

# CARACTERIZACIÓN OBSERVACIONAL DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR EN LOS ANDES CENTRALES DEL PERÚ

José Luis Flores Rojas<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geofísico del Perú,  
Lima, Perú



José Luis Flores es graduado en Física por la Pontificia Universidad Católica del Perú, magíster en Física por la misma casa de estudios y magíster en Meteorología por la Universidad Federal de Rio de Janeiro (UFRJ). Es doctor en Ciencias Atmosféricas por el Instituto de Astronomía, Geofísica y Ciencias Atmosféricas de la Universidad de Sao Paulo (IAG-USP). Actualmente es investigador científico del IGP, con experiencia en las áreas de Física y Geociencias.

**Palabras clave:** Irradiancia solar, irradiancia global, irradiancia directa, irradiancia difusa, valle del Mantaro, Andes centrales del Perú

Citar como Rojas, J. (2024). Caracterización observacional de las componentes de irradiancia solar en los Andes centrales del Perú. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, vol. 11 n.º 05, págs. 4-10.

## ¿Cuál es la **contribución** de esta investigación para los tomadores de decisiones?

La investigación señala que los componentes de la radiación solar muestran picos y declives distintos a lo largo de las estaciones, por lo que los tomadores de decisiones en la región del valle del Mantaro podrían utilizar estos hallazgos para optimizar la planificación agrícola y energética. Además, es importante desarrollar estrategias de manejo de biomasa, y que se considere el impacto que pueden tener los aerosoles en la calidad de la irradiancia. Implementar políticas que promuevan prácticas agrícolas sostenibles también ayudará a reducir la quema de biomasa, y mejorar así la salud ambiental y la productividad agrícola.

## Resumen

Este estudio evalúa de forma exhaustiva los patrones de irradiancia solar en la región occidental del valle del Mantaro, región ecológica y agrícola de los Andes centrales del Perú. Utilizando datos de radiación solar de la estación Baseline Surface Radiation Network (BSRN), instalada en el Observatorio Geofísico de Huancayo (OGHY, 12.04° S, 75.32° W,

3350 m s. n. m), entre los años 2017 y 2022, se analizan las variaciones estacionales y tendencias en los componentes de la irradiancia solar en superficie. Asimismo, se estudian las variaciones diurnas y estacionales de los componentes de la radiación solar, a saber, la irradiancia difusa ( $E_{DF}$ ), directa ( $E_{DR}$ ) y global ( $E_G$ ). Los resultados muestran picos y declives distintos a lo largo de las estaciones, con  $E_{DR}$  y  $E_{DF}$  exhibiendo tendencias estacionales opuestas, lo que

influye en la variabilidad general en  $E_G$ . Los picos de  $E_G$  ocurrieron en primavera ( $3.32 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  al mediodía), particularmente durante octubre ( $24.14 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ). Probablemente, este comportamiento estuvo asociado con eventos de quema de biomasa y un mayor espesor óptico de aerosoles (EOA) presentes en esta región durante la primavera. Estos hallazgos destacan el impacto de los aerosoles de quema de biomasa en la dinámica de la radiación solar en la región. En general, la variabilidad estacional de  $E_G$  en el OGHY es menor que la observada en otras regiones de América del Sur, en latitudes más altas, y alcanza sus máximos durante los meses de primavera.

## 1. Introducción

La radiación solar es la principal fuente de energía que impulsa las interacciones superficie-atmósfera e influencia una amplia gama de procesos físicos, químicos y biológicos dentro de las componentes atmosféricas y oceánicas del sistema terrestre (Arya, 2005; Munner et al., 2004). Comprender los componentes de la irradiación solar, es decir, la radiación global ( $E_G$ ), difusa ( $E_{DF}$ ) y directa ( $E_{DR}$ ) en la superficie, es indispensable para varias aplicaciones. Estas incluyen la identificación de regiones adecuadas para la generación de energía solar (Barragán-Escandón et al., 2022), la evaluación del consumo de energía en edificios (Rodríguez-Hidalgo et al., 2012), el apoyo a estudios ecofisiológicos (Monteith and Unsworth, 1995), la estimación de la evapotranspiración de los cultivos (Supit and Van Kappel, 1998) y la facilitación de la planificación urbana (Redweik et al., 2013). Actualmente, la energía solar y eólica se encuentran entre los recursos renovables más prometedores y factibles. La implementación de sistemas fotovoltaicos (FV) ha experimentado una rápida expansión, con tasas de crecimiento que alcanzan el 40% en los últimos años (Jager-Waldau, 2019).

