

Evaluación del WRF como herramienta para determinar el rendimiento de un sistema fotovoltaico en condiciones de cielo despejado



<https://cu-id.com/2377/v28n4e07>

Evaluation of the WRF as a tool to determine the performance of a photovoltaic system in clear sky conditions

✉ Flavia Gutiérrez Muiña^{1*}, ✉ Alina Roig Rassi¹, ✉ Israel Borrajero Montejo², ✉ Bárbara Liz Miravet Sánchez¹

¹Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, CUBAENERGIA, La Habana, Cuba

²Centro de Física de la Atmosfera, Instituto de Meteorología, Loma de Casa Blanca s/n, Casa Blanca, Regla, La Habana, Cuba.

RESUMEN: En los sistemas fotovoltaicos se considera de vital importancia la evaluación de la eficiencia de la planta durante largos periodos con el objetivo de optimizar su rendimiento y maximizar su confiabilidad. La imposibilidad de adquirir en Cuba instrumentos medidores de la intensidad de la radiación solar para monitorear su desempeño, así como las limitantes para su mantenimiento y calibración, impone la necesidad de estimarla a través del empleo de modelos numéricos. En el presente trabajo se realiza la evaluación del modelo WRF como alternativa para determinar el rendimiento de una instalación fotovoltaica a partir de la estimación de la intensidad de la radiación solar en condiciones de cielo despejado. Se emplearon como valores de referencia datos de intensidad de la radiación solar medidos durante marzo de 2014 por una celda calibrada. Para realizar los ajustes entre la intensidad de la radiación solar en el plano horizontal (EICelda) y energía solar de onda corta acumulada en una hora en la superficie a cielo despejado (EIWRFCS), se emplearon 5 muestras con diferentes condiciones de cercanía entre las variables. Dentro de los resultados obtenidos vemos que, es posible emplear el modelo WRF como alternativa teniendo en cuenta que entre las horas de sol a analizar exista una diferencia $\leq 150 \text{ Wh/m}^2$.

Palabras claves: intensidad de la radiación solar a cielo despejado, rendimiento de sistemas fotovoltaicos.

ABSTRACT: In photovoltaic systems the evaluation of the efficiency of the plant during long periods is considered of vital importance in order to optimize their performance and maximize their reliability. The impossibility of acquiring in Cuba instruments to measure the intensity of solar radiation to monitor the performance photovoltaic systems, as well as the limitations for their maintenance and calibration imposes the need to estimate it through the use numerical models. In the present work, an assessment of the WRF model is carried out as an alternative to determine the performance of photovoltaic facilities, based on the estimation of the intensity of solar radiation under clear sky conditions. The solar radiation intensity data measured during the month of March 2014 by a calibrated cell is taken as a reference. 5 samples with different conditions of proximity between the variables were used to obtain fitted dependencies between the intensity of solar radiation in the horizontal plane (EICelda) and accumulated downwelling clear sky shortwave flux at bottom (EIWRFCS). It was obtained that it is possible to use the WRF model as an alternative, taking into account that there is a difference between the hours of sunshine to be analyzed difference $\leq 150 \text{ Wh/m}^2$.

Keywords: intensity of solar radiation in clear sky conditions, performance of photovoltaic systems.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial y tecnológico alcanzado a partir de la segunda mitad del siglo XX ha provocado un aumento en la explotación de los combustibles fósiles, situación que se refleja en dos aspectos fundamentales: el agotamiento, antes de lo previsto, de los yacimientos, y el incremento de la contaminación ambiental debido a la emisión de grandes cantidades de gases de efecto invernadero y de contaminantes a la atmósfera.

El concepto de fuente de energía alternativa surge hace más de 40 años, como aquella que puede sustituir a las energías convencionales, ya sea debido al menor efecto contaminante y/o por la posibilidad de renovarse (Stolik, 2019), constituyendo una parte importante de la solución hacia un desarrollo sostenible. El conjunto de las energías renovables comparte la misma fuente, el Sol (Morradán, 2012), del que se abastece directamente la energía fotovoltaica, la cual se presenta como alternativa ventajosa desde el punto de vista económico y ambiental.

