

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA ABSORTANCIA SOLAR DE TECHOS METÁLICOS ONDULADOS EN CONDICIONES REALES: METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Gerardo Vitale¹, Andrés Monetta¹, Italo Bove²

¹Laboratorio de Energía Solar, Depto. de Física del CeNUR Litoral Norte, Universidad de la República, Salto, Uruguay

²Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay
email: gvitalepdf@gmail.com

RESUMEN: La absorptancia solar de techos metálicos ondulados suele tomarse de ensayos de laboratorio o tablas, lo que no siempre representa superficies reales bajo cielo variable. Presentamos una metodología en campo para estimar la absorptancia efectiva de una chapa galvanizada ondulada usada típicamente en techos de vivienda social uruguaya. Se instrumentó un arreglo de siete radiómetros de silicio LI-200 orientados hacia abajo para medir la radiación reflejada y un sensor adicional hacia arriba para la irradiancia global incidente (GHI). Para mitigar picos por reflejos especulares y la heterogeneidad espacial debida a la geometría corrugada, se aplicaron filtros numéricos basados en condiciones físicas ($GHI > 100 \text{ W/m}^2$), geométricas (ángulo cenital $< 75^\circ$), en la consistencia espacial entre sensores (dispersión de reflejada $\sigma_{\text{ref}} < 20 \text{ W/m}^2$), y estadística robusta (mediana y promedio recortado entre sensores). Del total de la campaña, 13 379 registros minutales (18,2 %) pasaron todos los filtros. Clasificando por condición de cielo mediante el índice de claridad se obtuvo una absorptancia promedio $\alpha = 0,687 \pm 0,039$ (1σ) para el conjunto total; por cielo: despejado $0,679 \pm 0,041$, parcialmente cubierto $0,688 \pm 0,037$, y cubierto $0,700 \pm 0,031$. Las diferencias entre mediana y promedio recortado fueron $< 0,002$. Los resultados se encuentran dentro de rangos reportados y proveen un valor reproducible en condiciones reales, útil para simulaciones energéticas y evaluación de estrategias pasivas en vivienda social.

Palabras clave: Techo metálico ondulado, absorptancia solar, medición en campo, estadística robusta, vivienda social.

INTRODUCCIÓN

En regiones de clima cálido o templado-húmedo como el litoral norte de Uruguay, los techos metálicos representan una de las principales fuentes de ganancia térmica en edificaciones de interés social. Este fenómeno se debe a su elevada absorptancia solar y baja inercia térmica, que favorecen un rápido calentamiento durante las horas de mayor radiación solar. En contextos de vulnerabilidad energética, donde el acondicionamiento térmico activo no siempre está disponible, esta ganancia puede impactar significativamente en el confort térmico y la salud de los ocupantes.

La absorptancia solar de las superficies es un parámetro clave para estimar las ganancias de calor por radiación directa y difusa. Si bien existen valores tabulados para materiales genéricos y mediciones en laboratorio bajo condiciones controladas, estas no siempre reflejan adecuadamente el comportamiento real de la superficie, expuestas a condiciones meteorológicas variables o con geometrías complejas como las ondulaciones típicas de los techos metálicos galvanizados.

Diversos estudios han abordado la caracterización óptica de materiales de cubierta mediante mediciones espectrales o de reflectancia hemisférica. Levinson et al. (2010); Sleiman et al. (2011), destacan la influencia del envejecimiento, la suciedad y la humedad sobre la absorptancia y reflectancia solar de



techos pintados y no pintados, reportando variaciones significativas respecto a condiciones de laboratorio. Otros trabajos, como los de Paolini et al. (2014); Piselli et al. (2018), han utilizado métodos en campo para evaluar techos en condiciones reales, relacionando sus propiedades ópticas con el desempeño térmico del edificio, aunque centrados en coberturas de tipo techo frío o superficies planas.

Los estudios que abordan la absorptancia solar de techos metálicos en condiciones reales aún son escasos en América Latina. A nivel internacional, Yoochareon et al. (2024) propusieron un enfoque experimental sobre techos metálicos corrugados en Tailandia, aunque sin incorporar un tratamiento estadístico robusto para reflejos especulares ni una caracterización detallada bajo distintas condiciones de cielo. En Estados Unidos, Parker et al. (2002), han instrumentado techos metálicos en contextos reales, centrando el análisis en el desempeño térmico general más que en la determinación precisa de la absorptancia. Por su parte, algunos reglamentos técnicos constructivos en Brasil RGSA incluyen valores tabulados de propiedades ópticas sin sustento experimental detallado.

Se han reportado valores de absorptancia solar para cubiertas metálicas en condiciones reales. Piselli et al. (2018) reportaron valores entre 0,61 y 0,75 para techos metálicos pintados expuestos al clima mediterráneo. Yoochareon et al. (2024), en su estudio sobre cubiertas metálicas corrugadas en Tailandia, observaron valores promedio cercanos a 0,65 para superficies nuevas, con incrementos de hasta un 10 % tras pocos meses de exposición. Paolini et al. (2014); Colon et al. (2021) han trabajado sobre la caracterización energética de viviendas con techos metálicos, asumiendo valores tabulados entre 0,6 y 0,8 según el tipo de acabado y exposición. Sin embargo, estos valores no surgen de mediciones directas, y en general no consideran reflexiones especulares ni dispersión angular del flujo reflejado.

La falta de datos experimentales en condiciones reales, considerando factores como la acumulación de polvo, humedad o envejecimiento, limita la capacidad de modelar con precisión el comportamiento térmico de techos metálicos en viviendas reales. Por otro lado, el uso de superficies con geometrías irregulares, como las chapas onduladas, introduce desafíos adicionales en la medición debido a las reflexiones especulares y la heterogeneidad espacial del flujo reflejado.

