2010) Energy effectiveness of simultaneous heat and mass exchange devices, *Front. Heat Mass Transf.* (1) 1–13. <https://doi.org/10.5098/hmt.v1.2.3001>
- Narayan G.P., Lienhard J.H., Sharqawy M.H., Zubair S.M. (2010) Thermodynamic analysis of humidification dehumanization desalination cycles, *Desalin. Water Treat.* (16) 339–353. <http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2010.1078>
- Qasem N. A. A., Lawal D. U. (2020). Humidification-dehumidification desalination systems driven by thermal-based renewable and low-grade energy sources: A critical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109817>
- Scozzina E. S., Díaz O. M, Lorenzo H. G., Vera L. H (2023). Procesos de desalinización del agua, tecnología de humidificación-deshumidificación. *ASADES, Acta de la XLV reunión de trabajo* (10), 92 – 104.
- Sharqawy M.H., Antar M. A. (2013) Experimental investigations on the performance of an air heated humidification–dehumidification desalination system. *Desalination and Water Treatment* (51), 837 – 843. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.714598>
- Sharqawy M. H., Antar M. A., Elbashir A. M. (2014). Optimum thermal design of humidification dehumidification. *Desalination* (349), 10-21. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.06.016>
- Tariq R., Sheikh N.A., Xamán J., Bassam A. (2018) An innovative air saturator for humidification-dehumidification desalination application. *Applied Energy* (228), 789–807. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.135>
- Treybal R.E. (1980). *Operaciones de transferencia de masa* (2da edición). Mc Graw Hill.
- Xu H., Dai Y.J., Sun X.Y. (2019). Thermodynamic study on an enhanced humidification-dehumidification solar desalination system with weakly compressed air and internal heat recovery. *Energy Convers Manage* (181), 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.073>
- Yamal C., Solmus I. (2008) A solar desalination system using humidification–dehumidification process: experimental study and comparison with the theoretical results. *Desalination* (220), 558 - 551. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.054>

Zubair S.M., Antar M. A, Elmutasim S.M., Lawal D.U. (2018). Performance evaluation of humidification- dehumidification (HDH) desalination systems with and without heat recovery options: An experimental and theoretical investigation. *Desalination* (436), 161–75. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.02.018>

### **THEORETICAL STUDY OF AN OACW TYPE HUMIDIFICATION-DEHUMIDIFICATION DESALINATOR FOR RURAL APPLICATIONS**

**ABSTRACT:** The growing demand for potable water has prompted the search for sustainable and efficient methods for desalination. Conventional methods, such as reverse osmosis and multistage evaporation, have limitations in their small-scale application, especially in rural areas with limited access to electric power. This paper explores Humidification-Dehumidification desalination using a closed system with solar water heating. The analysis focused on key performance parameters, revealing a strong influence of the humidifier inlet water temperature, the ratio of water and air mass flow rates, and the inlet air temperature. It was found that the points of maximum energy efficiency and production require packing heights above 40 m. Climatic variability negatively affects these systems, so it is recommended that additional components be implemented to maintain constant temperatures and operate at points where the packing height is lower.

**Keywords:** solar energy, humidification-dehumidification and desalination.

## **GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN LA CIUDAD AUTÓNOMA DE BUENOS AIRES: ANÁLISIS DE CINCO AÑOS DE IMPLEMENTACIÓN (2019-2024)**

**Pablo Bahamonde<sup>1</sup>, Alejandro Aroca Bavich<sup>1</sup>, Alan Bjerring<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Cruz

Tel. 011-66486687 e-mail: [pablobahamonde@frsc.utn.edu.ar](mailto:pablobahamonde@frsc.utn.edu.ar)

**RESUMEN:** La generación distribuida es un modelo beneficioso para el fortalecimiento y descarbonización de la infraestructura energética, generando nuevas posibilidades de interacción de los usuarios con la red eléctrica. En la República Argentina esta herramienta se introdujo normativamente en el año 2017, a partir de la sanción de la Ley 27.424 “Régimen de fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica pública”. Este estudio busca estudiar los resultados de la adhesión de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires a esta ley en el año 2019, considerando el quinquenio comprendido entre mayo de ese año y junio de 2024. Esta adhesión permitió que en la jurisdicción se implemente la figura legal del usuario generador, con capacidad de generar energía a partir de fuentes renovables para autoconsumo, pudiendo además inyectar eventuales excedentes a la red de distribución eléctrica. En este trabajo se analizan y describen la evolución, características y resultados, destacándose una evolución con velocidad y tendencia inferior a la esperable. Se concluye que los contextos nacional y local resultan adversos para la adopción masiva de este modelo, así como los estímulos implementados también resultan insuficientes. Se proponen líneas de acción para impulsar el desarrollo de esta herramienta.

**Palabras clave:** energía solar, generación distribuida, usuario generador, Buenos Aires

### **INTRODUCCIÓN**

#### ***La generación distribuida en la Argentina***

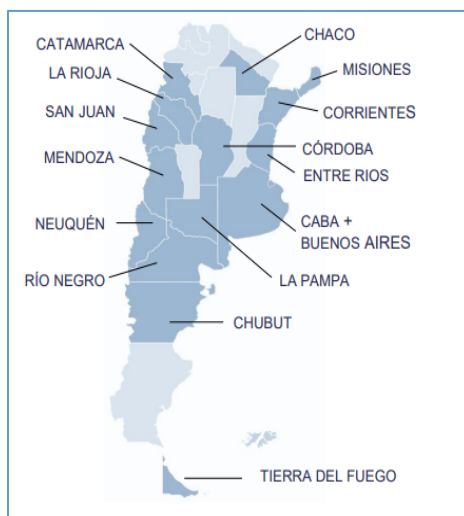
La generación distribuida, según el marco regulatorio nacional vigente a partir de la promulgación de la Ley 27.424 “Régimen de fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica pública”, se entiende como toda aquella generación de energía eléctrica obtenida a partir de fuentes renovables por usuarios del servicio público de distribución que estén conectados a la red del prestador del servicio (Ley 27.424, 2017). Además, se requiere que estos cumplan con los requisitos técnicos establecidos por la regulación para inyectar los excedentes del autoconsumo en la mencionada red pública.

La integración de la generación distribuida al sistema eléctrico argentino, complementando al modelo convencional de generación concentrada, presenta como principal novedad la creación de la figura legal del usuario-generador (UG), que admite el acceso al doble rol de parte de los usuarios, y que resulta equivalente al del “prosumidor” de otras legislaciones. Los usuarios que adoptan esta modalidad de generación, y obtienen el correspondiente certificado de usuario-generador, están habilitados para producir energía eléctrica (con una potencia instalada máxima permitida de 2 MW), permaneciendo a su vez conectados al suministro que les brinda la red eléctrica de distribución (Subsecretaría de Energías Renovables y Eficiencia Energética, 2019). De existir un sobrante de energía eléctrica (excedente), el UG puede percibir un beneficio económico o retribución por la inyección de esta energía a la red, mediante un esquema de *net billing* o balance neto de facturación. Hasta la sanción de la ley 27.424, esta inyección de energía autogenerada a la red pública de distribución por parte de usuarios constituía siempre una actividad ilegal, toda vez que no existía un instrumento que la habilitara.

La generación distribuida presenta múltiples aspectos positivos, entre los que se destacan: (i) baja los requerimientos de transporte, fortaleciendo y mejorando la eficiencia de la red por descongestión de las líneas de transporte eléctrico y centros de distribución, (ii) disminuye pérdidas por transporte y distribución, (iii) contribuye a regular la tensión (por ejemplo, en extremos de línea), (iv) reduce la quema de combustibles fósiles de la matriz energética y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas, (v) genera empleo local, (vi) beneficia económicamente al usuario a través del ahorro por autoconsumo y el ingreso derivado de la eventual inyección de excedentes de energía a la red local (vii) involucra y concientiza al usuario en los temas energéticos (Borenstein, 2020). La adopción de la generación distribuida también implica un mejoramiento de la calidad de la matriz eléctrica nacional, ya que, al disminuir la demanda total, permite reducir el consumo marginal, evitando así el despacho de máquinas ineficientes. Entonces, este instrumento constituye una herramienta importante en el proceso de transición energética, volviéndose relevante para los estados nacionales y subnacionales su implementación exitosa.

Tras la reglamentación de la Ley 27.424 en diciembre de 2018, se requirió que cada jurisdicción adhiriera a la misma para poder ser implementada en cada una de ellas, dado que, al tratar sobre la distribución de redes eléctricas no interjurisdiccionales, la competencia legal asociada corresponde a las provincias y no a la Nación. De hecho, la provincia de Santa Fe se adelantó al resto del país en el año 2016, implementando su propio programa de generación distribuida (llamado “Prosumidores”), con un esquema de incentivos diferente, conocido como *feed-in-tariff*.

Al mes de junio de 2024, hay 17 provincias adheridas a la ley 27.424 (Figura 1), con 42.412 kW de potencia renovable instalada (Secretaría de Energía de la Nación, 2024). Respecto a la cantidad total de UGs habilitados, hasta esa fecha era de 1.892 en todo el país. A modo comparativo, en Brasil se registraba en marzo de 2024 una potencia instalada de 27.700.000 kW, con 2,4 millones de instalaciones (ANEEL, 2024).

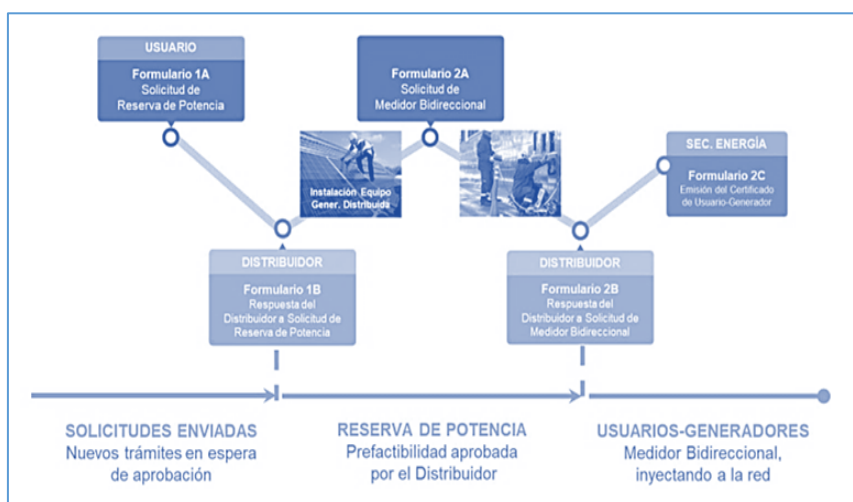


*Figura 1: Jurisdicciones adheridas a la ley 27.424 en junio de 2024 (Secretaría de Energía de la Nación, 2024)*

Respecto a las tecnologías utilizadas, hasta junio de 2024 no hay registrados UGs que utilicen tecnologías distintas a la fotovoltaica. Este predominio puede explicarse a partir de dos causas. Por un lado, la generación distribuida, por sus características, es de aplicación mayormente urbana y periurbana. En estos contextos, los sistemas fotovoltaicos suelen ser los de mayor aplicación, debido a su modularidad, simplicidad de implementación, eficiencia independiente de la escala y la facilidad de integración arquitectónica (*Building-Integrated Photovoltaics*, BIPV), ya sea en reemplazo de elementos de construcción o ubicando los módulos fotovoltaicos sobre cubiertas o fachadas existentes (Videla y otros, 2023).

Por otra parte, para el caso de la aplicación de la Ley 27.424, aunque en ella se encuentran admitidas todas las fuentes de energías renovables contempladas por el art. 2 de la Ley 27.191 (eólica, solar térmica, solar fotovoltaica, geotérmica, mareomotriz, undimotriz, de corrientes marinas, hidráulica, biomasa, gases de vertedero, gases de plantas de depuración, biogás y biocombustibles), las tecnologías solar fotovoltaica y eólica son las únicas definidas extensamente en la reglamentación (Secretaría de la Energía de la Nación, 2023) en cuanto a requerimientos técnicos particulares, certificaciones, ensayos, condiciones estructurales, y otros aspectos asociados. Las demás tecnologías están incluidas en una misma definición genérica de requisitos de las instalaciones de maniobra y protección eléctrica, sin distinción por tecnología o normas aplicables. Estas especificaciones son requeridas en la práctica por las empresas y cooperativas de distribución eléctrica, que tienen delegada la potestad de aprobación técnica de las instalaciones dentro del trámite, y que, por su rol como distribuidoras, no suelen poseer expertiz técnica en generación a partir de fuentes renovables. Esto introduce algún nivel de resistencia de parte de las empresas distribuidoras para aceptar instalaciones de tecnologías que no tienen definidos los requisitos técnicos de manera clara en la normativa nacional. Prueba de esto fue la necesidad de incorporar una actualización en la reglamentación técnica en noviembre de 2023, a través de la resolución 919/2023 de la SEN (Secretaría de la Energía de la Nación, 2023), que incorporó un capítulo con los requerimientos técnicos de la tecnología eólica de baja y media potencia para ser admitidos como usuarios generadores (incluyendo especificaciones y normas requeridas para su aprobación).

En cuanto al procedimiento para convertirse en usuario-generador, el titular de un punto de suministro debe realizar un trámite a través de la plataforma de Trámites a Distancia (TAD) de Nación (Secretaría de Energía), que actúa como nexo oficial entre el usuario solicitante y la empresa o cooperativa de distribución correspondiente a la jurisdicción. Este trámite requiere de una serie de pasos (Figura 2), que comienzan con la solicitud de reserva de potencia (coincidente con la potencia contratada por el usuario, por defecto 10 kW para los residenciales), que debe ser aprobada por la empresa distribuidora.



*Figura 2: Esquema del trámite para obtención del certificado de usuario-generador 2024 (Secretaría de Energía de la Nación, 2024).*



Una vez obtenida esta autorización, y concluida la instalación del sistema de generación (con sus correspondientes protecciones, según normativa), se realiza un segundo paso administrativo, que consiste en la solicitud del medidor bidireccional. Este paso, que incluye la validación de información de la instalación por parte de un instalador calificado (que debe estar matriculado en un consejo profesional), concluye con la inspección de parte de la distribuidora, y si la instalación cumple con los requerimientos técnicos, se realiza la instalación de dicho medidor. Luego la distribuidora notifica a la Secretaría de Energía, la cual expide el certificado de usuario-generador, con lo que concluye el proceso administrativo (Secretaría de la Energía de la Nación, 2023).

### ***La Ciudad Autónoma de Buenos Aires y la generación distribuida***

La Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), con un área de 203 km<sup>2</sup> y 3.106.000 habitantes (GCBA, 2023), dispone de un potencial energético renovable muy importante, a partir del eventual aprovechamiento fotovoltaico de energía solar. Según la modelización de la herramienta *Environmental Insights Explorer* (Google, 2024), existirían 237.000 techos con viabilidad para implementar 4.853 MW de potencia en generación fotovoltaica. También se estima que el aprovechamiento del potencial solar de la ciudad con un margen de penetración razonable permitiría cubrir alrededor del 72 % de la demanda eléctrica actual de la Ciudad (Stella y otros, 2020), estimada en alrededor de 10 TWh por año (GCBA, 2023). La generación distribuida brinda la posibilidad de aprovechar todo ese enorme potencial energético.

Por otra parte, si bien poblacionalmente la Ciudad de Buenos Aires representa el 6,5% de los habitantes de toda la Argentina, su PBI corresponde al 18% del total nacional (INDEC, 2023), siendo la jurisdicción con mayor PBI per cápita del país. El nivel de ingresos representa un factor a considerar en la adopción de nuevas tecnologías, que pueden resultar sensiblemente más costosas que las convencionales.

En cuanto a la generación distribuida, la CABA adhirió al marco nacional el 16 de mayo de 2019, a través de la Ley 6.165 (GCBA, 2019). Cabe mencionar que existen antecedentes previos de sistemas *on-grid*, sin inyección a la red pública, como los desarrollados en el marco del proyecto IRESUD (Eyras et al, 2016). De esta manera, se pudo implementar en la jurisdicción el régimen de generación distribuida y la figura legal del usuario-generador. Como beneficios, complementarios a los previstos en la Ley Nacional, se incorporó la exención a los impuestos de sellos e ingresos brutos derivados de la actividad de producción de energía eléctrica, así como el descuento del 20% en los derechos de delineación para obras nuevas que demuestren la incorporación de instalaciones de generación distribuida.

El estudio del proceso de implementación de la generación distribuida en la Ciudad de Buenos Aires presenta un caso de estudio interesante en el país, dadas sus características socioeconómicas, su ámbito completamente urbano, su potencial energético, los estímulos económicos limitados para la adopción de autogeneración de energías renovables, y la adhesión temprana al régimen. Si bien existen estudios anteriores de casos de generación distribuida en la Ciudad, como en Godfrin et al (2022), en este trabajo se busca explorar desde un enfoque *top-down* la evolución y resultados de la adhesión de la CABA a la Ley 27.424, considerando el periodo quinquenal desde mayo de 2019 hasta junio de 2024.

## **METODOLOGÍA**

Dado el recorte geográfico y temporal de la jurisdicción de la CABA durante el periodo mayo 2019 a junio 2024, se aborda el análisis a partir de información provista por la Secretaría de Energía de la Nación (SEN), en cuanto se trata de la autoridad de aplicación para la obtención del Certificado de Usuario Generador, que habilita legalmente a la inyección de excedentes a la red pública de distribución eléctrica.

Esta información surge, por un lado, de los reportes públicos de avance de generación distribuida publicados mensualmente por la SEN, así como de una base de datos sobre los trámites, que abastece un tablero de seguimiento de la misma dependencia. Sobre esta, se aclara que no es de acceso público, sino que cuenta con permisos de acceso para funcionarios técnicos de cada jurisdicción, por lo que la información obtenida se circunscribe sólo al ámbito de la misma (en este caso CABA), con limitaciones

en cuanto a los campos accesibles, tales como aquellos relacionados con los datos personales asociados a cada trámite. Los campos utilizados en este trabajo corresponden al estado de cada expediente, la fecha de inicio y de conclusión del trámite, la caracterización sectorial (tipo de usuario) y geográfica (a nivel comunas), y la potencia declarada de cada instalación.

El alcance de este estudio se encuentre acotado sólo a aquellas instalaciones *on-grid* que solicitan el certificado de usuario generador. Si bien claramente las fuentes de información no reflejan el avance total de las energías renovables en el ámbito bajo estudio, toda vez que no incluye a instalaciones *off-grid*, u *on-grid* con control dinámico de potencia, constituyen la única fuente de información compilada y fidedigna existente hoy en el país. Se considera que los resultados pueden resultar indicativos de la dinámica del sector, toda vez que para un usuario del ámbito urbano resultará más conveniente invertir en instalaciones *on-grid* con medidor bidireccional que permita la eventual inyección de excedentes de energía a la red pública.

Con estas fuentes de información, se realiza tanto la caracterización del estado actual de implementación de instalaciones de generación distribuida (en potencia instalada y en cantidad de UGs), como un análisis sobre la evolución en la implementación local de este modelo. Se describen las características más relevantes encontradas sobre este proceso, así como el perfil de los usuarios-generadores de la Ciudad, y aspectos vinculados a la obtención de la autorización de los UGs, como la duración de los trámites, y el estado administrativo de los mismos (aprobados, en curso y rechazados). El estudio del proceso administrativo resulta de interés para evaluar si representa una barrera en sí mismo para la incorporación de nuevos usuarios generadores.

El análisis de la información busca detectar aspectos relevantes e indicativos del proceso, tales como áreas geográficas y socioeconómicas de la ciudad con mayor desarrollo, perfil promedio y dispersión de las instalaciones implementadas (sectorial, niveles de potencia), dinámica del crecimiento y etapa de implementación de la tecnología. También se busca detectar las barreras que limitan la actividad, y proponer soluciones para que el proceso se dinamice.

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

Según el Reporte Mensual de Avance de Generación Distribuida (Secretaría de Energía de la Nación, 2024), la CABA tiene en junio de 2024 un total de 124 usuarios-generadores, que disponen de una potencia total instalada de 2.981 kW. De esta manera, la Ciudad ocupa el cuarto lugar jurisdiccional en cuanto a potencia instalada bajo el régimen de generación distribuida (Figura 3), con un 7 % de participación sobre el total nacional, indicando la relevancia del distrito.

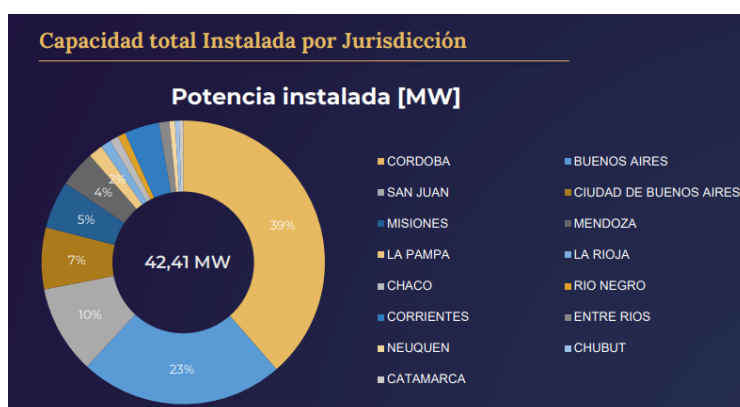


Figura 3: Distribución porcentual jurisdiccional de potencia instalada en el régimen de GD 2024 (Secretaría de Energía de la Nación, 2024)

Sin embargo, resulta llamativo que la provincia de Córdoba, habiendo adherido a la ley casi al mismo tiempo y con una población mayor, aunque comparable a la de CABA (3,9 millones de habitantes), ocupe el primer lugar y represente casi el 40 % de la potencia instalada en el país, mientras que la Ciudad de Buenos Aires sólo ronda el 7 %. Entre los factores detectados para esta diferencia sustancial se

encuentra una normativa energética más adecuada y con mayores beneficios que los de CABA, así como tarifas eléctricas que históricamente fueron entre 100 % y 300 % superiores en Córdoba (Marcó, 2019). Debe tenerse en cuenta también que CABA, a diferencia de las jurisdicciones provinciales, no cuenta con ente regulador propio de la actividad eléctrica, dependiendo exclusivamente del Ente Regulador Nacional de la Electricidad (ENRE), por lo que la jurisdicción se encuentra limitada en cuanto a las posibilidades de implementar una adecuada política energética propia que estimule el crecimiento de la generación distribuida.

Por otro lado, en base a los datos provistos por el tablero de control de la SEN, se caracteriza sectorialmente a estos UGs de CABA. Se observa que el 61 % de los UGs pertenecen al sector residencial (Figura 4), mientras que los usuarios del sector comercial/industrial representan el 31 %. Pero al considerar la potencia aportada por cada sector, claramente el más relevante es el comercial/industrial, con 73 % de la capacidad instalada de generación renovable. Luego, el sector residencial y gubernamental tienen una participación similar, con 13 % cada una.

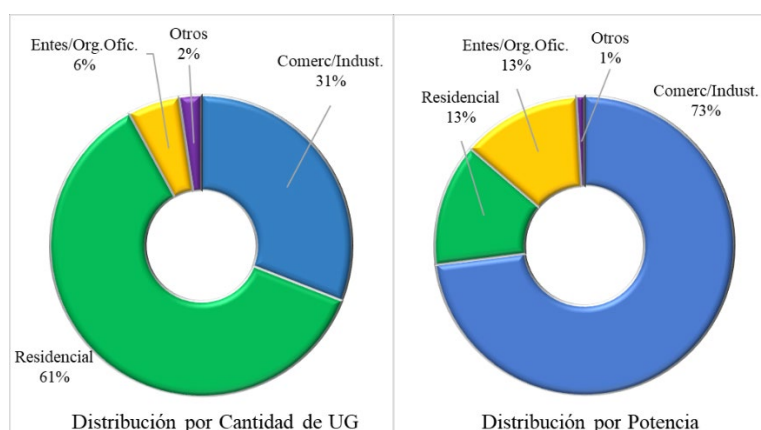


Figura 4: Distribución sectorial de la cantidad de UGs y potencia instalada en CABA (elaboración propia).

En cuanto a las dimensiones de las instalaciones para tipo de usuario, existe una gran dispersión de escala entre estos (Figura 5). Mientras que los entes gubernamentales y los usuarios comerciales/industriales tienen un promedio de potencia instalada de 55,94 kW y 54,8 kW (típicamente usuarios T2 y T3), respectivamente, los usuarios residenciales disponen de instalaciones que en promedio son de 5,17 kW (asociadas a la menor disponibilidad de espacio, y menores potencias requeridas para el autoconsumo). Luego, en la categoría “otros” se incluyen entidades como Clubes y ONGs. Para una mejor comprensión, en la figura 5 se ilustra, además del valor medio, el rango de potencias implementadas en cada tipo de instalación.

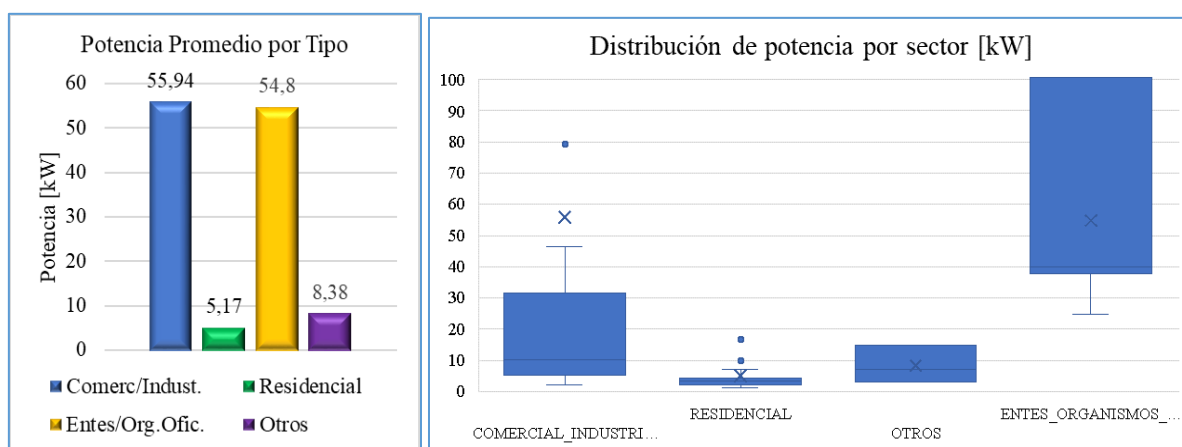
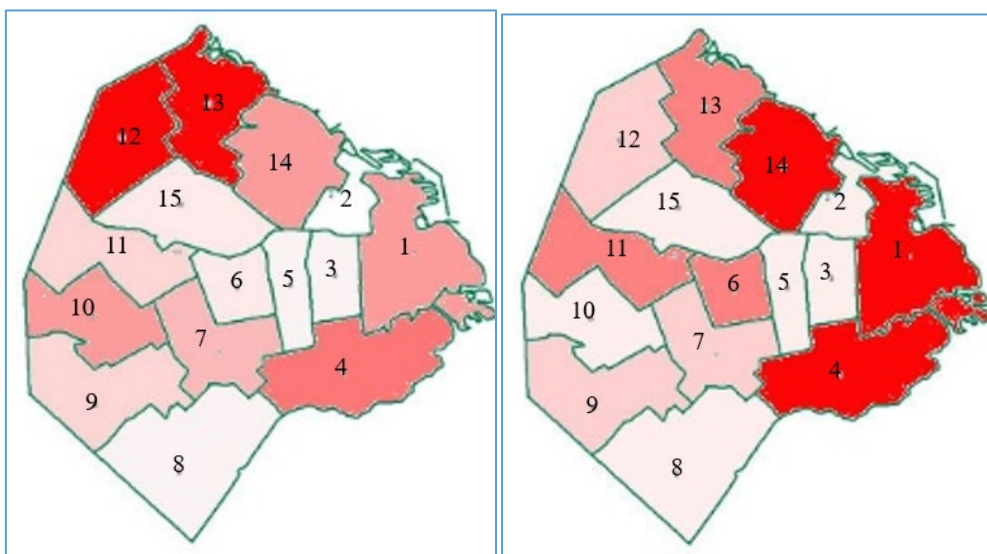


Figura 5: Dimensiones promedio y rango de las instalaciones, según sector (elaboración propia)

Se destaca que para el sector comercial e industrial la mayoría de las instalaciones se inscriben dentro del rango de 4 kW a 47 kW (con el 90 % de ellas entre 8 y 32 kW). Sin embargo, el promedio se indicó que es de 55,94 kW debido a que existen tres instalaciones (no registradas en el gráfico de la figura 5 para facilitar la visualización del mismo) que tienen valores superiores a los 100 kW, e impactan sobre el promedio del sector (la instalación de la Sociedad Rural Argentina dispone de 600 kW, mientras que la Universidad Católica Argentina tiene una instalación de 400 kW). Claramente, el sector con menor dispersión es el residencial, con el 90 % de instalaciones dentro del rango de 3,1 kW a 6,9 kW.

En un análisis geográfico de la situación, considerando la subdivisión política de CABA en 15 Comunas (Figura 6), se aprecia una clara preponderancia en la concentración de UGs en la zona norte de la ciudad, especialmente en las comunas 12 y 13. Esto puede corresponder a la conjunción de factores socioeconómicos, con mayor porcentaje de población con inquietudes ambientales, así como cuestiones de morfología urbana (zona residencial sin grandes edificios, apta para el aprovechamiento solar) y de régimen de tenencia de la vivienda: los edificios multifamiliares y con elevado porcentaje de alquileres dificultan la implementación de energías renovables, dado que las decisiones de inversión sobre espacios de uso común deben adoptarse de manera colectiva a través de los consorcios. En cuanto a la densidad energética, las comunas que la encabezan son la 1, 4 y 14, si bien estas no tienen la mayor cantidad de usuarios. Esto se debe a que dentro de las jurisdicciones de estas tres Comunas se encuentran localizadas las mayores instalaciones individuales de la Ciudad. Como ya se mencionó, la Sociedad Rural, en la Comuna 14, tiene una potencia instalada de 600 kW, mientras que la Universidad Católica Argentina dispone de una instalación de 400 kW en su sede de la Comuna 1. En cuanto a la Comuna 4, tratándose de una zona con fuerte impronta industrial, posee tres instalaciones con potencias superiores a 100 kW.

Un dato interesante es que las dos comunas que prácticamente carecen de UGs son la 2 (Recoleta) y la 8 (Villa Lugano y Villa Soldati), y se encuentran en extremos opuestos socioeconómicos (GCBA, 2023).



*Figura 6: Distribución por comunas por cantidad de UGs y potencia instalada (elaboración propia)*

En cuanto al estudio de la evolución de la potencia instalada y de la cantidad de UGs en la CABA (Figura 7), surge una tendencia lineal coincidente en ambas curvas. Si bien en la potencia instalada hay un crecimiento significativo durante el periodo de tiempo considerado, este está marcado por tres hitos de instalaciones individuales significativas (Figura 7a). Como ya se mencionó, sólo la instalación de la Sociedad Rural y de la Universidad Católica Argentina explican el 33 % de la potencia total instalada en la Ciudad). Fuera de esos incrementos específicos, la tendencia en el crecimiento de la potencia mantiene una pendiente estable. O sea que esta variable presenta un crecimiento explicado mayormente por escalones introducidos por instalaciones de potencia elevada.

En lo que respecta a la evolución en la cantidad de UGs (Figura 7b), esta resulta claramente lineal, conservando la misma pendiente durante los cinco años analizados. Se aprecia una cierta estacionalidad

en la cantidad de certificados de usuario-generador expedidos, atribuible a determinados momentos del año (como la falta de aprobación de trámites durante el mes de enero).

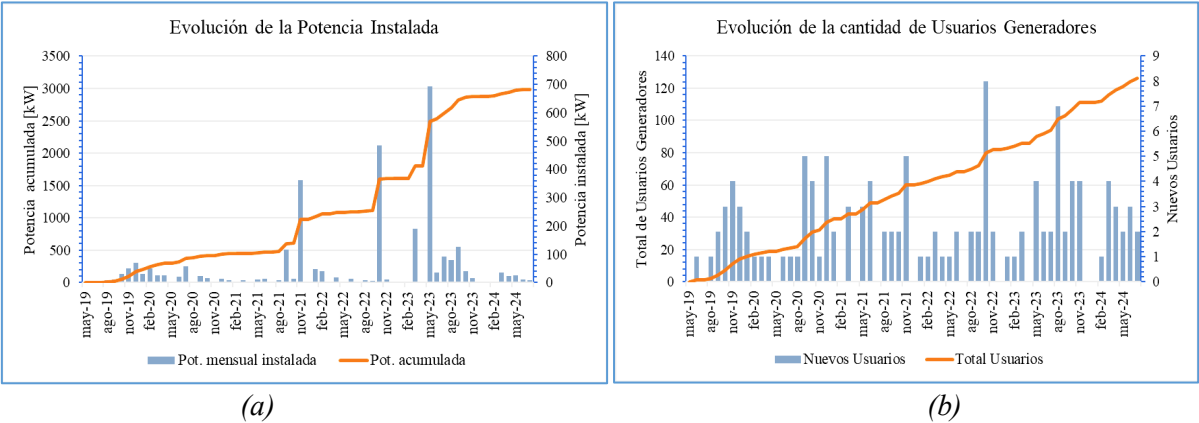


Figura 7: Evolución de instalaciones de generación distribuida en la CABA, periodo 2019-2024. (elaboración propia)

A modo de comparación se observa el comportamiento de la curva de evolución a nivel nacional (Figura 8). En esta, si bien la potencia instalada tiene un comportamiento levemente exponencial (como resulta esperable al adoptar nuevas tecnologías), el crecimiento en la cantidad de usuarios-generadores también presenta un comportamiento de carácter lineal.

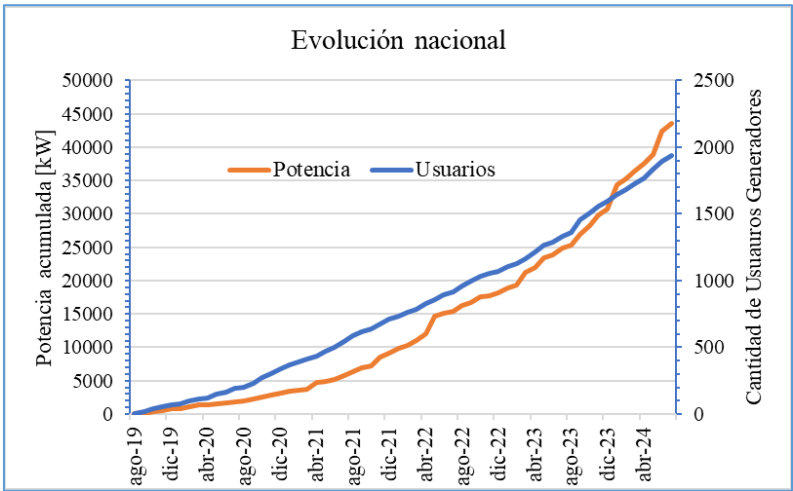


Figura 8: Evolución de instalaciones de generación distribuida en la República Argentina, periodo 2019-2024 (elaboración propia)

Otro aspecto a analizar es la participación porcentual de CABA a nivel nacional (Figura 9). Siendo una de las primeras jurisdicciones en adherir a la Ley 27.424, es lógico que inicie con una participación elevada (próxima al 40 % tanto en potencia instalada como en cantidad de usuarios). A nivel de cantidad de usuarios, esta participación parece haberse estabilizado en el orden del 7 %, mientras que para la potencia instalada se encuentra en un orden similar, aunque con variaciones que dependen de los escalones antes mencionados, producto de la incorporación de UGs de potencias elevadas. Esta participación declinante debe contextualizarse también en el marco de la progresiva incorporación de nuevas provincias al Régimen de Generación Distribuida, y que la población de la CABA está en el orden del 6 % del total nacional.

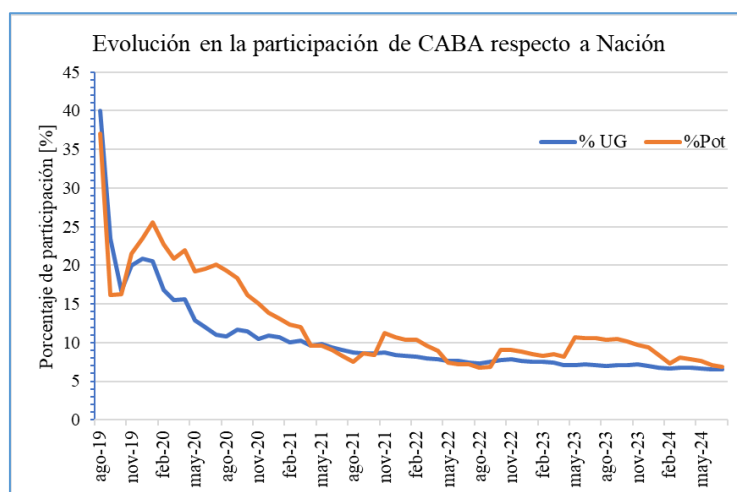


Figura 9: Evolución de la participación porcentual de CABA a nivel nacional (elaboración propia)

En cuanto al trámite para la obtención del certificado de usuario-generador, contrastando la fecha de obtención de este respecto a la fecha de inicio del expediente (Figura 10), se obtiene una duración promedio de 187 días, con trámites concluidos en un mínimo de 11 días, mientras que el expediente que requirió de mayor tiempo tuvo un proceso de 774 días. En la figura 10 se observan y señalan dos eventos durante 2020 y 2021, en los que los trámites se demoraron y acumularon, para luego actualizarse casi simultáneamente. Estos corresponden a la instancia de aislamiento social preventivo obligatorio (ASPO) por COVID-19, en 2020, y en 2021 cambios en la plataforma TAD y la secuencia administrativa del trámite. Es apreciable durante la última etapa una mayor dispersión en la duración del trámite, que no sería atribuible al proceso administrativo en sí mismo, sino a factores propios de las instalaciones y de los usuarios solicitantes.

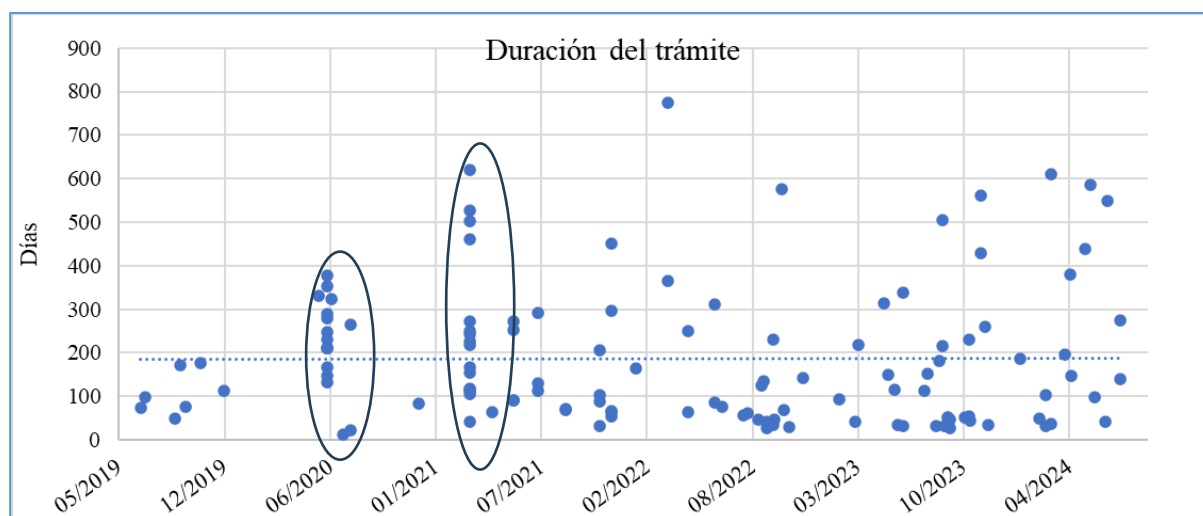


Figura 10: Estadística de duración del trámite de obtención del certificado de usuario-generador (elaboración propia)

En la figura 11a se observa que el 50 % de los expedientes tienen una demora administrativa inferior a los 122 días, y el 80 % se resuelve en menos de 232 días. Si bien es una dispersión temporal muy amplia, originada en diferentes factores, no parece indicar un proceso administrativo excesivamente extenso, cuando la mitad de los trámites se resuelven dentro de los cuatro meses de iniciados (Figura 11a). El factor retardante del proceso, que eleva el promedio a seis meses y propicia que algunos trámites superen el año de duración, podría ser causado por la creación del expediente antes de que el usuario cuente con la instalación concluida, o con los requisitos técnicos y documentales requeridos. Además, luego pueden detectarse inconvenientes técnicos en la instalación que provocan la desaprobación de parte de la distribuidora, e incluso hay registro de demoras en la recepción de notificaciones del sistema, por



cuestiones tan triviales como que la misma ingresó en la carpeta de *spam* de la casilla de correo electrónico del usuario.

En cuanto al estado de los expedientes, en la figura 11b puede observarse que, del universo total de 392 trámites iniciado, el 44 % fue aprobado o se encuentra en una etapa normal del proceso administrativo, mientras que el 56 % restante son expedientes cancelados, caducados por extensión de tiempo o rechazados en alguna de sus etapas por no cumplir con requerimientos del trámite.

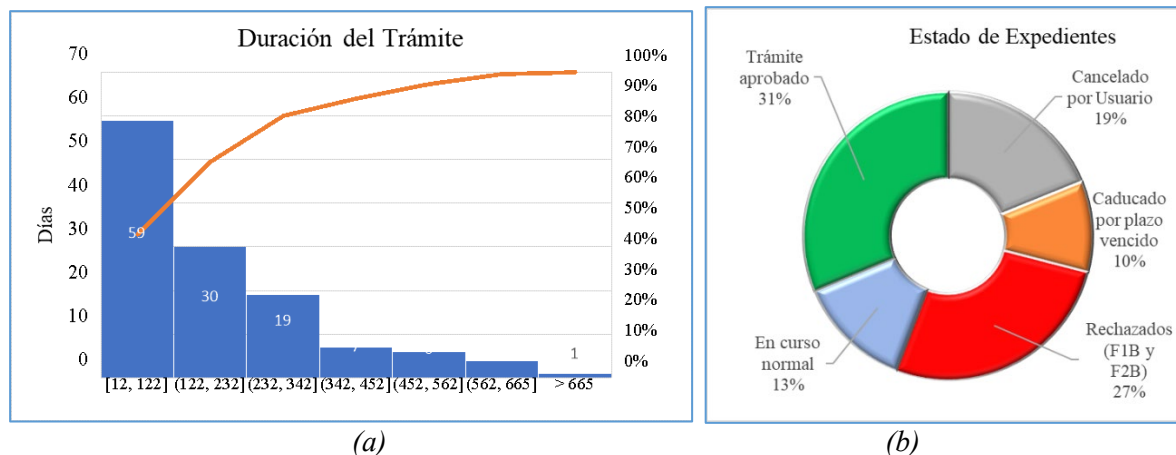


Figura 11: Distribución de la duración del trámite de UG, y del estado del total de expedientes tramitados (elaboración propia).

Este porcentaje tan elevado de expedientes malogrados, abandonados o con inconsistencias o errores que motivaron su rechazo, resulta indicativo de una capacitación o asistencia insuficiente a los usuarios e instaladores calificados (que asesoran y acompañan a los usuarios en el desarrollo del trámite) en cuanto a los requerimientos del trámite. Además, estos trámites inconclusos probablemente sean indicativos de una dificultad aparente que desmotive a los usuarios y postergue la obtención del certificado.

## CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos, se desprenden varias cuestiones interesantes. Por un lado, la jurisdicción presenta una evolución lineal sostenida, tanto en la cantidad de UGs como en la potencia total instalada. La potencia acumulada es altamente dependiente de proyectos relevantes y significativos, presentando saltos esporádicos, debidos a usuarios específicos que incorporan potencias elevadas al sistema. Este comportamiento lineal (también apreciable en las curvas de evolución a nivel nacional) parece corresponder a las etapas iniciales o experimentales de adopción de nuevas tecnologías, representada por la llamada curva S (Ruiz, 2017). En esta curva, la adopción de una nueva tecnología está representada por tres etapas claramente distinguibles: una adopción lenta y lineal, luego un crecimiento exponencial, hasta que comienza a detenerse y frenarse cuando alguno de los factores que traccionan el crecimiento comienza a saturarse. En el caso de la generación distribuida, todo indica que aún se encuentra en las etapas iniciales de adopción de la tecnología, con un amplio espacio para crecer. Pero todavía no aparecen los factores que catalicen la adopción masiva de la tecnología.

Dado que tras cinco años de adhesión a la ley sólo existen 124 UGs en la CABA, que representan apenas una fracción del total de techos potenciales, claramente es un problema, sobre todo tratándose de un modelo tecnológico ampliamente probado en otros países, como el caso citado de Brasil. El comportamiento estudiado durante este periodo, si bien resulta coincidente con la evolución nacional al menos en la incorporación de nuevos UGs, contrasta con el fuerte desarrollo en la provincia de Córdoba, con tarifas sensiblemente más elevadas que en CABA. La evolución analizada no da muestras de cambio en la tendencia, por lo que se requiere de la implementación de estímulos que permitan un crecimiento más acelerado en la incorporación de nuevos usuarios generadores.

Sin duda, la principal barrera es el contexto macroeconómico del país, con restricciones a la importación, sumado a la política tarifaria, con precios de energía fuertemente subsidiados, especialmente en el área bajo estudio. Sin embargo, al momento de corte de este trabajo se comienza a dar un proceso de retracción de subsidios y actualización de tarifas. Los efectos locales de este proceso sin duda podrán verse reflejados en futuros estudios al respecto.

Entre las medidas e incentivos que impulsen el desarrollo del sector, se propone la implementación de:

- Régimen de beneficios impositivos y financieros adecuados, que impulsen el desarrollo de la tecnología.
- Adecuación tarifaria local, que permita reducir los periodos de repago.
- Políticas educativas, que incentiven la demanda social por la tecnología.
- Generación de capacidades técnicas, que permitan no sólo abastecer la demanda, sino también promoverla.
- Implementación de instalaciones comunitarias, para agilizar la inversión colectiva.

Se propone también realizar una actualización de la Ley 6.165, a través de su derogación y sustitución por otro instrumento superador, que, manteniendo la adhesión a la norma nacional (conservando los artículos 1, 2 y 3), admita la inclusión de nuevos beneficios que impulsen la transición energética de la ciudad hacia una matriz descarbonizada.

Además, dada la fuerte incidencia del sector comercial-industrial sobre la potencia instalada (73 % de potencia, con sólo el 31 % de las instalaciones), y el mayor costo de energía de red respecto a los usuarios residenciales, resulta un segmento de usuarios que seguramente con menor nivel de estímulo podrían desarrollarse más rápidamente e impactar de manera notoria en la potencia instalada en la Ciudad.

Por otro lado, las demoras en los trámites del certificado de usuario generador no parecen requerir de mejoras sensibles en el trámite propiamente dicho, toda vez que se registran algunos aprobados en el término de 11 días. El cuello de botella se encuentra muy probablemente en la calidad de la información cargada en cada expediente, y la correspondencia temporal del mismo. Esto es, el no inicio del trámite hasta tanto la instalación se encuentre finalizada, así como la carga correcta de la información requerida por el expediente. Una propuesta sería implementar capacitaciones oficiales orientadas a potenciales usuarios-generadores, o especializar gestores o instaladores a tal efecto, de manera que cuando realicen el trámite cuenten con todos los elementos requeridos por el mismo, reduciendo las incidencias que producen demoras.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las autoridades de la Secretaría de Energía de la Nación, en particular al coordinador de Generación Distribuida, por facilitar el acceso al tablero de seguimiento de trámites correspondientes a la jurisdicción de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

## REFERENCIAS

- ANEEL (2024). Agência Nacional de Energia Elétrica. URL: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/matriz-eletrica-brasileira-alcanca-200-gw> . Brasil.
- Borenstein, S. (2020). What Can Distributed Generation Do For the Grid? Energy Institute Blog, UC Berkeley; 28 de septiembre de 2020. <https://energyathaas.wordpress.com/2020/09/28/what-can-distributed-generation-do-for-the-grid/>
- Eyras I., Duran J., Parisi F, Alvarez M. (2016). Proyecto IRESUD: Primeros ejemplos de Energía Solar Fotovoltaica Integrada a la Arquitectura (BIPV) en el país. Actas de la XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 4, pp. 13.01-13.10, 2016. ISBN 978-987-29873-0-5
- GCBA, Ley 6.165/2019 (2019). Adhesión a la Ley Nacional N° 27.424 – Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica. Dirección URL: <https://boletinoficial.buenosaires.gob.ar/normativaba/norma/471551>

- GCBA. (2023) Anuario Estadístico 2022. Dirección General de Estadística y Censos. (Ministerio de Hacienda y Finanzas GCBA) ISSN 0326-5439. URL: [https://www.estadisticaciudad.gob.ar/eyc/wp-content/uploads/2023/06/Anuario\\_estadistico\\_2022\\_web.pdf](https://www.estadisticaciudad.gob.ar/eyc/wp-content/uploads/2023/06/Anuario_estadistico_2022_web.pdf)
- Godfrin E., Krautner A., Durán J. (2022). Análisis de un sistema fotovoltaico con almacenamiento conectado a red en una vivienda unifamiliar en la Ciudad de Buenos Aires: autoconsumo, inyección a red y ahorro en la factura del servicio eléctrico. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 26, pp. 103-114, 2022, ISSN 2796-8111 ASADES 2022.
- Google (2024)- Environmental Insights Explorer.  
URL: <https://insights.sustainability.google/places/ChIJvQz5TjvKvJURh47oiC6Bs6A/solar?hl=es>
- Ley 27.424 (2017). Régimen de fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica pública. Publicada el 27/12/2017 en el Boletín Oficial de la República Argentina N° 33.779, primera sección.
- Marcó L. y Griffa L. (2019) Estudio comparativo de las tarifas de energía eléctrica residenciales en la Argentina. Panorama del Sector Energético. Junio 2019 | Número 30 | ISSN: 2683 – 6726. CIEPE - Centro de Investigación en Economía y Planificación Energética.
- Medinilla M. (2023). Portal Energía Estratégica. URL: <https://www.energiaestrategica.com/fodis-argentina-confirma-financiamiento-para-impulsar-generacion-distribuida-renovable/>
- Ruiz I. (2017). Descubriendo los secretos de la Curva S de difusión de innovaciones. Online. <https://innovation.com/2017/09/20/descubriendo-los-secretos-de-la-curva-s-de-difusion-de-innovaciones/>
- Secretaría de Energía de la Nación (2023). Resolución 919/2023, Actualización del Reglamento Técnico para la Generación Distribuida.
- Secretaría de Energía de la Nación (2024). Secretaría de Energía de la Nación. Generación Distribuida en Argentina: Evolución de Trámites y Conexión de Usuario-Generador. Junio 2024. URL: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/ppt\\_reporte\\_de\\_avance\\_junio\\_2024.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/ppt_reporte_de_avance_junio_2024.pdf)
- Stella P. Garófalo A., Bahamonde P. (2020) Aportes para la evaluación del potencial solar fotovoltaico en la mitigación de emisiones de la ciudad de Buenos Aires. ASADES, 2020.
- Subsecretaría de Energías Renovables y Eficiencia Energética (2019). Introducción a la generación distribuida de energías renovables. ISBN 978-987-47110-3-8 1.
- Videla M., Krautner A., Eyra I., Durán J.C., Plá J. (2023). Estado actual del desarrollo de la generación fotovoltaica distribuida en Argentina. Ciencia e Investigación, Tomo 73, N° 1, 54-71. Dirección URL: <https://aargentinapciencias.org/publicaciones/revista-cei-3/>

## **DISTRIBUTED GENERATION IN THE AUTONOMOUS CITY OF BUENOS AIRES: ANALYSIS OF FIVE YEARS OF IMPLEMENTATION (2019-2024)**

### **ABSTRACT**

Distributed generation is a beneficial model for strengthening and decarbonising energy infrastructure, generating new possibilities for users to interact with the electricity grid. In the Argentine Republic, this tool was introduced in 2017, with the enactment of Law 27.424 ‘Regime for the promotion of distributed generation of renewable energy integrated to the public electricity grid’. This study seeks to study the results of the adhesion of the Autonomous City of Buenos Aires to this law in 2019, considering the five-year period between May of that year and June 2024. This accession allowed the jurisdiction to implement the legal figure of the user generator, with the capacity to generate energy from renewable sources for self-consumption, with the possibility of injecting any surplus into the electricity distribution network. The evolution, characteristics and results are analysed and described, highlighting an evolution with a lower speed and trend than expected. It is concluded that the national and local contexts are adverse to the mass adoption of this model, and that the incentives implemented are also insufficient. Lines of action are proposed to promote the development of this tool.

**Keywords:** solar energy, distributed generation, user generator, Buenos Aires

## **AVANCES EN PROYECTOS DE INVERSIÓN PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA DISTRIBUIDA CON SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN LA CNEA**

**Julio C. Durán<sup>1,2</sup>, Ismael Eyras<sup>1,3</sup>, Juan Plá<sup>1,4,5</sup>, Mariela Videla<sup>1</sup>, Alejandro Krautner<sup>6</sup>, Claudio G. Bolzi<sup>1</sup>, Juan I. Pérez<sup>1</sup>, Mónica Martínez Bogado<sup>1,2,4</sup>**

<sup>1</sup>Departamento Energía Solar, CNEA

<sup>2</sup>Escuela de Ciencia y Tecnología, UNSAM

<sup>3</sup>Centro de Investigación Hábitat y Energía CIHE, FADU-UBA

<sup>4</sup>Instituto de Nanociencia y Nanotecnología, CONICET-CNEA

<sup>5</sup>Instituto de Tecnología Prof. Jorge Sábato, CNEA-UNSAM

<sup>6</sup>Gerencia Investigación y Aplicaciones GIYA- CNEA

Tel. +54 11 6772 7128 – e-mail: [monicamartinez@cnea.gob.ar](mailto:monicamartinez@cnea.gob.ar)

**RESUMEN:** Los proyectos de inversión en sistemas de generación fotovoltaica actualmente en ejecución en los Centros Atómicos Constituyentes y Ezeiza de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) contribuyen a dar cumplimiento a lo establecido en las Leyes Nacionales 27.191/15, dirigida al fomento del uso de las fuentes renovables, y 27.424/17, que establece las condiciones para la inyección de energía en generación distribuida. Entre los objetivos principales de estos proyectos se destaca instalar sistemas fotovoltaicos con una potencia total de aproximadamente 1.100 kW, conectados a la red eléctrica de baja tensión que alimenta a los edificios públicos pertenecientes a la CNEA. Con esta potencia instalada, se espera proveer anualmente alrededor del 8 % del consumo eléctrico. En este trabajo se presenta el progreso en cuanto a la potencia instalada, que totaliza aproximadamente 178 kW fotovoltaicos, así como las actividades de investigación llevadas adelante en el último año. También se consignan las dificultades encontradas durante la ejecución. Los proyectos de inversión presentados aquí representan una contribución institucional del sector público a la transición energética del país, colaborando con la diversificación de su matriz eléctrica, a la vez que disminuyen sus emisiones.

**Palabras clave:** energía solar fotovoltaica, generación distribuida, transición energética, responsabilidad ambiental institucional.

### **INTRODUCCIÓN**

La tecnología solar fotovoltaica (FV) se ha posicionado a nivel global como una fuente de generación eléctrica limpia que compite económicamente con las denominadas fuentes convencionales. Este hecho es consecuencia de las políticas llevadas adelante por países de distintos bloques político-económicos, que propiciaron la investigación básica y aplicada y el desarrollo tecnológico y de mercados durante las últimas décadas. La evolución del crecimiento de la potencia instalada de solar FV se observa en la Figura 1, habiendo superado el hito del TW durante 2022. Sin embargo, al efecto de cumplimentar el objetivo de limitar el aumento de la temperatura global a 1,5°C, establecido en el Acuerdo de París, es necesario multiplicar varias veces este valor (Haegel et al, 2023; Jäger-Waldau, 2024).

Desde 2006, Argentina ha implementado diversas leyes nacionales orientadas a la promoción de las energías renovables, así como programas articulados en este contexto y múltiples iniciativas a nivel provincial. Las políticas mencionadas facilitaron la adopción de tecnologías de generación de energía renovable, en particular de la energía solar FV. La generación eléctrica a partir de fuentes renovables, excluyendo la generación hidroeléctrica convencional de potencia, llegó a representar el 13,6 % de la oferta en 2023, sobre un total de 147.641 GWh (incluyendo la importación de energía), mostrando una clara evolución en los últimos años tal como se muestra en la Figura 2 (CAMMESA, 2024).

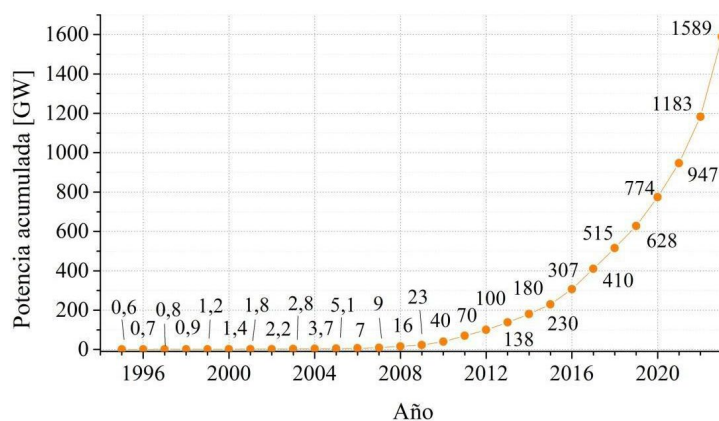


Figura 1: Evolución de la potencia instalada de Energía Solar Fotovoltaica global (1995-2023).  
Elaboración propia a partir de datos extraídos de REN21 (2013) y REN21 (2024).

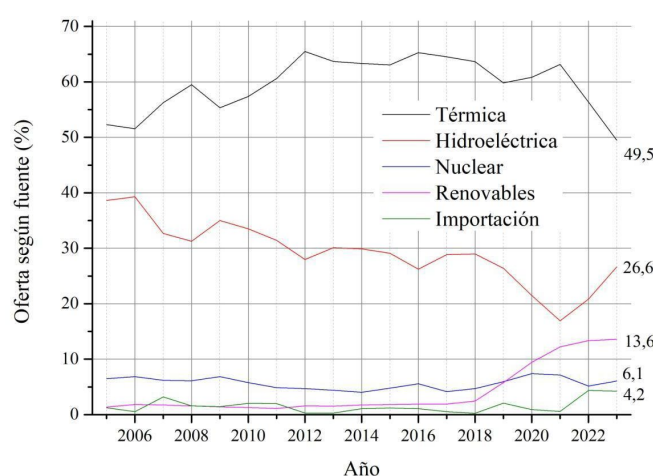


Figura 2: Evolución de la contribución de cada fuente de generación eléctrica a la oferta de energía en 2005-2023. Hidroeléctrica se refiere a centrales de potencia (> 50 MW) según la clasificación dada en la Ley 27.191. Elaboración propia a partir de datos extraídos de CAMMESA (2024).

Solar FV contaba a fin de 2023 con un total de 1366 MW de potencia instalada, habiendo generado en el año un 16,2 % de la generación total con renovables (CAMMESA, 2024). Cabe aclarar que el porcentaje mencionado corresponde a la generación FV centralizada, es decir a través de centrales de potencia que participan en el mercado mayorista regulado por CAMMESA. Estas cifras, por lo tanto, están subestimando tanto la potencia instalada como la energía generada a través de la energía solar FV. El estado de la generación distribuida en el país, considerando particularmente la tecnología solar FV actualizado a 2022, ha sido publicado anteriormente (Videla et al., 2023).

En este artículo, se puntualiza el avance en la ejecución de proyectos para la instalación de sistemas FV de generación distribuida en la CNEA durante el último año. Estos proyectos forman parte del Banco de Proyectos de Inversión Pública de la República Argentina (BAPIN) y tienen por finalidad contribuir a los objetivos y compromisos del Estado Nacional fijados en las sucesivas leyes nacionales, objetivos que fueron detallados en Durán et al. (2023). Entre los mismos se encuentran, además de los hitos temporales de cobertura de la demanda eléctrica mediante fuentes renovables, los compromisos ambientales asumidos por el Estado Nacional para la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Asimismo, se presentan las actividades de investigación desarrolladas en el último año asociadas a dichos proyectos. Cabe destacar que, en este sentido, se emprendieron tareas que serán de importancia en las siguientes etapas de la ejecución, como las de caracterización de módulos FV, la evaluación de la energía generada y del recurso solar local, y características particulares del sitio que pueden afectar estructuralmente a las instalaciones.



## PROYECTOS DE INVERSIÓN DE LA CNEA – ESTADO ACTUAL

Entre mediados de 2023 y 2024 se ejecutó parcialmente la segunda etapa del proyecto focalizado esencialmente en el Centro Atómico Constituyentes (CAC), con el objeto de instalar aproximadamente 100 kW de generación eléctrica FV. Se elaboraron las especificaciones técnicas, se realizó el llamado a licitación pública y se instalaron cuatro sistemas con una potencia FV total de 64,7 kW<sub>p</sub>. Los sistemas se encuentran operativos e inyectando energía eléctrica a la red interna. En el CAC se llevó a cabo la prolongación de una pérgola FV BIPV (*Building Integrated Photovoltaics*) existente de 4,6 kW AC ya mencionada en Eyras et al. (2016) y dos instalaciones sobre cubiertas planas ubicadas en los edificios 40 y 42, ambas con inversores de 25 kW AC, así como también una instalación FV de 25 kW AC en el Centro Atómico Ezeiza (CAE), ubicada en el Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson (IDB; UNSAM-CNEA).

Una segunda licitación, que hubiera permitido iniciar la instalación de otros 50 kW, fue declarada desierta debido a que todas las ofertas presentadas contenían algún error que no permitía su aprobación.

Como ejemplo de los resultados obtenidos, en la Figura 3 se muestra la generación mensual de una de las instalaciones, que corresponde al sistema de 20 kW<sub>p</sub> ubicado en el edificio 40 del CAC. El monitoreo de la energía generada fue realizado a partir de la adquisición de los datos provistos por el inversor de dicha instalación, mientras que la simulación fue realizada utilizando el programa PVSyst 6.88 (<https://www.pvsyst.com/>) a partir de datos de radiación solar global sobre plano horizontal registrados en el sitio. Asimismo, en la Tabla 1 se muestran la potencia FV instalada y la energía total generada en el CAC hasta el momento. El total, 208 MWh, equivale al consumo promedio anual de 43 hogares en Argentina.

Otro ejemplo de los resultados se observa en la Figura 4. Los datos de la energía mensual, correspondientes a la instalación de 50 kW del Edificio 42, fueron obtenidos a partir del sistema de monitoreo del inversor. Resulta particularmente interesante el tiempo de repago energético de solo 11 meses, que proviene de contabilizar la energía involucrada en la fabricación de cada componente de la instalación. La energía necesaria para el repago se estimó en 71 MWh; la metodología utilizada y el detalle del cálculo pueden encontrarse en González Bisciglia et al. (2023). La instalación alcanzó el repago durante el mes de septiembre de 2023.

Por otra parte, en la Figura 5 se resume el estado actual del proyecto focalizado en el CAC (total 400 kW AC), en términos porcentuales de la potencia instalada en los distintos emplazamientos.

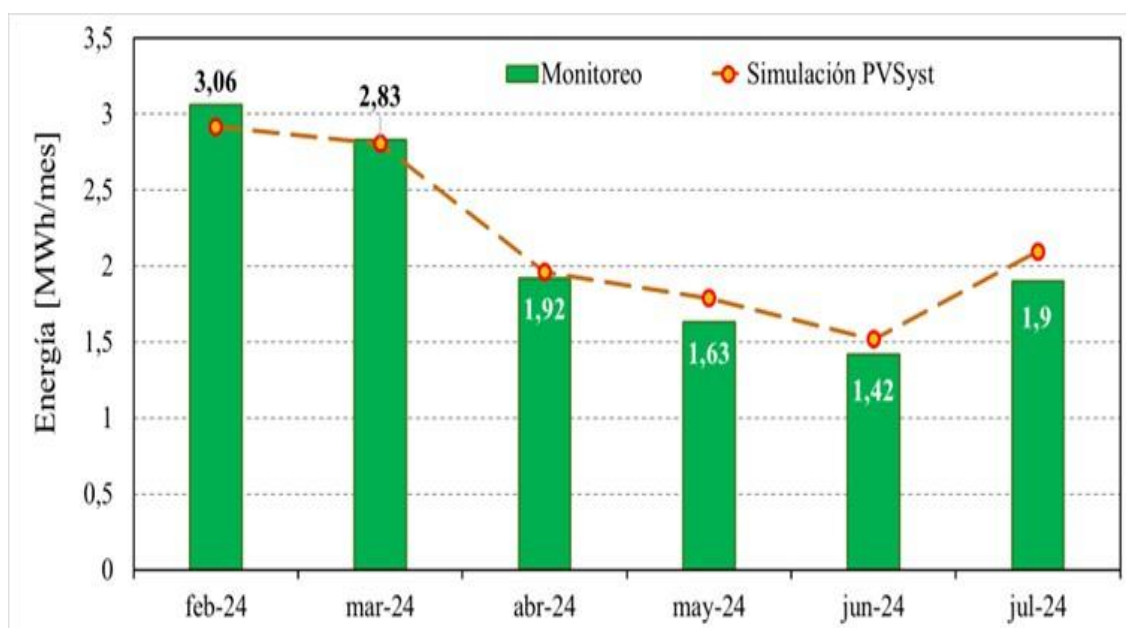


Figura 3: Generación mensual entre febrero y julio de 2024 del sistema ubicado en el edificio 40 del CAC. La línea punteada representa la energía obtenida por simulación mediante el programa PVSyst.



Tabla 1: Potencia FV instalada y energía inyectada en el CAC hasta agosto de 2024.

| Instalación            | Potencia FV [kW] | Puesta en marcha | Fecha última medición | Energía [MWh] |
|------------------------|------------------|------------------|-----------------------|---------------|
| Edificio 42 Pérgola    | 4,56             | 9/1/2024         | 9/8/2024              | 3,2           |
| Edificio 40 Usina      | 24,92            | 15/1/2024        | 9/8/2024              | 69            |
| Edificio 42 ampliación | 14,1             | 15/1/2024        | 9/8/2024              | 11            |
| Guardia                | 6,25             | 27/6/2022        | 9/8/2024              | 16,1          |
| Edificio 41            | 20,21            | 23/6/2022        | 9/8/2024              | 15            |
| Edificio 42 TANDAR     | 56,96            | 1/11/2022        | 17/12/2024            | 93,4          |
| <b>Total</b>           | <b>127</b>       |                  |                       | <b>208</b>    |

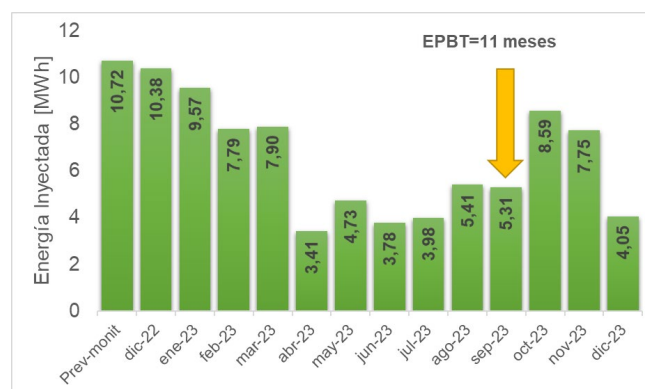


Figura 4: Generación mensual del sistema ubicado en el edificio 42 del CAC.

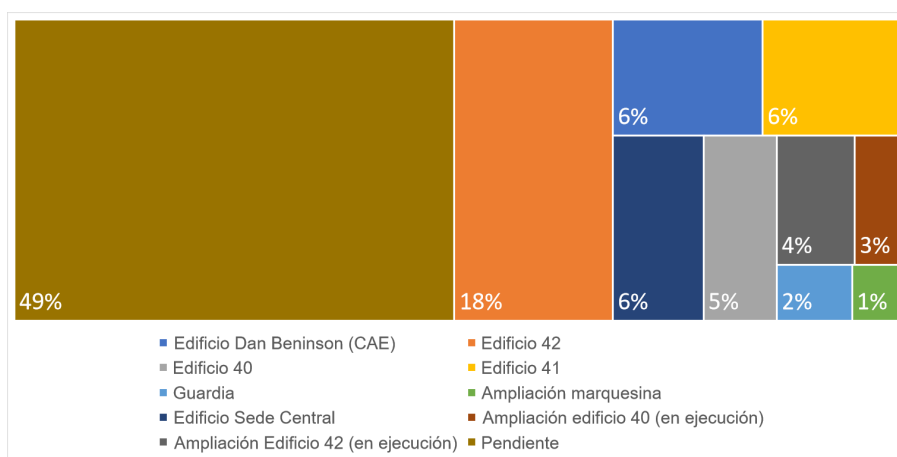


Figura 5: Estado actual del proyecto en potencia fotovoltaica instalada (en % de la potencia total prevista). Se encuentran instalados e inyectando energía a la red un total de 178 kW.

## DESCRIPCIÓN DE LAS NUEVAS INSTALACIONES

En el año 2023 se realizaron las siguientes instalaciones con las características que en cada caso se indican.

### Edificio 42 del CAC. Pérgola fotovoltaica

La pérgola FV (Figura 6) consta de 16 módulos FV de Si policristalino Amerisolar AS-6P30-285W de 285 W<sub>p</sub> (potencia FV total de 4,56 kW<sub>p</sub>), conectados a un inversor trifásico SMA Sunny Tripower de 3 kW.

La integración arquitectónica se plantea con el objetivo de completar en etapas posteriores la totalidad de la superficie descubierta del piso y como continuación de otra de similares características. Montada sobre tubos estructurales de sección circular, curvados, soldados al antepecho existente y fijados a la fachada mediante planchuelas de hierro, tornillos y tarugos plásticos. La protección anticorrosiva de los mismos se realizó mediante antióxido y esmalte sintético del tipo poliuretánico bicomponente.



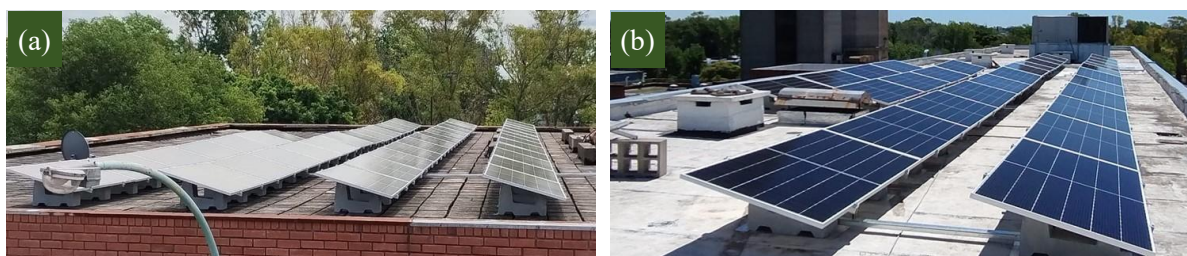
*Figura 6: Ampliación de instalación existente: Pérgola FV BIPV. Edificio N° 42 -Tandar-CAC.*

#### **Edificios 40 y 42 del CAC. 34 kW<sub>p</sub> sobre cubierta plana**

La instalación del edificio 40 (Figura 7a) consta de 43 módulos FV Jinkosolar JKM de 470 W<sub>p</sub> (potencia total de 20,2 kW<sub>p</sub>), conectados en 2 cadenas de 14 módulos y 1 cadena de 15 módulos, montados en posición apaisada con una inclinación de 20° con respecto a la horizontal, y un inversor trifásico SMA Sunny Tripower X 25 de 25 kW con 3 seguidores del punto de máxima potencia (MPPT).

El sistema FV sobre la cubierta plana del edificio 42 (Figura 7b) cuenta con 30 módulos FV Jinkosolar JKM de 470 W<sub>p</sub> (potencia total de 14,1 kW<sub>p</sub>), conectados en 2 cadenas de 15 módulos cada una, montados en posición apaisada con una inclinación de 20° con respecto a la horizontal, y un inversor trifásico SMA Sunny Tripower X 25 de 25 kW con 3 MPPT.

Ambas instalaciones fueron realizadas con estructuras simplemente apoyadas a las cubiertas existentes, mediante contrapesos o muertos de anclaje de hormigón H30 premoldeado que fueron transportados a las cubiertas mediante grúa.



*Figura 7: Instalaciones FV sobre cubiertas planas de los edificios 40 (a) y 42 (b), CAC.*

#### **Edificio del Instituto Dan Beninson del CAE. 26 kW<sub>p</sub> con integración arquitectónica en el frente**

El sistema FV instalado en el IDB está compuesto por 55 módulos FV Jinkosolar JKM de 470 W<sub>p</sub> cada uno (potencia FV total igual a 25,85 kW<sub>p</sub>), y un inversor SMA Sunny Tripower X 25 de 25 kW con 3 MPPT. 23 módulos están montados en el alero del edificio, en posición vertical, con una inclinación de 55° con respecto a la horizontal y conectados en 2 cadenas, una con 11 módulos y otra con 12 (ver Figura 8). Los 32 módulos restantes están ubicados sobre la cubierta, en posición apaisada, con una inclinación de 20°, y conectados en 2 cadenas de 16 módulos cada una.