*Autor para correspondencia: Flavia Gutiérrez Muiña. E-mail: flavia@cubaenergia.cu

Recibido: 01/08/2022

Aceptado: 03/08/2022

La producción de energía eléctrica por medio de sistemas fotovoltaicos se caracteriza por ser fluctuante ya que depende directamente de los cambios en la intensidad de la radiación solar. En estos se considera de vital importancia la evaluación de su eficiencia durante largos períodos con el objetivo de optimizar su rendimiento y maximizar su confiabilidad. Los estudios que se llevan a cabo con este fin se deben realizar bajo cielo despejado; condición ideal para el funcionamiento del generador fotovoltaico y de los equipos de medición de intensidad de la radiación (como piranómetros y celdas fotovoltaicas), los cuales son calibrados bajo este requerimiento (Guinand & Quintero, 2020).

La problemática de la carencia de datos suficientes de radiación y el uso de equipamientos costosos y específicos ha provocado que se hayan realizado numerosos intentos para estimarla a partir de formulaciones sencillas con base empírica o teórica (Sayago, Ovando, & Willington, 2011). Entre los métodos de estimación se encuentran la utilización de imágenes de satélites y el empleo de modelos numéricos; la selección de uno u otro depende del horizonte de pronóstico y la resolución espacial y temporal necesarias.

En Cuba, el uso de modelos numéricos tiene particular importancia ya que las posibilidades de adquisición de instrumentos medidores de la intensidad de la radiación solar, su mantenimiento y calibración son limitadas. Al cierre de mayo del 2019, el país contaba con 65 parques fotovoltaicos instalados al Sistema Electroenergético Nacional (SEN) en funcionamiento y 15 en proceso de terminación. Muy pocos cuentan con instrumentos con la calidad adecuada para la medición de la radiación global que permitan monitorear el rendimiento del parque.

El presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar el empleo del modelo WRF como alternativa para determinar el rendimiento de una instalación fotovoltaica a partir de la estimación de la intensidad de la radiación solar en condiciones de cielo despejado.



Figura 1. Dominios de modelación

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Se seleccionó como área de estudio el polígono integral para el monitoreo y evaluación de paneles fotovoltaicos, ubicado en la azotea del Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGÍA). A partir de contar con el sistema de monitoreo se pudo determinar el coeficiente característico del sistema fotovoltaico (Ecuación 1).

Modelo numérico WRF - ARW

Para la realización de este estudio se empleó también el modelo numérico WRF en su versión 3.9.1.1. con el núcleo dinámico ARW. Para las corridas se seleccionaron tres dominios anidados (Figura 1): un dominio externo con resolución de 9 km; un segundo dominio con resolución de 3 km y un tercer dominio de 1 km. El centro de todos los dominios coincide con el emplazamiento del polígono integral.

Los esquemas de parametrización utilizados se muestran en la Tabla 1.

Para realizar las comparaciones entre las mediciones reales y estimadas por el modelo se utilizó la intensidad de la radiación solar incidente en el panel acumulada para cada hora, denominada EI_{Celda} ; así co-

$$Coef_{caract} = \frac{Energía\ eléctrica\ generada\ (kWh)}{Energía\ solar\ incidente\ \left(\frac{kWh}{m^2}\right) \cdot Área\ de\ superficie\ captadora\ (m^2)} \quad (1)$$

Tabla 1. Esquemas de parametrización

Parámetros físicos	Esquemas utilizados
Microfísica	Thompson aerosol - aware
Capa límite planetaria (PBL)	Yonsei University scheme
Radiación de onda larga	RRTMG scheme
Radiación de onda corta	RRTMG shortwave
Modelo de superficie	Noha Land Surface Model
Capa atmosférica superficial	MM5 similarity
Parametrización de Cu	Betts - Miller - Janjic schem

mo las variables ACSWDNB (*Accumulated Downwelling Shortwave Flux At Bottom*) y ACSWDNBC (*Accumulated Downwelling Clear Sky Shortwave Flux At Bottom*), obtenidas a través del modelo y nombradas EI_{WRF} y EI_{WRFCs} respectivamente.

Los datos recopilados pertenecen al mes de marzo de 2014 en un horario comprendido entre las 8:00 y las 19:00 horas.