Este trabajo tiene por objetivo desarrollar y validar una metodología experimental robusta para determinar la absorptancia solar efectiva de techos metálicos ondulados en condiciones reales de operación. Dicha metodología fue ensayada con una chapa galvanizada, instalada algo más de un año antes del periodo de medición. Este aspecto es relevante, ya que la absorptancia solar de superficies metálicas puede variar sensiblemente con el tiempo de exposición debido a procesos como oxidación, acumulación de polvo o humedad (Levinson et al., 2010; Paolini et al., 2014; Piselli et al., 2018). Evaluar una superficie con bajo grado de envejecimiento permite obtener un valor representativo del comportamiento inicial del material en condiciones reales. Se propone un sistema de medición basado en múltiples sensores de radiación instalados sobre una superficie de chapa galvanizada típica, evaluando la fracción de radiación reflejada en campo abierto durante un periodo mayor a 50 días. Se incluyen criterios de filtrado para distintas condiciones de cielo y análisis estadísticos orientados a reducir el sesgo por reflexiones especulares. Los resultados obtenidos permitirán mejorar la representación de estos materiales en simulaciones energéticas y evaluar estrategias de mitigación pasiva en viviendas sociales.

EQUIPOS Y MÉTODO EXPERIMENTAL

Sitio experimental

El experimento se llevó a cabo en el predio del Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de la República, ubicado en $-31,283^\circ$, $-57,918^\circ$, en la región litoral norte de Uruguay. Esta zona presenta un clima subtropical húmedo. Las mediciones se realizaron durante el invierno (junio y julio), con días despejados, parcialmente nublados y cubiertos, lo que permitió aplicar filtros de clasificación por condiciones de cielo.

Instrumentación y diseño experimental

Para la adquisición de datos se emplearon radiómetros LICOR LI-200 (LI-COR Biosciences, 2017), utilizados para la medición de la irradiancia global en plano horizontal (GHI). Este sensor es

ampliamente utilizado en estudios de radiación solar, tienen respuesta espectral entre 400–1100 nm, pero están calibrados frente a piranómetros térmicos de referencia internacional para estimar GHI. Se eligieron por su tamaño reducido y robustez, que permiten el montaje cercano y en orientación hacia abajo, lo cual sería impracticable con piranómetros térmicos que además presentan errores convectivos significativos fuera de la horizontalidad. Estas características hacen a los LI-200 especialmente adecuados para estimar radiación reflejada sobre superficies corrugadas. La precisión típica es de $\pm 5\%$. Para el registro de datos se utiliza un DataTaker DT80, responsable del registro automático de las señales provenientes de los radiómetros, la medida se realiza cada 20 segundos y se registra el promedio minutal. Este equipo permite registrar múltiples canales en paralelo, asegurando la simultaneidad de las mediciones.

Con el objetivo de garantizar que las mediciones reflejaran de forma representativa la radiación reflejada por una superficie metálica ondulada, típica de chapas usadas en techos de viviendas sociales o familiares en Uruguay, se utilizan varios radiómetros como se muestra en la Figura 1.



Figura 1: Arreglo experimental: siete LI-200 orientados hacia abajo, separados 3 cm y montados a 30 cm sobre la chapa; la línea de sensores cruza de cresta a cresta. Dos chapas de 1 m en continuidad aseguran que el campo de visión esté dominado por la propia superficie.

Se utilizó un conjunto de siete radiómetros LICOR orientados hacia abajo y dispuestos en línea sobre la superficie de chapa galvanizada, perpendicular a la dirección de las ondulaciones. Este diseño buscó reducir el sesgo causado por reflexiones especulares localizadas, generadas más que nada por las paredes de las ondulaciones, de esta forma se obtiene la radiación de diferentes posiciones relativas a las crestas y valles del perfil metálico. Las ondulaciones se disponen en dirección Norte - Sur y la línea de radiómetros se centra en la chapa en dirección Este - Oeste. Además se utiliza un sensor adicional, ubicado en la misma estructura pero orientado hacia arriba, este registró la irradiancia global incidente (GHI) sobre un plano horizontal, utilizado como base para el cálculo de la absortancia. Los datos se registraron de manera continua durante 50 días entre junio y julio de 2025, abarcando diferentes condiciones de cielo.

Geometría del arreglo y cobertura espacial

El arreglo de sensores reflejados se montó a una altura de $h = 0,30$ m respecto al plano de la chapa y centrado en su ancho. Se utilizaron dos chapas galvanizadas con algo más de un año a la intemperie de 1 m de ancho colocadas en continuidad, de modo que el área vista por los sensores quedó dominada por la propia superficie metálica. Los siete radiómetros LI-200 orientados hacia abajo se dispusieron en línea perpendicular a las ondulaciones, con separación centro-centro de 3 cm (de difusor a difusor), cubriendo transversalmente de principio de una cresta a principio de la cresta consecutiva (como se indica en la Figura 1) en la canaleta central de la unión de las chapas. Esta configuración asegura un muestreo espacial representativo de crestas, paredes y valles de la chapa, y reduce el sesgo por reflexiones especulares localizadas. La distancia al plano (h) y la posición centrada minimizan la

contribución de bordes; cualquier remanente del entorno es simétrico y se atenúa adicionalmente al aplicar la estadística robusta (mediana / promedio recortado) en el conjunto de sensores. En la sección Apéndice se detallan los cálculos que justifican esta hipótesis.

Procesamiento de datos

El cálculo de la absorptancia solar instantánea, α , se realizó según la siguiente expresión, basada en el balance de radiación global propuesto por Duffie y Beckman (2006):

$$\alpha = 1 - \frac{G_{ref}}{G_{inc}} \quad (1)$$

donde G_{inc} es la irradiancia global incidente en la superficie de la chapa, medida por el sensor orientado hacia el cielo, y G_{ref} es la irradiancia global reflejada por la superficie de la chapa estimada a partir del arreglo de sensores.

