

Development and evaluation of a radiative attenuation index derived from net shortwave radiation

José Luis Di-Laccio^{1,2} , Paola Russo¹ 

Abstract Characterizing radiative attenuation associated with cloud cover is fundamental for analyzing surface energy balances and evaluating solar resources. However, many meteorological stations lack reliable measurements of global horizontal irradiance. This work develops and analyzes the physical consistency of an empirical index of radiative attenuation by cloudiness derived exclusively from net shortwave radiation, oriented to its application in sites with limited radiometric instrumentation. The index is constructed from a dimensionless variable normalized to a statistically representative clear sky condition, defined by the 98th percentile due to its interannual and seasonal stability. The classification of radiative states is established using the 55th and 85th percentiles, calculated based on solar geometry and parameterized using local cubic polynomials, allowing for dynamic segregation of clear, partly cloudy, and cloudy conditions with a 15-minute temporal resolution. The physical consistency of the index is verified by its relationship with the net longwave radiation and the total radiative balance, while its external consistency is evaluated by comparison with satellite estimates of the clearness index obtained from the Physical Solar Model, reaching a correlation of 0.816. The results demonstrate that the index constitutes a robust tool for characterizing the radiative state of the atmosphere and extending the climatological use of historical series based exclusively on net radiation measurements.

Keywords radiative attenuation index, net shortwave radiation, surface energy balance, cloud cover, solar resource assessment

Desarrollo y evaluación de un índice de atenuación radiativa derivado de la radiación neta de onda corta

Resumen La caracterización de la atenuación radiativa asociada a la nubosidad es fundamental para el análisis del balance energético superficial y la evaluación del recurso solar. Sin embargo, numerosas estaciones meteorológicas no disponen de mediciones confiables de irradiancia global horizontal. En este trabajo se desarrolla y analiza la consistencia física de un índice empírico de atenuación radiativa derivado exclusivamente de la radiación neta de onda corta, orientado a su aplicación en sitios con instrumentación radiométrica limitada. El índice se construye a partir de una variable adimensional normalizada respecto a una condición estadísticamente representativa de cielo claro, definida mediante el percentil 98 por su estabilidad interanual y estacional. La clasificación de los estados radiativos se establece mediante los percentiles 55 y 85 calculados en función de la geometría solar y parametrizados mediante polinomios cúbicos locales, permitiendo una segregación dinámica de condiciones despejadas, parcialmente nubladas y nubladas con resolución temporal de 15 minutos. La consistencia física del índice se verifica mediante su relación con la radiación neta de onda larga y el balance radiativo total, mientras que su consistencia externa se evalúa mediante comparación con estimaciones satelitales del índice de claridad obtenidas del modelo Physical Solar Model, alcanzando una correlación de 0.816. Los resultados demuestran que el índice constituye una herramienta robusta para caracterizar el estado radiativo de la atmósfera y ampliar el aprovechamiento climatológico de series históricas basadas exclusivamente en mediciones de radiación neta.

Palabras clave índice de atenuación radiativa, radiación neta de onda corta, balance energético superficial, cobertura nubosa, recurso solar

INTRODUCCIÓN

La caracterización cuantitativa de la nubosidad constituye un componente central en estudios de balance de energía superficial, modelado radiativo, evaluación del recurso solar y análisis climático regional (Wild, 2020; Wild et al., 2019). La presencia de nubes modula simultáneamente la radiación de onda corta incidente y el intercambio radiativo infrarrojo, condicionando la energía disponible en el sistema suelo-atmósfera y afectando procesos hidrológicos, agrícolas y energéticos (Ghausi et al., 2023; Tao et al., 2025; Wild et al., 2019). En este contexto, disponer de indicadores del estado atmosférico resulta fundamental tanto para investigaciones básicas como para aplicaciones operativas

¹ Laboratorio de Energía Solar, Departamento de Física, Centro Universitario Regional (Cenur) Litoral Norte, Universidad de la República (Udelar), Uruguay

² Departamento de Física, Centro Regional de Profesores del Litoral (CeRP del Litoral), Consejo de Formación en Educación (CFE), Uruguay

* Contacto: jdilaccio@gmail.com

(Cawkwell y Bamber, 2002).

Entre los distintos parámetros utilizados, el índice de claridad k_t (Perez et al., 1990) ha demostrado ser una herramienta útil para discriminar condiciones despejadas, parcialmente nubladas y nubladas, debido a su interpretación física directa como fracción transmitida de la irradiancia extraterrestre. Sin embargo, su cálculo requiere mediciones confiables de irradiancia global horizontal (GHI), lo que implica la utilización de piránómetros de alta calidad (Clase A según la norma ISO 9060:2018), adecuados sistemas de ventilación y mantenimiento periódico. Este tipo de instrumentación no siempre está disponible en estaciones meteorológicas automáticas convencionales ni en numerosas redes ambientales de América Latina, donde es más frecuente la medición de radiación neta que la medición independiente y calibrada de *GHI*.

En este escenario, la radiación neta de onda corta (SW_{net}) representa una variable registrada en redes de observación y utilizada en estudios de balance energético superficial (Inamdar y Guillevic, 2015; Ohmura et al., 1998). Está definida como la diferencia entre la radiación descendente y la reflejada en superficie, e incorpora de forma implícita el efecto del albedo superficial (Stull, 1988). Aunque tradicionalmente ha sido utilizada para estudios de balance energético, su potencial como base para la construcción de un índice de atenuación radiativa ha sido escasamente explorado. La posibilidad de derivar un indicador operativo de atenuación radiativa a partir de SW_{net} permitiría ampliar significativamente el aprovechamiento climatológico de registros históricos en sitios donde no se dispone de *GHI* confiable. Cabe destacar que el índice de atenuación radiativa no debe confundirse con la cobertura nubosa geométrica u operacional, la cual evalúa la fracción de bóveda celeste cubierta independientemente del espesor óptico de la nube.

El objetivo de este trabajo es desarrollar y evaluar un índice de atenuación radiativa basado exclusivamente en SW_{net} , fundamentado en relaciones físicas simples y en un esquema de normalización estadística adaptado a las condiciones locales del sitio de estudio. Se propone además un sistema de clasificación dinámica que incorpora la dependencia con la geometría solar, permitiendo una segregación consistente de estados atmosféricos a lo largo del ciclo diurno. Se analiza la coherencia física del índice mediante su relación con la radiación neta de onda larga y el balance radiativo total, evaluando su estabilidad interanual. Finalmente, se evalúa su consistencia mediante la correlación entre la transmitancia atmosférica efectiva derivada de SW_{net} y el índice de claridad, calculado a partir de la irradiancia solar hemisférica horizontal estimada por satélite (GHI_{PSM}).

ÍNDICE DE ATENUACIÓN RADIATIVA CON BASE EN LA RADIACIÓN DE ONDA CORTA

La radiación neta de onda corta se define como:

$$SW_{net} = SW_{\downarrow} - SW_{\uparrow}, \quad (1)$$

donde $SW_{\downarrow}$ es la irradiancia global hemisférica horizontal y $SW_{\uparrow}$ la componente reflejada por la superficie. El albedo superficial α se define como la fracción de irradiancia reflejada respecto de la incidente (Rodríguez-Muñoz et al., 2024):

$$\alpha = \frac{SW_{\uparrow}}{SW_{\downarrow}}, \quad (2)$$

de modo que:

$$SW_{net} = SW_{\downarrow}(1 - \alpha). \quad (3)$$

El índice de claridad clásico se define como (Perez et al., 1990):

$$k_t = \frac{SW_{\downarrow}}{G_{sc} F_n \cos \theta_z}, \quad (4)$$

donde G_{sc} es la irradiancia solar total (1361 W m^{-2}) (Kopp y Lean, 2011), F_n el factor de corrección orbital (Spencer, 1971) y θ_z el ángulo cenital solar. Las variables astronómicas pueden determinarse

mediante formulaciones estándar (Duffie y Beckman, 2013; Iqbal, 1983). Definiendo la irradiancia extraterrestre horizontal como:

$$G_{oh} = G_{sc} F_n \cos \theta_z, \quad (5)$$

puede escribirse:

$$k_t = \frac{SW_{\downarrow}}{G_{oh}}. \quad (6)$$

Sustituyendo en la ecuación 3 se obtiene:

$$SW_{net} = k_t G_{oh} (1 - \alpha). \quad (7)$$

A partir de esta expresión se define un índice adimensional basado exclusivamente en radiación neta:

$$X = \frac{SW_{net}}{G_{oh}} = k_t (1 - \alpha), \quad (8)$$

el cual integra en forma normalizada los efectos combinados de nubosidad y reflectancia superficial.

