

## TENDENCIA DE LA IRRADIANCIA SOLAR EN SUPERFICIE EN LA REGIÓN DEL NOA BASADO EN EL REANÁLISIS NCEP/NCAR R1

**Cristóbal I. Silvero<sup>1,2</sup>, Franco D. Medina<sup>1,2</sup>, María L. Molina<sup>2</sup>,  
Gustavo A. Mansilla<sup>1,2</sup>, Teresita Heredia<sup>1,2</sup>, Ana G. Elias<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>INFINOA (CONICET-UNT), 4000 Tucumán, <https://infinoa.conicet.gov.ar/>

<sup>2</sup>Laboratorio de Ionosfera, Atmosfera Neutra y Magnetosfera - LIANM (FACET, UNT), Av. Independencia 1800, 4000 Tucumán, <https://www.facet.unt.edu.ar/labatmosfera/>

Tel. 0381-4364093 Int.7828 e-mail: [cristobalivansilvero@gmail.com](mailto:cristobalivansilvero@gmail.com)

**RESUMEN:** Las tendencias en parámetros climáticos, de escala temporal superior a la decadal, suele ser en general pequeña cuando se la compara con la variabilidad natural de las mismas, como la estacional o la diaria. Sin embargo, puede ser de interés y utilidad en la planificación de largo plazo del aprovechamiento de energías renovables. En este trabajo, se caracteriza la tendencia de largo plazo de la irradiancia solar en superficie en la región del NOA utilizando datos del reanálisis NCEP/NCAR R1 durante un período de 74 años (1948-2021) de radiación directa y de radiación para cielo claro. En el caso de las tendencias de irradiancia anual se obtuvieron valores positivos con significancia estadística para la región centro-sur del NOA. En el extremo hacia el este y norte se detectan tendencias negativas. Para el caso estacional, se distinguen dos comportamientos en el patrón de variabilidad espacial de las tendencias: en los meses de verano éstas son máximas positivas hacia el oeste disminuyendo su valor para volverse negativas hacia el este, mientras que en el invierno esto ocurre comenzando desde el sur hacia el norte. Es este último el patrón que se impone en el comportamiento anual.

**Palabras clave:** irradiancia solar, datos de reanálisis, tendencia de largo plazo

### INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de manera automatizada y directa de datos experimentales de irradiancia solar en superficie es aún escasa para algunas regiones de Argentina, como es el caso de la región del Noroeste Argentino (NOA). Si bien el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) dispone de algunas estaciones en esta región, son pocos años de datos de manera que no se puede hacer un estudio de variabilidad de largo plazo como se plantea en este trabajo.

El estudio de la variabilidad, tanto temporal como espacial, de la irradiancia solar en superficie es de suma importancia en el análisis de viabilidad del aprovechamiento de energía solar como fuente de energía renovable en una dada localidad o región, y en el análisis dimensional de la tecnología necesaria para su uso. Este parámetro es importante además por su rol en el intercambio de energía entre la atmósfera y la superficie para comprender fenómenos meteorológicos y procesos de transferencia radiativa. En particular la variabilidad de largo plazo, o tendencia, es importante por su relación con el cambio climático y porque, si bien ahora puede ser débil, de mantenerse en el tiempo podría cobrar importancia en el futuro.

En este trabajo, se caracteriza la tendencia de largo plazo de la irradiancia solar en superficie en la región del NOA, a través del análisis de datos del reanálisis NCEP/NCAR R1 (National Centers for Environmental Prediction -NCEP- en colaboración con National Center for Atmospheric Research) (Kalnay et al., 1996) durante un período de 74 años (1948-2021). El objetivo de investigar esta variabilidad es aportar, a través de nuestros resultados, a la mejor comprensión y conocimiento sobre la disponibilidad y variabilidad del recurso solar que sirvan para pronósticos de largo plazo, y aporten

al sector energético en la planificación y diseño de tecnologías para el aprovechamiento de energía solar. Los datos del reanálisis, en general, se han utilizado en numerosos estudios de caracterización y variabilidad de diversos parámetros, sobre todo en regiones donde las mediciones en superficie, a pesar de ser más precisas, tienen una cobertura espacial y temporal limitada, como es el nuestro (Morales-Moraga et al., 2019; Peng et al., 2019).

