XXXII SIMPOSIO PERUANO DE FÍSICA
1er CONGRESO INTERNACIONAL DE FÍSICA
Arequipa, 17–20 de noviembre de 2026

Irradiancia espectral de cielo despejado en un sitio andino tropical de altura: validación de SMARTS y libRadtran alimentados con reanálisis y pronósticos globales de aerosol

Alejandro Paxi Silva, Alberto Montoya Portugal, Ernesto Palo Tejada, **Carlos Taco Chila***, Rodrigo Joseph Quispe Andrade, Luis Angel Conde Mendoza y Wilson Braulio Ramos Ccoa

Departamento Académico de Física, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú
*Expositor: Carlos Taco Chila (ctaco@unsa.edu.pe) · Correspondencia: Alejandro Paxi Silva (apaxi@unsa.edu.pe)

Resumen

Los modelos de irradiancia solar espectral rara vez se validan en sitios tropicales de altura sin medidas locales de aerosol, la situación de casi todos los Andes. Validamos SMARTS 2.9.5 y libRadtran 2.0.6 frente a la irradiancia global espectral medida cada minuto con un espectrorradiómetro EKO MS-711 a 2335 m en Arequipa (abril–mayo y agosto–octubre de 2026), alimentando ambos modelos solo con el reanálisis ERA5 y los pronósticos de aerosol de CAMS. En 689 casos de cielo despejado de 121 días, el sesgo medio en 315–1100 nm es de $-1{,}16$ % (SMARTS) y $-0{,}22$ % (libRadtran), con un RMSE de 4,0–4,3 %. La incertidumbre de las entradas (1,6–1,7 %, por Monte Carlo) supera ese sesgo, que no puede atribuirse a ninguno de los modelos. El sesgo lo gobierna el aerosol de entrada: correlaciona con el espesor óptico de CAMS con la misma pendiente en ambos modelos (-23 % por unidad de AOD), y con el pronóstico GEOS-FP de la NASA (espesor óptico medio de 0,068 frente a 0,129) se vuelve positivo, de modo que ambos productos acotan la medida. En los Andes, la calidad del aerosol de entrada importa más que la elección del modelo.

689
casos horarios de cielo despejado, 121 días

$-0{,}2$ %
sesgo de libRadtran en 315–1100 nm (SMARTS: $-1{,}2$ %)

1,7 %
incertidumbre de las entradas: mayor que el sesgo

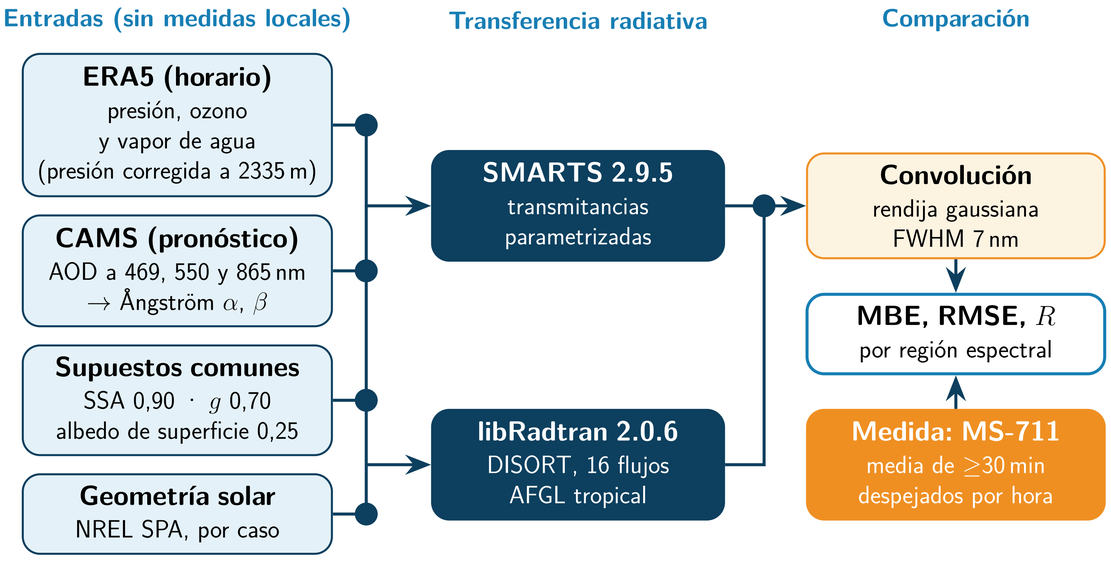
-23 %
sesgo por unidad de AOD de CAMS, igual en ambos modelos

Introducción

El espectro solar importa para la fotovoltaica (Dirnberger et al., 2015), la degradación de materiales y el UV. Donde no se mide, se estima con modelos de cielo despejado (Gueymard, 2019; Emde et al., 2016), que necesitan presión, ozono, vapor de agua y, sobre todo, **aerosol**. En los Andes del sur, la región más irradiada de la Tierra (Cordero et al., 2023), casi no hay fotómetros solares: esas entradas deben salir de reanálisis y pronósticos globales (Gueymard y Yang, 2020).