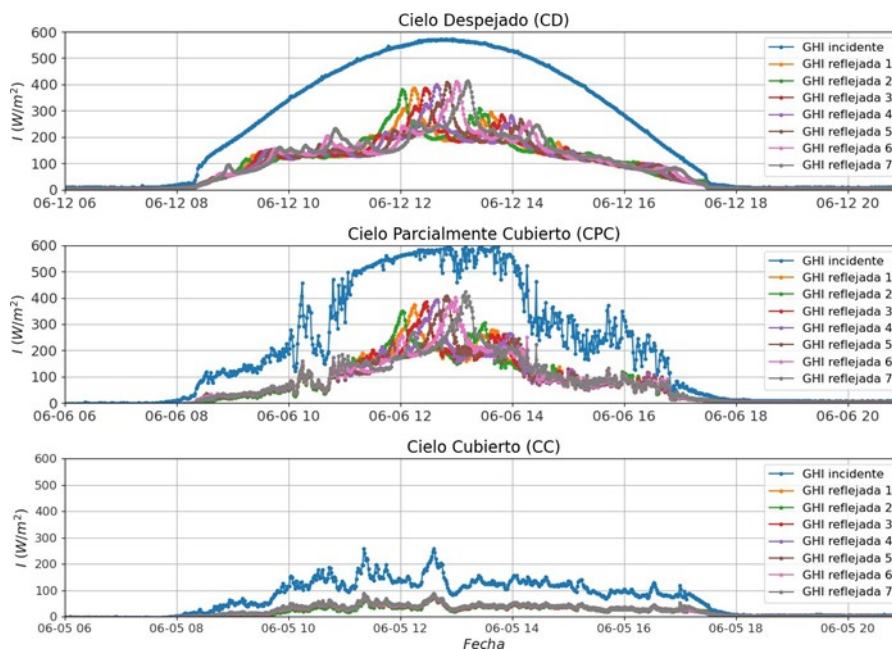


Figura 2: Irradiancia solar incidente y reflejada para tres días de la serie con diferentes condiciones de cielo, de arriba hacia abajo: Cielo Despejado (CD), Cielo Parcialmente Cubierto (CPC) y Cielo Cubierto (CC)

La Figura 2 muestra la evolución temporal de la irradiancia solar incidente en plano horizontal y las 7 irradiancias solares reflejadas para tres condiciones de cielo diferentes. Como se puede observar existe bastante dispersión en la irradiancia reflejada debido a las reflexiones de las irregularidades superficiales de la chapa. Este fenómeno se manifiesta con más intensidad los días de cielo despejado o parcialmente despejado cuando la irradiancia directa es significativa. Para obtener un valor representativo de G_{ref} , se aplicaron métodos estadísticos robustos que reducen la influencia de picos especulares en el espacio de la irradiancia reflejada: mediana y promedio recortado.

Para trabajar con datos de calidad en el espacio de las irradiancias se suelen aplicar filtros, para este trabajo se aplican los siguientes:

- Filtro 1: Irradiancia incidente $> 100 \text{ W/m}^2$, para evitar sesgos por condiciones de baja radiación, pero captar datos en días de cielo cubierto.
- Filtro 2: Ángulo cenital solar $\theta_z < 75^\circ$ (es decir, altura solar mayor a $> 15^\circ$ respecto al horizonte), para evitar datos con Sol muy bajo.

- Filtro 3: Descarte de registros con alta dispersión espacial (desviación estándar de la radiación reflejada entre sensores $\sigma_{ref} > 20 \text{ W/m}^2$), indicadora de reflexiones especulares extremas o perturbaciones en la superficie.

Sea $R_j(t)$ la irradiancia reflejada medida por el sensor j en el minuto t ($j = 1, \dots, 7$). Ordenamos $R_{(1)}(t) \leq R_{(2)}(t) \leq \dots \leq R_{(7)}(t)$ y definimos el conjunto recortado $S_t = \{R_{(2)}(t), \dots, R_{(6)}(t)\}$, excluyendo el mínimo y el máximo. La media recortada es:

$$R_{trim}(t) = \frac{1}{5} \sum_{i=2}^6 R_{(i)}(t), \quad (2)$$

y la dispersión espacial utilizada en el filtro es la desviación estándar del conjunto recortado:

$$\sigma_{ref}(t) = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{i=2}^6 (R_{(i)}(t) - \bar{R}_{trim}(t))^2}. \quad (3)$$

Se descartan los minutos con $\sigma_{ref}(t) > 20 \text{ W/m}^2$, por asociarse a reflejos especulares intensos o perturbaciones locales de la superficie.

En la Tabla 1 se muestran los datos descartados por cada filtro, donde el caso cero son los 73 485 datos minutales tomados en toda la campaña. Se puede observar que el 18,2 % de los datos pasan todos los filtros, y sobre ellos se trabaja a continuación.

Tabla 1: Resumen de registros filtrados. Se indica la cantidad de datos que cumplen cada condición individual y el subconjunto que cumple todas simultáneamente

Filtro	Condición	Registros	Porcentaje (%)
Filtro 1	$G_{inc} > 100 \text{ W/m}^2$	22 113	30,1 %
Filtro 2	$\theta_z < 75^\circ$	22 275	30,3 %
Filtro 3	$\sigma_{ref} < 20 \text{ W/m}^2$	44 943	61,2 %
Combinación	Cumplen los tres filtros	13 379	18,2 %

Los datos considerados buenos son clasificados por condiciones de cielo mediante el índice de claridad, $k_t = \frac{G_{HI}}{G_{oh}}$, donde G_{oh} es la irradiancia horizontal a tope de atmósfera.

