

Análisis de índice de radiación ultravioleta producto del satélite Aura referido a dos instrumentos terrestres ubicados en el cantón Mejía Ecuador

Analysis of ultraviolet radiation index from the Aura satellite referred to two ground-based instruments located in the Mejía canton, Ecuador

Christian Salazar-Noroña^[0000-0001-6449-8862], Sergio Castillo-Páez^[0000-0002-5402-2462]

¹ Universidad Politécnica Estatal del Carchi (UPEC). Av. Universitaria, Tulcán - Carchi. Ecuador

² Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE). Av. General Rumiñahui s/n, 171103 Sangolquí - Pichincha. Ecuador

¹christian.salazar@upec.edu.ec, ²sacastillo@espe.edu.ec

CITA EN APA:

Salazar-Noroña, C., & Castillo-Páez, S. (2023). Análisis de índice de radiación ultravioleta producto del satélite Aura referido a dos instrumentos terrestres ubicados en el cantón Mejía Ecuador. Tesla Revista Científica, 3(2), e284. <https://doi.org/10.55204/trc.v3i2.e284>

Recibido: 2023-10-05

Revisado: 2023-10-10 al 2023-11-01

Corregido: 2023-11-10

Aceptado: 2023-11-13

Publicado: 2023-11-20

TESLA

Revista Científica
ISSN: 2796-9320



Los contenidos de este artículo están bajo una licencia de Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Los autores conservan los derechos morales y patrimoniales de sus obras. The contents of this article are under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license. The authors retain the moral and patrimonial rights of their works.

Resumen:

Introducción: A nivel mundial, el interés en los valores del índice de radiación ultravioleta (IUV) y el costo de instrumentos terrestres impulsan la consideración de información satelital. La validación con mediciones terrestres es crucial, generando estudios comparativos entre ambas tecnologías.

Objetivo: Determinar el margen de error y asociación entre datos de índice de radiación ultravioleta derivados del satélite Aura para una localidad del cantón Mejía-Ecuador durante los años 2014 y 2015, en referencia a dos instrumentos terrestres.

Método: El enfoque es no experimental, utilizando las variables independientes (datos IUV) solo para comparación estadística. En el caso del espectrofotómetro, también se emplearon para validar sus datos imputados mediante dos técnicas distintas.

Resultados: Los datos del instrumento de monitoreo de ozono (OMI) del satélite Aura presentaron sobreestimación frente a los del radiómetro y espectrofotómetro, con errores absolutos medios de 6.016 y 6.612, respectivamente. Los coeficientes de correlación de Spearman fluctuaron entre 0.006 y 0.119.

Conclusiones: En este periodo, no se detectó correlación significativa entre los datos del OMI y los de instrumentos terrestres, y se identificó a la interpolación lineal como la técnica más precisa para completar los datos faltantes del espectrofotómetro.

Palabras Clave: Espectrofotómetro, Brewer, Radiómetro, IUV, Imputación de Datos.

Abstract:

Introduction: Globally, interest in ultraviolet radiation index (UVI) values and the cost of ground instruments drive consideration for satellite data. Validation with ground measurements is crucial, leading to comparative studies between both technologies.

Objective: Determine the margin of error and association between Aura satellite-derived ultraviolet radiation index data for a location in Mejía Canton, Ecuador, during 2014 and 2015, in reference to two ground instruments.

Method: The approach is non-experimental, using independent variables (UVI data) solely for statistical comparison. In the case of the spectrophotometer, they were also employed to validate its imputed data using two different techniques.

Results: Ozone Monitoring Instrument (OMI) data from the Aura satellite exhibited overestimation compared to the radiometer and spectrophotometer, with mean absolute errors of 6.016 and 6.612, respectively. Spearman correlation coefficients ranged from 0.006 to 0.119.

Conclusions: During this period, no significant correlation was found between OMI data and ground instruments. Linear interpolation was identified as the most accurate technique for completing missing data in the spectrophotometer.

Keywords: Spectrophotometer, Brewer, Radiometer, UVI, Data imputation

1. INTRODUCCIÓN

En Meteorología, los espectrofotómetros Brewer son instrumentos avanzados para medir el índice de radiación ultravioleta (IUV), que utilizan sistemas mecánicos, electrónicos y ópticos controlados por software para medir la radiación ultravioleta, el ozono y contaminantes como el NO₂ y SO₂. Sin embargo,

el mantenimiento y la calibración de estos equipos son costosos. Existen alternativas más asequibles, como los radiómetros, y algunos países combinan datos satelitales con mediciones terrestres validadas mediante radiómetros y algoritmos de corrección para reducir los costos de medición del IUV.

1.1. Estudios derivados de satélites e instrumentos terrestres

Parra et al. (2019) recopilaron datos IUV de dos fuentes: un radiómetro Biospherical Instruments INC. en Quito desde 2010 y la página web del Royal Netherlands Meteorological Institute con datos entre 1979 y 2018. También emplearon datos IUV de 14 días entre 2010 y 2014 para correlacionar valores locales con datos del TEMIS.

Muyimbwa et al. (2015) presentan la comparación de IUV entre un Instrumento de Monitoreo de Ozono (OMI) y un espectrofotómetro Brewer en mediciones efectuadas en Uganda, encontrando el 28% de error medio de sobreestimación satelital que bajó al 8% con promediación de datos terrestres implementando una restricción llamada factor de modificación de radiación *RMF*.

En el estudio de Zempila et al. (2018) sobre validación de dosis eritemales del OMI con instrumentos terrestres realizado en Salónica – Grecia, destacaron diferencias entre el OMI y los instrumentos terrestres para el rango IUV entre 6 y 8, con el 2% de comparaciones que mostraron diferencias en la estimación, ya sea sobreestimando o subestimando.

Nolasco et al. (2018), utilizaron un modelo de regresión lineal para estimar valores de radiación global a partir de datos satelitales en una provincia de Argentina, determinando que una forma de mejorar las lecturas satelitales referidas a la radiación solar medida con respecto a terrestres es utilizar un modelo calculado por regresión lineal en base a los dos grupos de lecturas; este modelo lo obtuvieron en base a una correlación de R^2 de 0.9 y mediante este la ecuación lineal para estimar la radiación.

Lee et al. (2020), en su estudio comparativo de IUV y otros índices biológicos, se observó que el instrumento GEMS a bordo del satélite GEO-KOMPSAT-2 y el OMI en Seúl, Corea del Sur, tienden a sobreestimar sus mediciones al utilizar datos mensuales de AOD, especialmente en áreas urbanas contaminadas. Esto sugiere que es necesario implementar un método de corrección adicional en el algoritmo para mejorar la precisión de las mediciones.

En el trabajo de comparaciones de UVA medido por el OMI y por el satélite GOME-2, Parisi et al. (2021) indican que los errores en la determinación de la irradiancia UV del algoritmo OMI se producen porque OMI no distingue entre aerosoles no absorbentes y nubes delgadas, lo que da lugar a una sobreestimación y al mismo tiempo, la absorción de aerosoles en la más baja capa de la tropósfera atenúa la irradiancia UV, debido a que el OMI no alcanza esta capa.