Procesamiento de datos

Una vez que se tienen los datos de las tres variables para cada día se compararon los valores de intensidad de la radiación solar acumulados en una hora teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- Considerar como hora de sol aquellas en las que la variable $EI_{Celda} \geq 120 \text{ Wh/m}^2$.
- Considerar las horas donde la variable $E_{Generada} \neq 0$.
- Utilizar, para realización del ajuste, la variable EI_{WRFCs} , la cual no tiene en cuenta la influencia de la nubosidad, condición requerida para la calibración de equipos medidores de intensidad de la radiación solar y evaluación del funcionamiento ideal de los sistemas fotovoltaicos.

Para realizar los ajustes entre EI_{Celda} y EI_{WRFCs} se emplearon datas seleccionadas a partir de diferencias existentes entre ambas variables (Tabla 2) y que cumplieran las condiciones previamente mencionadas.

A partir de estos datos se determinó para qué diferencia se obtiene el mejor ajuste para estimar la intensidad de la radiación solar acumulada en una hora bajo condiciones de cielo despejado a partir del empleo del WRF-ARW.

Evaluación de los resultados

Para evaluar la calidad de los resultados obtenidos se realizó un análisis cuantitativo de los mismos a través de funciones estadísticas sencillas descritas por (Galán, Arce, Koch, & Lara, 2015). Los estadígrafos que se utilizaron fueron: el error medio (MBE) (Ecuación 2), el error porcentual medio (Ecuación 3), el error cuadrático medio (RMSE) (Ecuación 4) y el índice de correlación de Pearson (rP) (Ecuación 5).

El resultado óptimo es aquel que consiga que los errores estadísticos tomen valor nulo y el coeficiente de correlación rP tome el valor de la unidad. Mientras más cerca estén los valores a los óptimos mayor será la exactitud del modelo empleado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comparación de los valores de intensidad de la radiación solar

Los valores horarios acumulados de intensidad de la radiación solar estimados por el modelo (EI_{WRF} y EI_{WRFCs}) se comportan de manera similar a los medidos por la celda fotovoltaica los días 1ro (Figura 2 (a)) y 8 de marzo, días típicos de cielo despejado; mientras que en el resto de los días la variable EI_{WRF} es completamente diferente a las otras dos (Figura 2 (b)), debido a la influencia de la nubosidad. Se puede apreciar también que el comportamiento de la variable EI_{WRFCs} presenta la misma tendencia que el de la medida por la celda fotovoltaica, aunque el modelo presenta valores menores durante la mañana y mayores durante la tarde.

Tabla 2. Datas seleccionadas para determinar ajustes entre EI_{Celda} y EI_{WRFCs}

Data	Diferencias	Tamaño de la muestra
1	$ EI_{Celda} - EI_{WRFCs} \leq 60 \text{ Wh/m}^2$	93 (25.6 %)
2	$ EI_{Celda} - EI_{WRFCs} \leq 75 \text{ Wh/m}^2$	113 (31.2 %)
3	$ EI_{Celda} - EI_{WRFCs} \leq 100 \text{ Wh/m}^2$	150 (41.4 %)
4	$ EI_{Celda} - EI_{WRFCs} \leq 150 \text{ Wh/m}^2$	198 (54.7 %)
5	Todas las horas que cumplen la condición de horas de sol	296 (81.7 %)

$$MBE = \frac{1}{n} \sum (EI_{WRFCs_i} - EI_{Celda_i}) \quad (2)$$

$$MPE\% = \frac{1}{n} \sum \frac{(EI_{WRFCs_i} - EI_{Celda_i})}{R_{Celda_i}} \cdot 100 \quad (3)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum (EI_{WRFCs_i} - EI_{Celda_i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$rP = \frac{n \sum (EI_{WRFCs_i} \cdot EI_{Celda_i}) - \sum EI_{WRFCs_i} \cdot \sum EI_{Celda_i}}{\sqrt{n \sum EI_{WRFCs_i}^2 - (\sum EI_{WRFCs_i})^2} \cdot \sqrt{n \sum EI_{Celda_i}^2 - (\sum EI_{Celda_i})^2}} \quad (5)$$