Determinando un valor representativo bajo condiciones de cielo claro, X_{claro} , se introduce la transmitancia atmosférica relativa:

$$\tau = \frac{X}{X_{claro}} = \frac{k_t (1 - \alpha)}{k_{t,claro} (1 - \alpha_{claro})}, \quad (9)$$

y finalmente el índice de atenuación radiativa:

$$I_{nub} = 1 - \tau. \quad (10)$$

Por construcción, $0 \leq \tau \leq 1$ y $0 \leq I_{nub} \leq 1$. Mientras τ conserva una interpretación directa como fracción transmitida respecto a una atmósfera despejada representativa, I_{nub} constituye una escala adimensional creciente con el grado de atenuación atmosférica. Dado que ambos parámetros se derivan exclusivamente de SW_{net} y de la geometría solar, el esquema resulta aplicable en estaciones que disponen únicamente de mediciones de radiación neta.

METODOLOGÍA

Datos

El análisis se basa en un registro de 5 años (del 1 de enero de 2020 al 31 de diciembre de 2024) de datos con resolución de 15 minutos de radiación neta de onda corta, onda larga y total, medidos en el Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia (AGGO). El observatorio está ubicado en el partido de Berazategui, Provincia de Buenos Aires, Argentina (ver Figura 1), con $\text{lat} = -34.87^\circ$, $\text{lon} = -58.14^\circ$ y a una altitud de $h = 39.7$ m sobre el nivel del mar. Debido a limitaciones técnicas detectadas en la integridad de la serie histórica de GHI medida *in situ*, se recurrió a estimaciones satelitales de irradiancia global horizontal para complementar el análisis. Para ello, se utilizaron datos de GHI_{PSM} con resolución temporal de 10 minutos correspondientes al período comprendido entre el 1 de enero de 2023 y el 31 de diciembre de 2024, obtenidos para el sitio de estudio mediante el modelo físico solar *Physical Solar Model* (PSM) de la *National Solar Radiation Database* (NSRDB) (Sengupta et al., 2018). La elección de este producto se fundamenta en su disponibilidad continua y en los resultados de validaciones recientes realizadas en Sudamérica, que reportan una buena concordancia con observaciones de superficie (Sarazola et al., 2023). Las estimaciones satelitales fueron sincronizadas con los registros de superficie, considerándose únicamente los instantes con observaciones coincidentes para el análisis comparativo entre el índice de claridad satelital y la transmitancia atmosférica efectiva, definida como $\tau = 1 - I_{nub}$. El modelo PSM se basa en observaciones de los satélites geoestacionarios GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellites*) y permite estimar los componentes de la radiación solar en superficie con adecuada resolución temporal y espacial.

El procedimiento metodológico se estructuró en tres etapas secuenciales destinadas al desarrollo y validación del modelo de clasificación de cielos. En primera instancia, con el propósito de garantizar la

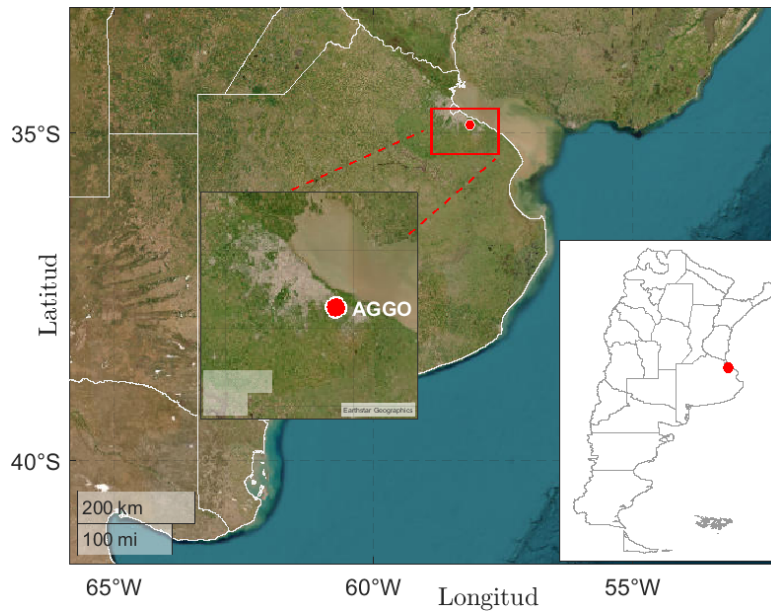


Figura 1. Ubicación del Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia en la provincia de Buenos Aires, Argentina.

representatividad climatológica del umbral de referencia de cielo despejado (X_{claro}), se utilizó la serie completa de cinco años (2020 a 2024). En segunda instancia, el periodo de 2020 a 2022 se destinó a la obtención de las fronteras dinámicas de I_{nub} para la clasificación (cielo despejado, parcialmente nublado y nublado). Finalmente, el periodo de 2023 a 2024 se reservó como un conjunto de evaluación de la consistencia física del índice en la radiación neta de onda larga (LW_{net}) y la radiación neta total (R_{net}). Complementariamente, las estimaciones del índice de claridad satelital provenientes del modelo PSM se preservaron para realizar un análisis complementario de consistencia de la nubosidad identificada por ambos métodos.

Las observaciones de radiación se obtuvieron mediante un radiómetro neto *CNR2 Net Radiometer* (Campbell Scientific, Inc., s.f.). Este instrumento ha sido utilizado en estudios de balance radiativo superficial y ha sido discontinuado por el fabricante. El *CNR2* integra dos piranómetros y dos pirgeómetros que permiten medir de forma independiente la radiación neta de onda corta y neta de onda larga, tanto entrante como saliente. Los piranómetros operan en el rango espectral 300–2800 nm y registran la radiación solar global incidente y reflejada, mientras que los pirgeómetros miden radiación infrarroja lejana en el intervalo 4.5–42 μm . A partir de estas señales, el instrumento registra, en este caso, con resolución temporal de 15 minutos, SW_{net} , LW_{net} y R_{net} en W m^{-2} . La radiación neta total se define como:

$$R_{net} = SW_{\downarrow} - SW_{\uparrow} + LW_{\downarrow} - LW_{\uparrow}. \quad (11)$$

La estación se encuentra en una región clasificada como Cfa (templado húmedo con veranos cálidos) según el sistema de Köppen–Geiger (Peel et al., 2007). El AGGO constituye un observatorio geodésico fundamental equipado con múltiples técnicas co-localizadas de alta precisión, lo que garantiza la estabilidad y trazabilidad de sus mediciones (Antokoletz et al., 2020; Mikolaj et al., 2019).

Control de calidad

El control de calidad de los datos anuales de SW_{net} y LW_{net} se realizó mediante un procedimiento secuencial que incluyó: (i) la selección de muestras diurnas, definidas por $\cos \theta_z > 0$; (ii) la identificación y descarte de datos afectados por sombreado u otras anomalías evidentes, basada en una inspección visual de las series (con este fin, se construyó un diagrama solar para cada año de estudio en el que se representa la altura solar (α_s) en función del ángulo azimutal (γ_s), utilizando una escala de colores para indicar el nivel de SW_{net} . A partir de este análisis se definió y aplicó un filtro de sombras para cada año, que fue posteriormente extendido a las series de LW_{net} y R_{net}) y (iii) la aplicación de un filtro de límites para SW_{net} y LW_{net} basados en criterios adaptados del protocolo de la Baseline