Alwan et al. (2021) en su investigación del IUV efectivo que alcanza la superficie terrestre en Bagdad mediante datos OMI, explican el uso de un polinomio de cuarto grado para representar la tendencia de la curva que ilustra el comportamiento normal de los índices UV altos al medio día a lo largo del año de mediciones.

Kosmopoulos et al. (2021) hablan del desarrollo de un modelo de estimación y monitoreo de IUV denominado UVIOS para países de Europa con computación de alto rendimiento, que utiliza datos satelitales y consideraron factores como ozono, nubes y aerosoles, validando sus resultados con instrumentos terrestres en 17 estaciones, incluyendo Brewers y espectrorradiómetros.

En su investigación de radiación UV en 5 países de la región oeste del océano de la India, Lamy et al. (2021) compararon los productos IUV de instrumentos OMUVG, TROPOMI y GOME-2 de los satélites Aura, S5P y ERS-2 respectivamente, con datos de instrumentos terrestres: de un espectrorradiómetro Bentham desde el 2009, y datos de un radiómetro Kipp&Zonen modelo UVS-E-T desde el 2016. El tipo de radiómetro del estudio de Lamy et al. (2021) coincide con el del presente artículo.

Taipe et al. (2021) describen un modelo de regresión lineal construido a través de una ecuación de corrección para datos satelitales basado en la comparación con datos terrestres, modelo que corrigió datos IUV derivados de satélite en una localidad de Perú luego de analizar datos IUV del OMI y datos IUV de un sensor no especificado.

Kutal et al. (2022) compararon la radiación ultravioleta eritémica UVER entre instrumentos terrestres y satélite para una localidad de Pune en India y se encontró que el OMI sobreestima en un 30% el UVER de un instrumento biómetro UV.

1.2. Estudios de imputación de datos

La validación entre instrumentos enfrenta desafíos debido a discrepancias en las temporalidades de las mediciones. Muyimbwa et al. (2015) resolvieron este problema promediando datos terrestres cercanos a las mediciones del OMI, por otra parte, Lamy et al. (2021) encontraron que para realizar las comparaciones entre las parejas de instrumentos, la diferencia de tiempo de mediciones debe ser menor a 5 minutos y la diferencia de ángulo solar de cenit SZA menor de 5°.

La imputación de datos es otra opción, explorada en otros estudios, por esto, es pertinente mencionar otros artículos que distan de las intercomparaciones IUV, pero analizan esta técnica, por ejemplo, Moritz et al. (2015) evaluaron algoritmos de imputación, destacando la interpolación con filtro Kalman y la interpolación lineal.

Turicchi et al. (2020) investigaron siete métodos de imputación, incluyendo interpolación lineal y splines cúbicos encontrando que interpolación lineal es eficiente al predecir valores con una tasa de cambio constante (este método busca una línea recta que pase entre 2 valores X_a y X_b donde los valores imputados están ligados a X_a y X_b), sin embargo, con este método se suavizan los datos.

Por otra parte, Turicchi et al. (2020) se refieren a los splines cúbicos (curvas diferenciables definidas a trozos), como ajuste a funciones polinomiales conectadas en cada extremo para formar un spline, creando una sucesión de splines cúbicos, método que se beneficia de su concepto de no linealidad, pero su capacidad para predecir oscilaciones a partir de datos univariados es limitada. En la evaluación del rendimiento de datos imputados utilizaron métricas como RMSE, MAE y MAPE en comparación con los datos observados.

1.3. Descripción del presente caso de estudio en Ecuador

El Instituto de Meteorología e Hidrología de Ecuador (INAMHI) dispone del instrumento Brewer número 218 en el mundo y sus datos por el momento no se han utilizado en validación de datos satelitales razón por la que se propone este trabajo. En ese sentido, este estudio tiene por objetivo determinar el margen de error y asociación entre datos de IUV derivados del satélite Aura para una localidad del cantón Mejía - Ecuador durante los años 2014 y 2015, en referencia a dos instrumentos terrestres, un espectrofotómetro Brewer y a un radiómetro.

El problema que se busca resolver consiste en identificar el margen de error y el grado de asociación entre los datos del OMI y los dos instrumentos terrestres durante el período de calibración del Brewer (años 2014-2015). Es relevante destacar que los instrumentos terrestres no realizaron mediciones de IUV simultáneamente, lo que limita las oportunidades de coincidencia para la comparación de datos. Además, no existe coincidencia entre el Brewer y el OMI, ya que el primero no estaba configurado para adquirir datos a las 12:00:00, mientras que los datos del segundo provienen de mediciones realizadas en esa hora específica para Ecuador.

La importancia de este estudio radica en la falta de detalles en la mayoría de los artículos respecto a cómo se comparan los datos de instrumentos de IUV cuando tienen momentos de adquisición diferentes. Este trabajo aborda dicha problemática mediante la validación y comparación del rendimiento de dos técnicas de imputación, interpolación lineal y spline cúbico, las que se utilizan para llenar lagunas de datos en el Brewer. Estos hallazgos podrían tener implicaciones significativas en el uso de datos meteorológicos en Ecuador y contribuir al estudio de intercomparaciones IUV a nivel internacional.