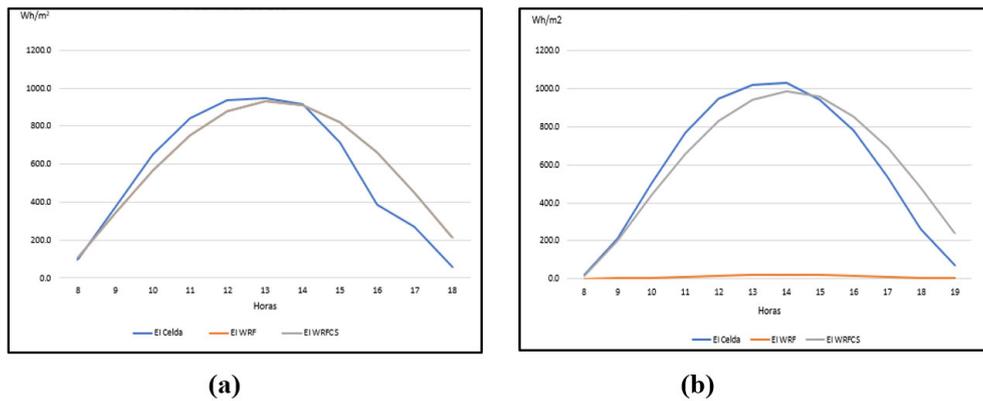


Figura 2. Comparación entre las variables EI_{Celda} , EI_{WRF} y EI_{WRFCS} para los días 1ro (a) y 28 de marzo (b)

En cuanto a los valores acumulados en 24 horas, se encontró una variabilidad significativa en las estimaciones del modelo con respecto a la variable EI_{WRF} , lo cual puede estar relacionado con las parametrizaciones escogidas que resultaron adecuadas para estimar los días de cielo despejado y presentaron grandes inexactitudes para los días con generación de nubes. La variable EI_{WRF} se comporta de manera similar a EI_{Celda} solamente los días 8, 9 y 14 de marzo; mientras que EI_{WRFCS} muestra similitud los días 1ro, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 17, 24, 28, 29 y 30. En la Figura 3 se puede observar como los acumulados diarios de EI_{WRFCS} sobrestiman a los medidos por la celda y presentan una distribución suave. Por su parte, los valores de EI_{WRF} son subestimados y poseen una distribución más abrupta.

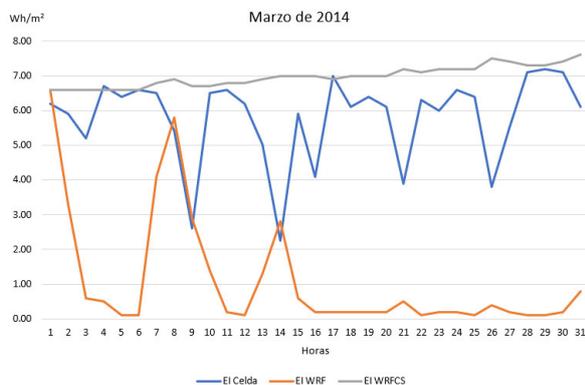


Figura 3. Marcha diaria de EI_{Celda} , EI_{WRF} y EI_{WRFCS}

Por tanto, para determinar el desempeño de un sistema fotovoltaico a partir del modelo WRF- ARW se debe utilizar la variable EI_{WRFCS} donde no hay influencia de la nubosidad.

Ajustes entre EI_{Celda} y EI_{WRFCS}

Los resultados de los ajustes se muestran en la Figura 4, donde se aprecia como a medida que se disminuye el valor de la diferencia entre EI_{Celda} y EI_{WRFCS} ,

ambas variables se acercan a la línea de tendencia y la pendiente de la ecuación se aproxima a 1, es decir, el valor estimado por el WRF (EI_{WRFCS}) se aproxima al valor medido por la celda fotovoltaica (EI_{Celda}). Sin embargo, cuando disminuimos la diferencia, decrece la cantidad de datos que cumplen esa condición y la muestra no sería representativa en comparación con la población.

En la Tabla 3 se muestran los valores de los estadígrafos calculados. A medida que aumentan las diferencias seleccionadas, nótese que el error medio (MBE), el cuadrático medio (RMSE) y el porcentual medio (MPE%) aumentan, alejándose de cero (valor óptimo), lo que significa que la EI_{WRFCS} se aleja de la EI_{Celda} . Por otra parte, a medida que aumenta la diferencia disminuye el índice de correlación de Pearson (rP), es decir, disminuye la correlación que existe entre EI_{WRFCS} y EI_{Celda} ; aunque de manera general los valores de rP son aceptables.