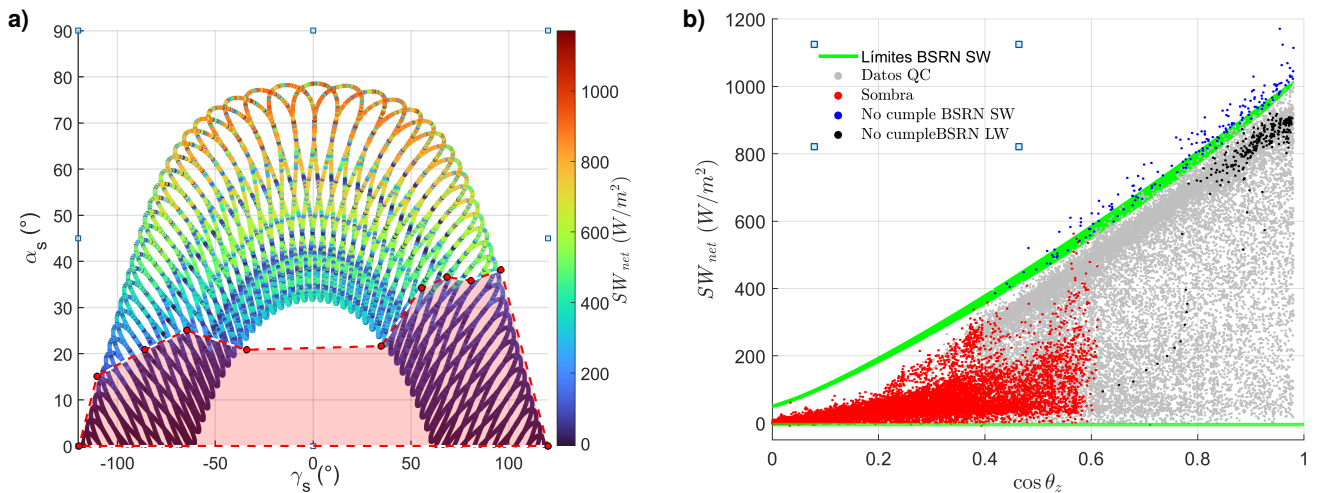


Figura 2. Control de calidad aplicado a SW_{net} : a) diagrama solar correspondiente al año 2024, utilizado para identificar las regiones afectadas por sombreado; y b) relación entre SW_{net} y $\cos \theta_z$ para el período 2020–2024, con clasificación de las muestras según los criterios de control de calidad aplicados. Los datos aceptados se muestran en gris.

Surface Radiation Network (BSRN) para condiciones diurnas (Long y Shi, 2008; McArthur, 2005).

Tras la aplicación de estos procedimientos, se retuvieron únicamente los registros simultáneamente válidos para todas las variables requeridas, conformando el conjunto inicial de datos utilizado en el análisis. En la Figura 2a se presenta el diagrama solar correspondiente al año 2024 junto con la detección de sombreado, patrón que se repite con pequeñas variaciones en los restantes años analizados. Por su parte, la Figura 2b muestra el efecto del filtrado aplicado a la serie 2020–2024 de SW_{net} . Los puntos rojos identifican las sombras, los puntos azules corresponden a registros excluidos por el filtro de límites de SW_{net} , los puntos negros representan los registros descartados por los límites de LW_{net} , mientras que los puntos grises satisfacen los criterios de control de calidad adoptados en este estudio.

La Tabla 1 resume el conjunto base de muestras diurnas por año y para la serie (100 %) y muestra cómo el descarte, que alcanza el 46.93 %, lleva a un 53.07 % de muestras válidas para el período 2020 a 2024. Del total de datos descartados, un 42.83 % corresponde a muestras afectadas por sombreado.

Una vez aplicado el control de calidad asociado al sombreado, solo un 4.10 % adicional de las muestras fue descartado por el resto de los filtros (valores perdidos o fuera de rango), ver la Figura 2b.

Construcción del índice de atenuación radiativa

A partir del conjunto de datos depurado de los años 2020 a 2024, se calcula el índice X , definido en la ecuación 8. Para transformar esta variable en una transmitancia atmosférica relativa, es necesario establecer un nivel de referencia que caracterice las condiciones de cielo despejado (*clear-sky*) específicas del sitio de estudio.

El establecimiento de un umbral representativo para X_{claro} es relevante para la normalización del índice de atenuación radiativa. Para obtenerlo de forma fundada, se efectuó un estudio de sensibilidad comparando la variabilidad anual de distintos percentiles, desde el P_{90} hasta el P_{99} . Con este propósito, se utilizó el coeficiente de variación (CV), el cual se define como el cociente entre la desviación estándar y el valor medio, expresado en porcentaje:

$$CV = \left(\frac{\sigma}{\mu} \right) \times 100. \quad (12)$$

El CV se calcula a partir de la serie mensual de los valores del percentil de X_{claro} considerado para

Tabla 1. Resumen del control de calidad y filtrado de datos para el periodo 2020 a 2024. Se detallan los criterios físicos, el descarte por año y el total de la serie.

Filtro / condición	Fronteras dinámicas I_{nub}			Consistencia física		Total
	2020	2021	2022	2023	2024	Serie
Datos diurnos ($\cos \theta_z > 0$)	17512	17455	17455	17455	17512	87389
1. NaNs diurnos ($R_{net} = NaN$)	173	175	541	1376	83	2348
% del total anual	(0.99 %)	(1.00 %)	(3.10 %)	(7.88 %)	(0.47 %)	(2.69 %)
2. Sombras (máscara geométrica)	7710	7855	8493	6513	6859	37430
% del total anual	(44.03 %)	(45.00 %)	(48.66 %)	(37.31 %)	(39.17 %)	(42.83 %)
3. Rango $SW_{net}^{\dagger}$	160	137	135	56	131	619
% del total anual	(0.91 %)	(0.78 %)	(0.77 %)	(0.32 %)	(0.75 %)	(0.71 %)
4. Rango $LW_{net}^{\ddagger}$	15	72	263	269	0	619
% del total anual	(0.09 %)	(0.41 %)	(1.51 %)	(1.54 %)	(0.00 %)	(0.71 %)
DATOS VÁLIDOS	9454	9216	8023	9241	10439	46373
% Válido final	(53.99 %)	(52.80 %)	(45.96 %)	(52.94 %)	(59.61 %)	(53.07 %)

[†] Condición SW_{net} : $-4 < SW_{net} < 0.7 G_{sc} F_n \cos^{1.2}(\theta_z) + 50$.

[‡] Condición LW_{net} : $-170 < LW_{net} < 5$.

cada año. A partir de estos doce valores mensuales, se obtiene la media (μ) y la desviación estándar (σ) anual.

De este modo, el CV se utiliza como una medida directa de la estabilidad estacional del umbral de cielo claro. Al analizar este indicador, se observa que la máxima estabilidad (menor CV) se produce en la región comprendida entre P_{96} y P_{99} . En base a este criterio de mínima variabilidad interanual y estacional, se selecciona el percentil P_{98} de cada mes.

La [Figura 3a](#) muestra la evolución del coeficiente de variación (CV) en función del percentil para cada año analizado. En términos generales, los valores mínimos de CV se alcanzan en torno a P_{99} , con excepción del año 2024. Por su parte, la [Figura 3b](#) presenta el promedio interanual del CV y su desviación estándar, representada mediante barras verticales. En este caso, el mínimo absoluto del CV promedio también se localiza en P_{99} .

Aunque el mínimo absoluto del coeficiente de variación corresponde a P_{99} , este percentil se ubica en el extremo superior de los valores de X_{claro} , donde las estimaciones pueden verse más afectadas por observaciones atípicas. Por esta razón, se selecciona P_{98} como percentil de referencia, dado que mantiene niveles de variabilidad prácticamente equivalentes dentro de la región de máxima estabilidad.

La [Figura 4a](#) presenta la evolución anual del parámetro de cielo claro X_{claro} obtenido a partir de la mediana de los valores correspondientes al percentil P_{98} de cada mes. Se observa estacionalidad, con valores máximos en enero y febrero ($X_{claro} \approx 0.705$) y un mínimo en junio ($X_{claro} = 0.640$). Entre ambos extremos se aprecia una transición gradual y consistente a lo largo del año, reflejando la modulación estacional de las condiciones atmosféricas que afectan la transmitancia en condiciones de cielo despejado. Este comportamiento sugiere la utilización de umbrales mensuales de X_{claro} para la identificación de condiciones de cielo despejado. Los valores mensuales de referencia se presentan en la tabla que se muestra en la [Figura 4b](#).