Si bien la incorporación de módulos en la fachada de esta instalación no cumple con todas las características de una integración arquitectónica de la energía solar FV (o BIPV), al visibilizar parte del plano de captación genera mayor conciencia ambiental y difusión de las energías renovables que una instalación sobre cubierta. Asimismo, produce un significativo ahorro de materiales en estructuras de soporte al carecer de contrapesos, los cuales fueron reemplazados por fijaciones a los paramentos existentes de la fachada.



*Figura 8: Instalación fotovoltaica incorporada en fachada. Instituto Dan Benisnson, CAE.*

## ENSAYO DE MÓDULOS FV

En el último año se iniciaron actividades de caracterización de módulos con el fin de tener herramientas para evaluar la evolución de dichos módulos como componentes de los sistemas instalados. Esto cobró particular relevancia a partir de los daños ocasionados en una de las instalaciones debido a eventos meteorológicos extremos (ver sección DIFICULTADES ENCONTRADAS).

### *Caracterización eléctrica*

Se realizó un estudio comparativo de módulos comerciales de distintas procedencias mediante la medición de la característica eléctrica corriente-tensión ( $I-V$ ), con el módulo a temperatura ambiente ( $24 \pm 1^\circ\text{C}$ ), utilizando un simulador solar pulsado de gran área (*Large Area Pulsed Solar Simulator, LAPSS*) Alpha-Omega y una celda de silicio policristalino de referencia, Solar World, calibrada.

Se caracterizaron 5 módulos en total: tres Amerisolar, un Jinko y un Trina. Dos de los módulos Amerisolar están relacionados con la instalación de 50 kW mencionada, uno de ellos sufrió el desplazamiento de su posición en la estructura mecánica del arreglo, mientras que el restante no tenía uso previo y se utilizó como referencia. El tercer módulo Amerisolar, sin uso, corresponde a la ampliación de la pérgola FV. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 2. El subíndice M representa a los valores del punto de máxima potencia, CA a la condición de circuito abierto, CC a la de cortocircuito, y nom a los valores nominales dados por el fabricante en la hoja de datos.

Se observa que en todos los casos la medición de la corriente de cortocircuito y la potencia máxima son inferiores a los valores nominales. Si bien desde el punto de vista estadístico no es posible hacer una afirmación categórica, esto podría ser un indicio de que la calibración de la irradiancia no fue del todo correcta, posiblemente por haberse utilizado una celda de referencia Si policristalino, cuando los módulos medidos están basados en celdas de Si monocristalino, a excepción del Amerisolar 285W. No obstante, es posible comparar resultados en la medida que las condiciones experimentales fueron las mismas en todas las mediciones.

El módulo Amerisolar ‘dañado’ presenta valores de sus parámetros eléctricos sistemáticamente inferiores respecto del módulo utilizado como referencia. La potencia máxima resulta un 7 % inferior, y cabe destacar que este deterioro no está asociado principalmente a los valores correspondientes a circuito abierto y cortocircuito (solo se deteriora  $I_{CC}$  en un 1,8 %) sino al factor de forma  $FF$  (5 %), lo cual es consistente con la evidencia de roturas y fisuras de celdas observadas mediante inspección visual por electroluminiscencia (ver la próxima sección) que den lugar a un aumento de la resistencia serie y/o una disminución de la resistencia paralelo equivalentes.

Por otra parte, los módulos Amerisolar presentan disminuciones porcentuales de sus parámetros medidos respecto a sus valores nominales que resultan sistemáticamente superiores a los casos de Jinko y Trina presentados aquí. Esto lleva a sospechar, aunque nuevamente sin fundamento estadístico y como una de las posibilidades, de una particular selección de la cola inferior de la distribución estadística con respecto al valor medio de la producción por parte del proveedor o el fabricante.

Tabla 2. Parámetros eléctricos de los módulos medidos.

| Módulo            | Amerisolar 445W (dañado) | Amerisolar 445W (referencia) | Amerisolar 285W (pérgola) | Jinko 470W | Trina 455W |
|-------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------|------------|------------|
| $P_M$ (W)         | 376                      | 407                          | 249                       | 453        | 442        |
| $I_M$ (A)         | 9,4                      | 10,3                         | 8,2                       | 10         | 10,7       |
| $V_M$ (V)         | 40                       | 39,6                         | 30,2                      | 45,2       | 41,2       |
| $V_{CA}$ (V)      | 47,5                     | 47,5                         | 37,7                      | 52,5       | 48         |
| $I_{CC}$ (A)      | 10,5                     | 10,7                         | 8,7                       | 10,6       | 11,3       |
| $P_{M\ nom}$ (W)  | 445                      | 445                          | 285                       | 470        | 455        |
| $I_{M\ nom}$ (A)  | 10,7                     | 10,7                         | 9                         | 10,9       | 11,1       |
| $V_{M\ nom}$ (V)  | 41,6                     | 41,6                         | 31,7                      | 43,2       | 41,2       |
| $V_{CA\ nom}$ (V) | 50                       | 50                           | 38,7                      | 52,1       | 49,8       |
| $I_{CC\ nom}$ (A) | 11,2                     | 11,2                         | 9,42                      | 11,7       | 11,6       |

### Electroluminiscencia

Se tomaron imágenes por electroluminiscencia (EL) de dos módulos Amerisolar correspondientes a la instalación de 50 kW del Edificio 42, identificados anteriormente como ‘dañado’ y de ‘referencia’, con valores de corriente cercanos a la de cortocircuito ( $I_{CC}$ ) y al 10% de  $I_{CC}$ , de acuerdo con lo indicado en la norma IEC TS 60904-13 (IEC, 2018). A fin de obtener las condiciones experimentales requeridas, se utilizaron 2 fuentes de alimentación disponibles conectadas en serie.

De acuerdo con las interpretaciones de los patrones observados y teniendo en cuenta los lineamientos de la norma mencionada anteriormente, para el módulo dañado se encontraron:

- 1) 20 celdas con evidencia clara de fisuras múltiples y regiones de las celdas aisladas eléctricamente;
- 2) 6 celdas con posibles microfisuras;
- 3) celdas con posibles valores menores de vida media de portadores minoritarios (celdas más oscuras).

En la Figura 9 se muestran imágenes de EL correspondientes a los módulos dañado (a) y de referencia (b). Las situaciones recientemente mencionadas como 1) y 2) aparecen resaltadas con recuadros rojos y verdes, respectivamente. En el módulo de referencia solo aparecen celdas con posibles microfisuras.

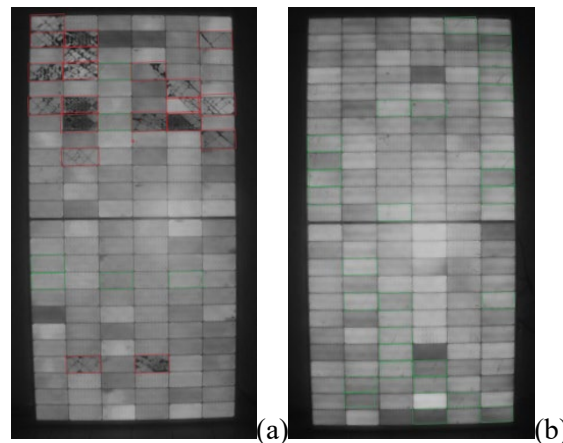


Figura 9: Imágenes de electroluminiscencia de dos módulos Amerisolar para corrientes cercanas a  $I_{CC}$ : a) Módulo dañado; b) Módulo de referencia. Las celdas con fisuras múltiples y regiones aisladas están recuadradas en rojo, y las celdas con posibles microfisuras están recuadradas en verde.

### EVALUACIÓN MECÁNICA ESTRUCTURAL

En las sucesivas licitaciones se requirió que el proveedor presentara la memoria de cálculo, avalada por profesional matriculado, que demostrara que las estructuras y fijaciones de los paneles FV utilizadas cumplieran con el “Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones” (CIRSOC, 2005). Se esperaba que dicha exigencia fuera suficiente, pero se han detectado errores en la selección de la estructura y los contrapesos por parte del proveedor, en especial para la instalación de 50 kW del Edificio 42, que ameritan las siguientes observaciones.

- Tal como fuera mencionado en Marighetti et al. (2022), se recomienda encuadrar el sistema como “cubiertas aisladas de vertiente única” (del reglamento CIRSOC 102-2005) y no, por ejemplo, como “cubiertas de vertiente única de edificios abiertos”. El encuadre recomendado facilita la estimación del apantallamiento mediante la tabla “factores de reducción para cubiertas aisladas múltiples”.
- Se recomienda la fijación del lado largo de los paneles solares comerciales actuales, de más de 2 metros de longitud, y no del lado corto por los siguientes motivos: i) la carga mecánica admisible se reduce considerablemente. En el manual de instalación de paneles FV de Jinko, por ejemplo, se admite en el caso de fijación del lado largo, 3600 Pa de carga positiva y 1600 Pa de carga negativa, pasando, en el caso de fijación por el lado corto, a tan sólo 1067 Pa de carga positiva y negativa; ii) la flexión por el peso propio es apreciable a simple vista, incrementada por la dilatación térmica en días calurosos, cuando los paneles pueden llegar a temperaturas superiores a 70 °C; iii) posibilidad de falla del sistema de fijación por reducción de la distancia (luz) entre apoyos o momentos debidos a la carga del viento. Relacionado con este punto se presume, dada la ausencia del cálculo de flechas, tensiones, momentos y reducciones de luz en las memorias de cálculo recibidas, que la teoría de flexión de tercer orden (grandes deformaciones) no es de uso habitual en instaladores de sistemas FV, motivo por el cual se ha comenzado a desarrollar un cálculo simplificado y aproximado de las variables mencionadas, a fin de poder tomar noción de las magnitudes intervinientes.
- Dada la falta de estudios de oscilaciones o resonancias por parte de los contratistas hemos verificado, mediante estudios propios luego de la instalación, la ausencia de riesgo en cuanto a vibraciones originadas por desprendimiento de vórtices o por turbulencias de este sistema de fijación particular de paneles, con sus medidas, frecuencias naturales y ángulos específicos.
- Evitar, en la medida de lo posible, sistemas de fijación que presenten efecto dominó o cascada ante la falla de una fijación.
- En el caso del uso de contrapesos, el coeficiente de rozamiento estático puede variar considerablemente implicando sobre o sub-dimensionamientos. Se recomienda verificar *in situ*, sobre la superficie de la instalación y con los soportes a utilizar, mediante un dinamómetro.
- No olvidar considerar efectos topográficos (punto 5.7. del reglamento CIRSOC 102-2005), es decir, el incremento de la velocidad del viento provocado por los mismos, pero no sólo sobre “lomas, escarpas y colinas”, sino también en cercanía de torres o acanalamientos del viento.

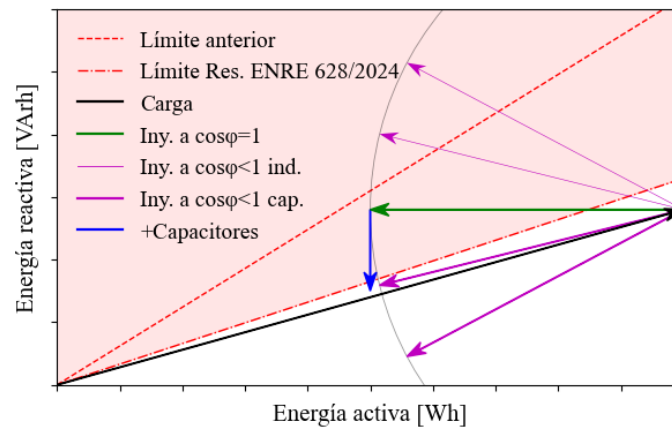
Las observaciones detalladas servirán como insumo para la elaboración de futuras descripciones técnicas de estructuras mecánicas en sistemas FV. Además, la arquitectura particular del CAC, en relación con la torre del acelerador y sus terraplenes, establece condiciones de diseño que podrían ser relevantes para la bibliografía existente y futura. Esto es especialmente pertinente debido al aumento de las velocidades del viento en las grandes ciudades.

## IMPACTO SOBRE EL FACTOR DE POTENCIA

Si bien la potencia FV total instalada hasta la fecha tanto en el CAC como en el CAE es relativamente pequeña y de escaso impacto en el factor de potencia (FP), es necesario tener presente que muy pronto, y más aún con la entrada en vigencia de la Resolución ENRE 628/2024, deberán tomarse medidas para no incurrir en penalizaciones por bajo FP. Usualmente se considera simplificada al  $\cos \varphi$  igual al FP (resoluciones del ENRE inclusive, y también en el presente trabajo) aunque, en rigor, el cálculo del FP incluye, además del  $\cos \varphi$ , la distorsión armónica total (*THD*, por sus siglas en inglés), resultando ser  $FP \leq \cos \varphi$ . En la Figura 10 puede observarse cómo la inyección de energía mediante inversores FV de conexión a red (*on-grid*) puede conducir a: (i) ingresar en la zona de penalización, identificada en el gráfico en color rojo, si se configura el inversor con  $\cos \varphi = 1$ ; o, por el contrario, (ii) contribuir a corregir la Potencia Reactiva Inductiva, si el inversor inyecta energía a la red con  $\cos \varphi < 1$  capacitivo, reduciendo el  $\cos \varphi$  y aportando al uso eficiente y racional de la energía eléctrica del lado de la demanda.

En la Resolución ENRE 628/2024 se incrementa la exigencia a los usuarios en cuanto a la calidad de sus cargas, pasando la zona penalizable de  $\cos \varphi_{\text{inductivo}} < 0,85$  a  $\cos \varphi_{\text{inductivo}} < 0,95$ . Esto equivale a pasar de un ángulo  $\varphi > 31,8^\circ$  a un ángulo  $\varphi > 18,2^\circ$ . Cabe aclarar que el límite de  $\cos \varphi_{\text{inductivo}}$  puede diferir de un posible futuro límite de  $\cos \varphi_{\text{capacitivo}}$ , como es el caso de España, para evitar la sobrecompensación mediante bancos de capacitores fijos.





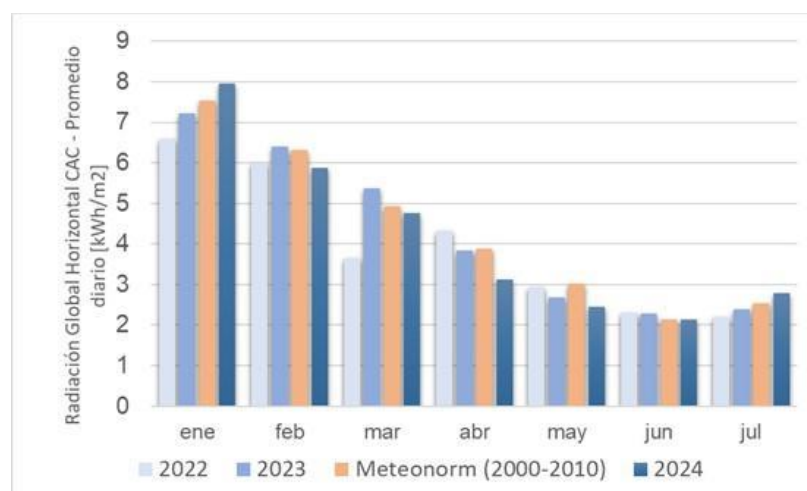
**Figura 10:** Representación esquemática de un  $\cos \phi$  medio, indicándose en rojo los límites y la zona de penalización, en verde la energía inyectada por un inversor de conexión a red con  $\cos \phi = 1$ , en violeta si fuera inyectada a  $\cos \phi < 1$  inductivo o capacitivo, y en azul una posible compensación parcial de energía reactiva inductiva mediante un banco de capacitores.

Básicamente, la energía reactiva puede reducirse migrando a cargas más eficientes (de mayor  $\cos \phi$ ) o compensarse mediante: i) bancos de capacitores distribuidos en las cargas, automáticos (variables en forma escalonada de acuerdo con la carga) o fijos (calculados de acuerdo con la carga basal), o ii) programando el inversor para que inyecte a un  $\cos \phi$  capacitivo fijo o a uno variable de acuerdo con una lógica programable para compensar la energía reactiva a demanda. Cabe remarcar que inyectando a  $\cos \phi \neq 1$  se estaría desaprovechando parte de la energía generada por los sistemas FV.

El análisis de la corrección del factor de potencia debería realizarse teniendo en cuenta todos los períodos de facturación de un año, dado que tanto la generación como la impedancia de la carga pueden variar considerablemente a lo largo del mismo.

## CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO SOLAR

En el marco del estudio del rendimiento de sistemas FV se registran en el CAC diferentes variables ambientales. Las variables más importantes corresponden a la radiación solar. El Departamento Energía Solar (DES) cuenta con un conjunto de radiómetros FV y piranométricos calibrados que permiten registrar la radiación global horizontal y la radiación incidente en planos con orientaciones e inclinaciones variables. Estos registros posibilitan evaluar el rendimiento de las instalaciones con datos del sitio y comparar con registros históricos (Figura 11) o satelitales. Además, se adquirió recientemente un espectrorradiómetro que permitirá caracterizar la radiación solar teniendo en cuenta el espectro y evaluar su influencia en el rendimiento de celdas FV de silicio.



**Figura 11:** Comparación entre los promedios diarios mensuales registrados en el CAC y los datos históricos de Meteonorm(R)(Remund et al, 2003).



## DIFICULTADES ENCONTRADAS

### ***Eventos climáticos extremos. Sistema del Edificio 42 (etapa 1; 50 kW) del CAC***

Sobre fines de 2023 se presentaron en la zona del CAC (municipio de General San Martín, Provincia de Buenos Aires) algunas tormentas particularmente violentas. Se destacaron dos de ellas, ya que tuvieron consecuencias sobre la integridad de una de las instalaciones del Edificio 42. La primera, ocurrida el 30 de octubre ocasionó algunos daños, concretamente el desplazamiento de algunos contrapesos y el desprendimiento de uno de los módulos FV, el cual fue caracterizado tal como se informa precedentemente en este mismo artículo. La segunda tormenta, de mucha mayor intensidad, ocurrió el 17 de diciembre y ocasionó daños generalizados en la misma instalación, la cual debió salir de servicio.

Cabe destacar que el sector comprometido es la denominada ala oeste del sistema, ubicada en el nivel +8 m del edificio, mientras que el ala este, ubicada en el nivel +12 m, básicamente no sufrió daños, así como tampoco la instalación ubicada sobre el Edificio 41, realizada en la misma etapa. La hipótesis que explicaría esta situación es la existencia de una influencia importante en la velocidad del viento de la topografía del sitio de emplazamiento de los módulos, el cual circunda la torre del acelerador de iones pesados TANDAR. A fin de verificar esta hipótesis, se está colaborando con el Grupo AeroMat de la Gerencia Materiales de la CNEA para hacer un relevamiento de la velocidad del viento en este sitio y compararla con la registrada en una estación meteorológica operada por el DES que se encuentra a aproximadamente 40 m del lugar, en principio no afectada por la cercanía de la torre del acelerador.

### ***Falla en el inversor en el sistema del IDB***

El día 20/3/2024 el seguidor C del inversor del sistema ubicado en el Instituto Dan Beninson del CAE empezó a registrar corriente nula, y en consecuencia la generación del sistema disminuyó sensiblemente. Dicho seguidor es el que controlaba el paralelo de dos cadenas de 16 módulos cada una. La inspección del estado de la instalación en el sitio reveló que no había problemas en el cableado y que las cadenas de módulos en apariencia estaban en condiciones normales, mientras que mediciones de resistencia con el inversor apagado y el circuito de corriente continua desconectado mostraron diferencias entre los distintos seguidores: mientras que el A y el B estaban en circuito abierto, el C presentaba una baja resistencia, virtualmente un cortocircuito. Se ejecutó la garantía del proveedor, reemplazó el equipo, y la instalación volvió a funcionar normalmente desde el día 30 de julio de 2024.

### ***Problemas presupuestarios***

Los proyectos BAPIN en ejecución corresponden a dos actividades presupuestarias de la CNEA. El proyecto centrado (no excluyentemente) en el CAC ha recibido un flujo de recursos razonable desde 2022, en cambio el centrado en el CAE ha tenido un presupuesto nulo desde su creación.

### ***Problemas de conectividad***

Todas las instalaciones de los proyectos cuentan con un monitoreo que permite configurar, controlar y realizar tareas de seguimiento de los equipos. El monitoreo se encuentra incorporado en los inversores que pueden ser accedidos de manera local a través de *ethernet* o *wifi* y, además, si la red local lo permite, se conectan a una plataforma de monitoreo cuyo acceso se realiza mediante un portal en internet. En la mayoría de los edificios del CAC la red de datos no cuenta con equipos actualizados que permitan el acceso remoto, tanto dentro del CAC como desde el exterior (internet). Se espera que las mejoras que se está llevando adelante la Gerencia Tecnología de la Información y de las Comunicaciones en las redes de datos del CAC faciliten el funcionamiento del sistema de monitoreo.

## INVESTIGACIONES COMPLEMENTARIAS

Como se ha puntualizado en la introducción del presente trabajo, fueron previstas otras actividades de investigación para cumplimentar ambos proyectos de inversión BAPIN. Se enumeran a continuación algunas de ellas, que fueron detalladas en Durán et al. (2023).

- Beneficios bioclimáticos de instalaciones fotovoltaicas BIPV (integradas a la arquitectura).
- Rendimiento de sistemas fotovoltaicos: factores ambientales que afectan la producción eléctrica; acumulación de polvo.

- Estudio de la degradación de potencia.
- Caracterización del recurso solar.

## CONCLUSIONES

Los proyectos BAPIN que son objeto de este artículo aportan al cumplimiento de las leyes nacionales de promoción de la generación de energía a partir de fuentes renovables, contribuyen a los compromisos ambientales asumidos por el país, favorecen la adopción de la tecnología solar FV en aplicaciones urbanas, y asumen la responsabilidad institucional de la CNEA como gran consumidor de energía eléctrica.

Las actividades realizadas durante el último año dieron lugar a un avance significativo del proyecto focalizado en el Centro Atómico Constituyentes, alcanzándose una potencia FV instalada cercana al 50 % de la total prevista, cubriendo diversos temas: evaluación de sitios, instalación y simulación numérica de sistemas FV, cuantificación de la energía generada, implementación de técnicas de caracterización de componentes, evaluación de estructuras mecánicas de soporte, y estimación del recurso solar. Se enumeran a continuación las principales conclusiones.

- El seguimiento del funcionamiento de las instalaciones mediante monitoreo remoto y el uso de alarmas permiten detectar fallas precozmente. Asimismo, el buen acuerdo entre las mediciones y las simulaciones realizadas con el programa PVSyst, contribuyen también a realizar dicho seguimiento.
- La evaluación del recurso solar y la medición de las variables meteorológicas *in-situ* resultan de gran utilidad para la evaluación de la eficiencia de los sistemas FV.
- El diseño de las estructuras y, muy especialmente, la forma de fijación a las cubiertas son temas críticos a los cuales no se les da, habitualmente, la suficiente relevancia. La utilización de sistemas de montaje inapropiados puede conducir a situaciones problemáticas durante eventos climáticos extremos como los presentados en este artículo. En particular, las memorias de cálculo que avalen el sistema de montaje deben contemplar la topografía del sitio de emplazamiento y su posible influencia sobre la velocidad del viento en la cercanía de las construcciones.
- Resulta necesario contar con equipamiento apropiado para realizar la medición de las características corriente-tensión (I-V) y la inspección mediante electroluminiscencia de los módulos FV, para realizar un seguimiento del funcionamiento y estado de estos, en especial luego de eventos climáticos extremos. La detección de apartamientos de las características eléctricas de los módulos FV con respecto a los valores informados por el fabricante requiere medir la curva I-V bajo norma y disponer de un dispositivo FV, de la misma tecnología que los módulos a medir, calibrado. La experiencia previa muestra que es prácticamente imposible conseguir estas celdas o módulos de referencia en el país, motivo por el cual es necesario poner a punto el procedimiento de calibración correspondiente.

Se espera que en el futuro cercano exista continuidad en la ejecución de estos proyectos, de manera que aumenten su aporte a la diversificación de la matriz energética y a la mitigación de la emisión de gases de efecto invernadero, y que a su vez sirva como modelo para su réplica en otros edificios públicos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración y aportes de Hernán Xargay, Sebastián Muñoz, Javier Fernández Vázquez, Marcelo Ramírez, José María Olima, Carlos Rinaldi, Laura González y Hernán Socolovsky en la realización del presente trabajo.

## REFERENCIAS

- CAMMESA (2024). Informe Anual 2023. Mercado Eléctrico Mayorista. Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico.  
Dirección URL: <https://cammesaweb.cammesa.com/informe-anual/>
- CIRSOC (2005). CIRSOC 102-2005. Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones. Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles.

- Durán J.C., Eyraş I., Godfrin E.M., Krautner A., Martínez Bogado M., Plá J., Raggio D., Videla M. (2023). Avances en proyectos de generación fotovoltaica distribuida en la CNEA: un aporte al cumplimiento de las leyes 27.191 y 27.424. Acta de la XLV Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente 10, 134-143.
- Eyraş I.H., Durán J.C., Parisi F., Eyraş R., Álvarez M. (2016). Proyecto IRESUD: Primeros ejemplos de Energía Solar Fotovoltaica Integrada a la Arquitectura (BIPV) en el país. Actas de la XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente 4, 13.01-13.10. Dirección URL: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/67089>  
<https://www.mendoza-conicet.gob.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2016/2016-t013-a001.pdf>
- Gonzalez Bisciglia L., Videla M.E., Pedace R. (2023). Tiempo de retorno energético de un sistema fotovoltaico de generación distribuida en Argentina. Energías Renovables y Medio Ambiente 52, 16-24.
- Haegel N.M. et al. (2023). Photovoltaics at multi-terawatt scale: Waiting is not an option. Science 380, 6640, 39-42. Dirección URL: <https://doi.org/10.1126/science.adf6957>
- IEC (2018). Norma IEC TS 60904-13:2018. Photovoltaic devices - Part 13: Electroluminescence of photovoltaic modules. International Electrotechnical Commission.
- Jäger-Waldau A. (2024). Snapshot of photovoltaics - February 2024. EPJ Photovoltaics 15, 21. Dirección URL: <https://doi.org/10.1051/epjpv/2024018>
- Marighetti J.O., De Bortoli M.E., Wittwer A.R. y Loredó Souza A.M. (2022). Cargas de Viento sobre Módulos Fotovoltaicos: Evaluación Experimental. JAIE 2022, Rosario.
- Remund J., Kunz S., METEOTEST & of Energy, M. S. F. O. (2003). METEONORM - Global Meteorological Database for Engineers, Planners and Education.
- REN21 (2013). Renewables 2013 Global Status Report, editado por REN21, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, ISBN 978-3-9815934-0-2. Dirección URL: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2013\\_Full-Report\\_English.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2013_Full-Report_English.pdf)
- REN21 (2024). Renewables 2024 Global Status Report, Energy Supply. Editado por REN21, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, ISBN 978-3-948393-15-1. Dirección URL: [https://www.ren21.net/gsr2024\\_SUPPLY\\_report/](https://www.ren21.net/gsr2024_SUPPLY_report/)
- Videla M., Krautner A., Eyraş I., Durán J.C., Plá J. (2023). Estado actual del desarrollo de la generación fotovoltaica distribuida en Argentina. Ciencia e Investigación, Tomo 73, Nº 1, 54-71. Dirección URL: <https://aargentinapciencias.org/publicaciones/revista-cei-3/>

## ADVANCES IN INVESTMENT PROJECTS FOR DISTRIBUTED ELECTRICAL GENERATION WITH PHOTOVOLTAIC SYSTEMS AT CNEA

**ABSTRACT:** The investment projects in photovoltaic generation systems currently underway at the National Atomic Energy Commission's (CNEA) Constituyentes and Ezeiza Atomic Centers contribute to complying with the provisions of National Laws 27.191/15, aimed at promoting the use of renewable sources, and 27.424/17, which establishes the conditions for the injection of energy in distributed generation. Among the main objectives of these projects is the installation of photovoltaic systems with a total power of approximately 1,100 kW, connected to the low-voltage electrical network that supplies public buildings belonging to the CNEA. With this installed capacity, it is expected to supply around 8% of the annual consumption of electricity. This paper presents the progress in terms of installed capacity, which totals approximately 178 kW of photovoltaic power, as well as the research activities carried out in the last year. The difficulties encountered during the execution are also reported. The investment projects presented here represent an institutional contribution of the public sector to the country's energy transition, collaborating with the diversification of its electrical matrix, while reducing its emissions.

**Keywords:** Photovoltaic solar energy, distributed generation, energy transition, institutional environmental responsibility.

## **ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DEL SUELO CON UN SERPENTÍN NO CONVENCIONAL EN SAN LUIS, ARGENTINA**

**Valentín Stefanini, Daniel Nazario, Ronio Guaycochea, Daniel Arellano**

<sup>1</sup>Universidad Nacional de San Luis – PROIPRO 15-1423 – Título: Sistemas de climatización a partir de la geotermia, utilizando el subsuelo como fuente de energía renovable para economizar otras energías sin contaminación. – Ruta Nac. 148 Extremo Norte C.P. 5730 Villa Mercedes – San Luis.  
Tel. +54 9 2664 66-7741 +54 9 2657 52-1229 e-mail: stefanini824@gmail.com, elmundial@hotmail.com.

**RESUMEN:** Este estudio presenta los resultados de un Test de Respuestas Térmicas “in situ”, en el cual se determinaron los valores de la conductividad térmica efectiva del subsuelo  $\lambda_{\text{eff}}$ , y la resistencia térmica de pozo  $R_b$ , para un intercambiador geotérmico no convencional de calor. Estos ensayos “in situ” se basan en el modelo de la fuente de línea infinita (ILS), de transferencia de calor por conducción térmica de kelvin. Los valores se obtuvieron por el método gráfico de la pendiente. Conociendo estos valores se desarrollan sistemas geotérmicos de baja entalpía, los que producen un gran ahorro en la energía secundaria para la climatización de edificios, porque utilizan el suelo como un gran acumulador de energía, disponible las 24 horas de los 365 días del año y en cualquier lugar de nuestro planeta tierra.

**Palabras clave:** TRT, intercambiador geotérmico, método pendiente, eficiencia.

### **INTRODUCCIÓN**

El objetivo de este ensayo de respuesta térmica fue determinar las características de subsuelo para un intercambiador no convencional, instalado durante la etapa de construcción de la piscina. Esto permitirá evaluar la eficiencia energética de estos sistemas geotérmicos de baja entalpía para climatización. Este ensayo es el tercero realizado en San Luis Argentina y el primero para este intercambiador no convencional. El intercambiador fue construido de forma perimetral a las paredes que limitan la piscina, la cual está enterrada.

Las bombas de calor geotérmicas (GSHPs) (ground source heat pumps) son sistemas eficientes para la climatización de edificios, ampliamente usados en Europa y EE.UU. Estos consisten en acoplar una unidad de bomba de calor con un grupo de intercambiadores de calor de pozo (BHEs) (borehole heat exchangers). Las mejoras en estos equipos se centran en su optimización y en la reducción de los costos de instalación. Dado que estos costos pueden ser elevados, es necesario realizar cálculos y simulaciones para optimizar el sistema antes de su construcción. (ASME Digital Collection)(OSTI)

Para ello, se deben conocer dos parámetros que afectan la eficiencia del depósito de calor, los cuales se deben determinar entre el fluido portador de calor y la pared del pozo, ellos son: La conductividad térmica efectiva del subsuelo  $\lambda_{\text{eff}}$ , y la resistencia térmica de subsuelo  $R_b$ .

Estos valores se determinaron mediante un Test de Respuesta Térmica (TRT) in situ. Este procedimiento implica hacer circular un fluido portador de calor a través de un intercambiador de calor geotérmico, por 72 horas, registrando las temperaturas de entrada y salida del mismo.

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a un tercer Test de Respuesta Térmica (TRT) realizado en San Luis, Argentina. En este ensayo, el intercambiador geotérmico construido presenta diferencias significativas tanto con los intercambiadores convencionales como con el intercambiador horizontal utilizado previamente en San Luis.

### ***Intercambiador Horizontal Particular***

- El primer test de respuesta térmica de suelo “in situ” se realizó en la ciudad de San Luis, a finales de marzo y comienzos de abril de 2012. (Acta de la XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 4, pp. 06.139-06.150, 2016. Impreso en la Argentina. ISBN 978-987-29873-0-5 AJUSTE LINEAL DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE RESPUESTA TÉRMICA DE SUELO DEL SERPENTIN HORIZONTAL - SAN LUIS – ARGENTINA. Stefanini, J. Leporati, R. Guaycochea, D. Nazario)
- El segundo test de respuesta térmica de suelo “in situ” se llevó a cabo en San Luis, en abril de 2013. Este trabajo fue presentado virtualmente en el Congreso Mundial de Geotermia 2020+1 (WGC 2021+1) en Reikiavik, Islandia. (Proceedings World Geothermal Congress 2020+1 Reykjavik, Iceland, April - October 2021 1 Geothermal Country Update of Argentina: 2015-2020)

### ***Intercambiador No Convencional***

- El tercer test de respuesta térmica de suelo “in situ” se realizó en San Luis, en mayo de 2022. (Averma volumen 26 noviembre 2022 tema 4 – energía eólica, geotérmica, mareomotriz, hidráulica, biomasa y biogás el rol del análisis factorial en la evaluación de ensayos de 127 respuesta térmica de suelo - serpentín vertical / horizontal cyprus / Corrientes / San Luis.)

## **MODELO MATEMÁTICO**

El test de respuesta térmica de suelo se realiza en un pozo individual con una tasa de inyección de calor constante, basado en un modelo teórico que no considera la influencia de pozos cercanos ni las variaciones en la tasa de inyección de calor. Se denomina gradiente geotérmico al aumento de temperatura del suelo con el aumento de profundidad. El campo de temperatura bajo la superficie del suelo se considera estacionario cuando el gradiente geotérmico no varía con el tiempo ni con los cambios estacionales de temperatura en la superficie. Esta estabilidad térmica se alcanza a una profundidad de 10 a 15 metros. (<https://geothermal-energy-journal.springeropen.com/articles/10.1186/2195-9706-1-3>)

Al inyectar calor en un pozo de sondeo, el campo de temperatura comienza a variar. Cuanto más calor se inyecta, más caliente se vuelve el suelo, desplazando la temperatura del suelo no perturbado a una distancia mayor del pozo.

Si el calor inyectado es constante, el campo de temperatura se volverá nuevamente estacionario, pero esto tomará al menos de 20 a 25 años. (Numerical Study on the Long-Term Thermal Performance and Ground Temperature Variation of Energy Pile in Multi-layered Soil)

Al inyectar calor en el suelo, se genera un proceso térmico que se puede dividir en tres partes:

**Proceso Transitorio:** Se registra un aumento de la temperatura del suelo, seguido de una estabilización gradual.

**Proceso Estacionario:** No se registra un aumento adicional de la temperatura del suelo. En este punto, la velocidad de transferencia de calor del suelo al medio ambiente se iguala a la velocidad de inyección de calor en el suelo.

**Un Pulso:** Se produce una variación en el calor de inyección que se superpone al proceso estacionario.

El pulso no conduce a un estado estacionario ya que es limitado en el tiempo y se superpone a la temperatura estacionaria media ( $T_r$ ). En cambio, en un proceso transitorio, el aumento de temperatura se superpone a la temperatura del suelo no perturbado ( $T_{sur}$ ). Esta diferencia distingue al pulso del proceso transitorio.

La ecuación fundamental de conducción del calor (Ec. 1) muestra que la variación de la temperatura depende de la difusividad ( $\alpha$ ).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Entonces, la temperatura (T) en un punto de coordenadas (X, Y, Z) está determinada por el tiempo (t) y la difusividad térmica ( $\alpha$ ).

La difusividad ( $\alpha$ ), dada en [m<sup>2</sup>/s], depende de las propiedades del material y nos indica si el material es un buen o mal conductor térmico. A mayor valor del parámetro ( $\alpha$ ), mejor es la conductividad térmica del material. La difusividad se expresa como ( $\alpha = \lambda / C$ ), donde ( $\lambda$ ) es el coeficiente de conductividad térmica del medio, dado en [W/m K], y (C) es la capacidad volumétrica de calor del medio, dada en [J/m<sup>3</sup> K].

En condiciones estacionarias, la capacidad calorífica y la derivada temporal pierden importancia. Por lo tanto, la ecuación de conducción de calor se puede representar mediante la ecuación de Laplace (Ec. 2).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

### **CALCULO DE LA TEMPERATURA REAL EN LA PARED DEL POZO**

Durante el proceso transitorio tenemos (Ec. 3):

$$T_r(t) = T_{sur} + T_{rq}(t) \quad (3)$$

Durante el proceso de un pulso (Ec. 4):

$$T_r(t) = T_{sur} + T_{rq}(t) \quad (4)$$

Donde:

$T_r(t)$ : temperatura en el tiempo (t).

$T_r$ : temperatura estacionaria originada por la temperatura media del fluido inyectado.

$T_{sur}$ : temperatura de suelo no perturbado.

$T_{rq}(t)$ : cambio de temperatura debido a la desviación de la temperatura media del fluido.

Para el modelo matemático del test de respuesta térmica, se considerará únicamente el proceso transitorio, ya que la superposición del pulso no es relevante.

Se necesita establecer una relación entre la temperatura del suelo no perturbado,  $T_{sur}$ , y la temperatura del fluido portador de calor  $T_f$ .

Entonces, parece una resistencia térmica que la denominamos  $R_b$  [K (W / m)], y es la resistencia entre el fluido portador de calor y la pared del pozo.

Definimos entonces la resistencia térmica para una inyección de calor (Ec. 5) como:

$$T_r - T_{sur} = R_b \cdot q \quad (5)$$

Cuando se inyecta calor al suelo, comienza un proceso transitorio. Por lo tanto, se debe establecer una relación entre la temperatura de suelo no perturbado  $T_{sur}$  y la temperatura del fluido portador de calor  $T_f$ , considerando el criterio del tiempo.

Esta relación está dada por (Ec. 6):



$$T_f = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \left( \ln\left(\frac{4at}{r_0^2}\right) - \gamma \right) + \frac{QR_b}{H} + T_{sur} \quad (6)$$

Con el criterio del tiempo:  $t \geq \frac{5r_0^2}{\alpha}$

Después de un cierto tiempo:  $t_b = \frac{\gamma H^2}{16\alpha}$  [s] de varias décadas, el proceso transitorio culmina y da comienzo a un proceso estacionario, el cual esta descrito por la siguiente ecuación (Ec. 7):

$$T_f - T_{sur} = \frac{Q}{H} \left[ \frac{1}{2\pi\lambda} \ln\left(\frac{H}{2r_0}\right) + R_b \right] \quad (7)$$

Dónde:

$T_{sur}$ : Temperatura de suelo no perturbado (°C)

$T_f$ : Temperatura del fluido portador de calor (°C)

$Q$ : Potencia inyectada (W)

$H$ : Profundidad eficaz del pozo (m)

$q=Q/H$ : Potencia inyectada por metro de tubo (W/m)

$\lambda$ : Conductividad térmica del medio (W/m K)

$\gamma$ : 0,5772 (Const. de Euler)

$r_0$ : Radio del pozo (m)

$\alpha$ : Difusividad térmica (m<sup>2</sup>/s)

$R_b$ : Resistencia térmica entre el fluido portador de calor y la pared del pozo [K (W / m)]

$t$ : Tiempo (s)

$t_b$ : Intervalo de tiempo (s)

## DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

### **Construcción:**

Durante la construcción de una piscina enterada de 4,5 metros de largo, 2,3 metros de ancho y 1,5 metros de profundidad, se llevó a cabo la instalación de un segundo intercambiador geotérmico. El tendido del intercambiador se realizó en el perímetro exterior de la piscina, comenzando desde el nivel del piso y ascendiendo hasta la superficie en un total de seis vueltas alrededor de la misma, con una separación de 10 centímetros entre cada vuelta. Este serpentín fue construido utilizando caños de PEBD de ¾" tipo K6, adecuados para la conducción de agua. (Figura 1)

El intercambiador quedó instalado de manera perimetral alrededor de la piscina, enterrado en un suelo macizo. La primera vuelta se ubicó a una profundidad de 89 centímetros desde la superficie exterior del terreno, mientras que la última vuelta coincidió con la profundidad total de la piscina.

Posteriormente, se construyó un tanque de expansión, el cual fue debidamente aislado térmicamente. Además, se instaló una bomba de circulación junto con los instrumentos de medición, un datalogger y una computadora para el monitoreo del sistema. (Figura 2)

La adquisición del datalogger fue crucial para el desarrollo de los TRT "in situ", ya que permitió la recopilación precisa de los datos de temperatura. Esta unidad cuenta con ocho entradas, que pueden utilizar dos tipos de sensores: uno exclusivamente de temperatura mientras que el otro sensor de humedad y temperatura. En este estudio, se dispusieron de dos sensores de humedad y temperatura, y cinco sensores solo de temperatura. La recopilación de datos se realizó en intervalos de entre 3 y 5 segundos, procesándose aproximadamente 60300 datos por columna.



Figura 1: Imágenes de construcción de la piscina, datalogger y sensores de temperatura

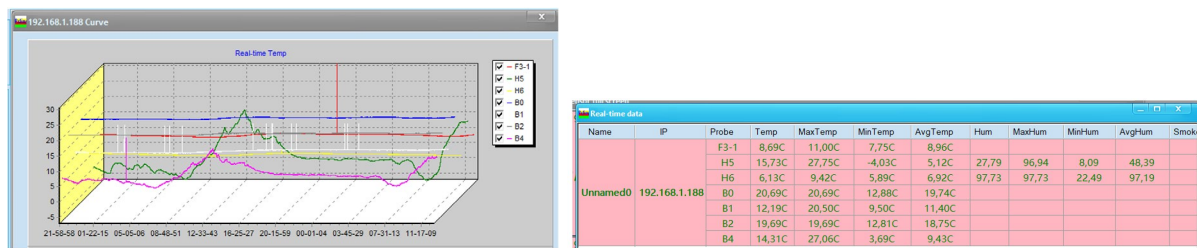


Figura 2: Pantalla de la devolución del datalogger y registro de sus sensores.

### Realización del ensayo:

Para la realización del ensayo, se vertieron 100 litros de agua en el tanque de expansión. La perturbación térmica se generó mediante una resistencia eléctrica sumergida en el agua del tanque, la cual fue conectada de manera adecuada para asegurar un calentamiento controlado. La potencia eléctrica utilizada se determinó mediante mediciones precisas de corriente y tensión. (Figura 3)

El caudal del sistema fue medido utilizando un caudalímetro mecánico, asegurando la precisión en la evaluación del flujo de agua.

### Cálculo del número de Reynolds:

El Test de Respuesta Térmica (Ec. 8) se llevó a cabo con un flujo turbulento, caracterizado por un número de Reynolds mayor a 3200 ( $Re > 3200$ ).

El Test de Respuesta Térmica se realizó con un flujo turbulento, ( $Re > 3200$ ).

$$Re = \frac{4 \cdot c}{\pi \cdot \nu \cdot D} \Rightarrow Re = \frac{4 \cdot 0,00047}{\pi \cdot 0,804 \times 10^{-6} \cdot 0,018} = 41.350,27 > 3200 \text{ Turbulento.} \quad (8)$$

Dónde:

c: Caudal = 0,00047 (m<sup>3</sup>/seg)

T: Temperatura = 30 °C

$\nu$ : Viscosidad Cinemática = 0,804 x 10<sup>-6</sup> (m<sup>2</sup>/seg)

D: Diámetro = 0,018 m

Tabla 1:

| POTENCIA |               | Temperatura Suelo no perturbado | Tiempo de ensayo |        | Temp. Fluido Media al final | Longitud Efectiva del intercambiador |
|----------|---------------|---------------------------------|------------------|--------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Q (W)    | q = Q/L (W/m) | To (°C)                         | t (Hs)           | Ln (t) | Tf(°C)                      | m                                    |
| 836      | 18,58         | 12,42                           | 72               | 4,28   | 19,88                       | 45                                   |

## DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

En el test de respuesta térmica, se utilizó como fluido portador de calor 100 litros de agua, con una inyección de 836 watts de potencia media y con un caudal circulante de 0,00042 (m<sup>3</sup>/s).

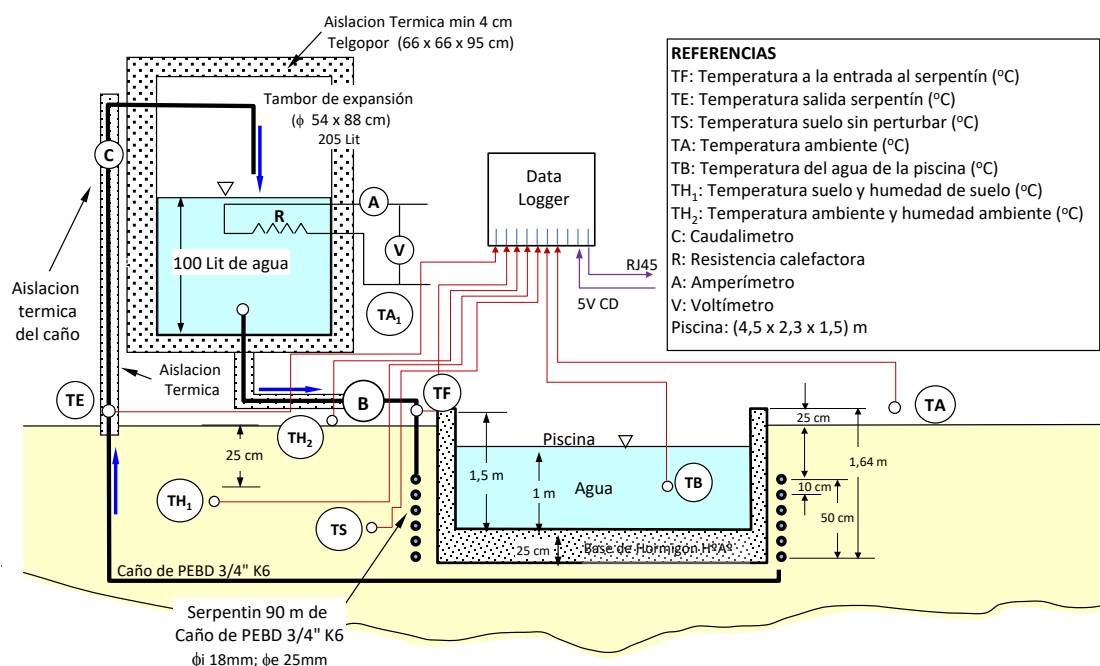


Figura 3: Esquema del dispositivo de medición montado en San Luis - Argentina

## MEDICIONES DEL ENSAYO

### Ensayo sin Perturbación:

Determinación de la Temperatura del Suelo No Perturbado

Para determinar la temperatura del suelo no perturbado, se conectaron la bomba de circulación y el datalogger, que registraron las temperaturas de entrada y salida del intercambiador geotérmico. El registro comenzó el 28/05/2022 a las 01:01:06 y finalizó el mismo día a las 11:31:29, recopilando un total de 9434 datos.

Como resultado, se obtuvo la temperatura del suelo no perturbado, con un promedio de temperatura de salida ( $T_{sur}$ ) de 12,42 °C, mientras que el promedio de la temperatura media entrada / salida fue de 12,46 °C.

### Ensayo con Perturbación:

Una vez determinada la temperatura del suelo no perturbado, se da comienzo al Test de Respuesta Térmica de Suelo propiamente dicho. Para ello, se conecta la bomba de circulación, el datalogger y la resistencia en el tanque de expansión, iniciando el ensayo con perturbación. La duración del ensayo es de 72 horas desde el momento en que se activa la resistencia. Durante este tiempo, los datos principales a recolectar son las temperaturas de entrada y salida del colector.

A partir del promedio de estos registros y graficándolos en un diagrama de dispersión en función del logaritmo natural del tiempo, se obtiene una nube de puntos. De esta nube de puntos se deriva la línea

de tendencia, su ecuación y el error medio cuadrático. Esto permite determinar, “in situ”, el coeficiente de conductividad térmica efectiva y la resistencia térmica del suelo, valores esenciales para la evaluación.

## DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE SUELO NO PERTURBADO

La figura 4 muestra la evolución de la temperatura de salida del fluido portador de calor en el pozo de sondeo sin perturbar. En esta primera etapa de medición se conectó la bomba de circulación, el datalogger para tomar los registros, pero no la resistencia eléctrica por lo cual no se inyecta potencia al sistema. Esto se realiza con el objetivo de determinar la temperatura del suelo no perturbado  $T_{sur}$ .

Para esto se promedió la temperatura de salida del fluido portador de calor, con un total de 9432 celdas.

El tiempo de la medición sin perturbación fue de aproximadamente 10:30 h. Obteniéndose el siguiente valor de  $T_{sur}=12,42\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

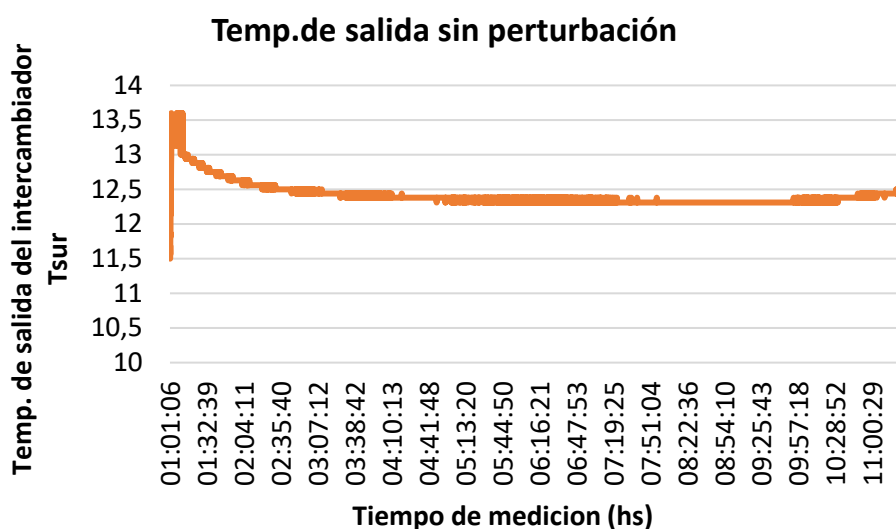


Figura 4: Evolución de la temperatura de salida del pozo de sondeo sin perturbar

## DETERMINACIÓN DE ( $T_f$ ) TEMPERATURA MEDIA DEL FLUIDO EN FUNCIÓN DEL $\ln(t)$

La determinación de la temperatura media del fluido ( $T_f$ ) en función del  $\ln(t)$  en horas se presenta en la Figura 5. Esta figura muestra la evolución de ( $T_f$ ) desde el inicio de la inyección de calor hasta la finalización del test. Además, se observa la línea de tendencia de la curva, su ecuación y el error medio cuadrático.

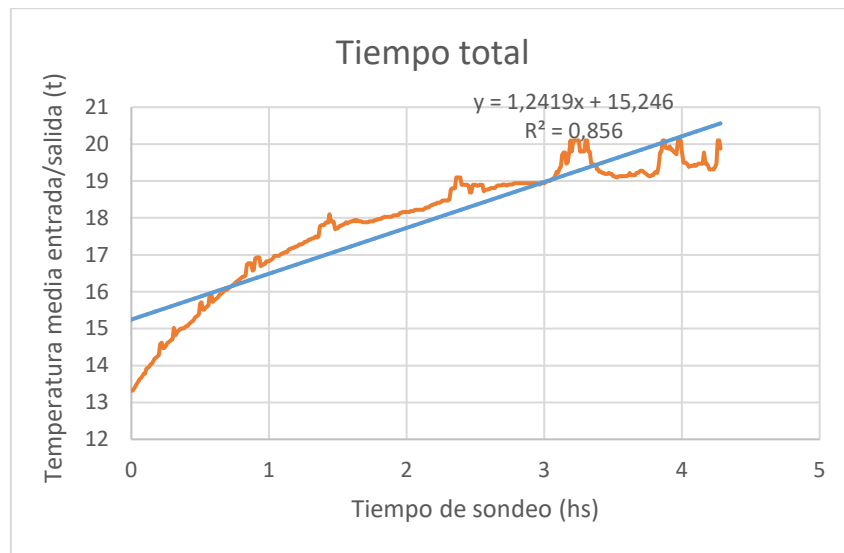


Figura 5: Temperatura media entrada/salida en función del  $\ln(t)$  total en horas del pozo de sondeo.

Aplicando el criterio del tiempo:  $t \geq \frac{5 \cdot r_0^2}{\alpha}$

Dónde:

$\alpha$ : Difusividad térmica del suelo macizo

$\alpha = 0,52 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

$r_0 = 0,05 \text{ m}$ , radio del pozo

Por lo cual el tiempo valido para la evaluación de la pendiente es:

$$t \geq \frac{5 \cdot 0,05^2 \text{ m}^2}{\frac{0,52 \text{ m}^2}{\text{seg}}} = 24038 \text{ seg.} \cong 6,67 \text{ h}$$

Que es aproximado a 6,67 horas, a partir de este valor de tiempo se puede evaluar la evolución de la temperatura media del fluido en función del logaritmo natural del tiempo en horas.

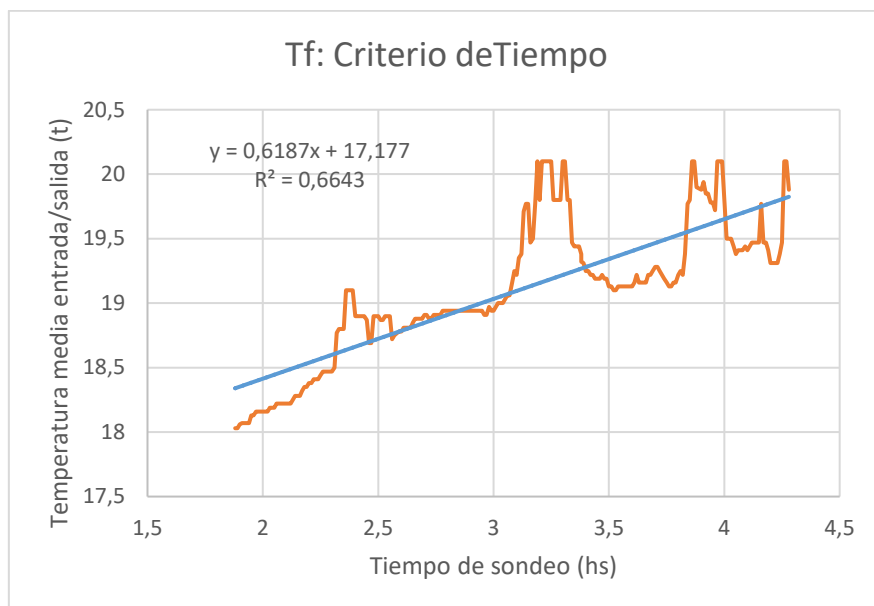


Figura 6: Evolución de la temperatura media entrada/salida en función del  $\ln(t)$  en hs aplicando criterio de tiempo.

En la figura 6 se muestra la evolución del fluido portador de calor desde el criterio de tiempo 't' hasta

la culminación del ensayo, la linealización de la curva, la pendiente y el error medio cuadrático.

La linealidad de la función  $T_f$ , se lo aproxima a la ecuación siguiente (Ec. 9 y 10):

$$T_f = k \cdot \ln(t) + m$$

$$k = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot H} \ln(t) \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot k \cdot H} \ln(t) \quad (10)$$

Así podemos determinar el parámetro de  $\lambda$ :

$\lambda$ : para el ensayo total fue del orden de: 1,28 W/m·K, para K= 1,24

$\lambda$ : aplicando el criterio de tiempo resulto: 2,46 W/m·K, para K= 0,62

## DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA TÉRMICA DE POZO GEOTERMICO

La resistencia térmica de un pozo geotérmico (Ec. 11) se refiere a la capacidad del pozo para resistir el flujo de calor desde el fluido portador de calor hacia el suelo circundante. Esta resistencia es crucial para evaluar la eficiencia de los sistemas de intercambio de calor en aplicaciones geotérmicas. La cual se determina despejando  $R_b$  en la ecuación 6.

$$R_b = (T_f - T_{sur}) \frac{H}{Q} - \frac{1}{4\pi\lambda} \left( \ln\left(\frac{4at}{r_0^2}\right) - \gamma \right) \quad (11)$$

## DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA TÉRMICA

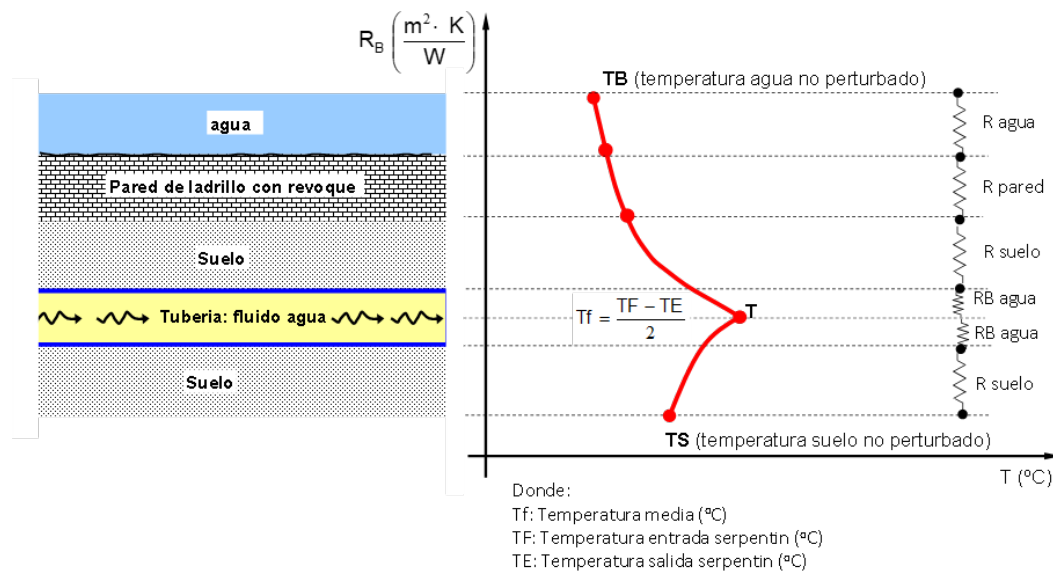
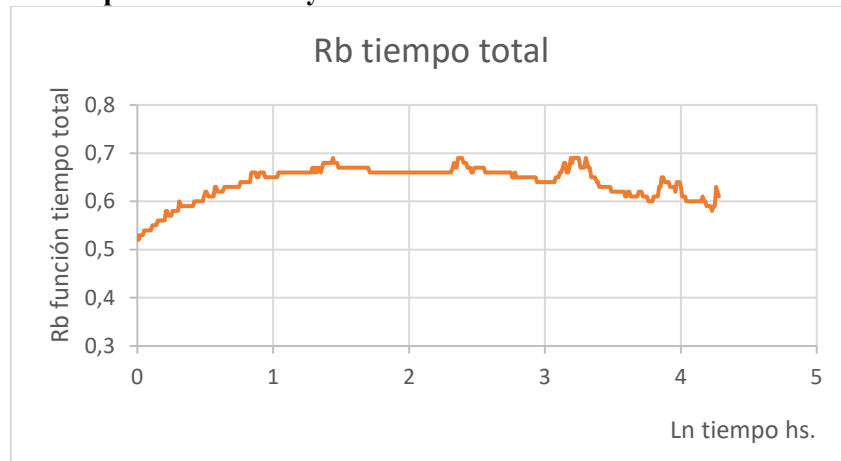


Figura 7: Esquema de resistencia térmica entre el fluido y la pared del pozo  $R_b(K / (W / m))$ .



### **$R_b$ en función del tiempo total del ensayo**



*Figura 8:  $R_b$  en función de tiempo total del ensayo*

Reemplazando los valores, obtenemos la resistencia térmica  $R_b$  ( $K / (W / m)$ ) en función del tiempo total del ensayo y se muestra en la figura 8.

### **$R_b$ en función del criterio del tiempo**



*Figura 9:  $R_b$  en función de tiempo, aplicando criterio de tiempo 6,5 hs.*

En la figura 9, se observa la gráfica de la resistencia térmica  $R_b$ , aplicando el criterio de tiempo, el cual es de 6,50 hs.

El valor promedio para  $R_b$  para la duración total del ensayo es de:  $0,64 [K / (W / m)]$ .

El valor promedio para  $R_b$  aplicando el criterio de tiempo es de:  $0,51 [K / (W / m)]$ .

### **AJUSTE PARAMETRICO DE DATOS EXPERIMENTALES**

Utilizamos como función de ajuste la solución del modelo matemático que representa el proceso de transferencia de calor, con  $\lambda_{eff}$  y  $R_b$  obtenidos experimentalmente como variables de ajuste, figura 10. En esta figura, se muestra la evolución de  $T_f(t)$  en función del  $\ln(t)$  en hs. (curva azul). Superponemos a esta la curva de ajuste paramétrico de los datos experimentales (curva roja), donde observamos buen ajuste y bajo error medio cuadrático acumulado. Al inicio, se observa una pequeña diferencia entre las dos curvas hasta un tiempo aproximado de 6,50 horas; luego, las mismas tienden a superponerse.

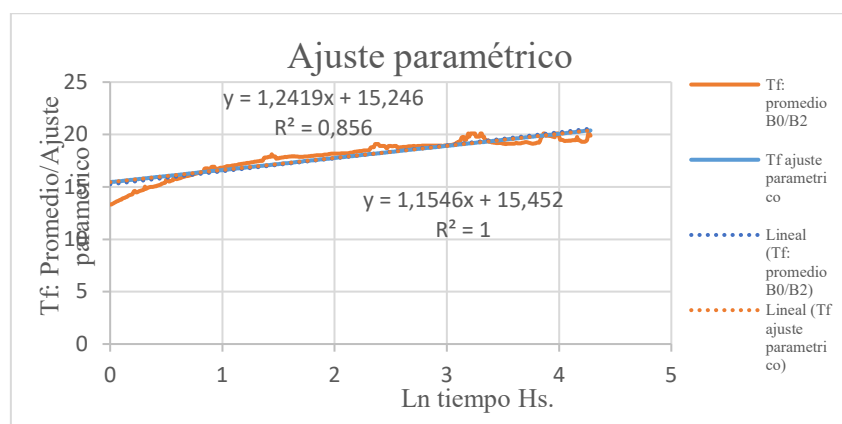


Figura 10: Evolucion de la temperatura media del fluido (curva naranja) y superpuesta la curva de ajuste paramétrico (curva azul)

Tabla 2. Resumen de los resultados del segundo test de respuesta térmica San Luis – Argentina

| $\alpha$ : Difusividad térmica del suelo macizo ( m <sup>2</sup> /s) | Criterio de tiempo | Pendiente: K | $\lambda_{eff}$ (W/m·K) | Rb: (K / (W/m)) |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------|-------------------------|-----------------|
| $0,52 \times 10^{-6}$                                                | Total              | 1,24         | 1,19                    | 0,64            |
| $0,52 \times 10^{-6}$                                                | 6,5 hs             | 0,66         | 1,24                    | 0,51            |

Tabla 3. Comparación con otros test de respuesta térmica

| LOCALIZACION          | CRITERIO DE TIEMPO | PENDIENTE: K | $\lambda_{eff}$ (W/m·°K) | Rb: (K / (W/m)) | SISTEMA    |
|-----------------------|--------------------|--------------|--------------------------|-----------------|------------|
| Erfurt Alemania       |                    |              | 2,78                     | 0,175           | Vertical   |
| Corrientes Argentina  |                    |              | 3,05                     | 0,047           | Vertical   |
| Largen Alemania -1    |                    |              | 2,8                      | 0,11            | Vertical   |
| Largen Alemania -2    |                    |              | 2,3                      | 0,08            | Vertical   |
| Largen Alemania -3    |                    |              | 2,2                      | 0,07            | Vertical   |
| Maguncia Alemania -1  |                    |              | 1,43                     | 0,16            | Vertical   |
| Maguncia Alemania -2  |                    |              | 1,41                     | 0,20            | Vertical   |
| San Luis Argentina -1 | ningún             | 1,98         | 1,41                     | 0,235           | Horizontal |
| San Luis Argentina -1 | 9hs                | 1,72         | 1,63                     | 0,257           | Horizontal |
| San Luis Argentina -2 | ningún             | 1,97         | 1,42                     | 0,117           | Horizontal |
| San Luis Argentina -2 | 9hs                | 2,28         | 1,23                     | 0,08            | Horizontal |
| San Luis Argentina -3 | ningún             | 1,24         | 1,19                     | 0,64            | No conv.   |
| San Luis Argentina -3 | 6,50               | 0,66         | 1,24                     | 0.51            | No conv.   |

## CONCLUSIONES

Este estudio resalta la flexibilidad del método de la pendiente para determinar el coeficiente de conductividad térmica efectiva del suelo  $\lambda_{eff}$ , aplicable tanto a intercambiadores verticales como a otras configuraciones.

El modelo considera una fuente de calor lineal infinita en un medio homogéneo, con temperatura inicial constante y transferencia de calor exclusivamente por conducción térmica. Sin embargo, en la práctica, cualquier implementación se desvía de este modelo ideal debido a factores como la longitud finita del intercambiador, pérdidas de calor por convección y radiación, condiciones de borde y la heterogeneidad del suelo.

La realización del TRT “in situ” permitió obtener el coeficiente de conductividad térmica ( $\lambda_{eff}$ ) y la resistencia térmica del suelo ( $R_b$ ), reflejando el sistema planteado. Los valores de  $\lambda_{eff}$  para los dos intercambiadores propuestos en San Luis son casi idénticos, aunque la resistencia térmica del suelo muestra una mayor variabilidad. Estos resultados, obtenidos en diferentes configuraciones y tiempos, se encuentran dentro del rango de valores mundiales.

Este trabajo demuestra la posibilidad de utilizar la gran fuente de energía renovable y gratuita almacenada en el suelo. Al enterrar un intercambiador y determinar el coeficiente de conductividad térmica mediante el método de la pendiente, se puede evaluar su eficiencia. Así, los sistemas de climatización geotérmica de baja entalpía pueden ganar mayor popularidad, contribuyendo a un importante ahorro energético y a la reducción de la contaminación.

Las implicaciones de estos hallazgos son significativas para el desarrollo de tecnologías sostenibles en el campo de la energía geotérmica. Futuras investigaciones podrían centrarse en la optimización de los diseños de intercambiadores de calor y en la evaluación de su desempeño en diferentes condiciones geográficas. Además, sería beneficioso explorar la integración de estos sistemas con otras fuentes de energía renovable.

En conclusión, este trabajo contribuye al avance del conocimiento en el campo de la energía geotérmica y ofrece una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas. El grupo de investigación está satisfecho con la experiencia realizada y los resultados obtenidos.

## REFERENCIAS

- Eklöf C, Gehlin S. (1996). A Mobile Equipment for Thermal Response Test. Master of science thesis 1996:198E. Luleå University of Technology. Sweden.
- Busso A., Müller J., Reuss M., Sograri N. (2000), Almacenamiento Subterráneo de Energía Térmica: Resultado de un ensayo de respuestas térmicas del subsuelo. Avance en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 4, Nº 1.
- Busso A., Reuss M., (2000), Ensayo de Respuestas Térmicas: Metodo de Evaluación de la Pendiente vs Ajuste Con Dos Parámetros Variables. Dpto de Física – Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UNNE – Corrientes Argentina.
- Austin III, W. A., (1998), Development of an Situ System for Measuring Ground Thermal Properties. Tesis de Maestria, Oklahoma State University.
- Gehlin, S. and Nordell, B. 1997. “Thermal Response Test - a Mobile Equipment for Determining Thermal Resistance of Borehole.” Proc. Megastock '97 Sapporo, pp. 103-108
- Hellström, G. 1997. “Thermal response test of a heat store in clay at Linköping, Sweden.” Proc. Megastock '97 Sapporo, pp. 115-120
- Ingersoll, L.R. and Plass, H.J. 1948. ”Theory of the ground pipe heat source for the heat pump.” Heating, Piping & Air Conditioning 20/7, pp. 119-122

## ANALYSIS OF THE THERMAL PERFORMANCE OF SOIL WITH A NON-CONVENTIONAL COIL IN SAN LUIS, ARGENTINA

**ABSTRACT** - This work was carried out with the aim of describing the results obtained from an in-situ Thermal Response Test, in which the effective thermal conductivity values of the subsurface ( $\lambda_{eff}$ ) and the thermal resistance ( $R_b$ ) corresponding to an unconventional geothermal heat exchanger were determined. These in-situ tests are based on the infinite line source (ILS) model, for heat transfer by thermal conduction as per Kelvin. The values were obtained using the graphical method of the slope with the objective of utilizing heat pumps coupled to the subsurface for heating and cooling in buildings.

**Keywords:** TRT, geothermal heat exchanger, slope method, efficiency.

## **ANÁLISIS DEL CONSUMO ELÉCTRICO DE UNA GRANJA AVÍCOLA DE LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS, ARGENTINA**

**Francisco J. Fernández<sup>1,3</sup>, Arsenio S. Ortman<sup>2</sup>, Luis I. Silva<sup>3</sup>, Cristian H. De Angelo<sup>3,4</sup>**

<sup>1</sup> Grupo de Investigación y Desarrollo en Energía y Medio Ambiente (GIDEMA) - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER) Oro Verde, Argentina.

<sup>2</sup> Facultad Regional Paraná Universidad Tecnológica Nacional (UTN) - Paraná, Argentina.

<sup>3</sup> Centro de Investigaciones y Transferencia Rafaela – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Universidad Nacional de Rafaela (UNRaf) Rafaela, Santa fe, Argentina.

<sup>4</sup> Grupo de Electronica Aplicada (GEA) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC) Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

Tel. 0343- 4051239 – e-mail: [javier.fernandez@uner.edu.ar](mailto:javier.fernandez@uner.edu.ar)

**RESUMEN:** En este trabajo se analizó el consumo de energía eléctrica de una granja avícola agroindustrial de la Provincia de Entre Ríos, con un enfoque particular en el funcionamiento intensivo de las máquinas eléctricas encargadas de la ventilación y extracción de aire y gases generados en el interior de las granjas. En el mismo, se identificaron las principales fuentes y factores que influyen y condicionan el consumo de la energía eléctrica de este establecimiento agroindustrial, donde se pueden destacar el consumo destinado al bombeo y suministro de agua, la iluminación y el uso de motores encargados de la ventilación y extracción del aire.

Se plantean algunas propuestas de eficiencia energética, a través de la implementación de dispositivos de control y monitoreo utilizados para optimizar el funcionamiento de las cargas eléctricas, reemplazo de los motores actuales por equipos más eficientes, instalación de sistemas de iluminación de bajo consumo y aprovechamiento del uso de fuentes de energía renovable; y de esta manera buscar alternativas sostenibles para reducir el impacto ambiental de la actividad. Este trabajo puede ser útil como punto de partida para conocer el consumo energético real de la industria avícola de la zona y encontrar oportunidades para disminuir el consumo energético.

**Palabras clave:** Consumo eléctrico, granjas avícolas, eficiencia energética, máquinas agroindustriales.

### **INTRODUCCIÓN**

Actualmente, el consumo de energía es un tema fundamental, especialmente en el contexto de la transición energética. La eficiencia energética es esencial para reducir el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La transición energética busca aumentar el uso de fuentes de energía renovable y mejorar la eficiencia energética en el sector industrial, lo que puede llevar a una reducción significativa en las emisiones de GEI y un aumento en la eficiencia energética (Sierocka et al., 2023).

Debido al crecimiento sostenible de la producción industrial, el consumo doméstico y del transporte, en los últimos 30 años se ha duplicado el consumo energético mundial. Según la Agencia Internacional de la Energía (AIE), el consumo de energía del mundo se incrementará en un 57% entre 2004 y 2030, a pesar de que el precio tanto del petróleo como del gas natural siga aumentando. La preocupación por la reducción del uso de la energía debido a las problemáticas medioambientales que acarrea, en especial la disminución de emisiones de GEI, dotan a las energías renovables en un papel fundamental para combatirlas (IEA, 2022).

Las granjas avícolas para la producción de carne se localizan, principalmente, en las provincias de Entre Ríos y Buenos Aires, fundamentalmente en las proximidades de los grandes centros urbanos. La provincia

de Entre Ríos es de gran importancia en el sector avícola argentino, destacándose respecto a la producción de carne aviar con una participación del 51,2% en el total nacional (ISAPE,2021).

En las granjas avícolas, los motores y ventiladores eléctricos son componentes críticos para el control de la temperatura y la calidad del aire para el bienestar de las aves y la rentabilidad del negocio. Sin embargo, su uso puede tener un impacto significativo en el consumo y la variación del voltaje en el sistema eléctrico de las granjas, lo que puede afectar la eficiencia y la producción de las aves (Roussel y Ebeire, 2017).

En este sentido, es importante realizar mediciones regulares de la variación del voltaje y tomar medidas para minimizar su impacto, como la instalación de reguladores de voltaje y la programación de la carga eléctrica para evitar la sobrecarga del sistema (Montoya Arias et al.,2020). Para garantizar la eficiencia energética y la seguridad eléctrica en las granjas avícolas, es importante tomar las medidas de mantenimiento adecuadas para garantizar el correcto funcionamiento de los motores y ventiladores (Levitin et al., 2016).

Los ventiladores utilizados en las granjas avícolas, al extraer el aire del interior crean un vacío parcial o de presión negativa. La diferencia de presión empuja el aire fresco a través de entradas de aire al interior de la nave reemplazando al aire que extrajeron los ventiladores. En las naves con sistema de ventilación por presión negativa la estanqueidad es una consideración esencial para la consecución de una buena y fiable presión negativa (AVINEWS, 2015).

