

Sistema de monitoreo de mediciones de radiación solar en parques fotovoltaicos



Monitoring system for solar radiation measurements in photovoltaic parks

<https://cu-id.com/2377/v30n3e10>

 Israel Borrajero - Montejo,  Miguel Hinojosa,  Juan Carlos Peláez - Chávez,  Krystine Naranjo -Villalón*,  Alfredo Roque - Rodríguez

Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.

RESUMEN: La mayoría de los parques fotovoltaicos instalados en el territorio nacional cuentan con medios de registro y reporte, junto con la generación eléctrica, de varias variables meteorológicas que tienen influencia en su rendimiento, en particular, la radiación solar, que es medida con piranómetros. Estos instrumentos pueden presentar variaciones en sus constantes de calibración tras un uso prolongado, y requieren de un esquema de monitoreo y calibraciones periódicas. A continuación se presenta un método de validación preliminar de los datos de radiación solar en los parques fotovoltaicos, que puede ir indicando en qué parques se están reportando valores erróneos de radiación solar. El método compara los valores horarios reportados cada día en cada parque con los estimados por el modelo numérico de pronóstico WRF y en los días donde la correlación entre ambas series es superior a 0.985, calcula entonces la relación entre las sumas de cada serie. Si el valor esta relación es próximo a 1, se puede considerar que el piranómetro de ese parque funciona correctamente. Se presentan los resultados de la evaluación de los reportes de radiación solar en un conjunto de parques fotovoltaicos conectados a la red eléctrica nacional.

Palabras Clave: Radiación Solar, Parques Fotovoltaicos, Monitoreo, Correlación.

ABSTRACT: The majority of photovoltaic parks installed in the national territory have means of recording and reporting, along with electricity generation, several meteorological variables that influence their performance, in particular, solar radiation, which is measured with pyranometers. These instruments may present variations in their calibration constants after prolonged use, and require a monitoring scheme and periodic calibrations. Below is a preliminary validation method for solar radiation data in photovoltaic parks, which can indicate in which parks erroneous solar radiation values are being reported. The method compares the hourly values reported each day in each park with those estimated by the WRF numerical forecast model and on days where the correlation between both series is greater than 0.985, it then calculates the relationship between the sums of each series. If the value of this ratio is close to 1, it can be considered that the pyranometer of that park is working correctly. The results of the evaluation of solar radiation reports in a set of photovoltaic parks connected to the national electrical grid are presented.

Keywords: Solar Radiation, Photovoltaic Parks, Monitoring, Correlation.

*Autor para correspondencia: Krystine Naranjo -Villalón. E-mail: krystinenaranjo@gmail.com

Recibido: 12/03/2024

Aceptado: 23/04/2024

Conflicto de Intereses: No se declaran conflictos de interés.

Contribución de los autores: Israel Borrajero - Montejo: **Participó en la conceptualización de la investigación. Trabajó con el uso del software estadístico, en el procesamiento de los datos recogidos para el estudio. Realizó contribuciones en la investigación y en la búsqueda de información del trabajo. Interpretación de los datos. Participó en el diseño de la investigación y en la revisión y redacción del informe final.** Miguel Hinojosa: **Formó parte de la creación de la metodología a emplear. Trabajó con el uso del software estadístico, modelación matemática. Participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.** Juan Carlos Peláez - Chávez: **Formó parte de la creación de la metodología a emplear. Se encargó de la validación de los resultados. Participó en la búsqueda de fuentes bibliográficas necesarias. Participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.** Krystine Naranjo -Villalón: **Participó en la conceptualización de la investigación, en el análisis de los resultados. Redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.** Alfredo Roque - Rodríguez: **Participó en la conceptualización de la investigación. Análisis formal de los resultados, revisión crítica de la organización del trabajo. Participó en el diseño de la investigación**

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/)