Una vez definidos estos umbrales, se procede a normalizar y acotar para cada mes la variable $X(m)$, mediante un esquema de saturación física. Este procedimiento garantiza que la transmitancia relativa calculada, $\tau(m)$, actúe como un *proxy* directo de la transmitancia atmosférica local escalada a

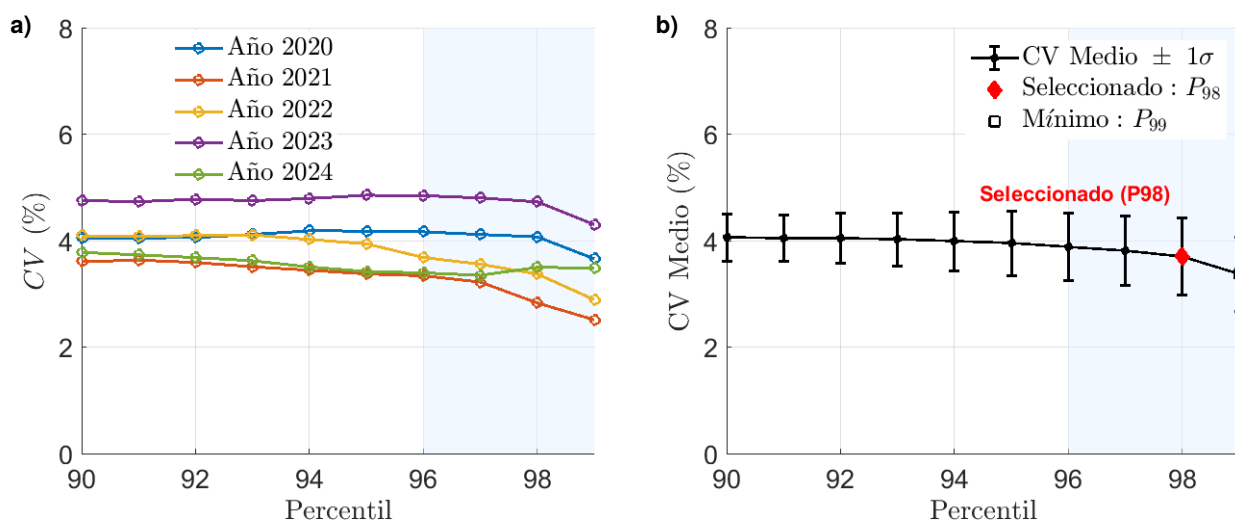


Figura 3. Análisis de estabilidad del coeficiente de variación (2020–2024): a) coeficiente de variación para cada año en función del percentil, con una región de máxima estabilidad concentrada en percentiles altos (P_{96} – P_{99}); y b) coeficiente de variación medio interanual, donde las barras verticales indican la desviación estándar de los datos para cada percentil analizado. El sombreado destaca la región de mayor convergencia entre los percentiles P_{96} y P_{99} .

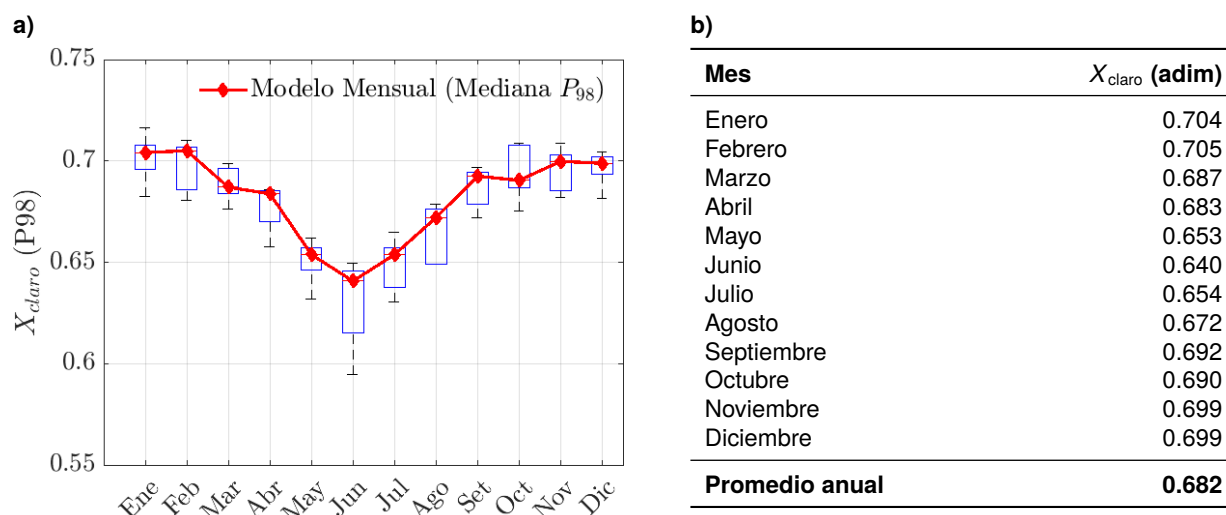


Figura 4. Estudio de sensibilidad para la selección del umbral de cielo claro: a) distribución interanual mensual de X_{claro} utilizando el percentil P_{98} para el período 2020–2024; y b) medianas mensuales de X_{claro} y valor promedio anual de las mismas.

condiciones de cielo despejado, permaneciendo estrictamente acotada en el intervalo cerrado $[0, 1]$:

$$\tau(m) = \begin{cases} 1, & \text{si } X(m) \geq X_{claro}(m) \\ \frac{X(m)}{X_{claro}(m)}, & \text{si } 0 \leq X(m) < X_{claro}(m) \\ 0, & \text{si } X(m) < 0. \end{cases} \quad (13)$$

Este truncamiento afecta a menos del 3 % de los datos (2020–2022), por lo que su impacto promedio anual es del orden del 1 %. A partir de esta transmitancia normalizada se calcula el índice de atenuación radiativa (ecuación 10), cuya respuesta frente a distintas condiciones geométricas y atmosféricas constituye el foco del análisis presentado en la siguiente sección.

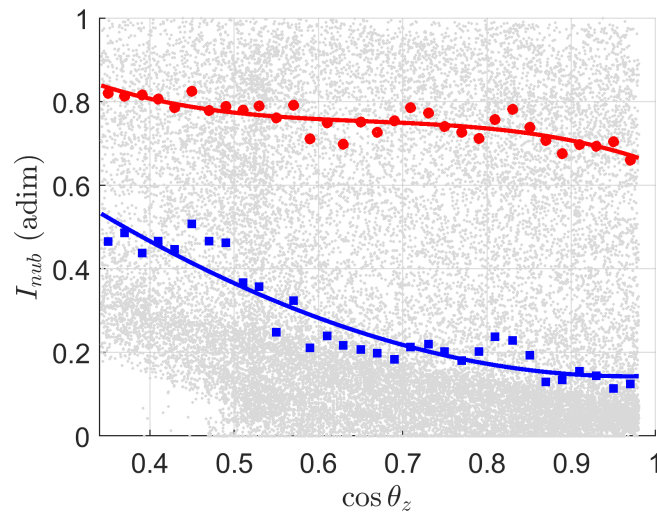


Figura 5. Curvas de clasificación dinámica sobre datos de I_{nub} para el período 2020–2022.

RESULTADOS

Estudio de I_{nub} en función de la elevación solar

Como primer paso, se analiza la sensibilidad de I_{nub} a la geometría solar. Para ello, se estudió la distribución de I_{nub} en función de $\cos \theta_z$ considerando únicamente observaciones con alturas solares (α_s) superiores a 30° . La inspección visual de la [Figura 5](#) muestra una dependencia de I_{nub} con el coseno del ángulo cenital solar. En particular, para valores de $\cos \theta_z < 0.7$, la nube de puntos tiende a desplazarse hacia valores más elevados de I_{nub} , mientras que para mayores valores de $\cos \theta_z$ la distribución se concentra progresivamente en valores más bajos del índice. Este comportamiento es consistente con el aumento de la masa de aire óptica a medida que disminuye la altura solar y la consecuente mayor atenuación radiativa de la atmósfera.

La dependencia observada de I_{nub} con $\cos \theta_z$ indica que la definición de umbrales de clasificación debe incorporar explícitamente la geometría solar. En efecto, la utilización de umbrales fijos de I_{nub} , análogos a los empleados habitualmente para el índice de claridad ([Iqbal, 1983](#)), no permitió reproducir una separación físicamente consistente de los distintos regímenes atmosféricos. En particular, al analizar la distribución de los datos en el plano SW_{net} – $\cos \theta_z$, las condiciones de cielo despejado no conformaban una envolvente superior continua y claramente diferenciada del resto de las observaciones.

Con el fin de construir límites de clasificación dependientes de $\cos \theta_z$, el dominio de esta variable se dividió en 50 bins equiespaciados, cada uno con más de 200 observaciones, para tener representatividad estadística. En cada bin se calcularon distintos percentiles de la distribución de I_{nub} , asignándolos al valor central del intervalo correspondiente. Posteriormente, dichos percentiles fueron ajustados mediante polinomios de distinto grado para obtener funciones continuas aplicables a todo el dominio de análisis. Los ajustes de tercer grado proporcionaron un compromiso adecuado entre calidad de ajuste y complejidad del modelo.