Por otro lado, en comparación con 1980, las proyecciones futuras asociadas a la variabilidad de la irradiación ultravioleta indican una disminución en la irradiación ultravioleta UV-B, de entre el 5-20%, en latitudes medias a altas para fines del siglo XXI (McKenzie et al., 2011), mientras que, en latitudes bajas, se espera un ligero aumento del 2-3%. Los trópicos ( $25^\circ \text{ N}$ - $25^\circ \text{ S}$ ) muestran una baja variabilidad estacional, con niveles naturales bajos de ozono de alrededor de 250 Unidades Dobson, lo que contribuye

a una alta radiación UV. Es notable el hecho de que en esta región no ha habido cambios significativos en la columna total de ozono durante este período (McKenzie et al., 2011). Los factores que contribuyen al registro de niveles elevados de radiación UV incluyen la altitud de las regiones montañosas, cielos despejados y bajas concentraciones de aerosoles, observadas notablemente en las montañas de los Andes, entre  $12^\circ \text{ S}$  y  $23^\circ \text{ S}$ , donde se cuenta con más de cien picos que superan los 6000 metros sobre el nivel del mar (Blumthaler et al., 1997; Cordero et al., 2014).

En particular, en el OGHY se realizaron mediciones de irradiación solar ultravioleta (UV) entre enero de 2003 y diciembre de 2006, con un radiómetro de filtro multicanal GUV-511 (Suárez Salas et al., 2017). El análisis de datos reveló ciclos diarios, mensuales y anuales de irradiación solar UV en cuatro longitudes de onda (305 nm, 320 nm, 340 nm y 380 nm). Se distinguieron condiciones de cielo despejado y cielo cubierto, siendo febrero el mes con los valores máximos. El índice UV medio más alto al mediodía alcanzó un máximo de 18.8, bajo condiciones de cielo despejado, y 15.5 bajo condiciones de cielo cubierto, con picos atípicos cercanos a 28. La cobertura de nubes aumentó la irradiación espectral en 340 nm, hasta en un 20%, lo que denota niveles excepcionalmente altos de radiación UV en los Andes tropicales centrales del Perú. Sin embargo, hasta la fecha, son muy pocos los estudios dirigidos a investigar, con datos de alta calidad, la radiación solar en todo su rango espectral en los Andes centrales del Perú.

El presente estudio tiene como objetivo analizar de manera integral los patrones de irradiación solar en el valle del Mantaro occidental, mediante el uso de datos de los sensores de BSRN localizados en el Observatorio Geofísico de Huancayo (OGHY), durante el periodo comprendido entre 2017 y 2022. La investigación indaga en las variaciones estacionales y tendencias en los componentes de la irradiación solar de superficie. Específicamente, el estudio explora las fluctuaciones diurnas y estacionales de la irradiación extraterrestre ( $E_T$ ), difusa ( $E_{DF}$ ), directa ( $E_{DR}$ ) y global ( $E_G$ ).

## 2. Instrumentación

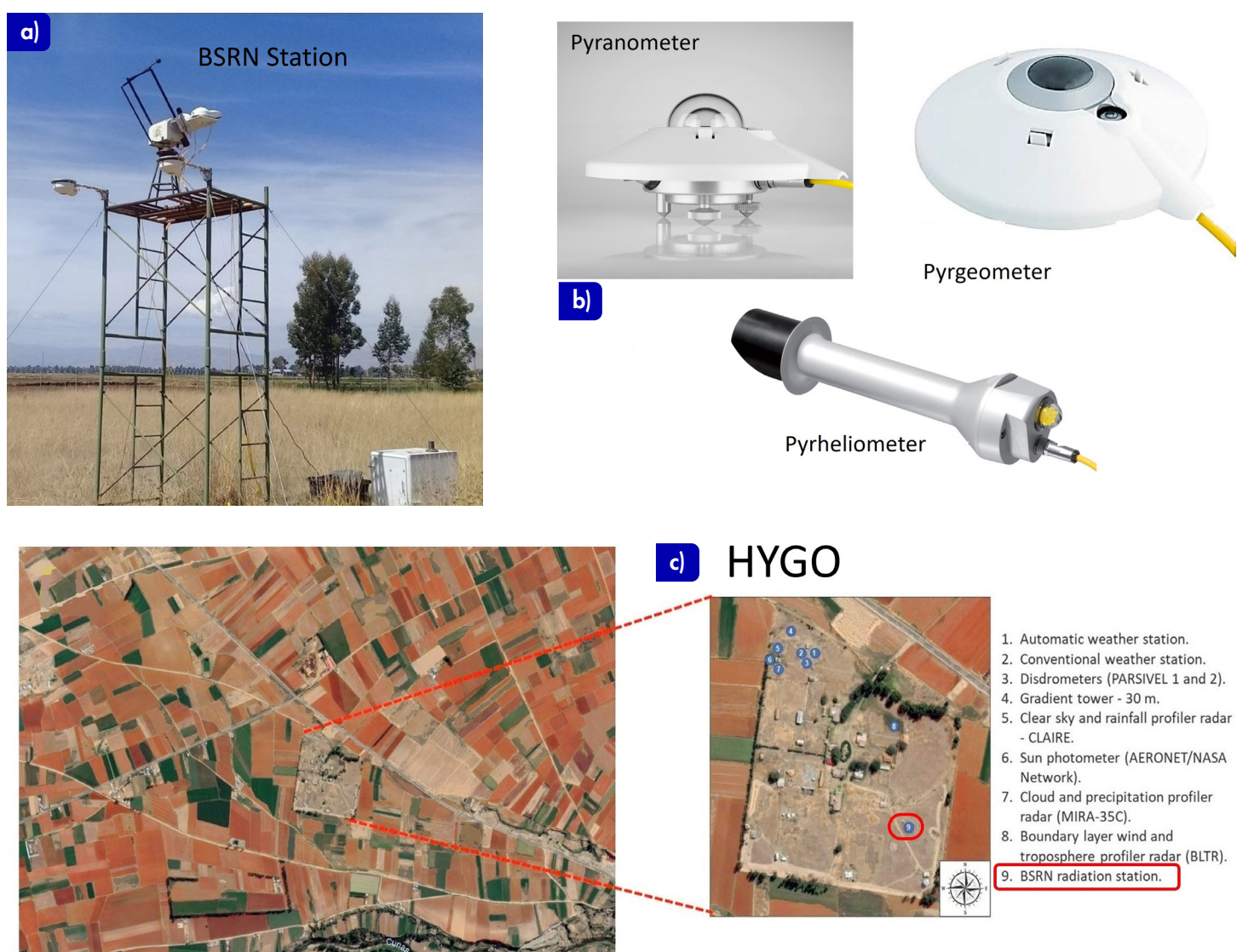
En 2015, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) implementó el Laboratorio de Física, Microfísica y Radiación (LAMAR) en el OGHY. LAMAR cuenta con