## DATOS

Los datos de flujo de radiación solar directa en superficie, dswrf (downward solar radiation flux) y de flujo solar directo en superficie para días de cielo claro, csdsf (clear sky downward solar flux) del reanálisis NCEP/NCAR R1, provistos por la NOAA/OAR/ESRL PSL, Boulder, Colorado, se obtuvieron del sitio [psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surfaceflux.html](http://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surfaceflux.html). Las series empleadas consisten en cuatro valores por día que corresponden a 00:00, 06:00, 12:00 y 18:00 UTC, y que consisten en valores promedios de períodos de 6 horas que comienzan en la hora indicada (Kalnay et al., 1996). Es decir que el valor de las 12:00, por ejemplo, corresponde al promedio entre las 12:00 y las 17:59 UTC. Dado que el NOA tiene zona horaria UTC-3, este valor del reanálisis incluye las 12:00 LT de la región (15 UTC).

Los productos del reanálisis atmosférico se utilizan para evaluar diferentes parámetros meteorológicos cuando los datos no están disponibles para una región. Las bases de datos del reanálisis, como ERA-5 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF, 5ta generación), JRA-55 (Japanese 55-year), NCEP/NCAR, entre otros, han sido ampliamente utilizadas en la valoración de diversas variables climáticas por numerosos investigadores. Estos productos son el resultado de la asimilación de datos observacionales (obtenidos por varias vías), y utilizando un modelo numérico de predicción meteorológica, con el fin de reproducir el estado de la atmósfera en un tiempo determinado, proporcionando así un gran número de variables climáticas. El reanálisis tiene la ventaja de que se caracteriza por series temporales largas, a diferentes escalas temporales (horaria, diaria, etc.) y a diferentes resoluciones, con cobertura espacial global.

El reticulado del reanálisis utilizado tiene una resolución de  $\sim 2^\circ$  en latitud  $\times$   $\sim 2^\circ$  en longitud. Se consideró la región del NOA comprendida entre los  $20^\circ\text{S}$  y  $30^\circ\text{S}$  en latitud, y  $70^\circ\text{O}$  y  $60^\circ\text{O}$  en longitud ( $5 \times 6 =$  grilla de 30 puntos), para el período 1948-2021. Estos límites comprenden en realidad una región extendida que definimos en función de los valores de retícula disponibles en la base de datos del reanálisis ( $-21.90^\circ$ ,  $-23.81^\circ$ ,  $-25.71^\circ$ ,  $-27.62^\circ$ ,  $-29.52^\circ$  en latitud;  $-69.38^\circ$ ,  $-67.50^\circ$ ,  $-65.62^\circ$ ,  $-63.75^\circ$ ,  $-61.88^\circ$ ,  $-60.00^\circ$  en longitud), que se muestran en la Fig.1. Esto explica también la diferencia en cantidad de puntos entre el rango latitudinal y el longitudinal, a pesar de ser iguales la amplitud de ambos rangos.

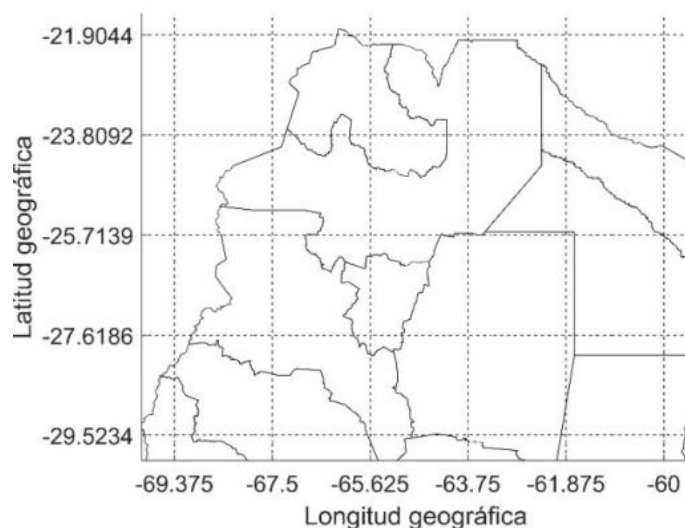


Figura 1: Reticulado del reanálisis NCEP/NCAR R1, donde los 30 puntos de intersección (5 en latitud  $\times$  6 en longitud) corresponden a los puntos de la grilla utilizados para representar al NOA

A partir de las series con cuatro valores diarios se determinaron series promedio mensual para cada punto de la grilla y se analizaron las correspondientes a las 12:00 que, como se mencionó, incluye al máximo diario en esta base de datos ya que contiene a las 12:00 LT de la región. La Fig. 2 muestra los valores promediados en el período 1948-2021 de los promedios anuales de ambas series, y en la Fig. 3 los de dos meses representativos de las estaciones de verano (enero) y de invierno (julio).