2. METODOLOGÍA O MATERIALES Y METODOS

2.1. Bases de datos empleadas

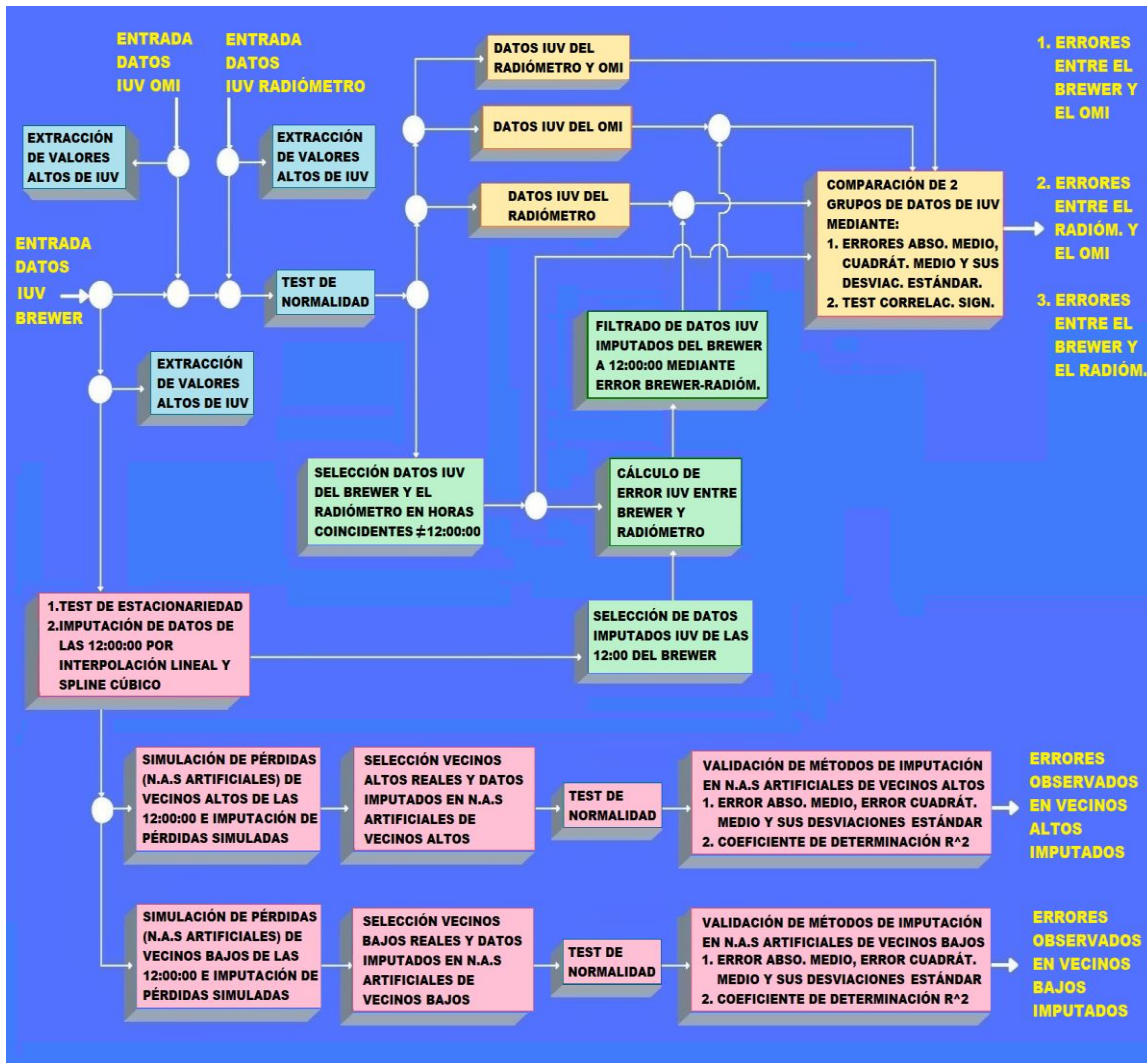
Se utilizaron tres bases de datos IUV para los años 2014 y 2015. La primera provino de la página web Giovanni de la NASA, obtenida a través de las coordenadas geográficas de la estación meteorológica y se basa en mediciones del OMI. La segunda se generó a partir del espectrofotómetro Brewer al transformar archivos ".218" a ".txt" utilizando el software UVBrewer64. La tercera base de datos se obtuvo del INAMHI y consiste en archivos ".csv" que contienen fechas y valores IUV.

2.2. Tratamiento y análisis de datos

El tratamiento y análisis de datos IUV del OMI, Brewer y radiómetro incluyó varios procedimientos en software estadístico R: depuración de datos no válidos del OMI, la selección de datos en tiempos comunes de medición para contrastar sólo entre los terrestres, imputación de datos a las 12:00:00 en el Brewer para poder comparar con el OMI, y radiómetro, análisis de estacionariedad, normalidad, correlación y finalmente análisis de errores y desviaciones estándar (figura 1).

Figura 1.

Diagrama de procesos y análisis estadísticos ejecutados en R



Fuente: Elaboración autor

Se agregaron registros de tiempo a las mediciones del OMI y Brewer a las 12:00:00 (bloques celestes). Se eliminaron datos inválidos en el OMI y se ajustaron las mediciones del Brewer multiplicándolas por un factor de 40 (bloques celestes, figura 1), conforme a las recomendaciones de los fabricantes KIPP&ZONEN (2013) y a la norma CIE (Comisión Internacional de Iluminación) que propone la fórmula (1) para calcular el índice de radiación ultravioleta (IUV).

$$IUV = k_{er} \int_{280}^{400} E(\lambda) S_{er}(\lambda) d\lambda \tag{1}$$

k_{er} : Constante de conversión 40 [m^2/W].

$E(\lambda)$: Irradiancia espectral en la superficie [$W/m^2/nm$] para una determinada longitud de onda λ .

$S_{er}(\lambda)$: Espectro de acción eritémica.

En los datos Brewer se ajustó la hora local ya que para cada dato IUV se encontraba en UTC. Los datos del radiómetro no requirieron ajustes. Para todos los grupos IUV se utilizó el paquete zoo (Z's ordered observations), útil con series de tiempo regulares e irregulares según Zeileis & Grothendieck (2005). Esta sección concluye identificando los IUV más altos y aplicando un test de normalidad.

El estudio de Chapon et al. (2023) aborda la imputación en series de tiempo medioambientales, considerando la estacionariedad de los datos. En el presente estudio se aplicó el test de estacionariedad Dickey Fuller a los datos IUV Brewer originales para determinar la posibilidad de imputación.

H_0 : la serie de tiempo no es estacionaria

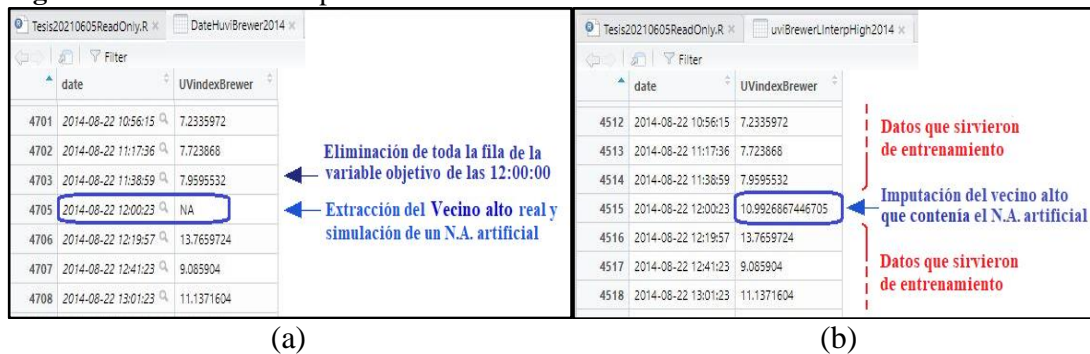
H_a : la serie de tiempo es estacionaria

La simulación de pérdida de datos en vecinos altos (datos pasadas las 12:00:00) y vecinos bajos (datos antes de las 12:00:00) para validar los métodos de imputación con datos Brewer, siguió el enfoque de Moritz et al. (2015), quienes destacaron que evaluar el desempeño de algoritmos de imputación presenta dificultades al no poder compararse con datos reales faltantes, por lo tanto, se eliminan artificialmente puntos de datos para compararse con los imputados (figura 2).

Para imputar NAs de series de tiempo, Zeileis et al. (2022) recomiendan combinar el paquete zoo con comandos: *na.omit*, *na.contiguos*, *na.approx*, *na.spline*, *na.locf*, entre otros. En la presente investigación la imputación de NAs se realizó mediante: *na.approx* (interpolación lineal) y *na.spline* (interpolación por spline cúbico).

El proceso de validación a datos imputados por interpolación lineal y por spline cúbico en vecinos altos y bajos fue el mismo para los dos años, por eso se detallan sólo los pasos para interpolación lineal en vecinos altos 2014 (bloques rosados, figura 1). Se eliminaron datos imputados inicialmente por interpolación lineal a las 12:00:00 horas para que no sean parte de la nueva imputación, con esto, se simularon N.A.s en las horas de vecinos altos reales IUV, para luego imputarlos (figuras 2 a y b).