- Cielo Despejado (CD): $k_t > 0,55$
- Cielo Parcialmente Cubierto (CPC): $k_t \geq 0,30$ y $k_t \leq 0,55$
- Cielo Cubierto (CC): $k_t < 0,30$

Tabla 2: Distribución de registros por condición de cielo para el conjunto filtrado y porcentajes de datos con el mismo conjunto de filtros aplicado al año meteorológico típico de Salto

Cielo	Registros	Porcentaje (%)	AMTUsa (%)
Despejado (CD)	7 139	53,4 %	55,6 %
Parcialmente cubierto (CPC)	2 493	18,6 %	23,5 %
Cubierto (CC)	3 747	28,0 %	20,9 %
Todo tipo cielo (TC)	13 379	100,0 %	100,0 %

En la Tabla 2 se muestran las cantidades y porcentajes de datos válidos que caen en cada tipo de cielo y en la última columna se muestran los datos del año meteorológico típico de Salto AMTUsa (Alonso-

Suárez et al., 2024). Se puede observar que las condiciones de cielo del ensayo son bastante representativas del AMTUsa.

Para reducir el efecto de reflexiones especulares puntuales y obtener una estimación representativa de la radiación reflejada en cada minuto t , aplicamos un promedio recortado (trimmed mean) en la dimensión espacial (entre sensores). Sea $G_{ref,j}(t)$ la lectura del sensor j ($j = 1, \dots, n$) y sea $G_{ref,(1)}(t) \leq \dots \leq G_{ref,(n)}(t)$ el conjunto ordenado. Definimos como en la Ec. (2), pero de forma genérica:

$$\bar{G}_{ref}^{(p)}(t) = \frac{1}{n - 2k} \sum_{i=k+1}^{n-k} G_{ref,(i)}(t) \quad (4)$$

donde n es el número de sensores (en nuestro caso, $n = 7$), $p \in [0, 0.5)$ es la fracción a recortar, $k = [pn]$ es la cantidad de valores descartados en cada extremo, e i recorre los índices del conjunto ordenado que se promedian tras descartar los k mínimos y k máximos.

En el caso de estudio utilizamos $k = 1$ (esto es, $p \approx 1/7 \approx 0,14$), por lo que la expresión se reduce a

$$\bar{G}_{ref}^{trim}(t) = \frac{1}{5} \sum_{i=2}^6 G_{ref,(i)}(t) \quad (n = 7, k = 1) \quad (5)$$

Se estimó G_{ref} como la mediana entre los siete sensores orientados hacia abajo:

$$\tilde{G}_{ref} = \begin{cases} G_{ref,(\frac{n+1}{2})} \\ \frac{G_{ref,(\frac{n}{2})} + G_{ref,(\frac{n}{2}+1)}}{2} \end{cases} \quad (6)$$

Posteriormente se realizan comparaciones a nivel de absortancias entre ambos métodos estadísticos y para todas las condiciones de cielo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 3 se presenta la distribución de la absortancia solar α calculada a partir de los datos filtrados, considerando todo tipo de cielo. Se muestran los resultados obtenidos mediante el promedio recortado y la mediana en ventanas espaciales, con un binado de 40 clases y un rango de α entre 0.50 y 0.80. Ambos métodos presentan distribuciones similares, con ligeras diferencias en la concentración de valores centrales.

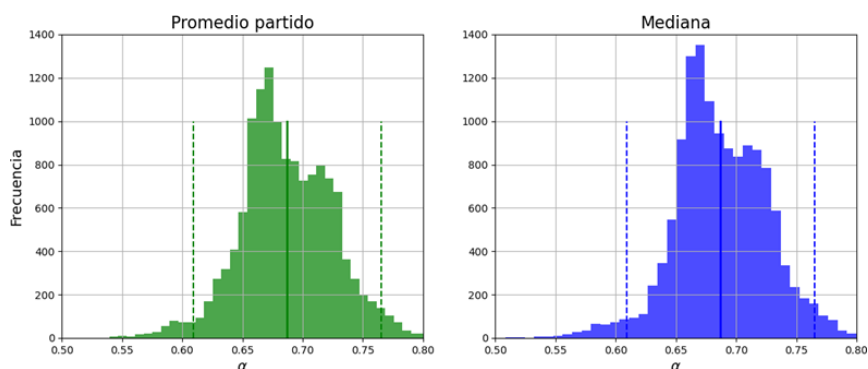


Figura 3: Distribución de la absortancia solar para todo tipo de cielo (TC), calculada con (izquierda) promedio recortado y (derecha) mediana

Distribución por condiciones de cielo

En la Figura 4 se muestran las distribuciones de α segmentadas según las condiciones de cielo (despejado, cubierto y parcialmente cubierto) y según el método estadístico aplicado. En todos los casos se mantienen los rangos generales observados para el conjunto total de datos, aunque las distribuciones presentan variaciones en su asimetría y dispersión dependiendo del tipo de cielo. En particular, los cielos despejados concentran valores ligeramente menores de α en comparación con los cielos cubiertos.

