

# EVALUACIÓN DEL PRONÓSTICO DE IRRADIACIÓN SOLAR DIARIA EN URUGUAY UTILIZANDO EL MODELO WRF

**Vivian T. A. Branco** – vvalves@fing.edu.uy

**Rodrigo Alonso-Suárez** – rodrigoa@unorte.edu.uy

Laboratorio de Energía Solar, UDELAR, Uruguay

**Everton de Almeida** – ealmeida@fing.edu.uy

**Claudio Porrini** – cporrini@fing.edu.uy

**Alejandro Gutiérrez** – aguti@fing.edu.uy

**Gabriel Cazes** – agcm@fing.edu.uy

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, FING/UDELAR, Uruguay

**Resumen.** El pronóstico de la irradiación solar permite un despacho eficiente de la generación solar fotovoltaica, optimizando costos y valorizando los excedentes para exportación. El desarrollo y evaluación local de técnicas para la predicción del recurso solar ha iniciado recientemente en Uruguay, motivado por las necesidades del sector eléctrico que ha incorporado 230 MW de energía solar PV a su matriz de generación. En este trabajo se releva el desempeño del pronóstico obtenido con una variante de modelo de mesoescala WRF que utiliza las salidas del modelo global GFS como condiciones iniciales y de borde para su ejecución. La evaluación se realiza a escala diaria hasta 3 días en adelante utilizando un año de datos registrados en la Red de Medida Continua de Irradiancia Solar que administra el Laboratorio de Energía Solar (LES). Se encontró un desvío cuadrático medio promedio en la región que varía levemente con el horizonte de pronóstico, entre 33.7 % y 35.0 % de la media de las medidas para la predicción de 1 a 3 días en adelante, mejorando en un 22 % y en un 31 % el desempeño de la persistencia, respectivamente. Se observa un sesgo sistemático del modelo hacia la sobrestimación debido a la dificultad que presenta para pronosticar la nubosidad.

**Palabras clave:** pronóstico de la irradiación solar, modelos numéricos de atmósfera, WRF.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos diez años Uruguay ha llevado adelante una política energética donde las energías renovables tienen un rol central. La gran incorporación de energía eólica y solar que se experimentó recientemente no tiene precedentes en la historia del país, y ha logrado que actualmente cerca de 97 % de la generación eléctrica sea de origen renovable (Uruguay XXI, 2017). En lo que refiere a energía solar, 16 plantas fotovoltaicas (PV) fueron licitadas por un total de 230 MW, lo que representa aproximadamente un 12 % de la máxima demanda histórica del país (ADME, 2017). El aumento de la penetración de la energía solar PV en la red eléctrica requiere pronosticar el recurso solar que estará disponible, de modo de poder manejar las fluctuaciones introducidas en la generación por la meteorología local (Diagne et al., 2013).

Existen distintas técnicas para pronosticar la irradiación solar cuya utilidad depende críticamente del horizonte de pronóstico y la resolución espacial requerida (Diagne et al., 2013). Estas técnicas se dividen en cuatro grandes grupos: (i) predicción basada en imágenes captadas por cámaras todo-cielo colocadas en tierra, utilizada para horizontes temporales de hasta 30 minutos; (ii) predicción basada en imágenes de satélite, empleada para horizontes temporales entre 30 minutos y 5 horas; (iii) predicción basada en modelos numéricos de atmósfera (NWP, Numerical Weather Predict), preferidos en el contexto del recurso solar para escalas temporales mayores a 5 horas (Kühnert et al., 2013; Perez and Hoff, 2013) incluyendo algunos días en adelante; y (iv) predicción basada en el análisis de series meteorológicas adquiridas en tierra. La predicción por NWP es la que presenta mayor grado de avance debido a que se utiliza desde hace décadas en forma general para pronosticar el tiempo y su utilización para la predicción de energía eólica se encuentra consolidada. Esta es la única técnica capaz de predecir a más de 1 día en adelante, horizontes temporales de alta importancia para la operación actual de las redes eléctricas.

Los NWP se clasifican en dos categorías: los modelos que corren a escala global, como el GFS de la NOAA (EEUU) o el ECMWF del Centro Europeo, y los modelos de escala regional como el WRF (Weather Research and Forecasting), el NAM (North American Mesoscale Model) o el ETA del CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, Brasil). El modelo WRF (Skamarock et al., 2008), objeto de este trabajo, es desarrollado por la comunidad científica para fines de investigación y operación, y su código es libre.