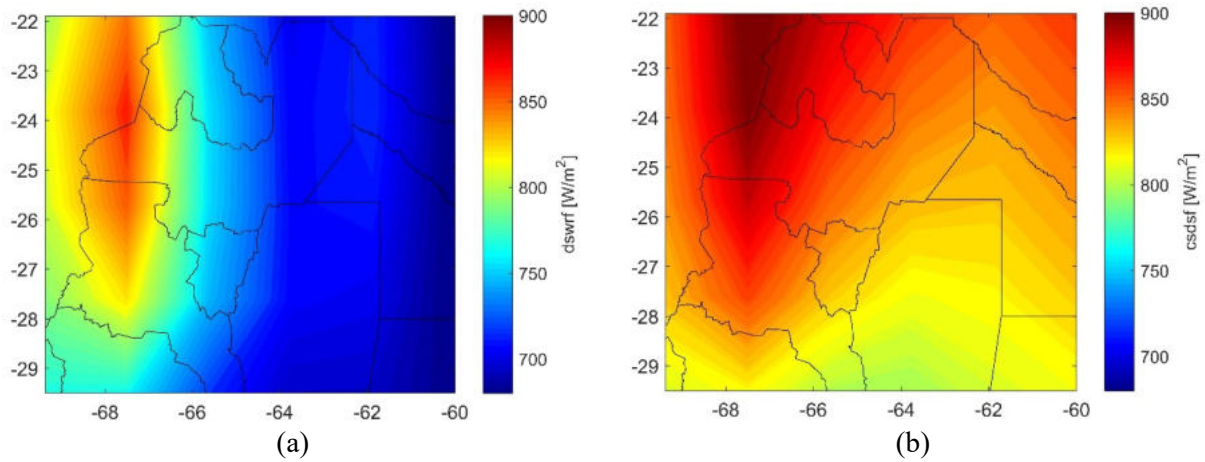


Figura 2: Promedio anual de  $dswrf$  (a) y  $csdsf$  (b) promediados en el período 1948-2021. Fuente de los datos: reanálisis NCEP/NCAR R1. (Nota: mapa de colores con interpolación lineal)