Para tener una adecuada versatilidad para ajustar el sistema de ventilación a los cambios climáticos es mejor combinar el funcionamiento de los ventiladores de poco caudal (alrededor de 12.000 m<sup>3</sup>/h) para la ventilación mínima con ventiladores de gran caudal (alrededor de 40.000 m<sup>3</sup>/h) para la ventilación máxima (Czarick y Fairchild, 2009).

El consumo de energía en granjas avícolas se refiere a la cantidad de energía eléctrica utilizada para mantener las operaciones diarias, incluyendo la provisión de agua, la iluminación, el control de temperatura y la ventilación. Uno de los aspectos relevantes es la gestión de la iluminación, la cual se lleva a cabo mediante programas específicos, donde generalmente se utiliza una luz intensa durante las primeras etapas de vida de las aves, seguida de una luz de menor intensidad durante el resto del ciclo de crecimiento (Arroyo, 2014).

El uso de lámparas incandescentes conlleva un alto consumo eléctrico y genera un exceso de calor en las granjas, lo que requiere mayor uso de los ventiladores. En cuanto a la ventilación y el enfriamiento, resulta fundamental garantizar una adecuada circulación de aire para eliminar elementos no deseados y regular el flujo dentro de las naves. Controlar las entradas de aire y realizar un mantenimiento regular de los ventiladores contribuye a mejorar la eficiencia energética. Estos aspectos relacionados con la iluminación, la ventilación y el enfriamiento, así como la calefacción, son elementos claves a considerar en la gestión de las granjas avícolas con el fin de optimizar la eficiencia energética y minimizar el impacto ambiental (Arroyo, 2014).

El objetivo de este trabajo es obtener el perfil de consumo eléctrico de una granja avícola agroindustrial de la Provincia de Entre Ríos, a través de la generación de una base de datos de los requerimientos energéticos de la planta y la identificación de actividades y procesos que requieren mayor gasto energético en la producción. Con esta información, plantear estrategias para disminuir el consumo energético de la granja avícola analizada.

## **METODOLOGÍA**

### ***A. Descripción de la granja***

La granja avícola “Don Santiago” se encuentra ubicada en Aldea Valle María, departamento Diamante de la Provincia de Entre Ríos, región de elevada actividad agrícola y agropecuaria. Dispone de 4 naves de pared no sólida de 150 metros de largo por 12 metros de ancho cada una, con una capacidad de producción aproximada de 80.000 pollos de engorde por cada ciclo productivo.

Aparte de las 4 naves destinadas para el engorde de los pollos, el predio de la granja dispone de una vivienda para el cuidador y un área de mantenimiento. Para cubrir parte de la energía consumida en el predio, en el año 2023 se instaló una planta fotovoltaica constituida por 72 paneles de 330 Wp cada uno ubicados sobre el nivel de suelo, la cual genera una potencia total de 23.760 W. La planta con sistema “on grid” se encuentra conectada a la red de distribución, permitiendo generar y consumir energía solar, pero con el respaldo de la red eléctrica en casos de que se consuma más energía de la generada. En caso contrario, el sistema permite inyectar el excedente a la red eléctrica.

### ***B. Análisis del proceso actual de la granja***

Para el estudio y relevamiento de la producción de la granja, se realizaron visitas técnicas en la cual se identificaron los diferentes procesos de producción, donde el personal de la granja indicó los diferentes elementos fundamentales de la infraestructura de las naves, así como los diferentes insumos y materiales necesarios para el proceso productivo.

En base a las mediciones e información recolectada, se determinaron las entradas y salidas del sistema. Luego se realizaron los diagramas de distribución y operaciones generales de la granja, así como el inventario de maquinarias y equipamientos requerido en el sistema de producción.

Si bien la dimensión y los servicios del sistema de producción de la granja está preparada para recibir aproximadamente 80.000 pollos por cada ciclo productivo, para poder comparar los resultados obtenidos, se estimaron los cálculos de las variables de entradas y los consumos eléctricos en base a 1.000 aves con un ciclo productivo promedio de 49 días.

### ***C. Consumo de energía eléctrica para la producción***

Para estimar el consumo energético durante la producción, es necesario conocer el consumo de agua y alimentos, así como la cantidad y peso de las aves al finalizar el ciclo productivo. Para esto se debe estimar el volumen de agua para bebederos y aspersores ambientales utilizados para disminuir la temperatura del interior de la granja, en base al volumen de carga de agua de los tanques de la granja. Para determinar el consumo de energía eléctrica (kWh) utilizada en el sistema de bombeo para extraer y distribuir el agua (m<sup>3</sup>), se utilizó el índice de extracción de agua. Este índice hace referencia a la cantidad de energía eléctrica necesaria para bombear y distribuir un metro cúbico de agua. Para este caso, se emplea un valor de 0,75 kWh/m<sup>3</sup>, proporcionado por la cooperativa de agua local.

La conformación del inventario de máquinas y equipos utilizados en la granja, permitió generar una base de datos considerando 1.000 aves en un ciclo productivo de 49 días, evaluando el consumo de energía eléctrica en cada proceso productivo. Luego, el consumo de energía eléctrica estimada en la producción fue comparado con los datos medidos de la generación y el registro de consumo de energía eléctrica real del último año, donde se llevaron a cabo 5 ciclos productivos.

### ***D. Estrategias para disminuir el consumo de energía de la granja***

Para determinar la productividad de la energía eléctrica (PEE) del proceso, se utilizó la Ec. (1), la cual hace referencia al índice que mide el uso de la energía eléctrica por cada kg de ave; sin embargo, alta productividad energética no garantiza la viabilidad económica (Salazar et al.,2012):

$$PEE = \frac{\text{Producción de Kg de ave [Kg]}}{\text{Entrada de Energía eléctrica [kWh]}} \quad (1)$$

De acuerdo al relevamiento y los resultados obtenidos, se seleccionaron las estrategias de eficiencia energética más factibles de aplicación de acuerdo a la característica de la granja; y de esta manera buscar alternativas sostenibles para reducir el impacto económico y ambiental de la actividad.

Para calcular el balance de energía eléctrica anual de la granja se debe considerar el consumo bimestral durante un año aportado por el registro de la empresa proveedora de energía. Además, se incluirá en el balance las mediciones de la energía generada por la planta fotovoltaica durante el mismo periodo.



Entre las acciones de eficiencia de energía para la granja, se propone comparar el consumo y su ahorro energético al reemplazar los motores encargados de extraer el aire de 1,5 Hp de eficiencia estándar IE1 utilizados actualmente, por motores de igual potencia con una eficiencia Premium IE3.

## RESULTADOS

### *A. Análisis del proceso actual de la granja*

La granja se encuentra en Aldea Valle María, el cual es un municipio del distrito Palmar del departamento Diamante en la provincia de Entre Ríos, República Argentina. El municipio comprende la localidad del mismo nombre y un área rural. Se ubica a 30 km al sudeste de la capital de la Provincia, la ciudad de Paraná (Figura 1). En la Figura 2 se puede observar la granja desde una imagen satelital y una foto del ingreso a los gallineros.



*Figura 1: Localización de Aldea Valle María en la Provincia de Entre Ríos.*



*Figura 2: Imagen satelital e ingreso de la granja.*

### *B. Entradas principales al sistema de producción de aves de engorde*

Como se dijo anteriormente, aunque la dimensión y el sistema de producción de la granja está preparada para recibir aproximadamente 80.000 pollos por cada ciclo productivo, para estimar los cálculos de las entradas y los consumos eléctricos se consideró en base a 1.000 aves, para un ciclo productivo promedio de 49 días.

Los requerimientos de las entradas principales al sistema de producción de la granja se muestran en la Tabla 1.

*Tabla 1: Entradas principales al sistema de producción de 1000 aves durante un ciclo productivo (CP) (49 días).*

| Variable de entrada                                             | Valor y unidades              |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Cantidad de aves por m <sup>2</sup>                             | 10 aves/m <sup>2</sup>        |
| Cantidad de días por CP                                         | 49 días/Cp                    |
| Cantidad de CP por año                                          | 5 Cp/año                      |
| Cantidad de agua                                                | 12 m <sup>3</sup> /1.000 aves |
| Cantidad de alimento consumido                                  | 6.200 Kg/1.000 aves           |
| Kg del ave al finalizar el CP                                   | 3 Kg                          |
| Cantidad de horas diarias de iluminación para diferentes edades | 1era semana: 24 horas         |
|                                                                 | 2da semana: 18 horas          |
|                                                                 | 3era semana: 12 horas         |
|                                                                 | 4ta semana: 8 horas           |
|                                                                 | 5ta semana: 7 horas           |
|                                                                 | 6ta semana: 6 horas           |
|                                                                 | 7ma semana: 5 horas           |

### **C. Consumo de energía eléctrica para la producción**

La producción de pollo de engorde en la granja, se conforma de distintos sistemas que requieren del consumo de energía para hacer funcionar los equipos. Para proveer y distribuir el agua, la granja dispone de 2 bombas de 1,5 Hp cada una.

Para la iluminación, calefacción, ventilación y extracción de aire, la granja es considerada técnicamente como nave de ambiente controlado. Para su producción, la granja dispone de 250 lámparas LED de 15 W para iluminación, 30 ventiladores-extractores de aire de 56" con motores de 1,5 Hp y eficiencia IE1 y dispersores de agua para regular la humedad y temperatura del interior de las naves. Para la calefacción se utilizan quemadores de gas de baja presión, este gas LP es acumulado en depósitos de alta presión y su reposición está a cargo de la empresa encargada de proveer y retirar los pollos de la granja.

El consumo de energía eléctrica por el uso de los extractores de aire puede variar dependiendo de la época del año y las edades de las aves. Para este cálculo se estimó un promedio de 4 horas/día que permanecerán encendidos los extractores durante un ciclo productivo de 49 días. El tiempo en el que se utilizan los extractores depende de un factor de uso, que varía según la época del año y las edades de los pollos.

En la Tabla 2 se presentan discriminados por subsistema de producción la estimación del consumo de energía eléctrica de todos los equipos considerando una producción de 1.000 aves en la granja.

Considerando solo la energía eléctrica utilizada en la granja para bombear y distribuir el agua, suministrar el alimento, así como para generar el ambiente confortable de las aves en las naves (iluminación, ventilación y extracción), podemos obtener que se requieren 32,5 Wh de energía eléctrica por cada kg de pollo. Este resultado resulta un poco más elevado en comparación a los resultados presentados por la FAO (2013) en los sistemas avícolas a nivel mundial, donde se requieren 4,5 Wh menos de energía para producir un kg de ave que en la granja analizada (FAO,2013). Esta diferencia puede deberse al diseño de los gallineros, dado que en (Oviedo Randon,2009) se indica que las naves de túnel de pared sólida utilizan 15% menos de energía que las de paredes no sólidas. Además, las condiciones meteorológicas y el clima influyen en la energía utilizada y deben ser parámetros tenidos en cuenta para el diseño e implementación de las granjas.

Tabla 2: Estimación del consumo de energía para la producción de 1000 aves durante un ciclo productivo (49 días).

| Subsistema de consumo de energía | Equipamiento disponible y entrada vinculada        | Energía estimada [kWh] |
|----------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------|
| Bombeo y suministro de agua      | 2 bombas sumergibles de 1,5 Hp y 12 m <sup>3</sup> | 9,0                    |
| Suministro de alimento           | 4 motores de 0,75 Hp                               | 1,5                    |
| Iluminación                      | 250 lámparas de 15W                                | 26,25                  |
| Extracción de aire               | 30 extractores de 56'' 1,5 Hp (1.1 kW) IE1         | 60,64                  |
| <b>TOTAL</b>                     |                                                    | <b>97,39</b>           |

En la Figura 3 se puede observar de forma discriminados por subsistema de producción los porcentajes del consumo de energía eléctrica de todos los equipos considerando una producción de 1.000 aves en la granja. Como se puede observar, el sistema de extracción de aire consume el 62,26 % del total de la energía eléctrica requerida, representando un área de oportunidad para disminuir el consumo de energía eléctrica.

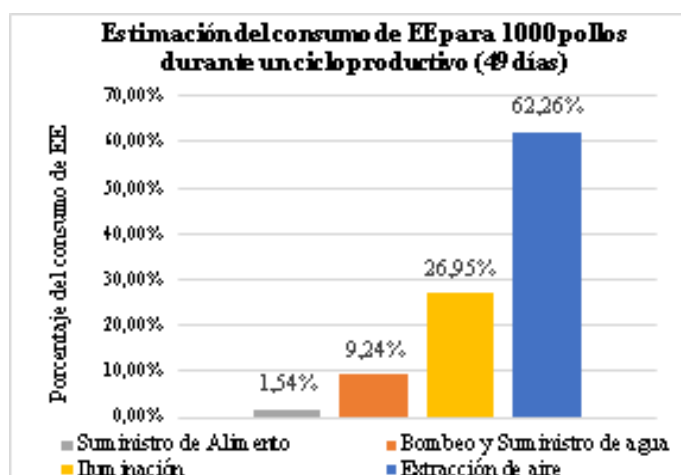


Figura 3: Distribución del consumo de EE de la granja.

#### D. Productividad energética de la granja

A través de la estimación realizada, se determinó que para producir un kg de carne de pollo se requieren 32,5 Wh. A través de la Ec. (1) se obtiene la productividad de energía eléctrica; la cual determina los kg de pollo generados tras el consumo de 1 kWh de energía eléctrica en la granja.

$$PEE = \frac{3000 \text{ de pollo (1000 aves)}[Kg]}{97,39 \text{ durante un ciclo productivo (1000 aves)}[kWh]}$$

$$\text{Productividad de energía eléctrica} = 30,8 \frac{Kg}{kWh}$$

Así se obtiene que la productividad de energía eléctrica de la granja es de 30,8 kg/kWh. Por lo que, con el incremento de la eficiencia energética, a través de prácticas y propuestas más eficientes esta productividad debería aumentar.

#### E. Balance energético

Para obtener el balance de energía eléctrica de la granja se consideró el consumo bimestral durante todo el año 2023 obtenido del registro de la empresa proveedora de energía. Además, se incorporó al balance las mediciones de la energía generada por la planta fotovoltaica durante el mismo periodo. En la Figura 4 se observa el balance de energía eléctrica discriminada por bimestres y el total anual.

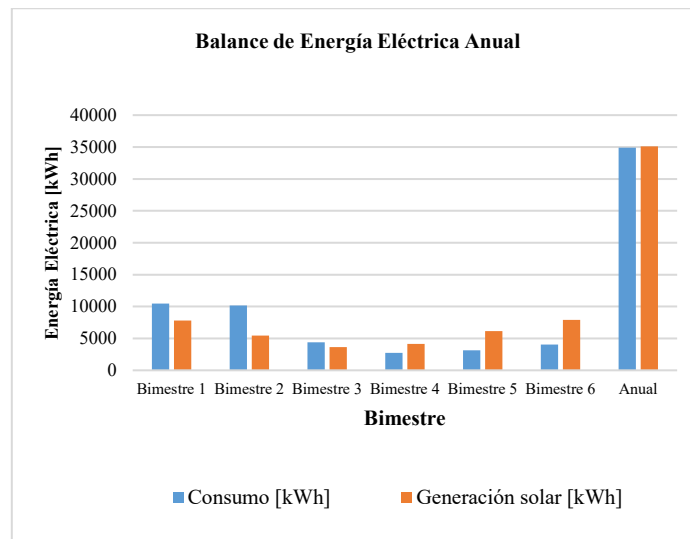


Figura 4: Balance de Energía Eléctrica Anual. Año 2023

Como se puede observar en la Figura 4, si bien la planta fotovoltaica cubre el consumo anual de la granja, está no puede cubrir el consumo en los periodos donde las temperaturas son elevadas y la demanda de energía consumida supera a la energía generada por la planta. Esta diferencia está asociada al elevado consumo de los extractores de aire de las naves durante los bimestres 1, 2 y 3.

#### ***F. Recomendaciones y propuestas de eficiencia energética de la granja***

A continuación, se proponen algunas acciones para reducir el consumo de energía eléctrica de las granjas avícolas, sin embargo, es de vital importancia seleccionar las más factibles de acuerdo a las características del clima y las condiciones meteorológicas del lugar de ubicación de la granja.

Las propuestas que se mencionan fueron seleccionadas de la bibliografía por ser aplicadas en granjas de similares características de diseño, capacidad de producción y condiciones meteorológicas. Sin embargo, su implementación real debe ir acompañada de un análisis completo de su viabilidad, dado que la transformación tecnológica de una granja agrícola surge principalmente de una decisión económica justificada.

##### ***a) Eficiencia en el sistema de ventilación y extracción de aire:***

➤ Mantenimiento del sistema de extracción de aire:

La limpieza de los extractores, las aspas de los ventiladores y mantener lubricado los motores permite mejorar la eficiencia de los equipos.

➤ Evitar entrada de aire no establecidas:

El cierre hermético de las naves favoreciendo el efecto túnel puede disminuir el consumo eléctrico, ya que mejora la eficiencia de los extractores de aire.

➤ Reemplazo de motores más eficientes:

Como se puede ver en los resultados de la Tabla 2 y Figura 3, el sistema de extracción de aire consume 60,64 kWh, representando el 62,26 % del total de la energía eléctrica requerida. Actualmente los motores encargados de este sistema son de 1,5 Hp (1.1 kW) con una eficiencia estándar IE1 y rendimiento de 0,75.

En el caso de reemplazar los motores encargados de extraer el aire por motores de 1,5 Hp (1.1 kW) con una eficiencia Premium IE3 y rendimiento 0,85, la estimación del consumo se reduce a 57,61 kWh, lo que representa un ahorro de energía de 5 % durante un periodo productivo. Así la productividad de energía eléctrica de la granja asciende de 30,8 a 31,8 kg/kWh.

**b) Implementación de dispositivos de control:**

La colocación de sistemas de control adicionales como la utilización de variadores de frecuencia (VFD), donde se puede controlar la velocidad de funcionamiento de los motores a partir de algunas de las variables de control ambiental del interior de la nave como la humedad, la temperatura, la concentración de gases saturados, etc.

La colocación de VFD en los motores de extracción de aire permitirá controlar el par y/o la velocidad durante todo el proceso de funcionamiento. Además, reduce el consumo de energía producido en el arranque y parada de los motores (alta potencia en la etapa transitoria); ya que estos equipos por medio de su regulación producen arranques y paradas suaves.

Otra opción, en el caso que sea posible y no afecte a la producción, sería implementar controladores de demanda eléctrica, que permitan monitorear y gestionar la demanda eléctrica en tiempo real, evitando picos de consumo y optimizando el uso de energía. Estos dispositivos no solo mejoran el control sobre el consumo de energía, sino que también contribuyen a reducir costos y maximizar la eficiencia operativa.

**c) Mantenimiento e incorporación de fuentes de energías renovables:**

- Limpieza y mantenimiento de los paneles solares para mantener la eficiencia de los mismos. Como así también, cuando sea posible incorporar más paneles y elementos de acumulación de energía (banco de baterías) a la planta de generación.
- Aprovechamiento de la cama de pollo: La cama de pollo o guano que se desecha cuando finaliza cada ciclo productivo puede gestionarse para producir biogás a partir de su biodigestión. Este biogás puede utilizarse para generar energía eléctrica o térmica, y a su vez reducir las emisiones de los GEI.

**d) Programa integral de eficiencia energética:**

La incorporación de un programa de gestión integral de eficiencia energética deberá incluir capacitación regular para el personal, promoviendo el uso responsable de la energía y fomentando prácticas sostenibles en el manejo de los equipos y sistemas energéticos. En este programa, se deben incluir medidas que incluyan la transición a tecnologías más eficientes, como lámparas LED de alta eficiencia, la implementación de sistemas de control automático de la iluminación, la optimización del diseño en las instalaciones para una mejor circulación de aire y la instalación de máquinas de alta eficiencia energética. Además, se debe realizar un monitoreo constante del consumo energético acompañado de la implementación de prácticas de mejoras continuas.

## **CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

La elaboración de este trabajo permitió estimar el consumo de energía eléctrica de una granja avícola típica de la provincia de Entre Ríos. Esta base de datos puede ser útil como punto de partida para conocer el consumo energético real de la industria avícola de la zona y encontrar oportunidades para disminuir el consumo energético.

Según la estimación del consumo eléctrico, el sistema de extracción de aire consume el 62,26 % del total de la energía eléctrica requerida, por lo que representa un área donde se pueden enfocar las propuestas de eficiencia energética para disminuir el consumo de energía eléctrica, y así aumentar la productividad energética de la granja. En el caso de reemplazar los motores de eficiencia estándar por los de eficiencia premium se estima un ahorro de energía de 5 % durante un periodo productivo.

A través del resultado del balance energético anual se pudo observar que, si bien la planta fotovoltaica cubre el consumo energético acumulado anual de la granja, está no puede cubrir el consumo en los periodos donde las temperaturas son elevadas (elevado consumo de los extractores de aire) y la demanda de energía consumida supera a la energía generada por la planta.

A partir de los resultados obtenidos, los trabajos futuros se orientan a incorporar mediciones de otras variables internas como la temperatura, humedad, concentración de gases, etc. vinculadas con el funcionamiento de los extractores de aire. Asimismo, se aconseja a la industria instalar medidores de

consumo energético en el interior de la granja para tener mayor información acerca de la demanda de energía eléctrica y la caracterización de uso.

Como trabajo futuro, es posible implementar modelos computacionales que permitan simular el comportamiento térmico y energético de la granja, luego de la incorporación de materiales constructivos con mejores propiedades bioclimáticas y equipos eléctricos más eficientes. También, es posible optimizar el diseño de la planta fotovoltaica, a través del cálculo de su dimensionamiento y un estudio más profundo de su emplazamiento. El cálculo de su tamaño puede verificarse a partir de la estimación del consumo y la producción de energía considerando las particularidades de la región donde está instalada la planta.

Los resultados obtenidos son adecuados al interés regional, particularmente en cuanto a los beneficios ambientales derivados de la implementación tecnológica en entornos agrícolas o industriales. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías estará determinada principalmente por decisiones económicas, aspecto que no ha sido abordado en este estudio. En trabajos futuros, se sugiere profundizar en el análisis económico de la transformación tecnológica, con el fin de evaluar su viabilidad financiera y generar estrategias que justifiquen su implementación desde una perspectiva costo-beneficio.

Los resultados de este trabajo servirán como modelo de difusión, no solo dentro de la industria avícola, sino en cualquier ámbito industrial de la zona e instituciones educativas; priorizando desde el área académica y de vinculación con el medio la transferencia y el acercamiento de la tecnología a la sociedad y la promoción de consumos energéticos responsables, y el uso cotidiano de las energías renovables.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado por el Grupo de Investigación y Desarrollo en Energía y Medio Ambiente (GIDEMA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Entre Ríos. El equipo de trabajo quiere agradecer a los dueños y empleados de la granja avícola “Don Santiago” ubicada en la localidad de Aldea Valle María, por permitirnos desarrollar este proyecto y brindar toda la información y herramientas necesarias para analizar su consumo energético y aceptar sugerencias para mejorar los servicios de la industria.

## REFERENCIAS

- Sierocka H., Zajkowski M., Hołdyński G. y Soljan Z. (2023). Characteristics of Electricity Consumption on the Example of Poultry Farming in Poland. *Energies*, vol. 16, no. 1, p. 547, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16010547.
- International Energy Agency (IEA) (2022). “Of World Energy Outlook Executive summary 2022”. IEA Publications International, Energy Agency.
- Informe del Sector Avícola, Provincia de Entre Ríos (ISAPE) (2021). Dirección General de Estadística y Censos – Ministerio de Economía hacienda y Finanzas, Provincia de Entre Ríos. 2021.
- Roussel F. y Ebeire G. (2017). XXL connection and disconnection, in 2017 12th International Conference on Live Maintenance (ICOLIM), Apr. 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICOLIM.2017.7964121.
- Montoya Arias M., Arango Marín J. y Rosero Otero S. (2020). Programación de mantenimiento preventivo usando algoritmos genéticos. *Lámpsakos*, no. 23, p. 37, May 2020, doi: 10.21501/21454086.3112.
- Levitin G., Xing L. y Dai Y. (2016). Heterogeneous Non-Repairable Warm Standby Systems with Periodic Inspections. *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 65, no. 1, pp. 394–409, 2016, doi: 10.1109/TR.2015.2455976.
- AVINEWS [en línea] Revista Avinews. Diseño del sistema de ventilación para una nave de pollos de engorde. Marzo 2015. <https://avinews.com/sistema-de-ventilacion/>. [consulta: 09 de agosto de 2024]
- Czarick, M., y Fairchild, B. (2009). Poultry Housing Tips. University of Georgia Cooperative Extension Service, 21(10).
- Arroyo, A. (2014) [en línea]. “Análisis del Requerimiento Energético de una Granja Avícola”, 2014. [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB\\_UMICH/4704/FIQ-M-2014-1904.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/4704/FIQ-M-2014-1904.pdf?sequence=1&isAllowed=y) [consulta: 09 de agosto de 2024]
- Salazar M., Pedro C. y Abraham R. (2012) [en línea]. Eficiencia en el uso de la energía en invernaderos mexicanos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3(SPE4):736-742. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v3nspe4/v3nspe4a16.pdf>. [consulta: 10 de agosto de 2024]



- FAO (2013). Greenhouse gas emissions from pig and chicken supply chains, A global life cycle assessment.2013.
- Oviedo Randon E. (2009). Ahorro energético en granjas avícolas. XLVII Simposio científico de avicultura, Zaragoza 2009.

## **ANALYSIS OF ELECTRICAL CONSUMPTION IN A POULTRY FARM IN THE PROVINCE OF ENTRE RIOS, ARGENTINA**

**ABSTRACT:** This paper analyzed the electric power consumption of an agro-industrial poultry farm in the Province of Entre Ríos, with a particular focus on the intensive operation of the electric machines responsible for ventilation and extraction of air and gases generated inside the farms. The paper identified the main sources and factors that influence and condition the electric power consumption of this agro-industrial establishment, where the consumption destined for pumping and supplying water, lighting and the use of motors responsible for ventilation and air extraction can be highlighted.

Some proposals for energy efficiency are put forward, through the implementation of control and monitoring devices used to optimize the operation of electrical loads, replacement of current motors with more efficient equipment, installation of low-consumption lighting systems and taking advantage of the use of renewable energy sources; and in this way, seek sustainable alternatives to reduce the environmental impact of the activity. This paper can be useful as a starting point to know the real energy consumption of the poultry industry in the area and find opportunities to reduce energy consumption.

**Keywords:** Electricity consumption, poultry farms, energy efficiency, agro-industrial machines.

## AHORRO DE ENERGÍA EN AGUA CALIENTE SANITARIA: TEMPORIZADORES EN TERMOTANQUES ELÉCTRICOS Y OTRAS SOLUCIONES DE BAJO COSTO

**Pablo Romero<sup>1,2</sup>, Jorge Fiora<sup>1,2</sup>, Luciana Oddo<sup>1,2</sup>, Walter Silvero<sup>2</sup>, Cristian Carri<sup>1</sup>, Italo Bove<sup>3</sup>, Salvador Gil<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Eficiencia Energética. Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup> ECyT- Universidad Nacional de San Martín (UNSAM). San Martín, Buenos Aires, Argentina

<sup>3</sup> Instituto de Física, Facultad de Ingeniería. Universidad de la República (Udelar). Uruguay

E-mail: [sgil@unsam.edu.ar](mailto:sgil@unsam.edu.ar)

**RESUMEN:** Este estudio analiza el impacto del consumo de Agua Caliente Sanitaria (ACS) en el consumo energético residencial total de Argentina y su repercusión en los presupuestos familiares. En países con climas templados y fríos, como Argentina, el ACS constituye uno de los principales consumos domésticos de energía. El foco de este análisis está en los termotanques eléctricos, que representan más del 15 % de los equipos de ACS en el país. Se demuestra cómo la instalación de temporizadores, tanto automáticos como manuales, puede reducir su consumo eléctrico entre un 20 % y un 40 %. Además, esta solución resulta igualmente eficaz cuando se utilizan estos equipos como complemento de sistemas solares térmicos. El estudio también explora otras medidas de bajo costo, como el uso de aireadores en grifos y cabezales de ducha, que pueden generar ahorros combinados de más del 50 % en el consumo de agua y energía.

**Palabras clave:** Eficiencia energética, Eficiencia en agua caliente sanitaria, Consumos pasivos, Timers, Calentamiento de agua con Bombas de Calor.

### INTRODUCCIÓN

El consumo de energía en Agua Caliente Sanitaria (ACS) es de mucha relevancia en el sector residencial y comercial en casi todo el mundo. En la mayoría de los países templados o fríos, el consumo de ACS está entre los tres principales consumos de los hogares (Eurostat, 2022), (Zavalía Lagos et al., 2022), (Trotta y Lorek, 2018). Si se supone que en promedio los consumos domésticos en Argentina son similares a la región del Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) que concentra el 30% de la población del país, el consumo asociado al ACS es del orden del  $8 \% \pm 2 \%$  de la demanda total argentina, como se ilustra en Figura 1. En la misma se presenta en la torta de la izquierda la distribución del consumo final de energía en Argentina para 2022 (Ministerio Economía Argentino, 2022), y en la de la derecha el desglose del consumo residencial (doméstico) para la región del AMBA (Zavalía Lagos et al., 2022).

Los equipos de ACS que más se usan en Argentina se muestran en la Figura 2. Aunque sin normas de eficiencia energética ni seguridad, existen dos tipos de equipos de ACS de uso muy frecuentes en viviendas de bajos recursos. Por un lado, están los *Calefones eléctricos con ducha (Cal\_EE)*. Estos equipos tienen un pequeño reservorio de agua caliente (20-35 litros) que se calienta mediante una resistencia eléctrica para una ducha corta. Son económicos y comunes en viviendas de bajos recursos con servicio eléctrico, pero requieren al menos 15 minutos de preparación previa. Por otro lado, los *calentadores instantáneos eléctricos (Chuveiros o Ducha\_EE)*, calientan agua para la ducha de forma instantánea, pero requieren alta potencia eléctrica, generando picos de consumo y posibles riesgos de seguridad. Son populares en Brasil. Ver Figura 2.

## Consumo Energético - RA 2022

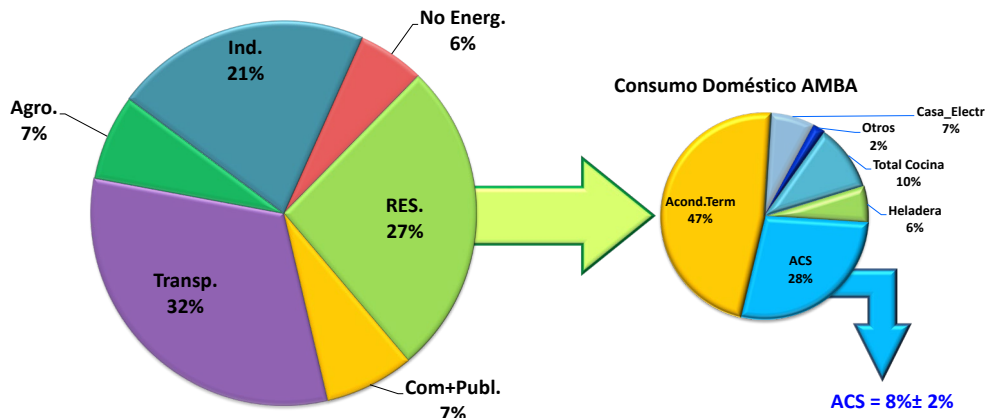


Figura 1 . Distribución del consumo final de energía en Argentina. Izquierda, consumo final para el año 2022. Derecha, distribución del consumo doméstico en el AMBA.

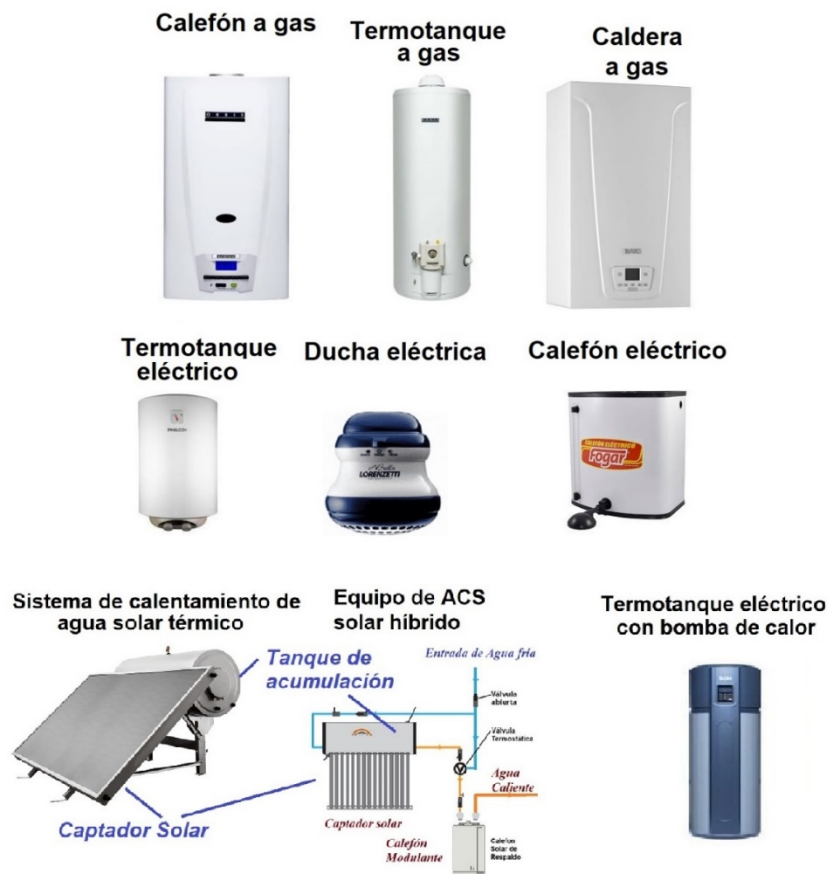


Figura 2. Arriba: equipos convencionales a gas. Línea media: principales equipos de ACS convencionales eléctricos, más usados en Argentina. Tercera fila: sistema solar térmico con apoyo de calefón modulante a GN y termotanque eléctrico con Bomba de Calor.

La distribución de tipos de equipos usados para ACS en Argentina se puede ver en la Figura 3, así como su clasificación según el tipo de energía que consumen. En dicha figura se presentan a la izquierda la distribución de insumos energéticos usados para ACS, mientras que a la derecha la distribución de tipo de equipos instalados en Argentina para ACS.

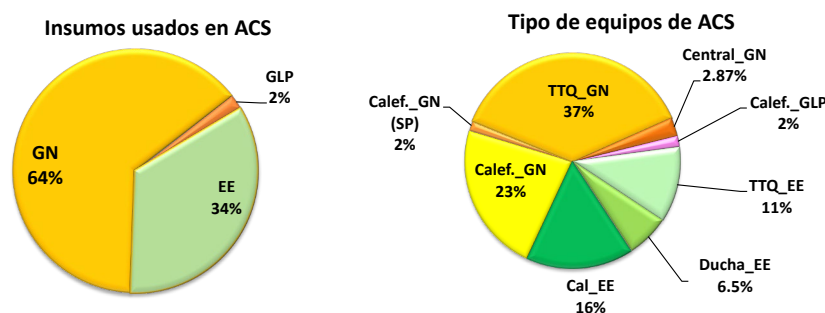


Figura 3. Izquierda, insumos energéticos utilizados en ACS en Argentina. Derecha, distribución de los distintos tipos de artefactos usado para ACS. TTQ\_GN: termotanque a gas; Calef\_GN: calefón a gas con piloto; Calef\_GN(SP): calefón a gas sin piloto; Central GN: calderas a gas natural.

En Argentina, es común que los equipos de ACS tengan consumos pasivos significativos, como los asociados a las llamas piloto o al consumo de mantenimiento de la temperatura en los termotanques. (Iannelli et al., 2016). Estos consumos pasivos pueden ser comparables al consumo necesario para calentar un volumen  $V_{Est} = 180$  litros de agua al día a  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ , que es lo que una familia de 3 o 4 personas necesita en el país y en buena parte del mundo (Meireles et al., 2022). Este consumo corresponde a tres duchas diarias, de 50 litros/persona/día, más el lavado de vajilla (30 litros); partiendo de una temperatura media del agua fría de  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para llevar este  $V_{Est}$  a la temperatura de confort  $T_c = 42\text{ }^{\circ}\text{C}$ , es necesario unos  $5,2\text{ kWh/día}$ . En los termotanques eléctricos (TTQ\_EE), el consumo pasivo está asociado a los consumos de mantenimiento del agua caliente, en general del orden de 1 a  $6\text{ kWh/día}$  dependiendo de la calidad de la aislación térmica del tanque de acumulación, y en los termotanques a gas (TTQ\_GN) estos consumos son aún mayores. (Iannelli et al., 2016) Según la Encuesta ENGHO del INDEC con datos de 2018, (INDEC, 2022), alrededor del 73 % de los equipos de ACS en Argentina tienen algún tipo de consumo pasivo.

Por otro lado, los sistemas solares térmicos híbridos<sup>1</sup> (ST+Calef. Mod.) (Iannelli et al., 2016) y los termotanques que calientan agua con bombas de calor (TTQ\_EE(B.C.)) o también conocidos como *Heap Pump Water Heaters* o *HPWH* (U.S. E.I.A., 2023), (Juanicó y Bove, 2021), ya están disponibles en el mercado local y son uno de los equipos más eficientes de ACS en el mercado. Su incidencia todavía es muy pequeña en el parque de equipos actuales, no obstante, sus ventas están aumentando a nivel global y local. Quizás la mayor barrera de estas tecnologías son sus altos costos iniciales de entre 2 a 2,5 veces mayor a los convencionales.

En este trabajo, por un lado, se midieron los consumos de calentamiento de agua en modo normal de uso y los de mantenimiento de varios termotanques eléctricos de uso habitual en Argentina, así como también termotanques eléctricos con Bomba de Calor. Con esos datos, se analiza la ventaja de utilizar un temporizador (*timer*) de encendido para reducir los consumos pasivos de los equipos. Por otro lado, se discuten algunas estrategias de bajo costo para reducir el consumo de agua y de energía.

## CONSUMOS PASIVOS DE MANTENIMIENTO EN TERMOTANQUES

Los sistemas de calentamiento de agua con tanque de acumulación de agua caliente, o termotanques, son sistemas que cuentan con un quemador (los sistemas a gas) o resistencia eléctrica los eléctricos (EE), que periódicamente se encienden para mantener el agua caliente entre dos temperaturas prefijadas por el usuario, en general en el entorno de unos  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La razón de usar esta temperatura aparentemente alta en relación con la temperatura de confort ( $T_c \approx 42\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), está asociada a las recomendaciones internacionales de inhibir la reproducción de las bacterias de la *Legionella* en los tanques de acumulación de agua caliente. (U.S. C.D.C., 2024) Esta recomendación está asimismo implícita en las normas nacionales de ensayo de los equipos, como la NAG314 (ENARGAS, 2019). En los sistemas a gas, además existe una llama piloto, que generalmente consume entre  $0,3$  a  $0,5\text{ m}^3/\text{día}$ , proporciona parte de esta energía al agua y sirve para encender el quemador. Así, los termotanques, aun sin consumo de agua

<sup>1</sup> Sistema solar térmico complementado con un sistema de energía convencional (Iannelli y otros, 2016).

caliente, tienen un consumo pasivo de mantenimiento debido a las inevitables pérdidas de calor por el tanque.

En los termotanques eléctricos, la situación es parecida, desde luego no hay consumo de piloto, pero sí consumo pasivo de mantenimiento asociado a las pérdidas del calor de los tanques, que se compensa con el encendido periódico de la resistencia eléctrica. En estos equipos, es posible realizar medidas de consumo total y pasivos, usando un simple medidor de consumo eléctrico asociado al termotanque. Por ejemplo, con un termotanque eléctrico, usado en una vivienda en uso habitual, es posible medir su consumo medio diario, registrando el consumo del equipo cada 8 o 12 horas por un par de días. En las Figura 4 y Figura 5 se muestran los resultados de dos casos medidos con esta metodología, en situaciones de uso real en viviendas. En la Figura 4 se ensayó un termotanque eléctrico de 40 litros, clase “D” en eficiencia energética, en un hogar con dos convivientes, con un consumo aproximado de 100 l/día. Se registraron por separado el consumo en uso normal (graficado con rombos violetas), el consumo solo de mantenimiento (sin uso de agua caliente; graficado con triángulos verdes), y además se registró el consumo con uso habitual de ACS pero con un temporizador (*timer*), que activa el calentamiento del termotanque por solo 75 min (con cruces rojas), previo a su uso para duchas (no se consideran otros consumos de agua caliente). Nótese que, en este caso, el consumo de mantenimiento (3,8 kWh/día), es superior al del calentamiento del agua misma (2,2 kWh/día). Por su parte en la Figura 5 se ensayó un termotanque eléctrico de 80 litros clase “A” en un hogar de cuatro convivientes. En este caso, al ser un tanque más moderno, y Clase “A” con y una mejor aislación térmica, el consumo pasivo resulto de solo 0,93 kWh/día. Nótese en todos estos casos la importancia de los consumos pasivos en este tipo de equipos.

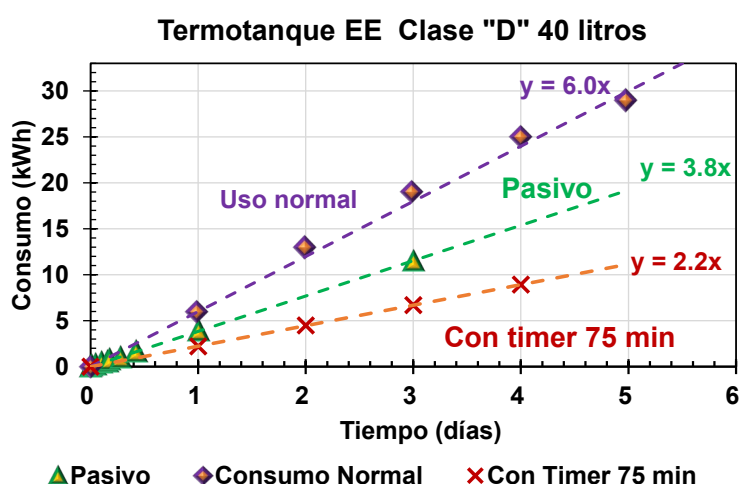


Figura 4. Ensayo de consumo con un termotanque eléctrico clase “D” en un hogar de dos convivientes. Rombo violetas: uso normal. Triángulos verdes: consumo pasivo (sin uso de agua caliente). Cruces rojas: uso habitual de ACS, pero con un temporizador (*timer*).

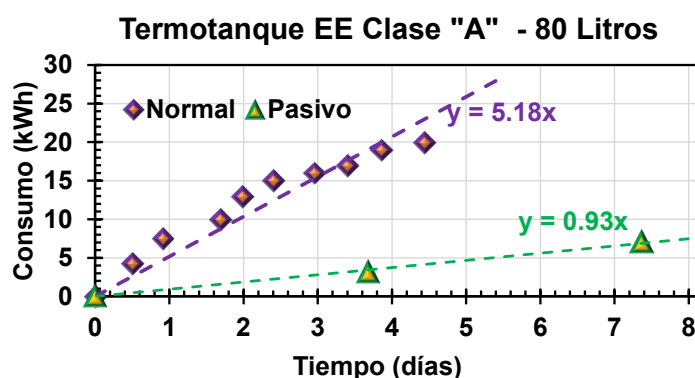


Figura 5. Ensayo de consumo con un termotanque eléctrico clase “A” en un hogar con cuatro convivientes. Rombo violetas: consumo en uso normal. Triángulos verdes: consumo pasivo (sin uso de agua caliente).

Por su parte, en la Figura 6, se muestra los resultados de un termotanque eléctrico de 60 litros, de una marca con mucha penetración en el mercado argentino. Se trata de un modelo originalmente catalogado como clase “C” con mejoras en la aislación térmica, pero aún sin etiqueta de eficiencia energética. Por esta razón se lo designa como Clase “C mejorado”. El ensayo de este equipo se realizó en los laboratorios de INTI con la metodología que se detalla en la sección siguiente.

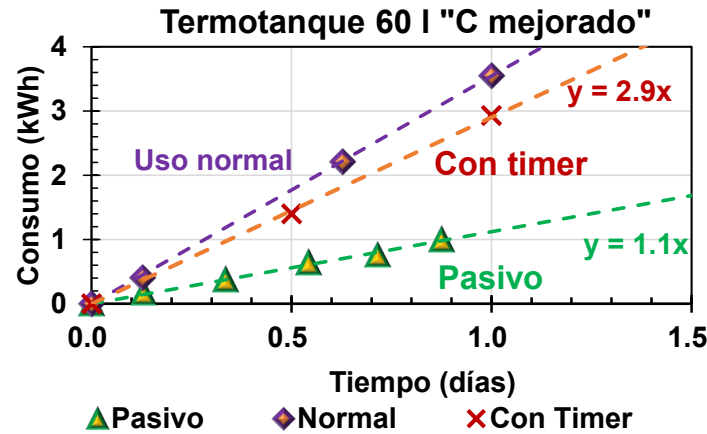


Figura 6. Ensayo de consumo con un termotanque eléctrico de 60 litros, clase “C mejorado”. Ensayo realizado en laboratorio, con la metodología descrita en el apéndice A.

Con todos estos datos, se puede evaluar las ventajas de usar un *timer* (temporizador) para reducir los consumos pasivos de los equipos. Los resultados se resumen en la TABLA 1. Como se ve, el uso de un temporizador o *timer*, que encienda el calentamiento total del tanque, aproximadamente 2 horas antes del uso de agua caliente para las duchas, puede generar ahorros en consumo que van del 17 % al 44 %. El tiempo de ajuste del *timer*, depende de la potencia de la resistencia y del tamaño del tanque, muchos fabricantes indican este tiempo de calentamiento en sus especificaciones, pero en general varía para los equipos domésticos de Argentina entre 1 a 2 horas aproximadamente.

Desde luego, a medida que la aislación térmica de termotanque es mejor, las pérdidas de calor se reducen y el consumo de mantenimiento disminuye. Por lo tanto, los termotanques con aislación térmica pobre tienen menos eficiencia y mayor consumo pasivo. Lo interesante, es que justamente en estos equipos es donde el resultado de uso de *timer* es más efectivo. Desde luego, si se activa el encendido y apagado manualmente, el efecto es el mismo.

## ARREGLO EXPERIMENTAL PARA LOS ENSAYOS DE EFICIENCIA DE TERMOTANQUES

Los ensayos de laboratorio de los termotanques se realizaron con el equipo dentro de una sala climatizada a  $T_A = 20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ . Se midieron las temperaturas del agua interior del tanque en dos puntos, uno inferior y otro superior y se consideró para el análisis la temperatura promedio de estas. Además, se medía la temperatura de la sala minuto a minuto al igual que todas las temperaturas: del agua interior y a la entrada y salida del tanque. Asimismo, se monitoreaba la temperatura de la superficie exterior del aparato. En cada uno de los ensayos, se medía el consumo de energía eléctrica con *dataloggers* en cada ensayo con una precisión del orden del 1 %.

La metodología de los ensayos seguía las recomendaciones de la norma NAG 314 (ENARGAS, 2019). Se medían los consumos del termotanque, sin extracción de agua, es decir los consumos de mantenimiento por al menos 24 horas. Seguidamente se repetían los ensayos con extracción de agua. De este modo era posible separar los consumos del servicio de provisión de agua caliente propiamente dicho y el de mantenimiento en cada caso. En los ensayos con consumo de agua, se determinaron dos consumos de agua caliente equivalentes a dos duchas con agua a 40 °C, de 50 litros cada una, y con un caudal de aproximadamente 6 litros por minuto, con un intervalo de 20 minutos entre cada una durante



el cual el termotanque estuvo encendido en todos los ensayos, tanto los que utilizaron temporizadores como los que no.

Para los ensayos en condiciones normales de uso, sin temporizador, se realizaron las mediciones durante 24 horas seguidas con el termotanque manteniendo el agua caliente como en el funcionamiento normal, y se monitoreó el consumo energético durante todo el periodo. En otro ensayo diferente, se simula el comportamiento del temporizador o *timer*. Se realizan dos extracciones de agua en dos días consecutivos. Para ello se realizó un ensayo previo con las dos extracciones de agua descritas anteriormente, luego del cual se apagó el termotanque hasta el día siguiente. A las 22 horas exactas después de las extracciones previas, se encendió el termotanque, y dos horas después se realizaron las mismas extracciones, luego de las cuales el termotanque fue apagado hasta el día siguiente. De este modo, se logra una medición de 24 horas durante la cual, un termotanque que está previamente enfriándose de extracciones del día anterior, es encendido dos horas antes de realizar las mismas extracciones, y luego es apagado hasta el día siguiente para repetir la misma acción. Vale aclarar que en nuestro laboratorio contamos con medidores calibrados tanto de consumo de electricidad como de gas, y de temperaturas.

*Tabla 1. Consumo en condiciones de uso normal y de mantenimiento, para distintos termotanques eléctricos. El consumo normalizado de 3 personas corresponde a un volumen de consumo diario de  $V_{Est} = 180$  litros/día a 42 °C, quinta columna.*

|         | Consumo medido kWh/día | Litros/día | Pasivo kWh/día | Consumo para 180 l/día kWh/día | Consumo con Timer kWh/día | Ahorro % 180 l/día |
|---------|------------------------|------------|----------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------|
| TTQ D   | 6,0                    | 100        | 3,8            | 7,8                            | 4,3                       | 44%                |
| TTQ C+  | 3,5                    | 100        | 1,2            | 5,4                            | 4,3                       | 19%                |
| TTQ A   | 5,3                    | 200        | 0,93           | 4,9                            | 4,0                       | 17%                |
| TTQ -BC | 3,3                    | 180        | 1,6            | 3,3                            | 1,9                       | 42%                |

Nótese, asimismo, que aún en los equipos más eficientes, el efecto de un temporizador es efectivo, por lo que convendría considerar su incorporación en todos los termotanques de uso doméstico.

## TERMOTANQUE CON BOMBA DE CALOR

Una de las tecnologías más recientes y eficientes para proveer servicio de ACS son los termotanques con bombas de calor también conocidos por su nombre en inglés *Heat Pump Water Heaters* o HPWH (U.S. D.O.E., s.f. b). Los HPWH funcionan utilizando electricidad para alimentar una bomba de calor que extrae calor del aire circundante y lo utiliza para calentar el agua, en lugar de generar calor directamente con electricidad o gas. Este enfoque mejora la eficiencia energética, ya que las bombas de calor pueden ser de dos a cuatro veces más eficientes que los calentadores estándares, dependiendo de las temperaturas ambiente y de calentamiento del agua. Dado que, como vimos, el consumo de ACS es uno de los principales consumos domésticos en Argentina, los HPWH podrían llevar a una sustancial reducción de la energía utilizada para este fin. Varios estudios muestran que las eficiencias de estos equipos son comparables con los sistemas solares térmicos híbridos (Juanicó y Bove, 2021). Estos sistemas pueden instalarse en diversos entornos, como hogares, hoteles, hospitales y edificios comerciales.

Para nuestro ensayo se utilizó un termotanque de 280 litros, de una conocida marca internacional que fabrica y distribuye sus productos en el país. Los detalles de este estudio se publicaron en forma separada (Romero et al, 2018), (Cozza et al., 2018). Para la determinación de la eficiencia se siguieron las pautas de la norma NAG 314, del ENARGAS (ENARGAS, 2019). Al igual que en los casos anteriores, se midió el consumo energético del equipo para una extracción de agua caliente de 180 litros diarios y se determinó su consumo pasivo de mantenimiento a lo largo de una semana. Los resultados de este ensayo se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados del ensayo de eficiencia de un termotanque de 280 litros operado con bomba de calor o HPWH.

| Termotanque de 280 litro con Bomba de Calor |             |            |
|---------------------------------------------|-------------|------------|
| <b>COP<sup>2</sup></b>                      | <b>2,91</b> |            |
| Consumo de Agua                             | 180         | Litros/día |
| Energía Util                                | 5,12        | kWh/día    |
| Consumo Pasivo                              | 1,55        | kWh/día    |
| Consumo Total                               | 6,67        | kWh/día    |
| Consumo electrico efectivo                  | 3,31        | kWh/día    |
| Rendimiento                                 | 202 %       |            |

## OTRAS ESTRATEGIAS DE BAJO COSTO DE AHORRO DE AGUA Y ENERGÍA

Dada la alta significación de los consumos pasivos (o de mantenimiento) en los sistemas de ACS con tanques de acumulación de agua (termotanques), creemos que el uso de temporizadores o *timer* asociados a los termotanques eléctricos puede ser una solución simple y económica para reducir sus consumos eléctricos y consecuentemente el valor de sus facturas en energía.



Figura 7. Aireadores de grifos (izquierda) y flor de duchas grandes y aireadas (derecha). Estos sistemas pueden reducir los consumos de uso de agua en un 25 % al 50 % (U.S. D.O.E., s.f. a), (NeoPerl, 2024).

Una alternativa similar por lo asequible y simple es usar coberturas aislantes de termotanques (de fibra de vidrio o lana de roca de 6 cm de espesor) para mejorar o complementar la aislación térmica de los tanques de acumulación de agua. Esta es una técnica muy eficaz usada en EE.UU. y la UE. (U.S. D.O.E., s.f. a), que persigue el mismo fin, reducir los consumos de mantenimiento del agua caliente. Sin embargo, el uso de *timers* tiene mayor simplicidad y bajo costo, de 10 a 30 USD.

Si al uso de *timers*, agregamos el uso de *aireadores* en grifos (Clean Energy Resource Teams, 2023), (NeoPerl, 2024), de agua caliente y fría y flores de duchas más grandes y aireadas, la reducción del consumo de agua puede ser del orden del 25 % al 50 %. Estas reducciones en el consumo de agua por supuesto se reflejan también en el uso de energía en ACS. El costo de una docena de aireadores y una nueva flor para ducha puede costar unos 25 USD por vivienda. Vale aclarar que, en edificios de varias plantas como los que hay en la mayoría de las ciudades Argentina, toda el agua que se usa primero debe ser bombeada a un tanque de acumulación en el último piso (terrazza) que requiere de considerable energía, y por ende ahorrar en la cantidad de agua consumida también genera un ahorro en energía demanda para su bombeo.

<sup>2</sup> COP: Coeficiente de Performance. Energía entregada (térmica) sobre la energía consumida (eléctrica).

En definitiva, con una inversión del orden de 30 a 50 USD/por vivienda, se podrían lograr ahorros en el calentamiento de agua sanitaria del orden o mayores al 50 % de sus valores actuales.

Dado que un sistema convencional eléctrico de ACS eficiente, clase “A”, tiene un costo moderado, y el consumo de energía en este servicio depende fundamentalmente de este artefacto, hay mucho potencial para reducir este consumo. Por ejemplo, con los costos actuales de la electricidad en el AMBA, la amortización de un nuevo termotanque eléctrico clase A, de unos 350 USD de costo inicial, a un costo de 0,12 USD/kWh y una tasa interna de retorno del 7 % anual en dólares, se podría amortizar en 3,5 años, con los ahorros logrados a partir de los consumos actuales.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha abordado la importancia del consumo de Agua Caliente Sanitaria (ACS) en el contexto energético de Argentina. Al igual que en muchos otros países, el ACS representa uno de los principales consumos domésticos. Varios estudios indican que, en hogares sin acceso a redes de gas natural, el ACS es el principal consumo, representando aproximadamente el 35 %  $\pm$  5 % del consumo eléctrico. Además, se ha identificado que, en sistemas de ACS con tanque de acumulación de agua, como los termotanques, los consumos pasivos relacionados con el mantenimiento del agua caliente constituyen una parte significativa de este consumo energético.

Este trabajo destaca que la implementación de temporizadores o *timers* en termotanques eléctricos puede reducir el consumo eléctrico de mantenimiento de agua caliente entre un 20 % y un 40 %, lo cual puede traducirse en una disminución significativa en los costos de las facturas de energía. Además, al combinar estas medidas con otras similares, como el uso de aireadores en grifos y cabezales o flores de ducha que reducen el flujo de agua entre un 25 % y un 50 %, es posible lograr ahorros energéticos en ACS de cerca del 50 % o más, según el caso. Es importante destacar, que estos sistemas no sólo ahorran energía de ACS sino también agua, lo cual es de mucha relevancia en localidades con escases de ella. Así, estas estrategias no solo son efectivas para reducir el consumo y los costos, sino que también contribuyen de manera sustentable a disminuir las emisiones de carbono, lo que convierte a la eficiencia energética y la sostenibilidad en herramientas muy valiosas para mitigar las emisiones y el costo de las facturas de energía.

## AGRADECIMIENTOS

Mucho del trabajo realizado aquí, pudo lograrse por la activa y gentil colaboración del Laboratorio de la empresa Tonka, de Victoria, Buenos Aires. En particular agradecemos la colaboración de Ricardo Bazán, Gerardo Becker, y Pedro Friedrich. También agradecemos a al Ing. Roberto Prieto de ENARGAS por su apoyo en la realización de este proyecto. A Nicolas Monti, por permitirnos usar su casa para la realización de parte de estos ensayos.

## REFERENCIAS

- Clean Energy Resource Teams. (2023). Faucet aerators are great for water and energy savings, but when should you use them? Recuperado el 1/10/2024, de:  
<https://www.cleanenergyresourceteams.org/faucet-aerators-are-great-water-and-energy-savings-when-should-you-use-them>
- Cozza, P., Romero, P., Fiora, J. y Gil, S. (2018). Ensayo de eficiencia de un termotanque accionado por una bomba de calor. INTI-UNSAM.
- ENARGAS. (2019). Normativa: Grupo 3 - Artefactos. Recuperado el 1/10/2024, de:  
<https://www.enargas.gob.ar/secciones/normativa/normas-tecnicas-items.php?grupo=3>
- Eurostat. (2022). Energy use in households in 2020. Recuperado el 1/10/2024, de:  
<https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20220617-1>
- Iannelli, L., Prieto, R. y Gil, S. (2016). Eficiencia en el calentamiento de agua. Consumos pasivos en sistemas convencionales y solares híbridos. PETROTECNIA, 4, 86-95.
- INDEC. (2022). Encuesta Nacional de Gastos de los Hogares 2017-2018. Uso hogareño de la energía. [https://www.indec.gob.ar/ftp/cuadros/sociedad/engho\\_2017\\_2018\\_uso\\_energia.pdf](https://www.indec.gob.ar/ftp/cuadros/sociedad/engho_2017_2018_uso_energia.pdf)

- Juanicó, L. y Bove, I. (2021). Efficient heating of sanitary water with heat pump. *ENERLAC*, V(1), 94-104.
- Meireles, I., Sousa, V., Bleys, B. y Poncelet, B. (2022). Domestic hot water consumption pattern: Relation with total water consumption and air temperature. *Ren.&Sust. Energy Rev.*, 157, 112035.
- Ministerio Economía Argentino. (2022). Balance Energético Nacional de la República Argentina, año 2022. Recuperado el 1/10/2024, de: [https://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/informacion\\_del\\_mercado/publicaciones/energia\\_en\\_gral/balances\\_2022/balance\\_2022\\_V0\\_horizontal.xlsx](https://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/informacion_del_mercado/publicaciones/energia_en_gral/balances_2022/balance_2022_V0_horizontal.xlsx)
- NeoPerl. (2024). Water and Energy - Saving Products. Recuperado el 10 2024, de: <https://www.neoperl.com/global/en/home/products/water-and-energy-saving>
- Trotta, G. y Lorek, S. (2018). Consumers and energy efficiency. Stock taking of instruments targeting household energy efficiency. *EUFORIE - European futures for Energy Efficiency*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27730.96967/1>
- U.S. C.D.C. (2024). Monitoring Building Water - Legionella. Recuperado el 10 1, 2024, de: U.S. Center for Disease Control and Prevention: [https://www.cdc.gov/control-legionella/php/guidance/monitor-water-guidance.html#cdc\\_generic\\_section\\_1-measure-water-temperature](https://www.cdc.gov/control-legionella/php/guidance/monitor-water-guidance.html#cdc_generic_section_1-measure-water-temperature)
- U.S. D.O.E. (s.f. a). Do-It-Yourself Savings Project: Insulate Water Heater Tank. U.S. Department of Energy. Recuperado el 10 1, 2024, de: <https://www.energy.gov/energysaver/do-it-yourself-savings-project-insulate-water-heater-tank>
- U.S. D.O.E. (s.f. b). Heat Pump Water Heaters. Recuperado el 10 1, 2024, de: U.S. Department of Energy: <https://www.energy.gov/energysaver/heat-pump-water-heaters>
- U.S. E.I.A. (2023). Units and calculators explained: Degree Days. Recuperado el 10 1, 2024, de: U.S. Energy Information Administration: <https://www.eia.gov/energyexplained/units-and-calculators/degree-days.php>
- Zavalía Lagos, R., Iannelli, L. y Gil, S. (2022). Anatomía del Consumo Residencial Argentino -Uso Racional y Eficiente del Acondicionamiento Térmico. In N. Coppari, S. Jensen, M. Iglesias, & V. Cañadas (Eds.), *Futuros Energía* (pp. 144-172). San Martín - Buenos Aires: Fund. UNSAM y ASSoc. Argentina para el Progreso de las Ciencias. <https://aargentinapciencias.org/serie-futuros/>

## **ENERGY SAVING IN DOMESTIC WATER HEATING. USE OF TIMER IN ELECTRIC WATER HEATERS, AND OTHER DEVICES.**

**ABSTRACT:** This study analyzes the impact of domestic hot water (DHW) consumption on total residential energy consumption in Argentina and its impact on household budgets. In countries with temperate and cold climates, such as Argentina, DHW constitutes one of the main domestic energy consumptions. This analysis focuses on electric water heaters, which account for more than 15% of the country's DHW equipment. It shows how the installation of timers, both automatic and manual, can reduce their electricity consumption by 20% to 40%. Moreover, this solution is equally effective when used as a complement to solar thermal systems. The study also explores other low-cost measures, such as the use of aerators on taps and showers, which can generate combined savings of more than 50% in water and energy consumption.

**Keywords:** Energy efficiency, domestic hot water efficiency, passive consumption. Timers, water heating with heat pumps.

## **SIMULACIONES CON ANSYS CFD Y ENERGYPLUS DE UN CULTIVO DE TOMATE EN UN INVERNADERO DE LA CIUDAD DE LA PLATA**

**Natalia M. Vásquez<sup>1</sup>, Santiago Aguilar Ferraro<sup>2</sup>, Pablo M. Demetrio<sup>2</sup>, Erica Y. Sánchez<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires (CIFICEN). Campus Universitario, C.P. 7000 - Tandil. Argentina. <http://www.cificen.gob.ar/>

Tel. 0249-4439840 e-mail: [nmunoz@ifas.exac.unicen.edu.ar](mailto:nmunoz@ifas.exac.unicen.edu.ar)

<sup>2</sup>Centro de Investigación del Medioambiente (CIM), Universidad Nacional de la Plata. Bbv. 120 n° 1489 – 1 er. Piso. <http://cim.conicet.gov.ar>.

**RESUMEN:** Se presentan los resultados de mediciones de las condiciones ambientales, interiores y exteriores, de un ciclo completo de cultivo de tomate en un invernadero de 960 m<sup>2</sup> con cubierta de polietileno. Se realizaron dos modelos tridimensionales para las simulaciones CFD y EnergyPlus, con el objetivo de estudiar el uso de ventiladores en días críticos de elevadas temperaturas. Los resultados en ambas simulaciones son descritos teniendo en cuenta las variables involucradas en la toma de decisiones, tendientes a reducir el consumo energético de los ventiladores. Se estudiaron 4 escenarios, dos de ventilación natural y dos de ventilación forzada. Los resultados preliminares indican que la ventilación natural se vuelve efectiva cuando la temperatura externa está dentro del rango óptimo de temperatura para el cultivo. Para días críticos, se debe tener en cuenta que el uso de ventiladores no puede reducir la temperatura interna por debajo de la temperatura externa.

**Palabras clave:** simulación numérica, invernaderos agrícolas, condiciones reales de uso, ventilación de interiores.

### **INTRODUCCIÓN**

La reducción del consumo energético en la industria de los invernaderos es un objetivo crucial para el desarrollo sostenible, especialmente en el contexto del crecimiento poblacional. Según proyecciones de las Naciones Unidas, la población mundial aumentará un 72% entre 1995 y 2050, superando los 9.000 millones de habitantes para ese año, con una perspectiva de comenzar a disminuir recién en 2080 (Alcalde, 2024). Para entonces, se prevé una reducción de los déficits alimentarios, un aumento en el consumo per cápita de alimentos en países con carencias y una diversificación de la dieta para eliminar deficiencias nutricionales específicas. El uso de nuevas tecnologías en procesos agroindustriales, como la medición de variables en los cultivos, el uso de sensores y las simulaciones numéricas, permite una mejor comprensión de los parámetros físicos involucrados en el funcionamiento de los invernaderos (López et al., 2023).

El cinturón frutihortícola de La Plata es una región productiva clave en Argentina, se encuentra en la zona IIb según la norma IRAM 11603, caracterizada por veranos relativamente cálidos con temperaturas máximas superiores a 30 °C, inviernos que rara vez descienden por debajo de 0 °C, y una amplitud térmica que no supera los 14 °C. Esta región se destaca, además, por el uso predominante de la tecnología de invernadero (Martínez et al. 2019). Según una estimación hecha con imágenes satelitales, la superficie bajo cubierta del área del Gran La Plata, en 2016 fue de 5462 ha (Miranda, 2017). La temperatura óptima para el crecimiento del tomate en invernaderos oscila entre 21°C y 35°C, con un rango de humedad entre 60-85% y una ventilación que debe exceder las 40 renovaciones de aire por hora (ASAE, 1981).

El objetivo de simular un invernadero utilizando dos herramientas de cálculo surge de la necesidad de abordar problemas relacionados con los ciclos de cultivo, principalmente para mitigar el impacto de los días extremos de frío y calor, mejorar el confort de las personas que operan el invernadero y alargar los tiempos de operación minimizando los costos energéticos asociados. En Argentina se han realizado diversos trabajos a largo de todo el territorio que involucran herramientas para determinar pérdidas de calor en invierno (Iriarte et al., 2001), mejoras y diseños de invernaderos en climas fríos patagónicos (González, 2012; Juanicó et al., 2011) y diseños integrados de secado y aprovechamiento térmico (Quiroga et al., 2013). Las simulaciones numéricas también han tenido avances en los últimos años como una herramienta para describir, evaluar y predecir el comportamiento térmico en invernaderos teniendo en cuenta las condiciones climáticas locales (Chiarito et al. 2022; Ávalos y Miguel, 2023).

EnergyPlus permite realizar cálculos simultáneos de los efectos radiativos y convectivos en las superficies interiores y exteriores, posibilitando ejecutar simulaciones anuales hora a hora que combinan los efectos de calefacción, refrigeración, ganancias internas, ventilación cruzada y natural, entre otras opciones (EnergyPlus, 2024; Marino et al., 2019). Por otra parte, la simulación computacional de la dinámica de los fluidos (CFD) permite alcanzar la solución simultánea de ecuaciones de conservación de masa, momento y energía, considerando las condiciones turbulencias causadas por obstáculos, y permitiendo observar zonas de estancamiento y recirculación de aire (Aguilar Ferraro et al., 2023).

Según Constantino et al. (2021), el consumo energético para el control climático en invernaderos ventilados mecánicamente puede incrementar significativamente los costos de producción. Mientras que el cultivo de tomates en campo abierto requiere aproximadamente 0.26 kWh por kilogramo, considerando tanto la energía térmica directa como la eléctrica, el cultivo en invernaderos climatizados demanda alrededor de 17.5 kWh por kilogramo. Además de ello, el desarrollo de modelos de simulación es una tarea compleja debida a la falta de un marco normativo adecuado para la evaluación del consumo energético de los invernaderos. En Argentina, la resolución N° 44/2001 de la Secretaría de Gobierno de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación establece los requisitos técnicos y legales para la construcción de invernaderos en general. De manera similar, la norma EN-13031-1 de la Unión Europea, se enfoca únicamente en las normas para el diseño estructural y la construcción de invernaderos, ofreciendo escasas directrices para la evaluación del rendimiento energético de los mismos.

En este trabajo se propone la aplicación articulada y complementaria de dos softwares, ANSYS CFD y EnergyPlus, para analizar escenarios de ventilación y optimización de la temperatura interna de un invernadero agrícola con cultivo de tomate. De este modo, se busca evaluar la fiabilidad de cada método, describir de forma adecuada los procesos físicos de transferencia de calor y masa que ocurren en el invernadero y analizar las diferencias en la interpretación de los flujos asociados al uso de ventiladores en días críticos de temperatura.

## DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL INVERNADERO

El invernadero bajo estudio se ubica en la Estación Experimental Julio Hirschhörn de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la UNLP, en La Plata, Provincia de Buenos Aires (Lat.: 34°52' S) Long.: 57°58' O). Es un invernadero de tipo parabólico, de 24 metros de ancho por 40 metros de largo. Posee una altura de 6 metros en su parte más alta y 4,5 metros en los límites laterales. Este invernadero posee 3 módulos y está orientado en dirección SE-NO. La envolvente de la construcción es de polietileno de 150  $\mu\text{m}$  de espesor, conductividad 0.3 W/mK, densidad 920 kg/m<sup>3</sup>, calor específico 1900 J/kg y absorptividades térmica, solar y visible iguales a 0.9, 0.7 y 0.35, respectivamente.

Para las simulaciones del invernadero de la Estación Experimental Julio Hirschhörn (Figura 1), se utilizaron mediciones horarias in situ de la temperatura interna ( $T_i$ ) y la temperatura de suelo ( $T_s$ ) en °C, correspondientes al período 1/1/2024 al 8/2/2024, a fin de comparar los datos de salida de las simulaciones. La misma es registrada con promedios horarios a través de sensores de una estación automática Davis Advance Pro II, ubicada en el centro del invernadero a 1,5 m de altura. La temperatura del suelo a -10 cm (registrado con equipo: Pace XR 440 Data logger con sensores PT 940 -Pace Scientific-) medida dentro del invernadero se utilizó como dato de entrada en las simulaciones, lo que evita el uso de modelos, que, si bien se encuentran incorporados en EnergyPlus, dependen del coeficiente



de evapotranspiración y de parámetros térmicos y ópticos de la hoja del cultivo, que muchas veces son aproximados y en consecuencia acarrean más incertidumbre a la simulación.



Figura 1: Vista satelital del invernadero (izquierda). Vista frontal del invernadero (derecha). Estación experimental Julio Hirschhörn.

La ventilación natural del invernadero se opera manualmente a través de una puerta principal, dos aberturas laterales y tres aberturas cenitales. Esta operación se activa cuando el sensor de temperatura, ubicado en la parte central del invernadero, a 1.5 m de altura, registra una temperatura de 23 °C. Las características de los diferentes tipos de aberturas se indican en la Tabla 1. El ángulo efectivo, medido en grados, se determina desde el norte en el sentido de las agujas del reloj hasta la línea normal exterior de la abertura. La diferencia de altura  $\Delta h$ , se calcula restando, en metros, la altura del punto medio de la abertura con respecto al nivel de presión neutral, que es el punto donde no hay movimiento de aire porque las presiones del aire interior y exterior son iguales (ASHRAE, 2017). En este trabajo, se considera que el nivel de presión neutral del invernadero es igual a 3 m.

Tabla 1: Características de las áreas efectivas de ventilación natural del invernadero.

| Tipo             | Cantidad | Área de<br>apertura (m <sup>2</sup> ) | Ángulo<br>efectivo (°) | $\Delta h$ (m) |
|------------------|----------|---------------------------------------|------------------------|----------------|
| Puerta principal | 1        | 7.42                                  | 315                    | 1.4            |
| Lateral 1        | 1        | 116                                   | 45                     | 1.5            |
| Lateral 2        | 1        | 116                                   | 225                    | 1.5            |
| Cenital          | 3        | 60                                    | 45                     | 3.0            |

## METODOLOGÍA

### *Simulaciones de ventilación natural y forzada en EnergyPlus*

Se realizaron simulaciones del invernadero para un periodo de un año, desde el 8/2/2023 hasta el 8/2/2024. Sin embargo, en este trabajo se analiza un día de verano en particular con el objetivo de realizar una comparación preliminar de los resultados obtenidos en EnergyPlus y ANSYS CFD. Primero, se analizaron las simulaciones del invernadero cuando estaba completamente cerrado; luego, se incorporaron las aberturas una a una. En el caso de los escenarios con ventiladores, las simulaciones se realizaron considerando que la puerta principal permanece abierta, dado que su área, comparada con la de las otras aberturas, es pequeña y puede representar así las infiltraciones naturales del invernadero.

Para simular el efecto del uso de ventilación forzada se utilizó el grupo *Fan:ZoneExhaust*, como condición de input, que se caracteriza por estar ubicado dentro de una zona térmica en lugar de funcionar como una parte de un sistema de aire acondicionado y calefacción. En la configuración de estas simulaciones se consideró que, comercialmente, existen diversos tipos de ventiladores diseñados para invernaderos que distribuyen el aire de manera uniforme, disminuyendo las diferencias de temperatura y humedad, con el objetivo de reducir el estrés térmico en las plantas. Estos ventiladores suelen tener tamaño entre 0.4 y 0.5 m y producen un caudal de entre 1.9 y 2.6 m<sup>3</sup>/s, generando una diferencia de presión de 50 Pascales (Pa) a flujo pleno. El tamaño de los ventiladores elegidos para este estudio tomó

en cuenta la información disponible en internet de empresas dedicadas a la comercialización de ventiladores para invernaderos.