Figura 2. Simulación e imputación de un N.A. artificial en el vecino alto



Fuente: Elaboración autor

Para validar la imputación de vecinos bajos y altos respecto a datos reales eliminados artificialmente, se calcularon: error absoluto medio (MAE), desviación estándar de errores absolutos (σ_{EA}), error cuadrático medio (MSE), desviación estándar de errores cuadráticos (σ_{SE}) y coeficiente de determinación (R^2).

En la figura 1, bloques verdes, se emplean datos IUV del Brewer sin imputar y del radiómetro para calcular errores entre estos dos instrumentos que sirven para filtrar datos válidos obtenidos por interpolación lineal y spline cúbico para el Brewer. El filtrado se realizó empleando como límites los errores mínimo y máximo. Para el año 2014 fueron: mínimo -3.1203 , máximo 3.9778 y para el año 2015: mínimo -3.9086 y máximo 2.2708 .

En la figura 1, los bloques amarillos representan datos imputados Brewer a las 12:00:00 y validados que se comparan con los datos OMI y radiómetro. Se crean parejas entre interpolación lineal y OMI, interpolación lineal y radiómetro, y spline cúbico y OMI, además de spline cúbico y radiómetro. El bloque amarillo superior agrupa datos del radiómetro con el OMI, mientras que la línea que sale del bloque verde izquierdo hacia arriba representa la combinación de datos reales Brewer con el radiómetro. En total, hay 6 parejas de registros IUV para comparar. La población se compone de 617 datos depurados del OMI en los años 2014 y 2015, y se crearon muestras basadas en las 6 parejas de registros mencionadas (tabla 1).

Tabla I*Parejas de muestras de datos según el año*

Horas comunes de medición	Procedencia de datos	OMI 2014	Radiómetro 2014	OMI 2015	Radiómetro 2015
= 12:00:00	Radiómetro	294	No aplica	277	No aplica
≠ 12:00:00	Brewer sin imputar	No forman parejas	44	No forman parejas	141
= 12:00:00	Brewer imputados por interpolación lineal	219	263	210	304
= 12:00:00	Brewer imputados por spline cúbico	220	263	215	304

Fuente: Elaboración autor

2.3. Metodología de comparación

Para comparar cada par de columnas de datos de los 6 registros, se emplearon: MAE , σ_{EA} , MSE , σ_{SE} excepto el coeficiente R^2 ya que en lugar de éste se empleó el análisis de correlación significativa de Spearman después de ejecutado un test de normalidad Kolmogorov- Smirnov y Lilliefors.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}_i| \quad (2)$$

$$\sigma_{AE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n} \quad (4)$$

$$\sigma_{SE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

Donde x_i significa datos IUV reales del Brewer al comparar con \hat{x}_i o datos IUV imputados luego de la simulación de pérdidas. También x_i significa datos IUV del instrumento referencia terrestre, con relación a los \hat{x}_i o datos IUV de otro instrumento terrestre o del OMI. El promedio de datos reales o del instrumento referencia está dado por \bar{x} .

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Identificación de IUV altos

La Organización Mundial de la Salud (OMS) identifica como valores IUV muy altos los comprendidos entre 8 a 10 y como extremadamente altos desde 11. Cada instrumento identificó diferentes cantidades de valores IUV extremadamente altos debido a sus distintos tiempos de adquisición de datos: el Brewer obtuvo 1098 valores en un rango de 11.00 a 17.82, el OMI registró 600 valores en un rango de 11.16 a 17.56, y el radiómetro detectó 26639 valores desde 11.00 hasta 19.58. Las diferencias se deben a las frecuencias de muestreo de los instrumentos, que variaron desde minutos hasta diariamente.

En la tabla II los IUV altos del 2014 aparecen a partir de 11, lo cual concuerda con Parra et al. (2019) que mencionan que entre el 2010 y 2014 era frecuentemente un IUV de 11, también explican que entre 1979 – 2018, los máximos valores de IUV en condiciones de cielo despejado al medio día, pertenecen a los meses febrero - marzo y en marzo la media de los máximos fue 17.8 ± 1.6 , valores que coinciden con los de este trabajo.

La figura 3 presenta diagramas de cajas de los datos 2014 – 2015 del Brewer (sin imputar), OMI y radiómetro, gráficos que no coinciden por los distintos tiempos de adquisición de datos. El diagrama de cajas Brewer indica que el 25% de datos está conformado por altos y extremos altos y existen varios atípicos sobre 15. En el diagrama OMI se visualiza que los IUV altos y extremadamente altos son el 100%, desde un IUV de 10 finalizando sobre 16 y existe un único atípico bajo 10. Para el radiómetro los IUV altos y extremadamente altos aparecen como atípicos en la caja, aproximadamente desde 8 hasta 20.

Tabla II

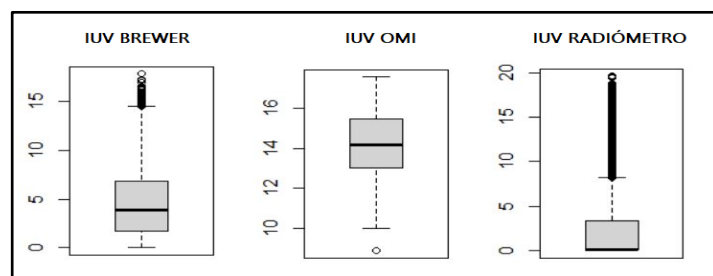
Fechas de datos extremos altos de IUV detectados.

INSTRUMENTO	Fecha y hora de ocurrencia	IUV Mínimo	Fecha y hora de ocurrencia	IUV Máximo
Brewer	2014-10-24 10:15:39	11.002	2014-03-24 11:58:02	17.824
	2015-07-29 12:00:00		2014-03-28 12:00:00	
Radiómetro	2014-04-29 11:30:00	11.000	2015-03-07 12:34:00	19.584

Fuente: Elaboración autor

Figura 3.

Diagramas de cajas de datos IUV, período 2014-2015



Fuente: Elaboración autor

3.2. Resultados de estacionariedad

En la prueba de estacionariedad Dickey-Fuller se encontró un p – *valor* de 0.01, verificando que los datos 2014 y 2015 del Brewer son aptos para imputación.

3.3. Resultados de validación de métodos de imputación

En la tabla III se aprecia que los más pequeños MAE , MSE , y σ_{EA} , σ_{SE} ocurrieron en el método de interpolación lineal. El coeficiente R^2 indica que el método interpolación lineal es mejor en ajuste que spline cúbico. Por ejemplo, en la validación de vecinos altos 2014, el R^2 para interpolación lineal es 43.428% respecto del 19.256% de spline cúbico.