un conjunto de instrumentos y sensores variados que pueden utilizarse para medir varias propiedades atmosféricas con alta resolución temporal y espacial, así como para validar modelos físico-numéricos en el valle del Mantaro. El conjunto de sensores de radiación se encuentra instalado en una torre de 6 m de altura (Figura 1a) y contiene tres piranómetros CMP10 (marca Kipp & Zonen): un pirheliómetro CHP1 (marca Kipp & Zonen) y dos pirgeómetros CGR4 (marca Kipp & Zonen) (Figura 1b), empleados para medir los componentes de irradiancia de onda corta (SW) hemisférica y la irradiancia de onda larga (LW) incidente y emitida por la superficie, respectivamente. Dos de los piranómetros se utilizan para medir las irradiancias de onda corta globales y difusas incidentes en la superficie, mientras que el tercero se usa para medir la irradiancia de onda corta reflejada por la superficie. Para medir la irradiancia difusa del cielo bloqueando la irradiancia solar directa, utilizamos una pequeña esfera negra montada en un ensamblaje de sombreado articulado en un seguidor solar automático de dos ejes 2AP (marca Kipp & Zonen). Se pueden encontrar más detalles sobre

estos sensores radiativos en contribuciones recientes (Flores-Rojas et al., 2021). La Figura 1c muestra la ubicación de los instrumentos y sensores de LAMAR dentro del OGHY.

### 3. Base de datos

En este estudio evaluamos las variables de irradiancia solar mediante el análisis de las mediciones de la estación BSRN que se muestran en la Figura 1a y 1b, operadas por el IGP. Los valores de irradiancia solar global, difusa y directa ( $W m^{-2}$ ) fueron medidos, cada minuto, por la estación BSRN, entre mayo de 2017 y diciembre de 2022. También se llevó a cabo un riguroso proceso de control de calidad visual en el conjunto de datos, con el objetivo de identificar y corregir inconsistencias y picos que pudieran atribuirse a fallos electrónicos dentro del sistema de adquisición de datos. Además, aplicamos la metodología introducida por Younes et al. (2005) y por Journee y Cedric (2010) para analizar los datos de series temporales. Los puntos de datos se consideraron



**Figura 1.** (a) Torre de radiación BSRN de 6 m de altura con sensores radiativos ubicados en el Observatorio Geofísico de Huancayo (OGHY); (b) Piranómetro, pirgeómetro y pirheliómetros instalados en la estación BSRN; (c) Área agrícola alrededor del OGHY y la ubicación del conjunto de instrumentos dentro del OGHY. La ubicación de la estación BSRN está resaltada en un recuadro rojo.

válidos si cumplían con criterios específicos, incluido un ángulo de elevación solar ( $\alpha$ ) mayor de 2 grados, así como las siguientes relaciones:

