

## ARGP-V2 UN MODELO PRÁCTICO PARA LA ESTIMACIÓN DE IRRADIANCIA GLOBAL HORIZONTAL EN CONDICIONES DE CIELO CLARO PARA SITIOS DE ALTURA

Rubén D. Ledesma<sup>1</sup>, Germán A. Salazar<sup>1</sup>, Olga de Castro Vilela<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO). Departamento de Física, Facultad de Cs. Exactas, Univ. Nacional de Salta. Av. Bolivia 5150, Salta Capital, CP 4400.

<sup>2</sup> Departamento de Energía Nuclear, Centro de Tecnología, Universidad Federal de Pernambuco. Av. Prof. Luiz Freire 1000, Cidade Universitária, 50740540 - Recife, PE - Brasil.

E-mail: rdledesma1995@gmail.com

**RESUMEN:** Este trabajo es una continuación del artículo “*Practical models to estimate horizontal irradiance in clear sky conditions: Preliminary results*” (Salazar et al, 2010). En el cual se especifica el modelo argentino corregido por presión (ARG-P), un modelo práctico para estimar irradiancia solar global horizontal (GHI) en condiciones de cielo claro (CC). Se realiza un análisis detallado del funcionamiento de ARG-P y se utiliza el servicio de irradiación McClear Clear-Sky del Servicio de Monitoreo de la Atmósfera de Copernicus para implementar una nueva versión del modelo que plantea, a partir de una corrección sobre el índice representativo de claridad utilizado en ARG-P, se obtiene ARGP-v2, una mejora sobre la estimación de GHI en condiciones de CC para sitios con altura mayor a mil metros sobre el nivel del mar ubicados en las provincias de Salta y Jujuy.

**Palabras clave:** energía solar, irradiancia, cielo claro.

### INTRODUCCIÓN:

El efecto de los procesos de absorción y dispersión sobre la radiación solar puede ser modelado en forma aproximada en el caso de condiciones de cielo claro (CC), es decir, de cielo despejado o sin nubes. La importancia de los modelos de CC se debe a dos factores: son la base de muchos modelos físicos e híbridos de irradiancia solar que incluyen el efecto de la nubosidad estimada a partir de imágenes satelitales y además, un modelo de CC bien ajustado puede estimar irradiancia de cielo claro con incerteza menor a 3% si la atmósfera está bien caracterizada, lo que lo transforma en una herramienta útil para realizar un control de calidad de series de medidas de irradiancia solar o normalizar las series de radiación para estudios de variabilidad o predicción del recurso, donde se debe aislar únicamente el efecto de las nubes. (Abal et al, 2020).

Un componente clave requerido para pronosticar la irradiancia con precisión es el modelo de cielo claro que estima la irradiancia promedio en un lugar en un momento dado en ausencia de nubes. Los métodos actuales para modelar la irradiancia de cielo claro son inexactos o requieren muchos datos atmosféricos, que tienden a variar según la ubicación y, a menudo, no están disponibles. (Palani et al, 2017).

En el artículo “*Practical models to estimate horizontal irradiance in clear sky conditions: Preliminary results*” (Salazar et al, 2010), se presentaron dos modelos para estimar irradiancia solar global horizontal en condiciones de cielo claro ( $GHI_{CC}$ ). La combinación de estos dos modelos dio lugar al modelo argentino corregido por presión (ARG-P) utilizado para estimar  $GHI_{CC}$  en sitios de gran altura.

El servicio de irradiación McClear Clear-Sky del Servicio de Monitoreo de la Atmósfera de Copernicus (CAMS) ofrece series temporales de irradiación que se observan en un sitio específico del mundo en condiciones de CC. (ECMWF, s.f.)

Para este trabajo se propuso analizar el modelo ARG-P e intentar implementar una corrección al mismo para un conjunto de sitios de las provincias de Salta y Jujuy.

### Análisis del modelo ARG-P

El modelo ARG-P utiliza como variable la altitud sobre el nivel del mar ( $A$ ) y genera como resultado un índice representativo de claridad ( $K_{tr}$ ) que se calcula para cada sitio estudiado. Este índice  $K_{tr}$  se utiliza luego con la masa de aire óptica relativa y la irradiancia extraterrestre para estimar el índice de claridad instantánea ( $K_t$ ). Posteriormente, se corrige el índice  $K_{tr}$  introduciendo la presión atmosférica en la definición de masa de aire óptica relativa propuesta por Kasten (Salazar et al, 2010).