Finalmente, se evaluaron distintas combinaciones de percentiles como posibles fronteras entre las categorías despejado (D), parcialmente nublado (PN) y nublado (N). La combinación P_{55} – P_{85} resultó la más adecuada para preservar la estructura radiativa observada en el plano SW_{net} – $\cos \theta_z$, permitiendo identificar una envolvente superior continua asociada a condiciones despejadas y reduciendo simultáneamente la superposición entre categorías adyacentes. En consecuencia, dichos percentiles fueron adoptados como límites operativos del esquema de clasificación.

Los ajustes obtenidos muestran una convergencia de ambos límites hacia valores más elevados de I_{nub} para $\cos \theta_z \approx 0.34$. Este comportamiento refleja la dependencia del índice con la geometría solar a bajas elevaciones y justifica la utilización de límites dependientes de $\cos \theta_z$ para mantener criterios de clasificación consistentes a lo largo del intervalo de validez considerado.

Tabla 2. Coeficientes del ajuste polinomial para los límites de clasificación de I_{nub} .

Límite (percentil)	a	b	c	d	R^2
Cielo despejado (P_{55})	0.148	0.656	-1.688	1.026	0.88
Cielo nublado (P_{85})	-1.846	3.656	-2.497	1.339	0.71

Los límites dinámicos, $L(x)$ quedaron definidos mediante:

$$L(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d, \quad (14)$$

donde $x = \cos \theta_z$.

Bajo este esquema, el índice I_{nub} actúa como clasificador dinámico según las siguientes regiones de decisión:

- Despejado (D): $I_{nub}(t) \leq L_{P55}(x)$
- Parcialmente nublado (PN): $L_{P55}(x) < I_{nub}(t) < L_{P85}(x)$
- Nublado (N): $I_{nub}(t) \geq L_{P85}(x)$

Los coeficientes obtenidos para los polinomios de clasificación, junto con sus respectivos coeficientes de determinación (R^2), se presentan en la [Tabla 2](#) para el sitio AGGO.

Índice de atenuación radiativa y el balance energético superficial

La consistencia física del esquema de clasificación propuesto se evalúa a partir de la relación entre la irradiancia neta de onda corta y la geometría solar presentada en la [Figura 6](#). La clasificación de datos mediante los umbrales dinámicos de I_{nub} permite identificar tres regímenes radiativos diferenciados, los cuales guardan correspondencia con procesos de transferencia radiativa en la baja atmósfera. Bajo condiciones de cielo despejado (puntos grises), SW_{net} va incrementándose desde valores en el entorno de los 200 W m^{-2} hasta aproximarse a los 1000 W m^{-2} cuando $\cos \theta_z \rightarrow 1$. Esta respuesta es consistente con el predominio de la irradiancia directa normal (DNI, *direct normal irradiance*) y la estabilidad óptica de una atmósfera libre de nubes. El régimen de cielo nublado (puntos rojos) muestra que $SW_{net} < 320 \text{ W m}^{-2}$, con atenuación frente a la disminución de $\cos \theta_z$. Dicho comportamiento refleja el predominio de la irradiancia difusa horizontal (DHI, *diffuse horizontal irradiance*). Por último, el régimen de cielo parcialmente nublado (puntos azules) se caracteriza por una mayor dispersión vertical para valores idénticos de $\cos \theta_z$. Esta variabilidad está relacionada con los cambios en DNI y DHI producidos por la nubosidad variable.

La consistencia física de esta clasificación se contrastó con el flujo neto de onda larga y el balance neto total. La [Figura 7a](#) ilustra la dependencia de LW_{net} respecto a I_{nub} . Bajo condiciones de cielo despejado ($I_{nub} \approx 0$), se registran los balances más negativos (hasta menores a -150 W m^{-2}), donde la baja emisividad efectiva de una atmósfera libre de nubes maximiza el enfriamiento radiativo superficial hacia el espacio exterior. A medida que el índice aumenta hacia la unidad ($I_{nub} \rightarrow 1$), el flujo neto se desplaza de forma continua hacia valores cercanos a cero. Este incremento es una manifestación directa del forzamiento radiativo de onda larga inducido por la base de las nubes, las cuales actúan como un cuerpo negro que incrementa la irradiancia térmica descendente ($LW_{\downarrow}$), mitigando la pérdida neta superficial. Mientras que los estados despejados presentan una mayor dispersión debida a las fluctuaciones del perfil térmico y la humedad atmosférica, los estados nublados convergen de manera compacta, evidenciando el efecto de techo térmico característico de la nubosidad baja y estratiforme.

Por otro lado, la [Figura 7b](#) presenta la relación del I_{nub} con la radiación neta total. En escenarios de cielo claro, el balance alcanza sus niveles máximos ($\approx 850 \text{ W m}^{-2}$), gobernado por una mayor irradiancia solar incidente. Conforme $I_{nub} \rightarrow 1$, se observa una caída lineal de R_{net} , tendiendo a cero bajo condiciones de alta opacidad.

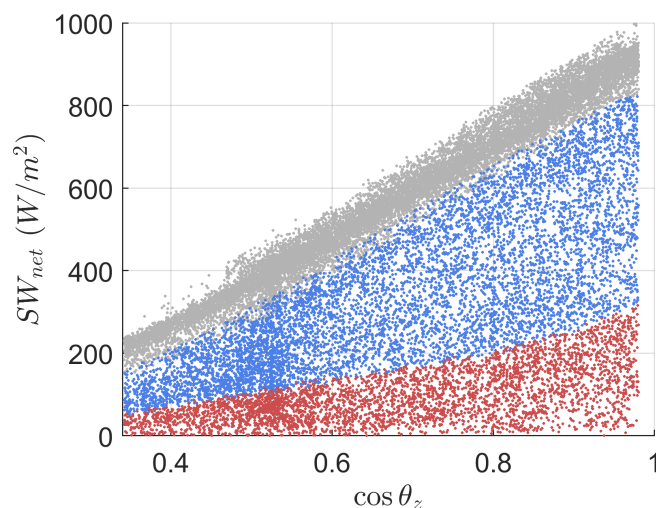


Figura 6. Muestras de SW_{net} según el régimen de nubosidad. En gris, cielo despejado (D); en azul, parcialmente nublado (PN); y en rojo, nublado (N).

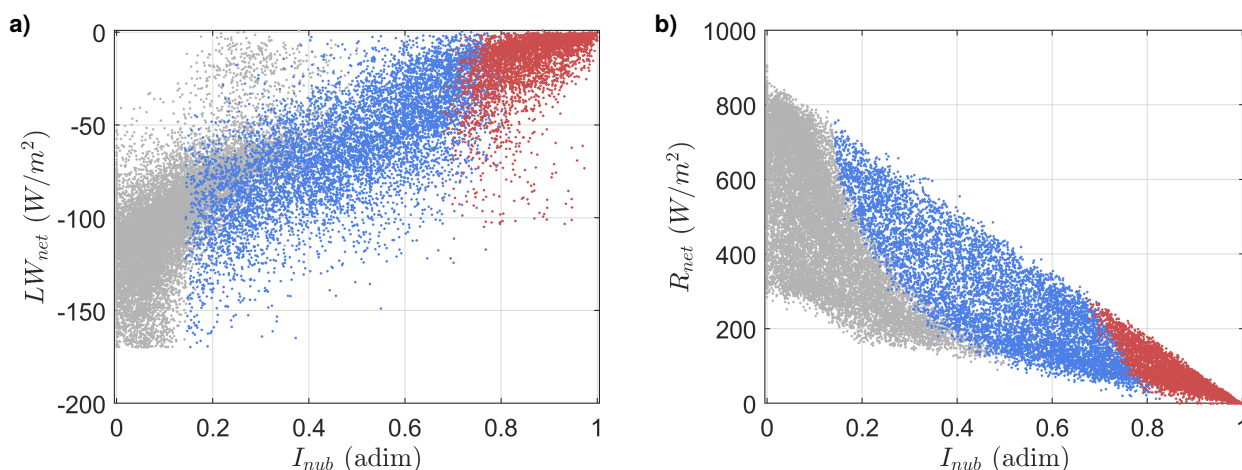


Figura 7. Análisis de los flujos del balance de radiación superficial en función de I_{nub} : a) componente neta de onda larga infrarroja, LW_{net} , cuyo comportamiento muestra que el aumento de la nubosidad reduce el enfriamiento radiativo superficial; y b) balance neto total, R_{net} , cuya pendiente negativa confirma el predominio de la atenuación de onda corta.