Tabla III*Validación de métodos de imputación*

MÉTODO DE IMPUTACIÓN		MAE	σ_{EA}	MSE	σ_{SE}	R^2
Interpolación lineal	Vecinos Altos	2.275	1.945	8.947	13.218	43.428 %
	Spline cúbico 2014	2.676	2.371	12.769	19.958	19.256%
Interpolación lineal	Vecinos Bajos	2.12	2.04	8.641	16.454	41.76 %
	Spline cúbico 2014	2.611	2.461	12.854	23.039	13.364%
Interpolación lineal	Vecinos Altos	1.93	1.855	7.155	13.918	45.659 %
	Spline cúbico 2015	2.296	2.146	9.862	18.819	25.094%
Interpolación lineal	Vecinos Bajos	1.858	1.652	6.173	9.979	42.934 %
	Spline cúbico 2015	2.239	2.075	9.303	16.911	14%

Fuente: Elaboración autor

3.4. Resultados de comparaciones de datos entre instrumentos año 2014

Brewer – radiómetro, año 2014

Los resultados de la comparación entre los datos reales del Brewer y el radiómetro indican que esta pareja tiene los valores más bajos de MAE , MSE , σ_{EA} y muestran una mayor asociación, con un coeficiente de Spearman de 0.957, a diferencia de las otras parejas de análisis. Los errores entre los datos del Brewer imputados por interpolación lineal y los del radiómetro tienen la menor σ_{SE} , aunque esta diferencia no es significativa en relación con la comparación entre datos reales del Brewer y el radiómetro.

La tabla IV indica que no hay diferencias significativas en los valores, pero los datos de la fila 3 (interpolación lineal-radiómetro) se acercan más a la comparación real entre el radiómetro y el Brewer. En 2014, los datos del radiómetro sobreestimaron los del Brewer, con un MAE de 0.964 y un MSE de 1.606, de forma gráfica se observa en la figura 4a. Además, los datos imputados linealmente y por spline cúbico del Brewer presentan sobreestimación y, en ocasiones, subestimación a los del radiómetro (figuras 4 b y c). Los datos spline cúbico-radiómetro muestran mayores errores, con un MAE de 1.08 y un MSE de 1.958, frente a un MAE de 1.015 y un MSE de 1.747 en la interpolación lineal.

Tabla IV*Errores, desviaciones, correlación Brewer-Radiómetro, año 2014*

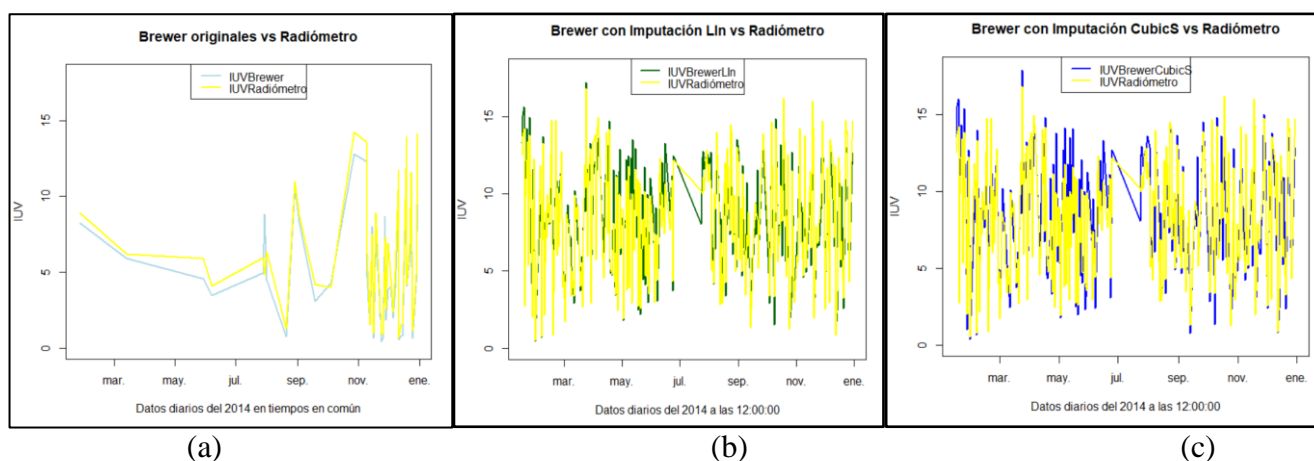
INSTRUMENTOS COMPARADOS	MAE	σ_{EA}	MSE	σ_{SE}	Coefficiente correlación Spearman
Brewer reales vs. radiómetro	0.964	0.832	1.606	3.008	0.957
Brewer interp. lin. vs. radiómetro	1.015	0.849	1.747	2.555	0.936
Brewer spline cúb. vs. radiómetro	1.08	0.891	1.958	2.75	0.934

Fuente: Elaboración autor

Figura 4.

Comparación de datos IUV 2014 entre Brewer y radiómetro:

- (a) Brewer originales (celeste) y radiómetro (amarillo),
- (b) Brewer interpolación lineal (verde) y radiómetro (amarillo),
- (c) Brewer spline cúbico (azul) y radiómetro (amarillo).



Fuente: Elaboración autor

Radiómetro – OMI y Brewer – OMI, año 2014

De la tabla V se identifica como los errores, desviaciones estándar y coeficiente de correlación entre interpolación lineal del Brewer y OMI son los menos lejanos de sus homólogos entre radiómetro y OMI, mientras los parámetros de comparación spline cúbico del Brewer versus OMI se alejan levemente de las otras dos comparaciones, la diferencia más notoria aparece en el error cuadrático medio con un valor de 58.968. Además, los datos OMI no tienen correlación significativa con los del radiómetro ni con los del Brewer porque los coeficientes de correlación Spearman son muy cercanos a cero, ya que existe sobreestimación del OMI hacia los instrumentos terrestres.

A partir de las figuras 5a, a la 5c y la tabla V, se confirma que los datos IUV OMI sobreestiman los datos de los instrumentos terrestres en 2014. La más alta sobreestimación del OMI se produce a los datos de interpolación por spline cúbico del Brewer con un MAE de 6.537 y un MSE de 58.968.

Tabla V

Errores, desviaciones y correlación entre radiómetro-OMI y Brewer-OMI, año 2014

INSTRUMENTOS COMPARADOS	MAE	σ_{EA}	MSE	σ_{SE}	Coefficiente correlación Spearman
Radiómetro-OMI	6.016	3.858	51.026	54.106	0.048

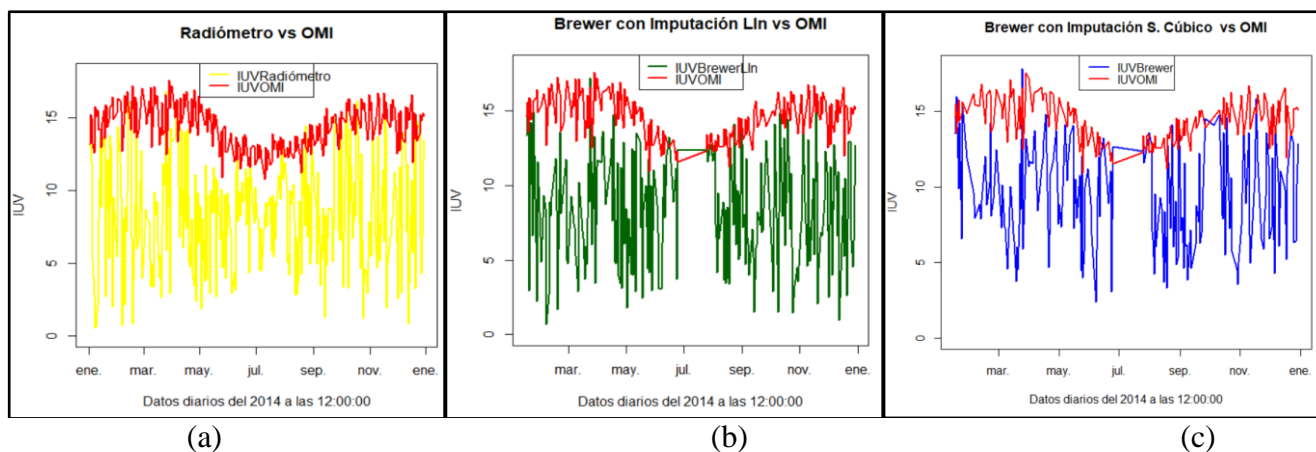
Brewer Interp. Lin. -OMI	6.498	3.867	57.106	54.068	0.018
Brewer Spline Cúb. -OMI	6.537	4.038	58.968	56.875	0.006

Fuente: Elaboración autor

Figura 5.