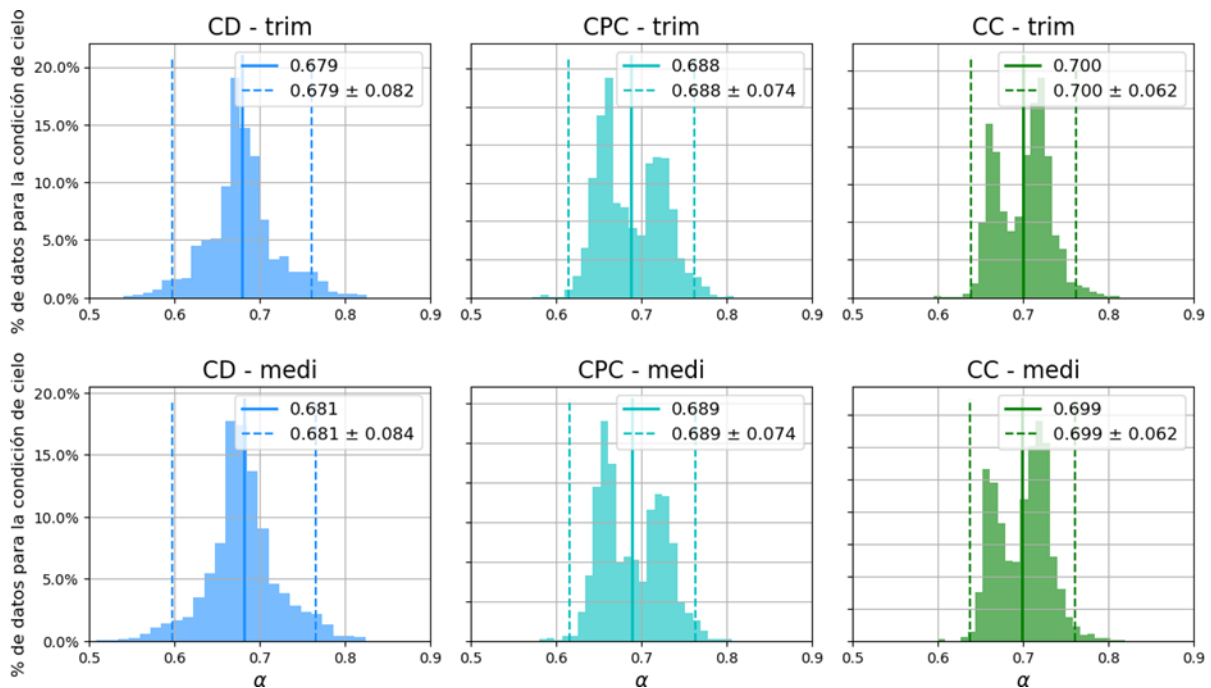


Figura 4: Distribución de la absorptancia solar segmentada por condiciones de cielo. Arriba: promedio recortado (trim), abajo: mediana (medi)

Comparativa de métodos

La Figura 5 presenta una serie temporal de irradiancia solar e incidente para varios días que abarcan cada condición de cielo, allí se muestran las estimaciones de irradiancia reflejadas obtenidas mediante el promedio recortado y la mediana.

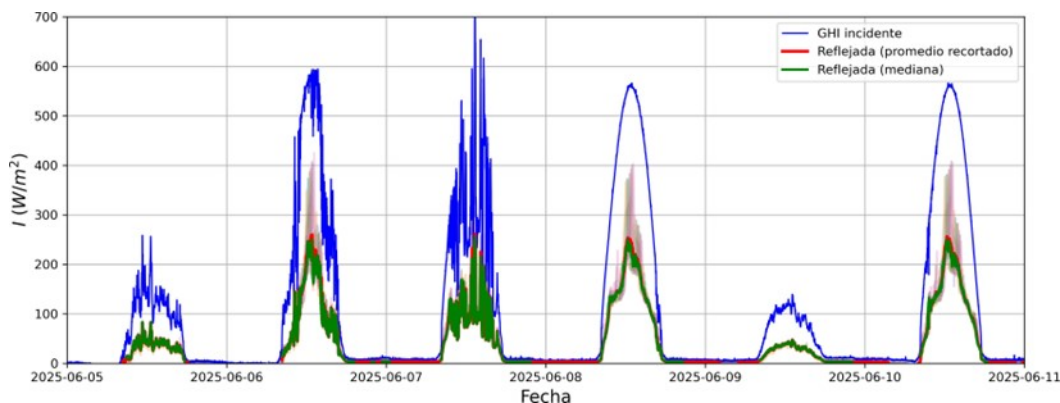


Figura 5: Comparación de los valores de irradiancia incidente y reflejados obtenidos con promedio recortado y mediana para una serie temporal que abarca días en cada condición de cielo

En la Tabla 3 se resumen los valores de μ y σ (promedio y desviación estándar respectivamente) de cada combinación de método y condición de cielo. Las diferencias entre ambos métodos son reducidas, aunque la mediana tiende a ser ligeramente más robusta frente a valores atípicos, mostrando desviaciones estándar marginalmente menores.

Tabla 3: Valores promedio (μ) y desviación estándar (σ) de la absorción (α) para cada condición de cielo, calculados mediante promedio recortado (α_{trim}) y mediana (α_{medi})

Condición de cielo	μ_{trim}	σ_{trim}	μ_{medi}	σ_{medi}
CD	0,679	0,041	0,681	0,042
CPC	0,688	0,037	0,689	0,037
CC	0,700	0,031	0,699	0,031
TC	0,687	0,039	0,687	0,039

Estimación de la incertidumbre

La absorción instantánea se calcula como en la Ec. (1). Su incertidumbre, asumiendo no correlación entre canales, se obtiene por propagación:

$$u^2(\alpha) = \left(\frac{\partial\alpha}{\partial G_{ref}}\right)^2 u^2(G_{ref}) + \left(\frac{\partial\alpha}{\partial G_{inc}}\right)^2 u^2(G_{inc}) = \left(\frac{1}{G_{ref}}\right)^2 u^2(G_{ref}) + \left(\frac{G_{ref}}{G_{inc}^2}\right)^2 u^2(G_{inc}) \quad (7)$$

La Ec. (7) propaga las incertidumbres estándar de entrada. Para cada magnitud usamos

$$u^2(G) = u_A^2(G) + u_B^2(G) \quad (8)$$

donde u_A es la componente estadística (repetibilidad) y u_B agrupa efectos instrumentales/sistemáticos (calibración, respuesta espectral, coseno, alineación, linealidad).

A continuación, se analizarán las incertidumbres de la radiación reflejada y de la incidente.