Esta tendencia decreciente confirma que el balance energético neto superficial diurno está controlado de forma dominante por la atenuación en el espectro de onda corta. Aunque el incremento de la nubosidad reduce la pérdida neta de onda larga por atrapamiento térmico, este efecto micrometeorológico es insuficiente para compensar la masiva reducción de la irradiancia solar incidente. La consistencia física observada y la baja dispersión en los extremos del dominio respaldan al índice de atenuación radiativa derivado de la radiación neta de onda corta como un proxy y herramienta adecuada para estimar la energía neta disponible en la interfaz suelo-atmósfera.

Clasificación de los años 2023–2024

Para verificar la capacidad de generalización del modelo, se aplicó el esquema de clasificación calibrado con datos de 2020–2022 sobre el registro completo de los años 2023 - 2024. En esta etapa, se mantuvieron los umbrales de cielo claro mensuales de la tabla de la [Figura 4b](#) y los coeficientes polinomiales obtenidos, ver [Tabla 2](#).

Como se observa en la [Figura 8](#), el índice I_{nub} logra clasificar los tres diferentes regímenes de irradiancia en dos años independientes. Los registros clasificados como despejado (puntos grises) se agrupan de forma compacta en la envolvente superior de la nube de datos, como era de esperarse. Por su parte, la categoría parcialmente nublado (puntos azules) captura la transición de los datos

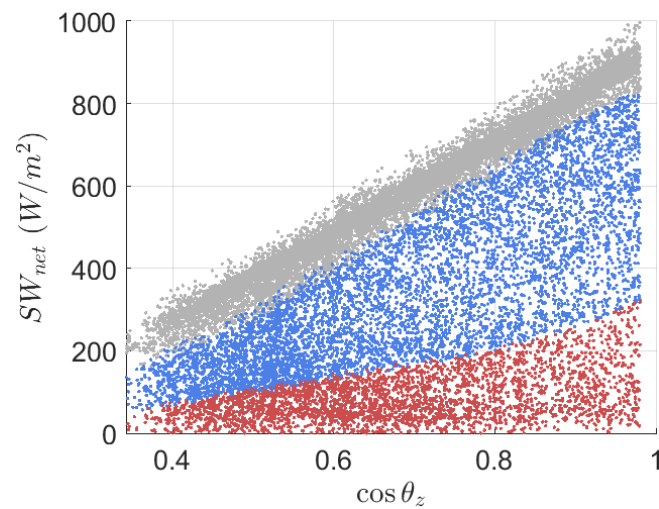


Figura 8. Distribución de SW_{net} en función de $\cos \theta_z$ para el período 2023–2024. Se observa una separación de los tres regímenes atmosféricos, utilizando los límites polinomiales entre años distintos.

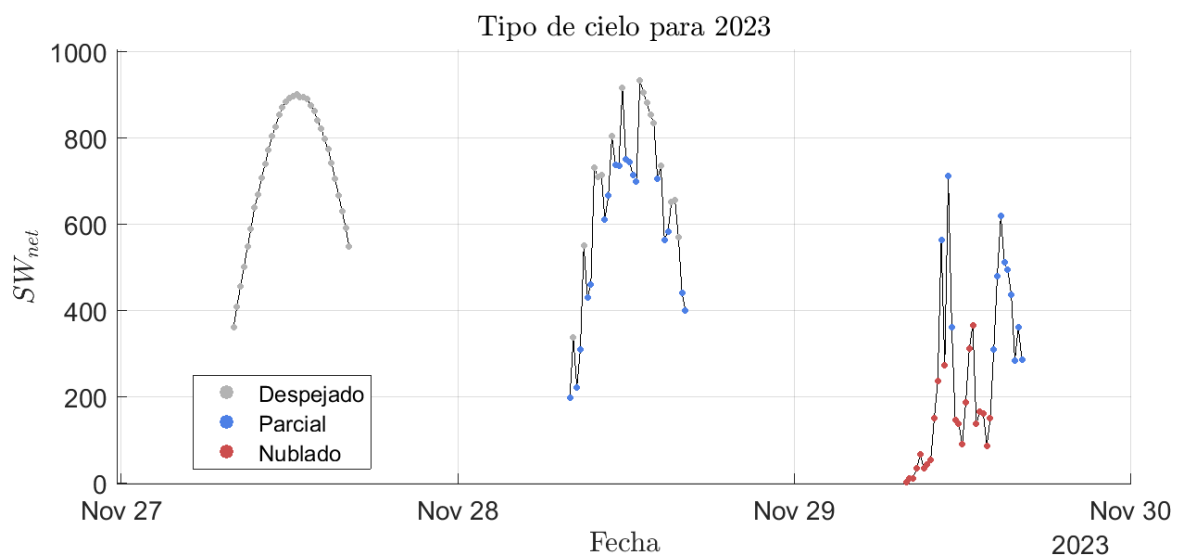


Figura 9. Serie temporal de SW_{net} para un periodo de validación en 2023. Los puntos coloreados indican la clasificación dinámica realizada por el I_{nub} , evidenciando su capacidad para capturar transiciones 15 minutales.

hacia valores inferiores, mientras que la clase nublado (puntos rojos) identifica correctamente los mínimos de radiación, incluso bajo condiciones de alta elevación solar ($\cos \theta_z > 0.9$).

La Figura 9 presenta la evolución temporal de la radiación para tres días consecutivos de noviembre de 2023 (27 a 29), ilustrando la respuesta dinámica del clasificador bajo distintas condiciones de nubosidad. El primer día (27) muestra un perfil de cielo despejado y simétrico. En contraste, los días 28 y 29 muestran variabilidad intradiaria asociada al paso de nubes, evidenciada por caídas abruptas en SW_{net} y desviaciones respecto del comportamiento esperado en condiciones de cielo despejado. En estos casos, el clasificador responde de manera coherente a la modulación radiativa inducida por la nubosidad, identificando como nublado los eventos de mayor atenuación y como parcialmente nublado los periodos de transición con nubosidad variable. La resolución de 15 minutos permite capturar adecuadamente estas fluctuaciones, evidenciando que el índice propuesto es capaz de detectar cambios relativamente rápidos en las condiciones de cielo sin introducir retardos significativos en la clasificación. En conjunto, estos resultados destacan la capacidad del método para representar tanto condiciones estables como la variabilidad transitoria de la nubosidad, lo cual es relevante para estudios del balance energético superficial.