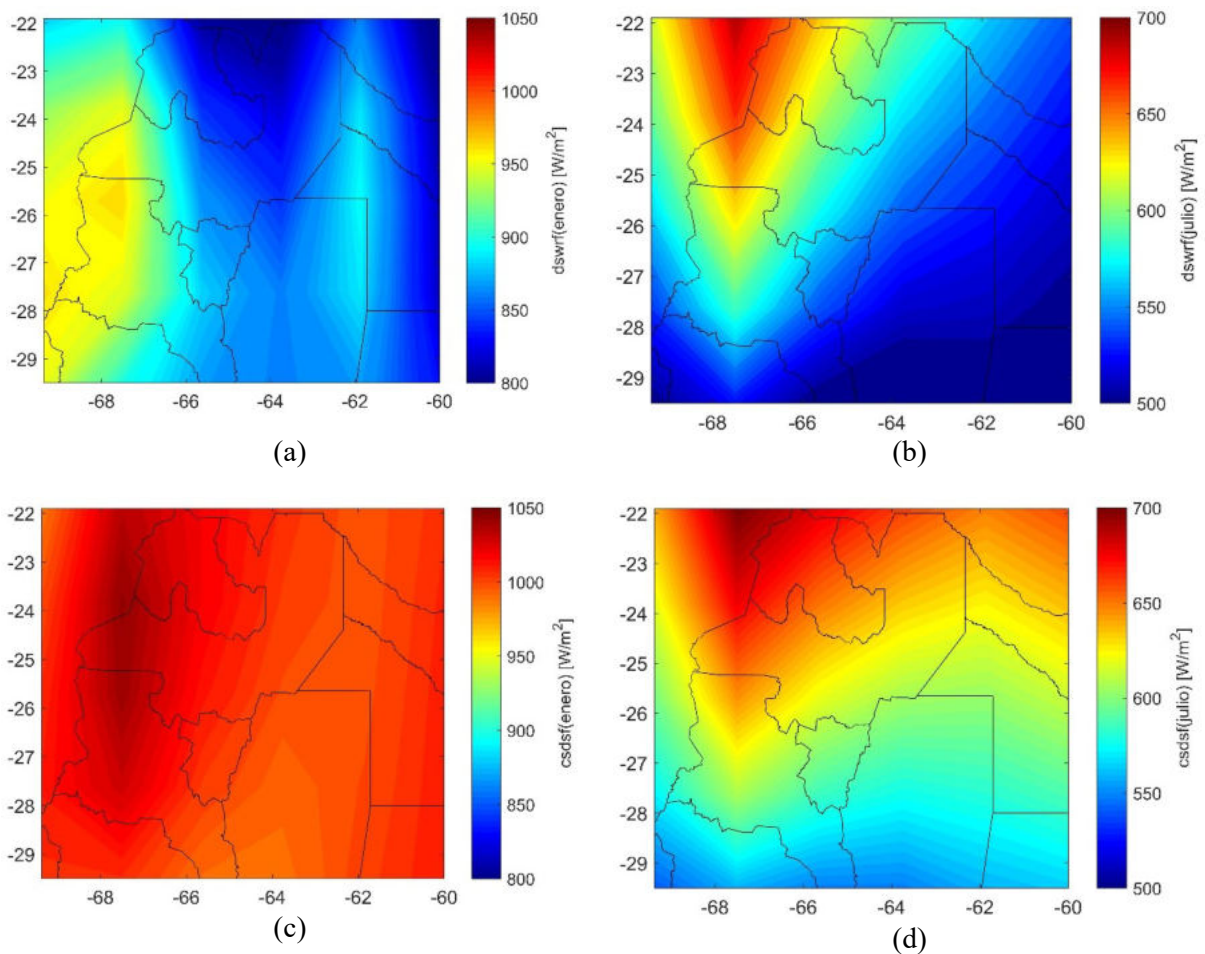


Figura 3: Promedio de  $dswrf$  para enero (a) y julio (b) y de  $csdsf$  para enero (c) y julio (d), como meses representativos de las estaciones de verano e invierno, respectivamente, promediados en el período 1948-2021. Fuente de los datos: reanálisis NCEP/NCAR R1. (Nota: mapa de colores con interpolación lineal)

En la Fig. 2 se observa en el caso de *csdsf* un gradiente espacial que resulta claramente del gradiente latitudinal negativo de la insolación promedio anual en el tope de la atmósfera con el aumento de la latitud hacia el sur en la región de análisis, combinado con el que resulta del gradiente del relieve. En el caso de *dswrf* prevalece el gradiente longitudinal debido al gradiente del relieve. En el caso de enero (Fig. 3a y c) la insolación en el tope de la atmósfera en el rango de latitudes del NOA es positivo, el cual no es muy notorio en las figuras correspondientes, mientras que sí lo es el que resulta del gradiente del relieve. En el caso de julio (Fig. 3b y d), se observa un caso similar al anual, porque la insolación en este caso también presenta gradiente negativo con la latitud, el cual se evidencia en los dos paneles correspondientes de la Fig. 3.

## METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Existen numerosas maneras de analizar la variación de un parámetro en términos de su disponibilidad espacial y temporal, como es éste caso. Se pueden discriminar sub-regiones, sub-períodos de tiempo, o los distintos meses y estaciones del año. En este trabajo, como primera aproximación en el análisis de esta base de datos, con el enfoque de largo plazo en cuanto a variación temporal, se estimaron las series promedio mensual para cada punto de la retícula considerada y el promedio anual obteniendo 13 series para cada punto (una para cada mes del año y una para el promedio anual), para *dswrf* y *csdsf*. La Fig. 4 muestra las series promedio anual de *dswrf* y *csdsf* para un punto de la red con pendiente positiva (25.71°S, 65.62°O) y otro punto con pendiente negativa (23.81°S, 61.88°O). La variabilidad interanual entre las series para cada punto es similar (la correlación lineal entre las series es de 0.83 y 0.76, respectivamente para cada punto considerado), aunque la amplitud de los rangos de variabilidad son diferentes:  $\sim 100$  y  $\sim 15$   $W/m^2$ , respectivamente en ambos casos.