Reflejada (7 sensores, estimador robusto). Sea $\{g_j\}_{j=1}^7$ el conjunto de lecturas en el mismo minuto. Definimos la dispersión espacial $s_{esp} = \text{std}(\{g_j\})$ tras el filtrado. Para la mediana:

$$u_A(G_{ref}) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{s_{esp}}{\sqrt{7}} \quad (9)$$

Para el promedio recortado con k valores por extremo (aquí $k = 1 \Rightarrow n_{ef} = 7 - 2k = 5$), usando la varianza winsorizada s_W :

$$u_A(G_{ref}) \approx \frac{s_W}{\sqrt{n_{ef}}} \quad (10)$$

La componente u_B puede tomarse, en primera aproximación, como la incertidumbre relativa de calibración del LI-200 ($\approx 5\%$) aplicada a G_{ref} . *Nota:* al usar el mismo tipo de sensor para G_{inc} y G_{ref} , parte del sesgo espectral/coseno se correlaciona y tiende a cancelarse en el cociente; aquí lo ignoramos para ser conservadores.

Incidente (1 sensor, promedio minatural). Si el datalogger promedia $m = 3$ muestras,

$$u_A(G_{inc}) \approx \frac{s_t}{\sqrt{m}} \quad (11)$$

con s_t la desviación de las muestras en ese minuto (este término suele ser pequeño frente a la calibración). Para u_B , usamos la incertidumbre relativa de calibración ($\approx 5\%$).

Sustituyendo $u(G_{ref})$ y $u(G_{inc})$ así definidos en la Ec. (7), se obtiene la incertidumbre combinada $u(\alpha)$ de cada instante. Con valores típicos de mediodía ($G_{inc} \approx 600 \text{ W/m}^2$, $G_{ref} \approx 186 \text{ W/m}^2$) y 5% de calibración, el orden de magnitud resulta $u(\alpha) \sim 0,02 - 0,03$, dominado por la incertidumbre de G_{inc} . Dado que la desviación estándar σ del histograma es mayor a la incertidumbre combinada, se optó por presentar los resultados (Tabla 3) con el valor de σ .

La respuesta espectral del LI-200 (400 – 1100 nm), la corrección coseno y el montaje experimental cercano a la chapa pueden introducir sesgos (error sistemático) de algunos puntos porcentuales. Por lo tanto, el valor reportado corresponde a una absorptancia efectiva en condiciones reales.

Agua superficial (lluvia/rocío).

La cubierta ensayada tiene una pendiente muy baja, por lo que tras eventos de lluvia o formación de rocío se retiene agua en forma de película y pequeños empozamientos en los valles de la ondulación. Esta condición modifica la distribución angular de la reflectancia (suaviza la micro-rugosidad y aumenta la componente especular), elevando G_{ref} y sesgando la absorptancia hacia valores menores. A primer orden puede modelarse como una mezcla de fracciones seca y húmeda sobre el campo de visión del sensor:

$$G_{ref}(t) = G_{inc}(t)[(1 - \phi_w(t))\rho_{dry} + \phi_w(t)\rho_{wet}]; \alpha_{eff}(t) = 1 - [(1 - \phi_w)\rho_{dry} + \phi_w\rho_{wet}], \quad (12)$$

donde $\phi_w(t)$ es la fracción superficial húmeda en el minuto t y, típicamente, $\rho_{wet} > \rho_{dry}$ (con ρ_{wet} y ρ_{dry} reflectancias secas y húmedas de la chapa respectivamente). Cuando ϕ_w varía entre posiciones (algunos sensores ven zonas húmedas y otros secas), la mezcla genera distribuciones mezcladas de α , lo que se manifiesta en los doble picos observados en los histogramas de cielos cubierto y parcialmente cubierto (Fig. 4). En esta campaña no se aplicó un filtro específico de humedad superficial; el efecto se atenúa parcialmente mediante el criterio de dispersión espacial σ_{ref} y los estimadores robustos (mediana/promedio recortado), pero constituye una fuente adicional de sesgo dentro de u_B .

Mitigación futura: (i) etiquetar y excluir las primeras horas posteriores a precipitación o con humedad relativa $> 90\%$ y baja irradiancia (p. ej., $GHI < 150 \text{ W/m}^2$), (ii) incorporar un sensor de registro de precipitación para definir una ventana de secado (4 – 6 h), y (iii) aumentar levemente la pendiente o prever drenajes para reducir empozamientos.

DISCUSIÓN

Los valores obtenidos muestran que la absorptancia efectiva de la chapa galvanizada ondulada se concentra en 0,50 – 0,80, con media global $\alpha = 0,687$ y dispersión 0,039 (1σ) para el conjunto filtrado. Se observa una diferencia sistemática por condición de cielo: $CD (0,679) < CPC (0,688) < CC (0,700)$. Bajo cielo despejado la componente directa potencia máximos especulares que elevan G_{ref} y reducen α ; en cielo cubierto predomina una distribución angular más difusa, con menor contribución especular y ligera elevación de α . Es importante hacer notar que las medidas fueron tomadas en junio-julio. Si bien en meses de verano con el Sol más elevado podría haber un cambio en la absorptancia solar por menores ángulos de incidencia de la irradiancia directa, nuestra experiencia en medidas previas, mientras se probaban metodologías para la implementación del experimento, nos mostraron que la variación por ángulo de incidencia es mínima. En la campaña de medidas se obtuvieron datos en todas condiciones de cielo, logrando una buena representatividad en las condiciones de nubosidad típicas del clima de Salto.

La comparación entre estimadores robustos (mediana vs. promedio recortado) arroja medias indistinguibles ($< 0,002$) y desviaciones estándar muy similares, por lo que la mediana resulta una elección adecuada por simplicidad y resistencia a valores atípicos.