Comparación de datos IUV 2014:

- (a) Radiómetro (amarillo) y OMI (rojo),
- (b) Brewer interpolación lineal (verde) y OMI (rojo),
- (c) Brewer spline cúbico (azul) y OMI (rojo).



Fuente: Elaboración autor

3.5. Resultados de comparaciones de datos entre instrumentos año 2015

Brewer – radiómetro, año 2015

En la tabla VI, los errores y desviaciones obtenidos en la comparación de datos imputados por interpolación lineal con los del radiómetro son los que se asemejan más a sus correspondientes de la pareja Brewer datos reales-radiómetro para el 2015.

En la figura 6a para el año 2015 se confirma la sobreestimación de datos IUV por parte del radiómetro a los datos reales del Brewer. Esto ocurre con un MAE de 1.132 y un MSE de 1.76.

Las figuras 6b y 6c evidencian lo presentado en la tabla VI, que los datos Brewer (interpolación lineal) y Brewer (spline cúbico) son sobreestimados por los del radiómetro en el 2015. La sobreestimación más alta ocurrió desde los datos del radiómetro a los de imputación por spline cúbico del Brewer con un MAE de 1.407 y un MSE de 2.828.

Tabla VI

Errores, desviaciones, correlación entre Brewer-radiómetro, año 2015

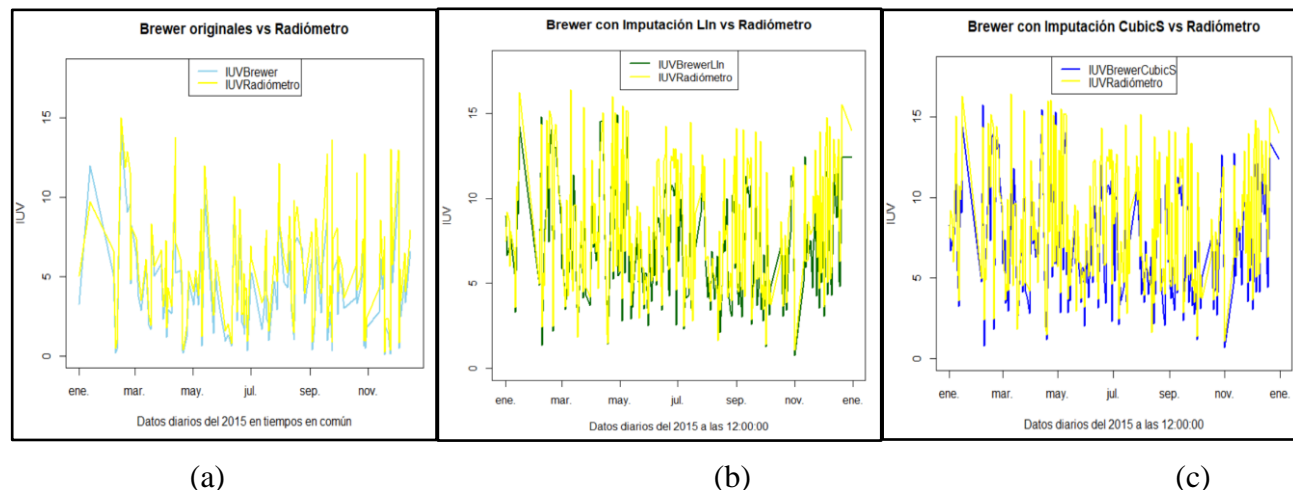
INSTRUMENTOS COMPARADOS	MAE	σ_{EA}	MSE	σ_{SE}	Coficiente correlación Spearman
Brewer-radiómetro	1.132	0.693	1.76	2.194	0.984
Brewer interp. lin. - radiómetro	1.299	0.892	2.479	2.941	0.933
Brewer spline cúb. - radiómetro	1.407	0.924	2.828	3.322	0.93

Fuente: Elaboración autor

Figura 6.

Comparación de datos IUV 2015:

- (a) Brewer reales (celeste) y radiómetro (amarillo),
- (b) Brewer interp. lin. (verde) y radiómetro (amarillo),
- (c) Brewer imput. spline cúb. (azul) y radiómetro (amarillo).



Fuente: Elaboración autor

Radiómetro – OMI y Brewer – OMI, año 2015

Las desviaciones estándar de la tabla VII muestran que hay menos variación en los errores entre la interpolación lineal del Brewer y el OMI en comparación con la pareja spline cúbico Brewer y OMI, lo que sugiere que la interpolación lineal se aproxima más a los datos reales del radiómetro. En el año 2014, no hubo correlación entre el OMI con el radiómetro y OMI con el Brewer, pero en el año 2015, hubo una correlación positiva pero muy baja, con valores entre 0.147 y 0.119.

En las figuras 7a a la 7c y la tabla VII se confirma la sobreestimación del OMI a los instrumentos terrestres para el año 2015 siendo la menor hacia los datos reales del radiómetro, en comparación con los datos imputados por los dos métodos en el Brewer. Hacia el radiómetro se produjo con un *MAE* de 5.476, y un *MSE* de 43.121; al Brewer imputación interpolación lineal con un *MAE* de 6.612, un *MSE* de 54.868 y al Brewer spline cúbico, con un *MAE* de 6.564 y un *MSE* de 55.297.

Tabla VII

Errores, desviaciones, correlación radiómetro-OMI y Brewer-OMI, año 2015

INSTRUMENTOS COMPARADOS	<i>MAE</i>	σ_{EA}	<i>MSE</i>	σ_{SE}	Coefficiente correlación Spearman
Radiómetro-OMI	5.476	3.631	43.121	44.172	0.147
Brewer Interp. Lin. - OMI	6.612	3.348	54.868	45.021	0.14
Brewer Spline Cúb. - OMI	6.564	3.502	55.297	46.94	0.119