Para determinar el ajuste más adecuado es necesario buscar un equilibrio entre la dispersión de los valores con respecto a la línea de tendencia, el porcentaje que la muestra representa del total y el valor de los estadígrafos aplicados.

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 3 se observa que, aunque el error cuadrático medio más pequeño corresponde a la data 1, donde las diferencias entre las variables son menores o igual a 60, la muestra que cumple estas condiciones también es pequeña, pues solo contempla el 25.6 % de todas las horas empleadas en el estudio. Sin embargo, la data 4, donde las diferencias entre las variables son menores o igual a 150, a pesar de que su error cuadrático medio duplica a la data 1, contempla más del 50% de todas las horas empleadas en el estudio y tiene valores de estadígrafos y correlación de Pearson que se consideran aceptables para la evaluación realizada. Por esta razón se considera como ajuste más adecuado la data 4, que viene dada por la expresión:

$$EI_{WRFCS} = 0.9125 \cdot EI_{Celda} + 57.331$$

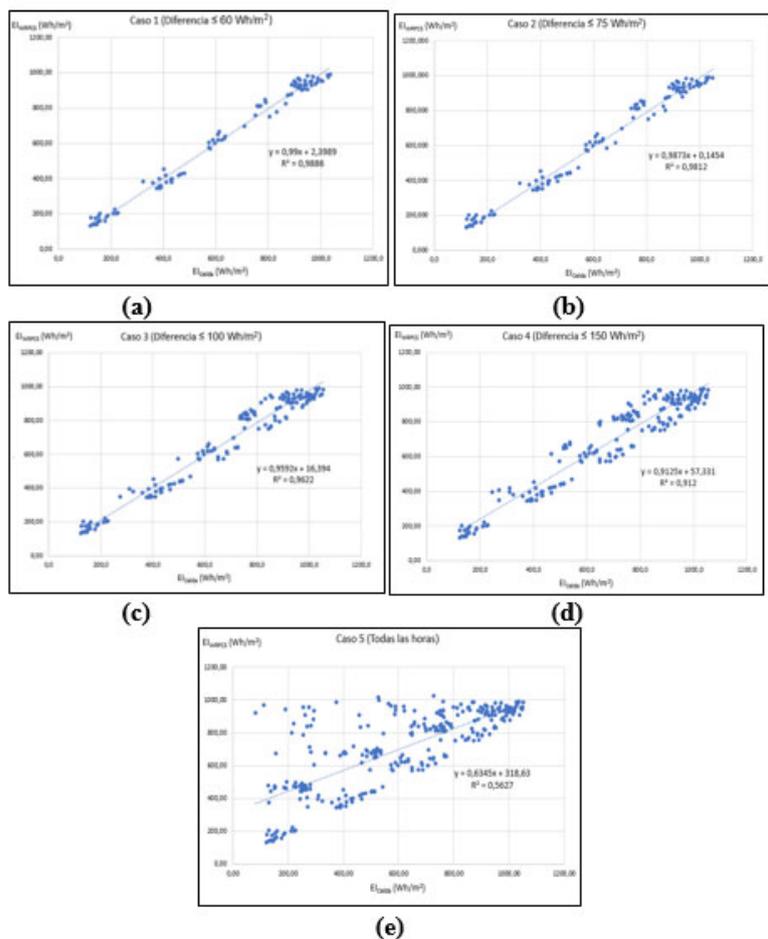


Figura 4. Ajustes entre EI_{Celda} y EI_{WRFCS} para diferencias de 60 Wh/m^2 (a), 75 Wh/m^2 (b), 100 Wh/m^2 (c), 150 Wh/m^2 (d) y para todas las horas de sol (e)

Tabla 3. Valores de los estadígrafos utilizados en el estudio.