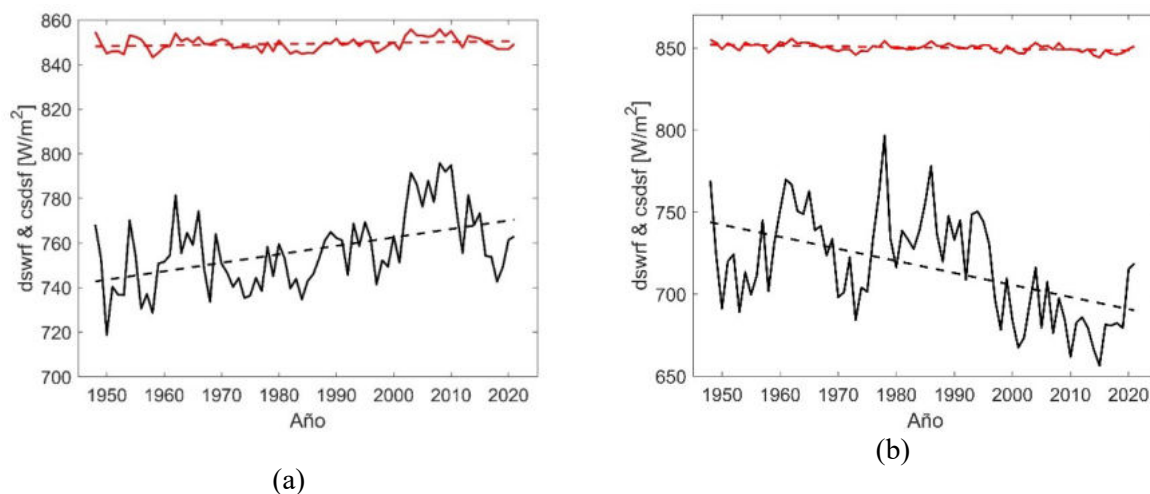


Figura 4: Variación temporal, a lo largo del período 1948-2021, del promedio anual de *dswrf* (línea negra) y *csdsf* (línea roja), para los puntos (a) (25.71°S, 65.62°O) y (b) (23.81°S, 61.88°O). Las líneas de trazos corresponden a la tendencia lineal en cada caso, con pendientes (a) 0.38  $W/m^2$  año para *dswrf* (línea de trazo negra) y 0.03  $W/m^2$  año para *csdsf* (línea de trazo roja), y (b) -0.70  $W/m^2$  año para *dswrf* (línea de trazo negra) y -0.05  $W/m^2$  año para *csdsf* (línea de trazo roja).

A partir de las series anuales se estimaron las tendencias lineales para el período completo de datos (1948-2021) mediante el método de mínimos cuadrados haciendo la regresión entre *dswrf*, o *csdsf*, en función de los años. La Fig. 5 muestra estas tendencias para el caso de la serie promedio anual, y la Fig. 6 para los meses de enero y febrero.

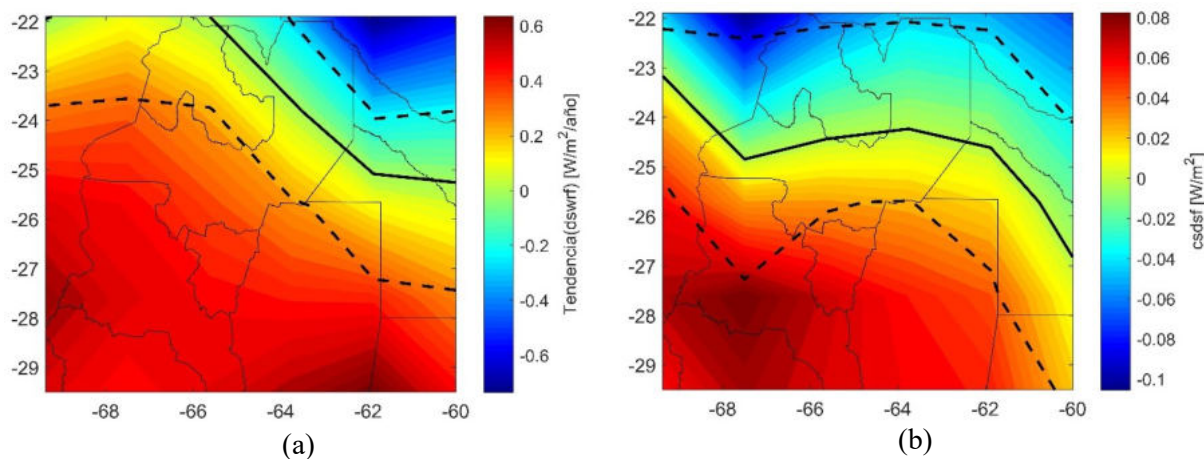


Figura 5: Tendencia lineal en el periodo 1948-2021 de las series promedio anual de (a)  $dswrf$  y (b)  $csdsf$ . La línea llena negra indica tendencia cero, y las líneas de trazo el valor por debajo del cual las tendencias tienen nivel de confianza menor al 95%. (Nota 1: mapa de colores con interpolación lineal. Nota 2: escala diferente en cada panel)