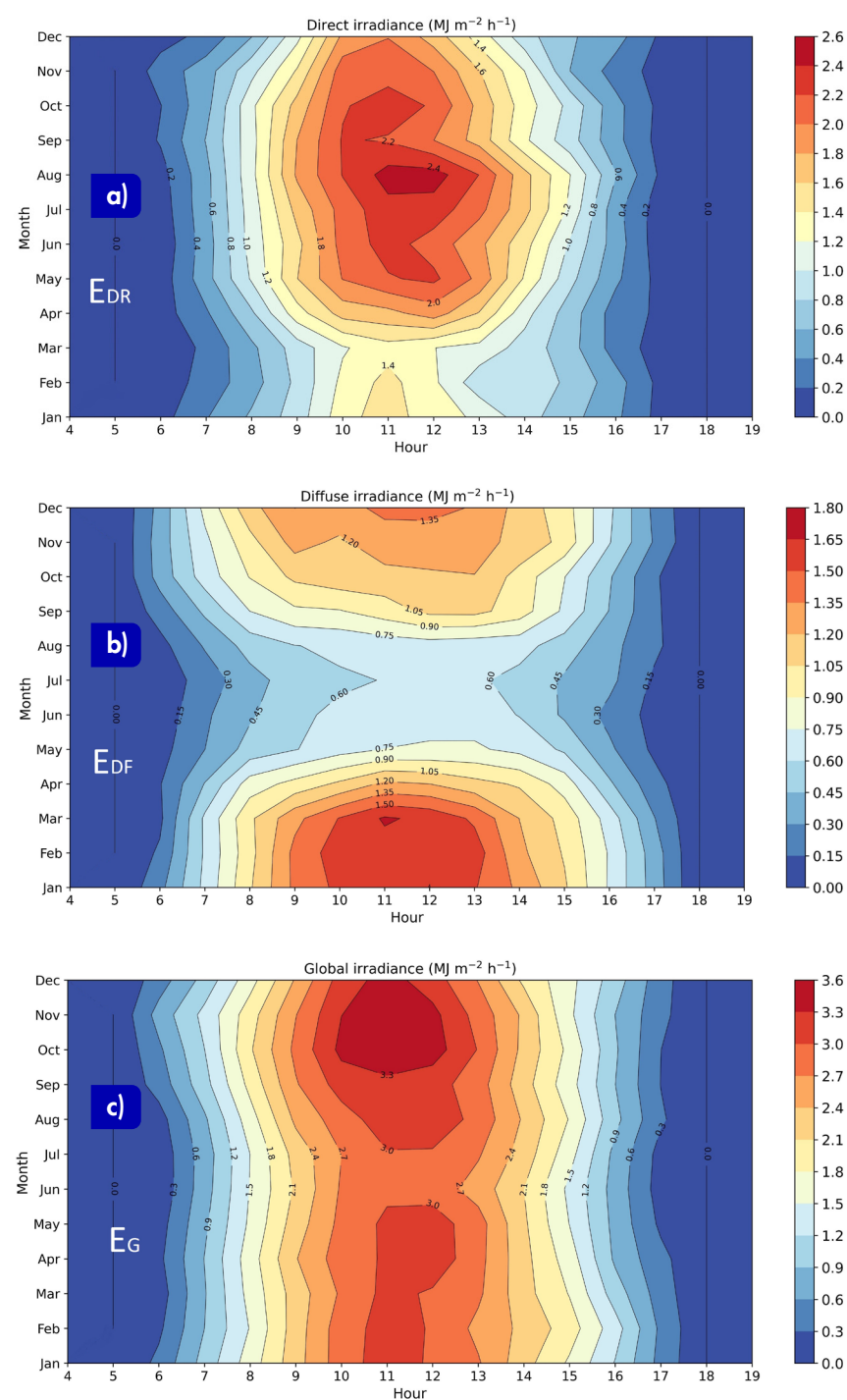
$$E_G/E_T < 1, E_{DF}/E_T < 0.8, E_{DF}/E_G < 1.1$$

En esta ecuación,  $E_T$  representa la radiación solar extraterrestre incidente en una superficie horizontal. Este valor se estimó analíticamente según Iqbal (1983); para ello, se utilizó un valor para la constante solar establecido en  $1367 \text{ W m}^{-2}$  (Frohlich, 1998). Además, aproximadamente el 3.0 % del conjunto de datos fue excluido con base en el criterio del ángulo de elevación ( $\alpha > 2^\circ$ ). Esto correspondió principalmente a mediciones tomadas durante los periodos de amanecer y atardecer, caracterizados por una turbidez atmosférica elevada, especialmente durante las estaciones de invierno y primavera. Un criterio más laxo,  $E_G/E_T < 1$ , llevó a la eliminación del 14.0 % del conjunto de datos, sin una dependencia observable de la turbidez atmosférica o la estacionalidad. Sin embargo, el criterio más estricto,  $E_{DF}/E_T < 0.8$ , resultó en la exclusión del 33 % del conjunto de datos, predominantemente durante los meses de verano (caracterizados por un aumento de las precipitaciones). Por último, el criterio  $E_{DF}/E_G < 1.1$  solo llevó a la exclusión del 1 % del conjunto de datos y no mostró una dependencia discernible de factores astronómicos o estacionales (Marques Filho et al., 2016). Siguiendo procedimientos rigurosos de control de calidad de datos, identificamos y seleccionamos 1650 días para capturar eficazmente las variaciones estacionales de la radiación solar en toda la región. Este conjunto de datos abarca aproximadamente el 76 % de todo el período de observación.