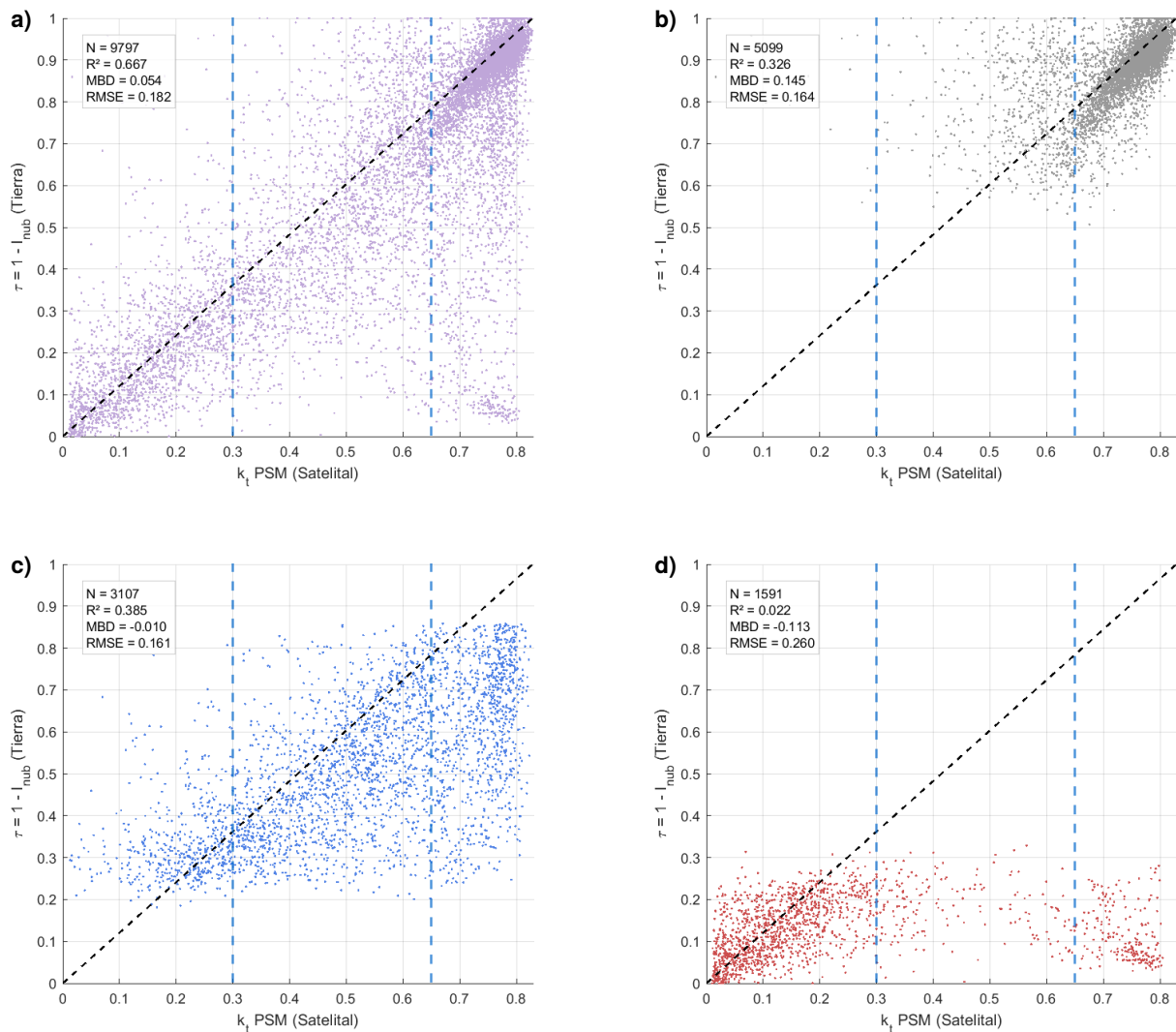


Figura 10. Análisis de consistencia cruzada e indicadores de desempeño para el índice propuesto ($\tau = 1 - I_{nub}$) frente al marco de referencia satelital (k_t) en AGGO, segmentado mediante los umbrales polinómicos dinámicos P_{55} y P_{85} : a) régimen de todo cielo; b) régimen despejado; c) régimen parcialmente nublado; y d) régimen nublado. Las líneas discontinuas azules indican las fronteras adoptadas, mientras que la traza discontinua negra representa la recta de correspondencia teórica.

Consistencia cruzada del índice τ mediante clasificación polinómica dinámica

Ante la ausencia de mediciones continuas y de calidad de GHI en superficie que permitan calcular un índice de claridad terrestre en AGGO, se adoptó el índice de claridad satelital como referencia independiente. En este contexto, la comparación entre k_t y τ permite evaluar su consistencia física y verificar si ambos capturan de manera coherente la variabilidad de la transmitancia atmosférica asociada a la nubosidad.

Los resultados de la comparación interanual entre τ y k_t para el período de estudio se presentan en la Figura 10. Con fines comparativos, los subconjuntos definidos mediante límites dinámicos se contrastan con fronteras fijas similares a las utilizadas habitualmente para la clasificación basada en el índice de claridad (Iqbal, 1983). En particular, se adoptaron los umbrales $k_t = 0.30$ y $k_t = 0.65$, este último ligeramente inferior al valor de 0.70 empleado comúnmente para la identificación de condiciones despejadas, con el fin de adecuar la clasificación al rango de variabilidad observado en los datos y facilitar una comparación más equilibrada con el esquema dinámico propuesto.

El análisis de dispersión global (Figura 10a) muestra correspondencia y correlación lineal entre ambas variables, registrando un coeficiente de correlación de Pearson de $R = 0.816$ ($R^2 = 0.667$) sobre el total de la población ($N = 9797$).

Al examinar de forma independiente los cuadrantes dinámicos, se deduce:

Régimen despejado (Figura 10b) Bajo condiciones de cielo despejado ($N = 5099$), los datos se concentran de forma densa en el extremo superior derecho, encontrando su límite superior físico en $k_t \approx 0.82$. Mientras el parámetro satelital se ve limitado por la atenuación atmosférica basal, el índice desarrollado satura de manera efectiva en la unidad ($\tau \rightarrow 1.0$). Esta asimetría conceptual en el diseño de las escalas genera un sesgo medio positivo (MBD, *mean bias deviation*) de +0.145, con una raíz del error cuadrático medio (RMSE, *root mean square error*) de 0.164, confirmando la capacidad del clasificador para aislar la condición de cielo despejado. Asimismo, las muestras que se extienden a la izquierda del umbral de $k_t = 0.65$, evidencian la capacidad del algoritmo polinómico para rescatar estados limpios bajo altas masas de aire ópticas.

Régimen parcialmente nublado (Figura 10c) La zona de transición o nubosidad parcial ($N = 3017$) representa la dinámica más compleja, exhibiendo asociación moderada ($R^2 = 0.385$) y una dispersión de $RMSE = 0.161$. Este comportamiento es plenamente coherente con las propiedades intrínsecas de formaciones nubosas intermitentes de escala intrahoraria. Esta discrepancia geométrica se atribuye, en parte, al efecto de escala derivado de correlacionar un sensor puntual en tierra, el cual registra el tránsito de nubes sobre el cenit, con la estimación espacial promediada del píxel satelital.

Régimen nublado (Figura 10d) Ante escenarios de alta cobertura u opacidad atmosférica ($N = 1591$), se observa convergencia geométrica hacia el origen ($k_t \rightarrow 0$, $\tau \rightarrow 0$). A pesar de que el agrupamiento asintótico en valores mínimos reduce el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.022$), la distribución revela un comportamiento predecible afectado por un sesgo sistemático uniforme ($MBD = 0.260$ y $RMSE = 0.260$).

Desde el punto de vista operativo, la capacidad del clasificador polinómico para independizar estos regímenes sin requerir instrumentación radiométrica de respaldo consolida a τ como una herramienta adicional para el procesamiento y control de calidad de series climatológicas históricas de radiación neta. Los sesgos identificados no representan fallas de fondo del modelo, sino la constatación física de la correspondencia biunívoca entre un índice k_t y un indicador operativo de atenuación efectiva del sistema suelo-atmósfera. En etapas futuras del proyecto, la integración de registros continuos de GHI medidos en superficie permitirá instrumentar una validación analítica directa contra un índice de claridad puntual como patrón de referencia absoluto.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirman que la radiación neta de onda corta contiene información física suficiente para estimar la atenuación radiativa asociada a la presencia de nubosidad, siempre que se adopte un esquema de normalización adecuado. La correspondencia observada entre el índice I_{nub} , los flujos radiativos de onda larga y la radiación neta total demuestra que este indicador de atenuación no solo captura la extinción de la radiación solar incidente, sino también la respuesta termorradiativa acoplada del sistema suelo-atmósfera. En particular, la mitigación del enfriamiento infrarrojo neto en superficie bajo condiciones de cielo nublado, junto con la dominancia de la atenuación de onda corta en el balance energético diurno, evidencian el sustento físico del enfoque desarrollado para describir el comportamiento radiativo de la atmósfera.

Desde el punto de vista del análisis, la comparación entre el índice de claridad satelital y τ aporta elementos clave sobre la dinámica de los regímenes atmosféricos. En el régimen despejado, la convergencia asintótica de $\tau \rightarrow 1.0$ frente a la limitación física de $k_t \approx 0.82$ demuestra que el modelo normaliza con éxito la firma geométrica solar, independizándola de la atenuación molecular basal. Por el contrario, la dispersión observada en el régimen parcialmente nublado denota un posible desfase espacial intrínseco entre la estimación promediada del píxel satelital y la naturaleza instantánea del sensor en superficie ante la intermitencia de nubes intrahorarias. Finalmente, la convergencia

geométrica hacia el origen ($k_t \rightarrow 0$, $\tau \rightarrow 0$) observada en el régimen nublado confirma que, bajo cubiertas ópticamente densas, ambos indicadores responden de manera coherente a la extinción del flujo radiativo directo.