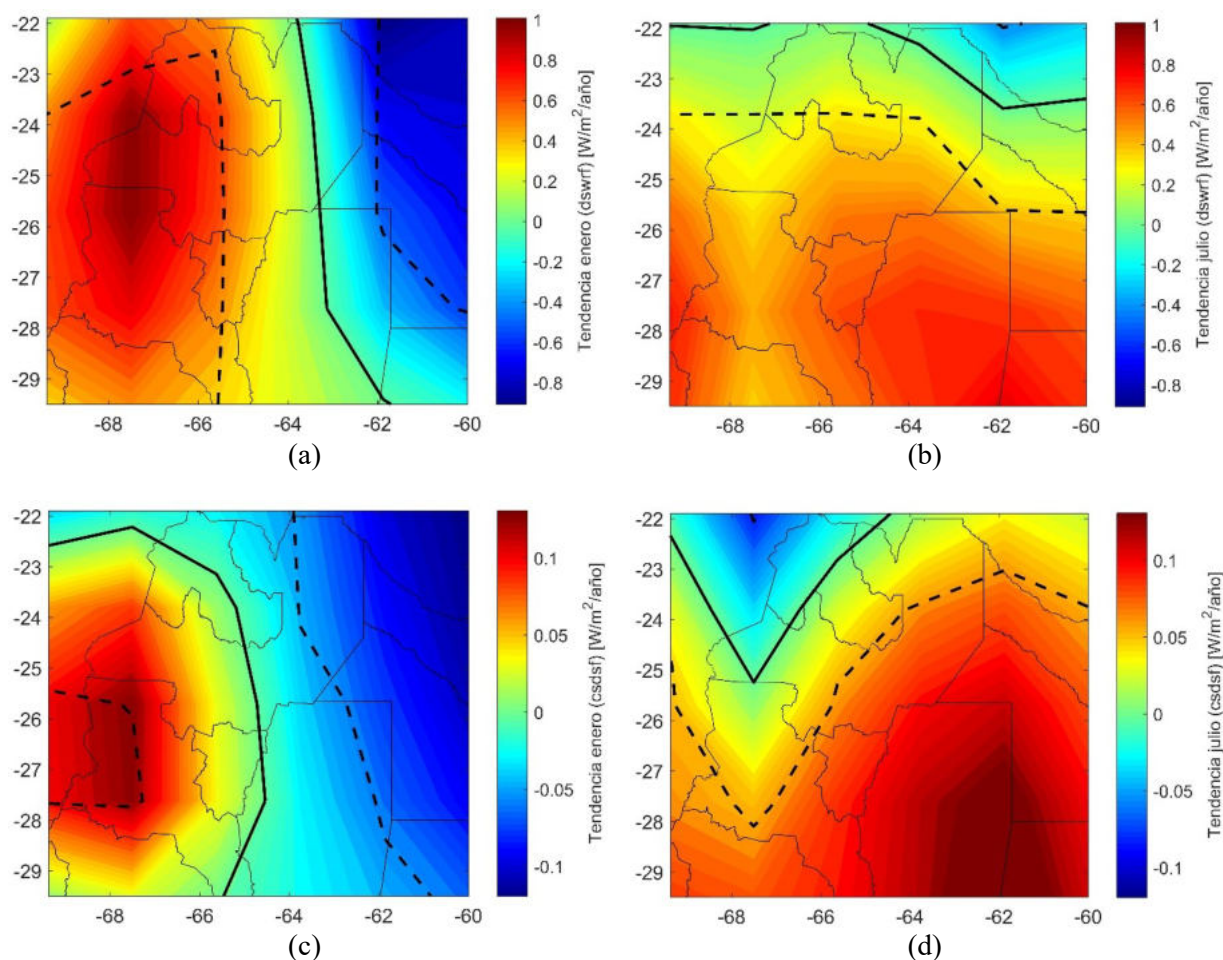


Figura 6: Tendencia lineal en el periodo 1948-2021 de las series de  $dswrf$  para enero (a) y julio (b) y de  $csdsf$  para enero (c) y julio (d), como meses representativos de las estaciones de verano e invierno, respectivamente. La línea llena negra indica tendencia cero, y las líneas de trazo el valor por debajo del cual las tendencias tienen nivel de confianza menor al 95%. (Nota: mapa de colores con interpolación lineal)

## DISCUSIÓN

En este trabajo, si bien no se realizó una validación de los valores de radiación del reanálisis con datos experimentales para la región del NOA, consideramos que los mismos permiten determinar características promedio y tendencias generales (Silva et al., 2010; Zuluaga et al., 2021) de utilidad en la planificación del aprovechamiento de energías renovables.