## 4. Resultados

**Tabla 1.** Valores promedio estacionales por hora de los componentes de irradiación solar:  $E^h_T$ ,  $E^h_G$ ,  $E^h_{DF}$  y  $E^h_{DR}$  observados en el OGHY. Los valores por hora corresponden al mediodía (12:00, hora local).

Irradiancias ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
$E^h_T$	$4.83 \pm 0.14$	$4.33 \pm 0.16$	$3.94 \pm 0.11$	$4.74 \pm 0.17$
$E^h_G$	$3.11 \pm 0.16$	$3.02 \pm 0.18$	$3.08 \pm 0.14$	$3.32 \pm 0.22$
$E^h_{DF}$	$1.67 \pm 0.22$	$1.18 \pm 0.17$	$0.64 \pm 0.16$	$1.32 \pm 0.24$
$E^h_{DR}$	$1.37 \pm 0.21$	$1.65 \pm 0.23$	$2.27 \pm 0.19$	$1.92 \pm 0.27$



**Figura 2.** Ciclos estacionales y horarios de las irradiancias solares promedio: (a) directa ( $E^h_{DR}$ ), (b) difusa ( $E^h_{DF}$ ) y (c) global ( $E^h_G$ ) en el GOHY ( $12.0^\circ \text{ S}$ ,  $73.5^\circ \text{ W}$ ), desde julio de 2017 hasta septiembre de 2022. Los gráficos muestran los valores medios de las variables calculados entre mayo de 2017 y diciembre de 2022.

Los valores medios estacionales por hora de los componentes de irradiación solar están identificados por el superíndice  $h$ . La fluctuación estacional en la evolución diurna de  $E^h_{DR}$  (Figura 2a) se deriva de la matriz de valores promedio mensuales de  $E^h_{DR}$ , los cuales son interpolados utilizando el método de interpolación cúbica. El promedio mensual de  $E^h_{DR}$  al mediodía alcanza un pico cercano a  $2.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  durante el invierno (julio) y desciende a un mínimo cercano a  $1.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  en verano (febrero). Además, el promedio mensual de  $E^h_{DF}$  (Figura 2b) alcanza al mediodía un pico alrededor de  $1.80 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  durante el verano (febrero), y desciende a un mínimo alrededor de  $0.45 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  en invierno (julio). Por el contrario, el promedio mensual de  $E^h_G$  (Figura 2c) alcanza al mediodía un pico alrededor de

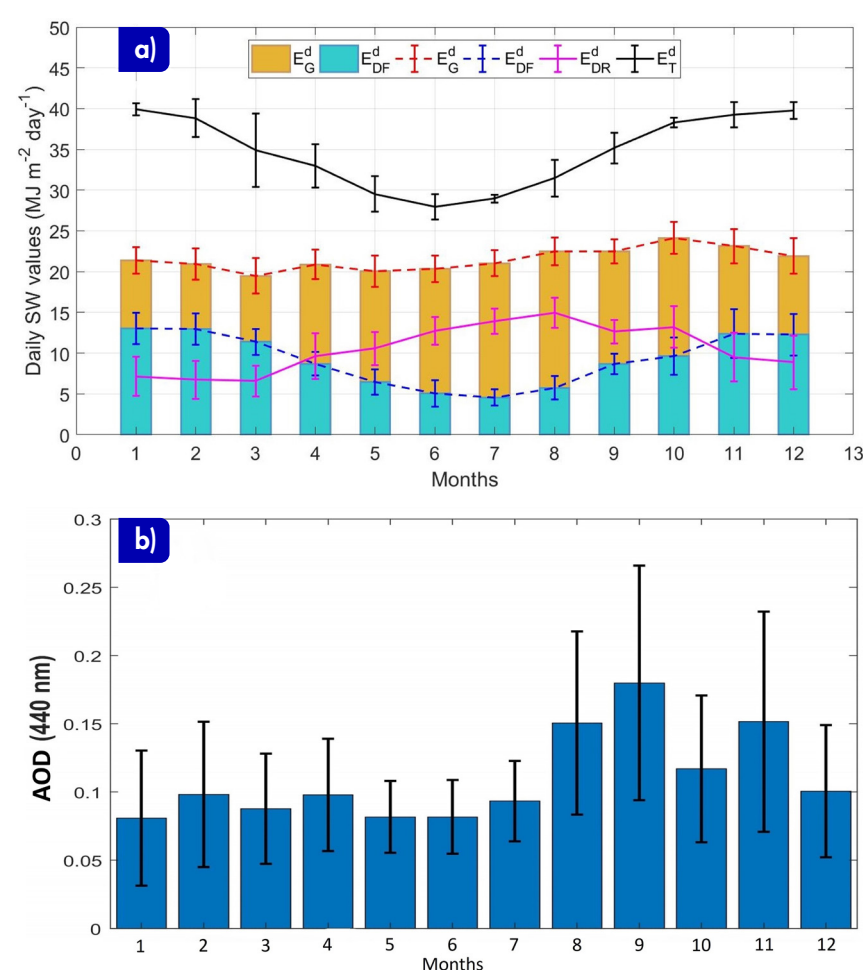
3.6 MJ m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup> durante la primavera (octubre), y desciende a un mínimo cercano a 2.7 MJ m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup> en invierno (julio).