En relación con la bibliografía (Levinson et al., 2010; Paolini et al., 2014; Parker et al., 2002; Piselli et al., 2018; Sleiman et al., 2011; Yoochareon et al., 2024), los resultados se sitúan dentro de los rangos reportados para techos metálicos expuestos, lo que respalda la validez del enfoque en campo. Para su uso en simulaciones de viviendas, recomendamos parametrizar la cubierta con absorptancia solar = 0,69 (valor medio del conjunto). Si se requiere un análisis de sensibilidad, se sugiere emplear el intervalo ($\mu \pm 2\sigma$) el cual asegura una cobertura del 95,4 % de los valores, es decir (0,61 – 0,77). De forma opcional, y cuando el caso de estudio lo amerite, pueden usarse dicho criterio de intervalo ($\mu \pm 2\sigma$) para cada una de las condiciones de cielo: $CD (0,597 - 0,761)$, $CPC (0,614 - 0,762)$ y $CC (0,638 - 0,762)$. Estos rangos reflejan únicamente la variabilidad observada en las mediciones (y su incertidumbre asociada), sin extrapolar a escenarios de envejecimiento, suciedad u oxidación no cubiertos por esta campaña. Dado que estos factores pueden modificar la absorptancia, se seguirán realizando campañas de medición para

evaluar su evolución temporal. El valor obtenido es algo mayor a la absorptancia de la literatura para chapas galvanizadas mencionada en la introducción; por ende, significa que una vivienda con dicha chapa como techo, tendrá mayor absorptancia solar, y por ende más necesidad de refrigeración en verano y menos de calefacción en invierno que lo que daría una simulación con el valor de absorptancia antes mencionado.

No se dispuso de sensores de lluvia ni humedad relativa, por lo que no fue posible filtrar datos de chapa mojada (lluvia o rocío). Esto genera un pequeño corrimiento de algunos registros a valores menores; sin embargo, al considerarse toda la distribución de datos, estos posibles desvíos quedan incluidos en la incertidumbre reportada.

CONCLUSIONES

Este trabajo presentó una metodología en campo y de bajo costo para estimar la absorptancia solar efectiva de chapas galvanizadas onduladas bajo condiciones reales de cielo. El uso conjunto de un arreglo de siete radiómetros orientados hacia abajo, filtros físicos ($GHI > 100 \text{ W/m}^2$, $\theta_z < 75^\circ$, $\sigma_{\text{ref}} < 20 \text{ W/m}^2$) y estadística robusta (mediana y promedio recortado) permitió mitigar la influencia de reflexiones especulares y de la heterogeneidad espacial asociada a la geometría corrugada. Con 13 379 registros válidos, se obtuvo una absorptancia promedio para el conjunto de datos de $\alpha = 0,687 \pm 0,039$ (1σ). Por condición de cielo, los valores fueron: Cielo Despejado (CD) $0,679 \pm 0,041$, Cielo Parcialmente Cubierto (CPC) $0,688 \pm 0,037$ y Cielo Cubierto (CC) $0,700 \pm 0,031$, lo que sugiere una leve dependencia angular/hemisférica: la presencia de componente directa intensa tiende a incrementar la reflejada y reducir α .

La geometría del montaje (altura de 0,30 m, línea de sensores con separación de 3 cm cubriendo de cresta a cresta, y dos chapas de 1 m en continuidad) contribuyó a que el campo de visión estuviera dominado por la propia superficie metálica y a que la contribución de bordes fuera simétrica y reducida. En este sentido, el valor reportado debe interpretarse como absorptancia efectiva en condiciones reales, adecuada para simulaciones y evaluaciones de desempeño térmico de viviendas sociales.

Los resultados se ubican dentro de los rangos reportados para techos metálicos expuestos y son directamente aplicables en modelos energéticos. Como trabajo futuro, se propone profundizar la trazabilidad metrológica con piranómetros espectralmente planos (300 – 3000 nm), explorar explícitamente la dependencia con el ángulo cenital y el envejecimiento (campañas estacionales).

Existen escasos estudios previos sobre techos metálicos en climas húmedos en la región, por lo que este trabajo contribuye a cubrir esa brecha.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Francisco Guimaraens, técnico del Laboratorio de Energía Solar (LES, Universidad de la República), por su apoyo en el diseño y montaje del arreglo experimental, así como en la instalación y mantenimiento durante la campaña de medición. Agradecemos también a Gonzalo Abal (LES, Universidad de la República) por sus comentarios y discusiones, que ayudaron a aclarar aspectos de la instrumentación y del análisis de los datos. Cualquier error remanente es responsabilidad exclusiva de los autores.

REFERENCIAS

- Alonso-Suárez, R., Abal, G., Righini, R., Nollas, F. M., Ramos-Martins, F., de Castro Vilela, O., Figueiredo, G., Wolfram, E., Laguarda, A., Lell, J., et al. (2024). Recomendaciones y Buenas Prácticas para la Medición y Registro de la Radiación Solar en Territorio.
- Colón, C., Colon-Serrano, J., et al. (2021). Cool roofs for community resilience: Performance of reflective coatings in a tropical climate. *Energy and Buildings*, 253, 111530. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111530>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes* (3rd). Wiley.