El desempeño de diferentes variantes del modelo WRF se ha evaluado para el pronóstico de irradiación solar en diversas partes del mundo. En Perez et al. (2013) se reporta el desvío cuadrático medio porcentual (rRMSD) para variantes del WRF que utilizan la salida del GFS como condiciones iniciales y de borde. Los resultados varían de acuerdo a la variante utilizada y la región geográfica bajo estudio. Para la variante del WRF operada por la empresa AWS Truepower

para EEUU el rRMSD varía desde 40 % a 48 % para el pronóstico de 1 día a 3 días. El mismo trabajo reporta un desvío rRMSD para estos horizontes de 50 % a 58 % para la variante del WRF operada por Meteotest para Europa central. En ambos casos se observan diferencias significativas entre los indicadores obtenidos en cada sitio por separado, mostrando que el desempeño no sólo es afectado por la variante utilizada sino también por la variabilidad meteorológica local. El mejor desempeño reportado en el mencionado trabajo se obtuvo con la variante del WRF desarrollada por la Universidad de Jaen (Lara-Fanego et al., 2012), para el cuál el rRMSD para horizontes de 1 a 3 días varía desde 26 % a 30 %. En Sudamérica las evaluaciones de este tipo de modelos son escasas, reportándose un trabajo en el nordeste de Brasil (Lima et al., 2016) y una evaluación preliminar en Uruguay (Porrini et al., 2015), que es antecedente de este trabajo.

En Uruguay el pronóstico de la energía solar por modelos NWP se encuentra en etapa de desarrollo y diagnóstico. En este trabajo se reporta el desempeño del pronóstico de la irradiación solar global en plano horizontal (GHI) del modelo WRF que está actualmente operativo para las predicciones de energía eólica en el país. La incertidumbre del modelo se evalúa a escala diaria utilizando medidas en tierra de calidad controlada, registradas durante un año en siete sitios del territorio de Uruguay. Este trabajo es parte de un conjunto de acciones que se están realizando en el país para el desarrollo y caracterización local de las técnicas de pronóstico del recurso solar. Los NWP ya se encuentran en operación en Uruguay, permitiendo anticipar y valorizar los excedentes de generación eléctrica para su exportación.

## 2. DATOS Y METODOLOGIA

La evaluación de desempeño se realizó para el periodo comprendido entre junio de 2016 y mayo de 2017, completando un año entero de estadística. Se utilizaron las salidas promedio del modelo global GFS disponibilizadas por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, EEUU) como condiciones iniciales y de borde para el modelo de regional WRF. Estas salidas se deben preprocesar con el módulo WPS (Preprocessing System) previo a su utilización como entrada para el modelo regional. El modelo WRF se corrió en grillas de 30 km para la predicción hasta 72 horas en adelante, de donde se extrajeron las series temporales de GHI pronosticadas para cada sitio bajo estudio. Estos pronósticos se compararon con las medidas en tierra para cuantificar su desempeño para la predicción de 1 a 3 días. Este desempeño se compara con el de la persistencia, que por ser la forma más simple de establecer una predicción, oficia como límite superior para el desempeño de técnicas de pronóstico más complejas. En lo que sigue se describen las medidas en tierra utilizadas, se detalla la configuración para la ejecución del WRF y se presentan las métricas para cuantificar el desempeño del pronóstico.

### 2.1 Medidas en superficie

Las medidas de referencia para este estudio fueron registradas en siete estaciones de la Red de Medida Continua de Irradiancia Solar (RMCIS) que administra el Laboratorio de Energía Solar de la UdelaR (LES, <http://les.edu.uy>). Estas estaciones, distribuidas en el territorio de Uruguay, están equipadas con piranómetros Kipp & Zonen de Primera Clase o superior que son calibrados cada dos años como indican las buenas prácticas de la WMO (WMO, 2008). La calibración se realiza bajo normativa internacional vigente contra un Estándar Secundario Kipp & Zonen CMP22 que el LES mantiene con trazabilidad al patrón primario mundial en el World Radiation Center, Davos, Suiza. Considerando la calidad de los equipos en campo y el mantenimiento diario que reciben las cúpulas de los piranómetros, se estima la incertidumbre de la medida de esta red en un 3-4 % a escala diaria, lo que está muy por debajo de la incertidumbre del pronóstico a evaluar.

La ubicación de los sitios utilizados en este trabajo se muestra en la Fig. 1 y se detalla en la Tab. 1. Se trata de una región con clima templado sub-tropical con características climáticas homogéneas, cuyo recurso solar presenta una variabilidad inter-anual intermedia (Alonso-Suárez, 2017), similar a la encontrada en la cuenca del Río Mississippi, en algunas zonas de la costa oeste de EEUU y en varios estados de la zona centro-este (Gueymard and Wilcox, 2011). Esta información sirve como referencia para comparar el desempeño del pronóstico con otras partes del mundo con similar variabilidad del recurso.

Tabla 1- Detalle de la ubicación de las estaciones de medida.

Estación	Cód	Lat	Lon	Alt
Salto	LE	-31.28	-57.92	42
Artigas	AR	-30.40	-56.51	136
Tacuarembó	TA	-33.71	-55.83	140
Canelones	LB	-34.67	-56.34	32
Rocha	RC	-34.49	-56.17	24
Colonia	ZU	-34.34	-57.69	81
Treinta y Tres	PP	-33.26	-54.49	58



Figura 1- Ubicación de las estaciones de medida utilizadas.