INTRODUCCIÓN

Si se considera una planta solar fotovoltaica o algún tipo de arreglo que conforme un sistema fotovoltaico, existen parámetros críticos implicados en la generación de energía solar como irradiancia, temperatura y potencia generada que, en caso de desviarse del rango normal, afectarán la eficiencia de la instalación y en consecuencia su rentabilidad. En una investigación llevada a cabo en el año 2022 en la Universidad Nacional de San Martín se midieron y registraron estas variables involucradas en la evaluación del rendimiento de sistemas solares fotovoltaicos tales como temperatura de celda, irradiancia y potencia del arreglo y se construyó un dispositivo de telemetría basado en la tecnología IoT (Internet of Things) para el monitoreo de la instalación solar fotovoltaica del centro tecnológico FUNINTEC (Fundación Innovación y Tecnología). El prototipo implementado está compuesto por sensores de temperatura e irradiancia junto con la electrónica necesaria para convertir las variables físicas en datos digitales, así como también módulos de procesamiento y comunicaciones y, además un sistema de alimentación autónoma a batería y energía solar (Corominas & Grebneva, 2022).

Existen otros trabajos relacionados, como el llevado a cabo en la Universidad de la Costa, en Colombia, en el año 2022, donde se evaluó la eficiencia energética de tres tecnologías diferentes de paneles fotovoltaicos operando In Situ; paneles de silicio monocristalinos, policristalinos y CIGS (Cobre, indio, Galio y Selenio) de capa fina, considerando características propias de la ubicación del sistema, como son las variables meteorológicas de la ciudad de Barranquilla. Para el desarrollo de dicha investigación se implementó un sistema de monitoreo en tiempo real de datos meteorológicos, ambientales y energéticos, para determinar la correlación de las variables que caracterizan el comportamiento energético de las tecnologías fotovoltaicas seleccionadas, se realizó su caracterización, determinando su producción de energía para finalmente desarrollar comparaciones energéticas para cada tecnología estudiada (Mendieta, 2022).

En la investigación realizada en la Universidad Tecnológica Centroamericana, UNITEC, en el año 2020, se muestra una propuesta de un sistema de monitoreo por medio de sensores que presentan información sobre variables tales como temperaturas, opacidad, proximidad de lluvia, consumo, nivel de tensión y potencias. El método ofrece un diagnóstico del sistema fotovoltaico para comprobar que no se produzcan fallas y/o caídas bruscas que puedan alterar la red. Se logra describir y enumerar los distintos tipos de sensores utilizados para la prevención de fallas en los sistemas fotovoltaicos, y como estos pueden ayudar al análisis y predicción de las nubes para

evitar interrupciones imprevistas de la generación. Además, dan una opción de los nuevos paneles que son muy útiles para el ahorro de energía eléctrica y aprovechamiento del recurso principal. Además de presentar la información necesaria de tipos de mantenimiento y las fallas más comunes en los sistemas fotovoltaicos que pueden ser aplicados y adaptados según la utilidad que el cliente les desea dar, se brinda una solución de una propuesta puede ser aplicada para sistemas residenciales, comerciales o grandes parques fotovoltaicos (Sierra Aguilera & Mol, 2020).

El registro de la radiación solar en parques fotovoltaicos es fundamental para la evaluación del estado técnico y el rendimiento de los mismos, asimismo, en los parques que contribuyen a la red eléctrica nacional es necesario hacer un pronóstico de la generación de 24 a 48 horas para que el Despacho Nacional de Carga pueda tener en cuenta las fluctuaciones de este tipo de contribución al hacer la planificación de la generación del día en función de la demanda estimada. En este caso se utiliza un modelo de pronóstico del tiempo, el WRF (Powers, et al., 2017), que da el pronóstico de las principales variables meteorológicas en una rejilla con paso de 3 x 3 Km sobre todo el territorio nacional. Entre las variables suministradas está la radiación solar global, directa y difusa. Los datos reportados de radiación solar y generación permiten ajustar relaciones empíricas en cada parque para estimar la generación eléctrica en función de la radiación solar, al evaluar estas relaciones con los valores de radiación solar pronosticados por el WRF, se obtienen los pronósticos de generación, también los datos reportados se utilizan para evaluar la calidad del pronóstico y ajustar la configuración del modelo buscando reducir el error. Resulta de la mayor importancia que los valores reportados en los parques sean lo más exactos posibles, los instrumentos utilizados para el monitoreo de la radiación solar son los piranómetros, equipos analógicos que, expuestos al sol entregan una señal de voltaje proporcional a la intensidad de radiación solar incidente. Los instrumentos están diseñados de manera que esta relación radiación - voltaje se mantenga constante para cualquier valor posible de radiación solar, y se conoce como constante de calibración. Los sistemas de colección de datos reciben la señal de voltaje del piranómetro, la digitalizan y la multiplican por la constante de calibración correspondiente para registrar la radiación solar. Cada piranómetro viene con una constante de calibración suministrada por el fabricante, que con el tiempo de explotación puede ir cambiando, y así el equipo empieza a reportar valores incorrectos de radiación solar, en estos casos se hace necesario calibrar el instrumento y obtener su nueva constante.