El modelo calcula irradiancia solar global horizontal en condiciones de cielo claro ( $GHI_{CC}$ ) como:

$$GHI_{CC} = G_0 K_{t-r-p}^{Ma^{0,678}} \quad (1)$$

Donde:

$G_0$ : irradiancia global extraterrestre

$M_{ac}$ : Masa de aire óptica relativa propuesta por Kasten corregida por la presión atmosférica

Para sitios con altura menor a 1000 metros sobre el nivel del mar:

$$K_{t-r-p} = 0,7570 + 1,0112 * 10^{-5} * A^{1,1067} \quad (2)$$

Para sitios con altura mayor o igual a 1000 metros sobre el nivel del mar:

$$K_{t-r-p} = 0,7 + 1,6391 * 10^{-3} * A^{0,5500} \quad (3)$$

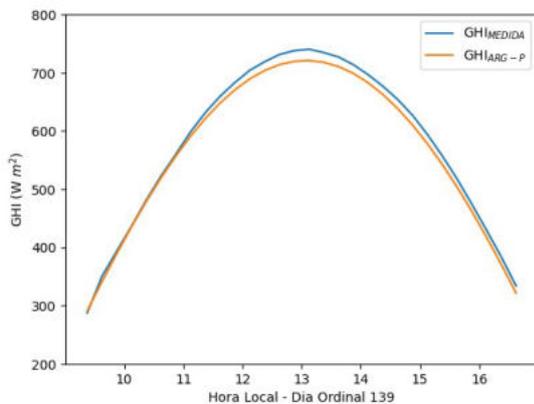


Figura 1: GHI SALTA 19/5

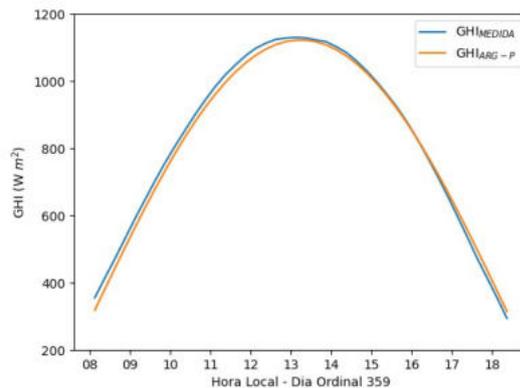


Figura 2: GHI SALTA 25/12

Las Fig 1 y Fig 2 muestran una comparativa entre la  $GHI_{CC}$  estimada por ARG-P y la  $GHI$  medida para un sitio ubicado en la ciudad de Salta con altitud de 1190 m.s.n.m. para un día próximo al invierno y un día de verano respectivamente.

### PLANTEAMIENTO DE LA ESTRATEGIA

Para la implementación del modelo ARG-P los autores tomaron datos de tres (3) sitios de la provincia de Salta, y trabajaron sobre los días de CC de la muestra para obtener su correspondiente  $k_{t-r-p}$ , nosotros planeamos, a través del servicio McClear Clear-Sky GHI, trabajar con datos de  $GHI_{CC}$  correspondientes a ocho (8) sitios, ubicados en las provincias de Salta y Jujuy. Es decir que para este trabajo se contó con una cantidad de datos significativamente más extensa.

En vista de que la variable  $A$  ha sido significativamente importante en la implementación de ARG-P, cada sitio con los que trabajamos fue elegido teniendo en cuenta su altitud. Los sitios y su altura correspondiente tomada a partir de la información de McClear se expresan en la siguiente tabla:

Tabla 1: SITIOS DE ESTUDIO

Localidad	Provincia	Latitud(°)	Longitud(°)	Altitud (msnm)
Salta	SALTA	-24,7	-65,4	1190
Yala	JUJUY	-24,12	-65,4	1600
Payogasta	SALTA	-25,05	-66,10	2442
El Angosto	JUJUY	-21,87	-66,18	3582
El Toro	JUJUY	-23,08	-66,7	4076
Molinos	SALTA	-25,79	-66,63	4116
El Rosal	SALTA	-24,4	-65,7	4510
Moreno	SALTA	-24,39	-68,04	5523