El archivo de datos de entrada para EnergyPlus es posible descargarlo en formato. epw para EnergyPlus. Desde POWER - Prediction of Worldwide Energy Resources (2021), se descendieron datos de estimaciones satelitales hora a hora de: radiación solar global medida sobre una superficie horizontal  $I_H$  en  $W/m^2$  (incluyendo tanto la radiación solar directa, así como la radiación solar difusa de cielo), radiación solar difusa  $I_{DH}$  en  $W/m^2$ , Temperatura externa  $T_e$  en  $^{\circ}C$ , Humedad relativa externa  $H_e$  en %, presión del aire externo  $P_e$  en  $Pa$ , velocidad del viento en  $m/s$  y dirección del viento en grados.

### ***Simulaciones de ventilación natural y forzada en ANSYS-CFD***

ANSYS-CFD permite analizar diferentes configuraciones estructurales y operacionales de ventilación natural y forzada. Entre las condiciones iniciales y de contorno relevantes para este estudio se destaca el perfil logarítmico de velocidad externa y dirección del viento, temperatura ambiente interna y externa, las propiedades térmicas de la envolvente, el agregado de cultivo en la simulación y el área y la diferencia de presión para la representación de los ventiladores (Tabla 2). Estos valores corresponden a un día específico de todo el ciclo de cultivo, un día considerado crítico, obtenido del análisis con EnergyPlus. Para el día y el momento considerado crítico, que es el mediodía, se realiza un promedio de las variables en las que la dirección del viento permanece constante, esto a fin de representar un estado estacionario.

Cabe destacar que la selección del perfil logarítmico radica en que es uno de los modelos de preferencia ampliamente aplicados para estimar la velocidad del viento hasta alturas de unos 300 m, por su relación de sencillez y bondad de descripción (Guevara Díaz, 2013; Lopez Llanusa et al., 2017).

*Tabla 2: información meteorológica y de operación de los ventiladores utilizados en ANSYS Fluent*

| <b>Datos de entrada en ANSYS</b>     | <b>Valor ingresado</b>                           |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Velocidad de viento (perfil)         | $(0.38[m/s]/0.4)*\log(\text{Position.y}/0.2[m])$ |
| Dirección de viento                  | norte                                            |
| Temperatura externa del aire         | 29 $^{\circ}C$                                   |
| Salto de presión de los ventiladores | 50 $Pa$                                          |

Los escenarios estudiados con ventilación natural fueron: EVN1) Ventilación restringida: puerta como única abertura abierta y EVN2) Ventilación completa: puerta, ventanas laterales y cenitales abiertas.

En ANSYS Fluent además de simular el invernadero se representa el dominio de estudio como un recinto que incluye el interior del invernadero y estructuras aledañas, a fin de obtener una buena definición de la capa límite atmosférica, y con ello una buena descripción del aire que ingresa al invernadero. Las dimensiones del recinto fueron consideradas en relación a lo que Rojas Risher (2015) propone: la longitud del frente del dominio (lado del ingreso al invernadero) se estima como tres veces la longitud del invernadero y siete veces en la parte trasera. La altura del dominio se define como cinco veces la altura del invernadero. Por lo expuesto, el dominio de modelado, considerado los obstáculos aledaños, consta de 172 metros de ancho y 574 metros de largo con una altura de 35 metros.

La malla de buena calidad, según los estadísticos de *Skewness* y *Orthogonal Quality*, se construyó con el método patch Independence, utilizando ANSYS Meshing. Se utilizaron esquemas de discretización espacial de segundo orden para todas las ecuaciones. Se empleó un método de acoplamiento de presión-velocidad con un esquema SIMPLE. Se adoptó el modelo de turbulencia k-epsilon estándar (Launder & Spalding, 1974) que asume una turbulencia isotrópica para describir el transporte turbulento. Este modelo demostró brindar una buena concordancia con los datos experimentales en muchos estudios de flujos de ventilación del invernadero (Bartzanas et al., 2004; Bournet et al. 2007; Majdoubi et al. 2009; Molina-Aiz et al. 2017). En la entrada del fluido al dominio (inlet), a partir de los datos de campo, se incorpora un perfil de viento logarítmico a fin de describir de manera representativa las variaciones de la velocidad del viento con la altura. Los límites laterales y el límite superior del dominio se establecieron como condición de simetría. Para este primer abordaje no se tuvo en cuenta el intercambio de calor y humedad entre el cultivo su entorno.

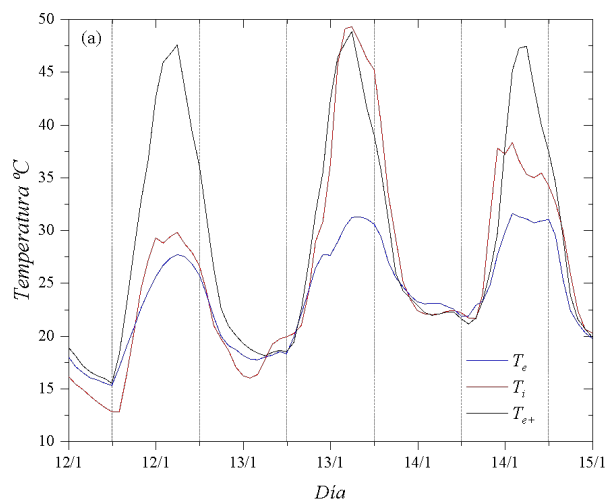
Con respecto al cultivo, se generan hileras de 2 metros de altura por 0,80 m de ancho y 34 m de largo, con una separación de las líneas de cultivo de 2 m. Esta es representada como una zona porosa, que se describe con tres parámetros: permeabilidad ( $\alpha$ ), coeficiente de resistencia inercial (C2) y porosidad ( $\gamma$ ). Para los fines de este trabajo, se utilizaron los valores encontrados por Haxaire, Boulard y Mermier (2000) en túnel de viento con plantas de tomate. Sus valores fueron  $\alpha = 0,017 \text{ m}^2$  ( $1/\alpha=58,825$ ),  $C2=0,31 \text{ m}^{-1}$  y  $\gamma=20\%$  (0,2) (Molina-Aiz, 2010). Con respecto a los ventiladores, estos se disponen geométricamente en las paredes del invernadero a una altura de 2.5 metros, por encima del cultivo, y se asigna una diferencia de presión de 50 Pa en ANSYS Fluent. La simulación de este invernadero fue validada según se describe en Aguilar Ferraro et al (2023).

### **Integración EnergyPlus y ANSYS-CFD**

En función de los resultados estimados con EnergyPlus, referidos al caudal volumétrico necesario para refrigerar el interior del invernadero a una temperatura cercana a la temperatura ambiente externa, se calculó la cantidad de ventiladores comerciales que serían necesarios instalar para responder a tal condición. Es así que 38 ventiladores de 0.47 m de diámetro y  $2.25 \text{ m}^3/\text{s}$  son requeridos para dar respuesta a la estimación de EnergyPlus. Los mismos fueron distribuidos en las paredes laterales del invernadero, con una distancia aproximada de 3 m, a 2.5 m de altura de modo de quedar ubicados por encima de los cultivos. Los escenarios estudiados con ventilación forzada fueron: EVF1) 38 ventiladores activos y EVF2) 19 ventiladores activos.

## **RESULTADOS**

Los resultados de las simulaciones en EnergyPlus muestran una buena correlación con las mediciones en invierno y verano en función de los datos disponibles. La figura 2 muestra la evolución de la temperatura para los días comprendidos entre el 12 y el 15 de enero del 2024. La línea azul representa la temperatura externa, la línea roja representa la temperatura interna medida y la línea negra representa el resultado de las simulaciones del invernadero completamente cerrado. En los escenarios descritos, la condición de  $T_i \gg T_e$ , es la que indicaría pensar en manejos donde debería considerarse la ventilación para mantener rangos óptimos para la producción del cultivo. El día 13/1/2024 es posible notar una escasa o nula ventilación.



*Figura 2: Evolución de las temperaturas externa e interna del invernadero. Azul: Temperatura externa, rojo: temperatura interna medida, negro: resultados de la simulación. Simulaciones sin ventilación natural*

Como era de esperar, los resultados simulados mostraron que el uso de ventiladores no puede reducir la temperatura interna por debajo de la temperatura externa. En general los ventiladores tienen el efecto de acelerar la evaporación del agua y así generar una sensación de refrescamiento. Por lo cual, llevar la

temperatura interna hasta la temperatura de confort del cultivo (entre 23 y 25 °C) requiere de la simulación de un sistema de refrigeración distinto al uso de ventiladores. Esta línea, a profundizar en trabajos futuros, se considera de interés, ya que se puede, además, proveer calor durante el invierno aumentando el confort de operación y evitar daños en el cultivo por heladas.

La Figura 3 muestra las salidas de ambos programas de simulación para los escenarios de ventilación natural. En A) se observa  $T_e$  medida por la NASA (línea azul),  $T_i$  medida en el invernadero (línea roja),  $T_i$  EVN1 corresponde a la ventilación con puerta abierta únicamente (línea negra) y,  $T_i$  EVN2 a la simulación del invernadero totalmente abierto EVN2 (línea rosa punteada).

El escenario EVN1, simulado con ANSYS CFD, evidencia una disminución de 9,2 °C, siendo esta una temperatura crítica acorde a los rangos de temperatura óptima presentados en la introducción. No obstante, la ventilación natural simulada en EVN2 resulta efectiva y se visualiza en la temperatura alcanzada que se aproxima a la temperatura ambiente externa. Si bien ambos programas arriban a estas mismas conclusiones, ANSYS muestra un nivel de descripción mayor en referencia a los gradientes espaciales de temperatura que completan la descripción inicial del escenario simulado con EnergyPlus.

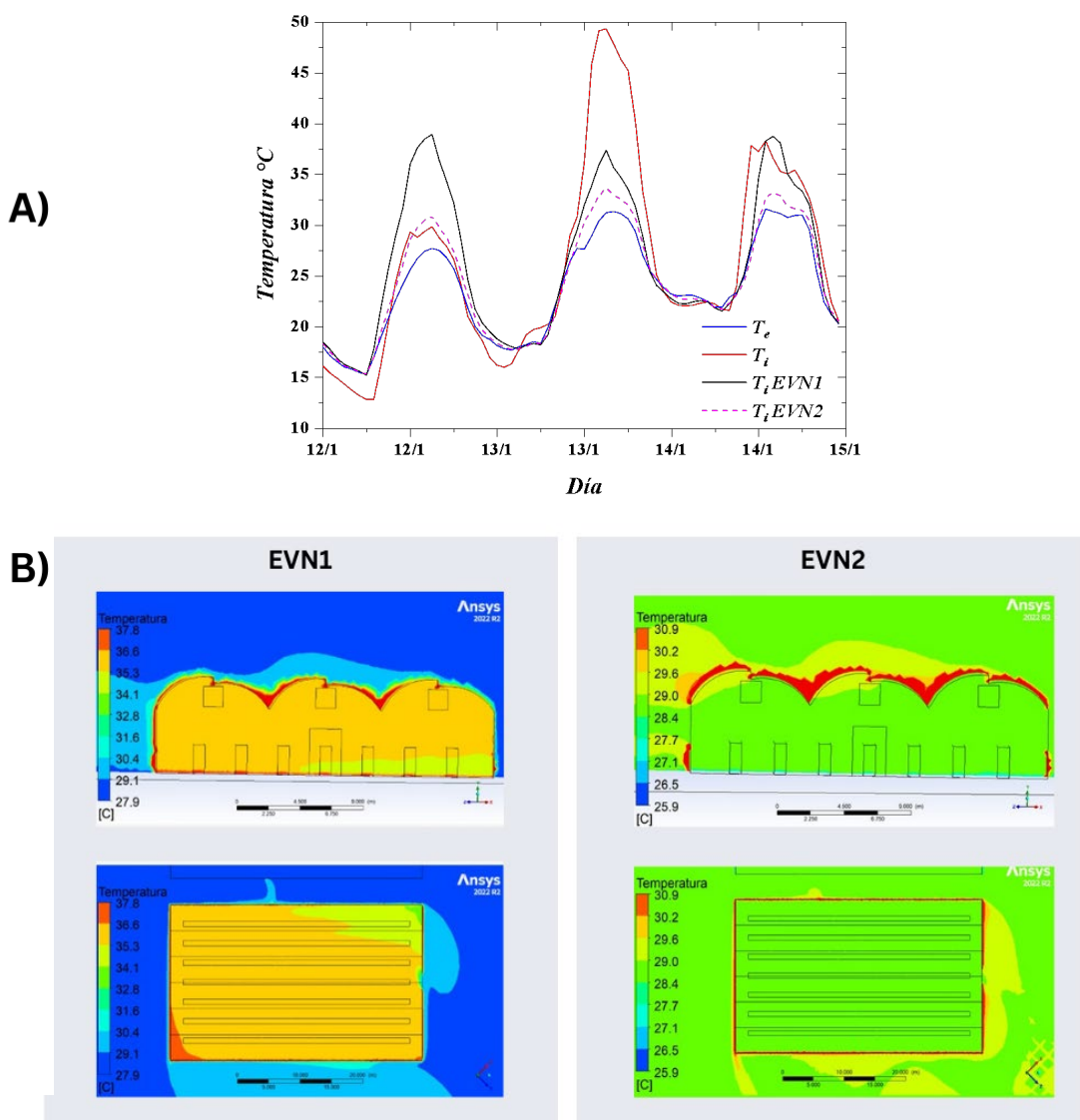


Figura 3: A) Evolución de las temperaturas simuladas con EnergyPlus para el escenario EVN1 (sólo puerta abierta) y EVN2 (todas las aberturas abiertas), en comparación a las marchas de temperatura externa y temperatura interna, en grados Celsius. B) Salidas gráficas de ANSYS CFD, para la temperatura en EVN1 y EVN2. La imagen superior corresponde a un plano vertical que corta al invernadero a la mitad y la imagen inferior corresponde a un plano horizontal a 1.5 m del suelo.

Con EnergyPlus, se encontró que la apertura de la puerta frontal tiene un efecto significativo en el enfriamiento del invernadero, disminuyendo en casi 5 °C la temperatura interna al mediodía. Además, es posible reducir la temperatura hasta alcanzar la temperatura externa si se provee, usando ventiladores, un caudal de aire desde el exterior de 85 m<sup>3</sup>/s a flujo pleno durante las horas de luz, es decir, considerando que los ventiladores generen un salto de presión de 50 Pa. Tomando una referencia de un valor de caudal promedio por ventilador, se simuló con ANSYS CFD la incorporación de 38 ventiladores a una diferencia de presión de 50 Pa.

La figura 4 muestra las salidas de ambos programas para el escenario de ventilación forzada. En A) se muestra la evolución de las temperaturas simuladas para un escenario de ventilación natural restringida (EVN1) en comparación con uno con ventilación forzada (EVF2),  $T_e$  estimado mediante POWER (línea azul),  $T_i$  medida en el invernadero (línea roja),  $T_i$  EVN1 corresponde a la ventilación con puerta abierta únicamente (línea rosa) y,  $T_i$  EVF2 a la simulación del invernadero con la puerta abierta y el caudal equivalente a 38 ventiladores EVF1 (línea negra). En el caso de B) se simuló con ANSYS CFD una distribución de los 38 ventiladores, a 2.5 m de altura en todo el perímetro del invernadero, y adicionalmente se simuló un escenario con 19 ventiladores activos (EVF2) para evaluar los gradientes espaciales de la temperatura al disminuir la cantidad de ventiladores sugeridos por EnergyPlus. Los resultados mostraron que, al disminuir la cantidad de ventiladores activos, no se observan diferencias significativas con respecto a la temperatura, ni tampoco respecto a la tasa de ventilación (Tabla 3). Los resultados indican que el caso EVF1, presenta una mejor homogeneización o circulación del aire, observándose la misma temperatura en los planos presentando en comparación con el caso EVF1, aunque cabe aclarar que el caso EVN2 con ventilación natural completo indico lo mismo sin tener que recurrir a la ventilación forzada y un gasto energético.

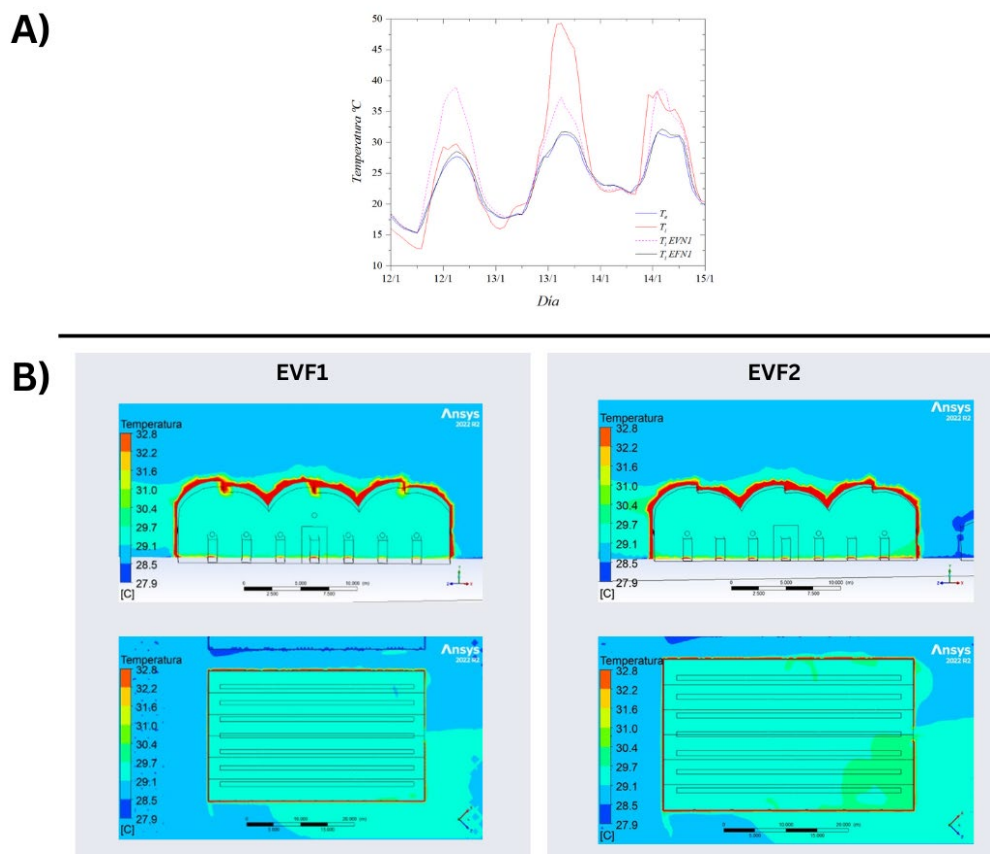


Figura 4: A) Evolución de las temperaturas simuladas con EnergyPlus para el escenario EVN1 (sólo puerta abierta) y EVF1 (38 ventiladores), en comparación a las marchas de temperatura externa y temperatura interna, en grados Celsius. B) Salidas gráficas de ANSYS CFD, para la temperatura en EVF1 y EVF2 (19 ventiladores). La imagen superior corresponde a un plano vertical que corta al invernadero a la mitad y la imagen inferior corresponde a un plano horizontal a 1.5 m del suelo.

En la tabla 3 se presentan los resultados de temperatura y ventilación de las cuatro simulaciones realizadas con ANSYS Fluent, los dos casos de ventilación natural y los dos casos de ventilación forzada. El dato de temperatura se obtiene en el centro del invernadero a 1.5 m de altura, en el mismo lugar donde se encuentra un sensor de variables meteorológicas, entre ellas temperatura, a fin de comparar con los datos medidos para la fecha evaluada (13/1/2024). El valor observado en el sensor en el interior del invernadero para el espacio temporal estudiado en ANSYS es de 45,4 °C.

*Tabla 3: resultados de temperatura y tasa de ventilación para los 4 caso simulados con ANSYS fluent*

|                     | <b>Simulación</b> | <b>Temperatura (°C)</b> | <b>Ventilación (h-1)</b> |
|---------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|
| Ventilación natural | EVN1              | 36.2                    | 3.1                      |
|                     | EVN2              | 29.1                    | 131.6                    |
| Ventilación forzada | EVF1              | 29.5                    | 114.8                    |
|                     | EVF2              | 29.7                    | 113.6                    |

Estos resultados indican que, para un día crítico, cuando no hay ventilación como es caso EVN1 la temperatura resulta elevada y no se considera óptima para el cultivo de tomate. Tampoco resulta óptima la tasa de renovación del aire. Cuando se agrega ventilación natural, abriendo todas las ventanas, se reduce inmediatamente la temperatura y aumentan las renovaciones de aire, generando un clima óptimo para el cultivo. Por otra parte, los resultados de ventilación forzada sugieren lo mismo que EnergyPlus, que el uso de ventiladores no puede reducir la temperatura interna por debajo de la temperatura externa (29 °C). Con respecto a la ventilación de los escenarios con ventiladores (EVF1 y EVF2), se observa también que se cumple con los recomendados por la ASAE.

Con respecto a la diferencia de temperatura obtenida entre el dato medido en el interior del invernadero y ANSYS CFD, vale aclarar que con ANSYS no se tienen en cuenta los efectos de la radiación solar en la simulación, a diferencia de EnergyPlus, que el valor de temperatura obtenido en la simulación se acerca mucho más al medido realmente en el interior del invernadero, ya que EnergyPlus si considera los efectos de la radiación.

## CONCLUSIONES

Se realizaron simulaciones en EnergyPlus para un ciclo completo de cultivo de tomate al interior de un invernadero ubicado en la ciudad de la Plata provincia de Buenos Aires, Argentina. Los resultados para un día seleccionado en verano, donde la temperatura interna medida superó la temperatura de confort del cultivo, fueron comparados con los resultados de una simulación estacionaria en ANSYS – CFD. Se encontró que la ventilación natural es efectiva siempre y cuando las condiciones externas sean favorables, es decir, que la temperatura externa no supere la temperatura media de confort del cultivo (29 °C), ya que se debe tener en cuenta el efecto de la radiación solar. En el caso de que la temperatura externa supere ese valor por varios días consecutivos, es necesario contar con un sistema de aire acondicionado que permita ingresar una masa de aire refrigerado al cultivo.

Los dos programas de simulación consideran el efecto de la evapotranspiración, sin embargo, ANSYS CFD permite simular los efectos de forma propios del cultivo. Utilizando EnergyPlus es posible establecer la cantidad de equipos de ventilación que permiten reducir la temperatura interior hasta la temperatura ambiente, en este caso fueron 38 ventiladores que fueron simulados en ANSYS CFD con el objetivo de visualizar los flujos de aire y su efecto en la temperatura interior en varios escenarios, caracterizados por diferentes configuraciones de los ventiladores, tanto en tamaño como en ubicación y distribución dentro del invernadero. Con esto es posible proporcionar a las partes interesadas una evaluación eficaz del rendimiento energético de nuevas tecnologías o soluciones innovadoras que permitan mejorar el clima interior de los invernaderos ya existentes aumentando el ahorro de energía y la producción de los cultivos.



## REFERENCIAS

- Aguilar Ferraro S., Del Sole M.B., Demetrio P.M., Colman L. J. E., Garbi M., Martínez S.B., Porta A., Sánchez E.Y. (2023). Aplicación de Ansys CFD como herramienta para la gestión de sistemas hortícolas bajo cubierta utilizados en la plata y alrededores. 40 (10), 393-402
- Alcalde S. (2024). La población mundial crece menos de lo previsto. National Geographic España. [https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/poblacion-mundial-crece-mucho-menos-previsto\\_19098](https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/poblacion-mundial-crece-mucho-menos-previsto_19098)
- ASAE. American Society Of Agricultural Engineers. (1981). Heating, Ventilating and Cooling Greenhouses. American Society of Agricultural Engineers. ANSI-ASAE Standard. 401-404.
- ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Handbook of Fundamentals. Chapter 16. ASHRAE.
- Avalos A. S., Miguel S. (2023). Diseño y simulación térmica de un invernadero andino escolar en estación solar Pocitos, Provincia de Salta. Avances en Energías Renovables y Medioambiente. 27, 33-44.
- Chiarito G., Gómez C. W., González G., Nuruel A., Turdó E. (2022) Análisis de demanda térmica invierno/verano comparada en módulos habitacionales sometidos a condiciones variables en Rosario. Avances en Energías Renovables y Medioambiente. 26, 169-180.
- Bartzanas, T., Boulard, T., Kittas, C. Effect of Vent Arrangement on Windward Ventilation of a Tunnel Greenhouse. Biosystems Engineering (2004) 88 (4), 479–490.
- Bournet, P. E., Ould Khaoua, S. A. y Boulard, T. (2007). Numerical prediction of the effect of vent arrangements on the ventilation and energy transfer in a multi-span glasshouse using a bi-band radiation model. Biosystems Engineering, 98, 224–234.
- Comité Europeo de Normalización – CEN. (2019). EN. Greenhouses – Design and construction – Part 1: Commercial production greenhouses.
- Constantino A., Comba L., Sicardi G., Bariani M., Fabrizio E. (2021). Energy performance and climate control in mechanically ventilated greenhouses: A dynamic modelling-based assessment and investigation. Applied Energy. 288, 116583.
- EnergyPlus Documentation (en línea) (2024). Input Output Reference. Versión 24.1.0 Dirección URL: &lt; <https://energyplus.net/documentation/>> [consulta: 9 de agosto de 2024].
- Guevara Díaz, J. M. (2013). Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica. Terra, 29(46), 81-101.
- González. A. D. (2012). Estudio de la temperatura en un invernadero adosado con orientación norte en la Patagonia Argentina. Avances en Energías Renovables y Medioambiente. 16, 35-42.
- IRAM. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Acondicionamiento Térmico de Edificios. (2011). Clasificación bioambiental de la República Argentina. IRAM, Argentina.
- Iriarte A., García V., Saravia L. (2001). Modelo para la predicción de pérdidas nocturnas y necesidades de calefacción de invernaderos. Avances en Energías Renovables y Medioambiente. 5, 55-60.
- Juanicó L.E., Piacentini R., La Mattina G. (2011). Desarrollo de invernaderos con sistema sustentables de confort térmico. Avances en Energías Renovables y Medioambiente. 15, 1-8.
- Launder B.E. & Spalding D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3, 269–289.
- Lopez, M., et al. (2023). Numerical Simulations for Optimizing Greenhouse Climate Control. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 165, 112578.
- López Llanusa, A., Elena Parnás, V. B., & Cataldo Ottieri, J. (2017). Modelación de capa límite atmosférica para estudios de paneles solares en túnel de viento. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 38(3), 52-64.
- Majdoubi, H.; Boulard, T.; Fatnassi, H.; Bouirden, L., 2009. Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: An experimental and CFD assisted study.
- Marino B.M, Muñoz N., Thomas L.P. (2019). Análisis del comportamiento térmico de un edificio complejo del centro bonaerense a partir de simulaciones con EnergyPlus. Acta de la XLII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 7, pp. 01.01 01.12
- Martínez, S.; Garbi, M.; Andreau, R. (2019). Situación actual de la producción en invernaderos en el cinturón hortícola de La Plata, provincia de Buenos Aires. Libro Invernaderos, Tecnología apropiada en las regiones productivas del territorio nacional argentino (del paralelo 23 al 54). INTA Ediciones.

- Miranda, M. 2017. Superficie de cultivo bajo cubierta en el Gran La Plata, análisis espacial son Sistemas de Información Geográfica -SIG. Periurbanos hacia el consenso. Córdoba.
- Molina-Aiz, F. D. (2010). Tesis Doctoral. Simulación y modelación de la ventilación en invernaderos de Almería mediante la utilización de Dinámica Computacional de Fluidos. Universidad de Almería. Departamento de Ingeniería Rural.
- Molina-Aiz, F.D.; Norton, T; López, A., Reyes-Rosas, A.; Moreno, M.A.; Marín, P.; Espinoza K.; and Valera D. L. (2017). Using Computational Fluid Dynamics to analyse the CO<sub>2</sub> transfer in naturally ventilated greenhouses. Acta Hort. 1182. ISHS 2017.
- Prediction of Worldwide Energy Resources - POWER. (1999). National Aeronautics and Space Administration – NASA. Disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/>. [consulta: 1 de junio de 2024].
- Quiroga M., Condorí M., Durán G., Martínez C., Echazú R. (2013) Sistema integrado de secado y acondicionamiento térmico en un sustrato de propagación. Avances en Energías Renovables y Medioambiente. 17, 27-34.
- Quiñonez J. E., Becchio V., A. Di Fonzo R., Ortiz Hugo G., Hernández A. L (2023). Construcción y análisis térmico de un invernadero en la escuela albergue de Cerro Negro del Tirao. Avances en Energías Renovables y Medioambiente. 27, 169-180.
- Rojas Risher, A (2015). Tesis de grado, Análisis del comportamiento térmico de un invernadero construido en ladera, aplicando dinámica de fluidos computacional. Facultad De Ingeniería, Escuela de Ingeniería Agrícola, Universidad de Costa Rica.

## **SIMULATIONS WITH ANSYS CFD AND ENERGYPLUS OF A TOMATO CROP IN A GREENHOUSE IN THE CITY OF LA PLATA**

**ABSTRACT** The results of measurements of the indoor and outdoor environmental conditions, for a complete tomato crop cycle in a 960 m<sup>2</sup> greenhouse with a polyethylene cover are presented below. Two three-dimensional models were created for the CFD and EnergyPlus simulations, with the aim of studying the use of fans on critical days of high temperatures. The results obtained in both simulations are described taking into account the variables involved in decision-making, aimed at reducing the energy consumption of the fans. Four scenarios were studied, two of natural ventilation and two of forced ventilation. Preliminary results indicate that natural ventilation becomes effective when the external temperature is close to the optimal temperature range for the crop. For critical days, it should be noted that the use of fans cannot reduce the internal temperature below the external temperature.

**Keywords:** numerical simulation, agricultural greenhouses, real conditions of use, indoor ventilation.

## **R161 Y R134A: COMPARACIÓN DE 2 FLUIDOS REFRIGERANTES DESDE EL PUNTO DE VISTA TERMODINÁMICO, TÉCNICO Y AMBIENTAL**

**Pablo Martina<sup>1</sup>, Raquel Aeberhard<sup>1</sup>, M Laura Canteros<sup>2</sup>, Franco Milich<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Termodinámica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, A. Las Heras 727, Resistencia - Chaco

<sup>2</sup>Department of Fluid Dynamics and Thermodynamics, FME, Czech Technical University in Prague, Technická 4, Praga, República Checa  
e-mail: [pablo@ing.unne.edu.ar](mailto:pablo@ing.unne.edu.ar)

**RESUMEN:** Se exponen los resultados obtenidos del estudio de un ciclo ideal de refrigeración a compresión de vapor, utilizando 2 fluidos refrigerantes diferentes: el R161 y el R134a. La comparación entre los mismos se centró en parámetros característicos de cada uno de los 5 puntos del ciclo, obtenidos con el software REFPROP versión 10.0. Los parámetros analizados comprenden temperatura máxima alcanzada, trabajo realizado por el compresor, potencia frigorífica, coeficiente de operación, presión en el condensador y en el evaporador, rendimiento exergético, GWP (Global Warming Potential, potencial de calentamiento global), ODP (Ozone Depletion Potential, potencial de agotamiento de ozono) y ALT (Atmospheric Life Time, Tiempo de vida atmosférico). Los resultados indican que el refrigerante R161 emerge como una opción más completa, con ventajas significativas sobre el R134a en la mayoría de los parámetros evaluados. Su eficiencia termodinámica de 5,51, compatibilidad técnica y perfil ambiental lo posicionan como una alternativa más conveniente y sostenible para aplicaciones de refrigeración y aire acondicionado.

**Palabras clave:** refrigerantes; máquina frigorífica; eficiencia termodinámica; R161; R134a

### **INTRODUCCIÓN**

Los fluidos refrigerantes desempeñan un papel fundamental en el funcionamiento de sistemas de refrigeración y bombas de calor. Estos fluidos circulan dentro de estos sistemas, absorbiendo calor en el evaporador y liberándolo en el condensador. En modo enfriamiento se denominan refrigeradores, enfriadores o equipos de aire acondicionado y, en modo calefacción, se conocen como bombas de calor. Dado que realizan una transformación cerrada o ciclo, su variación de entalpía es nula. Las etapas que describe el refrigerante en un ciclo comprenden compresión, condensación, expansión y evaporación. Luego de este último proceso, el refrigerante repite el ciclo.

La elección correcta del fluido refrigerante depende de muchos factores: las temperaturas fría y caliente, las presiones de trabajo, la miscibilidad del fluido con el aceite refrigerante del compresor, su entalpía de vaporización, etc. A estos parámetros termodinámicos se agregan hoy en día los factores ecológicos ambientales, como ser si perjudica al medio ambiente, si daña la capa de ozono, si contribuye al calentamiento global, su huella de carbono, etc. (IPCC, 2012). También intervienen factores como su toxicidad y su probabilidad de provocar incendios.

Entre los refrigerantes que fueron utilizados para reemplazar al R12, el R134a es el hidrofluorocarburo más popular, dado que ambos poseen propiedades termodinámicas similares. Sin embargo, la enmienda de Kigali por las 28<sup>o</sup> Reunión de las partes del protocolo de Montreal firmada en 2016 (Heath, 2016) subraya la intención de erradicar el uso de los hidrofluorocarburos. Entre los factores más importantes para evaluar el refrigerante más apropiado para reemplazar el R134a, deben evaluarse los requerimientos ambientales, legislaciones locales y además una buena compatibilidad termodinámica. La

compatibilidad termodinámica puede ser crucial a la hora de evaluar el costo económico que conlleva el reemplazo de un refrigerante por otro y su impacto en un modelo de economía circular. Debe poder responder a la pregunta (o al menos acercarse a la respuesta) de “¿En qué medida deben rediseñarse y pueden reciclarse equipos que ya están operando con R134a?”.

Uno de los parámetros de relevancia es el potencial de calentamiento global, **GWP** (Global Warming Potential) y señala la capacidad de un gas de atrapar calor en la atmósfera en comparación con el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Este proceso implica una serie de pasos científicos y cálculos que consideran tanto las propiedades químicas del refrigerante como su comportamiento en la atmósfera.

La fórmula básica para calcular el GWP es la siguiente (Shine et al. 1990) (ecuación 1):

$$GWP_x = \frac{\int_0^T a_x \cdot [x(t)] dt}{\int_0^T a_{CO_2} \cdot [CO_2(t)] dt} \quad (1)$$

Donde:

$a_x$ : es la capacidad de absorción de radiación infrarroja del refrigerante

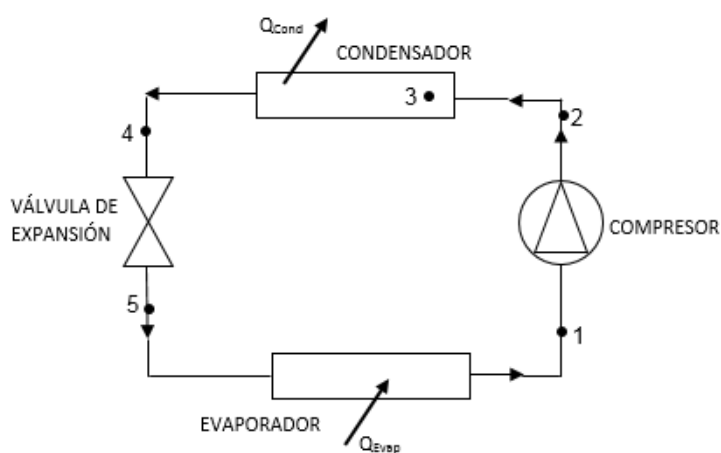
$[x(t)]$ : es la concentración del refrigerante en función del tiempo

$a_{CO_2}$ : es la capacidad de absorción de radiación infrarroja del dióxido de carbono  $[CO_2(t)]$ : es la concentración de CO<sub>2</sub> en función del tiempo

T: es el horizonte temporal (generalmente 100 años).

Para determinar estos valores se utiliza **espectroscopía infrarroja** y modelos atmosféricos complejos, que simulan la dispersión y la evolución del refrigerante en la atmósfera. Estos modelos requieren una gran cantidad de datos y suposiciones sobre las propiedades del refrigerante, las tasas de emisión y las condiciones atmosféricas. Los valores de GWP de diferentes refrigerantes son publicados por organismos científicos, como el IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático), y se actualizan periódicamente a medida que se obtiene nueva información científica y mejoran los modelos de simulación.

Se estudiará el comportamiento de estos dos fluidos en un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor (Cengel y Boles, 2003), integrado por un compresor, un condensador, una válvula de expansión y un evaporador, tal como lo muestra el siguiente esquema de la Figura 1:



*Figura 1: Esquema de la instalación de un ciclo de refrigeración por compresión de vapor*

El evaporador extrae el calor ( $q_{evap}$ ) de la zona fría (heladera, foco frío, pieza, entre otros) y luego el fluido se comprime isoentrópicamente en el compresor accionada generalmente por un motor eléctrico. El compresor comprime el fluido hasta la presión del condensador (punto 2, Figura 1), y allí el fluido ingresa como vapor sobrecalentado al condensador. En el condensador se entrega el calor,  $q_{cond}$ , al foco caliente o atmósfera produciéndose la transformación isobárica 2-3-4 (el punto 3 de inicio de la

condensación se encuentra dentro del condensador, Figura 1). Finalmente, el fluido pasa por la válvula de expansión que reduce isoentálpicamente su presión y su temperatura (transformación isoentálpica 4-5, Figura 1). Este proceso se representa en un diagrama T-s de la siguiente forma (Figura 2):

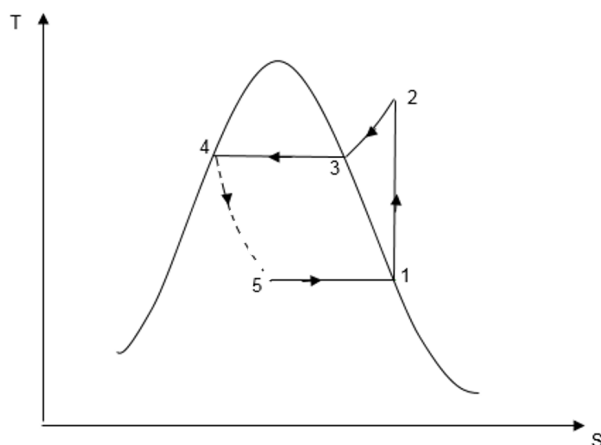


Figura 2: Diagrama T-s para un ciclo de refrigeración

### Refrigerantes

Con el objetivo de encontrar alternativas más sostenibles y eficientes para los sistemas de refrigeración se han seleccionado 2 fluidos con características diferentes, el R134a y el R161. Estos refrigerantes son importantes para varios sectores como ser la industria automotriz, de aire acondicionado, refrigeración comercial e industrial.

Estudios experimentales (Fang et al. 2022, Wu et al. 2012) han demostrado que el refrigerante R161, a pesar de no ser ampliamente utilizado como el R134a, es valorado por su baja toxicidad y por su potencial de calentamiento global relativamente bajo, en comparación con otros refrigerantes como el R22. Su aplicación principal se encuentra en sistemas de refrigeración doméstica y comercial, así como en equipos de climatización de edificios y vehículos, lo que hace interesante su estudio y divulgación.

Las principales características de ambos refrigerantes se mencionan a continuación:

**R134a:** (1, 1, 1, 2-Tetrafluoroetano), es un compuesto químico perteneciente a la familia de los hidrofluorocarbonos (HFC). Su composición química es:  $\text{CH}_2\text{FCF}_3$

Entre sus características más importantes se menciona:

- No tóxico y no inflamable: A diferencia de algunos refrigerantes más antiguos, como el R12, el R134a es seguro en términos de toxicidad y no presenta riesgos de inflamabilidad.
- Buenas propiedades de transferencia de calor y eficiencia en sistemas de aire acondicionado, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en sistemas de refrigeración.

**R161:** (1, 1, 1- trifluoroetano, tiene la siguiente composición química:  $\text{C}_2\text{H}_3\text{F}_3$

- Baja toxicidad, al igual que el R134a, el R161 es no tóxico, lo que lo hace seguro para su uso en sistemas de refrigeración y aire acondicionado.
- No inflamable, lo que reduce el riesgo de accidentes en caso de fugas o mal manejo.
- Compatibilidad con sistemas existentes.
- Eficiencia en la transferencia de calor.

### Software REFPROP

REFPROP (REference fluid PROPERTIES), es un software desarrollado por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) de los Estados Unidos, diseñado para calcular propiedades termodinámicas y de transporte de fluidos. Está especialmente diseñado para trabajar con sustancias puras y mezclas, y es ampliamente utilizado en la industria química, de procesos, y en investigación (Lemmon et al. 2018).

El funcionamiento básico de REFPROP implica ingresar datos específicos sobre la sustancia o mezcla de interés, como composición química, presión, temperatura, y fase (líquido, vapor, o ambos). El programa resuelve las ecuaciones de estado de energía de Helmholtz, para así obtener los parámetros de estado a calcular.

## METODOLOGÍA

Se determinaron, utilizando el software REFPROP versión 10.0, las propiedades de los 5 puntos del ciclo frigorífico (Fig. 2), para cada uno de los gases mencionados anteriormente (R134a y R161).

Para hacer el diagrama T-s se tuvo en cuenta que:

- La compresión es isoentrópica, por lo que  $s_1 = s_2$ .
- En el condensador la presión es constante, por lo que  $p_2 = p_3 = p_4$ .
- La transformación en la válvula de expansión o estranguladora es isoentálpica, por lo que  $h_4 = h_5$ .
- Los puntos 1 y 3 son de vapor saturado (curva límite superior), por lo que  $x_1 = x_3 = 1$ .
- El punto 4 es de líquido saturado (curva límite inferior), por lo que  $x_4 = 0$ .

Para comparar ambos refrigerantes se han evaluado los aspectos enumerados a continuación.

- Coeficiente de efecto frigorífico:

Es la relación entre el efecto deseado (calor extraído en el evaporador) y la energía consumida por el compresor. Calculado mediante Ec. (2):

$$c_{ef} = q_{evap} / w_{comp} \quad (2)$$

Donde:

$q_{evap} = h_1 - h_5$  es el calor extraído del evaporador, en kJ/kg. Se determina a través de la diferencia de entalpías entre la salida y la entrada del evaporador.

$w_{comp} = h_2 - h_1$  es el trabajo entregado al compresor, en kJ/kg. Se determina por la diferencia de entalpías entre la salida y la entrada del compresor.

- Coeficiente de efecto calorífico:

Si el equipo funcionara como bomba de calor, es la relación entre el efecto deseado (calor cedido en el condensador) y la energía consumida por el compresor. Definido por Ec. (3):

$$c_{ec} = q_{cond} / w_{comp} \quad (3)$$

Donde:

$q_{cond} = h_2 - h_4$  representa el calor suministrado al condensador, en kJ/kg. Se establece como la diferencia de entalpías entre la salida y entrada del condensador.

- Variación de exergía en el evaporador

$$q_u = q_{evap} - T_0 \cdot \Delta s \quad (4)$$

Donde:

$T_0$  es la temperatura ambiente, definida como 300 K;

$\Delta s = s_1 - s_5$  es la variación de entropía en el evaporador, en kJ/kg\*K. Es la diferencia de entropías entre la entrada y la salida.



- Rendimiento exergético:

Relación entre el calor útil del evaporador (en valor absoluto) y el trabajo del compresor. Los análisis exergéticos se utilizan para poner de manifiesto la magnitud de las irreversibilidades de los procesos (5):

$$\eta_{EXE} = qu/w_{comp} \quad (5)$$

#### Otros aspectos no relacionados con los parámetros termodinámicos

**Potencial de calentamiento global (GWP):** es una cantidad relativa como consecuencia del calentamiento que provoca un gas cuando está en la atmósfera. Señala la cantidad de calor por una tonelada de un gas liberado a la atmósfera en relación con la cantidad de calor en una tonelada de CO<sub>2</sub> en la atmósfera durante un determinado período de tiempo, (Shine, 1990).

**Potencial de agotamiento de ozono (ODP):** es la cantidad relativa de degradación que se le causa a la capa de ozono.

**Tiempo de vida atmosférico,** o vida útil atmosférica: se refiere al tiempo promedio que una molécula de un compuesto permanece en la atmósfera antes de ser destruida o eliminada mediante procesos naturales, (IPCC, 2012).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Tablas 1 y 2 se presentan los valores obtenidos mediante el programa REFPROP, para el R134a y R161 respectivamente:

*Tabla 1: Valores obtenidos con REFPROP para el refrigerante R134a*

| Estado | Temperatura (K) | Presión (bar) | Densidad (Kg/m <sup>3</sup> ) | Entalpía (kJ/kg) | Entropía (kJ/kg.K) | Calidad de mezcla (Kg/kg) | Fase     |
|--------|-----------------|---------------|-------------------------------|------------------|--------------------|---------------------------|----------|
| 1      | 263,00          | 1,9942        | 9,9846                        | 392,57           | 1,7335             | 1,0000                    | Gas      |
| 2      | 308,52          | 7,6690        | 36,106                        | 420,54           | 1,7335             | Sobrecalentado            | Gas      |
| 3      | 303,00          | 7,6688        | 37,370                        | 414,75           | 1,7145             | 1,0000                    | Gas      |
| 4      | 303,00          | 7,6688        | 1188,0                        | 241,51           | 1,1428             | 0,0000                    | Líquido  |
| 5      | 263,00          | 1,9942        | 36,647                        | 241,51           | 1,1591             | 0,26694                   | Bifásico |
| 6      | 263,00          | 1,9942        | 9,9846                        | 392,57           | 1,7335             | 1,0000                    | Gas      |

*Tabla 2: Valores obtenidos con REFPROP para el refrigerante R161*

| Estado | Temperatura (K) | Presión (bar) | Densidad (Kg/m <sup>3</sup> ) | Entalpía (kJ/kg) | Entropía (kJ/kg.K) | Calidad de mezcla (Kg/kg) | Fase     |
|--------|-----------------|---------------|-------------------------------|------------------|--------------------|---------------------------|----------|
| 1      | 263,00          | 3,0797        | 7,3975                        | 567,69           | 2,4002             | 1,0000                    | Gas      |
| 2      | 319,65          | 10,525        | 22,314                        | 622,48           | 2,4002             | Sobrecalentado            | Gas      |
| 3      | 303,00          | 10,525        | 24,695                        | 594,30           | 2,3096             | 1,0000                    | Gas      |
| 4      | 303,00          | 10,525        | 686,64                        | 265,76           | 1,2253             | 0,0000                    | Líquido  |
| 5      | 263,00          | 3,0797        | 32,013                        | 265,76           | 1,2522             | 0,22359                   | Bifásico |
| 6      | 263,00          | 3,0797        | 7,3975                        | 567,69           | 2,4002             | 1,0000                    | Gas      |

A continuación, se representan los datos en un diagrama T-s, tal como son obtenidos con el software REFPROP (Figuras 3 y 4):

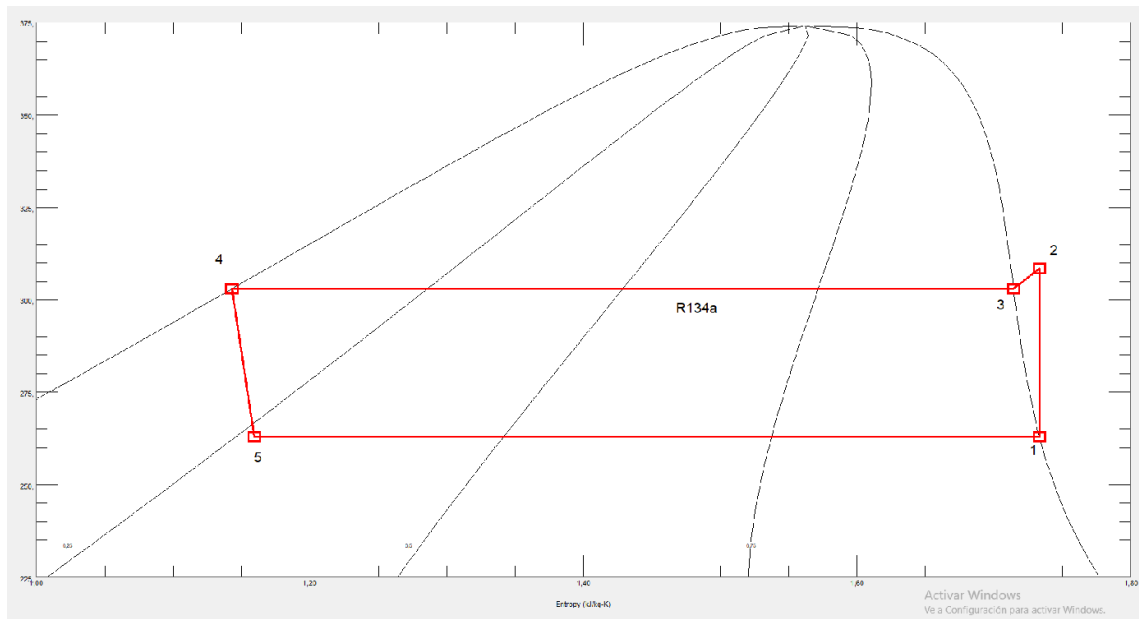


Figura 3: Diagrama T-s obtenido con REFPROP para el refrigerante R134a

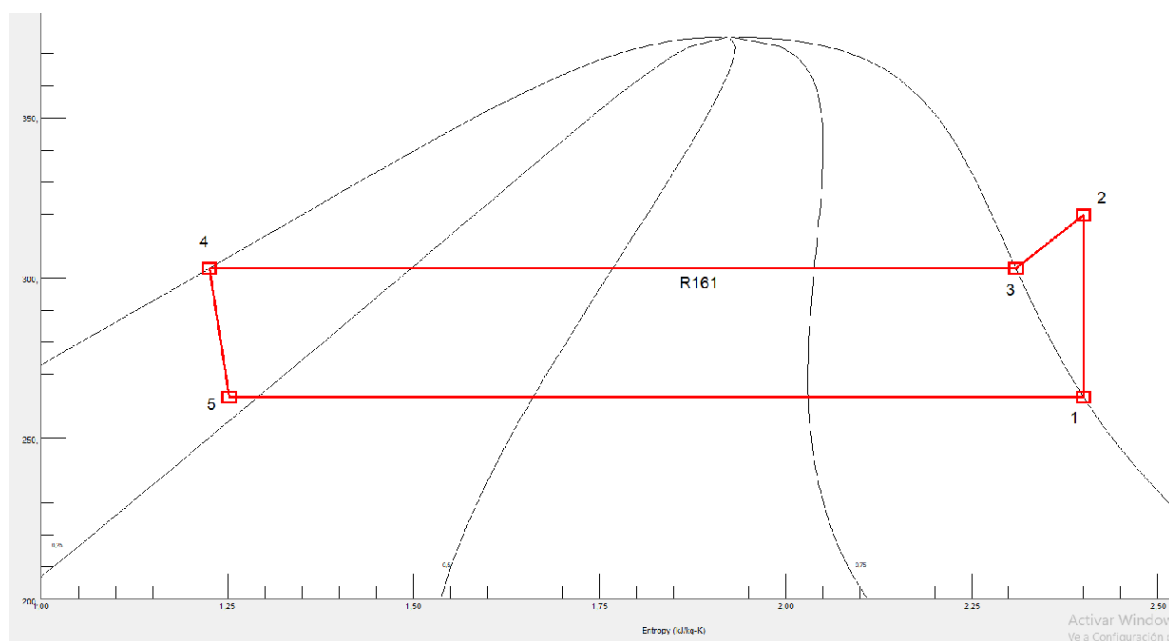


Figura 4: Diagrama T-s obtenido con REFPROP para el refrigerante R161

En la tabla 3 se presentan los resultados alcanzados al calcular algunos parámetros termodinámicos para los dos refrigerantes comparados, tales como: Trabajo entregado al compresor, Calor extraído del evaporador, calor cedido al condensador, coeficiente de efecto frigorífico, coeficiente de efecto calorífico, variación de entropía en el evaporador, etc.:

Tabla 3: Parámetros termodinámicos según el refrigerante utilizado

| PARÁMETROS TERMODINÁMICOS        | R134a  | R161   |
|----------------------------------|--------|--------|
| $(h_2-h_1)$ [kJ/kg]              | 27,97  | 54,79  |
| $(h_1-h_5)$ [kJ/kg]              | 151,06 | 301,93 |
| $(h_2-h_4)$ [kJ/kg]              | 179,03 | 356,72 |
| Máxima temperatura alcanzada [K] | 308,52 | 319,65 |
| $c_{ef}$                         | 5,4    | 5,51   |
| $c_{ec}$                         | 6,4    | 6,51   |
| $\Delta s$ [kJ/kg.K]             | 0,5744 | 0,1480 |
| $q_u$ [kJ/kg]                    | -21,26 | -42,47 |
| $\eta_{EXE}$                     | 0,760  | 0,775  |
| GWP                              | 1.430  | 12     |
| ODP                              | 0      | 0      |
| ALT                              | 14     | 0,21   |

**El trabajo entregado al compresor.** De la Tabla 3 se extrae que el trabajo a entregar al compresor con R161 es casi el doble del trabajo correspondiente al R134a. Teniendo en cuenta sólo este parámetro, convendría usar el R134a.

**El calor extraído del evaporador.** En este caso, el R161 extrae más calor del evaporador, por lo que teniendo en cuenta sólo esta medida sería favorable su empleo.

**El calor cedido en el condensador.** En este parámetro, el calor cedido por el R161 es casi el doble del R134a. Esta energía no se utiliza ya que es calor cedido y perdido hacia el medio ambiente.

**La máxima temperatura alcanzada.** Es la temperatura al final de la compresión (punto 2 de las Figuras 3 y 4). Se advierte que el compresor que utiliza R134a, alcanza una temperatura más baja, por lo que se debería utilizar este refrigerante, debido a que altas temperaturas afectan el funcionamiento mecánico del sistema.

**El coeficiente de efecto frigorífico.** En el presente estudio se observa que el R161 tiene una mayor relación, por lo que este refrigerante es más adecuado para ciertas aplicaciones de refrigeración donde se requiere una alta eficiencia energética.

**El coeficiente de efecto calorífico.** Se advierte que el R161 tiene una mejor relación, por lo que en un equipo funcionando como bomba de calor aprovecharía mejor la energía.

**La variación de entropía en el evaporador.** En el caso de los refrigerantes utilizados, se percibe que la mayor variación de entropía es para el R134a. Dado que la entropía es una medida del desorden o aleatoriedad de un sistema, una mayor variación de entropía indica un mayor cambio en la distribución de energía dentro del sistema, lo que puede tener complicaciones en el rendimiento y la eficiencia de los sistemas de refrigeración que utiliza este refrigerante.

**El calor útil o variación de exergía.** El valor mayor de  $q_u$  del R161 indica que este fluido es más eficiente en la conversión de calor en trabajo útil, lo que lo vuelve beneficioso en aplicaciones donde se requiere una alta eficiencia energética como en sistemas de refrigeración.

**El rendimiento exergético.** El R161 presenta un rendimiento exergético mayor. Este comportamiento implica que el R161 es más eficiente en la conversión de energía en trabajo útil respecto a la misma cantidad de energía del R134a, lo que lo hace más adecuado para aplicaciones donde se maximiza el rendimiento del sistema.

Una vez realizada la comparación de los parámetros termodinámicos, se llevó a cabo el correspondiente análisis desde el punto de vista ambiental y ecológico, para los dos refrigerantes estudiados.

Si bien los parámetros termodinámicos señalaron un comportamiento superior del R161 respecto al R134A, esta diferencia se hace evidente al evaluar los refrigerantes desde el punto de vista ambiental.

El GWP del R161 es de aproximadamente 12 y se considera bajo, en comparación con otros refrigerantes, (Han et al. 2011). Aunque su capacidad de absorción de radiación infrarroja específica no está tan documentada como la del dióxido de carbono o los principales gases de efecto invernadero, se conoce que contribuye al calentamiento global al absorber radiación en ciertas longitudes de onda infrarroja principalmente entre 7 y 13  $\mu\text{m}$ , que corresponden a la región donde la Tierra emite radiación térmica.

El GWP del refrigerante R134a es de alrededor de 1430, según el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). Esto significa que tiene un impacto en el calentamiento global 1430 veces mayor que el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) durante un período de 100 años.

***El potencial de agotamiento del ozono (ODP)*** de los refrigerantes R134a y R161 es cero. Esto significa que no contribuyen a la destrucción de la capa de ozono en la atmósfera. Dado que ambos refrigerantes tienen el mismo ODP, no existen ventajas ni desventajas de uno sobre el otro.

***El tiempo de vida atmosférico.*** El R161 tiene una vida atmosférica relativamente corta, de aproximadamente 0,21 años. Esto significa que, una vez emitido, se descompone rápidamente en la atmósfera, mientras que en el caso del R134a, el ALT es de 14 años, es decir que permanece en la atmósfera durante un tiempo considerable antes de desintegrarse.

## CONCLUSIÓN

El presente trabajo describe algunos de los factores que influyen en la elección de un refrigerante utilizado en sistemas de refrigeración, propiedades que también deben considerarse para minimizar el impacto ambiental. Los diferentes coeficientes y rendimiento del R161 evaluados son muy similares a aquellos del R134a. Sin embargo, es importante destacar que en cuanto al reemplazo directo de un refrigerante por el otro deben tomarse en cuenta las siguientes observaciones:

1. Los rangos de temperatura de trabajo son muy similares, por lo tanto, este no es un factor limitante en cuanto a su reemplazo.
2. Los rangos de presiones presentan un cierto nivel de similitud a excepción de la presión del evaporador. Atención especial es requerida al intentar reemplazar un refrigerante con el otro porque un sistema que opere lejos de la presión de diseño del evaporador de un sistema de R134a debe tener diámetros menos de tubería para soportar la presión que genera el R161 al trabajar en dichas condiciones.

Desde el punto de vista ecológico, el R161 supera al R134a. Aunque no se encuentran valores exactos para la capacidad de absorción infrarroja, en términos de números absolutos (como se hace con el  $\text{CO}_2$ ), se conoce que los refrigerantes R161 y R134a tienen diferentes capacidades de absorción que influyen en su GWP. El R161, con un GWP mucho menor, tiene una capacidad de absorción infrarroja más limitada en comparación con el R134a, lo que lo hace menos dañino para el clima global.

Existen acuerdos y regulaciones internacionales, como el Protocolo de Montreal y la Enmienda de Kigali, que buscan reducir el uso de sustancias con alto GWP, como los hidrofluorocarbonos (HFCs). Al promover el uso de refrigerantes con bajo GWP, se ayuda a reducir la cantidad total de gases de efecto invernadero en la atmósfera, e incentiva a las industrias a desarrollar nuevas tecnologías y refrigerantes con menor impacto ambiental, impulsando la evolución hacia sistemas de refrigeración más ecológicos y sostenibles.

El conocimiento del GWP de un refrigerante es clave para mitigar el cambio climático, cumplir con normativas globales y avanzar hacia un futuro más sostenible.

Dado que sus propiedades son superiores en términos de eficiencia energética, capacidad de refrigeración y menor impacto ambiental se propone al refrigerante R161 como la elección óptima para aplicaciones de refrigeración contribuyendo así a la promoción de prácticas más sostenibles y eficientes.

## AGRADECIMIENTO

Los autores con afiliación en Czech Technical University quisieran agradecer a dicha universidad, que posibilitó el subsidio necesario a través del Concurso de Grants Estudiantiles número SGS23/104/OHK2/2T/12.

## REFERENCIAS

- Canteros, M.L., Polansky, J., 2022. Study of the heat pump for a passenger electric vehicle based on refrigerant R744. *Archives of Thermodynamics*; 2022; vol. 43; No 2; 17-36. DOI: 10.24425/ather.2022.141976
- Cengel Y. A. y Boles M. A, (2003). *Termodinámica*. McGraw-Hill Interamericana.
- Fang Y., Wu M., Guo Z., Ni H., Han X., and G. Chen, (2022). Evaluation on Cycle Performance of R161 as a Drop-in Replacement for R407C in Small-Scale Air Conditioning Systems, *J. Therm. Sci.*, vol. 31, no. 6, pp. 2068–2076, doi: 10.1007/s11630-022-1678-6.
- Han X.-H, Qiu Y., Xu Y., Zhao M., Wang Q., Chen G. (2011). Cycle performance studies on a new HFC-161/125/143a. Mixture as an alternative refrigerant to R404A *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*- ISSN 1862-1775
- Heath, E.A., 2017. Amendment to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer (Kigali Amendment). *International Legal Materials* 56, 193–205. <https://doi.org/10.1017/ilm.2016.2>
- IPCC, (201). Glossary of terms. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, IPCC, Cambridge, UK, and New York, NY, USA. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar3/>
- Lemmon E. W., Bell I. H., Huber M. L., and McLinden M. O., (2018). NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology, doi: <https://doi.org/10.18434/T4/1502528>.
- Shine K., Derwent R., Wuebles D. and Morcrette J., (1990). Radiative Forcing of Climate. *Climate Change: the IPCC Scientific Assessment*, pp. 41-68. Cambridge University Press.
- Wu Y., Liang X., Tu X., and Zhuang R., (2012). Study of R161 Refrigerant for Residential Air-conditioning Applications.

## R161 & R134a: COMPARISON OF 2 REFRIGERANT FLUIDS FROM THERMODYNAMICAL, TECHNICAL AND ENVIRONMENTAL POINT OF VIEW

**ABSTRACT:** The results obtained from the study of an ideal vapor compression refrigeration cycle are presented; 2 different refrigerant fluids are used: R161 y R134a. The comparison between them focused on characteristic parameters of each of the 5 points of the cycle, obtained with REFPROP software version 10.0. The parameters analyzed include: maximum temperature reached, power of the compressor, frigorific power, coefficient of operation, condenser and evaporator pressure, exergetic efficiency, GWP (Global Warming Potential), ODP (Ozone Depletion Potential), and ALT (Atmospheric Life Time). The results indicate that R161 refrigerant emerges as a more complete option, with significant advantages over R134a in most of the parameters evaluated. Its thermodynamic efficiency of 5.51, technical compatibility and environmental profile position R134a as a more convenient and sustainable alternative for refrigeration and air conditioning applications.

**Keywords:** refrigerants, refrigeration machine, thermodynamic efficiency, R161, R134a

## **DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN GENERADOR TERMOELÉCTRICO CON EVAPORADOR CERÁMICO PARA POTENCIALES APLICACIONES EN COMUNIDADES AISLADAS**

**Lucio Perez Sardi<sup>1,2</sup>, Luis Boccaccini<sup>1,2</sup>, Juan P. Martín<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>UTN Regional San Rafael, Avda. Justo José de Urquiza 314, (5600) San Rafael, Mendoza

<sup>2</sup>GruSE, (Grupo de Soluciones Energéticas) liboccaccini@frsr.utn.edu.ar Tel. 549-2604-405353

**RESUMEN:** El objetivo de este estudio es evaluar un prototipo de generador termoelectrico, diseñado para abordar las necesidades energéticas básicas de comunidades aisladas, como la iluminación o la carga de dispositivos de baja potencia, utilizando el efecto Seebeck en celdas de Peltier. Para optimizar la eficiencia térmica, se construyó un evaporador de material cerámico, instalado en la cara fría del generador con el fin de incrementar el gradiente térmico. Este enfoque se comparó con un diseño previo del grupo de trabajo, que utilizaba un disipador de aluminio en la misma posición. Durante la experimentación, se monitorearon y registraron variables clave como temperaturas, humedad, tensión y corriente, bajo condiciones de radiación solar directa en la cara caliente y el evaporador en la cara fría. Se planteó la hipótesis de que, al mejorar la disipación de calor en la cara fría del generador, durante los periodos sin una fuente de calor disponible, sería posible alcanzar la producción energética mínima deseada. Los resultados muestran que el nuevo diseño no ofrece mejoras significativas en comparación con los generadores equipados con disipadores de aluminio en la cara fría, y que no permiten la generación de energía sin una fuente de calor externa.

**Palabras Clave:** Energía, termoelectricidad, diferencial, evaporador y temperatura

### **INTRODUCCIÓN**

Aunque las energías renovables, incluidas las soluciones energéticas de baja potencia, han demostrado ser una opción viable para cubrir las necesidades básicas de comunidades marginadas y aisladas, su implementación en zonas precordilleranas de Argentina se enfrenta a desafíos económicos y técnicos significativos. En estas regiones, donde las economías locales son inestables y basadas en la subsistencia, la adopción de tecnologías energéticas modernas puede resultar prohibitiva debido a los elevados costos iniciales de instalación de los sistemas, como paneles solares o generadores eólicos, que requieren una inversión considerable, la cual muchas veces supera los ingresos anuales de estas comunidades. A esto se suma la necesidad de contar con un mantenimiento especializado, dado que los componentes de estas tecnologías suelen ser sensibles y demandan personal técnico capacitado que, en muchas de estas áreas aisladas, no está disponible localmente, lo que implica mayores costos logísticos y de asistencia técnica. Además, la falta de financiamiento adecuado para proyectos de largo plazo dificulta aún más la adopción de estas soluciones, ya que las comunidades no cuentan con acceso a créditos o subvenciones que les permitan costear la implementación y el mantenimiento continuo de estas tecnologías (Bragagnolo et al., 2022; PERMER et al., 2022). La ausencia de políticas públicas que faciliten mecanismos de financiamiento o subsidios específicos para este tipo de tecnologías acentúa la desigualdad entre estas regiones aisladas y las más desarrolladas, donde las inversiones en energías renovables están más avanzadas. Además, la dependencia de fuentes de energía tradicionales, como la biomasa leñosa nativa, sigue siendo común, aunque su extracción intensiva amenaza la sostenibilidad ambiental y social de estas comunidades (Bratro et al., 2002; INTI-CONICET et al., 2008). Esta problemática se ve exacerbada por la ineficiencia de las tecnologías tradicionales, como los fogones de leña, que presentan una baja eficiencia térmica y generan altos niveles de contaminación. La quema de biomasa en estos dispositivos no solo provoca una mayor deforestación y degradación ambiental, sino



que también tiene graves consecuencias sobre la salud de los usuarios, quienes están expuestos a contaminantes peligrosos como el humo de la combustión incompleta (Tauro et al., 2021). Además, el acceso a la energía eléctrica en muchas de estas comunidades marginadas es prácticamente inexistente, y la falta de infraestructura adecuada para la distribución de electricidad limita severamente las posibilidades de desarrollo económico y mejora de la calidad de vida. Esta carencia no solo impide el uso de tecnologías más limpias y eficientes, sino que también afecta actividades cotidianas esenciales, como la iluminación, la comunicación y el acceso a servicios básicos, perpetuando el ciclo de pobreza y limitando las oportunidades de educación y empleo, lo que exacerba la desigualdad en estas regiones.

Diversos estudios han subrayado la importancia de acceder a fuentes de energía más limpias y eficientes en contextos aislados. Por ejemplo, Westhoff y Germann (1995) y la Organización Mundial de la Salud (2006) han destacado que la energía es fundamental para satisfacer necesidades básicas como la cocción de alimentos, la calefacción y la iluminación. Por su parte, investigaciones recientes como la de Villalba y Clementi (2020) en la región precordillerana argentina han identificado el potencial de las tecnologías de baja potencia, como los generadores termoeléctricos basados en el efecto Seebeck, para proporcionar soluciones sostenibles y adaptadas a las necesidades locales.

En este contexto, la implementación de tecnologías energéticas apropiadas, que sean tanto accesibles económicamente como adaptadas culturalmente, es esencial para mejorar la calidad de vida en estas comunidades marginadas, a la vez que se protege el medio ambiente (O'Neill et al., 2014).

Para abordar esta situación, el grupo de investigación y extensión universitario GruSE (Grupo de Soluciones Energéticas), en la UTN, Facultad Regional de San Rafael, está desarrollando múltiples soluciones que puedan satisfacer necesidades básicas insatisfechas en comunidades aisladas, particularmente aquellas relacionadas con la falta de suministro de energía y agua potable, o por su lejanía de centros urbanos que dificultan el acceso a estos servicios. Por todo esto, las líneas de trabajo del GruSE son soluciones, prácticas y de bajo costo, para iluminación, cocción de alimentos, agua caliente sanitaria y refrigeración de alimentos, entre otras.

### ***Investigación y desarrollo de energía termoeléctrica***

El efecto Seebeck, descubierto en 1821, permite la conversión de un diferencial de temperatura en energía eléctrica. Este fenómeno ha sido ampliamente estudiado y aplicado en diversas tecnologías de generación termoeléctrica (Goldsmid, 2010; Snyder y Toberer, 2008). Los generadores termoeléctricos (TEGs) han captado una atención significativa debido a su capacidad para convertir el calor residual en energía eléctrica, proporcionando una solución sostenible para la recolección de energía (DiSalvo, 1999; Zheng et al., 2017).

Una línea clave de investigación se enfoca en la generación de electricidad a partir de energía solar, utilizando concentradores de calor en la cara caliente de las celdas Peltier. El uso de concentradores solares puede aumentar significativamente el gradiente de temperatura, mejorando la salida eléctrica de los dispositivos termoeléctricos (Vining, 2009; Freer y Powell, 2017). Sin embargo, la gestión térmica en la cara fría de las celdas Peltier sigue siendo un desafío crítico para la optimización de la eficiencia de estos dispositivos.

La investigación continua en este campo está explorando nuevas oportunidades para el uso de materiales termoeléctricos de bajo costo y alta eficiencia, como la tetrahedrita, que podría proporcionar una solución económica y sostenible para la generación de energía en áreas remotas (Alphabet Energy, 2016). La integración de nanomateriales y estructuras avanzadas como los nanocompuestos también promete mejorar significativamente la eficiencia de conversión termoeléctrica en el futuro cercano (MIT, 2016).

### ***Gestión térmica en la cara fría de las celdas Peltier***

Los métodos tradicionales para la gestión térmica en la cara fría de las celdas Peltier incluyen disipadores de calor y el uso de hielo seco. Aunque efectivos en ciertas aplicaciones, estos métodos han mostrado

incrementos térmicos limitados, lo que resulta en un rendimiento insuficiente del dispositivo (Chen et al., 2011; Yang y Caillat, 2006). Para abordar estos desafíos, la investigación reciente se ha centrado en materiales y técnicas avanzadas.

El uso de materiales de cambio de fase (PCMs) para la gestión térmica ha demostrado ser prometedor. Los PCMs pueden almacenar y liberar grandes cantidades de calor durante su proceso de fusión y solidificación, proporcionando una solución más eficiente para la gestión térmica (Zhang et al., 2017). Además, la incorporación de fluidos de transferencia de calor de alta eficiencia, como los nano fluidos, puede mejorar significativamente la capacidad de los disipadores de calor al aumentar la conductividad térmica del fluido base (Chow et al., 2010).

Otra técnica es la refrigeración termoacústica, que utiliza ondas sonoras para mover el calor a través de un medio sin la necesidad de partes móviles. Esta tecnología ofrece una solución potencialmente robusta y de bajo mantenimiento para la gestión térmica en dispositivos termoeléctricos (Swift, 2002). Además, el uso de estructuras micro y nanométricas en las superficies de los disipadores de calor aumenta significativamente el área de superficie disponible para la transferencia de calor, mejorando así la eficiencia del dispositivo (Liu et al., 2015).

### ***Estudios de caso y proyectos***

Kraemer et al. (2016) desarrollaron un generador termoeléctrico solar concentrado que alcanzó una eficiencia máxima del 7,4%. Este avance se logró mediante la integración de concentradores solares que amplificaron el gradiente térmico en las celdas termoeléctricas, optimizando la conversión de calor en electricidad. Este sistema demostró un potencial significativo para su aplicación en regiones remotas y fuera de la red, superando las limitaciones de trabajos previos y destacando la viabilidad de la energía termoeléctrica como una solución sostenible para la generación de energía.

Boccaccini (2019) desarrolló un prototipo inicial que era capaz de generar electricidad utilizando celdas Peltier, con un disipador en el foco frío del dispositivo. Aunque se lograron avances importantes, aún eran necesarias mejoras en el diseño y optimización de su funcionamiento.

Las tecnologías termoeléctricas presentan desafíos significativos en términos de eficiencia y costo, pero los avances recientes y la investigación en curso ofrecen un potencial considerable para proporcionar soluciones energéticas sostenibles y accesibles a comunidades aisladas. Es esencial continuar explorando y optimizando estas tecnologías para garantizar que puedan cumplir con las necesidades energéticas básicas de las poblaciones más vulnerables, mejorando así su calidad de vida y facilitando su desarrollo socioeconómico.

## **DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO ENSAYADO**

### ***Objetivo del Trabajo***

Particularmente, la línea de trabajo del GruSE en la cual se enmarca este desarrollo, apunta a satisfacer la necesidad de energía de baja potencia en los hogares, permitiendo así el uso de dispositivos básicos que proporcionen la iluminación mínima necesaria y la carga de ciertos dispositivos, utilizando el efecto Seebeck en celdas de Peltier.

El objetivo específico de este trabajo es desarrollar y evaluar un prototipo capaz de cubrir las demandas básicas de iluminación y pequeños consumos eléctricos, sin depender de fuentes externas para aumentar la diferencia de temperatura entre las caras de las placas de Peltier. Este tipo de solución es especialmente relevante en comunidades aisladas, donde extender el horario de iluminación mediante una fuente de energía autónoma puede mejorar significativamente la calidad de vida.

A diferencia de otros proyectos de generación termoeléctrica, este estudio se centró en mejorar el rendimiento del sistema. Para lograrlo, se experimentó con un prototipo diseñado específicamente para disminuir la temperatura de la cara fría del generador. Este enfoque tiene como objetivo mantener una

fuentes frías con un diferencial de temperatura significativamente mayor en comparación con los disipadores tradicionales.