Pregunta: ¿con qué exactitud reproducen SMARTS y libRadtran el espectro global medido a 2335 m en Arequipa cuando se alimentan *solo* con ERA5 y CAMS?

Metodología



- **Mismas entradas** en ambos modelos: las diferencias son del modelo, no de la atmósfera supuesta.
- Casos elegidos solo con la medida (ningún modelo interviene): **689 horas de 121 días**, abril–octubre de 2026.

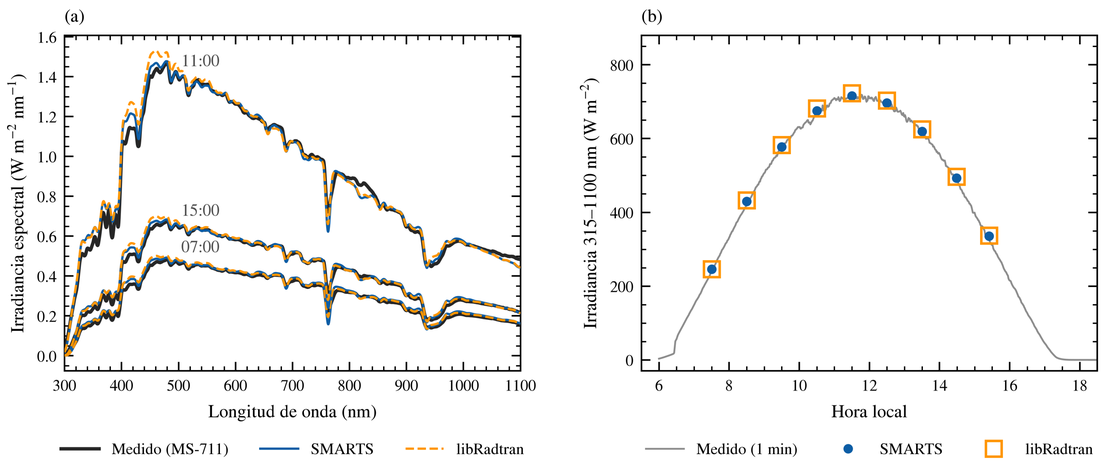


Figura 1. Caso del 19 de mayo de 2026: (a) espectros medido y modelados a las 07:00, 11:00 y 15:00; (b) irradiancia en 315–1100 nm a lo largo del día (gris: medida minuto a minuto; símbolos: instantes simulados).

Resultados

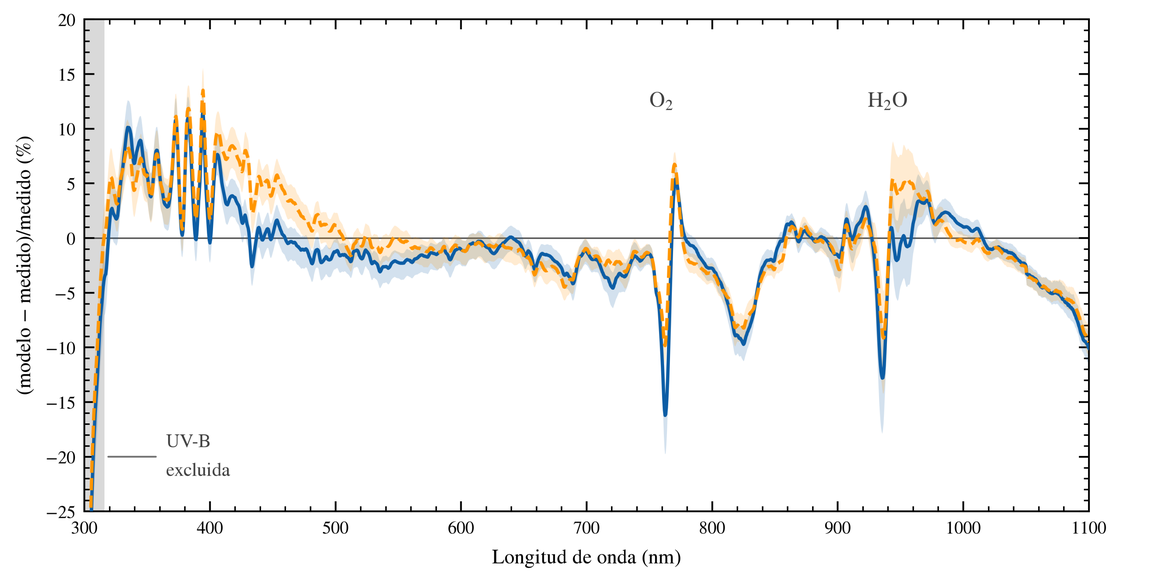


Figura 2. Residuo relativo (modelo − medido)/medido: mediana y rango intercuartil de 230 de los 689 casos. UV-B (sombreado) excluido. En el O_2 (760 nm) y el vapor de agua (820 y 940 nm) los modelos absorben más de lo medido.

Tabla 1. Métricas frente al MS-711 en 689 casos de cielo despejado.