Los valores de E<sup>h<sub>G</sub></sup> más altos no se observan durante los meses de verano debido, principalmente, a los altos niveles de nubosidad existentes en esos meses. El análisis de los resultados muestra que los valores de E<sup>h<sub>G</sub></sup> más altos se observan en los meses de primavera y están asociados a una combinación de factores astronómicos, patrones de nubosidad y concentración de aerosoles observados durante el periodo 2017-2022 en el OGHY. Durante este período, la precipitación diaria acumulada alcanzó valores máximos y medios de alrededor de 24 mm día<sup>-1</sup> y 5 mm día<sup>-1</sup>, respectivamente. El valor máximo está por debajo de la normal climática en octubre (con máximos cercanos a 37 mm día<sup>-1</sup>) y el valor medio está cerca del valor medio climático (alrededor de 4 mm día<sup>-1</sup>). Además, las horas de sol durante octubre alcanzan un máximo cercano a 10 horas. La combinación de estos factores indica que la reducción en la precipitación y la presencia moderada de aerosoles parecen estar asociadas a la reducción en la cobertura de nubes que favoreció grandes valores de E<sup>h<sub>G</sub></sup>.

Además, la Tabla 1 muestra los valores específicos para el ciclo diurno de E<sub>T</sub>, E<sub>G</sub>, E<sub>DF</sub> y E<sub>DR</sub> observados en el OGHY. Durante el verano, E<sup>h<sub>G</sub></sup> constituye el 64.4 % de E<sup>h<sub>T</sub></sup>. Además, E<sup>h<sub>DF</sub></sup> y E<sup>h<sub>DR</sub></sup> representan el 53.7 % y el 44.10 % de E<sup>h<sub>G</sub></sup>, respectivamente. En contraste, durante el invierno, E<sup>h<sub>G</sub></sup> representa el 78.2 % de E<sup>h<sub>T</sub></sup>, mientras que E<sup>h<sub>DF</sub></sup> y E<sup>h<sub>DR</sub></sup> representan el 20.8 % y el 73.7 % de E<sup>h<sub>G</sub></sup>, respectivamente. Por otro lado, durante el otoño, E<sup>h<sub>G</sub></sup> constituye el 69.7 % de E<sup>h<sub>T</sub></sup>. Además, E<sup>h<sub>DF</sub></sup> y E<sup>h<sub>DR</sub></sup> representan el 39.1 % y el 54.6 % de E<sup>h<sub>G</sub></sup>, respectivamente. Finalmente, es destacable que, durante la primavera, E<sup>h<sub>G</sub></sup> supera los valores promedio de verano, constituyendo el 70.0 % de E<sup>h<sub>T</sub></sup>. Asimismo, E<sup>h<sub>DF</sub></sup> y E<sup>h<sub>DR</sub></sup> representan el 39.8 % y el 57.8 % de E<sup>h<sub>G</sub></sup>, respectivamente.

De forma adicional, la variación estacional de los valores promedio mensuales diarios de los componentes de la radiación solar en la superficie del OGHY se presenta en la Figura 3a, renombrada con el superíndice d. Los valores más altos de E<sup>d<sub>G</sub></sup> se observan en octubre (primavera), con aproximadamente 24.14 ± 2.10 MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, mientras que los valores más bajos de E<sup>d<sub>G</sub></sup> se observan en marzo (otoño), con aproximadamente 19.50 ± 2.15 MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>. Además,

los valores más altos de E<sup>d<sub>DR</sub></sup> se observan en agosto (invierno), con aproximadamente 14.97 ± 1.82 MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, aunque también se registran valores altos de E<sup>d<sub>DR</sub></sup> en septiembre y octubre (primavera), probablemente asociados, en parte, con elevados valores de la profundidad óptica de aerosoles a 440 nm que ocurren durante estos meses (Figura 3b). Los valores más bajos de E<sup>d<sub>DR</sub></sup> se observan durante marzo (otoño), con aproximadamente 6.59 ± 1.89 MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>. Por otro lado, los valores más altos de E<sup>d<sub>DF</sub></sup> se observan en enero (verano), con aproximadamente 13.03 ± 1.91 MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, mientras que los valores más bajos se observan en julio (invierno), con aproximadamente 4.57 ± 1.0 MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>. Este comportamiento de E<sup>d<sub>DF</sub></sup> puede explicarse por la fuerte variación estacional de nubes y precipitación en el OGHY.