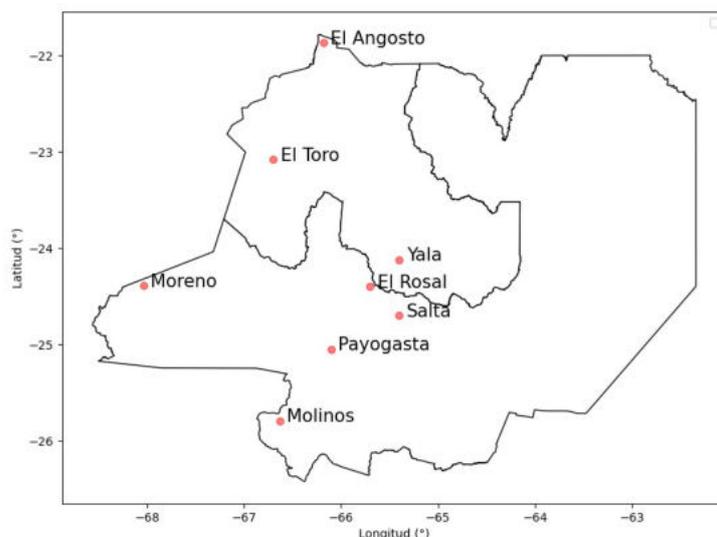


Figura 3: Sitios de Estudio Prov. Salta-Jujuy

La Fig 3 brinda una representación de los datos con los que trabajamos, estos se encontraban en escala 15 minutal (datos espaciados por 15 minutos entre ellos) comprendidos entre los períodos 1/1/2010 hasta 31/12/2020.

La estrategia aplicada en este trabajo se centró en realizar el cálculo de  $K_{t-r-p}$  para cada sitio planteado y luego expresar en función de A una aproximación al valor extrapolado a otros sitios.

## DESARROLLO

Para cada sitio (Sitio<sub>i</sub>), utilizando el servicio Mc-Clear de CAMS se obtuvo la GHicc correspondiente a escala 15 minutal de los períodos 2010-2020 (McClear(Sitio<sub>i</sub>)).

Se generaron 1500 valores (KTRP<sub>v2</sub>), utilizados para calcular una aproximación de la GHicc, a esta la llamamos  $GHI_{cc\_ARGP\_v2}$

$$GHI_{cc\_ARGP\_v2} = G_0 K_{t-r-p}^{Ma^{0,678}} \quad (4)$$

Aceptamos como KTRP<sub>v2</sub> a aquel valor candidato que minimice el error (RMSE) entre  $GHI_{cc\_ARGP\_v2}$  y McClear (Sitio<sub>i</sub>). Definimos RMSE;

$$RMSE = \sqrt{\sum_{1}^M (GHI_{cc\_ARGP\_v2} - GHI_{McClear})^2 / M} \quad (5)$$

Donde:

M: Es la cantidad total de datos de la muestra

Tabla 2:  $K_{t-r-p}$  v2 obtenidos para cada sitio

Localidad	Provincia	Latitud(°)	Longitud(°)	Altitud (msnm)	$K_{t-r-p-v2}$
Salta	SALTA	-24,7	-65,4	1190	0,8032
Yala	JUJUY	-24,12	-65,4	1600	0,8081
Payogasta	SALTA	-25,05	-66,10	2442	0,8235
El Angosto	JUJUY	-21,87	-66,18	3582	0,8443
El Toro	JUJUY	-23,08	-66,7	4076	0,8536
Molinos	SALTA	-25,79	-66,63	4116	0,8572
El Rosal	SALTA	-24,4	-65,7	4510	0,8637
Moreno	SALTA	-24,39	-68,04	5523	0,8782

Luego se procedió a realizar una extrapolación sobre los valores de  $K_{t-r-p}$  v2 obtenidos, introduciendo A como variable, se buscó una función que aproxime la serie de puntos.

Salazar et al. (2010) aplicaron una expresión propuesta por Forero et al. (2007) a las mediciones realizadas en tres sitios de Salta, y ajustaron los índices KTRP encontrados a una función de la altura A:

$$K_{t-r-p}(A) = a + bA^c \quad (6)$$

Estimamos la serie de puntos obtenida para los valores de  $K_{t-r-p}$  v2 buscando los coeficientes a, b y c tales que en la función  $K_{t-r-p}(A)$  se obtuviera el mínimo RMSE para cada sitio estudiado.