	SMARTS		libRadtran	
Región	MBE (%)	RMSE (%)	MBE (%)	RMSE (%)
UV-A (315–400 nm)	$+5{,}11$	6,67	$+5{,}50$	6,84
Visible (400–700 nm)	$-1{,}16$	2,86	$+0{,}39$	3,71
NIR (700–1100 nm)	$-2{,}27$	4,86	$-2{,}07$	4,29
315–1100 nm	$\mathbf{-1{,}16}$	**4,00**	$\mathbf{-0{,}22}$	**4,32**

- De los 0,93 puntos entre modelos, **0,62 vienen de sus espectros extraterrestres**.
- El desempeño no se degrada con el ángulo cenital solar (2,8–75,9°).

Análisis de resultados

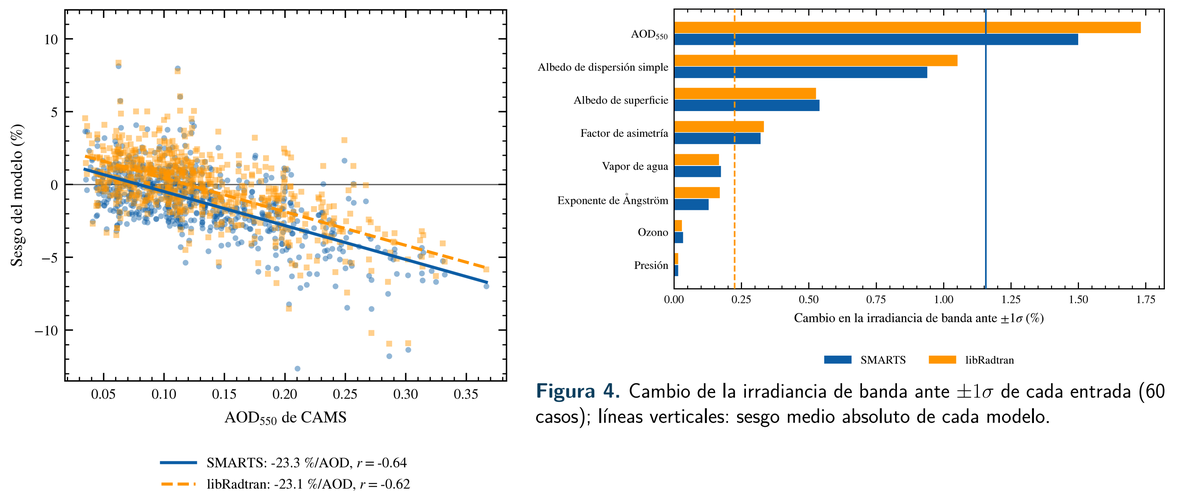


Figura 3. Sesgo en 315–1100 nm frente al AOD de CAMS.

Figura 4. Cambio de la irradiancia de banda ante $\pm 1\sigma$ de cada entrada (60 casos); líneas verticales: sesgo medio absoluto de cada modelo.

- El sesgo correlaciona con el AOD de CAMS ($r = -0{,}64$ y $-0{,}62$) con la **misma pendiente** en ambos modelos: la causa es la entrada de aerosol compartida.
- Con **GEOS-FP** (AOD medio 0,068 frente a 0,129 en CAMS) el sesgo pasa a $+0{,}32$ y $+1{,}35$ %: los dos pronósticos **acotan** la medida.
- La incertidumbre de las entradas (1,6–1,7 %), dominada por el aerosol, supera el sesgo observado.

Conclusiones

1. Solo con ERA5 y CAMS, ambos modelos reproducen el espectro medido a 2335 m: sesgo de $-1{,}16$ y $-0{,}22$ %, RMSE de 4,0–4,3 %.
2. El sesgo cabe en la incertidumbre de las entradas y lo gobierna el **aerosol de entrada**, no el modelo.
3. Hay que convolucionar con la rendija del instrumento y excluir el UV-B medido (luz parásita).
4. **Medir el aerosol localmente** mejoraría más las estimaciones que refinar el modelo.

Referencias

R. R. Cordero et al. Surface Solar Extremes in the Most Irradiated Region on Earth, Altiplano. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 104(6):E1206–E1221, 2023. doi: 10.1175/BAMS-D-22-0215.1.

D. Dirnberger, B. Müller, y C. Reise. On the uncertainty of energetic impact on the yield of different PV technologies due to varying spectral irradiance. *Solar Energy*, 111:82–96, 2015. doi: 10.1016/j.solener.2014.10.033.

C. Emde et al. The libRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1). *Geoscientific Model Development*, 9(5):1647–1672, 2016. doi: 10.5194/gmd-9-1647-2016.

C. A. Gueymard. The SMARTS spectral irradiance model after 25 years: New developments and validation of reference spectra. *Solar Energy*, 187:233–253, 2019. doi: 10.1016/j.solener.2019.05.048.

C. A. Gueymard y D. Yang. Worldwide validation of CAMS and MERRA-2 reanalysis aerosol optical depth products using 15 years of AERONET observations. *Atmospheric Environment*, 225: 117216, 2020. doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117216.

Agradecimientos

Al CIALE-UNSA, por la operación de la estación espectrorradiométrica y los datos, y a Copernicus y al GMAO de la NASA, por sus datos abiertos.