

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
FACULTAD REGIONAL MENDOZA

# MAPA DE RECURSO SOLAR

---

GENERALIDADES E IMPLEMENTACIÓN  
DEL MODELO WRF

# MAPA DE RECURSO SOLAR

---

## INTRODUCCIÓN: RADIACIÓN SOLAR

---

La naturaleza variable de la radiación solar en la superficie terrestre implica que sea un verdadero reto la explotación de este recurso renovable. Una determinación adecuada del recurso solar disponible permite reducir el costo de operación de sistemas de generación y garantiza operaciones más eficientes.

La radiación solar es la energía electromagnética que se produce en los procesos de fusión del hidrógeno (en átomos de helio) contenido en el sol. La energía solar que en un año llega a la tierra a través de la atmósfera es de tan sólo aproximadamente 1/3 de la energía total interceptada por la tierra fuera de la atmósfera y, de ella, el 70% cae en los mares. La energía que queda, de  $1,5 \times 10^{17}$  kWh en un año, cae sobre la tierra firme (Seinfeld and Pandis, 2006).

El clima de la tierra está determinado principalmente por el flujo de radiación solar incidente en el tope de la atmósfera (TOA) y su distribución espectral, la cual es alrededor del 5% en el ultravioleta, 55% en el visible y 40% en la parte infrarroja del espectro. La cantidad de energía proveniente del sol determina la temperatura superficial en la tierra y la composición de la atmósfera (Finlayson-Pitts, 2010).

La radiación solar (flujo solar o densidad de potencia de la radiación solar) recogida fuera de la atmósfera sobre una superficie perpendicular a los rayos solares es conocida como constante solar y es igual a  $135 \text{ W/m}^2$ , variable durante el año un  $\pm 3\%$  a causa de la elipticidad de la órbita terrestre. El valor máximo medido sobre la superficie terrestre es, en cambio, de aproximadamente  $1000 \text{ W/m}^2$ , en condiciones óptimas de sol a mediodía y en un día de verano despejado.

### Radiación solar diaria

La energía solar para un sitio depende del flujo solar disponible. Obviamente, el flujo que incide sobre una superficie arbitraria sufre variaciones tanto diarias como mensuales. La medición de la energía recibida desde el sol, sobre superficies horizontales como inclinadas es onerosa. En tal sentido, pocas locaciones en el mundo poseen sets de datos de irradiación en largo plazo que sean confiables.

La radiación solar que llega a la superficie terrestre puede ser directa o difusa. Mientras la radiación directa incide sobre cualquier superficie con un único y preciso ángulo de incidencia, la difusa cae en esa superficie con varios ángulos. Es necesario recordar que cuando la radiación directa no puede dar a una superficie a causa de la presencia de un obstáculo, el área en sombra no se encuentra completamente a oscuras gracias a la contribución de la radiación dispersa. Esta observación tiene importancia técnica para los dispositivos fotovoltaicos, que pueden funcionar incluso solamente con radiación dispersa.

Una superficie inclinada puede recibir, además, la radiación reflejada por el terreno o por espejos de agua o por otras superficies horizontales, debido al albedo de la superficie.

Las proporciones de radiación directa, dispersa y reflejada recibida por una superficie dependen:

- De las condiciones meteorológicas (de hecho, en un día nublado la radiación es prácticamente dispersa en su totalidad; en un día despejado con clima seco predomina, en cambio, la componente directa, que puede llegar hasta el 90% de la radiación total);

- De la inclinación de la superficie respecto al plano horizontal (una superficie horizontal recibe la máxima radiación dispersa si no hay alrededor objetos a una altura superior a la de la superficie y la mínima reflejada);
- De la presencia de superficies reflectantes (debido a que las superficies claras son las más reflectantes, la radiación reflejada aumenta en invierno por efecto de la nieve y disminuye en verano por efecto de la absorción de la hierba o del terreno).

En función del lugar, además, varía la relación entre la radiación dispersa y la total, ya que, al aumentar la inclinación de la superficie de captación, disminuye la componente dispersa y aumenta la componente reflejada. Por ello, la inclinación que permite maximizar la energía recogida puede ser diferente dependiendo del lugar.