Los valores obtenidos en cuestión permitieron definir la función  $K_{t-r-p}(A)$  como sigue:

$$K_{t-r-p}(A) = 0,649 + 0,02A^{0,28} \quad (7)$$

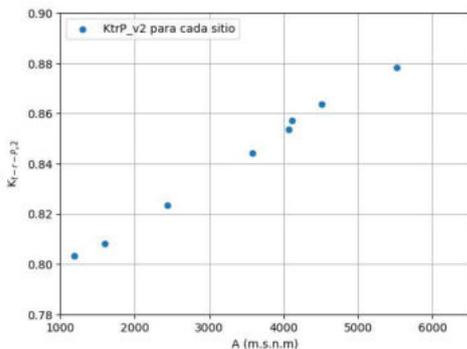


Figura 4: Valores  $K_{t-r-p}$  v2 Calculados para cada sitio

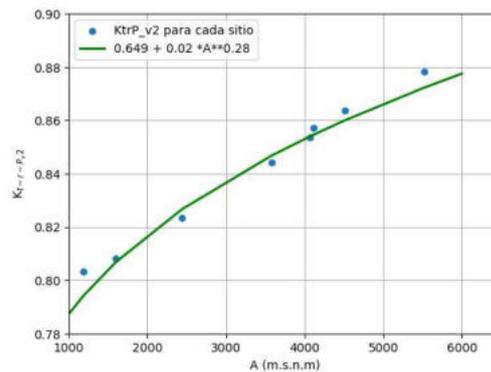


Figura 5: Valores  $K_{t-r-p}$  - Función de Estimación

La Fig 4 muestra el valor de  $K_{t-r-p}$  v2 obtenido para cada sitio. En la Fig 5 se muestra la manera en la que estima la función  $K_{t-r-p}(A)$  los valores de  $K_{t-r-p}$  v2 dado A.

## VALIDACIÓN

Comparamos los resultados obtenidos según ARGV v2 contra datos medidos en cuatro (4) sitios. El Rosal, Abra Pampa, Yuto, Cerrillos y Salta Capital ubicados a 3355, 3455, 1050, 1239 y 1190 m.s.n.m respectivamente. Las figuras 6 a 13 ilustran los ajustes para varios ciclos diarios de GHI.