## 2.2 Pronóstico por modelo WRF

El modelo WRF es un modelo de mesoescala, no hidrostático, euleriano y compresible que se utiliza en este trabajo para pronosticar la irradiación solar GHI hora a hora con un horizonte temporal de 3 días en adelante. Las configuraciones utilizadas para su ejecución se presentan en la Tab. 2.

Tabla 2- Configuraciones utilizadas para correr el modelo WRF.

Módulo	Parametrización	Referencia
Microfísica	Lin et al. Scheme	Lin et al. (1982)
Capa Límite Planetaria	Mellor–Yamada–Janjic Scheme	Janjic (1994)
Cúmulos	Kain–Fritsch Scheme	Kain (2004)
Radiación onda corta	Dudhia Shortwave Scheme	Dudhia (1989)
Radiación onda larga	Rapid and Accurate Radiative Transfer Model (RRTM)	Mlawer et al. (1997)
Modelo de superficie	Noah-MP Land Surface Model	Niu et al. (2011), Yang et al. (2011)
Capa Límite	Eta Similarity Scheme	Monin and Obukhov (1954), Janjic (2002)

Las salidas del modelo GFS se disponen cuatro veces al día (00 UTC, 06 UTC, 12 UTC y 18 UTC) con una resolución espacial de  $1^\circ \times 1^\circ$ , lo que para el territorio de Uruguay es aproximadamente  $110 \times 90$  km. Se utilizó el GFS promedio de la corrida de las 00 UTC. La ejecución del WRF en forma local requiere de unas 2 horas más de procesamiento para generar el pronóstico de las próximas 72 horas, por lo que normalmente se disponibilizan las predicciones a las 3 AM (hora local). Este procesamiento, costoso en capacidad de cómputo, se repite cuatro veces al día en el Cluster informático de la Facultad de Ingeniería de la UdelaR (ClusterUY, <https://www.fing.edu.uy/cluster/index.php>).

## 2.3 Métricas de desempeño

La evaluación de desempeño se realizó utilizando las métricas comunes en el área: el desvío promedio (MBD), el desvío cuadrático medio (RMSD) y la habilidad de pronóstico (FS, Forecasting Skill). Este último indicador compara el RMSD del pronóstico con el de la persistencia, resultando en una métrica de utilidad que permite intercomparar el desempeño de la predicción ante diferentes condiciones de variabilidad del recurso (Coimbra et al., 2013). El MBD y RMSD se definen según,

$$\text{MBD} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{H}_h - H_h^{\text{ref}}), \quad (1)$$

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{H}_h - H_h^{\text{ref}})^2}, \quad (2)$$

donde  $N$  es la cantidad de días,  $\hat{H}_h$  es la irradiación pronosticada y  $H_h^{\text{ref}}$  es la irradiación medida en tierra, ambas expresadas en  $\text{MJ}/\text{m}^2$ . Los valores porcentuales de estas cantidades, rMBD y rRMSD, se calculan relativos a la media de las medidas,  $\bar{H}_h^{\text{ref}}$ . Sólo se utilizan los días donde la medida de referencia y la predicción del modelo estén ambas disponibles.

La habilidad de pronóstico, FS (del inglés *Forecasting Skill*), se define como,

$$\text{FS} = 1 - \frac{\text{RMSD}^{\text{mod}}}{\text{RMSD}^{\text{per}}}, \quad (3)$$

a partir del RMSD del modelo y el de la persistencia. Se expresará el FS en términos porcentuales, multiplicando a la expresión de la Ec. (3) por 100. Este indicador es  $\text{FS} = 100\%$  si el pronóstico es perfecto y  $\text{FS} \leq 0\%$  si su desempeño es igual o peor que el de la persistencia.

Para irradiación solar la persistencia se implementa a partir del índice de claridad, que es el resultado de normalizar la irradiación global en un plano horizontal en tierra,  $H_h$ , por la irradiación que incide en un plano horizontal en el tope de la atmósfera,  $H_{oh}$ , de modo que  $K_T = H_h/H_{oh}$  (Duffie and Beckman, 2006). El pronóstico por persistencia asume que el índice de claridad permanecerá constante respecto al paso temporal anterior, i.e.  $K_T(t + \Delta t) = K_T(t)$ , por lo que el procedimiento en base diaria es:

$$\hat{H}_h^{\text{per}}(t + \Delta t) = K_T(t) \times H_{oh}(t + \Delta t). \quad (4)$$

En este trabajo se utiliza  $\Delta t = 1, 2, 3$  días.

### 3. RESULTADOS

En esta sección se analiza el desempeño en la región de Uruguay obtenido por el pronóstico WRF+GFS en base diaria. Esta evaluación se realiza contra los datos de campo de menor incertidumbre disponibles en el país y con una estadística de un año completo, representando la evaluación con datos de mayor calidad realizada hasta el momento para el pronóstico por WRF en Uruguay. Se destaca que para esta evaluación no se aplicaron técnicas de post-proceso que son de utilización común, como el MOS (Model Output Statistic) u otras basadas en redes neuronales, por lo que existe margen para disminuir la incertidumbre del pronóstico. Aquí se busca evaluar el desempeño de la predicción a la salida del modelo, como un paso base en su diagnóstico.