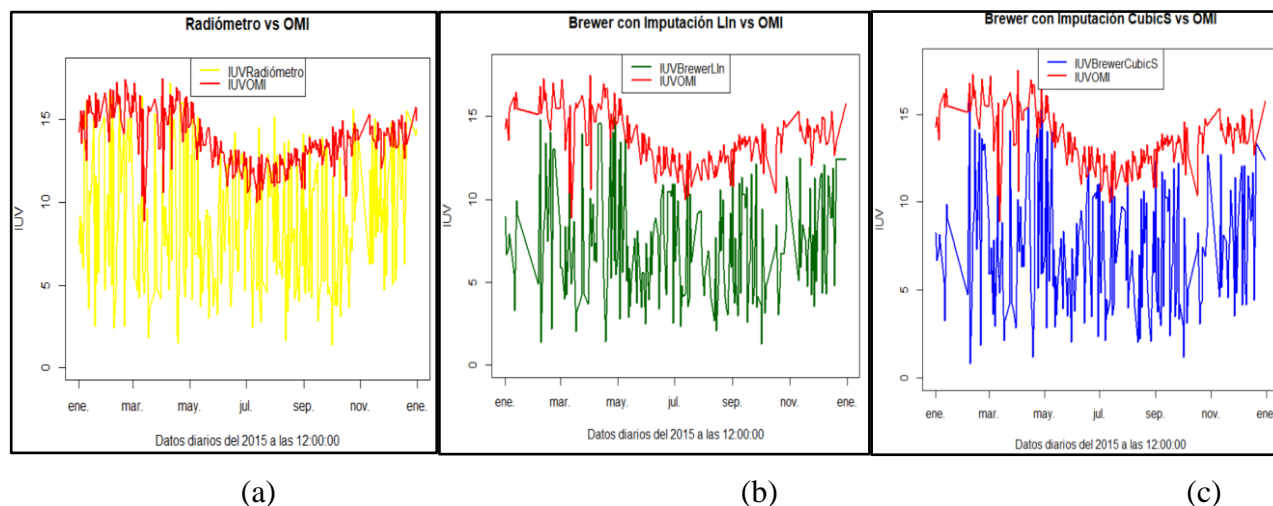
Fuente: Elaboración autor

Figura 7.

Comparación de datos IUV 2015:

- (a) Radiómetro (amarillo) y OMI (rojo),

(b) Brewer interp. lin. (verde) y OMI (rojo),
 (c) Brewer spline cúbico (azul) y OMI (rojo).



Fuente: Elaboración autor

Discusiones:

Para los valores más altos de IUV se consideran únicamente los registrados por el Brewer y el radiómetro ya que los tomados por el OMI son producto de sobreestimación. El Brewer registró su valor más alto en la fecha 2014/03/24 a las 11: 58: 02 con un valor de 17.824 y el radiómetro reportó su valor más alto en la fecha 2015/03/07 a las 12: 34: 00 con un valor de 19.584.

En este estudio, las diferencias entre el OMI y el radiómetro UV-S-AE-T tienen errores absolutos medios de 5.476 y 6.016. En las comparaciones con los datos de imputación del Brewer, las diferencias son 6.537 y 6.564 para interpolación lineal y de 6.537 a 6.564 para spline cúbico. Estos valores de diferencia coinciden con las observaciones previas de Karki et al. (2021) que mencionaron diferencias en torno a 6 unidades entre mediciones terrestres y las basadas en el OMI.

El coeficiente de correlación Spearman entre instrumentos terrestres tuvo los siguientes resultados: Brewer-radiómetro entre 0.957 y 0.984; Brewer interpolación lineal-radiómetro entre 0.933 y 0.936, y Brewer spline cúbico-radiómetro entre 0.93 y 0.934, con esto la mayor asociación entre datos se evidencia entre datos reales del Brewer y radiómetro.

En 2014, no se encontró una asociación significativa entre las mediciones del OMI y los otros dos instrumentos, de acuerdo con los bajos coeficientes de Spearman: radiómetro-OMI 0.048; Brewer interpolación lineal-OMI 0.018 y Brewer spline cúbico-radiómetro 0.006. Para 2015, se observó una correlación positiva muy baja entre el OMI y los instrumentos terrestres, con coeficientes de Spearman de 0.147 entre el radiómetro y OMI, 0.14 entre Brewer interpolación lineal-OMI y 0.119 entre Brewer spline cúbico-radiómetro.

Los valores del presente estudio pueden diferir de los encontrados en otros artículos por diversos factores, por ejemplo: no son los mismos radiómetros, Brewer, distintas condiciones geográficas, físicas, temporales además en esta investigación solo se realizaron comparaciones estadísticas de tipo cuantitativo, sin atender a las causas meteorológicas o físicas de la sobreestimación.

Las diferencias OMI vs. instrumentos terrestres se deben a factores como nubosidad, aerosoles y ozono. Según Kutal et al. (2022), la sobreestimación del OMI en mediciones UV se debe a la falta de inclusión de aerosoles absorbentes en su algoritmo, influida por condiciones atmosféricas. Zempila et al. (2018) indicaron que la nubosidad afecta tanto la sobreestimación como la subestimación del OMI en comparación con instrumentos terrestres, siendo más común en nubosidad estable para la primera y en inestabilidad para la segunda.

Por otra parte, Herman et al. (2020) indican que determinados lugares del planeta tienen índices IUV extremadamente altos por la existencia de bajos valores en el ángulo cenital solar en el ozono o debido a grandes altitudes con condiciones libres de nubosidad y en su investigación entre los años 2005 y 2018 de los cambios de irradiancia eritemal, señalan que Quito Ecuador tiene un IUV promedio de 7 y un máximo de 11 debido a la existencia de nubosidad considerable.

4. CONCLUSIONES

De los análisis comparativos realizados, los datos del OMI sobreestimaron los del radiómetro y los datos imputados del Brewer para los años 2014 y 2015, ocurriendo la mayor sobreestimación en el primer año. En el año 2014 los errores absolutos medios fueron: radiómetro-OMI 6.016, Brewer interpolación lineal - OMI 6.498 y Brewer spline cúbico – OMI 6.537. En el 2015 existió un error absoluto medio menor entre radiómetro-OMI, 5.476 pero de las demás parejas se mantuvo en valores similares a los del 2015: Brewer interpolación lineal – OMI 6.612 y Brewer spline cúbico – OMI 6.564.

No se encontró un grado de asociación aceptable entre datos OMI con los datos terrestres puesto que los coeficientes de correlación de Spearman varían entre un mínimo de 0.006, hasta el más alto de 0.119 con datos imputados de spline cúbico del Brewer, mientras que en las demás comparaciones estos coeficientes se encuentran en el mismo intervalo.

A partir de la validación de datos imputados mediante vecinos altos y bajos para los años 2014 y 2015, los resultados señalan que la imputación por interpolación lineal se acerca más a los valores reales del Brewer. Esto se observó también en los errores, desviaciones estándar y correlación de la comparación de datos IUV de interpolación lineal del Brewer con datos IUV reales del OMI, porque se asemejan más a la comparación entre valores del radiómetro y el OMI que los del análisis de spline cúbico con los del OMI.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de las siguientes personas e instituciones:

- Coordinador del Laboratorio de Metrología del INAMHI, Mg. César Tonato.
- Sr. Martin Stanek, software UVBrewer por brindar información sobre el manejo de datos de IUV para el Brewer 218.
- Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC): "Analyses and visualizations used in this study were produced with the Giovanni online data system, developed and maintained by the NASA GES DISC."