- Levinson, R., Berdahl, P., & Akbari, H. (2010). Solar spectral optical properties of pigments - Part II: Survey of common colorants. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(6), 1179-1189. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.02.017>
- LI-COR Biosciences. (2017). *LI-COR LI-200 Pyranometer Sensor Specifications* [Accessed: 2025-08-07]. <https://www.licor.com/documents/zde8po3ze1yc1lvtvv01>
- Paolini, R., Zinzi, M., Poli, T., Hofer, P., & Scrosati, C. (2014). Effect of cool roofs on ambient temperature and urban heat island in Rome: Analysis of local scale measurements. *Sustainable Cities and Society*, 13, 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.04.004>
- Parker, D. S., Sonne, J. K., Sherwin, J. R., & Moyer, N. (2002). Comparative evaluation of the impact of roofing systems on residential cooling energy demand in Florida. *Proceedings of the 2002 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, 1, 219.
- Piselli, C., Castaldo, V. L., Cotana, F., & Pisello, A. L. (2018). Outdoor experimental analysis for passive cooling effect of cool roof coating on building energy performance and thermal comfort in summer conditions. *Building and Environment*, 136, 142-151. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.052>
- Sleiman, M., Destailats, H., Sullivan, D. P., Cohn, S., Lunden, M. M., Russell, M. L., Fisk, W. J., Fatehifar, E., & Nazaroff, W. W. (2011). Emissions of reactive oxygen species from commercial and residential building materials. *Atmospheric Environment*, 45(15), 2758-2765. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.02.021>
- Yoochareon, T., et al. (2024). Spectral absorptance and thermal behavior of corrugated metal roofs under different sky conditions. *Journal of Building Engineering*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.106359>

APÉNDICE. HUELLA DE VISIÓN EFECTIVA DEL SENSOR

Planteo.

Para justificar que el campo de visión del arreglo de sensores es predominantemente de las chapas, estimamos el radio efectivo sobre el plano de la chapa que concentra una fracción p de la señal registrada. Suponemos (i) respuesta coseno del sensor con ángulo de aceptación $\theta_{\text{máx}}$, y (ii) campo difuso aproximadamente isotrópico en la vecindad de la normal local. Con el sensor a altura h sobre el plano, los rayos que llegan con ángulo θ (desde la normal del sensor) intersectan el plano en un radio:

$$r(\theta) = h \tan(\theta)$$

Bajo radiancia constante L y respuesta coseno, la irradiancia recogida hasta θ vale:

$$E(\leq \theta) = \int_0^{2\pi} \int_0^\theta L \cos \vartheta \sin \vartheta \, d\vartheta d\phi = \pi L \sin^2(\theta)$$

Normalizando por la aceptación angular del sensor, la fracción acumulada de señal proveniente del disco de radio R sobre el plano es:

$$f(R; h, \theta_{\text{max}}) = \frac{\sin^2(\min\{\arctan(R/h), \theta_{\text{max}}\})}{\sin^2 \theta_{\text{max}}} \quad (13)$$

El radio que contiene la fracción p se obtiene invirtiendo (13):

$$R_p(h, \theta_{\text{max}}) = h \tan[\arcsin(\sin \theta_{\text{max}} \sqrt{p})] \quad (14)$$

Aplicación al montaje.

Con $h = 0,30$ m y ángulos de aceptación típicos para sensores de silicio ($\theta_{\text{máx}} \in [70^\circ, 85^\circ]$), los radios efectivos resultan:

Para un valor representativo $\theta_{\text{máx}} = 80^\circ$, el 50 % de la señal proviene de un radio $\approx 0,29$ m, el 80 % de $\approx 0,56$ m y el 95 % de $\approx 1,03$ m. Dado que el arreglo está centrado sobre dos chapas en continuidad y el borde más cercano se ubica a 1 m, entonces $f(R=1 \text{ m}) \approx 0,95$: al menos un 95 % de la contribución aceptada proviene de la propia cubierta metálica, y la fracción potencial asociada a bordes/entorno queda acotada a $\lesssim 5 - 8$ % incluso para $\theta_{\text{máx}}$ exigentes (85°). Además, el uso de estadística robusta (mediana/promedio recortado) reduce el impacto de contribuciones angulares extremas y de eventuales reflexiones especulares.

Tabla 4: Radios efectivos R_p (m) para $h = 0,30$ m. Además, $f(R=1 \text{ m})$ indica la fracción de señal contenida dentro de 1 m de radio (relevante porque el borde más próximo de la cubierta está a ≈ 1 m)

$\theta_{\text{máx}}$	R50	R80	R95	$f(R=1 \text{ m})$
70°	0,27	0,47	0,68	1,00
75°	0,28	0,51	0,84	0,983
80°	0,29	0,56	1,03	0,946
85°	0,30	0,59	1,22	0,924

Nota. La estimación se basa en un campo difuso localmente isotrópico; ante anisotropías (p. ej., facetas de la ondulación) el peso angular puede desplazarse levemente, pero el orden de magnitud de la huella y las conclusiones respecto a bordes se mantienen.

IN-FIELD DETERMINATION OF THE SOLAR ABSORPTANCE OF CORRUGATED METAL ROOFS: METHODOLOGY AND RESULTS

ABSTRACT Laboratory values or tables are commonly used to estimate the solar absorptance of corrugated metal roofs, which may not represent real surfaces under variable sky conditions. We present an in-field methodology to estimate the effective solar absorptance of a galvanized corrugated roof typical of Uruguayan social housing. An array of seven downward-facing LI-200 silicon sensors measured reflected irradiance while an upward-facing sensor measured global horizontal irradiance (GHI). Filters (GHI > 100W/m², zenith angle < 75°, reflected dispersion $\sigma_{\text{ref}} < 20$ W/m²) and robust statistics (median and trimmed mean) were applied to mitigate specular peaks and spatial heterogeneity. From 13,379 valid one-minute records (18.2 % of the campaign), the average absorptance was $\alpha = 0.687 \pm 0.039$ (1σ) overall; by sky condition: clear 0.679 ± 0.041 , partly cloudy 0.688 ± 0.037 , and overcast 0.700 ± 0.031 . Differences between estimators were < 0.002. These results fall within reported ranges and provide a reproducible value under real conditions, useful for building energy simulations and the assessment of passive strategies in social housing.

Keywords: corrugated metal roof, solar absorptance, field measurements, robust statistics, social housing.