#### 3.1 Evaluación general a escala diaria

El pronóstico de la energía diaria se construye acumulando el pronóstico horario para cada día. Como el pronóstico inicia a las 00 UTC, la predicción para el día 1 se corresponde con el día actual, es decir, pronosticar al inicio del día la irradiación que se dispondrá para la totalidad de ese día. En la Tab. 3 se desglosan los indicadores de desempeño para el pronóstico por WRF+GFS con las parametrizaciones de la Tab. 2 desde 1 a 3 días en adelante. Se presentan los indicadores por estación, y su promedio sobre el final del cuadro, siendo éste el desempeño medio estimado para sitios en la región. En la mayoría de las estaciones se consideraron aproximadamente 360 días, excepto para estación de medida de Treinta y Tres (PP) donde se utilizan aproximadamente 220 días. Esta estación fue trasladada durante el 2016 a una nueva ubicación que dista unos 30 km del sitio original y por lo tanto no se utilizan los datos registrados en la ubicación anterior.

Se observa un leve incremento de rRMSD con  $\Delta t$  creciente y que la variabilidad de desempeño entre estaciones es pequeña. Para la predicción a 1 día el indicador rRMSD varía entre 30% y 36% en los distintos sitios. A 2 días el desvío rRMSD se encuentra entre 30-38% y a 3 días entre 31-38%. Se encontraron desvíos MBD positivos relativamente grandes, entre 19-24%. Este sesgo hacia la sobrestimación puede observarse en los diagramas de dispersión de la Fig. 2, donde también se puede apreciar la similitud del pronóstico de 1 a 3 días en adelante. Se observa que la mayoría de los puntos alejados de la diagonal (línea de pronóstico perfecto) son días que fueron pronosticados con mayor irradiación que la que hubo. Este comportamiento se debe principalmente a falencias del modelo para resolver adecuadamente la ocurrencia de nubosidad. El desempeño promedio sobre la región muestra una sobrestimación de  $\approx 3.7 \text{ MJ}/\text{m}^2$  para todo  $\Delta t$  y un RMSD que se incrementa levemente desde  $5.8 \text{ MJ}/\text{m}^2$  a  $6.0 \text{ MJ}/\text{m}^2$  para el pronóstico desde 1 a 3 días. En términos porcentuales esto representa un rMBD de  $\approx +22\%$  y un rRMSD levemente incremental desde 33.7% a 35%. El FS del pronóstico desde 1 a 3 días muestra mayores diferencias, debido a que el desempeño de la persistencia empeora más rápidamente con  $\Delta t$  que el desempeño del modelo. Al considerar la variabilidad típica de cada sitio en el análisis, se observan mayores diferencias entre estaciones. El FS del pronóstico varía entre 18-27% a 1 día, entre 24-34% a 2 días y entre 29-35% a 3 días, siendo creciente con el horizonte de pronóstico y presentando mayor variación entre estaciones. En términos promedio, la habilidad de pronóstico crece desde un 22% a 1 día a un 31% a 3 días.

Tabla 3- Indicadores de desempeño para el pronóstico de 1 a 3 días.

	<i>N</i> (días)	media (MJ/m <sup>2</sup> )	MBD (MJ/m <sup>2</sup> )	RMSD (MJ/m <sup>2</sup> )	rMBD (%)	rRMSD (%)	FS (%)
<b>LE</b>							
día 1	358		3.6	6.0	21.0	34.6	23.0
día 2	357	17.2	3.7	6.4	21.4	36.9	24.9
día 3	356		3.6	6.2	20.9	36.0	29.0
<b>AR</b>							
día 1	357		3.7	5.9	21.2	34.3	22.5
día 2	356	17.2	3.7	6.2	21.2	35.7	28.2
día 3	355		3.7	6.2	21.5	36.2	28.8
<b>TA</b>							
día 1	362		3.8	5.9	23.0	35.3	17.8
día 2	361	16.7	3.8	6.2	22.8	36.2	25.7
día 3	360		3.7	6.0	22.3	35.7	31.0
<b>LB</b>							
día 1	362		3.8	5.6	21.7	34.2	17.6
día 2	361	16.5	3.9	5.8	22.0	35.3	24.3
día 3	360		4.0	5.8	21.7	35.4	28.5
<b>RC</b>							
día 1	361		3.8	5.7	23.6	35.5	20.5
día 2	360	16.1	3.9	6.1	23.9	37.6	26.4
día 3	359		3.9	6.1	23.9	37.6	28.8
<b>ZU</b>							
día 1	363		3.2	5.3	19.0	31.4	26.9
día 2	362	16.8	3.4	5.5	20.0	32.9	30.0
día 3	361		3.4	5.7	19.2	33.9	31.6
<b>PP</b>							
día 1	221		4.1	6.1	20.8	30.5	20.9
día 2	220	19.9*	4.0	5.9	19.9	29.7	33.9
día 3	219		3.9	6.2	19.6	31.4	34.8
<b>todas</b>							
día 1	–		3.7	5.8	21.5	33.7	25.8
día 2	–	17.2	3.8	6.0	22.1	35.0	27.6
día 3	–		3.7	6.0	21.5	35.0	30.5

\*Debido a la re-ubicación de la estación el invierno está sub-representado en la serie de datos.