Aunque no incluyen la región del NOA, Peng et al., (2019) hacen el análisis de comparación con datos medidos en 804 estaciones distribuidas globalmente, pero ubicadas mayormente en Estados Unidos, Europa, China y Chile. Estos datos son obtenidos de dos bases de datos: GEBA (Global Energy Balance Archive, Suiza) y CMA (China Meteorological Administration, China). El período analizado es 2000-2009. Ellos utilizan tres bases de reanálisis: ERA-Interim, JRA-55, y NCEP-DOE, y encuentran que las tres sobreestiman la radiación medida. Uno de los parámetros que utilizan para hacer esta estimación es el sesgo, o “bias”, que calculan a partir de la siguiente ecuación:

$$bias = \frac{\sum_{i=1}^N y_i - x_i}{N}$$

donde  $y_i$  es el valor dado por el reanálisis,  $x_i$  el valor medido, y  $N$  el número de puntos en el espacio (o estaciones en superficie que registran  $x_i$ ) que se utilizan para hacer esta comparación, y que en este caso es de 804. Un bias positivo indica una sobreestimación del valor real por parte de los datos de reanálisis, mientras que un bias negativo indica una subestimación. Obtienen para ERA-Interim, JRA-55 y NCEP-DOE un bias relativo medio anual de ~15%, ~20% y ~30%, respectivamente, como promedio global. Estos valores se mantienen parecidos si la comparación se hace en términos mensuales o estacionales. Tahir et al. (2020) comparan también datos de distintos reanálisis con mediciones de tres estaciones de Pakistán en el período 2015-2017, y encuentran también un bias relativo positivo que llega a ~30%.

Sin embargo, yendo al análisis de tendencias de largo plazo, los valores reflejados por el reanálisis en términos de radiación parecen presentar un mejor acuerdo con valores experimentales. Silva et al. (2010) analizan la radiación global promedio diaria en la región del noreste de Brasil. Encuentran que la tendencia en el período 1948-2009 en los datos de reanálisis, y la de mediciones en dos estaciones ubicadas en esta región, que cubren el período 1975-2009, son consistentes e indican un decrecimiento general. Más recientemente, Zuluaga et al. (2021), en base al ERA-5, concluyen lo mismo (buen acuerdo entre las tendencias obtenidas a partir del reanálisis y las de datos medidos) para el período 1980-2016, y abarcando todo Brasil. Perdigo et al. (2016) hacen un análisis similar para estaciones de la península ibérica y los valores correspondientes del reanálisis ERA-40 y NCEP/NCAR encontrando una variabilidad interanual y tendencias consistentes, a pesar que ERA-40 subestima y NCEP/NCAR sobreestima los valores medios de radiación. La falta de acuerdo en los datos promedio se debería principalmente a la incorrecta estimación de las condiciones atmosféricas. Aun así, esto no pareciera afectar sensiblemente la variación temporal en escalas de tiempo interanuales como las tendencias que nosotros analizamos en este trabajo.

En el caso de las tendencias de irradiancia anual para el NOA analizados en este trabajo, tanto en el caso de dswrf como csdsf, se obtuvieron valores positivos con significancia estadística para la región centro-sur del NOA. En el extremo hacia el este y norte de la región se detectan tendencias negativas también con significancia, como se observa en las Fig. 5 y 6, pero prácticamente ya fuera de los límites del país. Si bien los patrones espaciales son similares, los valores de las tendencias son mayores en el caso de dswrf, tanto para tendencias positivas como negativas en el caso del análisis de series anuales (Fig. 5) y de las series de enero y julio (Fig. 6).

Bajo la hipótesis de que la diferencia entre ambas irradiancias es debido principalmente a la presencia de nubes, se podría deducir que las tendencias estimadas se intensifican por tendencias en la nubosidad. Es decir, en las regiones donde csdsf presenta tendencias positivas y las tendencias de dswrf son también positivas, pero más intensas, podría inferirse una tendencia negativa en la nubosidad (mayor nubosidad al inicio del período y menor hacia el final) que aportaría a la tendencia

de por sí positiva en csdsf intensificándola como se observa hacia el oeste del NOA para enero (Fig. 6a) y hacia el sur en julio (Fig. 6b). En el caso de las regiones donde csdsf presenta tendencias negativas y dswrf tendencias negativas también, pero de mayor intensidad, el caso sería al revés: una posible tendencia positiva en la nubosidad (menor nubosidad al inicio del período y mayor hacia el final) intensificaría una tendencia negativa en csdsf, como se observa hacia el este de la región en enero (Fig. 6a) y hacia el norte en julio (Fig. 6b).

## CONCLUSIONES

Las tendencias de la irradiancia anual para el NOA analizados en este trabajo en base a datos obtenidos del reanálisis NCEP/NCAR R1 para el período 1948-2021, tanto en el caso de dswrf como csdsf, presentan variación espacial con valores positivos y negativos con significancia estadística en ambos casos como se observa en las Fig. 5 y 6.