La mayoría de los datos se proporcionan como energía recibida en una superficie horizontal. Para el análisis de sistemas solares se utilizan valores diarios, aunque las mediciones meteorológicas suelen hacerse de manera que se cubran regiones climáticas y geográficas. Usualmente, el número de estaciones que miden radiación horizontal global diaria excede a aquellas que reportan radiaciones global y difusa. Y menos estaciones aún miden valores en base horaria, en lugar de valores integrados diarios.

---

## MAPA DE RECURSO SOLAR PARA LA PROVINCIA DE MENDOZA

---

El recurso solar a lo largo de la Provincia de Mendoza es relevante como fuente de generación térmica, como para sistemas fotovoltaicos, ya que usan tanto la luz solar directa como la difusa. Asimismo, tiene relevancia para el calentamiento de agua o secado de productos agrícolas. La cantidad de energía que puede ser aprovechada por cualquier tecnología solar en un sitio particular de la Provincia depende de cómo es alcanzado por el sol, por lo que un mapa del recurso permite un planeamiento más eficiente.

Los mapas ofrecidos proporcionan información sobre la radiación directa, difusa y total en celdas grilladas cubriendo el territorio provincial. Los mapas muestran promedios y máximos diarios de recurso solar en celdas de tamaño de 4 km, tanto en latitud y longitud. Donde fue posible, se utilizaron mediciones de superficie para validar los datos. Sin embargo, existe una incertidumbre asociada con las entradas meteorológicas al modelo, debido a que se trata de parámetros provenientes de modelos globales de gran resolución. Como resultado, los valores estimados tienen una precisión de aproximadamente 6% del valor verdadero medido en la celda de la grilla de estudio.

---

## CONSTRUCCIÓN DEL MAPA: MÉTODOS

---

Un modelo de mesoescala es un modelo numérico de predicción del tiempo, que trata de simular la atmosfera en una escala espacial y temporal conocida como mesoescala. la cual espacialmente oscila en los centenares de kilómetros y temporalmente de horas a días. Por ser un modelo numérico de la atmosfera tiene su fundamento en la dinámica atmosférica, la cual se basa de la mecánica y termodinámica de fluidos (Mass et al., 2002).

Dentro de la atmosfera existen cientos de procesos y características que no son resueltas por dichos modelos, ya que suceden en escalas inferiores a la del modelo o no pueden ser simuladas explícitamente mediante las ecuaciones propias del mismo. A pesar de que el modelo no puede resolver estos procesos sí debe tenerlos en cuenta, puesto que en muchos casos estos logran incidir en los campos meteorológicos.

En este caso dichos procesos han de ser calculados a través de alguna señal que pueda ser observada mediante los parámetros calculados por el modelo en los puntos de grilla, esta acción

recibe el nombre de Parametrizar. Los procesos físicos que se parametrizan son los flujos superficiales entre el suelo y la atmósfera, los flujos de la capa límite, la física de la humedad, la hidrología del suelo y la radiación atmosférica.

La parametrización física de la radiación atmosférica resuelve las ecuaciones que expresan las interacciones entre la radiación solar y el sistema Tierra-Atmósfera, mediante esquemas explícitos de transferencia radiativa. Los esquemas radiativos expresan regímenes para el calentamiento atmosférico y el balance energético superficial, a través de los flujos de onda larga y onda corta.

---

#### MODELO WRF: WEATHER RESEARCH AND FORECASTING

---

El modelo Weather Research and Forecasting (WRF) es un sistema de cálculo numérico para simulación atmosférica (NWP) diseñado para satisfacer las necesidades tanto de investigación como de predicción atmosféricas. WRF incluye dos núcleos diferentes (ARW, NMM), un sistema de asimilación de datos, y una arquitectura de software diseñada para la posibilidad de ejecuciones distribuidas o paralelas y la escalabilidad del sistema (Skamarock et al., 2008). WRF implementa una extensa gama de aplicaciones meteorológicas en escalas que van desde los metros a los miles de kilómetros.