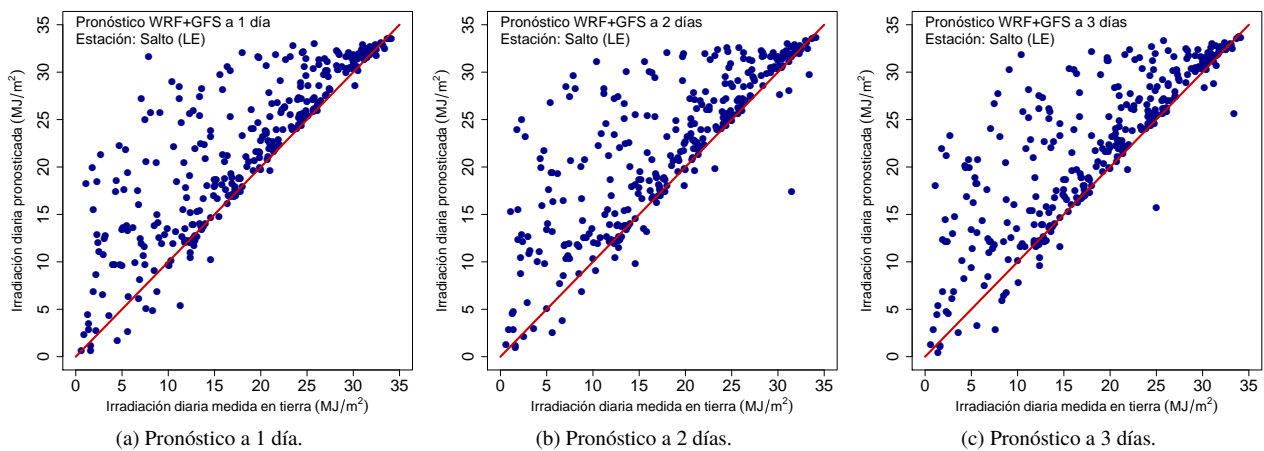


Figura 2- Diagramas de dispersión para el pronóstico diario. Eje x: medida. Eje y: pronóstico. Estación Salto.

En la Fig. 3 se presenta la información de rRMSD en forma resumida. Se muestran las curvas de rRMSD en función de

$\Delta t$  para cada estación y su promedio, en comparación con la persistencia y la referencia de caracterización por satélite. Dado su simplicidad, la persistencia brinda un límite superior para el desempeño de técnicas de pronóstico más elaboradas. Como límite inferior se adopta la incertidumbre de la caracterización por satélite a escala diaria que está disponible actualmente en Uruguay, y que para estas estaciones es de 5.6 % utilizando el modelo satelital JPTv2 (Alonso-Suárez, 2017). La incertidumbre del WRF se encuentra significativamente por debajo de la persistencia, que presenta un rRMSD promedio sobre el territorio entre 43 % y 51 % al ser aplicada desde 1 a 3 días. Los indicadores aquí obtenidos son consistentes con los que se encuentran en la literatura, y están comprendidos entre los reportados para España y EEUU en Perez et al. (2013) utilizando distintas variantes del modelo WRF con condiciones iniciales y de borde tomadas del GFS.