Cuando se analiza el caso mensual, se distinguen dos patrones de comportamiento en el valor de la tendencia: (\*) en el caso de verano (Fig. 6a) se observa un gradiente longitudinal, con los máximos valores de tendencia creciente hacia el oeste y los máximos de tendencia decreciente hacia el este, como respondiendo a diferencias en el relieve (Pereyra, 2018); (\*) en el caso de invierno (Fig. 6b) se observa un gradiente latitudinal, con valores máximos de tendencia creciente hacia el sur, y máximos de tendencia decreciente hacia el norte. Se podría decir que el patrón de tendencia del promedio anual (Fig. 5) sería prácticamente un promedio entre estos dos patrones de variación espacial, donde las “esquinas” oeste-sur y este-norte de la región presentan a lo largo del año tendencias positivas y negativas, respectivamente.

La base de datos del reanálisis NCEP/NCAR permite determinar características promedio y variabilidad de largo plazo de la irradiancia solar en superficie a lo largo de un extenso período de tiempo, como se mostró en este caso a través de uno de los múltiples enfoques y metodologías disponibles para este propósito. Un paso futuro importante será contrastar con valores experimentales, si bien no la tendencia, pero si algunos valores puntuales y/o la variabilidad de la irradiancia estudiada en menores escalas de tiempo. También será interesante repetir este estudio para datos de nubosidad del mismo reanálisis.

Algo para destacar de la Fig. 4 es una cuasi-periodicidad de ~20 años con mínimos en ~1960, ~1980, ~2000 y ~2020, que tendría mayor amplitud que la tendencia lineal a lo largo del período y que se planea estudiar en el futuro.

## AGRADECIMIENTOS

Trabajo enmarcado en el Proyecto de UE del INFNOA: PUE 22920200100008CO. Los autores agradecen también el financiamiento provisto por el proyecto PIP 2957.

## REFERENCIAS

- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., et al. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-470.
- Morales-Moraga, D., Meza, F.J., Miranda, M. y Gironás, J. (2019). Spatio-temporal estimation of climatic variables for gap filling and record extension using Reanalysis data. *Theor. Appl. Climatol.*, 137, 1089–1104.
- Peng, X., She, J., Zhang, S., Tan, J. y Li, Y. (2019). Evaluation of Multi-Reanalysis Solar Radiation Products Using Global Surface Observations. *Atmosphere*, 10, 42.
- Pereyra, F.X. (2018). *Regiones geomorfológicas de Argentina*, UNDAV Ediciones, Buenos Aires.
- Perdigão, J.C., Salgado, R., Costa, M.J., Dasari, H.P. and Sanchez-Lorenzo, A. (2016), Variability and trends of downward surface global solar radiation over the Iberian Peninsula based on ERA-40 reanalysis. *Int. J. Climatol.*, 36: 3917-3933.
- Silva, V.P.R., Araujo e Silva, R., Cavalcanti, E.P., Campos Braga, C., Vieira de Azevedo, P., Singh, V.P. y Rodrigues Pereira, E.R. (2010). Trends in solar radiation in NCEP/NCAR database and measurements in northeastern Brazil. *Solar Energy* 84, 1852–1862.

- Tahir, Z.R., Azhar, M., Blanc, P., Asim, M., Imran, S., Hayat, N., Shahid, H. y Ali, H. (2020). The evaluation of reanalysis and analysis products of solar radiation for Sindh province, Pakistan. *Renewable Energy*, 145, 347-362.
- Zuluaga, C.F., Avila-Diaz, A., Justino, F.B. y Wilson, A.B. (2021). Climatology and trends of downward shortwave radiation over Brazil. *Atmospheric Research*, 250, 105347.

## **LONG-TERM VARIATION OF SOLAR IRRADIANCE AT SURFACE IN THE NOA REGION BASED ON NCEP/NCAR R1 REANALYSIS**

**ABSTRACT:** Long-term trends in climatic parameters, with a time scale greater than decadal, is usually small when compared to natural variability, such as seasonal or daily. However, it can be of interest and useful in in long-term planning for the use of renewable energies. In this work, long-term trends of solar irradiance at Earth's surface in the NOA region are characterized, using data from the NCEP/NCAR R1 reanalysis over a 74-year period (1948-2021) of direct radiation and clear sky radiation. In the case of annual irradiance trends, positive values were obtained with statistical significance for the center-south region of NOA. In the far east and north, negative trends are detected. For the seasonal case, two spatial variability trend patterns can be distinguished: in the summer months these are stronger and positive towards the west, decreasing and becoming negative towards the east, while in winter this gradient occurs from south to north. The latter is the pattern that is imposed on the annual behavior.

**Keywords:** solar irradiance, reanalysis, long-term trends