**Figura 3.** (a) Variación mensual de los componentes de la irradiación solar (E<sup>d<sub>G</sub></sup>, E<sup>d<sub>DF</sub></sup> y E<sup>d<sub>DR</sub></sup>) y (b) el coeficiente de turbidez de Angstrom o espesor óptico de aerosoles (AOD) observados en el OGHY. Las barras de error representan el intervalo de confianza del 95 % para la media.

## 4. Discusión

La variación estacional en E<sup>h<sub>G</sub></sup>, especialmente al mediodía, exhibe una amplitud baja que va desde 3.02 ± 0.18 MJ m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> en otoño hasta 3.32 ± 0.22 MJ m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> en primavera, lo que resulta en una amplitud estacional cercana a 0.30 MJ m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Esta amplitud es notablemente menor que la variación en E<sup>h<sub>T</sub></sup> que

alcanza aproximadamente  $0.90 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Este patrón puede atribuirse a las variaciones estacionales opuestas de los componentes de irradiación solar  $E_{DF}^h$  y  $E_{DR}^h$  que atenúan la variación estacional de  $E_G^h$ . Específicamente,  $E_{DF}^h$  alcanza su pico durante el verano y su mínimo en invierno, mientras que  $E_{DR}^h$  alcanza su pico en invierno y su mínimo en verano. Durante la primavera, los valores moderados de  $E_{DF}^h$  y  $E_{DR}^h$  conducen a los valores más altos de  $E_G^h$  en esta temporada. Este comportamiento está asociado con la reducción de la precipitación, una cobertura nubosa moderada y la presencia de aerosoles, posiblemente procedentes de la quema de biomasa en el OGHY durante los meses de primavera (Estevan et al., 2019).

Además, los valores promedio mensuales diarios de los componentes de radiación solar en el OGHY corroboran los patrones estacionales observados en las variables de irradiación por hora. Los valores máximos de  $E_G^d$  son evidentes en octubre (primavera), en contraste con los valores más bajos observados en marzo (otoño). De manera similar, los valores máximos de  $E_{DR}^d$  se manifiestan en agosto (invierno), con ocurrencias notables en septiembre y octubre (primavera), atribuibles a una mayor profundidad óptica de aerosoles (Estevan et al. 2019). En contraste,  $E_{DF}^d$  alcanza su máximo en enero (verano) y su punto más bajo en julio (invierno), lo que refleja las pronunciadas fluctuaciones estacionales de nubes y precipitación en el OGHY (Giráldez et al., 2020).

## Conclusiones

El objetivo de este estudio fue analizar las variaciones diurnas y estacionales de  $E_{DR}$ ,  $E_{DF}$  y  $E_G$  en el valle occidental del Mantaro. Los resultados indican que  $E_{DR}^h$  alcanza al mediodía su punto máximo en invierno ( $2.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) y disminuye en verano ( $1.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ), mientras que  $E_{DF}^h$  alcanza su máximo en verano ( $1.80 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) y disminuye en invierno ( $0.45 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ). Además,  $E_{DR}^d$  alcanza su máximo en primavera ( $3.6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) y disminuye en invierno ( $2.7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ), influenciado por factores astronómicos, nubosidad y concentraciones de aerosoles observadas durante el periodo 2017-2022. La variación estacional de los componentes de radiación solar diaria en la superficie del OGHY revela valores máximos de  $E_{DR}^d$  en invierno, particularmente en agosto ( $14.97 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ), y los valores más bajos en marzo ( $6.59 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ). Por otro lado, los valores máximos de  $E_{DF}^d$  ocurren

en verano, especialmente en enero ( $13.03 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ), con los valores más bajos observados en invierno, particularmente en julio ( $4.57 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ).

Es destacable que los valores máximos de  $E_G^d$  ocurrieron en primavera, con el registro más alto en octubre ( $24.14 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) y el más bajo durante marzo ( $20.95 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ). Este comportamiento de  $E_G^d$  puede estar relacionado con períodos de quema de biomasa, correlacionado con niveles elevados de profundidad óptica de aerosoles (AOD) en la región del valle del Mantaro. Estos períodos se extienden anualmente de julio a octubre, siendo septiembre el mes con los valores máximos de AOD. Estos meses coinciden con un aumento de la actividad de incendios forestales, tanto a nivel local en Perú como en países vecinos. La evidencia sugiere la llegada de aerosoles de quema de biomasa procedentes de incendios forestales ocurridos en Brasil y Bolivia (Estevan et al., 2019).

Cabe señalar que la presente investigación forma parte del artículo científico de Fashé-Raymundo et al. (2024).