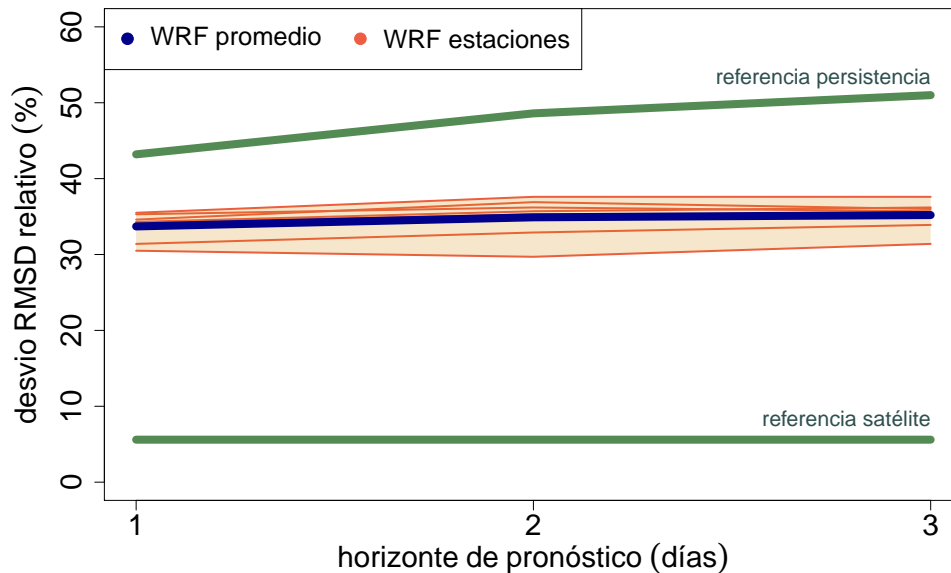


Figura 3- Comparación de desempeño de distintas técnicas de pronóstico

### 3.2 Discriminación de desempeño por índice de claridad

Como ya se observó, el desempeño del modelo está fuertemente influenciado por la presencia de nubosidad. Para obtener un mayor conocimiento sobre sus características se presentan en esta sección los indicadores discriminados por índice de claridad diario. Se clasifican los días en dos categorías: días de cielo despejado ( $K_T > 0.65$ ) y días con presencia de nubosidad ( $K_T \leq 0.65$ ), resultados que se presentan en la Tab. 4. Se observa un desempeño notablemente bueno para días de cielo despejado, con desvíos rMBD pequeños del orden del +3 %, y rRMSD bajos, entre 5.6 % a 1 día y 6.1 % a 3 días. Las ganancias respecto a la persistencia son altas y crecen rápidamente con el horizonte de pronóstico, pasando de FS  $\approx 48$  % para el pronóstico a 1 día a un FS  $\approx 72$  % para el pronóstico a 3 días. Los indicadores empeoran cuando se consideran días con presencia de nubosidad. Se observa un sesgo sistemático alto hacia la sobrestimación, del orden del  $\approx +45$  %, y rRMSD del orden de  $\approx 60$  %. Sin embargo, incluso en estas condiciones el pronóstico por WRF+GFS mejora la persistencia, presentando valores de FS de 20 % a 1 día y de 26 % a 3 días.

En la Fig. 4 se ilustran los valores de rRMSD encontrados en cada situación, y se comparan con la persistencia y la referencia de satélite. Se puede observar que para días de cielo despejado la curva del modelo WRF+GFS está cercana a la de la caracterización por satélite, que en estas condiciones es de  $\approx 3$  %. Además, está significativamente por debajo de la persistencia, lo que confirma la potencialidad del modelo en estas condiciones. Por el contrario, en los días con nubosidad la incertidumbre del modelo se encuentra más cercana a la de la persistencia que a la de la caracterización por satélite. El rRMSD en esta condición es considerablemente mayor que en el caso despejado, pero aún así se mantiene por debajo de la persistencia, lo que justifica su utilización incluso en estas condiciones. Si se discriminan con mayor grado de detalle los días con nubosidad se pueden encontrar indicadores aún mayores (Lara-Fanego et al., 2012), situaciones para las cuáles combinar el pronóstico con la persistencia pueden reducir la incertidumbre global de la predicción.

## 4. CONCLUSIONES

Se presentó la evaluación de desempeño de una variante del modelo WRF para el pronóstico de la irradiación solar sobre el territorio de Uruguay. Para ello se utilizaron los datos de campo de menor incertidumbre disponibles en el país para un año entero de estadística. Se encontró que esta variante del WRF, sin ningún tipo de post-proceso, es capaz de proporcionar predicciones de la GHI de 1 a 3 días para Uruguay con un rMBD de  $\approx +22$  % y un rRMSD del orden del  $\approx 35$  %. El desvío

Tabla 4- Discriminación de desempeño por kT para el pronóstico de 1 a 3 días.

	media (MJ/m <sup>2</sup> )	MBD (MJ/m <sup>2</sup> )	RMSD (MJ/m <sup>2</sup> )	rMBD (%)	rRMSD (%)	FS (%)
<b>días de cielo despejado</b>						
día 1		0.8	1.4	3.1	5.6	48.0
día 2	24.4	0.7	1.5	2.7	6.1	62.4
día 3		0.6	1.5	2.6	6.1	71.7
<b>días con nubosidad</b>						
día 1		6.0	7.7	44.6	57.7	20.2
día 2	17.6	6.1	8.0	45.8	59.8	25.2
día 3		6.1	8.1	45.8	60.4	25.9