El esfuerzo para desarrollar WRF comenzó en la última parte de la década de 1990 y era una asociación principalmente entre el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR), la Administración Oceánica y Atmosférica Nacional (NOAA) – representado por los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP) y el Sistema de Laboratorio de Investigación de la Tierra (ESRL) – la Agencia de Tiempo de la Fuerza Aérea (AFWA), el Laboratorio de Investigación Naval, la Universidad de Oklahoma y la Administración Federal de Aviación.

Para la simulación de la radiación solar incidente se utilizó la versión 3.5 del modelo regional acoplado WRF, el cual fue configurado con tres dominios anidados tal como se ve en la Figura 1.

Los dominios de modelado comprenden la parte central de Argentina y Chile, con una resolución espacial de 36, 12, 4 km respectivamente; cuya coordenada vertical es de 50 niveles, hasta una altura de 50 hPa, centrados en Latitud  $34^{\circ} 4'33.60''S$  y Longitud  $68^{\circ}32'38.40''O$ .

El tamaño y ubicación de los dominios fue seleccionado de tal manera de incluir la región de los Andes Centrales. El dominio más pequeño y de mayor resolución, en el cual se ajusta el modelo, abarca el Sur de las provincias de San Juan y La Rioja, el Oeste de San Luis, Noroeste de La Pampa, Norte de Neuquén y la provincia de Mendoza en su totalidad.

La inicialización meteorológica y condiciones de contorno del modelo se incluyen con datos globales de NCEP Global Final Analysis of GFS con una resolución de 0,5 grados, y actualizaciones cada 6 horas.

Varias opciones de configuración se incluyen en el modelo, de acuerdo a casos de estudios previos, que probaron su idoneidad para producir las mejores estimaciones de variables meteorológicas de superficie y altura (Mulena et al., 2016; Puliafito et al., 2015). Estas se indican en la

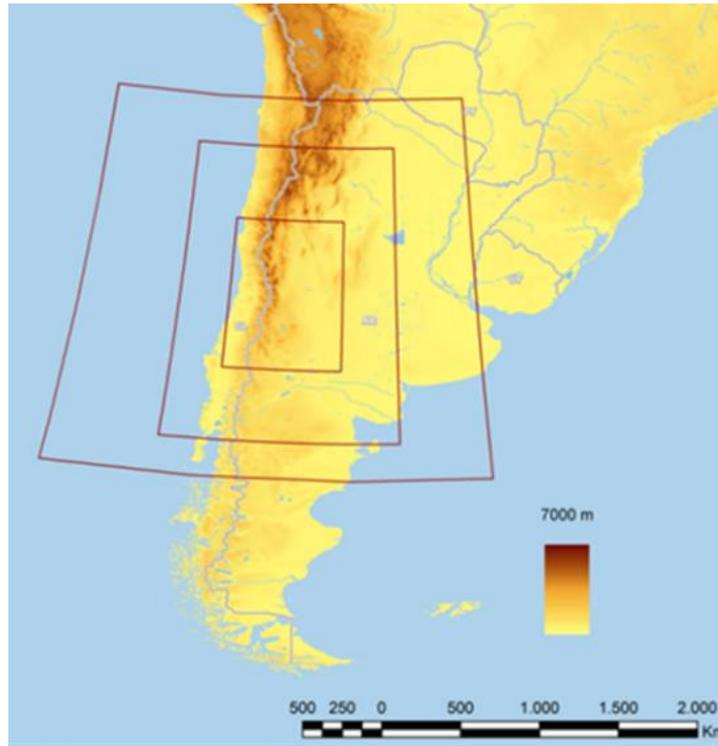


Figura 1. Dominios de Modelado en WRF considerados para la simulación de radiación solar en la Provincia de Mendoza.

PARAMETRIZACIÓN	ESQUEMA
<b>DATOS DE ENTRADA</b>	
Elevación del terreno	SRTM3
LULC	GLOBCOBER+DMPS-OLS
Reanálisis	NCEP-GFS
SST	NCEP_diaria
<b>RESOLUCIÓN</b>	
Temporal	$\Delta t$ (seg)= 90
Espacial	$\Delta x, \Delta y$ (km)= 36, 12, 4
Vertical	$\Delta z$ (ETA levels)= 60
<b>FÍSICA</b>	
Microfísica	Eta microphysics
<i>Radiación onda larga</i>	<i>RRTM</i>
<i>Radiación onda corta</i>	<i>Goddard Dudhia</i>
Superficie	Noah Land Surface Model
Niveles de superficie	4
Física de superficie	Monin-Obukhov similarity Theory
PBL	YSU
EPC	KF

Tabla 1. Parametrizaciones físicas utilizadas en las simulaciones con WRF.