## Referencias

- Arya, S. P. (2005). Micrometeorology and Atmospheric Boundary Layer. *Pure and Applied Geophysics*, 162(10), 1721–1745. doi:10.1007/s00024-005-2690-y
- Barragán-Escandón, E. A., Zalamea-León, E., Calle-Sigüencia, J., & Terrados-Cepeda, J. (2022). Impact of Solar Thermal Energy on the Energy Matrix under Equatorial Andean Context. *Energies*, 15(16), 5803.
- Blumthaler, M., Ambach, W., & Ellinger, R. (1997). Increase in solar UV radiation with altitude. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 39(2), 130–134. doi:10.1016/s1011-1344(96)00018-8
- Cordero, R. R., Seckmeyer, G., Damiani, A., Riechelmann, S., Rayas, J., Labbe, F., & Laroze, D. (2014). The world's highest levels of surface UV. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 13(1), 70–81. doi:10.1039/c3pp50221j
- Estevan, R., Martínez-Castro, D., Suarez, L., Moya, A., & Silva, Y. (2019). First two and a half years of aerosol measurements with an AERONET sunphotometer at the Huancayo Observatory, Peru. *Atmospheric Environment: X*, 100037. doi:10.1016/j.aeaoa.2019.100037
- Fashé-Raymundo, O., Flores-Rojas, J.L., Estevan-Arredondo, R., Giráldez-Solano, L., Suárez-Salas, L., Sanabria-Pérez, E., Karam, H.A., & Silva, Y. (2024). Observational characterization and empirical modeling of global, direct and diffuse solar irradiances at the Peruvian central Andes. *Front. Earth Sci.* 12:1399971. doi:10.3389/feart.2024.1399971

Flores-Rojas, J. L., Silva, Y., Suárez-Salas, L., Estevan, R., Valdivia-Prado, J., Saavedra, M., ... Martínez-Castro, D. (2021). Analysis of Extreme Meteorological Events in the Central Andes of Peru Using a Set of Specialized Instruments. *Atmosphere*, 12(3), 408. doi:10.3390/atmos12030408

Fröhlich, C., & Lean, J. (1998). The Sun's total irradiance: Cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976. *Geophysical Research Letters*, 25(23), 4377-4380.

Giráldez, L., Silva, Y., Zubieta, R., & Sulca, J. (2020). Change of the Rainfall Seasonality Over Central Peruvian Andes: Onset, End, Duration and Its Relationship With Large-Scale Atmospheric Circulation. *Climate*, 8(2), 23. doi:10.3390/cli8020023

Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Irradiation*. Academic Press.

Jäger-Waldau, A. (2019). *PV status report 2019*. Publications Office of the European Union: Luxembourg, 7-94.

Journée, M., & Bertrand, C. (2011). Quality control of solar radiation data within the RMIB solar measurements network. *Solar Energy*, 85(1), 72–86. doi:10.1016/j.solener.2010.10.

Marques Filho, E. P., Oliveira, A. P., Vita, W. A., Mesquita, F. L. L., Codato, G., Escobedo, J. F., ... França, J. R. A. (2016). Global, diffuse and direct solar radiation at the surface in the city of Rio de Janeiro: Observational characterization and empirical modeling. *Renewable Energy*, 91, 64–74. doi:10.1016/j.renene.2016.01.0

McKenzie, R. L., Aucamp, P. J., Bais, A. F., Björn, L. O., Ilyas, M., & Madronich, S. (2011). Ozone depletion and climate change: impacts on UV radiation. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 10(2), 182. doi:10.1039/c0pp90034f

Monteith, J.L, and Unsworth, M. (1995). *Principles of Environmental Physics: Plants, Animals and the Atmosphere (4th edition)*. Elsevier.

Munner, T., Gueymard, C. and Kambezidis, H. (2004). *Solar Radiation and daylight models*. Elsevier.

Redweik, P., Catita, C., & Brito, M. (2013). Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Solar Energy*, 97, 332–341. doi:10.1016/j.solener.2013.08.036

Rodríguez-Hidalgo, M. C., Rodríguez-Aumente, P. A., Lecuona, A., Legrand, M., & Ventas, R. (2012). Domestic hot water consumption vs. solar thermal energy storage: The optimum size of the storage tank. *Applied Energy*, 97, 897–906. doi:10.1016/j.apenergy.2011.12

Suárez Salas, L. F., Flores Rojas, J. L., Pereira Filho, A. J., & Karam, H. A. (2017). Ultraviolet solar radiation in the tropical central Andes (12.0°S). *Photochemical & Photobiological Sciences*, 16(6), 954–971. doi:10.1039/c6pp00161k

Supit, I., & van Kappel, R. R. (1998). A simple method to estimate global radiation. *Solar Energy*, 63(3), 147–160. doi:10.1016/s0038-092x(98)00068-1

Younes, S., Claywell, R., & Muneer, T. (2005). Quality control of solar radiation data: Present status and proposed new approaches. *Energy*, 30(9), 1533–1549. doi:10.1016/j.energy.2004.04.0