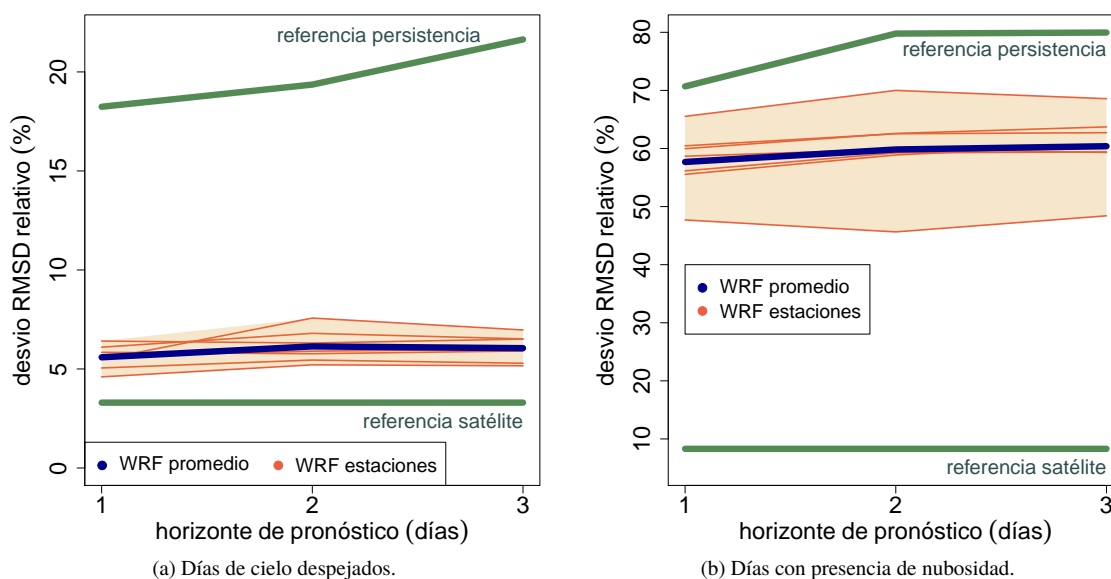


Figura 4- Desvío rRMSD del modelo WRF+GFS discriminado por índice de claridad diario.

MBD es relativamente alto y evidencia la necesidad de post-procesos para el pronóstico. No se encontró variabilidad significativa en el desempeño del modelo entre las estaciones analizadas y se observaron indicadores aproximadamente constantes como función del horizonte temporal, comportamiento que se observa en otras evaluaciones (Perez and Hoff, 2013). Los resultados obtenidos son consistentes con los reportados en la literatura (Lara-Fanego et al., 2012; Perez et al., 2013) y demuestran que el modelo a escala diaria es una mejora de la persistencia, que presenta valores de rRMSD entre 43 % y 51 %. La mejora respecto a la persistencia es un 22 % para el pronóstico a 1 día (Forecasting Skill) y es un 31 % para el pronóstico a 3 días.

Los resultados aportan evidencia que el modelo WRF con las parametrizaciones escogidas es bueno para pronosticar los días despejados y presenta falencias para pronosticar los días nublados. Se observa un desempeño excepcionalmente bueno para días de cielo despejado, obteniéndose un rMBD del orden del +3 % y un rRMSD entre 5.6 % y 6.1 % para la predicción de 1 a 3 días. En estas condiciones, el modelo puede aportar mejoras respecto a la persistencia entre 48 % y 72 % respectivamente. En cambio, para días con presencia de nubosidad los indicadores crecen a un rMBD de  $\approx +45$  % y un rRMSD de  $\approx 60$  %. La ganancia respecto a la persistencia en este caso es menor, ubicándose entre 20 % y 26 %. Una de las opciones que se está explorando para mejorar el desempeño del modelo WRF en condiciones de cielo nublado es la utilización de ensembles de condiciones iniciales con la técnica de breeding (Kalnay, 2003). Esto permite buscar combinaciones de las predicciones asociadas a cada ensemble que mejoren la calidad del pronóstico general, por ejemplo, si alguna corrida resuelve adecuadamente la nubosidad. La utilización de múltiples corridas permite además mejorar la estimación de intervalos de confianza, tan importantes para la operación de la red como el pronóstico puntual.

Este trabajo puede ser complementado en varios sentidos que son objeto de nuestro trabajo actual. El pronóstico con este modelo debe ser evaluado a escala horaria y a escala regional, esto es, considerando el pronóstico sobre la suma de todos los sitios (o su promedio). Esto es más adecuado a las necesidades de administración de la red, dado que se requiere pronosticar la generación conjunta de plantas PV de gran escala distribuidas en el territorio. Por otro lado, una evaluación en cada sitio por separado brinda más información para identificar fortalezas y debilidades en los modelos, y así definir

estrategias para reducir su incertidumbre. Como el principal problema del modelo se encuentra en resolver la nubosidad, se están probando otras configuración de capa límite que favorezcan la formación de nubes en el modelo. Es un objetivo futuro incluir en la evaluación otros sitios de medida en la región, por ejemplo, los datos de GHI de alta calidad registrados en la estación São Martinho da Serra de la red SONDA (<http://sonda.ccst.inpe.br>) ubicada en Río Grande do Sul, próxima al territorio de Uruguay.