FINANCIACIÓN

Los autores no recibieron financiamiento de ningún tipo para el desarrollo de la presente investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los Autores declaran que no existen conflictos de intereses con su investigación.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

En concordancia con la taxonomía establecida internacionalmente para la asignación de créditos a autores de artículos científicos (<https://credit.niso.org/>). Los autores declaran sus contribuciones en la siguiente matriz:

<i>Participar activamente en:</i>	<i>Salazar C.</i>	<i>Castillo S.</i>
<i>Conceptualización</i>	X	X
<i>Análisis formal</i>	X	X
<i>Adquisición de fondos</i>		
<i>Investigación</i>	X	X
<i>Metodología</i>	X	X
<i>Administración del proyecto</i>	X	X
<i>Recursos</i>		
<i>Redacción –borrador original</i>	X	
<i>Redacción –revisión y edición</i>	X	X
<i>La discusión de los resultados</i>	X	X
<i>Revisión y aprobación de la versión final del trabajo.</i>	X	X

RECONOCIMIENTO A REVISORES:

La revista reconoce el tiempo y esfuerzo del editor Juan Carlos Santillán Lima y de revisores anónimos que dedicaron su tiempo y esfuerzo en la evaluación y mejoramiento del presente artículo.

REFERENCIAS

- Alwan, A., Hameed, A., & Hamad, N. (2021). Analyzing of UV Index with the Time Variation for Baghdad. *Iraqi Journal of Industrial Research*, 8(1), 50–54. <https://doi.org/10.53523/ijoirVol8I1ID32>
- Chapon, A., Ouarda, T. B. M. J., & Hamdi, Y. (2023). Imputation of missing values in environmental time series by D-vine copulas. *Weather and Climate Extremes*, 41, 100591. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100591>
- Herman, J., Cede, A., Huang, L., Ziemke, J., Torres, O., Krotkov, N., Kowalewski, M., & Blank, K. (2020). Global distribution and 14-year changes in erythemal irradiance, UV atmospheric transmission, and total column ozone for 2005-2018 estimated from OMI and EPIC observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(14), 8351–8380. <https://doi.org/10.5194/acp-20-8351-2020>
- Karki, B., Dhobi, S. H., & Nakarmi, J. J. (2021). Study of UV Index above Dang, Pokhara and Kathmandu Valley from 2009 to 2020. *J. Mater. Environ. Sci.*, 12(5), 715–727. http://www.jmaterenvirosci.com/Document/vol12/vol12_N5/JMES-2021-12058-Karki.pdf
- Kipp&Zonen. (2013). *Elegir el radiómetro UV perfecto - Kipp & Zonen*. <https://www.kippzonen.es/News/483/Elegir-el-radiometro-UV-perfecto#.ZECZonbMK3A>
- Kosmopoulos, P. G., Kazadzis, S., Schmalwieser, A. W., Raptis, P. I., Papachristopoulou, K., Fountoulakis, I., Masoom, A., Bais, A. F., Bilbao, J., Blumthaler, M., Kreuter, A., Siani, A. M., Eleftheratos, K., Topaloglou, C., Gröbner, J., Johnsen, B., Svendby, T. M., Vilaplana, J. M., Doppler, L., ... Kontoes, C. (2021). Real-time UV index retrieval in Europe using Earth observation-based techniques: system description and quality assessment. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(8), 5657–5699. <https://doi.org/10.5194/amt-14-5657-2021>
- Kutal, G., Kolhe, A., Varpe, S., Mahajan, C., Singh, P., & Aher, G. (2022). UV Erythemal Radiation and Its Sensitivity to Changes in Total Column Ozone and Aerosols. *Aerosol Science and Engineering*, 6(2), 176–185. <https://doi.org/10.1007/s41810-022-00132-x>
- Lamy, K., Portafaix, T., Brogniez, C., Lakkala, K., Pitkänen, M. R. A., Arola, A., Forestier, J.-B., Amelie, V., Toihir, M. A., & Rakotoniaina, S. (2021). UV-Indien network: Ground-based measurements dedicated to the monitoring of UV radiation over the western Indian Ocean. *Earth System Science Data*, 13(9), 4275–4301.

- <https://doi.org/10.5194/essd-13-4275-2021>
- Lee, H., Kim, J., Jeong, U., Lee, W. ~J., Yoon, J., & Lee, D. (2020). Preliminary results of UV index and other biological indices in Asia for the Geostationary Environmental Monitoring Spectrometer (GEMS). *AGU Fall Meeting Abstracts, 2020*, A003-0007.
- Moritz, S., Sardá, A., Bartz-Beielstein, T., Zaefferer, M., & Stork, J. (2015). *Comparison of different Methods for Univariate Time Series Imputation in R*.
- Muyimbwa, D., Dahlback, A., Ssenyonga, T., Chen, Y.-C., Stamnes, J. J., Frette, Ø., & Hamre, B. (2015). Validation of ozone monitoring instrument ultraviolet index against ground-based UV index in Kampala, Uganda. *Appl. Opt.*, *54*(28), 8537–8545. <https://doi.org/10.1364/AO.54.008537>
- Nolasco, M., Sayago, S., & Bocco, M. (2018). Un modelo lineal para estimar radiación solar global en la provincia de Córdoba a partir de datos satelitales CERES_SYN1. *X Congreso de AgroInformática (CAI)-JAIIO 47 (CABA, 2018)*.
- Parisi, A. V, Igoe, D., Downs, N. J., Turner, J., Amar, A., & A Jebar, M. A. (2021). Satellite Monitoring of Environmental Solar Ultraviolet A (UVA) Exposure and Irradiance: A Review of OMI and GOME-2. *Remote Sensing*, *13*(4). <https://doi.org/10.3390/rs13040752>
- Parra, R., Cadena, E., & Flores, C. (2019). Maximum UV Index Records (2010–2014) in Quito (Ecuador) and Its Trend Inferred from Remote Sensing Data (1979–2018). *Atmosphere*, *10*(12). <https://doi.org/10.3390/atmos10120787>
- Taipe, C. W., Mendoza, E. G., & Flores, H. H. (2021). Validation of ultraviolet index data from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) based on measurements from meteorological stations in the city of Puno. *Journal of Physics: Conference Series*, *1841*(1), 12005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1841/1/012005>
- Turicchi, J., O'Driscoll, R., Finlayson, G., Duarte, C., Palmeira, A. L., Larsen, S. C., Heitmann, B. L., & Stubbs, R. J. (2020). Data Imputation and Body Weight Variability Calculation Using Linear and Nonlinear Methods in Data Collected From Digital Smart Scales: Simulation and Validation Study. *JMIR Mhealth Uhealth*, *8*(9), e17977. <https://doi.org/10.2196/17977>
- Zeileis, A., & Grothendieck, G. (2005). zoo: S3 Infrastructure for Regular and Irregular Time Series. *Journal of Statistical Software*, *14*(6), 1–27. <https://doi.org/10.18637/jss.v014.i06>
- Zeileis, A., Grothendieck, G., Ryan, J. A., Ulrich, J. M., & Andrews, F. (2022). *Package 'zoo'* (pp. 1–75). <https://cran.r-project.org/web/packages/zoo/zoo.pdf>
- Zempila, M. M., Fountoulakis, I., Taylor, M., Kazadzis, S., Arola, A., Koukouli, M. E., Bais, A., Meleti, C., & Balis, D. (2018). Validation of OMI erythemal doses with multi-sensor ground-based measurements in Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Environment*, *183*, 106–121. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.012>