Si se tiene en cuenta que de momento hay 68 parques fotovoltaicos y la perspectiva es que haya muchos más, la actividad de mantener al día las calibraciones puede volverse difícil, sería muy útil en este caso poder contar con alguna forma de monitoreo de los instrumentos, que indicara dónde hay equipos que pudieran estar reportando valores incorrectos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Existen hasta el momento 68 parques fotovoltaicos conectados a la red eléctrica nacional, que cuentan con instrumentos para medir un grupo de variables meteorológicas que son relevantes en su rendimiento, tales como la radiación solar, la temperatura del aire y de la superficie de los paneles y el viento, estos valores son reportados diariamente, junto con la generación eléctrica, mediante un sistema de recolección de datos y son utilizados para evaluar el estado técnico de cada parque. Igualmente sirven de apoyo a la elaboración de pronósticos de generación de 24 horas que permiten conocer de antemano la contribución de los parques fotovoltaicos, pues al depender de las condiciones meteorológicas, principalmente la nubosidad, que son variables, este aporte puede ser fluctuante, y con un pronóstico suficientemente exacto, se puede planificar la contribución de las restantes formas de generación para satisfacer la demanda estimada, con al menos un día de antelación.

El pronóstico está basado en el sistema de pronóstico numérico SisPI, desarrollado en el Centro de Física de la Atmósfera del Instituto de Meteorología de Cuba, este sistema está basado en el modelo numérico de pronóstico del tiempo WRF (Weather Research and Forecast) que ha sido configurado, mediante varios estudios de sensibilidad (Sierra-Lorenzo, et al., 2015) (Sierra-Lorenzo, Borrajero-Montejo, Ferrer-Hernández, Morfa-Ávalos, & Morejón-Loyola, 2017) para ofrecer pronósticos principalmente de precipitación, pero que da todo un conjunto de variables meteorológicas como viento, temperatura del aire, humedad y radiación solar entre otras. Según la configuración establecida en el sistema SisPI, los valores pronosticados se presentan en una matriz rectangular de puntos con un espaciamiento de 3 x 3 km. Para estimar los valores en una localización arbitraria se pueden emplear distintos tipos de interpolación a partir de los puntos de la rejilla. En el caso de la radiación solar se utiliza la interpolación bilineal entre los 4 nodos más cercanos al punto en cuestión.

Los valores de radiación solar pronosticados tienen en cuenta el efecto de modulación que produce la nubosidad, en este caso, la nubosidad que va generando el propio modelo, como se observa en la figura 1, donde se representan las marchas diarias registradas y pronosticadas de la radiación solar y

la generación eléctrica en un parque de 2.2 Mw de capacidad.

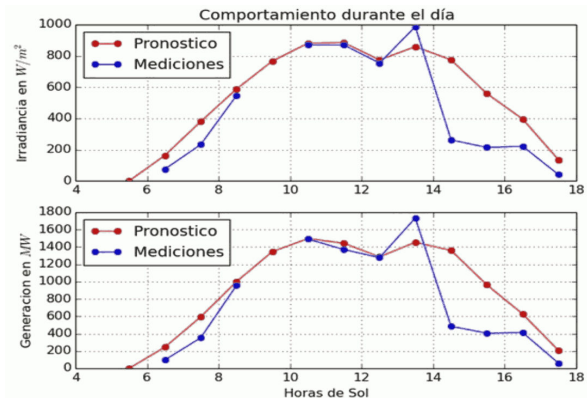


Figura 1. Marcha diaria de los valores pronosticados y medidos de radiación solar y generación eléctrica en un parque fotovoltaico.