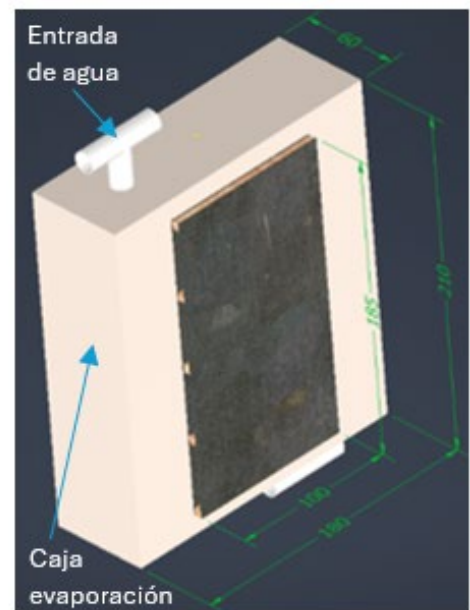
En los generadores evaluados, se priorizó el uso de múltiples fuentes calientes accesibles para comunidades sin acceso a energías convencionales, tales como radiación solar, fuego directo, brasas, y cualquier fuente que permita alcanzar un diferencial térmico de al menos  $20^{\circ}\text{C}$  entre las caras del generador. Además, se puso énfasis en el bajo costo, la portabilidad, y la capacidad de operar sin recurrir a fuentes de energía térmica convencionales, lo que podría representar un avance significativo en la eficiencia de la generación de energía termoeléctrica.

Con el objetivo de diferenciarse del diseño propuesto por Boccaccini (2019) (Figura 1), este prototipo se ha desarrollado con la premisa de asegurar una generación mínima de energía durante todo el día, incluso sacrificando rendimiento. La hipótesis planteada sugiere que, al mejorar la disipación de calor en la cara fría del generador, durante los periodos sin una fuente de calor disponible sería posible alcanzar la producción energética mínima deseada. Para ello, se ha sustituido el disipador de aluminio del prototipo original por un sistema de enfriamiento evaporativo en la cara fría de las placas Peltier. Este sistema aprovecha el proceso de evaporación para reducir la temperatura en la cara fría, lo que incrementa la diferencia térmica entre ambas caras sin depender de una fuente de calor externa. Al reducir la temperatura en la cara fría, y bajo el supuesto de un correcto funcionamiento del sistema, el dispositivo seguiría generando electricidad incluso en ausencia de una fuente de calor, permitiendo así alimentar un LED u otros dispositivos de bajo consumo. De esta manera, el prototipo ampliaría su rango de operación a condiciones donde no se disponga de una fuente continua de calor.



*Figura 1. Izq.: imagen termográfica del generador, Der: Imagen del generador operativo.*

El nuevo diseño integra un evaporador enfriador con el objetivo de aumentar el salto térmico y, de este modo, mejorar la eficiencia en la generación de electricidad (Figura 2). Las placas de Peltier se optimizaron para obtener un diseño compacto y funcional, adaptable a diversas condiciones operativas. El nuevo dispositivo consta de dos componentes fundamentales: la fuente caliente y la fuente fría, con las placas de Peltier situadas entre ambas. A través del diferencial térmico, estas placas facilitan el movimiento de electrones desde la fuente caliente hacia la fría, generando así energía eléctrica.



*Figura 2: Diseño previo a la construcción del dispositivo realizado con el software de modelado 3D. Las medidas se encuentran dadas en milímetros.*

La parte caliente del dispositivo está formada por una placa de aluminio pintada de negro, que se encuentra en contacto directo con las placas de Peltier. Para separar las placas del dissipador cerámico, se instaló un reticulado de madera, con el fin de mitigar el puente térmico. La fuente fría, por su parte, consiste en un evaporador de cerámica (Figura 3).

En cuanto a la conexión eléctrica de las placas, se evaluaron diversas configuraciones, concluyendo que la conexión en serie de las 8 placas de Peltier, modelo TEC1-12706, era la más adecuada.

El evaporador está compuesto por una caja de cerámica porosa que permite, por convección y diferencia de densidad, la circulación de agua en su interior (Figura 3). Esta circulación se garantiza mediante un sistema de mangueras conectado a un pequeño tanque de almacenamiento. La porosidad de la cerámica facilita la filtración de micropartículas de agua, mientras que el aire que circula sobre su superficie exterior promueve la evaporación y el enfriamiento del sistema.



*Figura 3: Evaporador cerámico.*

Una vez realizados los estudios preliminares pertinentes, se procedió a la construcción del generador y a la realización de pruebas en el componente cerámico. Se verificó que no hubiera pérdidas de agua, asegurando así su correcto funcionamiento como evaporador.

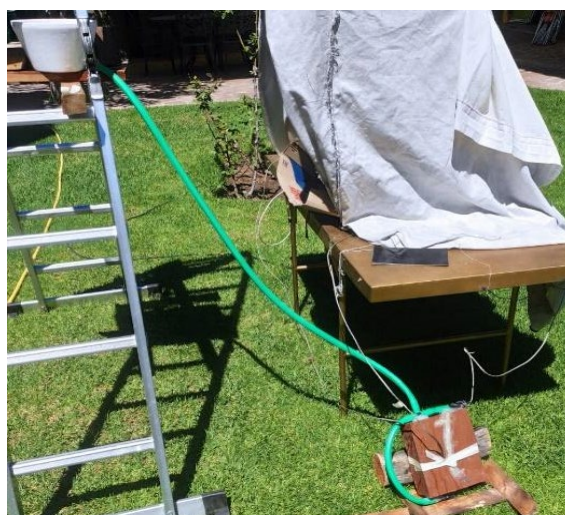
Finalmente, el dispositivo fue instalado provisionalmente en la ciudad de San Rafael, Mendoza, Argentina, en las coordenadas 34°36'19,1" latitud sur y 68°20'40,9" longitud oeste. Esta instalación tuvo como objetivo ensayar el dispositivo y observar su eficiencia en la generación de electricidad. San Rafael se caracteriza por su clima semiárido, con veranos calurosos e inviernos frescos, y cuenta con una alta radiación solar, lo que lo convierte en un lugar ideal para probar el dispositivo.

## MONITOREO DEL GENERADOR TERMOELÉCTRICO

El generador térmico fue evaluado durante los meses de verano a principios de 2024, enfocándose en un análisis térmico detallado. Para este propósito, se emplearon Dataloggers de temperatura marca Hobo, modelo Onset U12, equipados con sensores de contacto tipo K, junto con un sensor infrarrojo marca CEM, modelo DT-8835, y una cámara termográfica CEM, modelo DT-874Y. Para medir tensión y corriente se utilizó un Tester marca EM6000 TRMS Digital Multimeter.

Además de las mediciones y monitoreos, se verificó que el dispositivo es capaz de producir, en momentos de exposición al sol directo, suficiente energía para alimentar lámparas LED. Para iluminar se utilizó un dispositivo led de 5V, el objetivo de iluminación básica requerida se alcanzó con una corriente de circuito de 299,07mA. Para la etapa de carga de baterías se utilizó el dispositivo Modulo Cargador De Baterías de Litio Tp4056, Arduino 18650 Litio-ion 3,7 V 2200 mAh. En el periodo de carga la máxima corriente alcanzó los 199,6mA con tensión en los bornes de la batería 3,89 V. El cargador necesita para funcionar 5V de entrada de tensión de alimentación, que deben ser regulados y suministrados por el dispositivo a evaluar.

En la figura 4, se observa el prototipo a evaluar con sus correspondientes sensores para registrar y monitorear las temperaturas del componente cerámico del evaporador. El objetivo principal fue observar el comportamiento del dispositivo y determinar su capacidad para alcanzar la generación eléctrica mínima requerida para iluminar. Esto permitió evaluar si el dispositivo es capaz de generar energía no solo durante el día, sino también durante la noche, proporcionando así una fuente continua de electricidad.



*Figura 4: Registro de temperaturas del evaporador cerámico para un día soleado*

La fuente de calor del dispositivo, que consiste en una chapa negra, se midió manualmente con un sensor infrarrojo. Se calculó la temperatura promedio durante el período de prueba. Además, se realizaron ensayos con el prototipo completo para evaluar su capacidad de generar la mínima cantidad de energía requerida en condiciones operativas reales.



## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados graficados corresponden a los datos recolectados durante la operación del prototipo en condiciones de generación de energía, específicamente en un día con temperaturas extremas y altos niveles de humedad. Cabe destacar que los procesos evaporativos son más efectivos en zonas secas; sin embargo, a principios del verano de 2024, los registros de temperatura en la zona no coincidieron con los datos históricos, y los niveles de humedad durante el período de ensayo fueron significativamente más altos que los promedios habituales.

Se registraron múltiples variables, como la temperatura ambiente, la humedad ambiental, la temperatura en la parte inferior y superior de la caja evaporadora, la temperatura de la placa caliente, y las temperaturas de entrada y salida del agua en la caja evaporadora. También se recopilaron datos durante periodos de radiación solar directa e indirecta, así como en horario nocturno. Es importante aclarar que no se realizaron mediciones específicas de radiación solar; únicamente se consideraron las condiciones de cielo despejado, nublado y las horas de oscuridad total.

En la Figura 5 se presentan las mediciones de la temperatura de la chapa, el cerámico, y la temperatura ambiente, junto con el voltaje generado por el sistema termoelectrico. La tensión mínima necesaria para utilizar pequeños equipos comerciales de iluminación con entrada USB es de 5V, y se requiere una corriente mínima de 0,3 A para mantener el sistema en funcionamiento. Se verificó la generación de los 5V y más de 0,3A, lo cual permitió que el sistema comenzara a funcionar correctamente, posibilitando la carga de equipos o baterías. La combinación del voltaje adecuado y el flujo de corriente mínima asegura que el sistema sea capaz de alimentar dispositivos externos, siendo clave para su aplicación en contextos donde se requiere generar energía a partir de fuentes térmicas no convencionales.

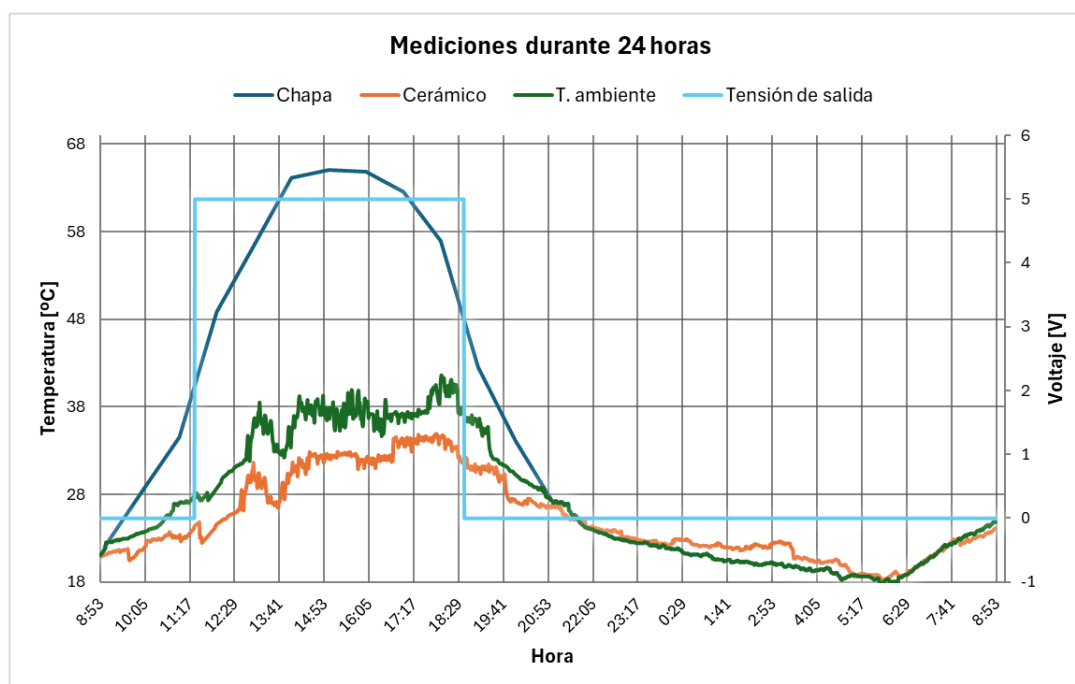


Figura 5: Relevamiento de datos obtenidos en 24 horas

Durante el periodo de radiación solar directa, comprendido entre las 11:00 y las 17:15 horas, se registró un diferencial térmico consistente entre la placa caliente y la fría, alcanzando un máximo de 34 °C y un mínimo de 16 °C. En este intervalo, el voltaje generado se mantuvo estable alrededor de los 5V, mientras que la corriente superó en todo momento los 0,3 A, cumpliendo con los requisitos necesarios para la generación eléctrica. Estas condiciones evidencian que el sistema logró su objetivo al mantener un diferencial térmico suficiente para la producción continua de energía, con un rango de temperaturas que osciló entre 16 °C y 34 °C, validando la viabilidad del sistema bajo condiciones de radiación solar directa.



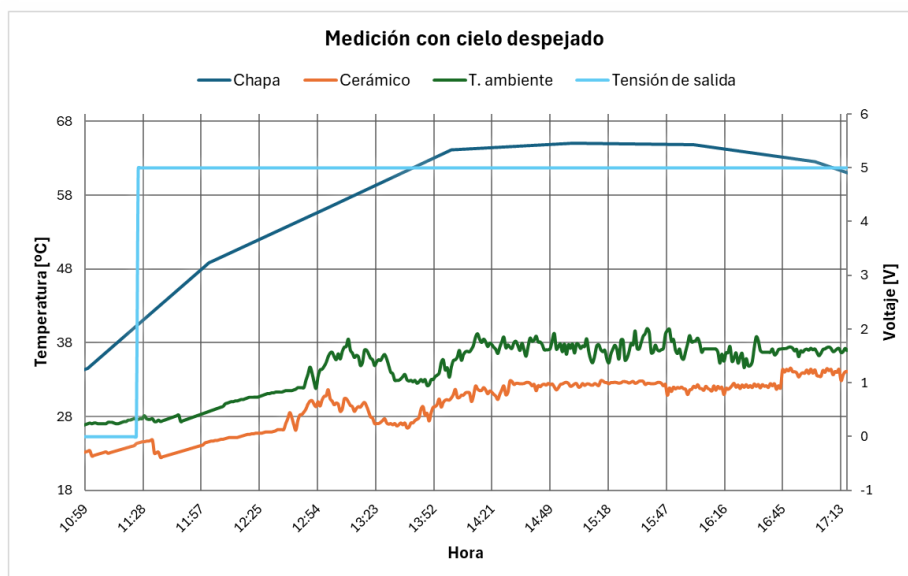


Figura 6: Diferencial de temperatura de 34 °C promedio entre la chapa y el cerámico entre las 14:00 y 15:30

Durante los momentos de mayor radiación, el foco caliente alcanzó una temperatura promedio de 64 °C, con picos de hasta 66 °C, mientras que el foco frío, en contacto con el evaporador cerámico, mantuvo una temperatura alrededor de 39 °C por debajo de la ambiental, lo que demuestra la efectividad del sistema de refrigeración pasiva implementado (Figura 6). Este diferencial térmico, superior a los 30 °C, permitió que el dispositivo operara de manera eficiente durante este periodo.

Además, a partir del análisis termográfico (Figura 7) se puede observar claramente la diferencia de temperatura entre el foco caliente y el foco frío, lo que corrobora los valores de temperatura medidos. Estos resultados muestran que el sistema es capaz de mantener una operación sostenible en contextos donde la exposición solar es constante, lo que lo convierte en una opción ideal para su uso en comunidades aisladas que dependen de fuentes alternativas de energía.

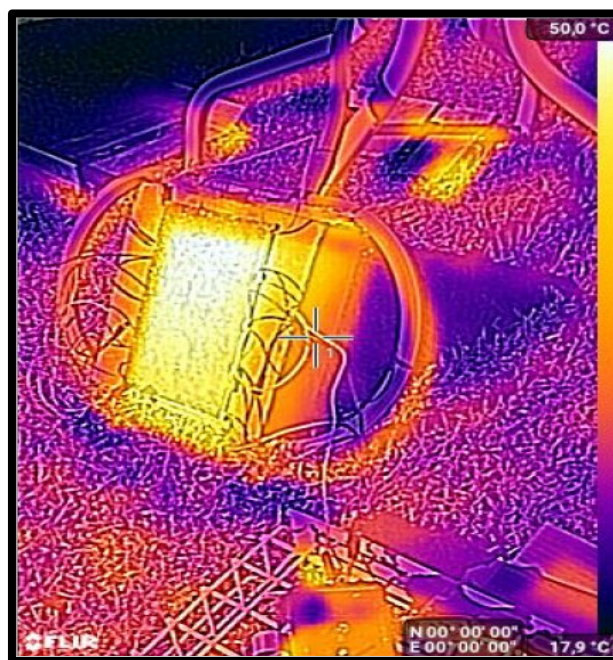


Figura 7: Análisis con cámara termográfica del diferencial de temperatura entre el lado caliente y frío del generador termoeléctrico en un día soleado

Entre las 17:15 y las 20:00 horas, se produjo un aumento progresivo de la nubosidad, lo que afectó significativamente el diferencial térmico entre las placas caliente y fría del sistema termoeléctrico. A medida que las nubes comenzaron a cubrir el cielo, la temperatura del foco caliente disminuyó paulatinamente, y como resultado, el diferencial térmico cayó por debajo de los 16 °C. Esto provocó una caída del voltaje generado, que descendió por debajo del umbral mínimo de 5V necesario para que el sistema continúe operando. Aproximadamente una hora después del inicio del ciclo nublado, el sistema dejó de cumplir con los requisitos mínimos de generación eléctrica, ya que el diferencial térmico dejó de ser suficiente para producir la corriente mínima requerida.

Durante este periodo de nubosidad, aunque se mantuvo el uso del evaporador, se observó que el diferencial térmico en el lado frío respecto a la temperatura ambiente fue de apenas 5 °C en promedio (Figura 8). Esta diferencia fue significativamente menor en comparación con las condiciones de radiación solar directa. La temperatura de la chapa disminuyó considerablemente debido a la falta de exposición directa al sol, lo que redujo la generación de energía a valores inferiores a los 5V necesarios. A pesar de que aún se produjo un pequeño flujo de corriente, este fue insuficiente para aplicaciones prácticas del sistema.

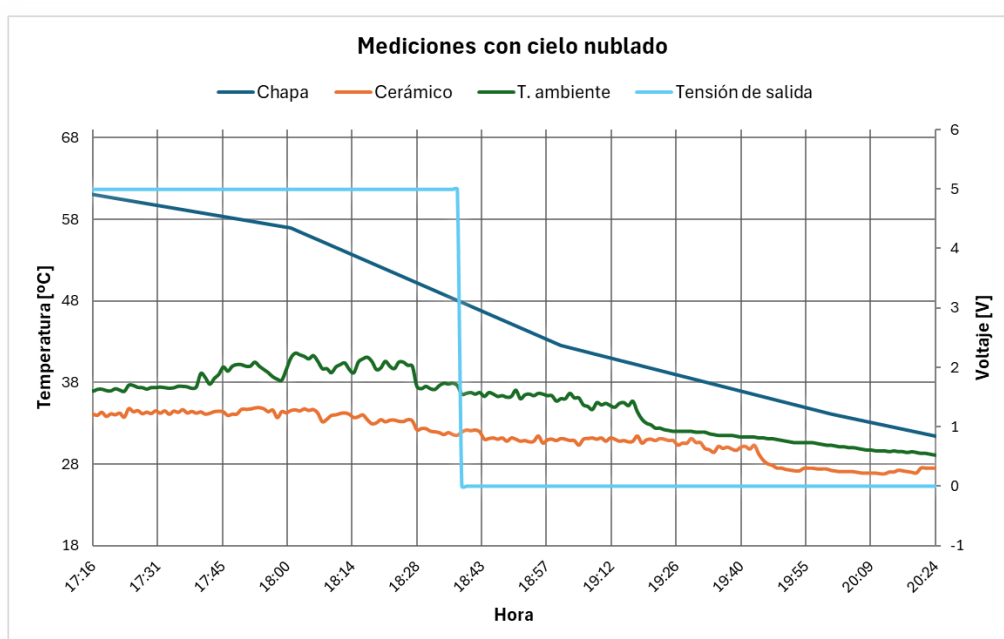
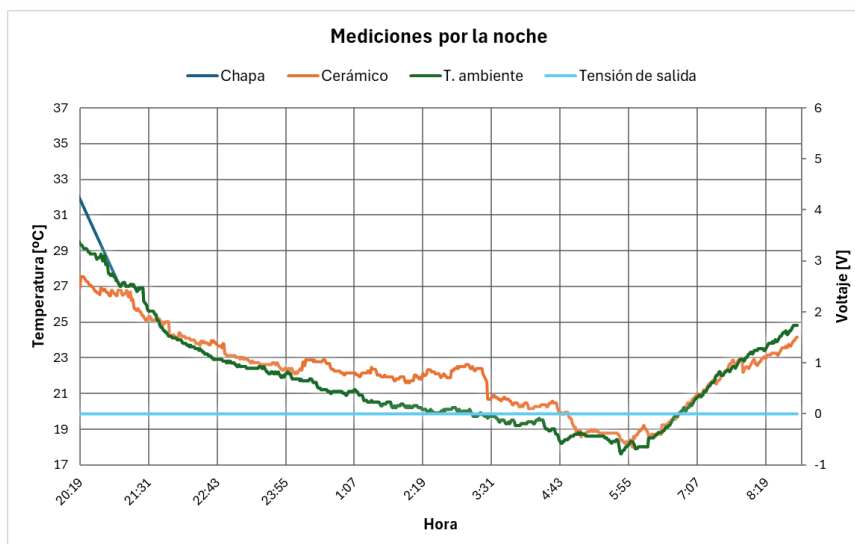


Figura 8: Análisis gráfico de la diferencia entre la temperatura del cerámico y la temperatura ambiente y de la chapa a la sombra

Por último, en los estudios realizados durante la noche, se observó que el evaporador no logró generar un diferencial térmico significativo. Las temperaturas de las placas se mantuvieron casi idénticas a la temperatura ambiente, lo que impidió la generación de energía. En estas condiciones, no se pudo cumplir con el objetivo de alcanzar los 5V requeridos, ni generar la corriente mínima de 0,3 A, debido a la ausencia de un diferencial térmico suficiente entre las placas del sistema termoeléctrico (Figura 9).



*Figura 9: Análisis gráfico de la diferencia entre la temperatura del cerámico y la temperatura ambiente y de la chapa por la noche*

Este comportamiento destaca las limitaciones del dispositivo cuando no hay una fuente de calor que genere un gradiente térmico adecuado, como ocurre durante las horas nocturnas. La falta de radiación solar directa o cualquier otra fuente térmica impide el funcionamiento del sistema termoelectrico, lo que subraya la importancia de considerar fuentes de calor adicionales para asegurar su funcionamiento continuo en entornos donde la radiación solar o las condiciones climáticas no son favorables. Este tipo de observaciones refuerza la necesidad de optimizar el sistema para que sea funcional no solo en condiciones diurnas, sino también durante la noche o en situaciones de baja radiación.

Durante toda la experiencia, el sistema logró generar un promedio de 5 V utilizando un regulador de tensión con un LM 7805. Los valores de corriente continua variaron entre los 0,3 A para días de cielo nublado y hasta de 0,6 A para días soleados con diferenciales térmicos de hasta 34°C. A las noches los valores de generación no alcanzaron para lograr el objetivo de tensión necesaria. Cabe destacar que para consumos de corriente mayores a 0,35A y diferenciales térmicos menores a 16 °C el regulador de tensión no alcanza a cumplir el objetivo de mantener entre los bornes de salida 5V.

Adicionalmente, y al completar la experiencia se observó durante los ensayos, que la caja de cerámica presentaba limitaciones constructivas y dificultades en su manejo debido a su fragilidad, especialmente cuando se compara con el modelo anterior que utilizaba un disipador de aluminio como enfriador. No obstante, este prototipo pretende ser portátil y práctico, adecuado para satisfacer las necesidades de la comunidad objetivo.

## CONCLUSIONES

A partir de las pruebas y mediciones realizadas, se puede establecer que el foco caliente del dispositivo requiere de radiación solar directa u otra fuente de energía calórica para funcionar de manera óptima. Se ha observado que cubrir el foco frío del sol puede aumentar aún más el diferencial térmico, aprovechando la reducción de temperatura del evaporador en conjunto con las condiciones ideales para el foco caliente. Por lo tanto, se recomienda realizar esta adaptación al generador para mejorar su eficiencia en la producción de energía eléctrica.

En relación con la hipótesis de trabajo, la disminución de la temperatura de la cara fría del generador mediante un evaporador no cumplió con las expectativas deseadas en las condiciones evaluadas. Durante los periodos de cielo nublado y por la noche, mayormente, no se alcanzaron los requisitos mínimos de generación

Las pruebas realizadas confirmaron la capacidad del equipo para generar electricidad demostrando su versatilidad al alimentar lámparas LED, cargar baterías y teléfonos celulares en condiciones de máxima generación. Esta capacidad de generación de energía en días soleados valida el potencial del dispositivo para proporcionar soluciones energéticas eficientes en comunidades aisladas en lo que involucra el acceso a energía de baja potencia a un bajo costo.

Además, se identificó que el material cerámico utilizado en el evaporador es muy frágil. Se deberá analizar la posibilidad de sustituirlo por otro material más resistente que, no obstante, siga permitiendo el proceso de evaporación, mejorando así la funcionalidad del dispositivo y ampliando la cantidad de aplicaciones potenciales.

Es de suma importancia repetir las experiencias para condiciones climatológicas de zonas áridas, ya que el periodo de verano 2024, el clima en la zona estudiada no es comparable con los datos históricos registrados.

Los resultados destacan la importancia de optimizar tanto el foco caliente como el foco frío del generador termoelectrico. La implementación de mejoras en estos componentes puede conducir a una mayor eficiencia y durabilidad del sistema. Asimismo, la continua investigación y adaptación de materiales y técnicas permitirá desarrollar dispositivos más robustos y versátiles, capaces de ofrecer un impacto positivo significativo en la generación de energía sostenible para poblaciones marginadas.

Estos hallazgos no solo confirman la viabilidad del generador termoelectrico en condiciones climáticas variadas, sino que también subrayan la necesidad de seguir innovando para perfeccionar su diseño y ampliar sus aplicaciones prácticas. Próximamente se pretende explorar alternativas de materiales y configuraciones estructurales que puedan contribuir a la optimización del dispositivo, garantizando su operatividad y efectividad a largo plazo.

## REFERENCIAS

- Alphabet Energy. (2016). Can Thermoelectric Generators Compete Against Solar Photovoltaics? GlobalSpec.
- Boccaccini L. I. (2019). Tesis Doctoral: "Evaluación Energético - Económica de una Estufa Rusa Mejorada. Comparación de Rendimiento Empleando Leña y Gas." Universidad Nacional de Salta. 2019.
- Bragagnolo J. A., Taretto K., Navntoft C. (2022). Solar Energy in Argentina. *Solar*, 2(2), 120-140. <https://doi.org/10.3390/solar2020008>.
- Bratro P. (2002). Estufa a Leña de Alto Rendimiento. Informe de la Estación Experimental Agropecuaria – Chubut – Centro Regional Patagonia Sur. Caimi—Chubut: edición INTA, 2006. 43 p.: il. ISBN-10: 987-521-227-x. ISBN-13: 978-987-521-227-5.
- Chen G., Dresselhaus M. S., Dresselhaus G., Fleurial J. P., Caillat T. (2011). Recent developments in thermoelectric materials. *International Materials Reviews*, 48(1), 45-66.
- Chow L. C., Zhong Y., Hahn O. (2010). Heat transfer performance of nanofluids as coolant for electronics. *Applied Thermal Engineering*, 30(2-3), 235-241.
- DiSalvo F. J. (1999). Thermoelectric cooling and power generation. *Science*, 285(5428), 703-706.
- Freer R., Powell A. V. (2017). Realising the potential of thermoelectric technology: A roadmap. *Journal of Materials Chemistry C*, 5(3), 6983-7005.
- Goldsmid H. J. (2010). *Introduction to Thermoelectricity*. Springer.
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). (2008). Análisis de Estufas de Tiro Balanceado en el Programa Pruebas de Desempeño de Productos, Informe Técnico. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Programa Pruebas de Desempeño de Productos.
- Kraemer D., Jie Q., McEnaney K. (2016). Concentrating solar thermoelectric generators with a peak efficiency of 7,4%. *Nat Energy* 1, 16153.
- Li K., Garrison G., Zhu Y., Horne R., Petty S. (2021). Cost Estimation of Thermoelectric Generators. In *Proceedings of the 46th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California.

- Liu W., Jie Q., Kim H. S., Ren Z. (2015). Current progress and future challenges in thermoelectric power generation: From materials to devices. *Acta Materialia*, 87, 357-376.
- Lorente Rivera, Martín E. (2008). Generación eléctrica por pila termoeléctrica. *Isagogé*, ISSN-e 1885-2475, N° 5.
- MIT. (2016). S3TEC Center: Solid-State Solar-Thermal Energy Conversion. Massachusetts Institute of Technology. UEI: E2NYLCDML6V1.
- O'Neill K. M. E. (2014). Renewable energy technologies and their potential impact on development in isolated communities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 478-490.
- Patterson G., Sobral M. (2007). Efecto Peltier. <https://materias.df.uba.ar/labo4aa2014c1/files/2012/07/Efecto-Peltier.pdf>
- Snyder G. J., Toberer E. S. (2008). Complex thermoelectric materials. *Nature Materials*, 7(2), 105-114.
- Swift G. W. (2002). Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators. *Acoustical Society of America Journal*, 112(5), 2379-2383.
- Tauro R. J., Caballero J. L., Salinas M. A., Álvarez O. A., Ghilardi A., Arroyo J. M. (2022). Evaluación del potencial energético de los recursos biomásicos. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). LC/MEX/TS.2022/17. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/48163-evaluacion-potencial-energetico-recursos-biomasicos-costa-rica>
- Villalba S., Clementi A. (2021). Unconventional Energy in Argentinian Andes: Territories of Dependence or Transition? *Open Edition Journals*. *Isagogé*, ISSN-e 1760-7426
- Vining C. B. (2009). An inconvenient truth about thermoelectrics. *Nature Materials*, 8(2), 83-85.
- Westhoff B., Germann D. (1995). *Estufas en Imágenes*. Edición Brandes y Apsel Verlag GmbH, Frankfurt am Main, Alemania. 1.a edición española. ISBN 3-86099-137-X.
- Yang J., Caillat T. (2006). Thermoelectric materials for space and automotive power generation. *MRS Bulletin*, 31(3), 224-229.
- Zhang Y., Zhao L. D. (2017). Thermoelectric materials: Energy conversion between heat and electricity. *Journal of Materiomics*, 3(1), 44-54.
- Zheng X., Yan Q., Zhu H., Zhao L. (2017). Advanced thermoelectric materials for future energy harvesting. *Advanced Energy Materials*, 7(3), 1602736.

## **DEVELOPMENT OF A THERMOELECTRIC SYSTEM FOR SUSTAINABLE ENERGY GENERATION AND APPLICATION IN MARGINALIZED COMMUNITIES**

**ABSTRACT.** The purpose of this study is to evaluate a prototype thermoelectric generator designed to address the basic energy needs of isolated communities, such as lighting or charging low-power devices, by utilizing the Seebeck effect in Peltier cells. To optimize thermal performance, a ceramic material evaporator was constructed and installed on the cold side of the generator to increase the thermal gradient. This approach was compared with a previous design by the research group that utilized an aluminum heat sink in the same position. During experimentation, key variables such as temperature, humidity, voltage, and current were monitored and recorded under conditions of direct solar radiation on the hot side and the evaporator on the cold side. The results show that the new design does not offer significant improvements compared to generators equipped with aluminum heat sinks on the cold side. The hypothesis was proposed that improving heat dissipation on the cold side of the generator, during periods without an available heat source, would make it possible to achieve the desired minimum energy production. The results show that the new design does not provide significant improvements compared to generators equipped with aluminum heat sinks on the cold side, which do not allow for energy generation without an external heat source.

**Keywords:** Energy, thermoelectricity, temperature, evaporator and differential

## ENVEJECIMIENTO Y ENERGÍA SOLAR EN LA PUNA

**Carlos Cadena<sup>1</sup> y Delicia Acosta<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>INENCO, Facultad de Ciencias Exactas UNSA

<sup>2</sup> INIQUI, Facultad de Ingeniería UNSA

Av. Bolivia 5150 -4400 - Salta - [cadenacinenco@gmail.com](mailto:cadenacinenco@gmail.com)

**RESUMEN:** En los territorios de altura de Salta y Jujuy comprendidos en la región de la Puna, trabajan decenas de miles de personas, muchas de ellas se incorporaron en los últimos años como consecuencia de la explotación minera. Casi simultáneamente se instalaron y entraron en funcionamiento varios parques solares con un total aproximado de unos 500MW (algo menos de dos millones de módulos). Ambos conjuntos reciben a diario una importante cantidad de radiación solar. Parte de esta radiación, la ultravioleta, produce efectos degradativos. Los fotones incidentes de las bandas UVA y UVB provocan mecanismos de ruptura con cierta similitud, tanto en la piel como en el material encapsulante de los módulos. El desafío del texto es poder mostrar posibles consecuencias concurrentes entre ambos, como así también en las membranas que se emplean en las pozas solares. Las secuelas comparativas como consecuencia de la exposición a la radiación ultravioleta muestran que el deterioro puede cuantificarse, aunque no necesariamente predecirse: en la piel, midiendo el deterioro de las protecciones, y en los paneles solares, analizado entre otros aspectos, el EVA (etileno-acetato de vinilo). Los resultados obtenidos muestran que, aunque complejo, es factible establecer algunos aspectos comparativos entre el EVA y la piel humana en alguna medida, si se hacen ciertas abstracciones.

**Palabras clave:** etilvinilacetato, piel humana, celda fotovoltaica, radiación ultravioleta, poza solar

### INTRODUCCIÓN

Desde tiempos remotos, el sol representa la principal fuente de energía renovable y envía a la Tierra energía de radiación en forma de luz visible, infrarrojos y, en menor medida, radiación ultravioleta (UV). Además, en la atmósfera esta radiación se convierte en diversos efectos, algunos de los cuales son importantes como recursos energéticos, mientras que otros provocan daños materiales que aún no han sido completamente caracterizados y afectan directa o indirectamente a la población y a los materiales. El estudio de estos daños puede ayudar a estimar la estabilidad o durabilidad de los materiales como así también su reposición o efectuar posibles mejoras. La velocidad de degradación o deterioro depende principalmente de la radiación UV que incide sobre la superficie y de la temperatura posterior del material.

La provincia de Salta, una de nuestras principales regiones de estudio está situada en el noroeste de Argentina, en la zona más occidental se encuentra la Puna y en la más oriental el Chaco Salteño. La variación de la radiación depende esencialmente de la altura sobre el nivel del mar y del índice de claridad atmosférica, y la radiación solar media en la meseta de altura es tal, que un material expuesto durante 10 años a la intemperie habrá recibido una radiación acumulada sobre la superficie de trabajo de aproximadamente 3759 MJ m<sup>2</sup> y una radiación UV de unos 188 MJ·m<sup>2</sup>, Montero Larocca, et al. (2014). Cabe mencionar que casi la totalidad de las actividades mineras, se realizan en regiones como



la que se encuentra la población de Tolar Grande. Está situada en la Puna salteña a 3560 msnm. y cuenta con una muy escasa población estable de 300 habitantes según el censo 2010. Hace unos años, estuvo vigente el proyecto “Tolar Grande Unido para Protegerse de los Rayos UV”. A través de un acta acuerdo entre el Instituto de Investigación en Energía No Convencional (INENCO / CONICET) y dicho Municipio, se instaló una estación de toma de datos de radiación global y eritémica, además de temperatura y humedad relativa. Suarez et al (2014)

En la región de Puna, el polvo en el ambiente es notorio, en parte debido a los frecuentes vientos. Por otra parte, el albedo se incrementa debido a la salinidad del suelo y a la casi inexistente vegetación. En la ciudad de Salta dicho albedo es menor. La Puna es una región geográfica que se encuentra en el noroeste de Argentina, en las provincias de Jujuy, Salta y Catamarca, y se extiende hasta Bolivia, Chile y Perú. Al igual que el Desierto de Atacama, la Puna es una región muy árida y seca, con poca vegetación y una alta incidencia de radiación solar. A diferencia del Desierto de Atacama, la Puna se encuentra a una menor altitud y, por lo tanto, no presenta la misma intensidad de radiación UV. Sin embargo, las temperaturas pueden ser extremadamente frías durante la noche debido a la altitud, que en algunas áreas supera los 4000 metros sobre el nivel del mar. Grau et al. (2018).

El conocimiento de la cantidad de radiación ultravioleta que reciben los humanos, plantas y animales resulta de gran importancia para muy diversos campos de investigación, McKenzie et al. (1991). La radiación solar ultravioleta (UV), en los rangos ultravioleta B (UVB, 280-320 nm) y ultravioleta A (UVA, 320-400 nm), tiene múltiples consecuencias para la vida en nuestro planeta, ya que en dosis apropiadas sus efectos son favorables para ciertos procesos biológicos, pero en dosis excesivas y debido a que son acumulativas sus consecuencias pueden ser muy perjudiciales para los seres vivos. Los efectos dañinos pueden ser envejecimiento prematuro de la piel, diversos tipos de cáncer, cataratas, afecciones oculares y numerosas enfermedades denominadas fotodérmicas. WHO (2006). Es muy importante entonces conocer las variaciones de los niveles de riesgo solar para emplazamientos en diferentes alturas y condiciones climáticas. Esto, debido a que por diferentes razones las personas pueden estar expuestas a estas radiaciones y resultan necesarias realizar estrategias de foto protección preventivas (URL-UV).

Si bien entre una celda fotovoltaica y la piel, existen muchos contrastes, la degradación de algunos de sus materiales en el primer caso, abarca conceptos referidos a un cambio en sus propiedades ópticas, lo que produce la disminución de energía que entrega el módulo. Puede mostrarse que aun degradado continúa realizando su función. Todavía puede producir electricidad a partir de la luz solar si no se lo utiliza con mucha exigencia. Además, cuando la degradación excede el umbral crítico, el estado de degradación puede empeorar, y causar más problemas. Como afirma Köntges, et al., 2014, la calidad de los módulos fotovoltaicos cruzará un umbral cuando la energía producida sea inferior al 80 % de la capacidad original. El rendimiento de los módulos fotovoltaicos se reducirá como resultado de varios factores, como la humedad, la radiación, la temperatura y el impacto externo. Estos factores pueden causar uno o más tipos de degradación, por ejemplo, corrosión, decoloración, delaminación, agrietamiento y rotura. Se espera que la esperanza de vida pueda predecirse analizando los modos de degradación. Montero et al. (2014).

En el caso de las “pozas solares”, el deterioro se produce esencialmente en el borde superior (los lugares donde el nivel de la solución salina no alcanza a cubrirla). Este daño implica reemplazar la totalidad de esta franja ya que se transforma en un potencial lugar de infiltración de la solución con la pérdida de rendimiento. Las zonas de pozas que se encuentran bajo la línea de la superficie no se degradan.

## EL PLANTEO METODOLÓGICO

Entonces, teniendo como eje al ser humano y al sol sobre la Puna, se analizará su interrelación entre los paneles solares fotovoltaicos, la piel y su protección, y en menor escala la relación con el litio, por el uso masivo de membranas plásticas, para la separación – concentración de minerales.



*Figura 1: los actores involucrados son la piel, el fotovoltaico, la Puna, La Radiación Solar, y las Pozas de Concentración de Solución de Litio*

La Figura 1 muestra simbólicamente los actores presentes en este desafío científico que interrelaciona un órgano (la piel humana) con los materiales industriales, en este caso paneles fotovoltaicos y litio (si bien no en forma directa, sino en su proceso de industrialización). A la sazón, los focos de atención, serán: La radiación solar, y en particular la radiación ultravioleta, por que sin duda es el vehículo que genera los daños; la piel humana, pues podría no estar protegida, o bien protegida de manera incompleta; los paneles fotovoltaicos, pues al estar permanentemente expuestos al clima en condiciones “fuera de lo habitual” se dañarán anticipadamente; la problemática del litio, relacionada con el proceso y con los materiales que se emplean, teniendo como entorno geográfico, la Puna de Salta y Jujuy.

### ***Materiales y Análisis***

La piel es el órgano más grande del cuerpo, puede medir hasta unos 2 m<sup>2</sup>, pesar hasta unos 5kg, y se trata de un conjunto de tejidos. Cumple diversas funciones relacionadas con el tacto, actuando como una barrera de protección. El material EVA de un panel (etileno -acetato de vinilo) es una resina de copolímero que se utiliza para el encapsulado de celdas solares. Se describirá con más detalle en párrafos siguientes, pero se puede adelantar que es una capa muy delgada y casi no tiene competidores como material para la fabricación de los paneles solares. Un polímero es una sustancia cuyas moléculas son aproximadamente, múltiplos de unidades de peso molecular (es la suma de las masas atómicas de los elementos que forman una molécula, y en el caso de los polímeros, es una medida de la longitud de su cadena) bajo. No necesariamente constan de moléculas del mismo peso molecular, y tampoco es necesario que tengan todas, la misma composición química y la misma estructura molecular. Existen polímeros naturales pero la gran mayoría de los ellos, son sintéticos. Las variaciones en la orientación de unidades monómeras y la irregularidad en el orden en el que se suceden los diferentes tipos de esas unidades son propios de los co-polímeros. No obstante, el accionar del clima, a lo largo de los años, y el panel al estar dispuesto casi sin ninguna protección, tiende a arruinarse con la exposición permanente al sol.

En otra aplicación, el EVA forma parte de los plásticos que cubren las pozas de concentración de Litio. En este sentido, los depósitos que tienen mayor concentración de litio, se encuentran en la Puna, y en ellos se localiza el elemento disuelto en forma iónica, como en las aguas subterráneas de algunos salares, acompañado de potasio, magnesio y boro. El litio es un recurso estratégico para la aspiración de desarrollar un paradigma tecno-económico basado en la generación, almacenamiento, distribución y consumo eficiente de energías limpias y renovables; en esta posición la República Argentina, es un

miembro de los países del Triángulo el Litio, que tiene la posibilidad de promover el desarrollo científico-tecnológico local, y de esta forma incorporar valor agregado a este recurso natural. Visualizando este horizonte tecnológico, se obtuvieron resultados que aportan mayor claridad en dos grandes campos de desarrollo industrial e investigación donde el litio cumple un rol preponderante, la separación isotópica de litio para la industria nuclear y el desarrollo de protocolos de carga no convencionales que mejoren las prestaciones de baterías ion- litio. Acosta y Flexer (2022). Si se observa el ciclo de transformación de las salmueras de litio, se puede notar que las mismas se depositan en “pozas” o estanques solares para producir evaporación del agua, como parte del proceso. Se trata de reservorios de gran superficie, en el suelo cavado y recubierto con una membrana plástica, como se observa en la Figura 2. Es notorio, que existe una zona del plástico que queda expuesta a radiación UV.

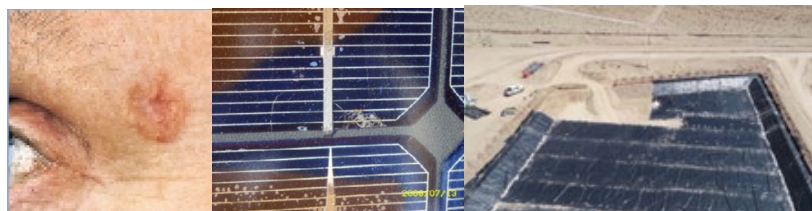


*Figura 2 Las membranas geotextiles en pozas solares Gentileza Rebosio A.*

Un ejemplo del uso de un estanque o poza solar en la industria minera, es la producción de sulfato de sodio a partir de un mineral consistente en una mezcla de sulfato decahidratado, cloruro de sodio y arcillas. El proceso solar industrial es el siguiente: utiliza el estanque solar como cuenca donde se disuelve el mineral a temperaturas elevadas. El sulfato sódico se separa de la solución caliente concentrada, a una temperatura de unos 40°C, y a baja temperatura por cristalización fraccionada. Este diseño se probó con éxito en un prototipo con un estanque de 400 m<sup>2</sup> en la década de los años '80. Las primeras pozas solares para la separación de este tipo de sales, emplearon como revestimiento de las pozas, films negros de polietileno de alta densidad, y el daño en los bordes fue notorio, luego de tres temporadas de uso. Una poza solar es un sistema térmico que permite coleccionar y almacenar energía solar. El hecho es que dicha membrana, pese a contar con protección “anti-uv”, y que muchas veces se cubre con el mismo material del suelo, es propensa a degradarse como la mayoría de los plásticos. Si bien el litio no es un actor principal en este “reparto”, es tal su trascendencia presente y futura, y sus implicancias que se decidió incluirlo, ya que está conectado directamente a la energía y al ser humano.

### ***Los mecanismos que provocan el daño***

Trazando un utópico paralelismo (solo en cuanto a envejecimiento o bien durabilidad) entre la piel humana y los módulos fotovoltaicos, es sabido que el clima produce daños que con el avanzar del tiempo de exposición, se hacen cada vez más notorios e irreversibles. Las membranas para pozas tienen un envejecimiento prematuro también. Las imágenes que se muestran a continuación (Figura 3), dan cuenta de la gravedad del problema, a la izquierda un carcinoma, al centro una celda fotovoltaica deteriorada y a la izquierda la imagen parcial de una “poza” sin la salmuera que debe concentrarse.



*Figura 3: Carcinoma de células basales, Fuente, OMS (izquierda). Celda fotovoltaica deteriorada en Puna (centro). Poza solar en construcción (derecha)*

Entonces, y a modo de síntesis, se muestra la tabla 1, donde se sintetizan los materiales, sus características y efectos:

*Tabla 1: síntesis de efectos producidos por la radiación UV en Piel, Polímeros y Polietileno de Pozas*

| material    | características                   | efectos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Piel        | El mayor órgano del cuerpo humano | Le produce, en función de los niveles recibidos, la activación de los factores de transcripción de los melanocitos. Esto funciona como una señal para que se inicie la síntesis de la melanina. Una vez producida, se empaqueta” en moléculas esféricas, y los melanosomas se transfieren a la dermis como queratinocitos |
| Polímero    | EVA, poliacetato                  | Ruptura de las cadenas de carbono, ácido acético                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Polietileno | Receptáculo, pozas                | Rotura de cadenas de carbono, estrés mecánico                                                                                                                                                                                                                                                                             |

El carcinoma basocelular es un tipo de cáncer de piel, que comienza en las células basales, un tipo de células que se encuentran en la piel y que producen las células cutáneas nuevas, a medida que las viejas mueren. El carcinoma basocelular suele aparecer en la forma de un bulto ligeramente transparente en la piel, aunque puede tomar otras formas. Ocurre con mayor frecuencia en zonas de la piel que están expuestas al sol, como la cabeza y el cuello. Se piensa que la mayoría de los carcinomas basocelulares se deben a la exposición prolongada a la radiación ultravioleta (UV) de la luz solar. Evitar la exposición al sol y usar protector solar pueden ser modos de protegerse contra el carcinoma basocelular. En piel blanca, el carcinoma basocelular generalmente se parece a un bulto de color piel o rosado. El carcinoma de células basales en piel morena generalmente se parece a un bulto de color marrón o negro brillante y tiene un borde romo (Publicación Clínica Mayo, 2024).

### ***Estrategias de protección anti-uv***

En el diseño del protector solar intervienen además otras propiedades como ser, la resistencia al agua, fotoestabilidad, durabilidad, etc. Sánchez et al (2002). Por ello es importante determinar efectivamente su capacidad de protección. Se muestran los resultados de caracterización efectuados a cremas de protección solar de diferente graduación, comercialmente difundidas, que están disponibles en el mercado y son de uso frecuente. El cálculo de UPF se realizó *in Vitro* a partir de la medición de transmitancia y simultáneamente a través de análisis del espectro infrarrojo, FT-IR, de las cremas. Para determinar la fotosensibilidad de los materiales constituyentes, se realizaron estudios de fotoestabilidad por irradiación en una cámara y también por exposición a la radiación solar directa. Los preparados anti-UV se presentan de diversas formas en el mercado: emulsiones, geles, aceites, lociones, lápices labiales, etc. La eficacia de una formulación se basa en lo planteado por Garcia-Bertran, et al. (2017). La buena elección de los filtros solares, resulta de la adecuada elección de excipientes y componentes que permitan la protección en el rango de UV deseado.

Por otra parte, es conocido que un panel fotovoltaico comprende capas, y cada una de ellas cumple una función determinada y precisa. Las capas que componen una celda o panel se muestran en la Figura 4.

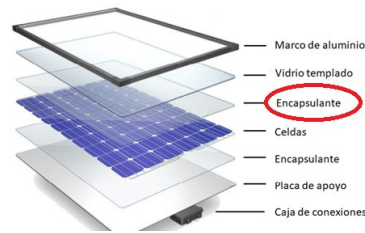


Figura 4: estructura de un panel, cortesía de Romero, I. (2017)

El vidrio, sumado al copolímero EVA, resultante de la adición de dos tipos de monómeros (moléculas diferentes que se combinan para formar la cadena polimérica final) son los encargados de la protección. En el caso de los films EVA se trata del etileno ( $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ ) y el acetato de vinilo ( $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{O}-\text{CO}-\text{CH}_3$ ). Estos monómeros se adicionan en diferentes proporciones para obtener los diferentes tipos de films EVA. Para predecir la vida útil de un módulo solar, es necesario analizar los principales modos en los que se produce la falla del módulo fotovoltaico. Sin embargo, es dificultoso para el fabricante y accionistas esperar y observar las pérdidas por fallas y degradación antes de introducir nuevos módulos fotovoltaicos en el entorno exterior (URL-EVA). Un modelo predictivo para determinar la esperanza de vida útil y para el rendimiento de un nuevo módulo fotovoltaico son extremadamente significativos, tanto para los fabricantes como para los clientes. En el caso de los módulos fotovoltaicos, la prueba de envejecimiento acelerado es uno de los principales análisis en los que se basa el modelo predictivo. El concepto básico implica varias pruebas de estrés acelerado utilizando técnicas de pre caracterización y post caracterización. En los programas de ensayos acelerados (AT), los módulos fotovoltaicos se someten a diferentes tipos de pruebas de estrés a niveles más altos que los niveles de campo, además de la caracterización previa, y posterior de los materiales y los módulos, desde el punto de vista de la durabilidad, la fiabilidad y la seguridad.

La inspección visual es el primer paso en el estudio de la degradación de los módulos. Se realiza una inspección minuciosa de los módulos objeto de estudio, especialmente de los puntos críticos y de los defectos que serán la referencia de los problemas a valorar durante el análisis. Los principales defectos que se pueden observar mediante la inspección visual son: La suciedad del módulo y la delaminación. Además, la presencia de burbujas, el amarillamiento de las celdas, la aparición de grietas y de células rotas, la existencia de puntos calientes, la oxidación, la degradación del material encapsulante: etilo vinil acetato (EVA). Uno de los problemas más frecuentes en el campo y provoca la decoloración de las cintas conductoras. Detectar la causa de la corrosión de un módulo fotovoltaico puede no ser sencillo porque los mecanismos de corrosión pueden estar relacionados con otros modos de degradación. Para que se produzca corrosión en un módulo fotovoltaico, se requiere un electrolito, un agente oxidante y un metal. El deterioro de cualquier componente del módulo fotovoltaico puede facilitar la corrosión, lo que permite la penetración de agua y oxígeno en la célula solar del módulo fotovoltaico. La corrosión en los módulos fotovoltaicos es iniciada y acelerada por varios factores simultáneamente y tiene una relación recíproca de causa y efecto. La Figura 5 muestra un resumen de los mecanismos de corrosión en los módulos fotovoltaicos informados en estudios anteriores, tal como lo plantea Jeong (2016).

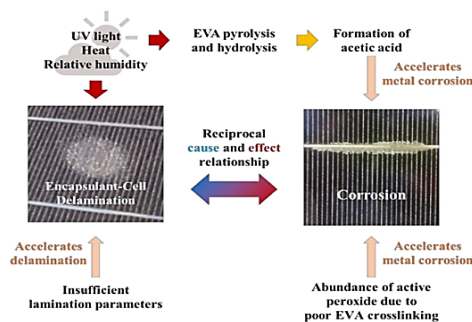


Figura 5: Mecanismo de corrosión provocado por el ingreso de agua y oxígeno. Fuente Jeong, 2016

El  $H_2O$  y el  $O_2$  ingresan a través de la lámina posterior o los bordes del marco y penetran en un espacio de celdas encapsulantes delaminadas. El hidrógeno gaseoso se forma durante la corrosión. Estos efectos de corrosión son consecuencia del deterioro del encapsulante EVA. Algunos estudios se han centrado en los problemas de delaminación de EVA causados por parámetros de delaminación y condiciones ambientales insuficientes. Otros estudios se han centrado en las causas de formación de ácido acético. Por otra parte, la delaminación es la pérdida de adherencia entre las capas debido a la humedad y a la exposición a altas temperaturas. Las imágenes pertenecientes a módulos de “generaciones” distintas, se muestran en la Figura 6.



Figura 6: a) y b) Módulos con delaminación y pérdida de adherencia.

Es uno de los principales defectos de los módulos, que produce dos efectos negativos: provoca cierto desacople mecánico en el módulo, lo que puede provocar la entrada de agua dentro de su estructura, puede además producir burbujas y pérdidas de energía. La falta de transparencia en estas zonas produce además disminución del área activa de la celda. Este defecto es peor si se da en los bordes del módulo, ya que aparte de la degradación, puede causar riesgos eléctricos tanto en el módulo como en la instalación. Por otra parte, se observa con frecuencia en las instalaciones fotovoltaicas módulos con una coloración amarillada en vez de azulada, que no es uniforme. La decoloración es debida a la degradación del EVA (material con el que se fabrica la celda) causada por la radiación UV solar incidente. El deterioro del encapsulante (EVA) es una de las degradaciones más importantes que sufre el panel debido a que su prolongada exposición a la radiación solar hace que sus propiedades ópticas cambien. La fiabilidad de los módulos fotovoltaicos se está convirtiendo en una aspiración importante en un escenario en el que la mayoría de los fabricantes de módulos fotovoltaicos establecen con sus clientes un contrato de garantía de 20 - 30 años. Los fabricantes de módulos fotovoltaicos garantizan una caída de potencia inferior al 20% durante el periodo de garantía. Con un periodo de garantía tan largo, los índices de degradación de los paneles solares deben estar bien definidos y ser inferiores al 0.8% anual (si esta degradación fuese lineal). Estudios recientes han informado de tasas de degradación de aproximadamente 0.6-0.7%/año. Esta tasa de degradación sigue siendo elevada, debido a la variabilidad de las muestras estudiadas y considerando que la degradación puede aumentar con el tiempo. Además, actualmente no se dispone de datos suficientes sobre fallas para realizar análisis estadísticos ya que la mayoría de los módulos fotovoltaicos en funcionamiento aún no han alcanzado los 25 años de



funcionamiento. Por lo tanto, la tasa de degradación de muchos módulos puede superar el 0,7% anual, lo que supone pérdidas para los fabricantes, ya que deben cumplir la garantía suministrando un módulo nuevo. Dependiendo del mecanismo implicado, la degradación de los paneles solares sobre el terreno puede ser a largo o a corto plazo. La fiabilidad y la vida útil de los sistemas fotovoltaicos dependen sobre todo de la eficiencia del sistema fotovoltaico y de sus diversos patrones de degradación. Estos modos de degradación, están causados por múltiples factores: la radiación ultravioleta (UV), la tensión junto con la humedad, la temperatura, el viento, el granizo y las altas tensiones del sistema, así como otros factores como interconexiones rotas, puntos calientes, corrosión, decoloración del encapsulante y delaminación.

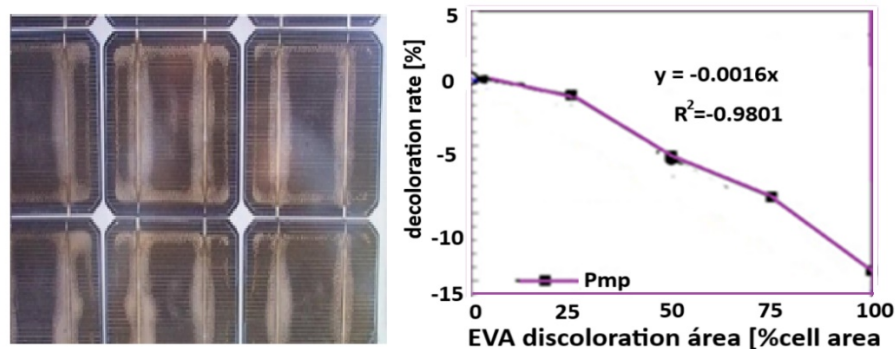


Figura 7: (a) Amarillamiento de celdas

(b). Tasa de degradación Jeong, 2016

La investigación sobre el modo de fallo del módulo fotovoltaico que se produce con mayor frecuencia y los factores implicados, ayuda a mejorar la fiabilidad del módulo fotovoltaico. Si alguno de los componentes del módulo FV se sustituye o se retira del entorno de campo, antes de su periodo de garantía debido a cualquier tipo de fallo y la potencia cae, ese tipo de fallos se denominan fallos duros, como se observa por ejemplo en la Figura 7 (a), en la 7 (b) la proporcionalidad entre el área amarilla y la tasa de degradación

## RESULTADOS

Las pérdidas por degradación son las que se producen cuando el rendimiento del módulo FV disminuye, pero sigue cumpliendo los requisitos de la garantía. Los mecanismos de fallo están relacionados principalmente con la construcción/ embalaje/diseño y el entorno operativo. Es por este motivo que los equipos instalados en zonas de altura y con niveles de radiación solar muy elevados están más propensos a degradarse. Se describe un procedimiento de análisis de muestras, que consistió en separar capas de un módulo para poder realizar algunos ensayos, tal como se muestra simbólicamente de la Figura 8

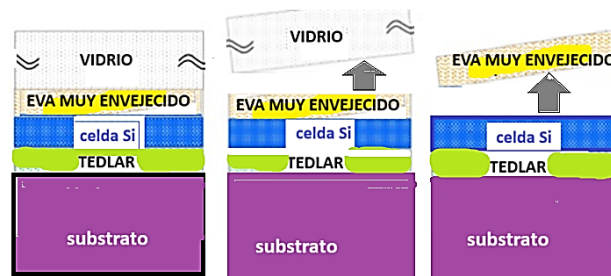


Figura 8: Representación del procedimiento de extracción de muestra EVA Jeong, 2016.

Las partes desprendidas, fueron ensayadas con espectro-radiómetros, que operan complementariamente. El desprendimiento fue solo mecánico, tal como se describe en Montero, et al., 2014. Se decidió el empleo parcial de dichos datos y materiales, pues se consideró que la utilización de solventes podría alterar los resultados. Los mismos se muestran en la Figura 9 “izquierda”. Obsérvese las curvas características de la transmitancia, según sea el caso. Posteriormente y con el objeto de determinar qué tipo de degradación se produjo, se optó por la técnica de Reflexión Interna Múltiple (MIR), en lugar de la técnica de Infrarrojo por transmitancia por dos razones importantes: la primera razón es porque el espesor de la capa transparente da lugar a espectros muy concentrados, lo que implica una pérdida de definición en los picos. Y en ese sentido no es conveniente utilizar ninguna técnica para disminuir el espesor (como el recorte o la extensión en frío o en caliente), ya que los efectos producidos por estas técnicas podrían superponerse a los producidos por la radiación. La segunda razón se debe a que el daño causado por la radiación UV es principalmente superficial y al utilizar la técnica de reflexión en la superficie, cualquier alteración que haya podido sufrir el material será más evidente en ésta, porque se encuentra en mayor concentración. Los mismos grupos de picos aparecen también en la muestra expuesta (c), pero se hacen visibles algunos cambios mostrando productos de degradación, la descomposición del acetato, en ácido. La banda correspondiente a la absorción de los grupos carbonilo se ha ensanchado, indicando otros productos típicos de degradación como los pertenecientes a grupos ácidos que aparecen como pequeñas bandas a frecuencias más bajas (aprox.  $1.718\text{ cm}^{-1}$ ). La aparición de grupos ácidos se confirma por una banda más ancha, característica de los grupos  $\text{-OH}$ , encontrada cerca de  $3.300\text{ cm}^{-1}$ . Se observan picos intensos en la región de  $1.200\text{-}1.020\text{ cm}^{-1}$  que corresponde al estiramiento del grupo éster ( $\text{CO-OCH}_3$ )

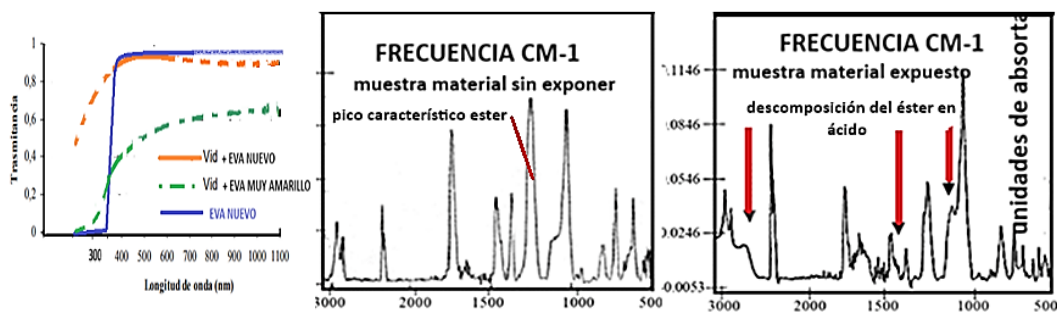
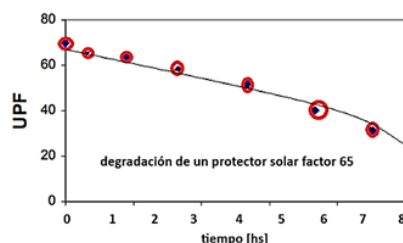


Figura 9: Transmitancia (izquierda) , Espectros de absorbancia (centro y derecha).

El índice de amarillamiento (YI) es un indicador numérico utilizado para evaluar el grado de decoloración (amarillamiento) en polímeros transparentes. Este índice es fundamental para el control de calidad en materiales, en los que la claridad es esencial, como la electrónica en general, y el EVA de los módulos FV en particular. Se calcula a partir de datos espectrofotométricos y describe el cambio de color de una muestra de ensayo de transparente o blanco, al amarillo. Factores como el envejecimiento, la exposición química o la radiación solar ultravioleta pueden contribuir a este cambio de color. Jeong, 2016 midió el índice de amarillamiento del EVA, definido como una medida del grado en que el color de una superficie se desplaza del incoloro hacia el amarillo (YI, Standard DIN6167), con un espectrofotómetro. Lo hizo separando del módulo fotovoltaico, primeramente, el vidrio, y finalmente el EVA envejecido (25 años de antigüedad en este caso) del vidrio. Entonces, midiendo la relación entre el YI y la transmisión de EVA, encontró que estaba dentro del rango de 36 a 44 (para módulos de 25 años de edad, se midió que YI 36 tenía una transmisión del 82 % a longitudes de onda inferiores a 550 nm y del 72 % a 450 nm. Jeong (2016).

### ***Características de cremas y UPF: experimentación, las cremas fotoprotectoras ensayadas***

Desde los '50, la gente emplea diversas y variadas sustancias para prevenir el daño producido por el sol. Actualmente se encuentran fórmulas, que contienen compuestos inorgánicos como el óxido de titanio, con combinaciones que protegen de una gran parte del abanico de radiación UV e Infrarrojos. Los principios activos utilizados como filtros solares son ácido p-aminobenzoico; 2-etioxietyl-p-metoxycinamato (cinoxato), dióxido de titanio, Trietanolamina salicilato, entre otros. Se efectuó un sondeo para conocer el mercado de estos productos en la ciudad de Salta; de acuerdo a la información obtenida se ensayaron pantallas solares de diferentes marcas y que cubren el espectro de FPS rotulados desde 8 hasta 65. Se ensayaron primeramente muestras de diferentes marcas comerciales y FPS. En otras experiencias, a los fines de uniformizar y contrastar los resultados, se ensayaron cremas protectoras solares de una misma marca comercial (Dermaglós), con similares fechas de elaboración y con diferentes grados de protección, rotulados como FPS 8, 15, 30 y 65. (Suarez et al., 2014). La Figura 10, muestra solo un resumen de los diferentes ensayos que se realizaron, pero allí puede observarse el deterioro del protector por el tiempo de exposición al sol. Estos resultados permitieron corroborar tiempo de reposición y existencia o no de componentes “anti UV”.



*Figura 10: Degradación del factor de protección de una crema protectora factor 65*

## **CONCLUSIONES**

Como una primera conclusión, se puede decir que la piel puede (y debe) ser protegida mediante productos externos, y en realidad, las mediciones se realizan midiendo las propiedades y degradación de esos protectores. No se realizaron medidas directas sobre una piel, para obtener conclusiones. Por otra parte, no está aceptado éticamente la realización de ensayos destructivos en pacientes vivos, por lo que pueden emplearse pieles artificiales. Las medidas realizadas en el EVA y módulos en general, son directas, o sea en su funcionamiento habitual. Por otra parte, tanto la vestimenta, las cremas protectoras y las gafas para el caso de los ojos, muestran su eficacia si se reponen en el período de tiempo recomendado. El período de reposición de las cremas es inferior al de las otras protecciones. Otro aspecto que se puede considerar es que, comparativamente, si bien la piel es el menos resistente (desde el punto de vista del daño que le provoca la radiación UV) de los “materiales” mencionados, y dependiendo del grado de la lesión, puede auto repararse. En el caso de las celdas solares, su utilización es tal, que permanentemente están expuestas a la radiación solar, dado que es su funcionamiento normal, y como se dijo, las fallas en el EVA de los módulos fotovoltaicos se producen con frecuencia como resultado de la degradación del material por la radiación UVA y UVB. Tanto la esperanza de vida, como la eficiencia de los módulos fotovoltaicos pueden mejorarse reduciendo el impacto de los fotones des dicha radiación a través del cristal de cubierta sin comprometer la transmitancia en la región de longitud de onda visible. Los vidrios recubiertos con  $\text{TiO}_2$  también muestran un mayor corte UV, lo que se traduce en una reducción de la transmitancia de la radiación UV A y UVB de hasta un 75%. Entonces y a modo de esquema general, se pueden sintetizar estos efectos en el pictograma que se muestra en la Figura 11. No es casual que los productos mencionados ( $\text{ZnO}$  y  $\text{TiO}_2$ ) también mejoran la performance de las cremas protectoras solares

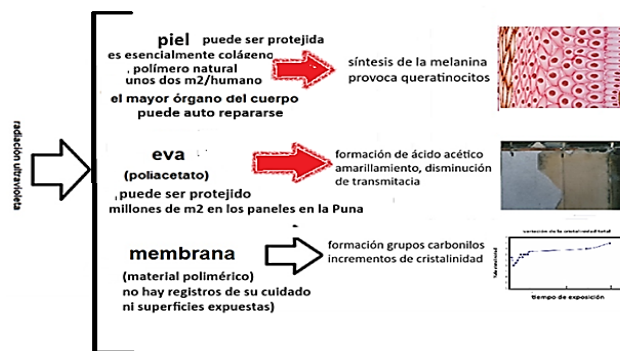


Figura 11: pictograma de efectos de ultravioleta en materiales

.El vidrio recubierto con ZnO mostró una tendencia a desplazar el corte UV a longitudes de onda más largas, así como a reducir la brecha de banda óptica de la muestra de vidrio recubierto. Es probable que la principal razón de ello sea que el  $\text{Fe}^{3+}$  coordinado tetraédricamente tiene un pico de absorción a unos 380 nm, pero también está sensibilizado por la presencia del recubrimiento de ZnO. Esta tendencia es menos clara en el caso de las muestras recubiertas con  $\text{TiO}_2$ . Ambas series de muestras expusieron un aumento significativo de la reflexión total para la luz incidente normal debido al mayor índice de refracción de los recubrimientos de óxido de película fina. Sin embargo, el aumento de la reflexión difusa fue significativamente menor,  $<4\%$ ; esto es una ventaja para la aplicación en la cubierta de vidrio de los módulos fotovoltaicos, donde pueda darse el hecho que la mayor parte de la luz entrante será de carácter difuso (Jiménez Reinoso, 2016). El vidrio recubierto muestra una mejora potencial en la esperanza de vida de los módulos fotovoltaicos a través de una disminución de la transmisión destructiva de la radiación UV al encapsulante hasta niveles relativos del 36,0% y 54,3% para  $\text{TiO}_2$  y ZnO, respectivamente. Además, aunque las muestras recubiertas han mostrado una reducción relativamente alta de la transmisión en la región espectral útil, la degradación de la transmisividad del encapsulante debería evitarse eficazmente. En el caso del ZnO, es evidente que el contenido de  $\text{Fe}^{3+}$  desempeña un papel importante en la actividad de bloqueo de los rayos UV, lo que supondría un compromiso entre la limitación del contenido de hierro del vidrio y una protección suficiente contra los rayos UV. Además, el vidrio recubierto de ZnO también mostró potencial en lo que respecta a la conversión descendente de luz UV a longitud de onda visible con picos a 377 y 640 nm. Así pues, es factible investigar la aplicación del ZnO como recubrimiento de los vidrios de los módulos fotovoltaicos, pero debe optimizarse, ya que existe un equilibrio entre el bloqueo de los rayos UV y la transmitancia en la región espectral útil para los módulos fotovoltaicos (Johansson et al., 2019). El dióxido de titanio es un bloqueante eficaz para los plásticos, un pigmento que sirve de pantalla contra los rayos UV. Los absorbentes como las cremas protectoras, son normalmente compuestos orgánicos (diseñados para absorber la luz UV y liberarla en una longitud de onda no dañina como el calor). ¿Será posible entonces predecir la durabilidad de los materiales, correlacionando la información existente sobre la piel y sobre los paneles FV? Como se dijo precedentemente los compuestos que contienen ZnO y  $\text{TiO}_2$ , podrían mejorar la “salud” tanto de la piel como la de los polímeros, pero por diferentes mecanismos. Es sabido que la dosis eritémica mínima (DEM) es una medida utilizada en fotobiología para evaluar la sensibilidad de la piel a la radiación ultravioleta (RUV). Esto se refiere a la mínima cantidad de radiación UV (dosis) necesaria para producir un eritema perceptible. Proviene del griego antiguo *ἐρύθημα* (*erýthema*, "rojez o inflamación"). Con estos niveles, es un fenómeno reversible. Se puede inferir, que como los polímeros artificiales no se “autorreparan”, no existe un término equivalente al DEM para los mismos, pero una medida eficaz consiste en “intervenir” (tomando una muestra del polímero desde la parte posterior) en un módulo. Este procedimiento puede normalizarse mediante el cálculo de su “índice de amarillamiento” (YI), que puede

ser un indicativo de lo que está sucediendo y lo que podría acontecer con el módulo en el futuro. En igual sentido los plásticos utilizados en pozas solares contienen aditivos como los del EVA, y pueden monitorearse por técnicas MIR y en caso de presencia de señales de ácido, será indicativa de deterioro.

## REFERENCIAS

- Acosta, L y Flexer, V. 2018. A First Assessment on the Scale-Up Possibilities of Different Electrochemical Techniques for Lithium Isotopic Enrichment. Industrial & Engineering Chemical.
- Ashish Mittal. (2024). Best UV Resistant Plastics for Outdoor Applications
- Garcia-Bertran, Serra-Baldrich, 2017. Baselga, Luca, Piquero-Casals, Agentes externos en la dermatitis atópica: nuevos conceptos en multiprotección. Elsevier
- Grau H, Babot M, Izquierdo A, Grau A. 2018. La Puna argentina Naturaleza y cultura. Serie Conservación de la Naturaleza N° 24.
- Jeong, Jae-Seong, 2016. Effect of EVA discoloration in 25-year-old single crystalline silicon photovoltaic modules operated under moderate climate. Microelectronics Reliability
- Jiménez Reinoso J., 2016. Enhancement of UV absorption behavior in ZnO–TiO<sub>2</sub>composites
- Johansson W; Peralta A; Bo Jonson Srinivasan A; Lars Ö; Karlsson, S. 2019. Transparent TiO<sub>2</sub> and ZnO Thin Films on Glass for UV Protection of PV. Frontiers in Materials Modules
- Köntges M., Kurtz S., Packard C.E., Jahn U., Berger K.A., Kato K., Friesen T., Liu H., Van Iseghem M. (2014) Review of Failures of Photovoltaic Modules. *International Energy Agency, IEA*.
- McKenzie, T. 1991. "Physical education's role in public health". SOFIT: System for observing fitness instruction time. Journal of Teaching in Physical Education, 11, 195–205.
- Montero Larocca, M; Cadena, C; Tamasi, M. 2014. Degradación de módulos fotovoltaicos y su influencia en la pérdida de potencia. Revista AVERMA año 2014
- Publicación Clínica Mayo, Carcinoma de células basales, <https://www.mayoclinic.org/es/diseases-conditions/basal-cell-carcinoma/symptoms-causes/syc-20354187>, Consulta 2024
- Sánchez L., Lanchipa P., Pancorbo J. (2002). Fotoprotectores tópicos, Revista de Dermatología.
- Suárez, H; Lera, H; Cadena, C; Salazar, G; Castillo, J; Suárez, G. 2014. Tolar Grande unido para protegerse de los rayos UV. Revista AVERMA año 2014
- URL-EVA: <https://www.eco-greenenergy.com/es/que-es-el-eva/>. Consulta 2022
- URL-UV: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ultraviolet-radiation>. Consulta 2023
- WHO Publication 2006 <https://www.who.int/publications/i/item/9241563214>

## AGEING AND SOLAR ENERGY ON THE PUNA

**ABSTRACT:** Tens of thousands of people work in the high-altitude territories of Salta and Jujuy in the Puna region. Many of them have been incorporated in recent years as a consequence of mining exploitation. Almost simultaneously, some solar parks with a total of approximately 500MW (slightly less than two million modules) were installed and started operating. Both arrays receive a significant amount of solar radiation on a daily basis. Part of this radiation, ultraviolet radiation, produces degradative effects. The challenge of the text is to show possible concurrent consequences between the two, as well as on the membranes used in the solar pools. The sequelae compared as a consequence of exposure to ultraviolet radiation show that deterioration can be quantified, although not necessarily predicted: in the skin by measuring the deterioration of the protections, and in the solar panels, by analysing the EVA (ethylene vinyl acetate) among other aspects. The results obtained show that, although complex, it is feasible to establish some comparative aspects between EVA and human skin to some extent, if certain abstractions are made.