El Esquema de Dudhia para la radiación de onda corta representa el flujo de energía solar que llega a la atmósfera considerando la absorción del vapor de agua y la absorción y albedo de las nubes. El esquema Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) para radiación de onda larga utiliza valores predeterminados en tablas que representan los procesos de onda larga debidos al vapor de agua, ozono, CO<sub>2</sub> y gases traza (si existen), considerando también las propiedades ópticas de la nube en función de su profundidad.

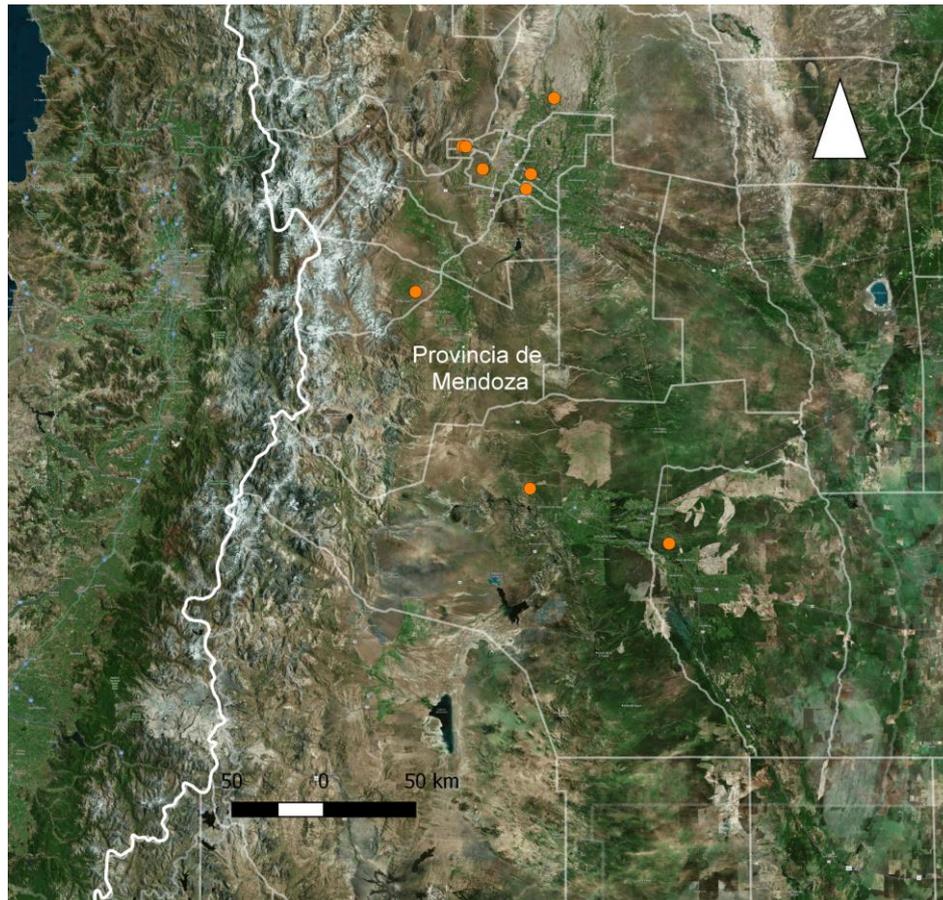
---

## VALIDACIÓN DEL MODELO

---

Las salidas horarias del modelo se comparan con mediciones puntuales de radiación solar en estaciones de superficie. Las estaciones miden radiación total, reportada como promedios horarios, o en algunos casos de 1 minuto, que fueron llevados a valores horarios.

Los sitios de monitoreo, 9 en total se distribuyen por toda la Provincia, tal como se ve en la Figura 2.