En la Figura 1 se aprecia que la radiación solar pronosticada así como la generación eléctrica pueden tener un grado variable de correspondencia. La principal causa de diferencias es la nubosidad producida por el modelo, que puede tener errores tanto de sobreestimación como de subestimación. Otra causa de posibles diferencias puede ser que la información con que trabaja el WRF en relación con los aerosoles atmosféricos (Jimenez, et al., 2014), que es el índice de espesor óptico de los aerosoles (AOD), no se corresponda con el real. Los aerosoles influyen en la extinción de la radiación solar de varias maneras, atenúan el flujo de radiación directa por absorción y dispersión, en el primer caso se atenúa la radiación global mientras que en el segundo aumenta la radiación difusa a expensas de la directa. También los aerosoles influyen en la formación de nubes al actuar como núcleos de condensación de gotas (CCN). A través de las parametrizaciones de radiación de onda larga y corta y de las de microfísica, el modelo incorpora estos procesos en el cálculo de las variables meteorológicas (Thompson, et al., 2016), incluida la radiación solar. El modelo usa una marcha anual climática de este índice para la latitud media de Cuba que se corresponde bastante bien con la realidad, salvo en casos aislados, como eventos notables de presencia de aerosoles del Sahara.

Cuando para un día determinado ocurre un pronóstico muy acertado del desarrollo de la nubosidad y no hay diferencias entre el AOD real y el del modelo, cabe esperar que los valores de las series horarias pronosticada y reportada tengan una alta correlación, y que además, la relación entre sus sumas o áreas bajo las curvas sea muy próxima a 1. Diferencias entre el pronóstico de nubosidad y sus valores reales hacen disminuir notablemente el coeficiente de correlación entre las marchas y la relación entre las áreas, por su parte, puede tomar valores tanto mayores como menores de 1 en

dependencia de que el modelo haya sobreestimado o subestimado la nubosidad. Por otro lado, las diferencias entre valores de AOD reales y utilizados por el modelo también afectan la correlación entre las marchas pronosticadas y medidas por la forma no lineal en que varía a lo largo del día la extinción que provocan los aerosoles en la radiación solar que atraviesa la atmósfera (Hulst, 1958; Escobedo João, Gomes Oliveira, & Soares, 2011). Un mayor valor de AOD en el modelo que en la realidad provoca una disminución en los valores de radiación pronosticados con respecto a los reales, pero esta será más apreciable para ángulos bajos de altura del sol, por lo que además de disminuir los valores, disminuye también la correlación entre las series de valores diurnos. Del análisis anterior se desprende que si para un día determinado se tiene un valor muy alto de correlación entre la serie de valores del modelo y los reportados, pero la relación entre las sumas no es próxima a 1 entonces hay una alta probabilidad de que la constante de calibración del instrumento en ese parque haya cambiado.

A partir de los registros horarios de generación y radiación solar reportados en los parques fotovoltaicos y de los valores de radiación solar estimados por el modelo WRF, se calculan los valores de correlación por días en un período de un año para cada parque, y se seleccionan los días con correlación mayor o igual a 0.985. Para el conjunto de días seleccionado se calcula el valor medio de la relación entre las sumas de los valores estimados y la de los reportados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La **Tabla 1** muestra los resultados obtenidos para el período de junio de 2022 a junio de 2023.

La **Figura 2** es la representación gráfica de la **Tabla 1**. Se observa que el parque de Caguaguas II (CAG2S) en Villa Clara presenta las diferencias más grandes entre valores reportados y estimados, un 33.77% mayores, de hecho, este parque reporta con frecuencia valores de radiación solar mucho mayores que la radiación solar en el tope de la atmósfera, aunque a lo largo del año comprendido en el experimento sólo hubo 2 días donde se cumplió el criterio de que la correlación entre valores estimados por el WRF y los reportados fuera mayor que 0.985. Teniendo en cuenta las imprecisiones del modelo, puede establecerse un umbral de $\pm 10\%$ para considerar un instrumento como que está reportando datos incorrectos, aunque también debe tenerse en cuenta con cuántos días se ha establecido la relación.