**Keywords:** EVA, human skin, photovoltaic cell, ultraviolet radiation, solar ponds



## **DESARROLLO Y CALIBRACIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA LA MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL AGUA**

**Lucas R. A. Costilla<sup>1</sup>, Dante O. Dominguez<sup>2</sup>, , María S. Vilte<sup>1</sup>  
Gustavo J. Curkovic<sup>3</sup> y Carlos C. Martinez<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Salta – Facultad de Ciencias Exactas – Instituto Nacional de Energía No Convencionales INENCO.

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Salta – Facultad de Ingeniería.

<sup>3</sup>Consejo de Investigación UNSa.-Av. Bolivia 5150 C.P. 4400 – Salta Tel. 0387-4255389 – Fax 0387-4254389-

e-mail: mvilte88@gmail.com

**RESUMEN:** En este trabajo se propone la implementación de una técnica para medir la conductividad térmica en líquidos durante el régimen transitorio. Se presenta la construcción y puesta a punto de un dispositivo que permite determinar la conductividad térmica en líquidos con la técnica del hilo caliente. Se presentan los resultados de tres etapas de medición de la conductividad térmica: del platino, la glicerina y con el dispositivo calibrado, del agua destilada. Los valores obtenidos de las mediciones son comparados con los de la bibliografía utilizada.

**Palabras clave:** conductividad térmica, hilo caliente, transferencia de energía, régimen transitorio, temperatura.

### **INTRODUCCIÓN**

La determinación de propiedades térmicas de materiales es una demanda muy importante en diversas áreas de investigación relacionadas con los procesos de transferencia de energía. Las técnicas para la medición de la conductividad térmica de materiales pueden clasificarse en dos categorías: métodos de estado estacionario (como el de las placas paralelas) y en estado transitorio. En particular, para esta última categoría, la técnica del hilo caliente ha sido muy utilizada para fluidos, gases, sólidos y materiales usados en “eco construcciones”; resultando en mediciones de alta precisión.

En este trabajo se propone la implementación de una técnica para la medida de la conductividad térmica en fluidos y sólidos. Es de interés particular el desarrollo de un dispositivo basado en la técnica de hilo caliente para su uso en la caracterización térmica de materiales; por ejemplo, para caracterizar materiales de cambio de fase (MCF), y también la posibilidad de aplicarlo a otro tipo de materiales que son usados en “eco construcciones”.

En investigaciones anteriores, la conductividad térmica en estado estacionario de materiales ha sido llevada a cabo por métodos convencionales (placas paralelas) y técnicas ópticas (Interferometría Speckle). Sin embargo, para determinar esta propiedad térmica en relación con la caracterización de los MCF es necesario incorporar datos en estado transitorio. El método del alambre caliente (THW, Transient Hot Wire) ha sido ampliamente utilizado para determinar las conductividades térmicas de fluidos como instrumento absoluto que permite operar con una precisión de 0.02% (Healy et al., 1976). Actualmente, se ha extendido su uso a nuevos materiales para las denominadas “eco- construcciones”, gases y polvos, (Xie et al., 2006, Merckx et al., 2012 y Alvarado et al., 2012). En líneas generales, el método consiste en sumergir un hilo en la muestra de estudio. El hilo se calienta, dejando pasar una corriente eléctrica constante a través de él, y se debe medir la evolución de su temperatura en función del tiempo para diferentes valores de corriente.

## METODOLOGÍA

### *Modelo Matemático del método del hilo caliente*

El modelo matemático desarrollado para el método del hilo caliente (Carslaw y Jaeger, 1959) considera una fuente lineal de calor, delgada, infinitamente larga y con una distribución de temperatura uniforme. Esta fuente disipa un flujo de calor por unidad de longitud en un medio homogéneo e infinito. La suposición general es que la transferencia de calor hacia el medio es solamente por conducción; y tanto la temperatura de la fuente como la del medio de prueba se incrementa en el tiempo. La expresión que relaciona la temperatura ( $T$ ) con la posición ( $r$ ) y el tiempo ( $t$ ) está dada por ecuación general de difusión de calor de Fourier que, en coordenadas cilíndricas para la componente radial, se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

Las condiciones de frontera a las que está asociada la solución de la Ec. (1) en este caso son:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \left\{ r \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right\} = \frac{-q}{2\pi k} \quad (2)$$

para  $t = 0$  y  $r \rightarrow 0$ , y

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \{ \Delta T(r, t) \} = 0 \quad (3)$$

para  $t \geq 0$  y  $r \rightarrow \infty$ .

Carslaw y Jager (1959) muestran que la solución, donde  $u$  es una función de  $r$  únicamente, es la siguiente:

$$\Delta T = T(r, t) - T_0 = \frac{q}{4\pi k} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (4)$$

Donde  $k$  y  $\alpha$  son la conductividad y la difusividad térmica del medio respectivamente y  $q$  representa el flujo de calor por unidad de longitud de la fuente. La integral que aparece en la Ec. (4) es la función integral exponencial que está dada por:

$$\int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = -\gamma - \ln x + x - \frac{1}{4}x^2 + \dots \quad (5)$$

donde  $x = \frac{r^2}{4\alpha t}$  mientras que  $\gamma$  es la constante de Euler ( $\gamma = 0.5772$ ).

Para tiempos suficientemente grandes ( $t \gg \frac{r^2}{\alpha}$ ), condición que se cumple en el estado transitorio cuando  $r$  se aproxima a cero, los términos de orden superior se consideran despreciables con respecto a los dos primeros. En este caso, la Ec. (4) queda:

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} \left[ -\gamma + \ln \frac{4\alpha t}{r^2} \right] \quad (6)$$

$$\Delta T = \frac{-q}{4\pi k} \gamma + \frac{q}{4\pi k} \ln t + \frac{q}{4\pi k} \ln \frac{4\alpha}{r^2} \quad (7)$$

derivando esta última ecuación con respecto a  $\ln(t)$  se tiene la expresión:

$$\frac{d\Delta T}{d(\ln t)} = \frac{q}{4\pi k} \quad (8)$$

De la Ec. (8) se puede obtener la conductividad térmica  $k$ :

$$k = \frac{q}{4\pi} \left[ \frac{d\Delta T}{d(\ln t)} \right]^{-1} \quad (9)$$

Por lo tanto, si la temperatura del medio se mide en función del tiempo en cualquier posición radial fija, la conductividad térmica del medio ( $k$ ) es proporcional al flujo de calor de la fuente e inversamente proporcional a la pendiente del gradiente de temperatura en relación con el logaritmo natural del tiempo.

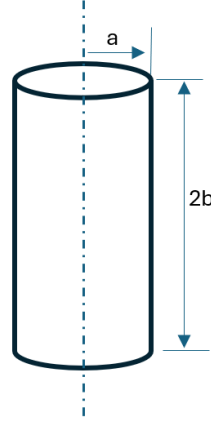


Figura 1: Dimensiones del hilo caliente.

Si se considera que la fuente de calor es un hilo de dimensiones finitas de radio  $a$  y longitud  $2b$  (Figura 1) sumergido en un medio cilíndrico de radio  $r$  fijo, entonces la solución a la ecuación de difusión de calor sería (Kluitenberg et al, 1993):

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} e^{-u(\frac{a}{r})^2} I_0(\frac{2au}{r}) \operatorname{erf}(\frac{b}{r}\sqrt{u}) du \quad (10)$$

donde  $I_0(x)$  es la función de Bessel modificada de orden 0 y  $\operatorname{erf}(x)$  es la función error. Suponiendo que el medio que rodea al alambre tiene dimensiones mucho más grandes que éste, se cumple que:

$$e^{-u(\frac{a}{r})^2} I_0(\frac{2au}{r}) \rightarrow 1 \text{ cuando } \frac{a}{r} \rightarrow 0 \quad (11)$$

$$\operatorname{erf}(\frac{b}{r}\sqrt{u}) \rightarrow 1 \text{ cuando } \frac{b}{r} \rightarrow \infty \quad (12)$$

Volviéndose a obtener así la Ec. (4).

#### **Metodología para la determinación de la conductividad térmica**

Si un pulso de corriente atraviesa el hilo, la energía eléctrica se disipa como calor por efecto Joule, estableciendo un flujo constante de calor hacia la muestra. En consecuencia, de esto se producirá un incremento de temperatura en el hilo. Cuando aumenta la temperatura, la resistencia eléctrica ( $R$ ) del hilo—y por lo tanto la diferencia de potencial ( $V$ ) entre sus extremos—aumentan. En la Figura 2 se muestra un esquema de la conexión de la celda de medición con el datalogger Lab Jack U6.

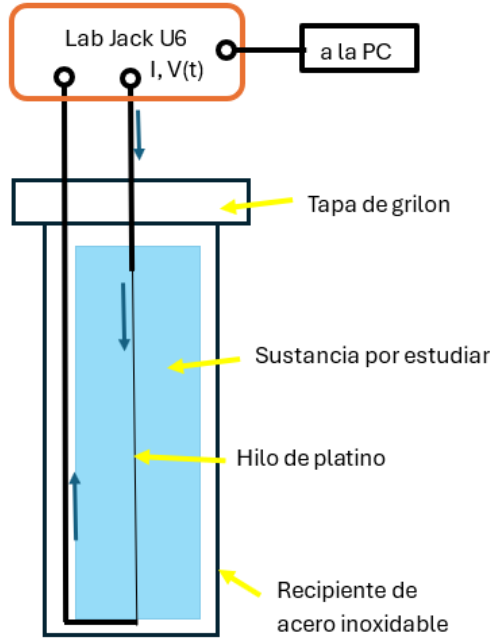


Figura 2: Esquema del dispositivo conectado del datalogger Lab Jack U6

Las magnitudes mencionadas se relacionan través de la siguiente ecuación:

$$V(t) = IR(t) = IR_0[1 + \sigma\Delta T(t)] \quad (13)$$

donde  $\sigma$  es el coeficiente térmico resistivo del platino, y  $R_0$  la resistencia inicial del platino. Para un hilo cilíndrico, recto e infinito se sustituye la diferencia de potencial entre dos puntos separados una distancia  $L$  en la Ec. (7) para  $\Delta T$ , considerando un radio muy pequeño tal que  $t \gg \frac{r^2}{\alpha}$ . De este modo se alcanza la solución (Kestin, Wakeham, 1978):

$$V(t) = IR_0\left\{1 + \sigma \frac{q}{4\pi k} [-\gamma + \ln t + \ln \frac{4\alpha}{r^2}]\right\} \quad (14)$$

De donde se puede obtener  $q$  de la forma:

$$q = \frac{I^2 R_0}{L} \quad (15)$$

Simplificando y derivando la Ec. (14) con respecto a  $\ln(t)$  se llega a la expresión:

$$\frac{d\Delta V(t)}{d(\ln t)} = IR_0\sigma \frac{q}{4\pi k} = \frac{I^3 R_0^2 \sigma}{4\pi L k} \quad (16)$$

Despejando  $k$  se tiene que:

$$k = \left(\frac{I^3 R_0^2 \sigma}{4\pi L}\right) \left(\frac{d\Delta V(t)}{d(\ln t)}\right)^{-1} \quad (17)$$

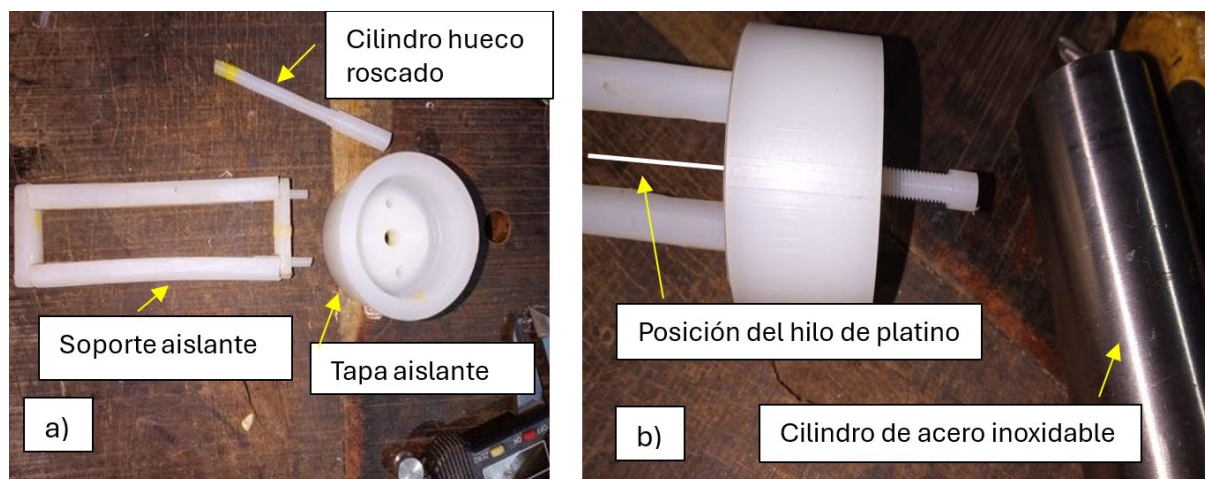
donde  $d\Delta V(t)/d(\ln t)$  es el valor de la pendiente que se obtiene mediante un ajuste de cuadrados mínimos sobre la región lineal de la curva  $\Delta V$  versus  $\ln(t)$ .

Entonces, para determinar la conductividad térmica del medio, se suministra un pulso de corriente eléctrica durante el cual se mide el incremento de la diferencia de potencial ( $\Delta V$ ) con respecto al tiempo. Luego de la gráfica de  $\Delta V$  versus  $\ln(t)$ , y mediante un ajuste de mínimos cuadrados sobre la región

lineal, se obtiene su pendiente para finalmente emplear la Ec. (17) para la determinación de la conductividad térmica del líquido considerado.

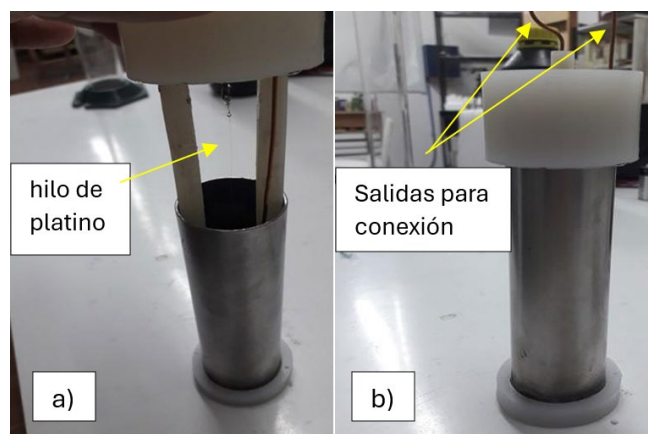
### **Dispositivo experimental de la Celda de medición**

La celda tiene como componentes (Figura 3): un recipiente cilíndrico de acero inoxidable con una capacidad de 143 cm<sup>3</sup>; un soporte aislante de Poliamida 6 (Grilon) que permite sujetar el hilo de platino mediante un sistema de rosca, para regular su tensión; y el hilo, que es el componente principal de la celda.



*Figura 3: a) Despiece del soporte del hilo de platino, b) Cilindro de acero inoxidable y montaje final del soporte, tapa y cilindro roscado donde se indica la posición del hilo.*

El soporte se realizó utilizando el mismo material para todas sus partes. Para su construcción se utilizó dos barras paralelas que están unidas por un puente a la parte inferior; y una tapa fijada en el extremo superior. En la construcción del soporte, para el hilo de platino, se ha empleado Grilon—material que combina las propiedades mecánicas y eléctricas adecuadas además de facilidad de maquinado. El soporte se mantiene estable en el rango de temperatura en el que se trabaja para esta experiencia.



*Figura 4: a) Dispositivo con el hilo de platino fijado, b) Dispositivo terminado*

Los extremos del hilo están sujetos con una soldadura de estaño a dos cables de cobre, que conectados a la fuente de corriente permiten medir la diferencia de potencial entre los extremos del hilo (Figura 4).

El hilo de platino se obtuvo de un sensor de temperatura PT100; luego se lo aprisionó mecánicamente con el cobre y una soldadura con estaño. La elección del hilo de platino fue por su alto valor de conductividad térmica (71,6 W/mK que es mucho mayor al de los líquidos analizados). Además, la conductividad térmica es proporcional a la conductividad eléctrica. Esto permite asumir que el flujo de corriente a través del líquido a analizar es nulo y toda la energía eléctrica es disipada por el hilo en forma

de calor hacia la muestra. Asimismo, el hilo de platino posee uno de los valores más altos de coeficiente térmico resistivo lo que hace posible medir de manera precisa las variaciones de temperatura del hilo. Las dimensiones del hilo son  $(6,83 \pm 0,01)cm$  de longitud y  $(3 \pm 1) \times 10\mu m$  de diámetro, por lo que se puede aproximar a un hilo de radio cero y longitud infinita (Khayet, Ortiz, 2005); cumpliendo así con las condiciones planteadas en (11) y (12). Se puede demostrar que, cuando el cociente ( $\eta$ ) entre la longitud y el diámetro del hilo es mayor a 60, el error que se comete en la determinación es inferior al 1% (Blackwell, 1953). En este dispositivo,  $\eta=2276$ , por lo que se cumple ampliamente la condición exigida.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Determinación del Coeficiente Térmico Resistivo (TCR) del Platino*

El valor del TCR ( $\sigma$ ) es uno de los parámetros involucrados en el cálculo de la conductividad térmica ( $k$ ). Este coeficiente indica la variación de la resistencia eléctrica del material por cada grado de cambio en su temperatura.:

$$R = R_0(1 + \sigma\Delta T) \quad (18)$$

Despejando  $\sigma$  de la Ec. (18) obtenemos:

$$\sigma = \frac{R-R_0}{R_0(T-T_0)} \quad (19)$$



*Figura 5: Configuración para la medición del coeficiente de resistividad térmica del platino.*

En la Figura 5 se muestra la configuración utilizada para realizar la medición. Para determinar el valor de este coeficiente se debe medir el valor de la resistencia del hilo a diferentes temperaturas y hacer un ajuste de cuadrados mínimos sobre los puntos obtenidos (Figura 6).



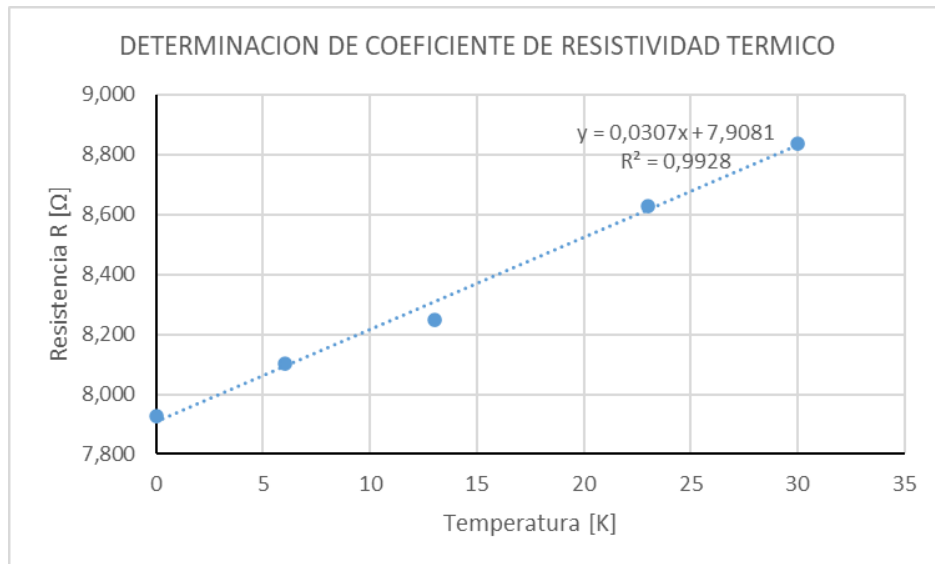


Figura 6: Gráfica de la Resistencia  $R$  en función de la temperatura.

A partir del ajuste realizado se obtiene el valor del coeficiente de resistividad térmico:

$$\sigma = (4,1 \pm 0,5) \cdot 10^{-3} K^{-1} \quad (20)$$

Este valor coincide con el reportado con otros autores (Khayet, Ortiz, 2005) en el rango de temperaturas ensayado:

$$\sigma = (3,35 \pm 0,03) \cdot 10^{-3} K^{-1} \quad (21)$$

#### Calibración con líquido de referencia: Glicerina



Figura 7: Fotografía de la celda de medición conectada al datalogger Lab Jack U6.

La glicerina es un fluido de propiedades térmicas bien conocidas y ampliamente utilizado como muestra de referencia. Para adquirir los datos se utilizó un dispositivo LabJack serie U6 con una frecuencia de 20 Hz. El LabJack U6 cuenta con 14 entradas analógicas y un software para registrar los datos tomados con un amplio rango de frecuencias. Además, trabaja con un rango de voltajes desde los 0,01 a los 10 Volts. En la Figura 7 se muestra una fotografía de la celda de medición cargada con glicerina—que está

dentro de un vaso térmico para asegurar una temperatura constante del sistema y la conexión con el dattaloger.

En la Figura 8 se puede ver que, a partir de los 5 segundos, la dispersión de los datos incrementa respecto a la tendencia lineal inicial. Esta dispersión está asociada a la presencia del fenómeno de convección. En este análisis es de interés la región lineal porque se acerca a que se cumplan las condiciones de validez del método.

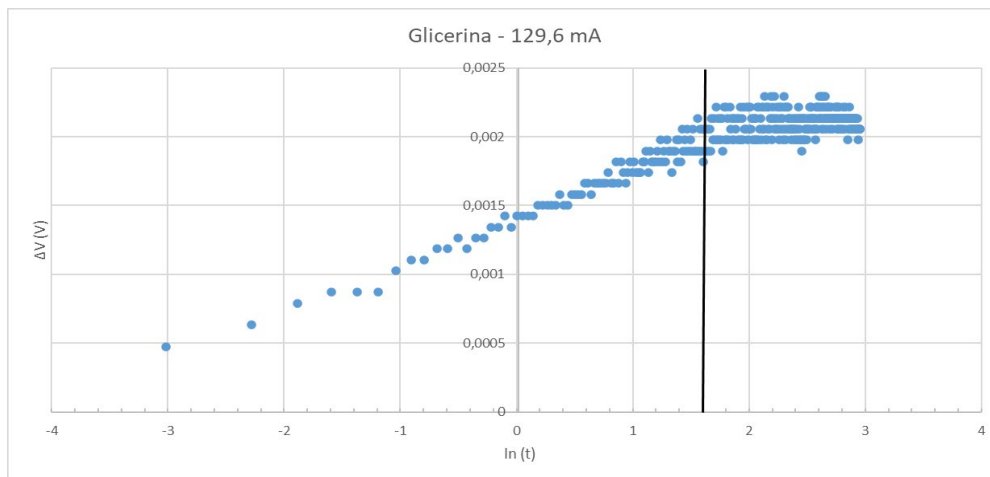


Figura 8:  $\Delta V$  en función del  $\ln(t)$  para una corriente constante de 129,6 mA. La recta vertical indica el tiempo  $t=5$  segundos.

En la Figura 9 se muestra la región lineal seleccionada para la determinación de la pendiente, en el intervalo de tiempo entre 0,30 s y 3,05 s.

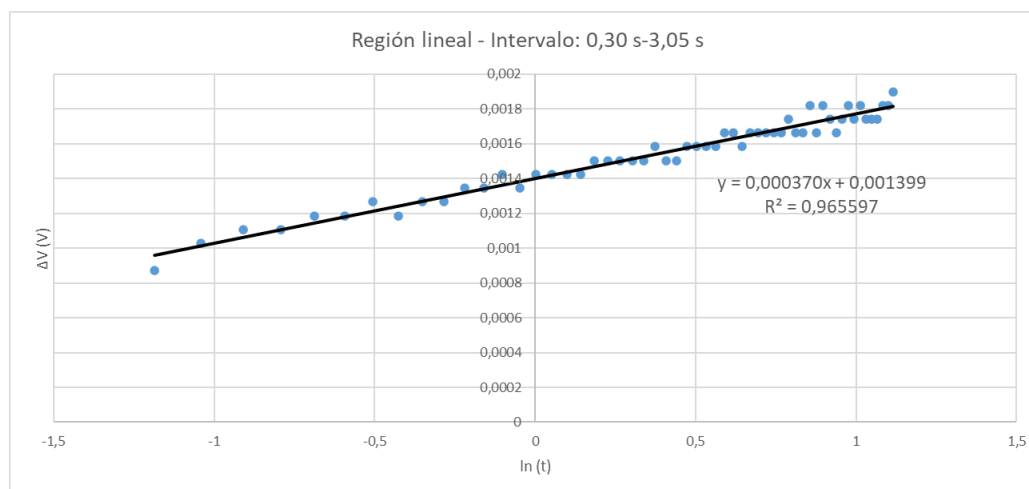


Figura 9:  $\Delta V$  en función del  $\ln(t)$  para una corriente constante de 129,6 mA en un intervalo de 0,30 a 3,05 segundos.

La gráfica de  $\Delta V$  versus  $\ln(t)$  muestra la necesidad de hacer un ajuste de cuadrados mínimos sobre la región lineal de la curva obtenida. A partir de esta se obtiene el valor de la pendiente, al conocer el resto de los parámetros involucrados, se puede calcular la conductividad térmica de la glicerina. Para  $I = 129,6 \text{ mA}$ ,  $R_0 = 8,02 \Omega$ ,  $\sigma = 0,0041 \text{ K}^{-1}$ ,  $L = 0,0638 \text{ m}$ , el valor obtenido es:

$$(1,81 \pm 0,09) \frac{W}{mK} \quad (22)$$

Considerando que la conductividad térmica de la glicerina es  $\kappa = 0,29 \frac{W}{mK}$  (Alvarado S. et al., 2012), se determina un factor de calibración (A) del instrumento. Al incluir este factor en la Ec.17 se obtiene:

$$k = \left(\frac{1}{A}\right) \left(\frac{I^3 R_0^2 \sigma}{4\pi L}\right) \left(\frac{d\Delta V(t)}{d(\ln t)}\right)^{-1} \quad (23)$$

El valor del factor de calibración es  $A = 6,2$ . Con este factor, la conductividad térmica de la glicerina obtenida en la experiencia es de:

$$\kappa = (0,29 \pm 0,02) \frac{W}{mK} \quad (24)$$

Con el objetivo de verificar el resultado obtenido para la glicerina se realizaron una serie de mediciones con este mismo fluido. Para estas mediciones se aplicaron distintos valores de corriente eléctrica ( $I$ ) que van desde los 110mA a los 140mA. En la Figura 10 se muestran los resultados experimentales.

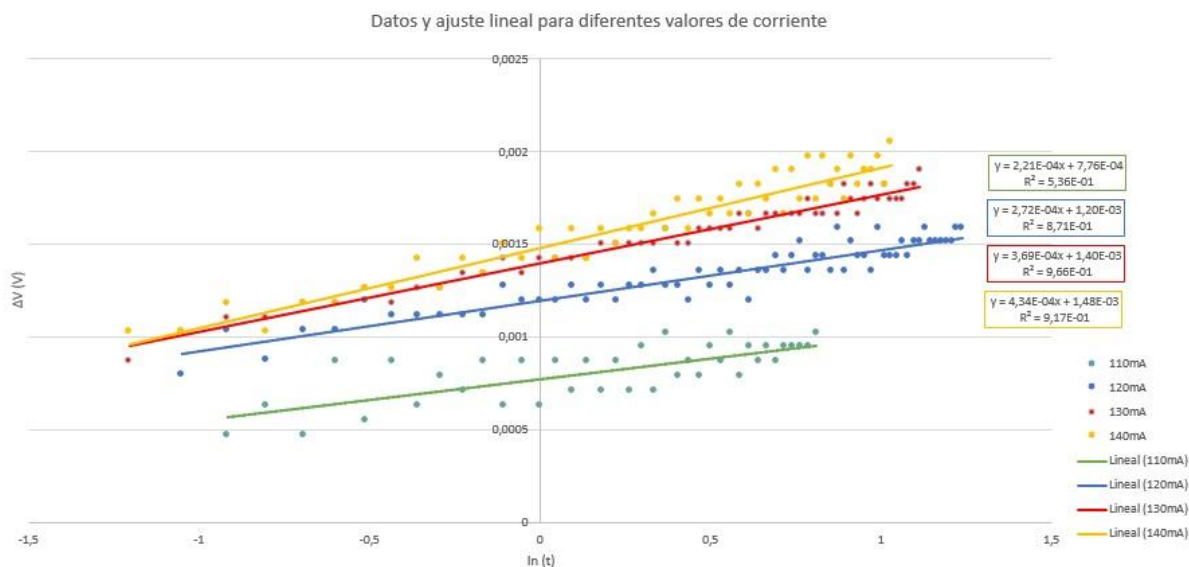


Figura 10: Comparación para diferentes valores de corriente en glicerina.

A partir de los ajustes de mínimos cuadrados y con los valores de las pendientes, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Conductividad térmica para diferentes valores de intensidad de corriente eléctrica en glicerina

| I (mA)   | 110       | 120       | 130       | 140       |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| k (W/mK) | 0,30±0,02 | 0,31±0,02 | 0,29±0,02 | 0,31±0,02 |

Estos resultados coinciden con otros autores (Decagon Devices Incorporated, 2001; Alvarado S. et al., 2012), y se aprecia que los valores de la conductividad térmica obtenidas con el dispositivo coinciden para diferentes valores de intensidad de corriente. Esto nos indica que la conductividad térmica no depende de la intensidad de corriente.

#### Determinación de la conductividad térmica del agua

El agua es un fluido que ha sido analizado ampliamente en sus propiedades térmicas; en particular su conductividad térmica ( $k$ ) es 0,58 W/mK, (Garnier et al., 2008). Se usó esta sustancia líquida para validar el funcionamiento del dispositivo construido. En la Figura 11 se muestran datos de dos experiencias para el agua y en la Tabla 2 se muestran los valores de conductividad térmica obtenidos para dos valores

de corriente eléctrica. Para la obtención de los valores mencionados, se empleó el factor de calibración previamente encontrado ( $A=6,2$ ).

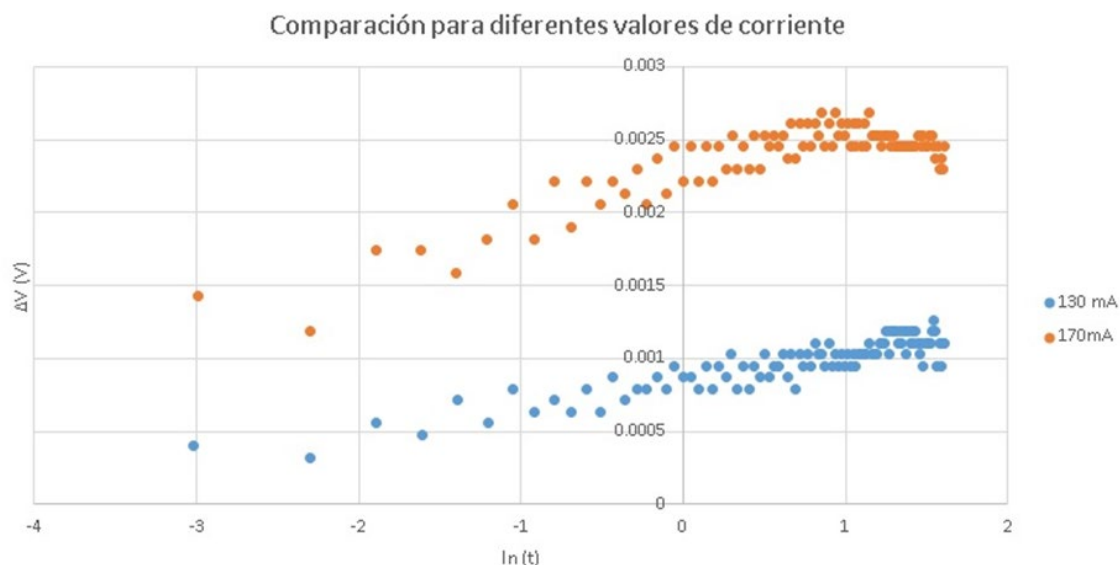


Figura 11: Comparación para diferentes valores de corriente en el agua destilada.

Tabla 2: Conductividad térmica para diferentes valores de intensidad de corriente eléctrica en agua

|          |                 |                 |
|----------|-----------------|-----------------|
| I (mA)   | 130             | 170             |
| k (W/mK) | $0,57 \pm 0,05$ | $0,54 \pm 0,05$ |

Las medidas obtenidas coinciden con las realizadas por otros autores (Garnier et al., 2008; Hechavarría et al., 2017). Estas mediciones se realizaron para dos valores diferentes de intensidad de corriente eléctrica en agua y usando el factor de corrección determinado para el dispositivo.

## CONCLUSIONES

Se diseñó y fabricó la celda de medición y el soporte para el hilo de platino. Luego, se determinó el coeficiente térmico resistivo del alambre de platino (TCR)  $\sigma = (4,1 \pm 0,5) \cdot 10^{-3} K^{-1}$ ; este valor coincide con otros que están citados en la bibliografía (Khayet, Ortiz, 2005).

Se obtuvo el factor de corrección  $A = 6,2$  del instrumento, realizando medidas de la conductividad térmica de una sustancia conocida como la glicerina. Se logró medir satisfactoriamente la conductividad térmica del agua destilada  $\kappa = (0,57 \pm 0,05) \frac{W}{mK}$  con un error relativo menor al 10%, empleando el factor de corrección del instrumento. En el análisis de los datos, se pudo establecer un criterio para verificar el ajuste de mínimos cuadrados realizado sobre la región lineal correcta en las curvas de  $\Delta V$  versus  $\ln(t)$ . Esta celda puede ser empleada para determinar la conductividad térmica materiales de cambio de fase como grasas orgánicas.

## AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Salta, Proyecto CIUNSa. N° 2499, por el financiamiento recibido.

## REFERENCIAS

- Alvarado S., Calderon A., Ivanov R., Juárez A. G. y Marín E. (2012). A hot-wire method based thermal conductivity measurement apparatus for teaching purposes. *Eur. J. Phys.* 33, 897–906.
- Blackwell, J. H. (1953). Radial-axial heat flow in regions bounded internally by circular cylinders. *Can J Phys.* 31:472-9.
- Carslaw, H.S. y Jaeger, J.C. (1959). *Conduction of Heat in Solids*. Clarendon Press, Oxford.
- Decagon Devices Incorporated (2001). *KD2 Thermal Properties Analyzer User's Manual*, Version 1.0. <http://www.thermalresistivity.com/KD2man.pdf> (2006/01/23).
- Garnier, J. P., Kadjo, A., Martemianov S., Maye, J. P., Saillard, J. y Thévenot, G., (2008), *Int. J. of Thermophysics*, 29, 468.
- Healy J., de Groot J. y Kestin J. (1976) "The theory of the transient hot-wire method for measuring thermal conductivity". *Physica B+C*, Volume 2, Issue 2 [https://doi.org/10.1016/0378-4363\(76\)90203-5](https://doi.org/10.1016/0378-4363(76)90203-5)
- Hechavarría, R., Delgado, O. y Pazmiño, F. (2017). Estudio de un nuevo procedimiento para medir la conductividad y difusividad térmicas de materiales. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, (17), 15-22. <https://doi.org/10.17163/ings.n17.2017.02>
- Kestin, J y Wakeham, W. A. (1978) *Physica* 92A, 102.
- Khayet, M. y Ortiz, J. M. (2005). *Int. J. Thermophysics*, 26, 3.
- Kluitenberg, G.J., Bristow K.L. y Ham J.M. (1993). Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 1444-1451.
- Merckx B., Dudoignon P., Garnier J. P., Marchand D. (2012) "Simplified Transient Hot-Wire Method for Effective Thermal Conductivity Measurement in Geo Materials: Microstructure and Saturation Effect". *Hindawi Publishing Corporation Advances in Civil Engineering Volume*. Article ID 625395, 10 pages doi:10.1155/2012/625395.
- Xie H. Q., Gu H., Zhang X., Fujii M. (2006) "Short Hot Wire Technique for Measuring the Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Various Materials". *Measurement Science and Technology* · DOI: 10.1088/0957-0233/17/1/032.

## DEVELOPMENT AND CALIBRATION OF A DEVICE FOR MEASURING THE THERMAL CONDUCTIVITY OF WATER

**ABSTRACT:** In this paper we propose the implementation of a technique to measure the thermal conductivity in liquids during the transient regime. The construction and development of a device that allows to determine the thermal conductivity in liquids with the hot wire technique is presented. The results of three measurement stages are presented: the coefficient of thermal resistivity of platinum, of thermal conductivity: of glycerin and with the calibrated device, the thermal conductivity of distilled water. The values obtained from the measurements are compared with those from the literature used

**Keywords:** thermal conductivity, hot wire, energy transfer, transient regime, temperature.

## **ESTUDIO COMPARATIVO DE PROGRAMAS DE PIV PARA EL ANÁLISIS DE CONVECCIÓN NATURAL EN UNA CAVIDAD RECTANGULAR CALENTADA LATERALMENTE**

**Sosa Matias<sup>1</sup>, Vilte Maria<sup>2</sup>, Domínguez Dante<sup>3</sup>, Martínez Carlos<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Exactas. Salta, Argentina

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Exactas, INENCO. Salta, Argentina

<sup>3</sup>Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ingeniería. Salta, Argentina

e-mail: [matias96sosa@gmail.com](mailto:matias96sosa@gmail.com)

**RESUMEN:** En el presente trabajo se evalúan y comparan tres programas diferentes que aplican la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV). El proceso de comparación se realizó mediante el estudio del flujo que resulta de la convección natural de agua en un recinto cerrado calentado lateralmente, en el que se emplea agua como fluido convectivo. Se pretende identificar fortalezas y debilidades en aspectos como calidad, velocidad, precisión, versatilidad y accesibilidad. Se validaron los campos de velocidades que se obtuvieron mediante contraste con los flujos de las fotografías de larga exposición y de los videos. Los resultados de las comparaciones indican que, si bien los programas analizados generan mapas de velocidades parecidos, cada uno detecta mejor ciertos aspectos específicos, por lo que son complementarios para un análisis completo del flujo.

**Palabras clave:** PIV, convección natural, recinto cerrado, visualización de flujo.

### **INTRODUCCIÓN**

Las propiedades dinámicas y térmicas de la convección natural transitoria en cavidades han sido estudiadas en el contexto de la limnología, la geofísica, la energía solar y las aplicaciones de mezcla, con el fin de desarrollar modelos realistas de diversos sistemas. La comprensión del proceso de transferencia de calor es fundamental para optimizarlo o minimizarlo según las necesidades (Poujol et al., 2000). En particular, el estudio de la transferencia de calor por convección natural en el interior de edificaciones es crucial para la investigación en eficiencia energética. Para cuantificar esta transferencia, es esencial conocer el campo de velocidades que se establece dentro del recinto bajo distintas condiciones térmicas que simulan escenarios reales, como el calentamiento solar en una pared lateral o un piso radiante. Tradicionalmente, el campo de velocidades se obtenía mediante fotografías de larga exposición y la medición de la longitud de las trazas (Vilte y De Paul, 1994). Sin embargo, este método sólo proporciona la magnitud y dirección de la velocidad en puntos específicos del plano de referencia, lo cual es suficiente para trazar líneas de corriente y describir cualitativamente el flujo (Vilte y De Paul, 1997). Aunque este proceso es lento, los avances tecnológicos recientes permiten procesar datos de manera más rápida y precisa.

En el ámbito de la óptica, se han desarrollado diversas técnicas para medir el campo de velocidades, tales como Shadows, Schlieren y la Fluorescencia Inducida por Láser (LIF). Sin embargo, la Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) se destaca como una herramienta cuantitativa y no invasiva que ofrece ventajas significativas. A diferencia de métodos tradicionales como la anemometría de hilo caliente y la Velocimetría Láser Doppler, que solo proporcionan mediciones en un punto específico del espacio, PIV permite obtener un campo de velocidades en múltiples direcciones (2D y 3D) (Westerweel, 1997; Adrian, 2005). Esta técnica ha sido empleada anteriormente para medir el campo de velocidad en una cavidad llena de aire con paredes isotermales y números de Rayleigh del orden de  $10^6$  (Mamun et al., 2008), así como para medir velocidades y temperaturas en un flujo de convección



natural en una cavidad cúbica llena de agua, calentada diferencialmente en la pared inferior y con números de Rayleigh del orden de  $10^{10}$  en régimen turbulento (Meyer et al., 2002). La técnica PIV permite establecer el campo de velocidad a partir de un par de imágenes consecutivas de un flujo con trazadores, utilizando la correlación (Raffle et al., 2007). La función de correlación, compleja en términos de cálculo, se simplifica mediante el uso del algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) en los programas que aplican esta técnica (Pérez Vidal, 2016; Guirado Navarro, 2017).

Este trabajo se realizó en el marco de una Beca de Estímulo a las Vocaciones Científicas (EVC) y se presenta una parte del estudio sobre procesos de convección natural en una cavidad rectangular cerrada. A continuación, se exploran distintos programas libres que aplican la técnica de PIV, con el objetivo de evaluar su potencial y eficiencia en situaciones reales. Este estudio pretende establecer una guía para la adquisición y el procesamiento de imágenes, así como para la interpretación de los resultados obtenidos.

## SISTEMA EXPERIMENTAL ESTUDIADO

### *Cavidad y calefaccionamiento*

El sistema que se estudia, consiste en una cavidad rectangular de  $0,115 \text{ m} \times 0,080 \text{ m} \times 0,095 \text{ m}$  construida con placas de vidrio, con techo de acrílico y una de las paredes de aluminio, todas las paredes son de 3 mm de espesor. La cavidad recibe un flujo de calor constante generado por un devanado de alambre de constantan sobre una placa de resina con una resistencia eléctrica de  $18,3 \Omega$ , y alimentado por una fuente de tensión constante de 10,20 V. Se interpone entre el fluido y placa calefactora, una superficie metálica para asegurar que el flujo de energía entregado sea uniforme (Alvarez et al, 2008) y se cubre el calefactor con un material aislante de 18 mm de espesor para minimizar pérdidas de calor al ambiente, como se muestra en la Figura 1. El recinto está expuesto a una temperatura ambiente de  $21^\circ\text{C}$  estabilizada. La cavidad está expuesta al ambiente y pierde calor por convección por sus 3 paredes laterales y el techo. El piso pierde calor por conducción al estar en contacto con una base metálica (Figura 1(a)).

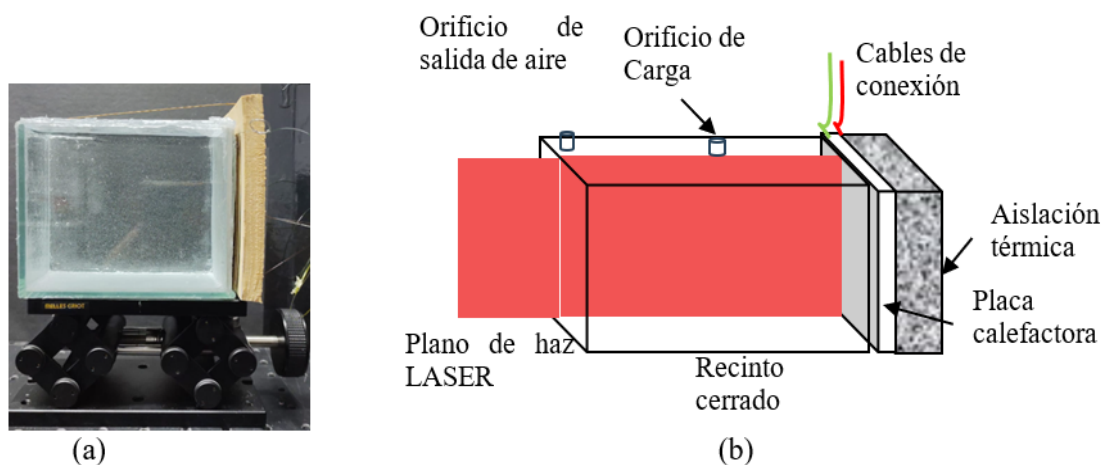


Figura 1:(a) Fotografía del recinto. (b) Esquema de vista lateral del recinto

### *Sistema Óptico y captura de imágenes:*

El recinto tiene agua desgasificada con microesferas de vidrio que actúan como trazadores (Figura 2). Las microesferas tienen un diámetro entre  $15\mu\text{m}$  y  $150\mu\text{m}$ , estimado a partir de las imágenes obtenidas por el Laboratorio LASEM (UNSa). Estas tienen una densidad relativa próxima a la unidad (De Paul et al., 1993), por lo que son arrastradas en su movimiento. Las partículas trazadoras son iluminadas con un haz plano, que se forma al expandir luz láser He-Ne de 50 mW ( $\lambda=632,8 \text{ nm}$ ) haciendo uso de una lente cilíndrica. Posteriormente se coloca una lente convergente de 500 mm para optimizar la iluminación. El haz plano llega de forma perpendicular al recinto como se muestra en la Figura 3.

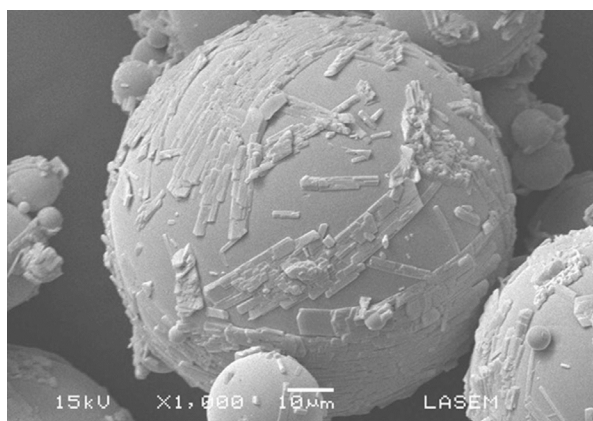


Figura 2: Imagen de las microesferas de vidrio mediante microscopio electrónico

Las imágenes fueron capturadas con una cámara Nikon D7100 equipada con un objetivo macro de 105 mm. La cámara se coloca de forma perpendicular al plano iluminado y se enfoca manualmente (Figura 3). Esta cámara tiene un sensor CMOS de 23,5 x 15,6 mm y una resolución de 24,1 megapíxeles, produciendo imágenes con una resolución de 6000 x 4000 píxeles. La adquisición de imágenes incluye la grabación de videos, fotografías de larga exposición y fotografías tomadas en intervalos controlados.

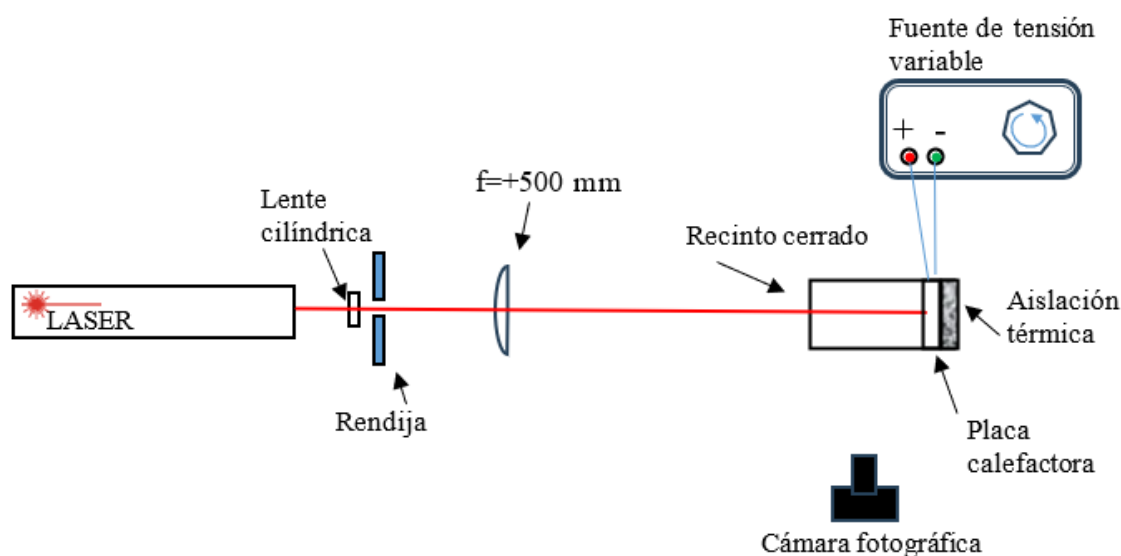


Figura 3: Sistema óptico de iluminación

## DESCRIPCIÓN DE LOS PROGRAMAS ANALIZADOS

**FORUGHI:** Es un programa en Python escrito por Farzad Forughi (Forughi, 2022). Su funcionamiento depende de un archivo con funciones definidas por el autor, que utiliza pocas librerías de fácil instalación. A este programa se ingresan 2 imágenes y dentro del script se pueden ajustar parámetros para determinar el escalado de las magnitudes de las velocidades. Al final del procesamiento el programa devuelve una gráfica del campo de velocidades, una gráfica de líneas de corriente y un archivo formato npz con el campo en forma matricial. Este último es útil si se quiere trabajar sobre el campo obtenido posteriormente.

**FIJI:** Es una distribución de ImageJ, un popular programa de procesamiento de imágenes de dominio público. FIJI incluye una colección de plugins preinstalados para ImageJ que facilitan tareas avanzadas de análisis de imágenes (Schindelin et al, 2012). Tiene plugins específicos para el análisis de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV). La herramienta de *PIV analysis* proporciona mapas que contienen la información del campo de velocidad. Genera un mapa de color que representa la dirección del flujo y además dos mapas en escala de grises con las componentes de velocidad, uno para la componente horizontal y otro para la componente vertical.

*PIVlab*: Es una herramienta de código abierto creada por William Thielicke, para la aplicación de la técnica PIV que funciona como una aplicación dentro de MATLAB (Thielicke y Sonntag, 2021). Este programa, a partir de al menos un par de imágenes, hace posible mostrar los valores de velocidad en cada punto, escalar los resultados y filtrar rangos de velocidades de interés, además de eliminar valores anómalos o inexistentes en el sistema real. Permite además personalizar la apariencia de los campos de velocidades, realizar análisis estadísticos y acceder a otros campos como la divergencia y la vorticidad.

## METODOLOGÍA

En cada uno de los programas se ingresa el mismo par de imágenes consecutivas conseguidas de una de las ráfagas sin reprocesar, el intervalo de tiempo entre fotografías consecutivas es de 350 ms. También se utiliza una fotografía de referencia con la que se determina la relación px/mm, necesaria para calibrar los valores de velocidad obtenidos. Para mantener las condiciones de procesamiento, todos los programas emplearon una ventana de interrogación de  $16\text{px} \times 16\text{px}$ .

Dado que las salidas de todas las herramientas evaluadas son variadas se decidió compararlas, en una primera instancia, evaluando la dirección de la velocidad del fluido en distintos puntos, ya que esta es la información que todos devuelven en común. Como segundo criterio se evaluó la magnitud del campo y las líneas de corriente generadas.

## RESULTADOS

Las imágenes y los vídeos analizados corresponden a un tiempo de calentamiento de 30 minutos del sistema estudiado, caracterizado por un número de Rayleigh del orden de  $10^6$ , lo que corresponde a un flujo transitorio replicando las condiciones térmicas de un trabajo anterior (Alvarez et al., 2008). El plano iluminado fue dividido en cuadrículas a fin de facilitar su análisis. La cuadrícula implementada es de  $3 \times 3$  y se nombró cada celda con letras como se observa en la Figura 4.

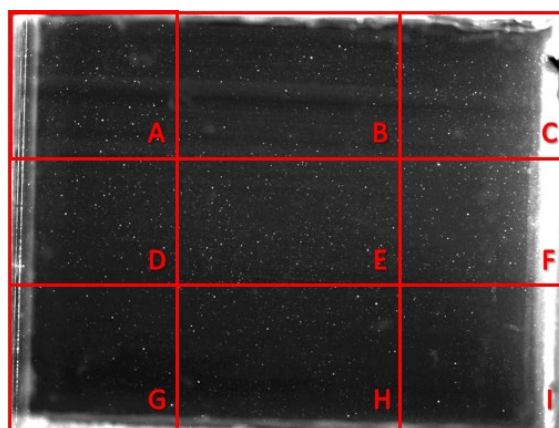


Figura 4: Imagen del plano iluminado con la cuadrícula.

En una primera instancia se describe el flujo visualizado en base a los videos y fotografías de larga exposición y luego se analiza los mapas generados por cada programa. Las celdas A, B, C, D, E y F son las de mayor interés debido a que son las que presentan mayor actividad en cuanto al movimiento y a la transferencia térmica. La cara caliente se encuentra a la derecha de la imagen en las celdas C, F e I. En la Figura 4 se puede observar la densidad de partículas utilizadas durante el estudio.

### ***Descripción del flujo en base a los videos y las fotografías de larga exposición:***

A fin de establecer la referencia del flujo estudiado se procede a describir lo observado mediante videos (Sosa, 2024) y fotografías de larga exposición como la de la figura 5.

En la celda A se observa que el flujo que llega desde la pared caliente, al interactuar con la esquina, crea un vórtice en sentido antihorario. Las partículas situadas por debajo del vórtice se desplazan hacia abajo si están próximas a la pared, de lo contrario se mueven hacia la derecha.

En la celda B, se puede observar que una capa cercana al techo el fluido se desplaza hacia la pared más fría a gran velocidad, mientras que en una capa inferior se mueve más lentamente retornando hacia la pared más caliente. En la interfaz de estos dos flujos se puede observar cómo algunas partículas de la capa inferior cambian de dirección, siendo arrastradas por la corriente de la capa superior más rápida.

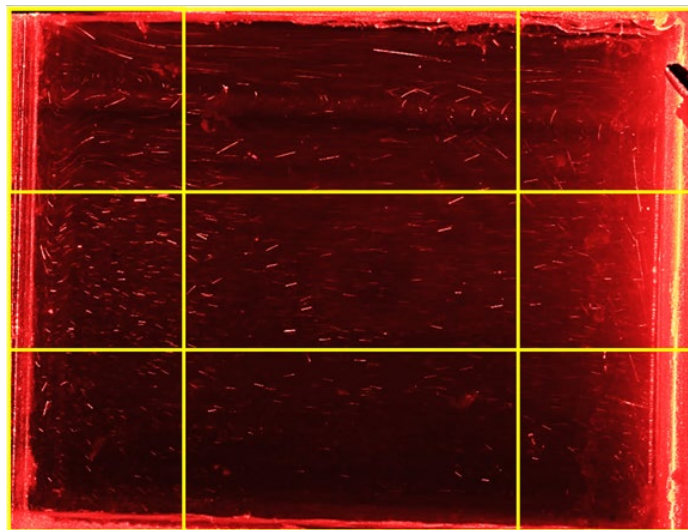


Figura 5: Fotografía de larga exposición ( $t_{exp} = 20\text{ s}$ ) del flujo convectivo en el recinto.

En la celda C (Figura 6(a)), se observa que el flujo proveniente de la pared calentada incide sobre la esquina superior y da lugar a tres corrientes de flujo. La corriente C1 es un flujo ascendente cercano a la pared caliente; al llegar a la esquina, se genera un vórtice en sentido antihorario, del cual se desprenden dos corrientes adicionales: la corriente C2 se dirige a  $45^\circ$  respecto al techo y la corriente C3 se desplaza a lo largo del techo de la cavidad. Parte de la corriente C2 es reabsorbida por la corriente C1.

En la celda D (Figura 6(b)), las partículas cercanas a la pared más fría descienden a gran velocidad, y a medida que estas descienden a mayor distancia de la pared, su velocidad disminuye. Se observa que partículas más alejadas de la pared se mueven lentamente retornando hacia la pared caliente.

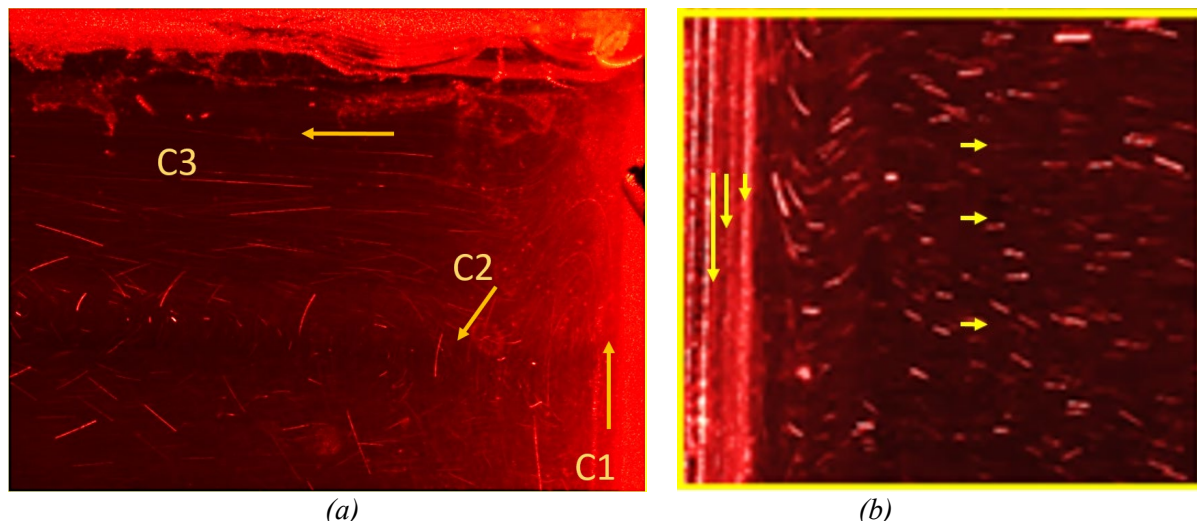


Figura 6: Dirección del flujo marcado con flechas, (a) celda C, (b) celda D

En la celda E, se observa un movimiento generalizado hacia la derecha a muy baja velocidad. Además, se ve que algunas partículas se cruzan sin colisionar, dando indicio que se trata de partículas que se ubican en otro plano.

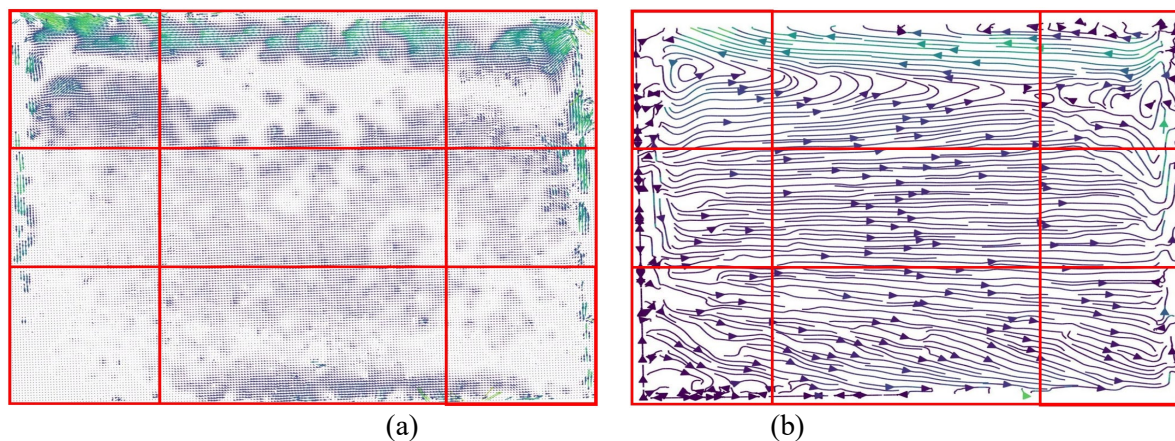


En la celda F, ubicada en la proximidad de la cara caliente como era de esperar, se observa flujo de capa límite ascendente muy veloz. Sin embargo, a la izquierda de esta capa, se puede ver un flujo descendente de partículas, que son algo más lentas que las anteriores. Se observa que estas partículas, al acercarse lo suficiente, se incorporan al flujo ascendente.

### ***Análisis de los resultados de los programas***

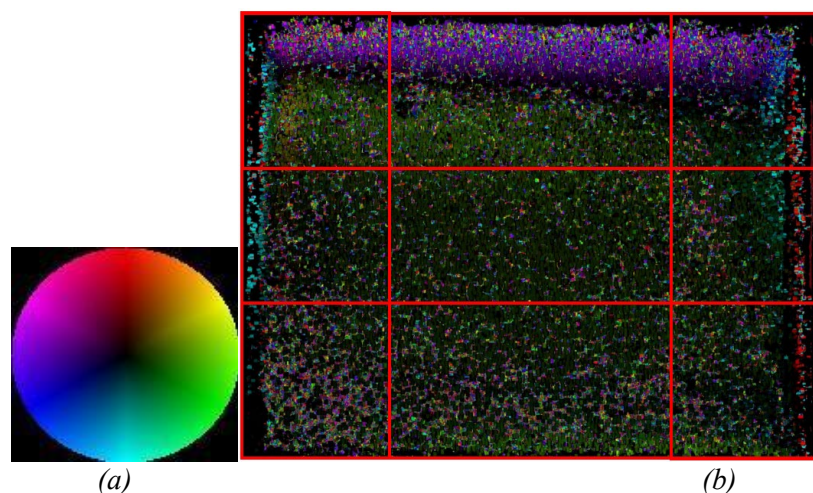
A continuación, se muestran los campos devueltos por cada programa luego del análisis de las fotografías en intervalos de tiempo controlado. En estos se indica la cuadrícula para mostrar las regiones que se describirán.

Forughi: El programa devuelve un campo de velocidades y líneas de corriente que se muestra en la Figura 7. En estas se señala la magnitud con una escala de colores. De manera general, ambos reflejan lo descrito previamente en base a los videos y fotografías de larga exposición. En los ensayos realizados, el tiempo de ejecución rara vez superó el minuto.



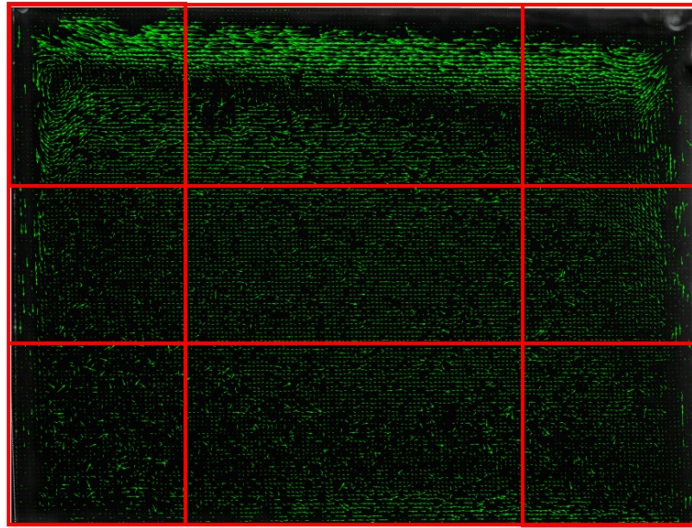
*Figura 7: (a) Campo de velocidades por Forughi, (b) Líneas de corriente por Forughi*

FIJI: Tras procesar las imágenes, devuelve dos gráficas que son de interés para la comparación. La primera es una referencia de las direcciones y magnitudes mediante un círculo de colores (Figura 8(a)) y la segunda imagen es un mapa de dirección de flujo (Figura 8(b)).

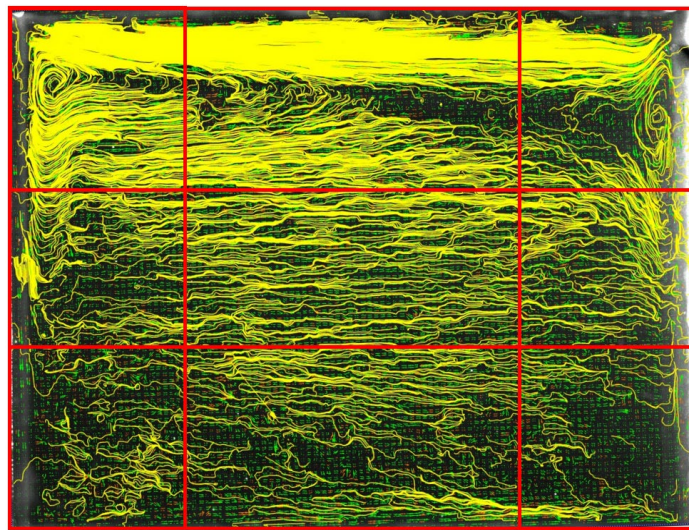


*Figura 8: Gráficas de FIJI. (a) referencia de colores (b) mapa de dirección de flujo*

PIVlab: Después de analizar las imágenes, la interfaz muestra un campo de velocidades, el cual se utilizó en la comparación. Dicho campo de velocidades se muestra en la Figura 9, donde se puede destacar la gran densidad de vectores marcados. También se puede agregar las líneas de corrientes, las que se muestran en la Figura 10.



*Figura 9: Campo de velocidades generado por PIVlab.*



*Figura 10: Líneas de corriente generadas por PIVlab*

De un primer análisis las imágenes de los tres programas estudiados, se encuentra que todas coinciden con lo descrito previamente a base de los video y fotografías de larga exposición, mostrando que estos programas son factibles para el estudio de este tipo de flujos. A continuación, se realiza un examen más detallado de algunas celdas de interés.

Celda A: Todos los mapas indican la misma dirección del flujo, pero el resultado de FIJI no evidencia claramente la presencia de un vórtice (Figura 11 (c)).

Celda B: Todos los programas muestran la existencia de dos corrientes en direcciones opuestas y en el caso de Forughi y PIVlab que la corriente superior tiene una mayor velocidad (Figura 12 (a) y (d)). En las líneas de corriente, Forughi refleja el cambio de dirección que experimentan algunas partículas. Esto también se observa en PIVlab ya que los vectores velocidad próximos a la interfaz de flujos tienen componentes verticales.

Celda C: En esta celda todos los programas tienen un buen desempeño. Se puede destacar que FIJI facilita la visualización de las corrientes C1, C2 y C3 que se describieron previamente (Figura 13 (c)).



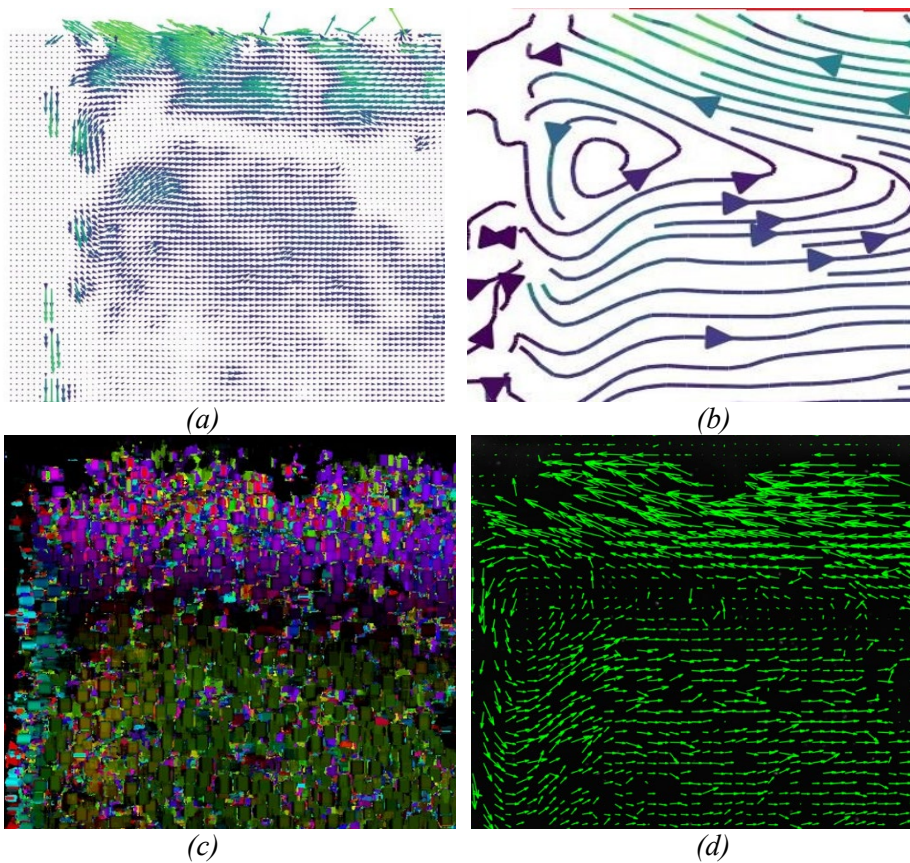


Figura 11: Celda A, (a) Campo de velocidades con Forughi, (b) Líneas de corriente con Forughi, (c) Dirección de flujo con FIJI, (d) Campo de velocidades con PIVlab

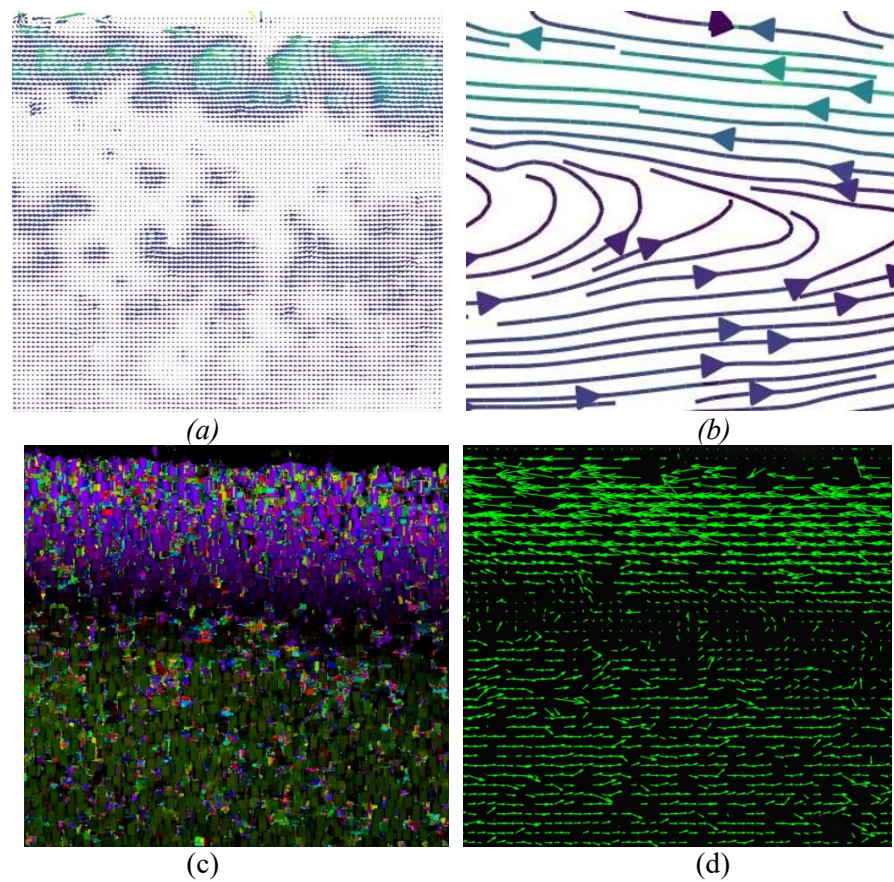
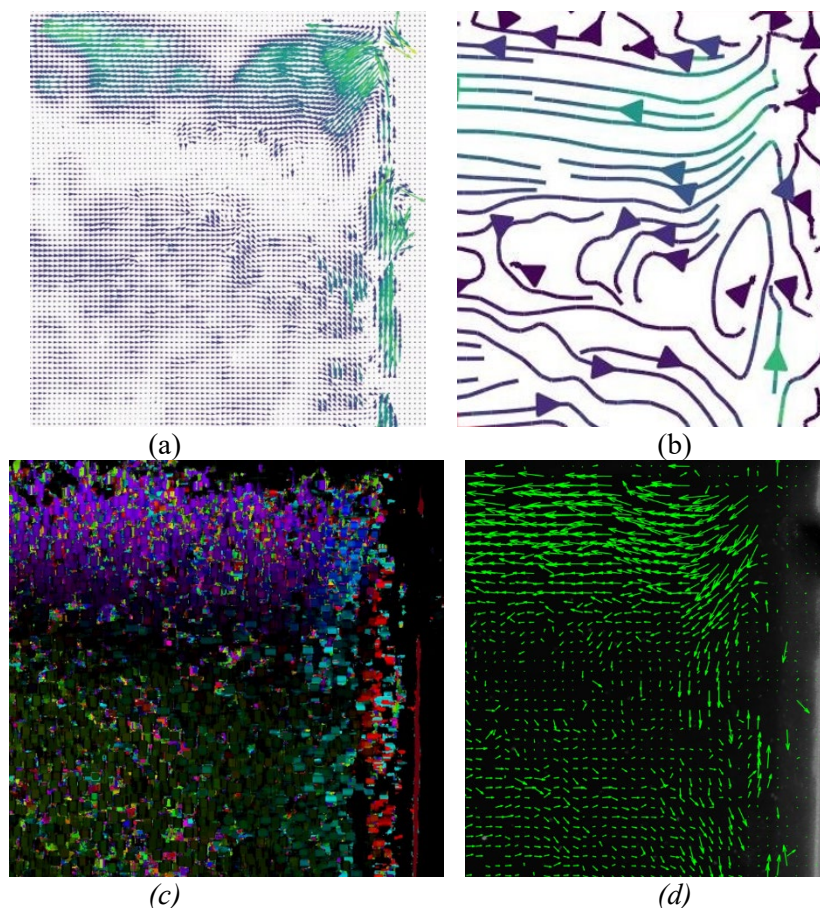


Figura 12: Celda B, (a) Campo de velocidades con Forughi, (b) Líneas de corriente con Forughi, (c) Dirección de flujo con FIJI, (d) Campo de velocidades con PIVlab





*Figura 13: Celda C, (a) Campo de velocidades con Forughi, (b) Líneas de corriente con Forughi, (c) Dirección de flujo con FIJI, (d) Campo de velocidades con PIVlab*

Celda D: En la proximidad a la pared opuesta a la calefaccionada se puede ver que las partículas tienen una velocidad descendente. Entre Forughi y PIVlab no hay diferencias apreciables, pero se destaca que reconocen la disminución de la velocidad del flujo a medida que se aleja de la pared (Figura 15 (a) y (d)). Los resultados de FIJI no son muy concluyentes respecto a lo que pasa a la derecha de la corriente descendente, pero se puede observar una predominancia del tono verde sobre todos los otros colores, indicando una tendencia del flujo hacia la pared calentada (Figura 14 (c)).