*Figura 2. Sitios de monitoreo de radiación solar utilizados para validar el modelo WRF.*

La evaluación modelo se realiza a través de un análisis estadístico, donde se examina cómo las predicciones se corresponden con las observaciones existentes en el dominio bajo estudio. Tradicionalmente, se ha empleado esta metodología, aunque es necesario notar que la comparación directa puede ser en algunos casos engañosa debido a que las incertidumbres en las observaciones y en las predicciones del modelo poseen diferentes orígenes (ver Chang y Hanna, 2004).

Willmott (1982) y Seigneur et al. (2000) proponen una serie de medidas para la evaluación del desempeño de modelos, basadas en la diferencia entre el valor predicho y el medido, utilizadas en numerosos estudios. La Tabla 2 presenta los principales parámetros estadísticos utilizados como indicadores para la evaluación del sistema de modelado.

Indicador	Fórmula	Rango	Valor ideal	Comentarios
Coefficiente de correlación	$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(C_{oi} - \bar{C}_o)(C_{pi} - \bar{C}_p)]}{\sqrt{\sigma_o \sigma_p}}$	[0,1]	1,0	$C_o$ y $C_p$ son concentraciones observadas y predichas.
Sesgo Promedio	$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_{pi} - C_{oi})$	n.a.	0,0	$C_{pi}$ y $C_{oi}$ son las concentraciones predichas y observadas para N casos.
Sesgo Fraccional (Fractional Bias)	$FB = \frac{\bar{C}_o - \bar{C}_p}{\frac{(\bar{C}_o + \bar{C}_p)}{2}}$	[-2,2]	0,0	$\bar{C}_o$ y $\bar{C}_p$ son los promedios de las concentraciones observadas y predichas.
Error medio cuadrático	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_{oi} - C_{pi})^2}$	n.a.	0,0	
Error medio cuadrático normalizado	$NMSE = \frac{(C_o - C_p)^2}{C_o C_p}$	n.a.	0,0	
Índice de acuerdo	$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (C_{pi} - C_{oi})^2}{\sum_{i=1}^N ( C_{pi} - \bar{C}_o  +  C_{oi} - \bar{C}_p )^2}$	[0,1]	1,0	

Tabla 2. Indicadores estadísticos para la evaluación del desempeño del modelo. (n.a.: no aplicable)

Para las simulaciones de radiación solar con WRF es posible afirmar que la representación del modelo es muy buena, con los indicadores de desempeño presentados en la Tabla 3.

Parámetro	Valor
MBE	-5,6
FB	0,02
RMSE	221
Coefficiente $d$ de Willmott	0,92

Tabla 3. Desempeño del modelo WRF

## REFERENCIAS

- Chang, J.C., Hanna, S.R., 2004. Air quality model performance evaluation. Meteorol. Atmos. Phys. 87, 167–196.
- Finlayson-Pitts, B.J., 2010. Atmospheric Chemistry. Proc. Natl. Acad. Sci. 107, 6566–6567.
- Mass, C.F., Ovens, D., Westrick, K., Colle, B.A., 2002. Does Increasing Horizontal Resolution Produce More Skillful Forecasts? Bull. Am. Meteorol. Soc. 83, 407–430.
- Mulena, G.C., Allende, D.G., Puliafito, S.E., Lakkis, S.G., Cremades, P.G., Ulke, A.G., 2016. Examining the influence of meteorological simulations forced by different initial and boundary conditions in volcanic ash dispersion modelling. Atmos. Res. 176–177.
- Puliafito, S.E., Allende, D.G., Mulena, C.G., Cremades, P., Lakkis, S.G., 2015. Evaluation of the WRF Model Configuration for Zonda Wind Events in a Complex Terrain. Atmos. Res. 166, 24–32.

- Seigneur, C., Pun, B., Pai, P., Louis, J.F., Solomon, P., Emery, C., Morris, R., Zahniser, M., Worsnop, D., Koutrakis, P., White, W., Tombach, I., 2000. Guidance for the performance evaluation of three-dimensional air quality modeling systems for particulate matter and visibility. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 50, 588–99.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 2nd ed. Wiley-Interscience.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Gill, D.O., Barker, D.M., Wang, W., Powers, J.G., 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. Mesoscale Microscale Meteorol. Div. Natl. Cent. Atmos. Res.
- Willmott, C., 1982. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 63, 1309–1369.