También se observa un grupo grande de parques que no tienen reportado ningún día donde se cumpla que la correlación fue mayor que 0.985. Aunque de acuerdo al régimen de nubosidad, en algunos parques se darán casos de alta correlación con más frecuencia que en otros, que en un año no haya ningún caso de alta correlación es poco probable en parques que reporten con estabilidad, desafortunadamente hay un número considerable de parques que casi nunca reportan datos aprovechables.

Tabla 1. Relación entre sumas de valores diurnos reportados y estimados por el modelo WRF para días donde ambas series presentaron valores de correlación mayores que 0.985

Id Parque	Días	Correlación	Relación entre sumas	Relación entre sumas (%)
CAG2S	2	0.99	1.3377	33.77
MARRS	1	0.99	1.2505	25.05
EXPOS	2	0.99	0.8199	-18.01
NARAS	3	0.99	0.8257	-17.43
CAR3S	13	0.99	1.1379	13.79
BORIS	1	0.99	0.866	-13.4
CAGUS	2	0.99	1.1233	12.33
UCLVS	6	0.99	1.1215	12.15
AGUDS	4	0.99	1.1107	11.07
PAR2S	4	0.99	0.8996	-10.04
GUANS	8	0.99	1.0963	9.63
PMAIS	5	0.99	1.0961	9.61
CAR1S	12	0.99	1.095	9.5
YUR2S	6	0.99	1.0799	7.99
VENZS	1	0.99	0.922	-7.8
STE3S	4	0.99	1.0731	7.31
STE4S	4	0.99	1.0726	7.26
PAYAS	6	0.99	1.0707	7.07
FRIGS	4	0.99	1.0604	6.04
YAYAS	3	0.99	1.0519	5.19
PAR1S	3	0.99	0.9526	-4.74
MAT2S	6	0.99	1.0376	3.76
STERS	2	0.99	1.0375	3.75
MANAS	7	0.99	1.0162	1.62
IMIAS	1	1	1.008	0.8
STE2S	3	0.99	1.0022	0.22

Id Parque	Días	Correlación	Relación entre sumas	Relación entre sumas (%)
TRONS				
TRO2S				
PR2CS				
PIA2S				
PREAS				
SMARS				
CORES				
CENIS				
ZAL2S				
TREBS				
HERRS				
XLIBS				
LRINS				
CRANS				
CRUCS				
PALMS				
PINOS				
YAGUS				
SIERS				
NEIVS				
GUASS				
YGUAS				
MYJIS				
MYJ2S				
VENES				
CEBAS				
CHAMS				
13AGS				
API2S				
LUGAS				
GUAIS				
PMECS				
YUR1S				
JIGUS				
MARTS				
YARES				
YAR2S				
SIBOS				
CIESS				
MAYAS				
RIOGS				
GTMOS				
SIGUS				

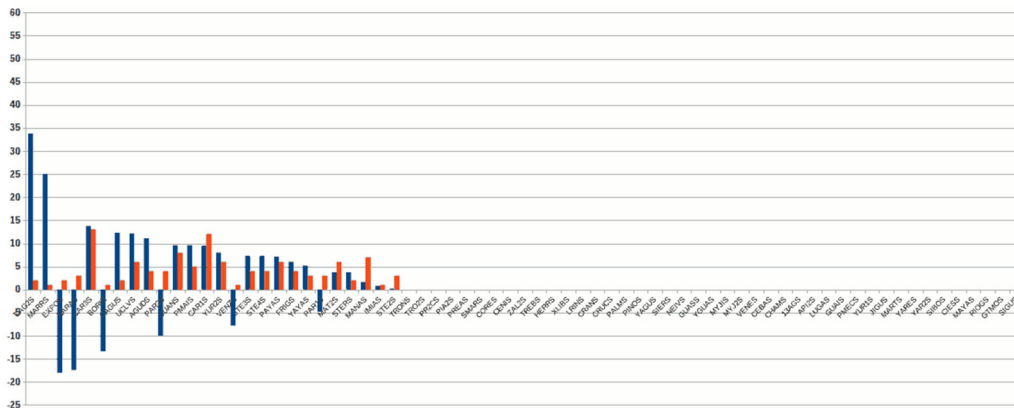


Figura 2. Relación media entre sumas diurnas de radiación solar reportada y estimada por en WRF para días donde la correlación entre ambas series es mayor que 0.985, las barras azules representan el error relativo en % entre las sumas y las rojas representan el número de días en que se cumplió la condición

CONCLUSIONES

El método propuesto permite llevar un monitoreo periódico y automatizado de la calidad de los valores de radiación solar reportados en los parques fotovoltaicos que contribuyen a la red eléctrica nacional.