Celda E: En ese recorte del centro del plano todos los programas muestran que el flujo es lento y hacia la pared calentada, pero se puede destacar que los vectores dibujados por PIVlab no son del todo horizontales indicando que las partículas se cruzan, algo que no es apreciable en los resultados de Forughi, ni siquiera en las líneas de corriente (Figura 15).

Celda F: Aquí se puede observar que las partículas se acercan lentamente desde la derecha y a medida que se acercan empiezan a tener componente vertical hacia abajo, algo que todos los programas reflejan bien incluso FIJI con sus tonos celestes (Figura 16(c)). En la proximidad de la pared las partículas tienen mayores valores de velocidad ascendente algo que también se ve reflejado en todos, pero Forughi y FIJI marcan más cantidad de partículas con velocidad ascendente.

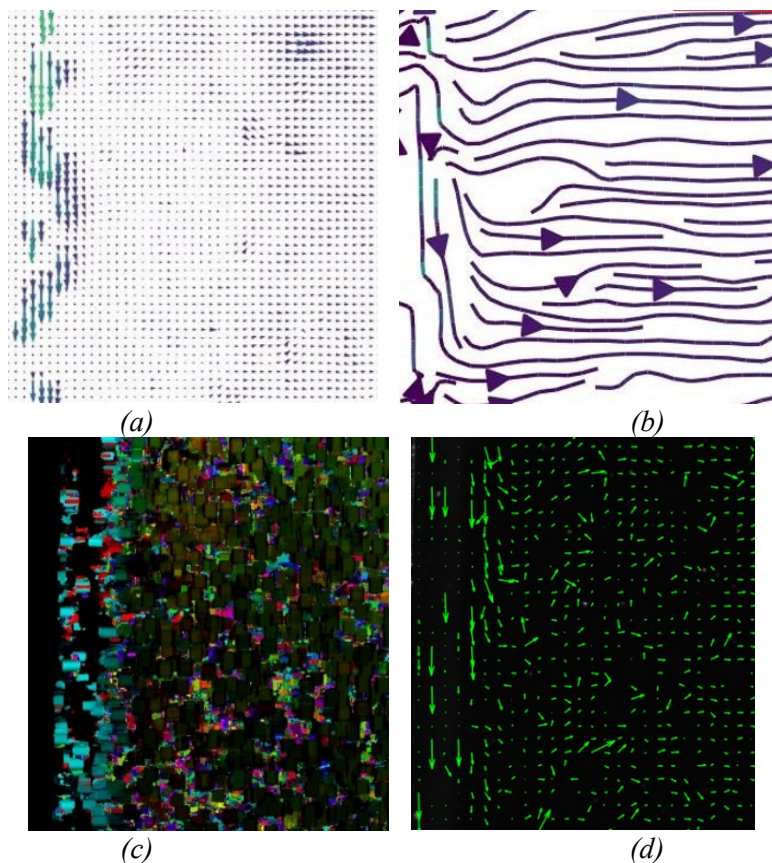


Figura 14: Celda D, (a) Campo de velocidades con Forughi, (b) Líneas de corriente con Forughi, (c) Dirección de flujo con FIJI, (d) Campo de velocidades con PIVlab

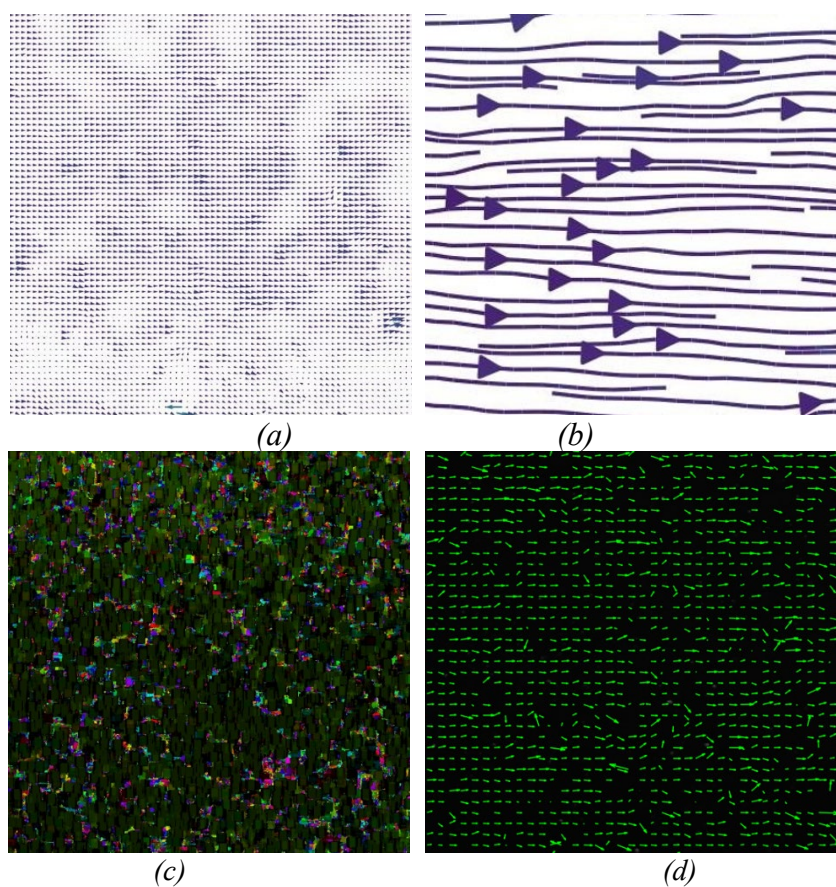
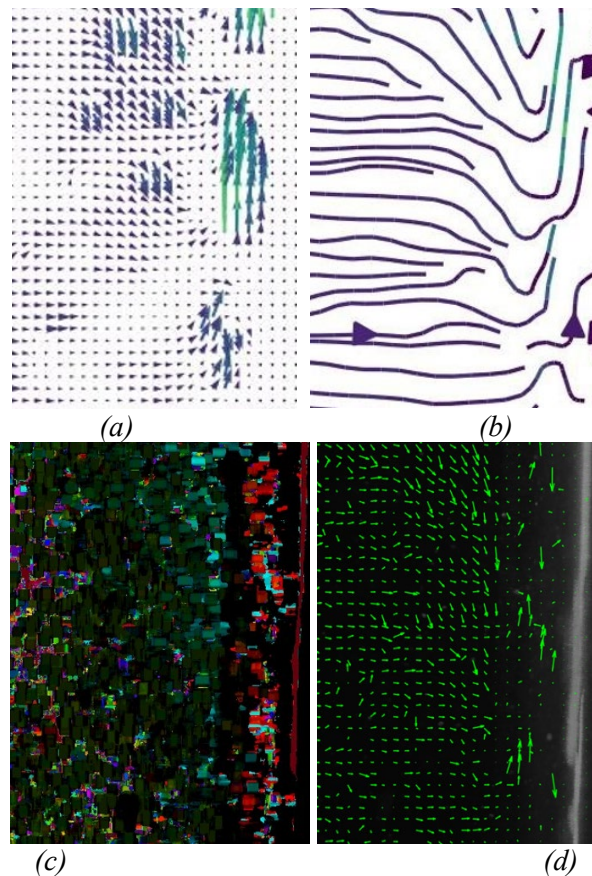


Figura 15: Celda E, (a) Campo de velocidades con Forughi, (b) Líneas de corriente con Forughi, (c) Dirección de flujo con FIJI, (d) Campo de velocidades con PIVlab.





*Figura 16: Celda F, (a) Campo de velocidades con Forughi, (b) Líneas de corriente con Forughi, (c) Dirección de flujo con FIJI, (d) Campo de velocidades con PIVlab.*

## CONCLUSIONES

Los tres programas analizados proporcionan resultados coherentes con las observaciones realizadas a partir de los videos y las fotografías de larga exposición, lo que valida su precisión en el análisis del flujo en la cavidad calentada lateralmente.

Forughi y PIVlab se destacan por su facilidad de uso. En particular, Forughi muestra la ventaja de incluir una escala de colores que permite indicar las magnitudes de las velocidades directamente, sin requerir posprocesamiento adicional. PIVlab, por su parte, ofrece una amplia gama de herramientas integradas que permite proporcionar información adicional valiosa, entre estas, la capacidad de generar un mapa de colores que muestra la dirección del flujo, como lo hace FIJI. Forughi se destaca en la detección de partículas con velocidades elevadas, como aquellas localizadas cerca de la pared calentada. Otra ventaja de Forughi es su bajo costo computacional, lo que lo convierte en una opción eficiente para usuarios con equipos de recursos limitados. Sin embargo, su uso requiere conocimientos en Python, a diferencia de PIVlab y FIJI, que cuentan con interfaces gráficas más accesibles para el usuario. Es relevante mencionar que los tres programas son de acceso libre, no obstante, PIVlab implica el uso de Matlab, que a su vez requiere una licencia para su utilización.

Finalmente, se ha planteado como objetivo futuro la construcción de una cavidad cúbica que permita, además de la visualización del flujo, realizar un estudio térmico detallado del sistema. Esto incluiría el análisis de sus números adimensionales y la corroboración de las observaciones experimentales mediante simulaciones numéricas utilizando programas como OpenFOAM. En cuanto a las mejoras del sistema, se propone la obtención de un haz plano más estrecho para asegurar la eliminación de las interferencias causadas por partículas que cruzan sus trayectorias.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Salta, Proyectos CIUNSa. N° 2499, por el financiamiento recibido y al Consejo Interuniversitario Nacional dado que el trabajo presentado se llevó a cabo como parte del plan de trabajo de la Beca “Estímulo a las Vocaciones Científicas” (EVC).

## REFERENCIAS

- Alvarez, L., Romero, G., Alanís, E., Domínguez, D., y Curkovic, G. (2008). Análisis térmico de un fluido en convección natural mediante DSPI, utilizando Phase Stepping. ANALES AFA (Vol. 20, No. 1).
- Adrian, R. J. (2005). Twenty years of particle image velocimetry. *Experiments in fluids*, 39, 159-169.
- De Paul I., Vilte M. y Lesino G. (1993). " Modelo de circulación de aire en locales cerrados". Actas conjuntas de la XVI de ASADES. La Plata. Tomo I, Pag. 209-218.
- Forughi, A. *Github-Forugh-PIV*. URL: <<http://github.com/forughi/PIV> > [consulta: 14 de septiembre de 2022]
- Guirado Navarro, C. (2017). Desarrollo de una interfaz de seguimiento para un PIV. Análisis para su uso docente (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- Mamun, M. A. H., Johnson, D. A., Hollands, K. G. T., & Leong, W. H. (2008). PIV measurements of the flow field inside an enclosed cubical cavity in natural convection. *Experiments in fluids*, 44, 647-659.
- Meyer, K. E., Larsen, P. S., Westergaard, C. H., y Guillard, F. (2002). In 11th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics (pp. 1-12).
- Perez Vidal, A. (2016). Desarrollo de un sistema PIV (Velocimetría por imagen de Partículas) didáctico. Doctoral Dissertation, Universitat Politècnica de Valencia.
- Poujol, F. T., Rojas, J., y Ramos, E. (2000). Natural convection of a high Prandtl number fluid in a cavity. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 27(1), 109-118.
- Raffle, M., Willert, C., Wereley, S., y Kompenhans, J. (2007). *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. Springer.
- Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., et al. (2012). Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nat Methods* 9. doi:10.1038/nmeth.2019.
- Sosa, M. (2024). Video convección velocidad X16 ASADES2024 URL: <<https://youtu.be/t0veuu3OGjU>> [consulta: 12 de agosto de 2024]
- Thielicke, W. y Sonntag, R. (2021). Particle Image Velocimetry for MATLAB: Accuracy and enhanced algorithms in PIVlab. *Journal of Open Research Software*, 9(1), 12. Ubiquity Press, Ltd.
- Vilte, M. y De Paul, I. (1994). Convección natural entre dos locales: determinación del perfil de velocidades en una puerta por fotografía de trazas. *Acta ASADES*, 665-673.
- Vilte, M. y De Paul, I. (1997). Análisis de la interacción térmica e hidrodinámica en un recinto cerrado producida por convección natural. *AVERMA*, 69-72.
- Westerweel J. (1997). “Fundamentals of digital particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*”. Printed in the UK. Vol 8, Pg 1379–Pg1392.

## COMPARATIVE STUDY OF PIV PROGRAMS FOR THE ANALYSIS OF NATURAL CONVECTION IN A Laterally HEATED RECTANGULAR CAVITY

**ABSTRACT** This work presents a comparison of different programs that apply the Particle Image Velocimetry (PIV) technique. The comparison is carried out by studying the flow resulting from natural convection of water in a laterally heated closed cavity. The velocity fields obtained are validated by contrasting them with those observed in long-exposure photographs and videos. The comparison results indicate that, while the analyzed programs generally produce similar velocity maps, each program identifies specific aspects more effectively, making them complementary for a comprehensive flow analysis.

**Keywords:** PIV, Natural Convection, Closed Enclosed, Flow visualization.

## ANÁLISIS DE RADIACIÓN SOLAR DIFUSA MEDIDA USANDO BANDA SOMBREADORA. CASO DE ESTUDIO: CIUDAD DE SALTA

**Constanza Lopez Ruiz<sup>1,2</sup>, Germán Salazar<sup>1,2</sup>, Rubén Ledesma<sup>1,2</sup>, Janis Galdíño<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO). Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Exactas (UNSa – FCE)

<sup>3</sup>Centro de Energías Renováveis, Universidade Federal de Pernambuco (Av. da Arquitetura, 857 - Cidade Universitária, Recife - PE, 50740-550)

[constanza.lopezruiz@conicetgov.ar](mailto:constanza.lopezruiz@conicetgov.ar); [germansalazar.ar@gmail.com](mailto:germansalazar.ar@gmail.com); [rdledesma1995@gmail.com](mailto:rdledesma1995@gmail.com); [janis.joplim@ufpe.br](mailto:janis.joplim@ufpe.br)

**RESUMEN:** En este estudio se presenta los primeros avances en la medición y análisis de la irradiancia solar difusa sobre el plano horizontal (DHI, por sus siglas en inglés), medida en la ciudad de Salta, Argentina. El dispositivo utilizado para el bloqueo de la irradiancia solar directa sobre plano horizontal (DNI por sus siglas en inglés) fue una banda sombreadora de elaboración propia, durante periodos de cielo claro. Se evaluaron dos métodos de corrección de las medidas de DHI: uno asumiendo un cielo isotrópico y otro considerando un cielo anisotrópico. Los resultados obtenidos se compararon con los datos obtenidos de un modelo satelital (LSA-SAF) y del modelo híbrido de Yang. El desempeño de cada modelo se evaluó mediante la aplicación de siete métricas: RMSE, MBE, MAE, rRMSE, rMBE, rMAE y  $R^2$ . Se determinó que la corrección por el método que considera un cielo isotrópico es el que mejor representa la DHI durante el periodo de análisis y que tanto el modelo satelital como el modelo híbrido subestiman los valores de la irradiancia solar difusa para el sitio de estudio.

**Palabras clave:** irradiancia difusa, banda sombreadora, modelo híbrido, modelo satelital.

### INTRODUCCIÓN

El crecimiento de las energías renovables es fundamental para abordar los desafíos del cambio climático y facilitar la transición energética global. Para cumplir con los ambiciosos objetivos energéticos establecidos en diversas cumbres climáticas, es crucial aumentar significativamente la capacidad de generación a partir de fuentes renovables (IRENA, 2024). En este contexto, la medición y el análisis precisos de la irradiancia solar se convierten en componentes esenciales para optimizar los sistemas de generación que utilizan el sol como fuente de energía y para planificar de manera eficiente los proyectos energéticos.

La correcta estimación de la generación de energía a partir de fuentes renovables es vital para la planificación y financiación de proyectos de diversas magnitudes. Sin embargo, la medición precisa del recurso solar enfrenta múltiples problemas y limitaciones, tales como la variabilidad temporal y espacial de la radiación solar, la influencia de las condiciones meteorológicas y la necesidad de equipos de medición costosos y de mantenimiento complejo (Huld et al. 2012; Muneer y Fairouz, 2022; Miranda, 2023). Estos desafíos pueden dar lugar a inexactitudes en los datos, lo que afecta la viabilidad y el rendimiento de los proyectos solares.

Las mediciones de las componentes de la radiación solar (DHI y DNI) no son tan frecuentes como las de irradiancia solar global sobre el plano horizontal (GHI), debido a que tanto el equipo como el mantenimiento necesario son costosos (Nollas et al. 2023), es por ello que se desarrollaron alternativas que puedan ser afrontadas con un menor presupuesto. Para registrar los valores de DNI es necesario contar con el sensor de medición (pirheliómetro), pero también con un seguidor de precisión (montura



astronómica) que garantice el seguimiento del sol durante su recorrido por la bóveda celeste. Para registrar los valores de DHI, además del sensor de medición (piranómetro) es necesario contar con un dispositivo que bloquee al sol (y la región del circunsolar), de esta forma, al piranómetro solo llegará la radiación que es dispersada por la atmósfera. Para llevar a cabo esta obstrucción de la componente directa de la radiación solar, se desarrollaron distintos dispositivos que se pueden adicionar en la estación de medición. Se pueden identificar dos conjuntos principales: los dispositivos que tienen partes móviles y realizan el seguimiento del sol de manera automática, y los dispositivos que son estáticos, requiriendo ajustes manuales y correcciones en los valores registrados.

A pesar de la ventaja que los dispositivos de seguimiento automático ofrecen (ya sea para medición de DNI o DHI), se requiere de una inversión elevada tanto para el equipamiento, recalibración y personal de mantenimiento. Cuando no se dispone de presupuesto suele optarse por el uso de bandas sombreadoras para la medición de DHI, realizando las correcciones correspondientes a las series de datos medidas. Además, conociendo los valores de GHI y DHI es posible estimar la DNI a través de la ecuación de clausura (Ec.1)

$$GHI = DHI + DNI \cos(\theta_z) \quad (1)$$

Otro problema al que suelen enfrentarse los investigadores del recurso solar es la pérdida de registros que surge en un día típico de medidas, esto generalmente asociado a problemas técnicos como desconexión del sensor, corte del suministro eléctrico, pérdida de paquetes (si se acceden a los datos de manera remota), o algún otro problema técnico (Muneer y Fairouz, 2022). Una alternativa ante la falta de datos locales precisos es el uso de bases de datos satelitales (BDS), que permiten estimar la irradiancia solar global, difusa y directa. Entre las más utilizadas se encuentran el Sistema de Aplicaciones de Satélites de EUMETSAT para la Vigilancia del Clima (LSA-SAF) (EUMETSAT, s.f.). Si bien las BDS proporcionan datos de alta resolución y actualizaciones frecuentes, lo que permite un monitoreo continuo de la irradiancia solar, la precisión de estos datos puede verse comprometida en ciertas ubicaciones geográficas específicas. No es de extrañar entonces, que se encuentren discrepancias entre las estimaciones satelitales y las mediciones realizadas en tierra mediante el uso de sensores, para el mismo sitio y durante el mismo periodo. Por ello es necesario complementar los datos satelitales con mediciones locales y métodos de corrección específicos (Schroedter-Homscheidt et al. 2019; EUMETSAT U. P., 2024).

Este estudio se centra en el análisis de las primeras mediciones de irradiancia solar difusa sobre un plano horizontal, utilizando una banda sombreadora en condiciones de cielo claro en Salta. Se implementaron dos métodos de corrección para las medidas de DHI (Drummond, 1956; LeBaron et al. 1990), comparándolos con los datos estimados por un modelo satelital (LSA-SAF) y los datos estimados del modelo híbrido de Yang et al. (2006).

## METODOLOGÍA

El análisis de la DHI se llevó a cabo mediante la corrección de los valores obtenidos por un piranómetro al cual se le adicionó un soporte con una banda sombreadora fija. Esta corrección es necesaria ya que, además de obstruir la componente directa de la radiación solar, la banda sombreadora también bloquea una porción del cielo, dando como resultado valores de DHI inferiores a los reales. A su vez, también se realizó el registro de los valores de GHI, temperatura ambiente (T) y humedad relativa ambiente (HR), en el mismo sitio y durante el mismo periodo.

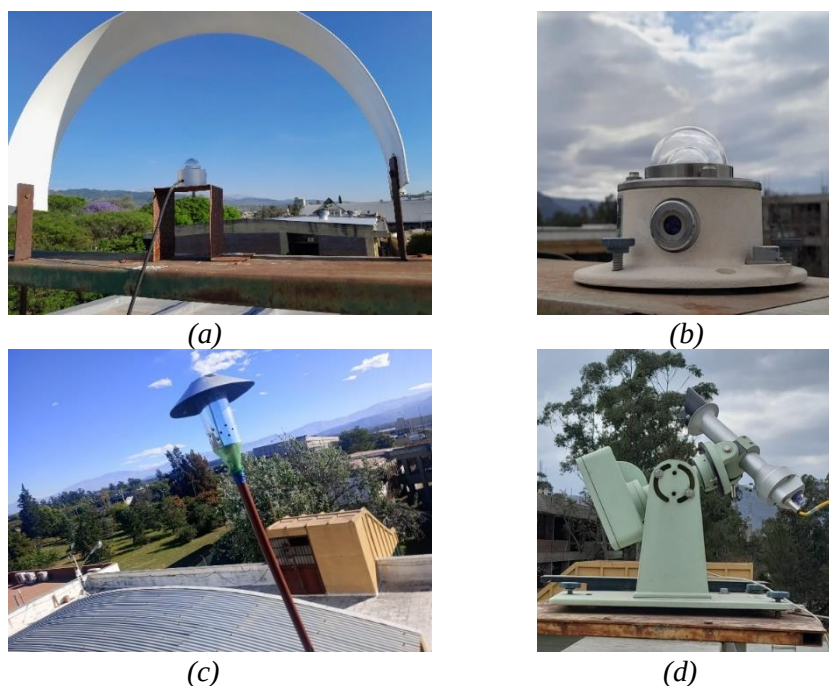
Los valores corregidos de DHI son comparados con valores obtenidos de la BDS LSA-SAF y con valores estimados por el modelo híbrido de Yang et al. (2006). La metodología empleada presenta ciertas limitaciones debido al uso de equipos que pueden estar afectados por problemas inherentes al desgaste y paso del tiempo. A pesar de estas limitaciones, se ha procurado obtener datos representativos mediante una metodología de medición y análisis bien definida.

### *Datos Medidos*

La estación de medición se encuentra ubicada en la Ciudad de Salta, en el noroeste de Argentina, con coordenadas geográficas de latitud  $-24.7289^\circ$  y longitud  $-65.4098^\circ$ , a una altitud aproximada de 1234 m.s.n.m.

Para llevar a cabo las mediciones se utilizó un piranómetro de la marca Eppley modelo PSP para medir GHI. Adicionalmente, se utilizó un piranómetro de la marca Kipp and Zonen modelo CM3 para obtener datos de DHI. Las mediciones de temperatura ambiente (T) se realizaron mediante un sensor LM35, el cual fue integrado en un circuito diseñado específicamente para ampliar el rango de medición de temperatura, resguardado en un abrigo meteorológico de fabricación propia. Para la medición de la humedad relativa del aire (HR), se utilizó un sensor HIH4000 de la marca Honeywell, instalado en el mismo circuito que el sensor LM35.

Para la medición de la irradiancia solar directa normal (DNI), se utilizó un pirheliómetro modelo de la marca Kipp and Zonen, montado en una montura astronómica modelo ST-1 de la marca Eppley LAB. Las mediciones de irradiancia solar difusa horizontal (DHI) se realizaron mediante el bloqueo de la irradiancia solar directa utilizando una banda sombreadora (de elaboración propia), con dimensiones de 65.8 cm de diámetro y 12 cm de ancho. En el trabajo de (LeBaron et al. 1980) se evalúa la influencia del color interior de la banda sobre las mediciones de irradiancia solar difusa, obteniéndose que lo mejor sería optar por una pintura de con un albedo de 0.55 (un ligero blanquecino). Los sensores instalados se muestran en la Fig. 1.



*Figura 1: (a) Piranómetro sombreado con banda para la medición de DHI. (b) Piranómetro para la medición de GHI. (c) Abrigo que alberga el circuito para medición de temperatura y humedad relativa. (d) Pirheliómetro montado sobre el seguidor para la medición de DNI.*

Todos los datos fueron adquiridos cada 5 segundos y registrados cada 1 minuto, utilizando un datalogger modelo CR1000 de la marca Campbell Scientific. En la Tabla 1 se presentan los sensores y sus características.

Tabla 1: Instrumentación utilizada

| Magnitud                  | Unidad           | Sensor                                              | Error              |
|---------------------------|------------------|-----------------------------------------------------|--------------------|
| Humedad relativa          | %                | HIH4000, marca Honeywell                            | ±3.5%              |
| Irradiancia directa (DNI) | W/m <sup>2</sup> | Pirheliómetro modelo CHP1, marca Kipp & Zonen       | ±2%                |
| Irradiancia global (DHI)  | W/m <sup>2</sup> | Piranómetro modelo CM3, marca Kipp & Zonen          | ±10% (suma diaria) |
| Irradiancia global (GHI)  | W/m <sup>2</sup> | Piranómetro modelo PSP, marca Eppley                | ±1%                |
| Registro de datos         | -                | Datalogger modelo CR1000, marca Campbell Scientific | -                  |
| Temperatura               | °C               | LM35                                                | ±0.5°C             |

El proceso de filtrado de datos consta de varias etapas. En la Tabla 2 se presenta los filtros aplicados a la GHI (Nollas et al. 2023) y en la Tabla 3 se presentan los filtros aplicados a la DNI (Long y Dutton, 2010), donde  $S$  es el factor de corrección de la distancia Tierra-Sol,  $E$  es la constante solar ( $1361,7 \text{ W/m}^2$ ),  $k_t$  es el índice de claridad adimensionalizado,  $\alpha$  es la altura solar expresada en grados y  $\theta_z$  es el ángulo cenital solar. Los datos utilizados en este trabajo corresponden a aquellos que cumplen con la condición  $\alpha > 10^\circ$ .

Tabla 2: Filtros del control de calidad aplicado a las medidas de GHI.

| Filtro | Descripción                                                                             |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| F1     | $GHI < 1,5 S E (\cos(\theta_z))^{1,2} + 100 \text{ W/m}^2$                              |
| F2     | $GHI > (6,5331 - 0,065502 \theta_z + 1,8312^{0,003} \theta_z) / (1 + 0,01113 \theta_z)$ |
| F3     | $kt < 1,4$                                                                              |

Tabla 3: Filtros del control de calidad aplicado a las medidas de DNI.

| Limites Extremadamente Raros                          | Limites Físicamente imposibles |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Min: $-2 \text{ W/m}^2$                               | Min: $-4 \text{ W/m}^2$        |
| Max: $E 0.95 \cos(\theta_z)^{1,2} + 10 \text{ W/m}^2$ | Max: $E \cos(\theta_z)$        |

Se descartaron aquellos días en los que no se disponía de mediciones completas de las tres componentes de irradiancia (global, difusa y directa). Además, se eliminaron los datos correspondientes a días no laborables, debido a la imposibilidad de garantizar el correcto funcionamiento del seguidor solar en esos días. También se excluyeron los días en los que no se registraron datos de temperatura y humedad relativa. Finalmente, se utilizaron cinco días que cumplieran con todas las condiciones establecidas y que corresponden al periodo invierno-primavera. Lo interesante de analizar días correspondientes a este periodo radica en el hecho de que el clima de la ciudad de Salta destaca por su clima templado, con inviernos secos (temporada seca) y veranos calurosos (temporada lluviosa) (Peel et al. 2007).

La serie de datos queda comprendida por los días: 2023-08-01, 2023-08-02, 2023-09-07, 2023-09-11 y 2023-10-09.

### Datos estimados por satelitales: LSA-SAF

Los datos estimados por satélite empleados en este estudio provienen de la base de datos LSA-SAF, una iniciativa de EUMETSAT que ofrece productos derivados de observaciones satelitales centrados en el análisis de la superficie terrestre mediante el satélite MSG (Meteosat Second Generation). Utilizando un modelo de transferencia radiativa que integra observaciones en bandas espectrales visibles e infrarrojas, se calcula la Irradiancia Solar Global Horizontal (GHI) considerando las condiciones

atmosféricas y las características de la superficie terrestre. Este modelo estima la radiación solar en la superficie horizontal, incluyendo la radiación directa y difusa, mientras que la fracción difusa, que representa la proporción de radiación solar difusa respecto a la GHI, se obtiene a partir de un procesamiento adicional de los datos, permitiendo derivar la irradiancia solar difusa (DHI). (EUMETSAT LSA-SAF LAND SURFACE ANALYSIS, 2020)

Estas bases de datos proporcionan registros de irradiancia solar con una frecuencia nativa de 15 minutos, por lo que fue se realizó una interpolación lineal para obtener valores con frecuencia de 1 minuto. El uso de la información satelital proporciona un valioso soporte para la validación y comparación de los datos obtenidos in situ.

### ***Datos Estimados por modelos: Modelo Híbrido de Yang***

Además del uso de BDS, hay otras alternativas para poder complementar las series de mediciones con faltantes de datos: El uso de modelos.

En este trabajo se opta por la aplicación del modelo propuesto por Yang et al. (2006) debido a que incorpora el uso de variables atmosféricas que influyen directamente en la transmisión de la radiación solar a través de la atmosfera. Se trata de un modelo físico que busca explicar estos procesos de atenuación, pero a su vez presenta una flexibilidad que permiten realizar el ajuste del coeficiente de turbidez de Ångström ( $\beta$ ) utilizando los datos de GHI. Para este trabajose considero un  $\beta$  constante para cada día.

Mediante la aplicación de las expresiones que describen, de manera aproximada, los elementos principales involucrados en la atenuación de la radiación: ozono ( $\tau_{oz}$ ), agua ( $\tau_w$ ), mezcla de gases ( $\tau_g$ ), efecto Rayleigh ( $\tau_r$ ) y aerosoles ( $\tau_a$ ), se obtienen los valores de las transmitancias directa ( $\tau_{b,clear}$ ) y difusa ( $\tau_{d,clear}$ ):

$$\tau_{b,clear} \approx \max(0, \tau_{oz}\tau_w\tau_g\tau_r\tau_a - 0,0013) \quad (2a)$$

$$\tau_{d,clear} \approx \{0, 0,5[\tau_{oz}\tau_w\tau_g(1 - \tau_r\tau_a) + 0,0013]\} \quad (2b)$$

$$\tau_g = \exp\left(-0,0117 \left(\frac{mP}{P_0}\right)\right) \quad (2c)$$

$$\tau_{oz} = \exp[-0.0365(ml)^{0.7136}] \quad (2c)$$

$$\tau_w = \min[1.0, 0.909 - 0.036\ln(mw)] \quad (2c)$$

$$\tau_r = \exp\left[-0.008735 \left(\frac{mP}{P_0}\right) \left(0.547 + 0.014 \left(\frac{mP}{P_0}\right) - 0.00038 \left(\frac{mP}{P_0}\right)^2 + 4.6 \times 10^{-6} \left(\frac{mP}{P_0}\right)^3\right)^{4.08}\right] \quad (2c)$$

$$\tau_a = \exp\{-m\beta[0.6777 + 0.1464(m\beta) - 0.00626(m\beta)^2]^{1.3}\} \quad (2c)$$

donde:

m = masa de aire (obtenida de Salazar et al.2010)

P = Presión local (Pa)

$P_0 = 1.013 \cdot 10^5$  (Pa)

l = espesor de la capa de ozono (cm)

w = agua precipitable (cm) (en función de T y HR)

Donde las irradiancias directa y difusa se estiman a partir de los valores obtenidos de  $\tau_{b,clear}$  y  $\tau_{d,clear}$  respectivamente. Uno de los aspectos más sensibles de la estimación del modelo híbrido de Yang son sus parámetros de tentación ( $\tau_{oz}, \tau_w, \tau_g, \tau_r, \tau_a$ ), para los cuales se consideraron valores promedios.

### **Corrección de DHI**

Las mediciones de las componentes de la radiación (DHI y DNI) no son tan frecuentes como las de GHI, debido a que tanto el equipo como el mantenimiento necesario son costosos, es por ello que se desarrollaron alternativas que puedan ser afrontadas con un menor presupuesto.

El uso de bandas sombreadoras permite bloquear la radiación solar directa de forma tal que el piranómetro solo registre la parte difusa. Sin embargo, durante el proceso, parte del cielo es bloqueado, por lo que los valores registrados resultan en subestimaciones de la DHI. Para poder subsanar este problema, se aplican métodos de corrección a los registros de DHI por banda sombreadora. En el trabajo de Rodríguez-Muñoz et al. (2021) se implementan y testean nueve métodos de corrección, entre los cuales se encuentran los métodos de LeBaron et al. (1990) y Drummond, (1956), teniendo en cuenta que el primer método considera los efectos anisotrópicos, mientras que el segundo es un método isotrópico que se enfoca solo en la corrección geométrica.

En esencia, ambos modelos buscan estimar el factor de corrección que debe aplicarse a las mediciones de DHI usando banda sombreadora. En ambos modelos se considera el factor isotrópico asociado a la corrección por la geometría de la banda (Ec. 3).

$$f_0 = (1 - S_0)^{-1} \quad (3)$$

donde:

$f_0$  = factor de corrección

$S_0$  = fracción de irradiancia difusa interceptada por la banda

### **Modelo Isotrópico de Drummond**

Este modelo proporciona una corrección isotrópica inicial ( $f_0$ ) para el cálculo de la irradiancia difusa utilizando la suposición de que la radiación es distribuida de manera uniforme en todas las direcciones del cielo (isotrópica). Se busca corregir la parte del cielo bloqueada por la banda de sombra mediante una corrección geométrica inicial, dando como resultado un método sencillo y rápido de aplicar. Sin embargo, las correcciones isotrópicas no capturan completamente las variaciones reales del cielo, por lo que la desventaja de usar este modelo es su limitación a la consideración de condiciones ideales.

### **Modelo Anisotrópico de LeBaron**

Se trata de un método paramétrico que usa el método isotrópico de Drummond como base, y sobre este enfoque se añade una tabla de búsqueda (LUT, por sus siglas en inglés) que refina el factor de corrección  $f$  al considerar otros factores, como el ángulo cenital solar y parámetros relacionados con la claridad del cielo. De esta manera, el modelo de LeBaron busca mejorar las estimaciones iniciales dadas por el método isotrópico de Drummond, especialmente bajo condiciones de cielos parcialmente despejados donde los efectos anisotrópicos son más pronunciados.

El modelo se define en función de cuatro variables: el factor de corrección isotrópico ( $f_0$ ), el ángulo cenital ( $\theta_z$ ), el índice de claridad difusa ( $k_d$ ) y el parámetro de claridad del cielo sin corrección por el ángulo cenital solar ( $\varepsilon$ ). Tanto  $f_{0,max}$  como  $\varepsilon_{max}$  corresponden al valor máximo que puede tomar el parámetro correspondiente. En la Tabla 4 se presentan los límites para cada parámetro.

Tabla 4: Límites para los parámetros que describen la corrección anisotrópica de la banda sombreadora

| Índice | Parámetro     | 1     | 2     | 3     | 4     |                     |
|--------|---------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|
| i      | $\theta_z$    | 0     | 35    | 50    | 60    | 90                  |
| j      | $f_0$         | 1,000 | 1,068 | 1,100 | 1,132 | $f_{0,max}$         |
| k      | $\varepsilon$ | 1,000 | 1,253 | 2,134 | 5,980 | $\varepsilon_{max}$ |
| l      | $k_d$         | 0,000 | 0,120 | 0,200 | 0,300 | 1,000               |

### Métricas de Desempeño

Las métricas utilizadas para cuantificar el rendimiento de los modelos fueron el coeficiente de determinación  $R^2$ , el RMSE (error cuadrático medio), el MBE (error de sesgo medio) y el MAE (error medio absoluto). Los valores de estas métricas fueron relativizados respecto a la media observada para facilitar la interpretación.

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \right]^2 \quad (4a)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (4b)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - x_i \quad (4c)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (4d)$$

$$rRMSE = \frac{RMSE}{\bar{x}} 100 \quad (4e)$$

$$rMBE = \frac{MBE}{\bar{x}} 100 \quad (4f)$$

$$rMAE = \frac{MAE}{\bar{x}} 100 \quad (4g)$$

donde:

$x$  = valores medidos

$y$  = valores estimados

$\bar{x}$  = media de los valores medidos

$\bar{y}$  = media de los valores estimados

$n$  = tamaño de la muestra

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### Corrección de DHI

Al aplicar los métodos de corrección para la DHI, se obtuvieron dos series con valores estimados de  $DHI_{\text{corregida}}$ . La primera es la serie generada con el método de Drummond (1956) ( $DHI_{\text{Drummond}}$ ) y la segunda serie corresponde a la serie generada con el método de LeBaron et al. (1990) ( $DHI_{\text{LB}}$ ). En la Fig. 2 se muestran la serie de mediciones de DHI y las series  $DHI_{\text{Drummond}}$  y  $DHI_{\text{LB}}$  obtenidas de aplicar las correcciones.



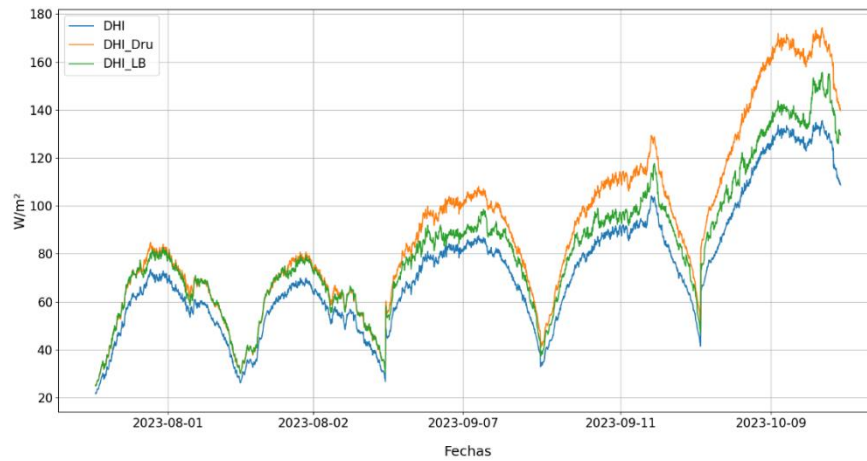


Figura 2:  $DHI$ = serie de mediciones realizadas con banda sombreadora.  $DHI_{Dru}$ = serie de mediciones corregida por el método de Drummond.  $DHI_{LB}$ = serie de mediciones corregidas por el método de LeBaron.

En la Fig. 3 se presentan las series de irradiancia directa sobre plano horizontal obtenidas de la medición DNI, y las series obtenidas al aplicar la Ec.1 usando los datos de GHI,  $DHI_{Dru}$  y  $DHI_{LB}$  para obtener los valores de  $DNI_{Dru}$  y  $DNI_{LB}$  respectivamente.

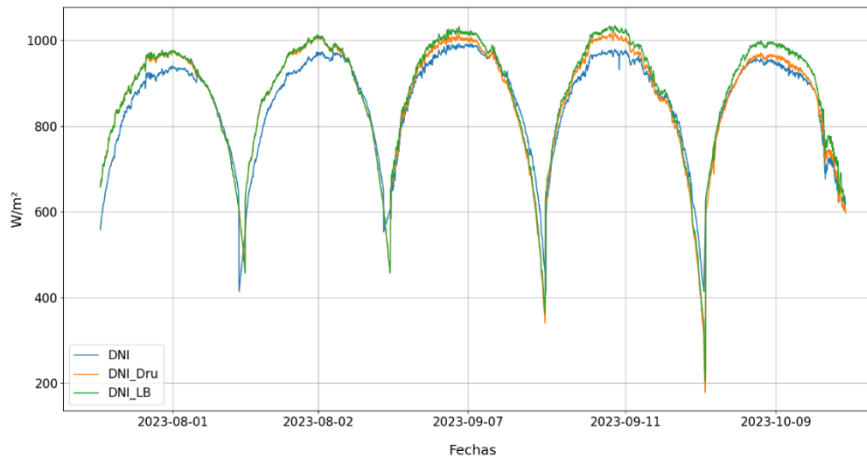


Figura 3:  $DNI$ = serie de mediciones.  $DNI_{Dru}$ = serie de mediciones corregida por el método de Drummond.  $DNI_{LB}$ = serie de mediciones corregidas por el método de LeBaron.

Los resultados obtenidos por las métricas de desempeño se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5: Métricas de desempeño obtenidas por los métodos de corrección de Drummond (Dru) y LeBaron (LB)

| Serie                      | $rRMSE$ (%) | $rMBE$ (%) | $rMAE$ (%) | $R^2$ |
|----------------------------|-------------|------------|------------|-------|
| $DHI_{Dru}$                | 26.2        | 22.8       | 22.8       | 0.996 |
| $DHI_{LB}$                 | 12.8        | 12.1       | 12.1       | 0.991 |
| $\overline{DHI} (Wm^{-2})$ | 73.1        |            |            |       |
| $DNI_{Dru}$                | 8.9         | 2.4        | 4.2        | 0.787 |
| $DNI_{LB}$                 | 9.2         | 3.7        | 5.0        | 0.798 |
| $\overline{DNI} (Wm^{-2})$ | 847.9       |            |            |       |

### Desempeño de los Modelos

Utilizando los datos medidos de GHI, T y HR, se obtuvieron los valores estimados para la irradiancia global horizontal donde el modelo de Yang, et al. (2006) ( $GHI_{Yang}$ ). Para ello se propuso la variación de coeficiente  $\beta$ , de forma tal que el error entre la serie de GHI y  $GHI_{Yang}$  sea el mínimo posible. También

se presenta la serie de valores de GHI estimada por la BDS LSA-SAF ( $GHI_{lsasaf}$ ). Los resultados se muestran en la Fig. 4.

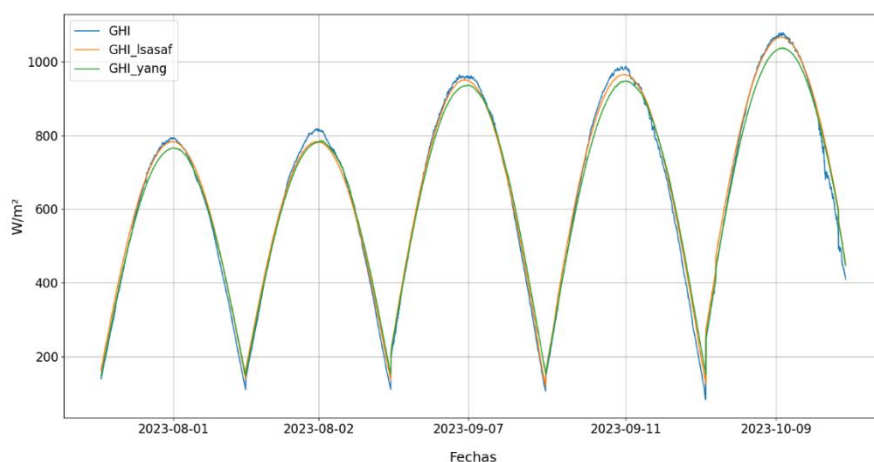


Figura 4:  $GHI$  = serie de mediciones.  $GHI_{lsasaf}$  = valores estimados por modelos satelitales (LSA-SAF).  $GHI_{yang}$  = valores estimados por el modelo híbrido de Yang.

Los valores obtenidos con las métricas de desempeño se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6: Resultados obtenidos de la comparación entre los datos medidos de GHI y los datos estimados por el modelo satelital ( $GHI_{lsasaf}$ ) y el modelo híbrido ( $GHI_{yang}$ )

| Serie               | $rRMSE$ (%) | $rMBE$ (%) | $rMAE$ (%) | $R^2$ |
|---------------------|-------------|------------|------------|-------|
| $GHI_{lsasaf}$      | 3.3         | 1.4        | 2.6        | 0.997 |
| $GHI_{yang}$        | 4.3         | -0.1       | 3.5        | 0.994 |
| $GHI$ ( $Wm^{-2}$ ) | 644.7       |            |            |       |

De las series de datos obtenidos de la BDS y del modelo de Yang es posible obtener también los valores de  $DHI_{lsasaf}$  y  $DHI_{yang}$  respectivamente, como también los de  $DNI_{lsasaf}$  y  $DNI_{yang}$ .

En las Fig. 5 y Fig. 6 se presenta las series de DHI y DNI obtenidas de los modelos.

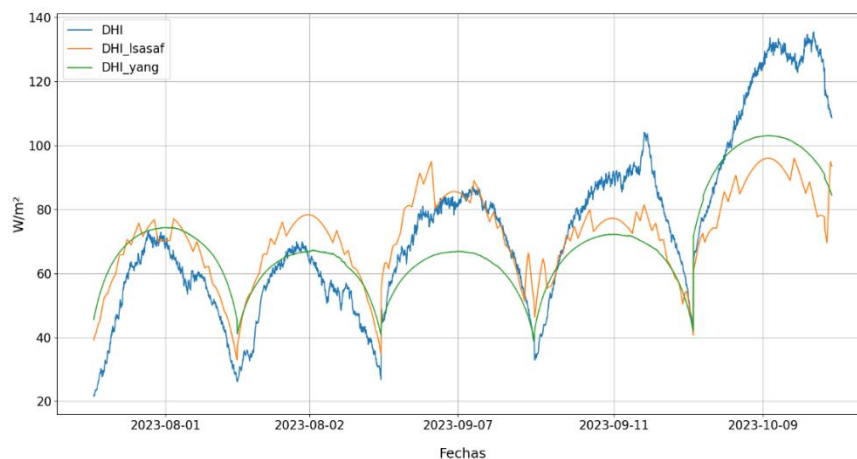


Figura 5: Series de irradiancia difusa sobre plano horizontal.  $DHI$  = valores medidos.  $DHI_{lsasaf}$  = valores estimados por modelos satelitales (LSA-SAF).  $DHI_{yang}$  = valores estimados por el modelo de Yang.

Si bien los resultados del modelo híbrido no reflejan completamente el incremento de atenuantes atmosféricos durante los días de prueba, es importante considerar que este comportamiento podría deberse tanto a limitaciones en el modelo como a las mediciones que se utilizaron como datos de entrada.

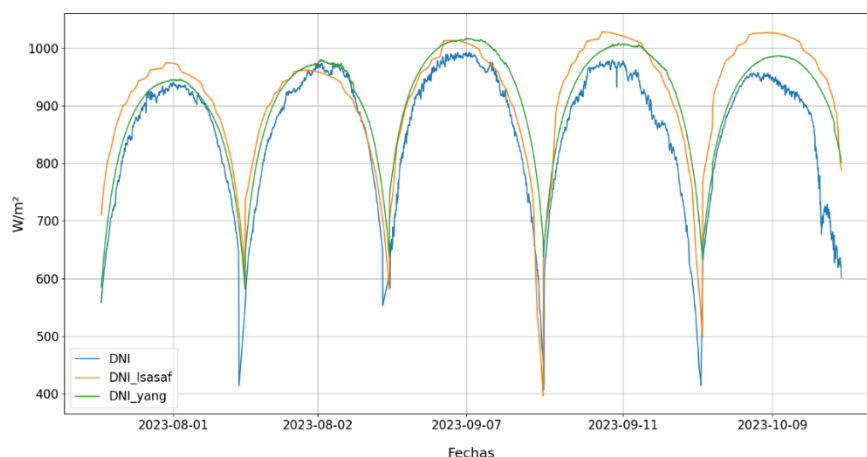


Figura 6: Series de irradiancia solar directa sobre plano horizontal. DNI = valores medidos.  $DNI_{ksaf}$  = valores estimados por modelos satelitales (LSA-SAF).  $DNI_{yang}$  = valores estimados por el modelo de Yang.

En la Tabla 7 se presentan los resultados de las métricas obtenidos para las componentes de cada modelo.

Tabla 7: Resultados obtenidos de la comparación entre los datos medidos de DHI y los datos estimados por el modelo satelital ( $DHI_{ksaf}$  y  $DNI_{ksaf}$ ) y el modelo híbrido ( $DHI_{yang}$  y  $DNI_{yang}$ )

| Serie                      | $rRMSE$ (%) | $rMBE$ (%) | $rMAE$ (%) | $R^2$ |
|----------------------------|-------------|------------|------------|-------|
| $DHI_{ksaf}$               | 23.1        | -2.0       | 18.0       | 0.677 |
| $DHI_{yang}$               | 21.3        | -5.2       | 18.0       | 0.749 |
| $\overline{DHI} (Wm^{-2})$ | 73.1        |            |            |       |
| $DNI_{ksaf}$               | 13.6        | 8.3        | 8.7        | 0.705 |
| $DNI_{yang}$               | 13.2        | 7.4        | 7.4        | 0.676 |
| $\overline{DNI} (Wm^{-2})$ | 847.9       |            |            |       |

Partiendo del hecho de que las mediciones de DHI registradas con banda sombreadora dan como resultado una serie que subestima la DHI real, es de esperar que los métodos de corrección aplicados incrementen los valores medidos. También se cuenta con valores de DNI medidos, para los cuales se procuró controlar el seguimiento durante los días seleccionados.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de las correcciones de irradiancia solar difusa, la serie de  $DHI_{Dru}$  son los que muestran un mayor incremento de los valores de DHI, además del hecho de que la  $DNI_{Dru}$  correspondiente es la que más se asemeja a la serie de DNI, se considera que la serie de  $DHI_{Dru}$  es la que muestra la corrección más apropiada.

En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos de las métricas para los datos estimados por el modelo satelital y el modelo híbrido, considerando como medidas de referencia las resultantes de la corrección por el método de Drummond.

Tabla 8: Resultados obtenidos de la comparación entre los datos corregido por el método de Drummond ( $DHI_{Dru}$  y  $DNI_{Dru}$ ) y los datos estimados por el modelo satelital ( $DHI_{ksaf}$  y  $DNI_{ksaf}$ ) y el modelo híbrido ( $DHI_{yang}$  y  $DNI_{yang}$ )

| Serie                            | $rRMSE$ (%) | $rMBE$ (%) | $rMAE$ (%) | $R^2$ |
|----------------------------------|-------------|------------|------------|-------|
| $DHI_{ksaf}$                     | 35.0        | -20.2      | 24.3       | 0.677 |
| $DHI_{yang}$                     | 34.8        | -22.8      | 27.2       | 0.749 |
| $\overline{DHI_{Dru}} (Wm^{-2})$ | 89.8        |            |            |       |
| $DNI_{ksaf}$                     | 9.0         | 4.8        | 6.1        | 0.473 |
| $DNI_{yang}$                     | 9.8         | 4.8        | 6.1        | 0.676 |
| $\overline{DNI_{Dru}} (Wm^{-2})$ | 868.3       |            |            |       |

En la Fig. 7 se presenta la correlación entre los valores de  $DHI_{Dru}$  y los valores de  $DHI_{lsaf}$  y  $DHI_{Yang}$ .

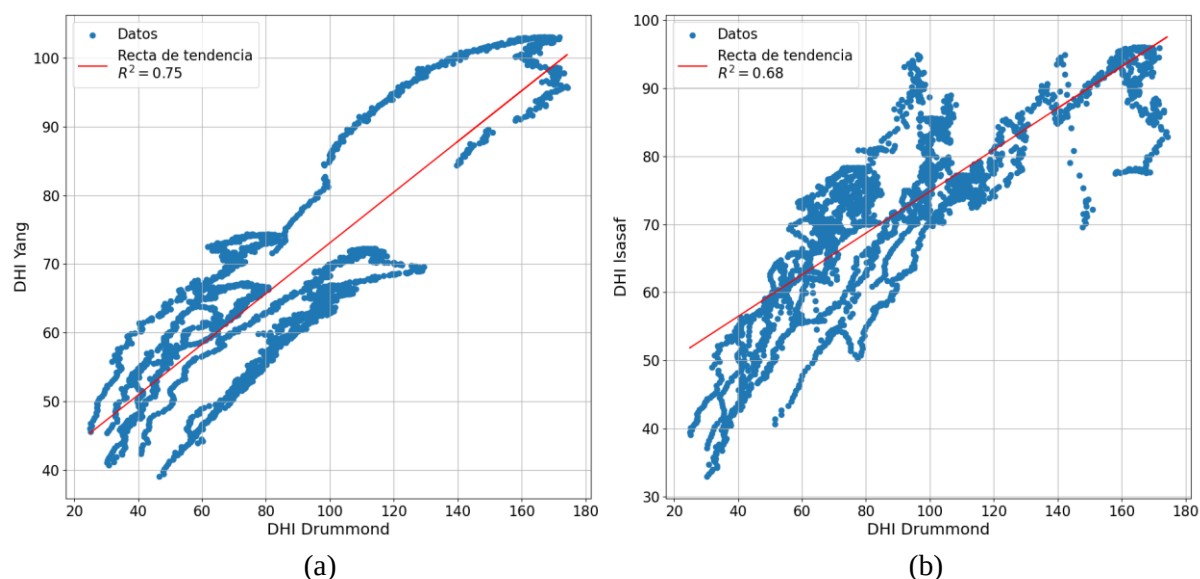


Figura 7: (a) Correlación entre los valores de irradiancia solar difusa obtenidas con el modelo de Drummond ( $DHI_{Dru}$ ) y los valores obtenidos del modelo híbrido de Yang. (b) Correlación entre los valores de irradiancia solar difusa obtenidas con el modelo de Drummond ( $DHI_{Dru}$ ) y los valores obtenidos del modelo satelital LSA-SAF.

En el trabajo de Drummond se indica que la relación usada para estimar la intensidad de la energía en el plano del sensor sombreado se usa siempre y cuando el ancho de la banda ( $b$ ) no sea grande en comparación con el radio ( $r$ ), siendo en su caso la relación  $b/r \sim 0.33$ . El método de corrección de (LeBaron et al. (1990) se basa en el trabajo de Drummond para el cálculo del factor geométrico.

Por otro lado, en el trabajo de (Rodríguez-Muñoz et al. (2021) se menciona que para hacer la aproximación que permite simplificar el cálculo de la radiación solar interceptada por la banda (pasando de una integral de área a una integral de línea) puede hacerse si se cumple el cociente entre el ancho y el radio de la banda es menor o aproximadamente igual a 0.2

Para el caso de este trabajo, el cociente  $r/b = 0.36$ , sin embargo, en el trabajo de (Steven y Unsworth, 1980) se menciona que el ancho de la banda tiene poco efecto sobre la corrección de la anisotropía.

## CONCLUSIONES

Este estudio presenta los primeros resultados de la medición y análisis de la DHI en la ciudad de Salta, donde no se encontraron investigaciones previas. Se analizó una serie de datos de cinco días de cielo claro durante el invierno-primavera, coincidiendo con la temporada seca de la región, caracterizada por un aumento de aerosoles en la atmósfera.

Los valores de DHI fueron corregidos utilizando los métodos de LeBaron et al. (1990) y Drummond (1956), encontrándose que el método de Drummond proporcionó la corrección más adecuada. Las medidas de DHI, GHI y DNI se compararon con las obtenidas mediante el modelo satelital LSA-SAF y el modelo híbrido de Yang et al. (2006). Los resultados indican que ambos modelos son efectivos, aunque el modelo híbrido, ajustado con mediciones de GHI, no refleja las variaciones debidas a atenuantes atmosféricos como los aerosoles o el vapor de agua.

Una limitación significativa que se tiene actualmente es la precisión del equipo actual, específicamente el seguidor solar analógico electromecánico, que genera dificultades para obtener mediciones precisas

de DNI. Esta situación limita el uso de la ecuación de clausura para derivar valores precisos de DHI, lo que subraya la dificultad de generar una referencia con baja incertidumbre. Sin embargo, a pesar de esta restricción, los métodos de corrección aplicados proporcionan resultados valiosos, permitiendo una primera evaluación robusta de las condiciones locales.

Para futuros estudios, se trabajará en mejorar la selección de días de cielo claro, a fin de reducir las incertidumbres asociadas con las condiciones atmosféricas, y se investigaran posibles fuentes de inestabilidad en las mediciones, las cuales podrían estar relacionadas a las limitaciones del quepo actual. Además, se propone ampliar la serie de datos para incluir las cuatro estaciones, ajustar el modelo de Yang con mediciones de DNI en lugar de GHI, modificar la geometría de la banda sombreadora considerando un valor aproximado de 0.2 en su relación ancho-radio y obtener una referencia de irradiancia difusa fiable y de baja incertidumbre. De esta manera, se logrará una evaluación más detallada del rendimiento de cada modelo en el contexto local, complementando y mejorando los análisis ya realizados en este trabajo.

En resumen, este trabajo demuestra avances en la estimación de DHI en Salta, sugiriendo que, a pesar de las limitaciones, la metodología utilizada puede ser replicable, destacando los aspectos a considerar en futuras mediciones de DHI.

## REFERENCIAS

- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633 - 1644. doi:10.5194/hess-11-1633-2007
- Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) Atmosphere Data Store, (. s.f.). CAMS gridded solar radiation. Recuperado el 26 de 06 de 2024, de <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/cams-solar-radiation-timeseries?tab=overview>
- Drummond, A. J. (1956). On the measurement of sky radiation. *Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, 413-436.
- EUMETSAT. (s.f.). LSA-SAF LAND SURFACE ANALYSIS. Recuperado el 07 de 08 de 2024, de <https://lsa-saf.eumetsat.int/en/>
- EUMETSAT LSA-SAF LAND SURFACE ANALYSIS. (2020). *Product User Manual for MSG Downwelling Surface Shortwave Flux – Total and Diffuse (MDSSFTD)*. Obtenido de [https://nextcloud.lsasvcs.ipma.pt/s/bA9gYoa5mQX2yJw?dir=undefined&path=%2FPUM-Product\\_User\\_Manual&openfile=27251](https://nextcloud.lsasvcs.ipma.pt/s/bA9gYoa5mQX2yJw?dir=undefined&path=%2FPUM-Product_User_Manual&openfile=27251)
- EUMETSAT, U. P. (2024). *MTG FCI level 1c data guide*. Recuperado el 07 de 08 de 2024, de <https://user.eumetsat.int/resources/user-guides/mtg-fci-level-1c-data-guide>
- Huld, T., Müller, R., & Gambardella, A. (2012). A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Solar Energy*, 86, 1803-1815. doi:doi.org/10.1016/j.solener.2012.03.006.
- IRENA. (2024). International Renewable Energy Agency. *Renewable energy statistics 2024*. Abu Dhabi.
- LeBaron, B. A., Michalsky, J. J., & Perez, r. (1990). A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions. *Solar Energy*, 249-256.
- LeBaron, B. A., Peterson, W. A., & Dirm, I. (1980). Corrections for diffuse irradiance measured with shadowbands. *Solar Energy*, 1-13.
- Long, C. N., & Dutton, E. G. (2010). *BSRN Website*. Obtenido de [https://bsrn.awi.de/fileadmin/user\\_upload/bsrn.awi.de/Publications/BSRN\\_recommended\\_QC\\_tests\\_V2.pdf](https://bsrn.awi.de/fileadmin/user_upload/bsrn.awi.de/Publications/BSRN_recommended_QC_tests_V2.pdf)
- Miranda, D. R. (2023). PROCEDIMENTO DE CLASSIFICAÇÃO E REGRESSÃO APLICADO AO SITE ADAPTATION DA RADIAÇÃO SOLAR. Recife, Brasil: Universidade Federal de Pernambuco. Obtenido de <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/49667>
- Muneer, T., & Fairouz , F. (2022). Quality control of solar radiation and sunshine measurements – lessons learnt from processing worldwide databases. *Building Services Engineering Research and Technology.*, 23(3):151-166. doi:10.1191/0143624402bt038oa

- Nollas, F. N., Salazar, G. A., & Gueymard, C. A. (2023). Quality control procedure for 1-minute pyranometric measurements of global and shadowband-based diffuse solar irradiance. *Renewable Energy*, 40-55.
- Rodríguez-Muñoz, R. M., Monetta, A., Alonso-Suárez, R., Bove, I., & Abal, G. (2021). Correction methods for shadow-band diffuse irradiance measurements: assessing the impact of local adaptation. *Renewable Energy*, 830-844.
- Salazar, G. (2010). Aplicación del modelo híbrido de yang a datos climáticos medios mensuales de 10 localidades de Argentina. Application of yang hybrid model to mean monthly climate data of 10 sites in Argentina. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 25, 15-21.
- Salazar, G. A., Hernández, A. L., & Saravia, L. R. (2010). Practical models to estimate horizontal irradiance in clear sky conditions: Preliminary results. *Renewable Energy*, 2452-2460. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.01.033>
- Schroedter-Homscheidt, M., Hoyer-Klick, C., Killius, N., Betcke, J., Lefèvre, M., Wald, L., . . . Saboret, L. (2019). *User Guide to the CAMS Radiation Service (CRS)*, Sattus December 2019. Obtenido de [https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/2020-03/CAMS72\\_2018SC1\\_D72.4.3.1\\_2019\\_UserGuide\\_v1.1.pdf](https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/2020-03/CAMS72_2018SC1_D72.4.3.1_2019_UserGuide_v1.1.pdf)
- Steven, M. D., & Unsworth, M. H. (1980). Shade-ring corrections for pyranometer measurements of diffuse solar radiation from cloudless skies . *Quarterly Journal of the RMetS*, 106, 865-872 . Obtenido de <https://doi.org/10.1002/qj.49710645015>
- Yang, K., Koike, T., & Ye, B. (2006). Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137, 43-55. doi:[doi:doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.02.001](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.02.001)

## **ANALYSIS OF DIFFUSE SOLAR RADIATION MEASURED USING A SHADOW BAND. CASE STUDY: CITY OF SALTA**

**ABSTRACT:** This study presents the initial advances in the measurement and analysis of diffuse horizontal irradiance (DHI), measured in the city of Salta, Argentina. The device used to block direct normal irradiance (DNI) on the horizontal plane was a self-made shading band, used during clear sky periods. Two methods for correcting DHI measurements were evaluated: one assuming an isotropic sky and the other considering an anisotropic sky. The obtained results were compared with data from a satellite model (LSA-SAF) and Yang's hybrid model. The performance of each model was evaluated using seven metrics: RMSE, MBE, MAE, rRMSE, rMBE, rMAE, and R<sup>2</sup>. It was determined that the correction method assuming an isotropic sky best represents DHI during the analysis period and that both the satellite model and the hybrid model underestimate the values of diffuse solar irradiance for the study site.

**Keywords:** diffuse irradiance, shadow band, hybrid model, satellite model.



## **ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE MEDICIONES DE IRRADIANCIA SOLAR EN PLANO HORIZONTAL (GHI) Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS MODELOS DE GHI EN CONDICIONES DE CIELO CLARO PARA DOS SITIOS EN LA PROVINCIA DE SALTA**

**Nicolás Rivera<sup>1</sup>, Germán Salazar<sup>1</sup>, Agustín Laguarda<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de investigaciones en Energía no Convencional (INENCO), Departamento de Física,  
Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta

<sup>2</sup>Laboratorio de Energía Solar, Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, UdelaR  
E-mail: nicolasrivera2297@gmail.com

**RESUMEN:** En este trabajo se llevó a cabo un análisis sobre la calidad de los datos de irradiancia solar medidos en Salta Capital y en El Rosal. Las mediciones fueron realizadas a nivel minutar, en los periodos del 10/08/2022 al 31/10/2023 y del 16/05/2023 al 31/12/2023, respectivamente. A partir de estos datos se evaluaron modelos de irradiancia solar global en el plano horizontal en condiciones de ausencia de nubes o cielo claro (CC): ESRA, ARG-P, ARG-P2 y McClear. La evaluación se realizó mediante análisis estadísticos para determinar el grado de correlación entre los valores medidos y los obtenidos por los diferentes modelos. Se utilizaron métricas de desempeño como el sesgo medio relativo (rMBD), error cuadrático medio porcentual (rRMSE), indicador de similitud (KSI) y coeficiente de regresión lineal ( $R^2$ ), para evaluar la precisión de los modelos en relación con la radiación efectivamente recibida en la superficie terrestre en ambas ubicaciones en condiciones de cielo claro. Los resultados obtenidos indican que el modelo ESRA, es quien mejor se ajusta a los valores en tierra para la Capital, mientras que el modelo McClear para el paraje El Rosal, con un rRMSE de 3,9% y 2,9%, respectivamente. Además, el modelo ARG-P2 muestra un mejor desempeño en ambos sitios que su versión anterior ARG-P.

**Palabras clave:** irradiancia solar en plano horizontal, control de calidad, modelos de cielo claro.

### **INTRODUCCIÓN**

Los modelos de cielo claro (CC) son herramientas utilizadas en meteorología y energía solar para estimar la irradiancia solar incidente (en  $W/m^2$ ) en la superficie terrestre en ausencia de nubes u otras obstrucciones meteorológicas. Su importancia radica en su utilidad para una variedad de aplicaciones, como la planificación de proyectos solares, la evaluación de la radiación en una ubicación específica, técnicas de pronóstico de radiación solar y la investigación climática. Estos modelos dependen de la geometría del sistema Sol-Tierra, considerando la ubicación geográfica, época del año y hora del día. Además, los modelos más precisos consideran algunos parámetros que representan el estado de la atmósfera.

Para su uso en ubicaciones específicas, es importante realizar una validación que permita evaluar cuán precisas son estas estimaciones en comparación con datos reales de radiación solar en condición de cielo claro observados en el terreno. Si bien existen estudios a nivel mundial como Antonanzas-Torres et al. (2019); Engener y Mills (2015); Gueymard (2012) y a nivel regional Laguarda y Abal (2017); Laguarda et al. (2020); Russo et al. (2022) las condiciones atmosféricas, geográficas y climáticas varían de un lugar a otro y a lo largo del tiempo como puede ser en nuestros sitios de estudio. Un modelo que funciona bien en un lugar o período podría no ser preciso en otro.

En este trabajo se utilizan medidas de irradiancia global horizontal (GHI) a las cuales se les aplica un exigente control de calidad. Luego, de ese conjunto se identifican las muestras correspondientes a condiciones de cielo claro (GHI<sub>cc</sub>) utilizando para ello un algoritmo automático. Estos datos se

utilizarán como referencia para evaluar discrepancias con estimaciones de modelos de cielo claro. Estas discrepancias se cuantifican con métricas de desempeño usuales en el área.

La evaluación se realiza en dos sitios, Salta y El Rosal (Tabla 1), mediante un análisis estadístico, comparando modelos CC y las mediciones en tierra durante los periodos del 10/08/2022 al 31/10/2023 (Salta Capital) y 16/05/2023 al 31/12/2023 (El Rosal), ambos con datos a escala minutal. Los modelos evaluados fueron: McClear (Lefevre et al., 2013), ARG-P (Salazar et al., 2010), ARG-P2 (Ledesma et al., 2022) y ESRA (Rigollier et al., 2000). Para realizar esta comparación, se aplicaron filtros de control de calidad a los datos de GHI medidos, algunos de los cuales fueron propuestos por la Baseline Surface Radiation Network (BSRN, Long y Dutton, 2002), así como por Nollas et al. (2023). Además, se implementaron filtros específicos por sombreado sobre el sensor y filtros manuales para eliminar ruido eléctrico sobre un periodo de tiempo. Estos filtros se describen en la sección de metodología. Posteriormente, se aplicó un algoritmo automático para selección de muestras correspondientes a cielo claro basado en la propuesta de Reno y Hansen (2016).

## MEDIDAS EN TIERRA

Salta Capital se encuentra en una región clasificada como clima subtropical de altura, Cwb, según la clasificación climática de Köppen-Geiger Peel et al. (2007). Este tipo de clima se caracteriza por veranos cálidos a calurosos con lluvias frecuentes y tormentas, mientras que los inviernos son frescos y secos. El paraje El Rosal se encuentra situado en el Departamento de Rosario de Lerma, en la provincia de Salta. Este paraje se clasifica como BSk según el sistema Köppen-Geiger. Esto indica que la región experimenta un clima semiárido con una temporada seca durante el verano y temperaturas relativamente moderadas a frías durante el invierno. Este tipo de clima es común en regiones de transición entre zonas desérticas.

Las mediciones de GHI para la Capital, fueron realizadas en el campus de la Universidad Nacional de Salta, las mediciones correspondientes al paraje El Rosal fueron realizadas sobre la Escuela N°4526 “El Rosal”, Rosario de Lerma, Salta, con una diferencia de más de 2000 metros de altura entre estos sitios y aproximadamente 130 km de distancia. La siguiente Tabla 1 brinda información acerca de los sitios y el periodo de medición.

*Tabla 1: descripción de los sitios, equipo y periodo en que fueron tomados los datos de GHI*

| Sitio         | Latitud (°S) | Longitud (°O) | Altura (m) | Piranómetro       | Inicio  | Fin      |
|---------------|--------------|---------------|------------|-------------------|---------|----------|
| Salta Capital | 24,728611    | 65,40944      | 1233       | Eppley PSP        | 10/8/22 | 31/10/23 |
| El Rosal      | 24,39278     | 65,7806       | 3355       | Kipp & zonen CMP3 | 16/5/23 | 31/12/23 |

Los piranómetros fueron calibrados a partir de un sensor patrón (Kipp & Zonen CM21), y constantemente se los supervisan, para realizar limpieza y la baja de datos (una vez al mes), de esta forma controlar posibles fallas o errores. Las salidas analógicas de ambos sensores fueron conectadas a Dataloggers Campbell CR1000 registrando datos con frecuencia minutal.

## MODELOS DE CIELO CLARO UTILIZADOS

### *Modelo ARG-P*

El modelo ARG-P Salazar et al. (2010), es un modelo de CC de tipo empírico, tiene como entrada la altura sobre el nivel del mar ( $A$ ) y genera como resultado un índice representativo de claridad ( $k_{tr}$ ), calculado para cada sitio en particular. Mediante este índice, la masa de aire óptica relativa y la irradiancia extraterrestre es posible estimar el índice de claridad instantánea ( $k_t$ ). A  $k_{tr}$  se realiza la corrección introduciendo la presión atmosférica en la definición de masa de aire óptico relativa propuesta por Kasten y Young (1989).

Este modelo permite calcular la irradiancia solar global sobre el plano horizontal de cielo claro ( $GHI_{cc}$ ) a partir de:

$$GHI_{cc} = G_{0h}(k_{t-r-p})^{Ma^{0,678}} \quad (1)$$

Donde:

$G_{0h}$ : Irradiancia solar extraterrestre sobre el plano horizontal

$Ma$ : Masa de aire óptico relativa propuesta por Kasten

Esta evaluación fue realizada para Salta Capital, situada a 1233 metros sobre el nivel del mar (msnm) y para El Rosal situado a 3355 msnm, de esta forma el modelo propone la siguiente correlación para encontrar el valor de  $k_{t-r-p}$

$$k_{t-r-p} = 0,7 + 1,6391 \times 10^{-3} \times A^{0,55} \quad (2)$$

### **Modelo ARG-P2**

El modelo ARG-P2 Ledesma et al. (2022), se obtiene a partir de un análisis detallado del funcionamiento detallado del modelo ARG-P junto con el servicio de irradiación McClear Clear-Sky y del Servicio de Monitoreo de la Atmosfera de Copernicus. Entonces, este modelo es una corrección al modelo mencionado anteriormente (ARG-P).

El ajuste para dar con ARG-P2 viene dado en la siguiente función definida sobre  $k_{trp}$  (para sitios de más de 1000mts):

$$k_{t-r-p}(A) = 0,649 + 0,02 \times A^{0,28} \quad (3)$$

Introduciendo esta nueva definición a la Ec. (5) se obtendrá  $GHI_{cc}$ .

### **Modelo McClear**

El modelo McClear (MCC, Lefevre et al., 2013), es un modelo avanzado y moderno de cielo claro de radiación solar desarrollado por el Centro Nacional de Investigaciones Meteorológicas (CNRM) en Francia. Este modelo se ha diseñado para proporcionar estimaciones precisas y detalladas de la radiación solar en la superficie terrestre bajo condiciones de cielo claro.