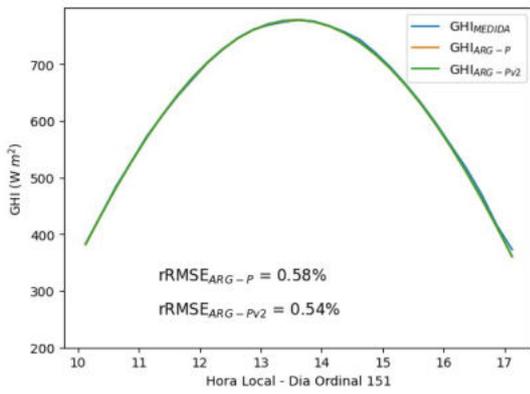


Figura 6: GHI El Rosal - 3 de Enero

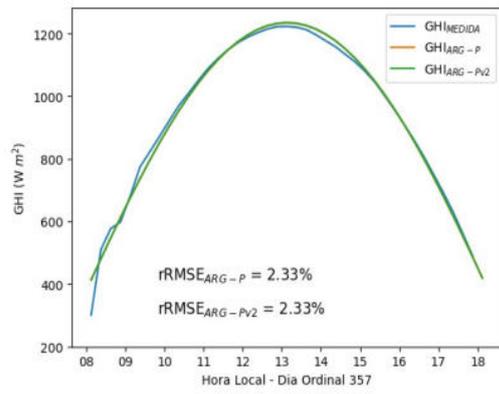


Figura 7: GHI El Rosal - 19 de Julio

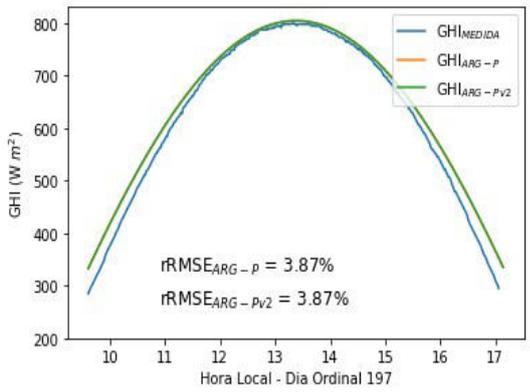


Figura 8: GHI Abra Pampa - 11 de Julio

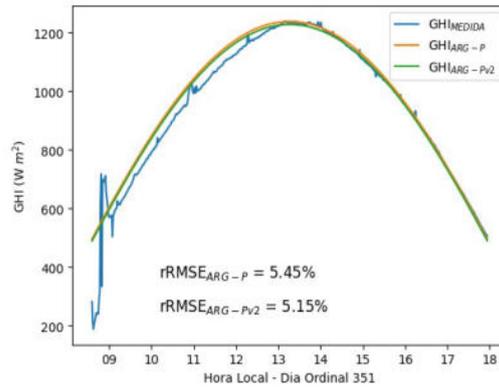


Figura 9: GHI Abra Pampa - 17 de Dic.