La exigencia de un umbral alto de correlación entre los valores reportados y estimados puede provocar que en algunos parques y en algunas épocas del año se tengan pocos casos para evaluar, pero si los reportes se producen con la calidad de datos necesaria, debe poder cubrirse todo el conjunto de los parques. En el año transcurrido entre septiembre de 2020 y septiembre de 2021 se reportaron días con alta correlación en 55 de los 68 parques, mientras que entre junio de 2022 y junio de 2023, sólo se reportaron en 17. Esto da idea de un deterioro de la calidad de los reportes.

REFERENCES

- Corominas, M. C., & Grebneva, A. (2022). *Sistema de telemetría IoT para el monitoreo de la instalación solar fotovoltaica del centro tecnológico FUNINTEC*. Proyecto Final Integrador, Universidad Nacional de San Martín, San Martín.
- Escobedo João, E., Gomes Oliveira, A., & Soares. (2011). Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renewable Energy*(36), 169-178. doi: <http://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.018>.
- Hulst, H. C. (1958). Light Scattering by Small Particles. *Nature*(182), 1470-1471. doi: <http://doi.org/10.1038/1821470b0>
- Jimenez, P., Hacker, J., Haupt, S. E., Ruiz Areas, J., Geymard, C., Thompson, G., . . . Deng, A. (2014). *WRF-Solar: An augmented NWP model for solar power prediction*. Bulletin of the American Meteorological Society. doi: <http://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00279.1>
- Mendieta, M. I. (2022). *Evaluación de la Eficiencia Energética de Paneles Solares Operando In Situ*. Maestría en Eficiencia Energética y Energía Renovable, Universidad de la Costa, Departamento De Energía, Barranquilla.
- Powers, J. G., Klem, J., Skamarock, W., Davis, C., Dudhia, J., Gill, D., . . . Duda, M. (2017). *The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions*. Bulletin of the American Meteorological Society.
- Sierra Aguilera, L., & Mol, O. (2020). Propuesta de un Sistema de Monitoreo y Detección de Fallas en un Sistema Fotovoltaico. Tegucigalpa.
- Sierra-Lorenzo, M., Borrajero-Montejo, I., Ferrer-Hernández, A., Morfa-Ávalos, Y., & Morejón-Loyola, Y. a.-F. (2017). Estudios de Sensibilidad del SisPI a Cambios de la PBL, la Cantidad de Niveles Verticales y, las Parametrizaciones de Microfísica y Cúmulos a muy Alta Resolución. doi: <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.29136.00005>
- Sierra-Lorenzo, M., Ferrer-Hernández, A., R., V.-H., González-Mayor, Y., Cruz-Rodríguez, R., Borrajero-Montejo, I., . . . Quintana-Rodríguez, N. a.-C. (2015). Sistema Automático de Predicción a Mesoescala de Cuatro Ciclos Diarios. doi: <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.2888.1127>
- Thompson, G., Tewari, M., Ikeda, K., Tsendorf, S., Weeks, C., Otkin, J., & Kong, F. (2016). *Explicitly-coupled cloud physics and radiation parameterizations and subsequent evaluation in WRF high-resolution convective forecasts*. Atmospheric Research. doi: <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.09.005>
- Israel Borrajero Montejo. Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.
E-mail: israel_b_m@yahoo.com
- Miguel Hinojosa. Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.
E-mail: miguelhinojosa994@gmail.com
- Juan Carlos Peláez - Chávez. Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.
E-mail: jcpozone@yandex.com
- Krystine Naranjo - Villalón. Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.
- Alfredo Roque - Rodríguez. Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.
E-mail: alfroquerodriguez@gmail.com