El modelo McClear utiliza información atmosférica, como la cantidad de vapor de agua, el ozono y el aerosol, para calcular cómo interactúa la radiación solar con la atmósfera antes de llegar a la superficie terrestre. Esto permite una mayor precisión al tener en cuenta los efectos de absorción y dispersión de la radiación.

McCclear utiliza datos globales de satélite para alimentar su modelo, lo que significa que puede proporcionar estimaciones en una amplia gama de ubicaciones en todo el mundo.

Los datos de radiación CC estimados por el modelo McCclear están disponibles en el portal del proyecto europeo Copernicus Atmospheric Monitoring Service (CAMS) y fueron obtenidos a partir del siguiente enlace: <https://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-radiation-service>, introduciendo como entradas las ubicaciones de los lugares en forma precisa y en los periodos de tiempo de medición.

### **Modelo ESRA**

El modelo ESRA, European Solar Radiation Atlas Rigollier et al. (2000), es otro modelo de cielo claro desarrollado por el Centro Nacional de Investigaciones Meteorológicas (CNRM) en Francia, al igual que el modelo McCclear.

El modelo ESRA utiliza como única entrada sobre el estado de la atmosfera al factor de Turbidez de Linke,  $T_L$  (Louche et al., 1986; Linke, 1992). Este factor incluye los efectos de aerosoles y vapor de agua presentes en la atmosfera y se puede interpretar como el número de atmósferas limpias y secas equivalentes necesarios para una atenuación atmosférica observada en un determinado momento y lugar. Los valores diarios medios mensuales de turbidez de Linke relacionados a los sitios de estudio, para este trabajo, fueron tomado del artículo Salazar y Raichijk (2014) y se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Valores de  $T_L$  para Salta Capital y El Rosal

| MES | Salta Capital | El Rosal |
|-----|---------------|----------|
| ENE | 3,9           | 2,8      |
| FEB | 3,9           | 2,7      |
| MAR | 3,6           | 2,4      |
| ABR | 3,8           | 2,5      |
| MAY | 3,2           | 2,1      |
| JUN | 3,1           | 2,0      |
| JUL | 2,8           | 1,9      |
| AGO | 2,9           | 2,0      |
| SET | 3,3           | 2,2      |
| OCT | 3,5           | 2,3      |
| NOV | 3,8           | 2,5      |
| DIC | 3,8           | 2,7      |

## METODOLOGIA

### Control de calidad

Los datos para su uso con este trabajo fueron previamente tratados mediante filtros de control de calidad. Estos filtros están separados por:

- Filtro 0: Este filtro tiene como objetivo filtrar todos los valores en los que no se disponga del recurso solar (filtro Ec. 4)
- Filtrado manual de datos con sombreado (Salta): A través de una inspección visual. Se detectaron sombreado en el instrumento de la estación de Salta Capital debido a un árbol situado al Este. Durante el primer trimestre de medición se observan mediciones afectadas en las primeras horas del día
- Filtrado manual de datos con sombreado (El Rosal): De forma similar a Salta, se detectaron datos afectados por sombreado para el paraje debido por las montañas en el horizonte
- Filtros GHI: Incluye una serie de criterios, incluidos el filtro BSRN (Long y Dutton, 2002) para valores de irradiancia global extremadamente raros y los filtros 2 (Ec. 6) y 3 (Ec. 7) del grupo 1 de GHI propuestos por Nollas (2023)
- Filtro de altura solar: Se descartan mediciones correspondientes a alturas solares menores a 7 grados para evitar el error del coseno de los instrumentos

### Filtrado manual de datos con sombreado (Salta)

Este filtro fue realizado de manera manual. En el diagrama solar (Figura 1b) puede apreciarse el efecto producido por la sombra de un árbol (Figura 1a). A partir de este diagrama, realizando una máscara de manera manual, se procedió a la sustracción de valores que cayeran en el recuadro en verde. Este recuadro comprende valores de ángulos de elevación entre  $0^\circ$  y  $15^\circ$  y ángulos azimutales dentro de un rango de  $70^\circ$  y  $80^\circ$ .

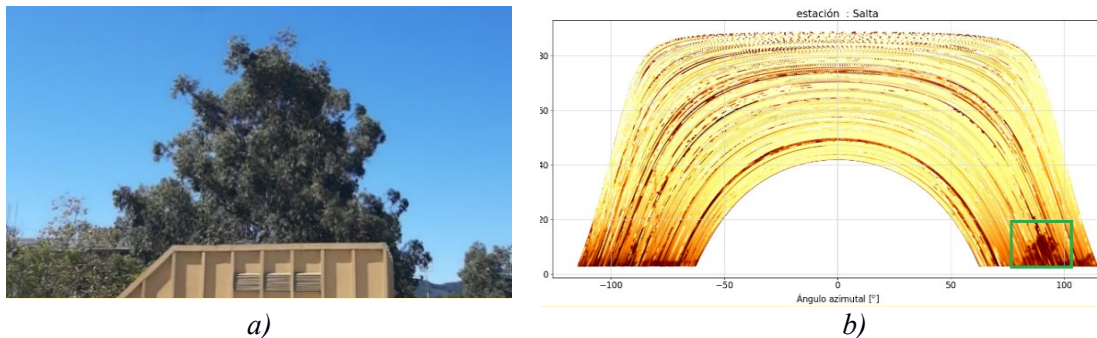
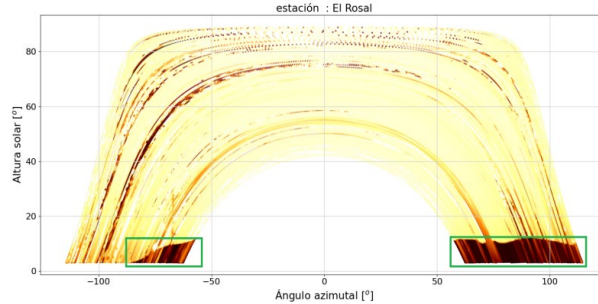


Figura 1: Sombra producida por el árbol, a) Árbol situado al Este del sensor., b) Diagrama solar parametrizado en GHI sin filtro de sombra.

### **Filtrado manual de datos con sombreamiento (El Rosal)**

En la Figura 2, se observa los recuadros en verde el efecto generado por las sombras provocadas por las montañas en el horizonte. Estos valores deben ser eliminados mediante este filtro, ya que representan valores de GHI atenuadas por sombra. Para llevar a cabo las evaluaciones correspondientes con los modelos de CC y modelos en condición de todo tipo de cielo, estos valores no deben ser considerados. El recuadro abarca valores de ángulos de elevación entre 0° y 15°, así como ángulos azimutales en un rango de -70° a 180°.



*Figura 2: Diagrama solar parametrizado en GHI sin filtro de sombra El Rosal.*

### **Filtros GHI**

Filtros BSRN:

$$GHI > -2 \frac{W}{m^2} \quad (4)$$

$$GHI < G_{sc} \times 1,5 \times (CSZ)^{1,2} + 50 \frac{W}{m^2} \quad (5)$$

donde:

CSZ coseno del ángulo cenital

$G_{sc}$  es la constante solar (tomada como 1361.7 W/m<sup>2</sup>)

Filtros de Nollas et al. (2023):

$$GHI > (6,5331 - 0,065502 \times \theta_z + 1,8312 \times 10^{-4} \times \theta_z^2) / (1 + 0,01113 \times \theta_z) \quad (6)$$

$$k_t < 1,4 \quad (7)$$

Siendo:

$\theta_z$  el ángulo cenital

$k_t$  el índice de claridad

### **Detección de muestras de cielo claro**

Para realizar una evaluación a través de métricas a los modelos de CC se necesita contar con datos medidos que correspondan a cielo claro, para esto se aplicó un algoritmo de selección de muestras de cielo claro a los datos que pasaron los filtros de control de calidad. El algoritmo, proporcionado por Reno y Hansen (2016), se utilizó para identificar periodos de tiempo con GHI similar a la que ocurre durante condiciones de cielo claro a partir de una serie temporal de mediciones. Para implementarlo, se utilizó la función `clearsky.detect_clearsky` del módulo `pvlib` de Python, que aplica el algoritmo RENO-2016. Esta función identifica periodos con GHI equivalentes a cielo claro comparando las características de las series temporales de mediciones de GHI con el resultado correspondiente de un modelo de cielo claro, en este trabajo, la comparación se realizó con el modelo McClear.

## **VALIDACION Y RESULTADOS**

### **Resultados del control de calidad**

Tomando como el 100% a los datos que superaron el filtro 0, se aplicaron los filtros restantes. Las Tablas 3 y 4, muestran la cantidad de datos finales a utilizar correspondiente a cada sitio de estudio, siendo el 71,5% y el 81,4% de los datos quienes pasaron todos los filtros de control de calidad para la ciudad de Salta y El Rosal respectivamente.

Se realizó otro filtro para Salta Capital en el que se quitaron días que presentaban ruido eléctrico, es decir, valores de GHI con perturbaciones. Este filtro se definió como “filtro de días”, filtrando el periodo desde el 28/11/2022 al 23/12/2022, este periodo fue filtrado a través de inspección visual sobre la serie temporal.

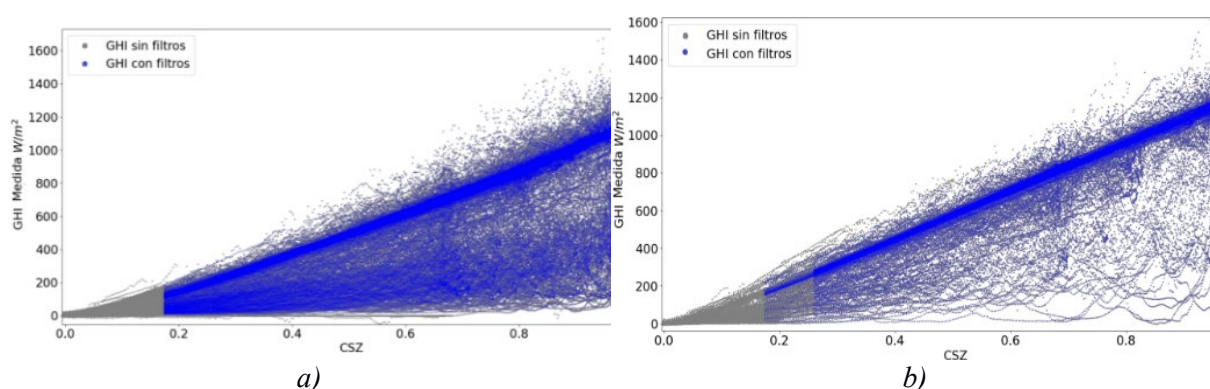
*Tabla 3: Cantidad de datos al pasar por los diferentes filtros Salta Capital*

| Filtros                       | Nº Datos | Porcentaje |
|-------------------------------|----------|------------|
| Filtro 0<br>(Ec. 4)           | 350184   | 100%       |
| Filtro BSRN<br>(Ec. 5)        | 305554   | 87,2%      |
| Filtro Nollas 2<br>(Ec. 6)    | 304784   | 87,0%      |
| Filtro Nollas 3<br>(Ec. 7)    | 299205   | 85,4%      |
| Filtro Sombras<br>(Figura 1a) | 263972   | 75,4%      |
| Filtro de días                | 250478   | 71,5%      |

*Tabla 4: Cantidad de datos al pasar por los diferentes filtros El Rosal*

| Filtros                      | Nº Datos | Porcentaje |
|------------------------------|----------|------------|
| Filtro 0<br>(Ec. 4)          | 163296   | 100%       |
| Filtro BSRN<br>(Ec. 5)       | 161019   | 98,6%      |
| Filtro Nollas 2<br>(Ec. 6)   | 158429   | 97,1%      |
| Filtro Nollas 3<br>(Ec. 7)   | 157230   | 96,2%      |
| Filtro Sombras<br>(Figura 2) | 132851   | 81,4%      |

Dadas la Figura 3a para Salta y 3b para El Rosal, los valores GHI no filtrados se representan en gris, mientras que los datos en azul que superan los controles de calidad en función del coseno del ángulo cenital.



*Figura 3: GHI medida en función del CSZ con y sin filtros aplicados, a) Salta Capital., b) El Rosal.*



### Filtro de detección de datos de cielo claro

Aplicado el algoritmo, se identificaron para ciudad de Salta y El Rosal, 94648 y 79175 datos correspondientes al 37,79% y 59,60% respectivamente, del total de datos previamente seleccionados después de aplicar los filtros de calidad. Estos datos fueron validados a partir de inspección visual. En la Figura 4a y en la Figura 4b, se pueden observar en azul los datos que corresponden a días de cielo claro, mientras que en gris se muestran los datos en condición de todo tipo de cielo para los dos sitios.

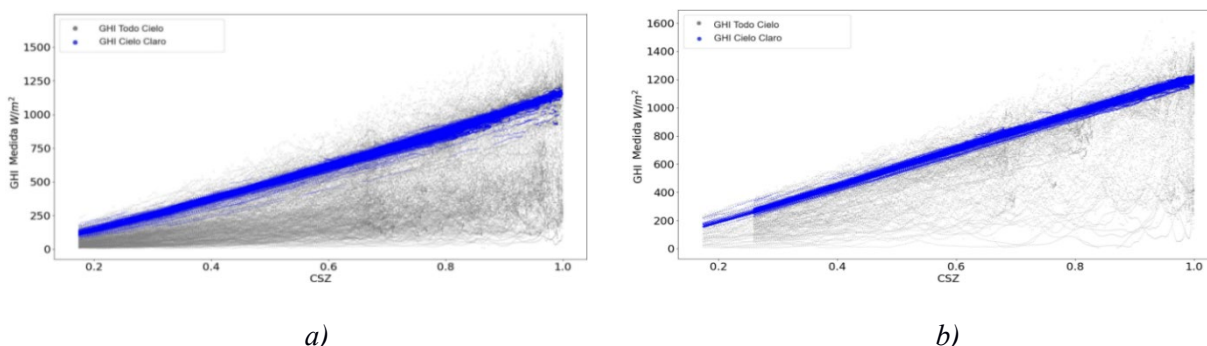


Figura 4: CSZ vs GHI para todo tipo de cielo y GHI aplicado algoritmo RENO-2016, a) Salta Capital., b) El Rosal.

Se destaca que, para El Rosal, a pesar de tener un periodo de medición más corto, la cantidad de muestras totales correspondientes a CC es comparable a las que se tiene en Salta Capital. Esto se demuestra gráficamente en la Figura 5, donde se representa la cantidad de datos de CC para ambos sitios durante el mismo periodo de tiempo, destacándose que El Rosal siempre tiene la mayor cantidad de muestras CC lo cual es congruente a su clasificación climática de Köppen-Geiger.



Figura 5: N° de datos correspondientes a CC para Salta y El Rosal en el periodo de 17 mayo al 31 de octubre 2023.

### Evaluación de los modelos de cielo claro

Al evaluar los datos de GHI correspondientes a cielos claros con los modelos de CC, las métricas de desempeño presentadas en la Tabla 5 para Salta Capital y El Rosal indican que el error cuadrático medio porcentual (rRMSE) de todos los modelos están entre el 3% y 5,5%, mientras que existen sesgos negativos y positivos dependiendo del modelo. Para este análisis, se utilizaron un total de 94648 y 79175 medidas correspondientes a días de cielo claro, con una media de 657 W/m<sup>2</sup> para Salta Capital y 749 W/m<sup>2</sup> para El Rosal.

Tabla 5: Métricas de rendimiento para los distintos modelos de CC

| Sitio           | Modelo  | rMBD(%) | rRMSE(%) | R <sup>2</sup> | KSI  |
|-----------------|---------|---------|----------|----------------|------|
| Ciudad de Salta | ARG-P   | -3,6    | 5,5      | 0,995          | 23,7 |
|                 | ARG-P2  | -1,6    | 4,3      | 0,995          | 11,0 |
|                 | McClear | 2,8     | 4,1      | 0,997          | 19,5 |
|                 | ESRA    | 0,1     | 3,9      | 0,995          | 6,5  |
| El Rosal        | ARG-P   | -3,4    | 5,1      | 0,994          | 27,8 |
|                 | ARG-P2  | 0,1     | 4,0      | 0,994          | 12,7 |
|                 | McClear | 1,3     | 2,9      | 0,997          | 10,0 |
|                 | ESRA    | -0,3    | 3,2      | 0,996          | 12,0 |

Las siguientes gráficas de dispersión, representadas respectivamente por la Figura 6 para la ciudad de Salta y la Figura 7 para El Rosal, ilustran como ajustan los modelos a cada sitio detallados en la Tabla 5, siendo el modelo Figura 6d el que mejor lo hace para ciudad y Figura 7c para el paraje.

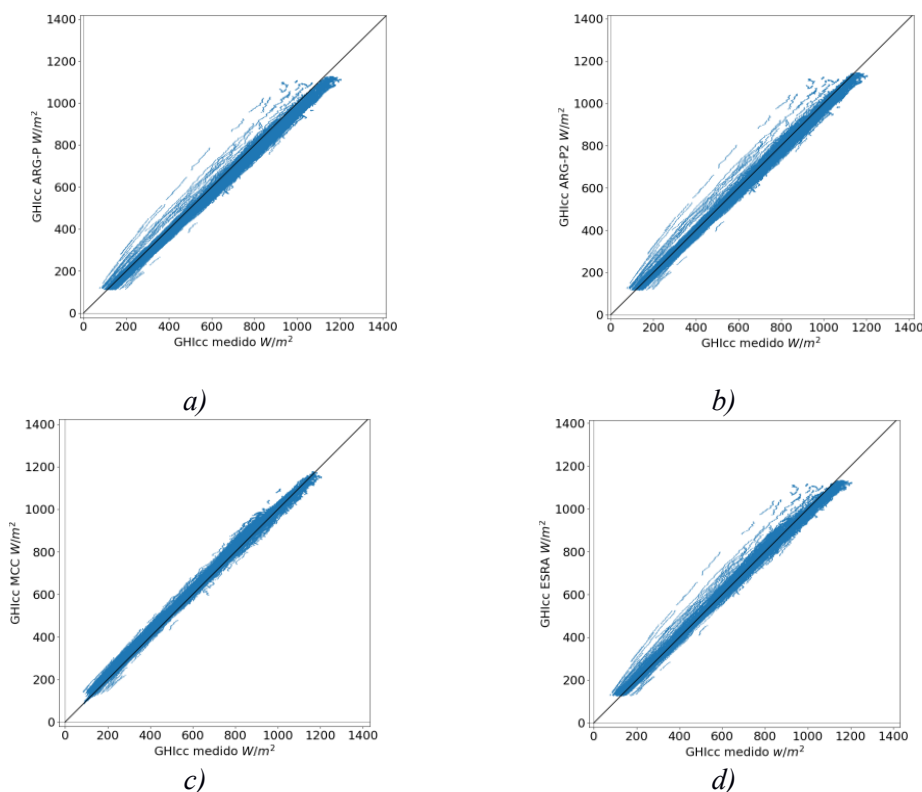


Figura 6: Modelos de cielo claro ciudad de Salta, a) ARG-P., b) ARG-P2., c) McClear., d) ESRA.

Se

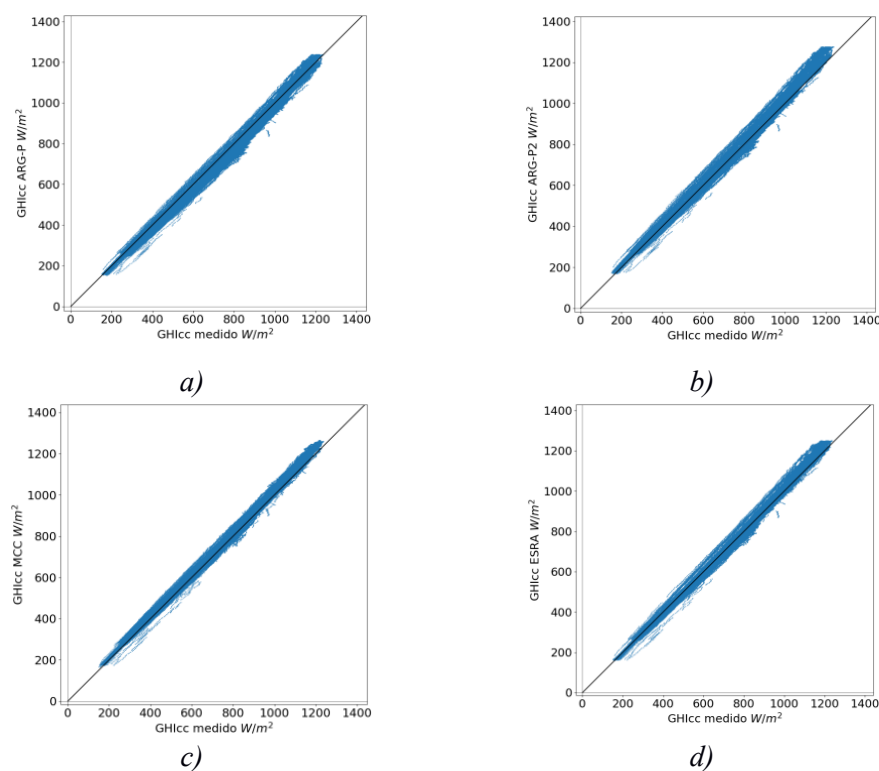


Figura 7: Modelos de cielo claro El Rosal, a) ARG-P., b) ARG-P2., c) McClear., d) ESRA.

realizó un análisis del rRMSE en función del CSZ para Salta y para El Rosal a partir de la Figura 8a y 8b, respectivamente. El coseno del ángulo cenital, que varía entre 0 y 1, se dividió en 10 subintervalos y se representaron los promedios que toman las métricas para cada uno de ellos. La cantidad de datos y el porcentaje correspondiente distribuidos según los intervalos del coseno del ángulo cenital (CSZ) se encuentran en la Tabla 6.

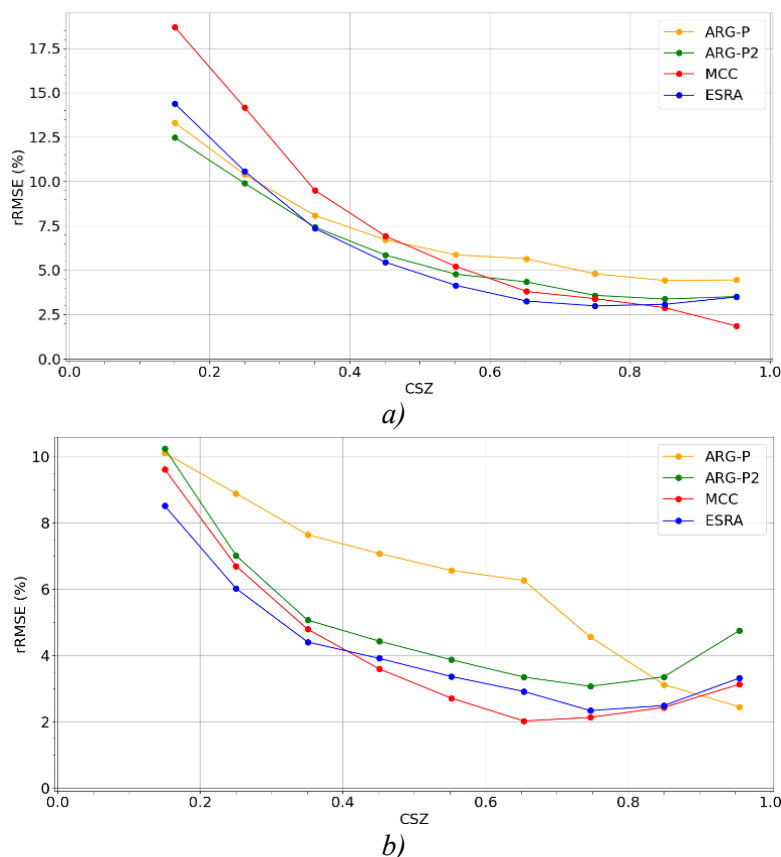


Figura 8: rRMSE(%) en función del CSZ, a) Salta Capital., b) El Rosal.

Tabla 6: Distribución de los datos de CC según CSZ

| Intervalo CSZ | Salta Capital |                | El Rosal    |                |
|---------------|---------------|----------------|-------------|----------------|
|               | Nº de Datos   | Porcentaje (%) | Nº de Datos | Porcentaje (%) |
| [0, 0,1]      | 0             | 0              | 0           | 0              |
| (0,1, 0,2]    | 1396          | 1,47           | 370         | 0,47           |
| (0,2, 0,3]    | 6646          | 7,02           | 9890        | 4,91           |
| (0,3, 0,4]    | 8415          | 8,89           | 7836        | 9,9            |
| (0,4, 0,5]    | 9874          | 10,43          | 8928        | 11,28          |
| (0,5, 0,6]    | 11937         | 12,61          | 11334       | 14,32          |
| (0,6, 0,7]    | 17522         | 18,51          | 17615       | 22,25          |
| (0,7, 0,8]    | 16768         | 17,72          | 10885       | 13,75          |
| (0,8, 0,9]    | 12938         | 13,67          | 9088        | 11,48          |
| (0,9, 1]      | 9152          | 9,67           | 9229        | 11,66          |

Se observa en las Figuras 8a y 8b que, para valores bajos de CSZ, se presenta el mayor error rRMSE. Sin embargo, esto no es significativo para los resultados obtenidos en la Tabla 6 debido a la cantidad de datos en esos rangos de CSZ. Para valores de CSZ comprendidos entre (0,6, 0,85) en ambos sitios, el

rRMSE tiende a estacionarse, con la excepción del modelo ARG-P que, a pesar de estar en diferentes escalas en las gráficas, en ambas posee un máximo sobre este rango, lo cual puede deberse a su naturaleza (sin consideraciones atmosféricas).

En la mayoría de los modelos, el rRMSE alcanza su valor mínimo dentro de este rango, lo cual coincide en este rango con la mayor cantidad de datos de CC proporcionada en la Tabla 6.

## CONCLUSIONES

Se midió la irradiancia solar en el plano horizontal durante un período de más de 14 meses (de agosto 2022 a octubre 2023) en Salta Capital, con una interrupción en diciembre cuando no se disponía de datos de calidad, y un período ininterrumpido de 7 meses (de mayo a diciembre 2023) en El Rosal.

Se llevó a cabo un control de calidad en los datos de GHI medidos, con el objetivo de mejorar la representatividad en la evaluación de los modelos de cielo claro y su posterior aplicación en evaluaciones con modelos de irradiancia en condiciones de todo tipo de cielo, sin embargo, no se realizó una comparación contra datos sin filtrar. Tras este proceso, el 71,5% de los datos iniciales para Salta Capital y el 81,4% para El Rosal lograron pasar todos los criterios de calidad considerados.

Para estos periodos, se realizaron validaciones de modelos de cielo claro, incluyendo ARG-P, ARG-P2, ESRA, McClear. El modelo McClear fue obtenido del portal CAMS, mientras que los otros tres fueron implementados en este trabajo. Por su precisión se destaca el modelo McClear, por ser fácilmente accesible y al modelo ESRA utilizando turbidez atmosférica localmente obtenida, por su simplicidad y precisión. Con respecto a las dos versiones de ARG-P, se encontró que el modelo ARG-P2 tiene un mejor ajuste que su versión anterior en ambos sitios, dado que su versión anterior es un modelo empírico sin tener consideraciones atmosféricas mientras que ARG-P2 fue ajustado con datos del modelo McClear. Los resultados de esta validación revelaron que el modelo ESRA es el que mejor se ajusta para la ciudad de Salta en condiciones de cielo claro, mientras que el modelo McClear mostró ser el más adecuado para El Rosal.

Los resultados obtenidos muestran que la desviación rRMSE de los modelos varía entre un 3,2% y un 5,5% para ambos sitios a escala minutal. Al comparar con estudios regionales, como el de Laguarda y Abal (2017), que reportaron desviaciones entre el 4,3% y el 7% a escala horaria en cinco sitios de Uruguay; el trabajo de Laguarda et al. (2020) se tiene para el McClear las desviaciones se encuentran entre 2,7 y 4,1% ESRA 3,2 y 3,8 a nivel horario para diez sitios de la Pampa Húmeda y el trabajo de Russo et al. (2022), que encontró un 3,7% a escala minutal para un sitio representativo de la Pampa Húmeda, se observa que las desviaciones en este estudio son comparables a las evaluaciones regionales utilizadas como referencia.

Desde un punto de vista práctico, la ciudad de Salta Capital y El Rosal se pueden considerar en ubicaciones equivalentes, ya que presentan condiciones similares desde una perspectiva de geometría solar. Sin embargo, al observar la Tabla 5, se nota que, a pesar de contar con una línea temporal de datos más corta para El Rosal, se dispone de una cantidad comparable de datos de cielo claro en relación con Salta. Además, los datos que pasan el filtro de detección de cielo claro representan casi un 60% en El Rosal, mientras que en Salta alcanzan alrededor del 40 %. Esto indica que la diferencia de altitud es un factor significativo en los procesos de atenuación y dispersión, siendo mucho más pronunciados en la capital de Salta, indicando que las características de nubosidad son distintas en ambas localidades.

## REFERENCIAS

- Antonanzas-Torres, F., Urraca, R., Polo, J., Perpiñan-Lamigueiro, O. y R, E. (2019). Clear sky solar irradiance models: A review of seventy models. *Renewable and sustainable Energy Reviews*, 107, 374-387. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.032>
- Engener, N. y Mills, F. (2015). Validating nine clear sky radiation models in Australia. *Solar Energy*, 120, 9-24. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.044>

- Gueymard, C. A. (2012). Clear-sky irradiance predictions for solar resource mapping and large-scale applications: Improved validation methodology and detailed performance analysis of 18 broadband radiative models. *Solar Energy*, 86(8), 2145-2169. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.11.011>
- Kasten, F. y Young, A. T. (1989). Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied optics*, 28(22), 4735-4738.
- Laguarda, A. y Abal, G. (2017). Clear-sky broadband irradiance: first model assessment in Uruguay. *Proceedings of Solar World Congress*, 29, 10-2.
- Laguarda, A., Giacosa, G., Alonso Suárez, R. y Abal, G. (2020). Performance of the site-adapted CAMS database and locally adjusted cloud index models for estimating global solar horizontal irradiation over the Pampa Húmeda. *Solar Energy*, 199, 295 - 307.
- Ledesma, R. D., Salazar, G. A. y Castro Vilela, O. d. (2022). ARGP-v2 un modelo práctico para la estimación de irradiancia global horizontal en condiciones de cielo claro para sitios de altura. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 26.
- Lefevre, M., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gschwind, B., Qu, Z., Wald, L., Schroedter-Homscheidt, M., Hoyer-klick, C. y Arola, A. (2013). McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions. (C. P. Göttingen, Ed.) *Atmospheric Measurement Techniques*, 6, 2403-2418.
- Linke, F. (1992). Transmission-koeffizient und trubungsfaktor. *Beitr. Phys. Atmos.*, 10, 91-103.
- Long, C. y Dutton, E. (2002). BSRN Global Network recommended QC tests, V2.0. BSRN Technical Report.
- Louche, A., Peri, G. y Iqbal, M. (1986). An analysis of Linke turbidity factor. *Solar energy*, 37. doi:[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(86\)90028-9](https://doi.org/10.1016/0038-092X(86)90028-9)
- Nollas, F. M., Salazar, G., y Gueymard, C. A. (2023). Quality control procedure for 1-minute pyranometric measurements of global and shadowband-based diffuse solar irradiance. *Renewable Energy*, 202, 40-55. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.11.056>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., y McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences*, 11, 1633-1644.
- Reno, M. J., y Hansen, C. W. (2016). Identification of periods of clear sky irradiance in time series of GHI measurements. *Renewable Energy*, 90, 520-531. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.031>
- Rigollier, C., Bauer, O., y Wald, L. (2000). On the clear sky model of the ESRA—European Solar Radiation Atlas—with respect to the Heliosat method. *Solar energy*, 68, 33-48. doi:[https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00055-9)
- Russo, P., Laguarda, A., Abal, G. y Piccioli, I. (2022). PERFORMANCE OF THE REST2 MODEL FOR 1-MINUTE CLEAR-SKY SOLAR IRRADIANCE WITH MERRA-2 ATMOSPHERIC INPUTS. *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*, 1-9. doi:10.59627/cbens.2022.1100
- Salazar, G. A., Hernández, A. L. y Saravia, L. R. (2010). Practical models to estimate horizontal irradiance in clear sky conditions: Preliminary results. *Renewable Energy*, 35(11), 2452-2460. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.01.033>
- Salazar, G. y Raichijk, C. (2014). Evaluation of clear-sky conditions in high altitude sites. *Renewable energy*, 64, 197-202. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.003>

## **ANALYSIS OF THE QUALITY OF GLOBAL HORIZONTAL IRRADIANCE (GHI) MEASUREMENTS AND PERFORMANCE EVALUATION OF GHI MODELS UNDER CLEAR SKY CONDITIONS FOR TWO SITES IN THE PROVINCE OF SALTA**

**ABSTRACT:** In this study, an analysis was carried out on the quality of solar irradiance data measured in Salta Capital and El Rosal. The measurements were taken at minute intervals during the periods from 08/10/2022 to 10/31/2023 and from 05/16/2023 to 12/31/2023, respectively. Based on these data, global horizontal irradiance (GHI) models under clear-sky (CC) conditions, namely ESRA, ARG-P, ARG-P2, and McClear, were evaluated. The evaluation was performed using statistical analyses to determine the degree of correlation between the measured values and those obtained by the different models. Performance metrics such as the relative mean bias (rMBD), relative root mean square error (rRMSE), Kolmogorov-Smirnov Index (KSI), and linear regression coefficient ( $R^2$ ) were used to assess the accuracy of the models in relation to the radiation actually received at the Earth's surface at both

locations under clear-sky conditions. The results indicate that the ESRA model best fits the ground values for the Capital, while the McClear model performs best for the El Rosal site, with an rRMSE of 3,9% and 2,9%, respectively. Additionally, the ARG-P2 model shows better performance at both sites than its predecessor, ARG-P.

**Keywords:** solar irradiance on a horizontal plane, quality control, clear-sky models.



## **UNA MIRADA SOCIOTÉCNICA AL PROGRAMA DE ENERGÍAS RENOVABLES EN MERCADOS RURALES EN LA QUEBRADA DE LAS CONCHAS (SALTA, ARGENTINA, 2023)**

**Genaro Vilte<sup>1</sup>, Sofía Govetto<sup>2</sup>, Facundo Pérez Machado<sup>3</sup>,  
Carlos Cadena<sup>4</sup>, Emiliano Villagra Yurovich<sup>5</sup> y Facundo González<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Investigación en Ciencias Sociales y Humanidades (ICSOH, Unsa - CONICET)  
Av. Bolivia 5150, Salta Capital, CP 4400, Argentina. Correo: genarojlvilte@gmail.com

<sup>2</sup>Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta  
Av. Bolivia 5150, Salta Capital, CP 4400, Argentina. Correo: sofiagovetto@gmail.com

<sup>3</sup>Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta  
Av. Bolivia 5150, Salta Capital, CP 4400, Argentina. Correo: kakuperez@gmail.com

<sup>4</sup>Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa – CONICET)  
Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta. Correo: cadenacinenco@gmail.com

<sup>5</sup>Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta  
Av. Bolivia 5150, Salta Capital, CP 4400, Argentina. Correo: emilianoyurovich@gmail.com

<sup>6</sup>Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa – CONICET)  
Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta. Correo: facundoinenco@gmail.com

**RESUMEN:** el presente artículo revisa la implementación del Programa de Energías Renovables en Mercados Rurales (PERMER) en la Quebrada de las Conchas, Salta, Argentina, desde una perspectiva sociotécnica en el año 2023. La región en cuestión, caracterizada por su alta radiación solar y escasa infraestructura eléctrica, es propicia para la instalación de paneles solares. El estudio se realizó desde un enfoque cualitativo, recolectando datos mediante entrevistas y observaciones en campo. Se identificaron problemas técnicos y de mantenimiento en los equipos PERMER, así como la necesidad de mayor capacitación para los usuarios. Los hallazgos destacan que, aunque el programa ha mejorado el acceso a energía en esta comunidad rural, persisten desafíos que requieren atención para optimizar el funcionamiento y sostenibilidad del servicio. Las conclusiones sugieren la importancia de fortalecer el apoyo técnico y la formación continua para que los beneficiarios alcancen el agenciamiento, mejoren el uso de los equipos y logren una integración efectiva de las tecnologías renovables en estas áreas.

**Palabras clave:** energía solar, fotovoltaico, transición energética, PERMER.

### **INTRODUCCIÓN**

La Quebrada de las Conchas es una reserva natural ubicada al sudoeste de la Ciudad de Salta, específicamente dentro de los Valles Calchaquíes. Es conocida por sus enormes formaciones rocosas de color rojo y se encuentra a orillas de la Ruta Nacional 68. La reserva se extiende por 60 kilómetros aproximadamente; desde la localidad de Alemania, La Viña (RN 68 - Km 83) hasta la localidad de Punilla, Cafayate (RN 68 - Km 18).

Desde una perspectiva geográfica, la Quebrada de las Conchas desempeña un papel crucial en la biodiversidad de la región. Su estructura natural facilita el drenaje del agua de las zonas montañosas hacia el río Las Conchas, contribuyendo así a los ecosistemas locales. Además, es un atractivo turístico de gran relevancia, lo que impulsa la economía local y fomenta la preservación de las culturas y tradiciones regionales. La afluencia de visitantes no solo ayuda a la sostenibilidad económica, sino que también promueve la valorización y el cuidado del patrimonio natural y cultural de la zona.

En cuanto a sus propiedades geográficas, resulta una zona ideal para la instalación de paneles solares debido a que se ubica en una región con alta radiación solar y cielos despejados durante la mayor parte del año; lo que permite una eficiente captación de energía solar. La topografía de la quebrada, con amplias áreas abiertas y elevaciones estratégicas, proporciona sitios adecuados para la colocación de estos paneles, maximizando su exposición al sol y optimizando la generación de energía renovable.

La región (ver figura N.º 1) es de fácil accesibilidad y cuenta con tendido eléctrico convencional hasta la localidad de Alemania. Pasada esa localidad, la mayor parte de los pobladores utilizan paneles solares fotovoltaicos para su energización. Algunos pertenecen al PERMER y otra parte a una gestión municipal de la Viña.



*Figura 1: mapa Quebrada de las Conchas. Fuente: Google Maps (2024)*

El objetivo de esta investigación es revisar la implementación del PERMER en la Quebrada de las Conchas, Salta, desde un enfoque socio-técnico permite comprender la multidimensionalidad de los procesos generados a partir del estudio de dinámicas e interacciones de elementos heterogéneos (actores, conocimientos y artefactos) que intervienen en la producción de hábitat (Garrido, 2020; González, 2019). El estudio se propone identificar los principales desafíos técnicos y operativos relacionados con el uso, mantenimiento y sostenibilidad de los sistemas fotovoltaicos instalados, así como evaluar el nivel de agenciamiento de los usuarios. Asimismo, se busca explorar la necesidad de fortalecer las capacidades locales a través de una formación continua, con el fin de optimizar la integración de las tecnologías de energía renovable en las comunidades rurales y asegurar la sostenibilidad del servicio a largo plazo.

Siguiendo la página oficial de la Secretaría de Energía - ex Ministerio de Energía y Minería - (2024), el PERMER se define como “una iniciativa integral desarrollada por el Gobierno Nacional desde 1999, que aborda las necesidades energéticas de las comunidades rurales más apartadas y aisladas de Argentina”, con un enfoque en el acceso a la energía a través de fuentes renovables, principalmente solar y eólica. El programa busca mejorar la calidad de vida en estas áreas que carecen de un suministro eléctrico confiable proveniente de las redes convencionales.

La etapa actual del programa, respaldada por el Préstamo BIRF N.º 8484, prioriza soluciones tecnológicas limpias y sostenibles, en áreas rurales dispersas. Este proyecto de electrificación rural se lleva a cabo bajo la dirección del Ministerio de Energía y Minería, mediante una Unidad de Coordinación específica. Se dirige tanto a viviendas como a establecimientos de servicios públicos rurales dispersos, como escuelas, puestos sanitarios, centros comunitarios, entre otros. Está diseñado para satisfacer las necesidades de abastecimiento eléctrico en zonas alejadas, donde el acceso a fuentes convencionales es impracticable (PERMER, 2023). Además, en la página oficial del PERMER (2023), se detalla que el programa está financiado por el Banco Mundial y se gestiona con las distintas provincias, cada una con su Unidad Ejecutora, que supervisa los proyectos, en ejecución y programados.

La inversión inicial del PERMER (equipos e instalación) se comparte entre Nación y las provincias, variando según el tipo de instalación y de zona. En sistemas individuales, la Nación financia el 100%, mientras que en sistemas colectivos cubre el 80% del costo total (PERMER, 2023). Los beneficiarios, una vez instalados los sistemas de generación, hacen uso de estos en comodato hasta que puedan ser incorporados al sistema de suministro eléctrico convencional.

La prestación del servicio eléctrico implica que los beneficiarios abonarán una tarifa mínima, determinada por la provincia, destinada a cubrir los costos de operación y mantenimiento. Esto garantiza la sostenibilidad del servicio y permite a las comunidades rurales dispersas acceder a electricidad de manera similar a las ciudades (PERMER, 2023).

Los habitantes interesados en el proyecto pueden solicitar el servicio a través de la empresa distribuidora local, la Dirección Provincial de Energía o el Ente Regulador de los Servicios Públicos. El PERMER, está preparado para operar en todas las provincias, contribuyendo así al desarrollo, la mejora de condiciones de vida y la protección del medio ambiente. Por lo que su solicitud y acceso es libre para aquellas personas que cumplan los requisitos (PERMER, 2023).

Por otro lado, la importancia del programa radica en su capacidad para generar un cambio transformador en la vida de comunidades desatendidas que dependen de soluciones energéticas para satisfacer sus necesidades básicas. Además, el programa fomenta la sostenibilidad ambiental al reducir la dependencia de combustibles fósiles, contribuyendo a un desarrollo más equitativo y sostenible. Así, el PERMER no solo satisface demandas energéticas inmediatas, sino que impulsa el progreso socioeconómico y ambiental.

En la provincia de Salta, la firma del Convenio de Participación en el proyecto PERMER se llevó a cabo en agosto de 2001, según información proporcionada en su página oficial (PERMER, 2023). El estudio de mercado se ejecutó en el año 2004 y permitió determinar la cantidad de clientes a abastecer, su capacidad y disposición de pago por el servicio. El acuerdo de la implementación se realizó con ESED S.A. y fue firmado en agosto de 2001 entre la Provincia de Salta y la empresa distribuidora del servicio eléctrico. Allí se incorporaron las condiciones específicas al contrato de concesión existente.

Por su parte, la implementación del proyecto en la provincia constó de 4 etapas (PERMER, 2023):

1° etapa: implementación física en Salta. Comenzó con la provisión del servicio eléctrico a 178 escuelas en octubre de 2003. 2° etapa: provisión e instalación de sistemas fotovoltaicos en establecimientos de servicios públicos como puestos sanitarios, estaciones de policía, Gendarmería Nacional, seccionales de Parques Nacionales, iglesias y escuelas. También se efectuó la repotenciación de escuelas y puestos sanitarios que ya contaban con sistemas instalados en febrero de 2005. 3° etapa: abastecimiento eléctrico a pequeñas comunidades rurales aisladas a través de la implementación de sistemas de suministro descentralizados, consistentes en la construcción de pequeñas mini redes híbridas y distribución en media y baja tensión. 4° etapa: abastecimiento eléctrico a viviendas rurales aisladas a través de sistemas fotovoltaicos. La adquisición e instalación de los sistemas de generación, se efectuó mediante licitaciones públicas internacionales llevadas a cabo de forma centralizada por el PERMER en el transcurso del 2010.

En cuanto al monto destinado al programa en la provincia de Salta, la página del PERMER (2023), aporta un cuadro informativo (ver figura N.º 2), que distingue cantidad y tipos de beneficiarios, origen del financiamiento y sumas asignadas:

| CATEGORÍA                | CANTIDAD DE INSTALACIONES/BENEFICIARIOS | FINANCIAMIENTO |                         |           |       | INVERSIÓN TOTAL (USD) |
|--------------------------|-----------------------------------------|----------------|-------------------------|-----------|-------|-----------------------|
|                          |                                         | PERMER         | MTORIO EDUCACION NACION | PROVINCIA | OTROS |                       |
| VIVIENDAS                | 5.038                                   | 100%           | -----                   | -----     | 2.94% | 13.221.564            |
| ESCUELAS                 | 316                                     | 80%            | 20%                     |           |       | 1.540.245             |
| OTROS SERVICIOS PUBLICOS | 179                                     | 80%            | -----                   | 20%       |       | 1.165.499             |
| MINIREDES                | 1533                                    | 75%            | -----                   | 25%       |       | 5.268.774             |
| TOTAL INVERSIÓN          |                                         |                |                         |           |       | 21.196.082            |

Figura 2: Beneficiarios del PERMER en la provincia de Salta. Fuente: PERMER (2023).

## METODOLOGÍA

La implementación del PERMER en la Quebrada de las Conchas es una iniciativa crucial para mejorar el acceso a servicios energéticos en esta área remota. La cual no estuvo exenta de distintos inconvenientes entre usuarios/equipos y usuarios/responsables/técnicos. Estas dificultades fueron observadas en un trabajo de campo realizado en la zona en el mes de octubre del 2023. La visita estuvo compuesta por dos técnicos del área de las energías renovables, un responsable del Ente Regulador de Salta, el docente a cargo del proyecto y un estudiante universitario.

El instrumento de recolección de datos constó de 16 ítems que abarcaban: información sobre los usuarios, datos geográficos, aspectos técnicos, procedimientos administrativos relacionados con el mantenimiento y pago del servicio, así como conclusiones y apreciaciones de los usuarios. Además, se incluyó un espacio para registrar los enlaces a las imágenes capturadas durante el proceso de evaluación (ver figura N.º 3).

La relevancia de estos datos radica en su capacidad para proporcionar una visión integral y multifacética del impacto y la operatividad del programa en la región estudiada. En primer lugar, los datos personales y geográficos permiten contextualizar las respuestas, facilitando un análisis que considera las variaciones demográficas y geográficas. Esto es crucial para identificar patrones y diferencias significativas entre distintas zonas o grupos de usuarios, lo que puede influir en la planificación de futuras intervenciones o en la adaptación del programa a contextos específicos.

Los datos técnicos son esenciales para evaluar el rendimiento y la fiabilidad de los sistemas instalados, así como para detectar fallas recurrentes o necesidades de actualización tecnológica. Este tipo de información es fundamental para asegurar que el programa no solo provea acceso inicial a la energía, sino que también mantenga un nivel de servicio adecuado a lo largo del tiempo.

Por otra parte, los datos burocráticos relacionados con el mantenimiento y el pago del servicio ofrecen una visión de la sostenibilidad operativa y financiera del programa. Estos datos permiten identificar posibles obstáculos que afecten la continuidad del servicio, como dificultades en el acceso a recursos financieros por parte de los usuarios o ineficiencias en los procesos de mantenimiento.

|                                                                                  |                    |                           |                                     |  |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------|-------------------------------------|--|
| Apellido, Nombre                                                                 |                    |                           | Télefono                            |  |
| 1) N° de usuario:                                                                |                    |                           |                                     |  |
| 2) Localidad                                                                     |                    |                           | 3) Paraje                           |  |
| 4) Km Ruta                                                                       |                    |                           | 5) Locación GPS                     |  |
| 6) Cantidad de Paneles                                                           | 7) Modelo de Panel |                           |                                     |  |
| 8) Año de instalación                                                            |                    | 9) Última Visita técnica: | 10) Última fecha de pago de factura |  |
| 11) Problemas relacionados con el uso del Panel                                  |                    |                           |                                     |  |
| 12) Solicitudes para la mejora en el uso del equipo                              |                    |                           |                                     |  |
| 13) ¿Qué más necesitaría para mejorar su calidad de vida a partir de la energía? |                    |                           |                                     |  |
| 14) Foto de los paneles<br>(al menos dos incluyendo datos impresos)              |                    |                           |                                     |  |
| 15) Foto del Paraje                                                              |                    |                           |                                     |  |
| 16) Foto de factura                                                              |                    |                           |                                     |  |

Figura 3: Instrumento de recolección. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, a medida que se entrevistaban a los residentes de la zona de interés, se tomaban anotaciones de las apreciaciones que surgían durante la charla con los mismos (ver tabla N.º 1). Además de ello, de cada equipo PERMER divisado se tomaron imágenes y descripciones de posibles problemas técnicos (ver tabla N.º 2).

Los residentes, como usuarios directos del programa, ofrecen una comprensión práctica y contextual de las necesidades, desafíos y beneficios que enfrentan en su vida cotidiana. Su participación facilitó la identificación no solo de problemas técnicos, sino también de cuestiones sociales, culturales o económicas que pueden influir en la utilización o aceptación de las tecnologías.

Por su parte, la visión de los técnicos es clave para evaluar los aspectos estrictamente tecnológicos y detectar fallas o áreas de mejora que, desde la perspectiva de los usuarios, podrían no ser evidentes. Los técnicos cuentan con la capacidad de identificar problemas técnicos complejos y proponer soluciones que optimicen la eficiencia y durabilidad de los sistemas. Las observaciones técnicas que se registran en forma de imágenes y descripciones detalladas permiten realizar un diagnóstico más preciso de los problemas que podrían presentarse en los equipos instalados.

La integración de ambas perspectivas, la de los pobladores y la de los técnicos, permite desarrollar una evaluación más completa y realista del proyecto. De esta manera, se asegura que las soluciones adoptadas sean no solo técnicamente viables, sino también adecuadas a las necesidades y circunstancias locales, lo cual es fundamental para garantizar la sostenibilidad del servicio a largo plazo.

*Tabla 1: instrumento de recolección de opiniones de los usuarios. Fuente: elaboración propia.*

| Problemas relacionados con el uso del panel / Solicitud para la mejora en el uso del equipo / ¿Qué más necesitaría para mejorar su calidad de vida a partir de la energía?                                                                                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Más potencia. Más que iluminación, potencia para la máquina del taller artesanal.                                                                                                                                                                                                      |
| Tuvieron problemas con la batería y compraron para cambiar batería e inversor.                                                                                                                                                                                                         |
| La ubicación del panel se ve afectada por el crecimiento de las ramas de los árboles. Mejora y cambio de la batería.                                                                                                                                                                   |
| La ubicación del panel se ve afectada por el crecimiento de las ramas de los árboles. Mejora y cambio de la batería.                                                                                                                                                                   |
| Todo bien.                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Escuela N° 4261. La directora manifiesta que no da abasto para el uso de internet (los paneles). Los paneles están a la sombra y tienen tierra y están sucios. Solicitan más potencia para utilizar internet, computadora de escritorio e impresora. No tienen otra fuente de energía. |
| El panel viejo tiene problemas con el agua destilada que llevan las baterías viejas. Necesitan una batería nueva. Y para mejorar sus condiciones de hábitat consideran: necesitan cocina solar, cargador solar y calefón solar.                                                        |

*Tabla 2: anotaciones de técnicos del equipo. Fuente: elaboración propia.*

|   |                                                                             |
|---|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Batería e inversor todo junto en una especie de conservadora.               |
| 2 | No cuentan con cargador atmosférico (el pliego 3 dice que deben tener)      |
| 3 | No tienen puesta a tierra ni llave térmica.                                 |
| 4 | Los paneles están sucios con capas gruesas de tierra.                       |
| 5 | Los paneles están cerca de árboles y hojas que cubren su exposición al sol. |

El universo de estudio fueron las familias ubicadas en la región de la Quebrada de las Conchas, Salta, Argentina. Las unidades de análisis fueron aquellas familias/instituciones que contaban con equipos del programa PERMER. En total fueron registradas un total de siete locaciones en donde se encontraron ocho titulares PERMER; de esas siete locaciones resultaron seis casas de familias (ver figura N.º 4) y una institución rural de educación primaria.



*Figura 4: relevamiento a un usuario del paraje Don Barbosa. Fuente: banco propio de imágenes.*



Las apreciaciones de los usuarios permitieron, en primer lugar, identificar inconvenientes basados en sus propios conocimientos y experiencias. Las personas encuestadas, al estar en contacto directo con los equipos, pueden detectar problemas y ofrecer información valiosa que de otro modo podría pasar desapercibida. Esta información resulta clave para comprender las dificultades específicas que enfrentan en el uso de los aparatos.

En segundo lugar, esta información permite a los técnicos evaluar el nivel de agenciamiento de los usuarios con los equipos. El concepto de “agenciamiento” refiere a la capacidad de los usuarios para interactuar eficazmente con los equipos, resolver problemas y maximizar su utilidad. Al evaluar este nivel de agenciamiento los técnicos pueden descifrar qué tan autónomos son los usuarios al manejar los equipos y qué tipo de soporte/apoyo requieren (González *et al*, 2023).

Este proceso de evaluación y retroalimentación de los obstáculos entre los responsables del programa y la comunidad permite, por ejemplo, que algunos problemas puedan solucionarse con capacitación adicional para los usuarios. Y, de no poder resolverlos por ellos mismos, que puedan requerir ajustes técnicos o mejoras en los equipos al equipo encargado.

En este sentido, al realizar el relevamiento se observan los datos expresados en la figura N.º 5 que señalan que cinco de los ocho en total pertenecían al departamento de La Viña (62,5%). Mientras que los tres restantes al departamento de Cafayate (37,5%). Entre las localidades de La Viña se visitaron usuarios de: Alemania, Las Curtiembres, Puente Morales y Don Barbosa. Por su parte, de Cafayate se relevaron usuarios de: Santa Bárbara y Taller El Obelisco.

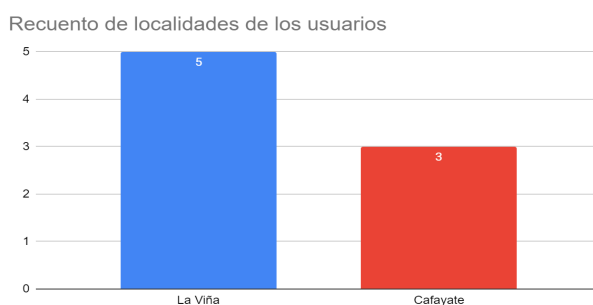


Figura 5: usuarios y localidades de incidencia. Fuente: elaboración propia.

Respecto al origen de los paneles, cinco de los ocho paneles solares divisados provienen de la firma mexicana SUNTECH (62,5%), mientras que los tres equipos restantes se dividían entre las marcas SOLSAVE (Suecia), Total Energy Solar (Australia) y Yingli Solar (Japón) (ver figura N.º6).

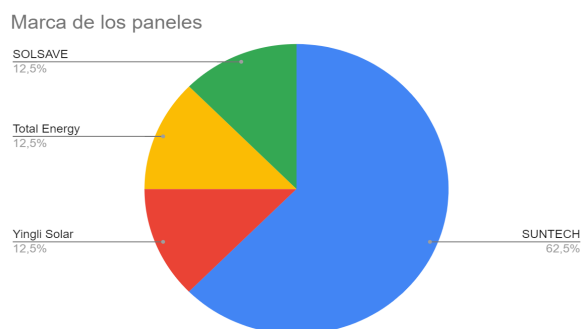


Figura 6: información sobre los paneles. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en cuanto a los años de instalación de los equipos a los usuarios relevados, estos van desde el año 2004 al 2020. El año 2012, con tres equipos instalados, es el período de mayor actividad. Según los residentes de la región, este aumento en la instalación de equipos coincidió con campañas políticas que impulsaron y agilizaron las gestiones e instalaciones de los equipos PERMER en la zona. En detalle,



los años de instalación expresados por los usuarios fueron: 2013, 2017, 2012, 2012, 2012, 2004, 2011 y 2020.

En cuanto a la visita de técnicos, los usuarios comentaron que se hicieron presentes al menos una vez en los últimos cinco años. Estos registros coinciden con los comentarios más allá del relevamiento, en donde indicaban que, cuando solicitaban asistencia, los técnicos demoraban un poco de tiempo, pero finalmente se acercaban a dar una solución. Todos coincidieron en que 15 días, como mínimo, era el plazo estimado en que los técnicos se hacían presentes para el mantenimiento.

En detalle, los años de las últimas visitas de técnicas expresadas para cada caso por los usuarios fueron: “no recuerda”, 2023, 2020, 2020, 2022, 2019, 2023 y 2023.

La mitad de los usuarios recibió al menos una visita de los responsables del PERMER en los últimos dos años (2022-2024). Cabe remarcar que los datos aquí utilizados pertenecen al año 2023, por lo que, en el periodo de relevamiento, las visitas de los técnicos a los usuarios resultaban recientes.

El caso de la escuela rural de Santa Bárbara es especialmente relevante debido a que las instituciones rurales que forman parte del programa reciben una potencia eléctrica significativamente mayor que las viviendas residenciales. Por lo tanto, se les otorga una prioridad superior en la reparación de inconvenientes y en la repotenciación del sistema, siendo esta última una necesidad crucial para las instituciones educativas (ver figura N.º 7).



*Figura 7: Escuela Monseñor Diego Gutiérrez Pedraza Ex N.º 397 - Paraje Santa Bárbara. Fuente: banco propio de imágenes*

Además, esta experiencia reveló una problemática importante: al dialogar con los responsables de la institución, se evidenció una comunicación deficiente entre los gestores del PERMER y la propia escuela. Esta falta de coordinación ha impedido que la institución pueda satisfacer incluso las necesidades básicas previstas por el programa, como el uso de TIC y el funcionamiento de equipos administrativos. Como resultado, las autoridades escolares han perdido la esperanza de encontrar una solución efectiva.

Por otro lado, al analizar las anotaciones de los técnicos que participaron en el equipo de relevamiento, los inconvenientes encontrados (ver figura N.º8), son:

### **1. Batería e inversor amontonados en una especie de conservadora de telgopor.**

- **Relevancia:** riesgos de sobrecalentamiento. Colocar la batería y el inversor en un espacio cerrado sin ventilación adecuada puede provocar sobrecalentamiento, reduciendo la vida útil de ambos componentes y aumentando el riesgo de incendios. Ciertos tipos de baterías generan vapores que pueden corroer partes del inversor; Impacto en el rendimiento. El calor excesivo puede afectar negativamente el rendimiento del sistema, llevando a fallos recurrentes y costosas reparaciones.

- *Condicionamiento por la ruralidad:* acceso limitado a infraestructura adecuada. Los usuarios pueden no tener acceso a instalaciones adecuadas para alojar los equipos. Esto hace que recurran a soluciones improvisadas que no cumplen con las especificaciones técnicas necesarias; Capacitación insuficiente. Pueden no estar suficientemente capacitados para entender la importancia de la ventilación y el espacio adecuado para estos componentes, lo cual subraya la necesidad de programas de formación y soporte técnico continuo.

## **2. No cuentan con descargador atmosférico (el pliego 3 dice que deben tener uno).**

- *Relevancia:* protección contra sobretensiones. Los descargadores atmosféricos protegen los sistemas fotovoltaicos contra sobretensiones causadas por rayos, evitando daños significativos a los equipos; Costo de reparaciones. La falta de protección puede llevar a daños costosos y períodos de inactividad del sistema, afectando la fiabilidad de la fuente de energía.
- *Condicionamiento por la ruralidad:* falta de recursos técnicos. Los usuarios pueden no contar con técnicos capacitados que instalen correctamente estos dispositivos, o pueden desconocer su importancia; Limitaciones económicas. El usuario que tenía el equipo con esta falla mencionó que no le habían puesto descargador atmosférico porque no tenían en stock al momento de la instalación.

## **3. No tienen puesta a tierra ni llave térmica.**

- *Relevancia:* seguridad eléctrica. La puesta a tierra es esencial, ya que proporciona un camino seguro para que la corriente de falla se disipe en la tierra. Por su parte, la llave térmica protege contra sobrecargas y cortocircuitos; Prevención de accidentes. Sin estos elementos, los usuarios están en mayor riesgo de accidentes eléctricos y daños al sistema, lo que puede resultar en lesiones graves o daños al equipo.
- *Condicionamiento por la ruralidad:* falta de conocimiento técnico. Los vecinos de la Quebrada de las Conchas pueden no estar informados sobre la importancia de la puesta a tierra y las llaves térmicas, ni saber cómo instalarlas.

## **4. Los paneles están sucios con capas gruesas de polvo.**

- *Relevancia:* reducción de eficiencia. La suciedad acumulada en los paneles solares bloquea la luz solar, disminuyendo la producción de energía. La eficiencia del sistema depende de la limpieza regular de los paneles; Maximización de la generación. Mantener los paneles limpios es crucial para asegurar la máxima generación de electricidad y más aún cuando es la única fuente de generación eléctrica disponible.
- *Condicionamiento por la ruralidad:* desconocimiento del mantenimiento. Los vecinos pueden no estar informados sobre la necesidad y la forma adecuada de limpiar los paneles solares; Recursos limitados. El agua puede complicar el mantenimiento regular de los paneles debido a que, para una limpieza óptima, se requiere su uso.

## **5. Los paneles están cerca de árboles y hojas que cubren parcialmente su exposición al sol.**

- *Relevancia:* reducción de exposición solar. La sombra de árboles y hojas reduce la cantidad de luz solar que llega a los paneles, disminuyendo su eficiencia y capacidad de generación de energía; Optimización de ubicación. Al ser una escuela primaria, resulta esencial ubicar los paneles en áreas despejadas y sin obstrucciones para asegurar la máxima exposición al sol, dado que la eficiencia energética es crucial para las actividades de esta institución.
- *Condicionamiento por la ruralidad:* en este caso particular, la directora a cargo de la institución mencionó que la falta de mantenimiento adecuado y la necesidad de repotenciación de los sistemas de energía no permiten la utilización del equipo de internet que posee la escuela. Esta situación tiene un impacto significativo en el trabajo pedagógico, ya que limita el acceso a herramientas y recursos educativos digitales que son fundamentales en el proceso de enseñanza y aprendizaje. La falta de una fuente de energía confiable y eficiente afecta directamente la capacidad de la escuela para integrar las Tecnologías de la Información y la Comunicación

(TICs). Las TICs son esenciales no solo para acceder a información y materiales educativos en línea, sino también para desarrollar competencias digitales en los niños que asisten a la escuela (Gallardo y Buleje, 2010).



*Figura 8: estado de los equipos relevados. Fuente: banco propio de imágenes*

## CONCLUSIONES

La implementación del PERMER en la Quebrada de las Conchas resultó en una mejora significativa en el acceso a la energía (Govetto y Vilte, 2024). Esta iniciativa facilitó la inclusión de fuentes de energía renovable, principalmente la solar, en zonas alejadas y de difícil acceso, transformando la vida de los habitantes y promoviendo un desarrollo sostenible debido a que reduce la dependencia de fuentes energéticas contaminantes y no renovables.

Además de la posibilidad de acceder a la energía, el PERMER representa una alternativa viable y económica. La prestación del servicio eléctrico bajo este programa se caracteriza por la implementación de una tarifa mínima, determinada por la provincia, destinada a cubrir los costos operativos y de mantenimiento. Esta estructura tarifaria garantiza la sostenibilidad a largo plazo del servicio, permitiendo que las comunidades rurales dispersas accedan a la electricidad en condiciones comparables a las de las zonas urbanas. En comparación, el gasto en alternativas tradicionales como pilas, velas, o nafta para generadores eléctricos suele ser significativamente más elevado y menos eficiente, lo que hace que el PERMER no solo sea más económico, sino también más seguro y ambientalmente sostenible.

En esta línea, la instalación de los paneles solares tuvo un impacto positivo en la calidad de vida de los residentes. La energía solar no solo proporciona una fuente confiable de electricidad para usos domésticos y comunitarios, sino que también reduce la dependencia de combustibles fósiles y otros recursos no renovables, lo que contribuye a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto, a su vez, ayuda a la preservación del medio ambiente y a la mitigación del cambio climático (Govetto y Vilte, 2024). Además, el acceso a una fuente de energía estable ha permitido a los habitantes locales desarrollar actividades económicas, como talleres artesanales (trabajos en cerámica y arcilla), que requieren electricidad para operar, potenciando así la economía local.

Sin embargo, el trabajo de campo reveló varios desafíos técnicos que afectan la eficiencia y sostenibilidad del programa. Los principales problemas identificados incluyen la falta de mantenimiento adecuado de los equipos, los relacionados con la instalación y ubicación de los paneles, y la necesidad de actualizaciones en los sistemas existentes. Las visitas del personal técnico no son lo suficientemente frecuentes, y los equipos a menudo están algo sucios o no muy bien ubicados, lo que reduce significativamente la energía entregada. Además, la falta de componentes esenciales como descargadores atmosféricos y llaves térmicas pone en riesgo la seguridad y durabilidad de los sistemas.

Otro aspecto crucial identificado es la necesidad de mejorar la capacitación y el nivel de agenciamiento de los usuarios. La capacitación insuficiente en el uso y mantenimiento de los equipos limita la capacidad de los usuarios para resolver problemas por sí mismos y maximizar la utilidad de los sistemas de energía renovable. Programas o cursos de formación más intensivos y continuos podrían permitirles a los usuarios tener conocimientos básicos, haciéndolos más autónomos y reduciendo la dependencia de soporte técnico externo.

Para garantizar la sostenibilidad del PERMER en la Quebrada de las Conchas se considera clave:

- Incrementar la frecuencia y calidad del mantenimiento: esto se podría lograr pactando fechas de visitas para un mantenimiento más riguroso. Esto aseguraría que los técnicos realicen visitas más frecuentes y exhaustivas para inspeccionar y mantener los equipos.
- Capacitar (desde la empresa encargada) de manera continua a los usuarios: implementar programas de capacitación regulares para los usuarios, enfocándose en el uso adecuado y el mantenimiento básico de los equipos solares.
- Optimizar (desde la empresa encargada) la ubicación de los paneles existentes: reubicar los paneles solares en áreas despejadas y sin obstrucciones para maximizar la exposición solar y la eficiencia energética.
- Mejorar la infraestructura técnica: asegurar que todos los sistemas cuenten con los componentes esenciales como descargadores atmosféricos y llaves térmicas para mejorar la seguridad y durabilidad de los equipos.
- Fomentar la participación de la comunidad: involucrar a los vecinos en el proceso de evaluación y mejora del programa para garantizar que las soluciones implementadas respondan a sus necesidades y circunstancias específicas.

Sin embargo, lo mencionado anteriormente debe estar respaldado por un compromiso sólido de las empresas encargadas de la provisión y mantenimiento de estos sistemas. Según los testimonios de los usuarios, la falta de stock de equipos y repuestos, atribuida a la baja inversión de las empresas, fue señalado por los técnicos como un factor que compromete la calidad y continuidad del servicio. Esta situación evidencia una deficiencia estructural que afecta la capacidad de respuesta ante fallas y, en consecuencia, la sostenibilidad a largo plazo del programa.

### ***Perspectivas***

El desarrollo del PERMER en la Quebrada de las Conchas puede servir como modelo para otras regiones rurales y remotas. La experiencia acumulada y las lecciones aprendidas pueden ser aplicadas para mejorar la implementación de programas similares en otras áreas, promoviendo el uso de energías renovables y contribuyendo al desarrollo sostenible a nivel nacional. La transición hacia fuentes renovables no solo es una necesidad ambiental, sino también una oportunidad para mejorar las condiciones de vida y fomentar el desarrollo socioeconómico en las comunidades más vulnerables.

El programa demostró ser una herramienta valiosa para la inclusión energética y el desarrollo sostenible en la zona. Con las mejoras y ajustes necesarios, este programa tiene el potencial de seguir transformando vidas y comunidades, allanando el camino hacia un futuro más sostenible y equitativo. A medida que el programa se expanda a otras regiones, será crucial mantener un enfoque adaptable que considere las características específicas de cada comunidad. De esta manera, se podrá maximizar el impacto positivo del PERMER, logrando un equilibrio entre las necesidades locales y los objetivos nacionales de sostenibilidad.

En este sentido, cabe preguntarse: ¿hasta qué punto la baja frecuencia de las visitas técnicas y la falta de repuestos reflejan un problema estructural más amplio en la inversión empresarial y estatal? Si bien el programa ofrece una alternativa a fuentes energéticas tradicionales, el costo de las ineficiencias y de los fallos técnicos podría terminar trasladándose a los usuarios, afectando la sostenibilidad económica y ambiental del PERMER.

Además, es relevante debatir sobre la responsabilidad de las empresas encargadas de la instalación y mantenimiento. La solución podría ser una inversión más sólida en infraestructura y un enfoque integral que considere la participación activa de las comunidades en la gestión de sus recursos energéticos. Este debate abre la puerta a reflexionar sobre cómo equilibrar las responsabilidades entre los actores privados, el Estado y las propias comunidades, para asegurar que los beneficios del PERMER sean duraderos y equitativos. Además, revisar la necesidad de integrar holísticamente saberes sociales de los usuarios, generar apropiaciones y un diálogo fluido con los técnicos.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

- Proyecto de Investigación Científica y Tecnológica (PICT-2020-SERIEA-01759) “Política Pública y Desarrollo Científico-Tecnológico en Energías Renovables: Estrategias de Transición Sustentable en la Producción de Hábitat En Salta (2021-2023)” financiado por la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación a través del Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica.
- Proyecto de Investigación N°A2916 “Transición Energética en los Valles Calchaquíes y la Puna Salteña: análisis de políticas públicas de energía solar vinculadas con la producción del hábitat en Salta, Argentina”.

## AGRADECIMIENTOS

Al equipo técnico, fundamentalmente al Sr. Ricardo Caso; al personal del Ente Regulador de Salta por su colaboración; al Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional por las facilidades en la gestión del transporte y viáticos; y al equipo del Grupo de Estudios Socio-técnicos de la Energía y el Hábitat por el trabajo colectivo.

## REFERENCIAS

- Boletín Oficial de la Provincia de Salta. (2023). Boletín Oficial de la Provincia de Salta. Recuperado de <https://boletinoficialsalta.gob.ar/instrumento.php?cXdlnR5dGFibGE9THw3ODI0cXdlnR5> el 22 de julio de 2024.
- Gallardo, L. M. G., y Buleje, J. C. M. (2010). Importancia de las TIC en la en la educación básica regular. Investigación educativa.
- Garrido, S. (2020). Del cambio de matriz energética a la transformación del sistema sociotécnico. Repensando transición energética en la argentina. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/366837013> el 25 de julio de 2024.
- González, F. (2019). Estrategias de hábitat en Salta: el caso del Programa de Mejoramiento Barrial (ProMeBa) 2015-2016. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Quilmes, Bernal, Argentina. Recuperado de <http://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/20417/2041> el 25 de julio de 2024.
- González, F., Duran, P., Govetto, S. y Vilte, G. (2023). La transición energética en Argentina. Imaginarios a partir de una experiencia formativa con actores del campo del hábitat durante 2022. XLV Reunión de Trabajo de la ASADES.
- González, F., Pedraza, M., Cornú, C., y Mendieta, B. (2023). Nociones de transición energética en Salta: una aproximación a cómo (re) construyen sentidos los medios de comunicación locales (2023). Revista AVERMA. Pág. 515-526. Recuperado de <https://drive.google.com/file/d/1PAm50X8k7IQP0xf26GV6pgaXE7p9719g/view> el 28 de julio de 2024.
- Govetto, S. y Vilte G. (2024). Sentidos en torno a Políticas Públicas de acceso a la energía: el caso del PERMER en Salta (2023). [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Salta. Pág. 268-279. Recuperado de <https://asades.org.ar/wp-content/uploads/2024/05/ACTAS-2023-FINAL-V2.pdf> el 24 de julio de 2024.
- Legislación. (n.d.). Argentina.gob.ar. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/energia-electrica/renovables/legislacion#1> el 24 de julio de 2024.

República Argentina. (2015). PERMER II - MANUAL DE OPERACIONES. URL: [https://permer.se.gob.ar/contenidos/archivos/permer/nuevo/MO\\_PERMER\\_final.pdf](https://permer.se.gob.ar/contenidos/archivos/permer/nuevo/MO_PERMER_final.pdf) el 28 de julio de 2024.

Secretaría de Energía - ex Ministerio de Energía y Minería -. (2017). Pliego PERMER - Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales - Préstamo Banco Mundial N° 8484-AR.

Secretaría de Energía - ex Ministerio de Energía y Minería -. (2017). ¿Qué es el PERMER? Recuperado de <https://permer.se.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3703> el 28 de julio de 2024.

## **A SOCIOTECHNICAL LOOK AT THE PROGRAMA DE ENERGÍAS RENOVABLES EN MERCADOS RURALES IN QUEBRADA DE LAS CONCHAS (SALTA, ARGENTINA, 2023)**

**ABSTRACT:** This article examines the implementation of the Programa de Energías Renovables en Mercados Rurales (from now on we will call it PERMER) in Quebrada de las Conchas, Salta, Argentina, from a sociotechnical perspective in 2023. The region in question, characterized by high solar radiation and scarce electrical infrastructure, is conducive to the installation of solar panels. A qualitative approach was used for the study, collecting data through interviews and field observations. Technical and maintenance problems in the PERMER equipment were identified, as well as the need for further training for users. The findings highlight that, although the program has improved access to energy in this rural community, challenges persist that require attention to optimize the operation and sustainability of the service. The conclusions suggest the importance of strengthening technical support and ongoing training for beneficiaries, so that they achieve agency with the equipment and an effective integration of renewable technologies in these remote areas.

**Keywords:** solar energy, photovoltaic, energy transition, PERMER.