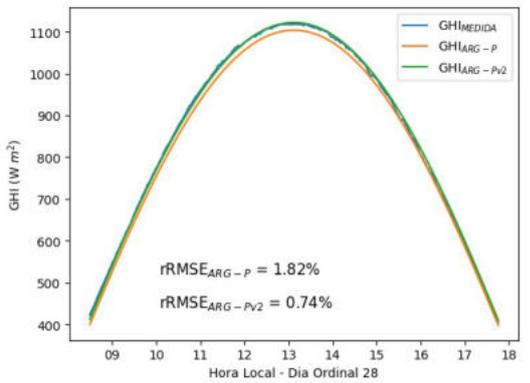


Figura 10: GHI Yuto - 28 de Enero

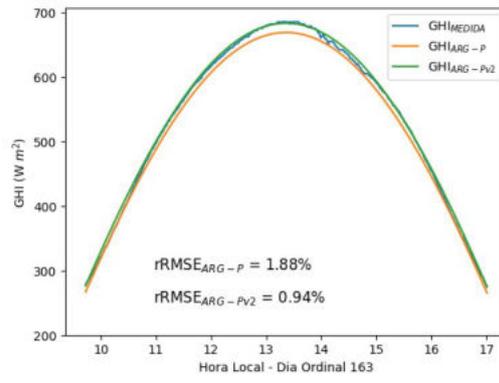


Figura 11: GHI Yuto - 20 de Julio

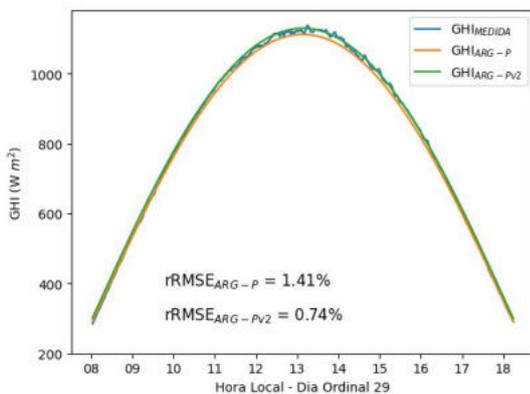


Figura 12: GHI Cerrillos - 29 de Enero

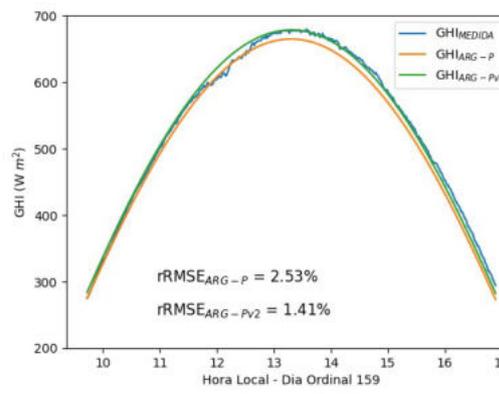


Figura 13: GHI Cerrillos - 6 de Agosto

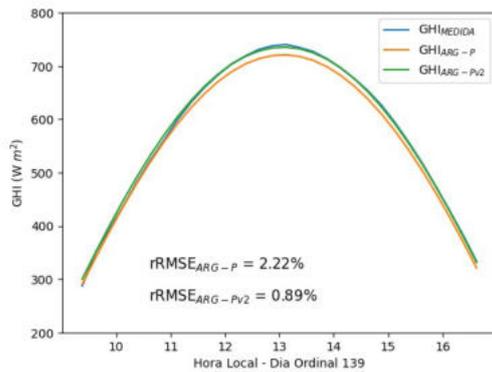


Figura 14: GHI Salta - 19 de Mayo

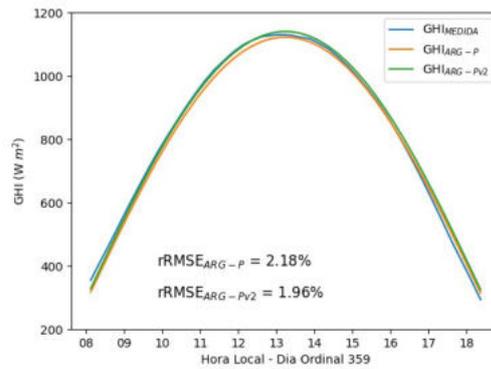


Figura 15: GHI Salta 25 de Diciembre

Tabla 3: rRMSE Mc-Clear vs ARGP

ALTURA (m.s.n.m)	rRMSE McClear-ARGP	rRMSE McClear-ARGPv2
Menos 2500	3,24%	2,58%
Entre 2500 y 4000	3,29%	3,18%
Más de 4000	3.58%	3,16%

La tabla 3 muestra el error promedio obtenido al comparar los datos de GHIcc provistos por Mc-Clear con los obtenidos a través de los modelos ARG-P y ARG-Pv2.

## CONCLUSIONES

En éste trabajo se pudo implementar una leve mejora al modelo ARG-P, donde solo se consideraron de interés sitios con altura mayor a los 1000 m.s.n.m. Comparando los resultados del modelo ARGP-v2 contra datos de Mc-Clear se pudo constatar que el error se redujo aproximadamente un 1% para los sitios que se encuentran en alturas comprendidas entre los 1000 y los 2500 m.s.n.m.

Observando las figuras 6 – 15, a través de los datos medidos, pudimos ver que el error tiende a disminuir según el sitio se encuentra próximo a los 1000 m.s.n.m.

## REFERENCIAS

- Abal, G., Alonso-Suárez, R., y Laguarda A. (2020). Radiación Solar. Notas del curso Fundamentos del recurso solar. [http://les.edu.uy/FRS/notas/FRS\\_notas\\_v4-0\\_R2\\_2020.pdf](http://les.edu.uy/FRS/notas/FRS_notas_v4-0_R2_2020.pdf)
- Duffie, J.A., Beckman, W.A. (2013).  
ECMWF (s.f).
- Forero, N.L., Caicedo, L.M., Gordillo, G. (2007). Correlation of global solar radiation values estimated and measured on an inclined Surface for clear days in Bogotá. *Renewable Energy* 32: 2590-2602. Doi:10.1016/j.renene.2006.12.012
- Palani, K., Kota, R., Amar, A., Vijay, A. (2017). Blue Skies: A Methodology for Data-Driven Clear Sky Modelling. Proc. Of Twenty-Six International Joint Conference on Artificial Intelligence Main Track. Pages 377-3783. <https://doi.org/10.24963/ijcai.2017/528>
- Salazar, G.A, Hernández, A.L., Saravia, L.R. (2010). Practical models to estimate horizontal irradiance in clear sky conditions: Preliminary results. *Renewable Energy* 35:2452-2460. Doi: 10.1016/j.renene.2010.01.033

## **ARGP-V2 A PRACTICAL MODEL FOR THE ESTIMATION OF HORIZONTAL GLOBAL IRRADIANCE UNDER SKY CONDITIONS FOR HIGH SITES**

**ABSTRACT:** This work is a continuation of the article Practical models to estimate horizontal irradiance in clear sky conditions: Preliminary results (Salazar et al, 2010). In which the Argentine pressure-corrected model (ARG-P) is specified, a practical model to estimate global horizontal solar irradiance (GHI) under clear sky conditions (CC). A detailed analysis of the operation of ARG-P is carried out and the McClear Clear-Sky irradiation service of the Copernicus Atmosphere Monitoring Service is used to implement a new version of the model it proposes, based on a correction on the representative index of clarity used in ARG-P, ARGP-v2 is obtained, an improvement over the estimation of GHI in CC conditions for sites with height greater than one thousand meters above sea level located in the provinces of Salta and Jujuy.

**KEYWORDS:** solar energy, irradiance, clear sky.