	Data 1	Data 2	Data 3	Data 4	Data 5
MBE (Wh/m2)	-3.86	-7.92	-11.36	-3.24	100.86
MPE% (%)	5.75	6.93	8.05	10.80	45.54
RMSE (Wh/m2)	33.04	41.39	56.26	79.03	212.87
rP	0.99	0.99	0.98	0.95	0.75
Tamaño de la muestra utilizada del total de horas estudiadas (362 h)	93 (25.6 %)	113 (31.2 %)	150 (41.4 %)	198 (54.7 %)	296 (81.7 %)

Determinación del rendimiento del sistema fotovoltaico

Para determinar el rendimiento de un sistema fotovoltaico se verificó cuan cercanos son los valores del coeficiente característico calculados según la ecuación 1 empleando como energía solar incidente los valores de EI_{WRFCS} y EI_{Celda} , teniendo en cuenta las cinco datas definidas. Por último, se aplicaron los estadígrafos

MBE y RMSE para verificar las diferencias entre ambas variables. Los resultados obtenidos se muestran en la [Tabla 4](#).

El menor valor de error medio (MBE) se obtiene para la data 4, que contempla más del 50% de todas las horas empleadas en el estudio; mientras que la data 1 muestra el menor valor del error cuadrático medio (RMSE), pero esta solo contempla el 25.6 % de todas las horas empleadas en el estudio.

Tabla 4. Valores de los estadígrafos para comparar los valores del coeficiente característico determinados a partir de EI_{WRFCS} y EI_{Celda} .

	Acumulado Diario	Data 1	Data 2	Data 3	Data 4	Data 5
MBE	-0.89	0.05	0.10	0.12	0.04	-0.91
RMSE	1.36	0.41	0.49	0.55	0.75	1.92

CONCLUSIONES

La estimación de la intensidad de la radiación solar mediante el empleo del modelo WRF, con fines fotovoltaicos, tiene particular importancia en Cuba ya que las posibilidades de adquisición de instrumentos medidores, su mantenimiento y calibración es limitada.

Con este trabajo se ha demostrado la capacidad del modelo WRF como alternativa para evaluar el rendimiento de un sistema fotovoltaico a partir de la estimación de la intensidad de la radiación solar, para lo cual es necesario: la utilización de la variable *Accumulated Downwelling Clear Sky Shortwave Flux At Bottom (ACSWDNBC*, denominada en el trabajo EI_{WRFCS}) para disminuir los efectos de la nubosidad, y que entre los valores medidos y estimados exista una diferencia menor o igual a 150 Wh/m².

REFERENCIAS

- Teixeira-Branco, V., Alonso-Suárez, R., de Almeida, E., Porrini, C., Gutiérrez, A., & Cazes, G. (2018). Evaluación del pronóstico de irradiación solar diaria en Uruguay utilizando el modelo WRF. In *Anales del VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*, Gramado.
- Cardona, M., & Piliouguine, M. (2017). *Medida de la irradiancia y temperatura*. España: Máster Oficial en Tecnología de los sistemas de Energía Solar Fotovoltaica. Universidad Internacional de Andalucía.
- Galán, R., Arce, A., Koch, C., & Lara, P. (2015). *Modelo de cuantificación del potencial fotovoltaico de España*. España: Colección Innovación y Conocimiento.
- Quintero Santana, S., & Guinand Rodríguez, K. (2020). Protocolo y procedimiento aplicado a instrumentación piranómetro para medición de radiación solar.
- Morradán, J. (2012). *Piranómetro fotovoltaico*. Pamplona, España: Tesis presentada para optar por el título académico de Ingeniero Técnico Industrial Eléctrico. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. Universidad Pública de Navarra.
- Sayago, S., Bocco, M., Ovando, G., & Willington, E. A. (2011). Radiación solar horaria: modelos de estimación a partir de variables meteorológicas básicas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 15.
- Stolik, D. (2019). *Energía fotovoltaica para Cuba*. La Habana, Cuba: Editorial CUBASOLAR.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflicto de intereses

Contribución de los autores: Flavia Gutiérrez Muiña: **Conceptualización, Conservación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Visualización, Redacción - borrador inicial**. Alina Roig Rassi: **Conceptualización, Investigación, Metodología, Administración de proyecto, Recursos, Redacción - revisión y edición**. Israel Borrajero Montejo: **Metodología, Recursos, Supervisión, Validación, Visualización**. Bárbara Liz Miravet Sánchez: **Redacción - revisión y edición**.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)