Desde el punto de vista metodológico, el empleo de percentiles locales y su parametrización polinomial en función del coseno del ángulo cenital solar permite compensar de manera empírica el efecto de la masa de aire óptica. Este esquema dinámico ofrece una posible solución para el procesamiento y filtrado automático de series de datos, lo que representa una ventaja operativa para estaciones meteorológicas que carecen de registros independientes de irradiancia global horizontal. En este sentido, el índice de atenuación propuesto amplía el potencial climatológico y el valor agregado de los registros históricos de radiación neta, variables frecuentemente disponibles en redes de monitoreo ambiental y agrometeorológico.

No obstante, es necesario enfatizar que I_{nub} no constituye una medición directa de la fracción de cobertura nubosa, sino un descriptor radiativo de la transmitancia atmosférica efectiva o, de manera más precisa, un índice de atenuación de la componente de onda corta. Por consiguiente, escenarios atmosféricos complejos, tales como cargas severas de aerosoles, nubes cirrus ópticamente delgadas o variaciones estacionales significativas en el albedo de la superficie, pueden introducir ambigüedades en la interpretación del estado del cielo. Asimismo, los coeficientes polinomiales derivados son estrictamente representativos del sitio de estudio, por lo que su aplicación en regiones con regímenes climáticos disímiles o propiedades ópticas del suelo diferenciadas requerirá de una recalibración local. En consecuencia, I_{nub} debe caracterizarse como una herramienta operativa de diagnóstico y caracterización radiativa local, complementaria a otras fuentes de información atmosférica y no como un sustituto de la observación sinóptica o la cuantificación instrumental directa de la nubosidad.

CONCLUSIONES

El índice de atenuación radiativa desarrollado en este trabajo demuestra que la radiación neta de onda corta contiene información física suficiente para caracterizar de manera operativa el estado radiativo de la atmósfera en el sitio de estudio. La definición del escenario basal de cielo claro mediante el percentil 98 proporcionó una curva de referencia estadísticamente estable, lo que permitió una normalización consistente del índice a lo largo del año sin introducir sesgos estacionales significativos.

La incorporación de una clasificación dinámica basada en la dependencia con el ángulo cenital solar, parametrizada mediante polinomios locales, evitó la imposición de umbrales fijos y mejoró la segmentación automática de los regímenes de atenuación (despejado, parcialmente nublado y nublado) durante parte del ciclo diurno ($\cos \theta_z > 0.342$). Asimismo, la consistencia física del índice fue confirmada a través de su relación con los flujos radiativos de onda larga y el balance radiativo total, evidenciando que el indicador responde adecuadamente al forzamiento termorradiativo acoplado del sistema suelo-atmósfera ante la presencia de cubiertas nubosas.

Finalmente, la evaluación del esquema con un conjunto de datos independiente correspondiente al periodo 2023–2024 confirmó la estabilidad interanual y la robustez temporal del método propuesto dentro del entorno climático local. Si bien los coeficientes polinomiales obtenidos son estrictamente representativos de las condiciones radiativas y superficiales específicas de AGGO, la metodología es potencialmente transferible a otros sitios y amplía de manera significativa el aprovechamiento climatológico de los registros históricos basados exclusivamente en radiación neta, integrando estas series a los estándares analíticos actuales de recursos solares.

Una línea de continuidad de este trabajo consiste en validar el índice de atenuación radiativa utilizando mediciones de irradiancia global horizontal en superficie. La disponibilidad futura de series de GHI extensas y sometidas a controles de calidad permitirá evaluar de forma independiente la capacidad predictiva del índice y su robustez en distintas condiciones atmosféricas.

Agradecimientos Agradecemos al Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia (AGGO) y al Centro Helmholtz de Geociencias (GFZ) por proporcionar los datos medidos de radiación solar neta.

REFERENCIAS

- Antokoletz, E. D., Wziontek, H., Tocho, C. N. y Falk, R. (2020). Gravity reference at the Argentinean-German Geodetic Observatory (AGGO) by co-location of superconducting and absolute gravity measurements. *Journal of Geodesy*, 94(9), 81. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01402-7>
- Campbell Scientific, Inc. (s.f.). *CNR2-L: Long- and short-wave net radiometer*. Recuperado el 29 de abril de 2026 de <https://www.campbellsci.com/cnr2>
- Cawkwell, F. G. L. y Bamber, J. L. (2002). The impact of cloud cover on the net radiation budget of the Greenland ice sheet. *Annals of Glaciology*, 34, 141-149. <https://doi.org/10.3189/172756402781817789>
- Duffie, J. A. y Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4ª ed.). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>
- Ghausi, S. A., Tian, Y., Zehe, E. y Kleidon, A. (2023). Radiative controls by clouds and thermodynamics shape surface temperatures and turbulent fluxes over land. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(29), e2220400120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2220400120>
- Inamdar, A. K. y Guillevic, P. C. (2015). Net surface shortwave radiation from GOES imagery—product evaluation using ground-based measurements from SURFRAD. *Remote Sensing*, 7(8), 10788-10814. <https://doi.org/10.3390/rs70810788>
- Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373750-2.X5001-0>
- Kopp, G. y Lean, J. L. (2011). A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters*, 38, L01706. <https://doi.org/10.1029/2010GL045777>
- Long, C. N. y Shi, Y. (2008). An automated quality assessment and control algorithm for surface radiation measurements. *The Open Atmospheric Science Journal*, 2, 23-37. <https://doi.org/10.2174/1874282300802010023>
- McArthur, L. J. B. (2005). *Baseline Surface Radiation Network (BSRN) operations manual*. WCRP-121 / WMO/TD-No. 1274. Versión 2.1. World Climate Research Programme. <https://epic.awi.de/id/eprint/30644/>
- Mikolaj, M., Güntner, A., Brunini, C., Wziontek, H., Gende, M., Schröder, S., Cassino, A. M., Pasquaré, A., Reich, M., Hartmann, A., Oreiro, F. A., Pendiuk, J., Guarracino, L. y Antokoletz, E. D. (2019). Hydrometeorological and gravity signals at the Argentine-German Geodetic Observatory (AGGO) in La Plata. *Earth System Science Data*, 11(4), 1501-1513. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1501-2019>
- Ohmura, A., Dutton, E. G., Forgan, B., Fröhlich, C., Gilgen, H., Hegner, H., Heimo, A., König-Langlo, G., McArthur, B., Müller, G., Philipona, R., Pinker, R., Whitlock, C. H., Dehne, K. y Wild, M. (1998). Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRP): New precision radiometry for climate research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10), 2115-2136. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<2115:BSRNBW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<2115:BSRNBW>2.0.CO;2)
- 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(5), 1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R. y Zelenka, A. (1990). Making full use of the clearness index for parameterizing hourly insolation conditions. *Solar Energy*, 45(2), 111-114. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90036-C](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90036-C)
- Rodríguez-Muñoz, J. M., Alonso-Suárez, R., Bove, I. y Abal, G. (2024). Assessing the impact of diffuse fraction estimation on ground albedo modeling. *Proceedings of EuroSun 2024*. <https://doi.org/10.18086/eurosun.2024.10.05>
- Sarazola, I., Laguarda, A., Ceballos, J. C. y Alonso-Suárez, R. (2023). Benchmarking of modeled solar irradiation data in Uruguay at a daily time scale. *IEEE Latin America Transactions*, 21(9), 1040-1048. <https://doi.org/10.1109/TLA.2023.10251811>
- Sengupta, M., Xie, Y., Lopez, A., Habte, A., Maclaurin, G. y Shelby, J. (2018). The National Solar Radiation Data Base (NSRDB). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.003>
- Spencer, J. W. (1971). Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, 2(5), 172.
- Stull, R. B. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8>
- Tao, C., Zhang, M. y Xie, S. (2025). Cloud radiative effect dominates variabilities of surface energy budget in the dark Arctic. *Scientific Reports*, 15, 2976. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86322-2>
- Wild, M. (2020). The global energy balance as represented in CMIP6 climate models. *Climate Dynamics*, 55(3), 553-577. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05282-7>
- Wild, M., Hakuba, M. Z., Folini, D., Dörig-Ott, P., Schär, C., Kato, S. y Long, C. N. (2019). The cloud-free global energy balance and inferred cloud radiative effects: An assessment based on direct observations and climate models. *Climate Dynamics*, 52(7), 4787-4812. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4413-y>