## REFERENCIAS

- ADME (2017). Generadores de energía eléctrica. Technical report, Administración del Mercado eléctrico.
- Alonso-Suárez, R. (2017). *Estimación del recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales*. PhD thesis, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. PhD Thesis.
- Coimbra, C. F., Kleissl, J., and Marquez, R. (2013). Chapter 8 - overview of solar-forecasting methods and a metric for accuracy evaluation. In Kleissl, J., editor, *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, pages 171–194. Academic Press, Boston.
- Diagne, M., David, M., Lauret, P., Boland, J., and Schmutz, N. (2013). Review of solar irradiance forecasting methods and a proposition for small-scale insular grids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27:65–76.
- Dudhia, J. (1989). Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the atmospheric sciences*, 46(20):3077–3107.
- Duffie, J. and Beckman, W. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, third edition.
- Gueymard, C. A. and Wilcox, S. M. (2011). Assessment of spatial and temporal variability in the US solar resource from radiometric measurements and predictions from models using ground-based or satellite data. *Solar Energy*, 85(5):1068–1084.
- Janjic, Z. I. (1994). The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*, 122:927–945.
- Janjic, Z. I. (2002). Nonsingular implementation of the mellor-yamada level 2.5 scheme in the ncep meso model. In *National Centers for Environmental Prediction*, number 437, page 61. NOAA Science Center.
- Kain, J. S. (2004). The kain-fritsch convective parameterization: An update. *Journal of Applied Meteorology*, 43:170–181.
- Kalnay, E. (2003). *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, illustrated, reprint edition.
- Kühnert, J., Lorenz, E., and Heinemann, D. (2013). Chapter 11 - satellite-based irradiance and power forecasting for the german energy market. In Kleissl, J., editor, *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, pages 267–297. Academic Press, Boston.
- Lara-Fanego, V., Ruiz-Arias, J., Pozo-Vázquez, D., Santos-Alamillos, F., and Tovar-Pescador, J. (2012). Evaluation of the WRF model solar irradiance forecasts in Andalusia (southern Spain). *Solar Energy*, 86(8):2200–2217. Progress in Solar Energy 3.
- Lima, F., Martins, F., Pereira, E., Lorenz, E., and Heinemann, D. (2016). Forecast for surface solar irradiance at the brazilian northeastern region using nwp model and artificial neural networks. *Solar Energy*, 87:807–818.
- Lin, Y.-L., Farley, R. D., and Orville, H. D. (1982). Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22:1065–1092.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., and Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: Rrtm, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14):16663–16682.
- Monin, A. S. and Obukhov, A. M. (1954). Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *American Meteorological Society*, 151:163–187.
- Niu, G., Yang, Z., Mitchell, K., Chen, F., Ek, M., Barlage, M., Kumar, A., Manning, K., Niyogi, D., Rosero, E., Tewari, M., and Xia, Y. (2011). The community noah land surface model with multiparameterization options (noah-mp): 1. model description and evaluation with local - scale measurements. *Journal of geophysical research*, 116(D12109):1–19.
- Perez, R. and Hoff, T. E. (2013). Chapter 10 - SolarAnywhere forecasting. In Kleissl, J., editor, *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, pages 233–265. Academic Press, Boston.
- Perez, R., Lorenz, E., Pelland, S., Beauharnois, M., Knowe, G., Jr., K. H., Heinemann, D., Remund, J., Müller, S., Traunmüller, W., Steinmauer, G., Pozo, D., Ruiz-Arias, J., Lara-Fanego, V., Ramirez-Santigosa, L., Gaston-Romero, M., and Pomares, L. (2013). Comparison of numerical weather prediction solar irradiance forecasts in the US, Canada and Europe. *Solar Energy*, 94:305–326.
- Porrini, C., Gutierrez, A., Boezio, G. C., Hermida, G., Orono, D., and Puppo, M. (2015). Development of a model



- output statistic and implementation of an operational solar photovoltaic energy forecast model based in wrf. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America*.
- Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., Duda, M., Huang, X., Wang, W., and Powers, J. (2008). A description of the advanced research wrf version 3.
- Uruguay XXI (2017). Oportunidades de inversión en energías renovables. Technical report, Instituto de Promoción de Inversiones y Exportaciones de Bienes y Servicios del Ministerio de Relaciones Exteriores del Uruguay.
- WMO (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. World Meteorological Organization, WMO, Geneva, Switzerland, seventh, wmo-no. 8 edition.
- Yang, Z., Niu, G., Mitchell, K., F. Chen, M. E., Barlage, M., Longuevergne, L., Manning, K., Niyogi, D., Tewari, M., and Xia, Y. (2011). The community noah land surface model with multiparameterization options (noah-mp): 2. evaluation over global river basins. *Journal of geophysical research*, 116(12110):1–16.

### PERFORMANCE OF DAILY SOLAR IRRADIATION FORECASTING IN URUGUAY USING THE WRF MODEL

**Abstract.** *Solar irradiation forecast allows an efficient grid integration of solar photovoltaic power, optimizing costs and providing key information to determine export prices. The local development and evaluation of solar resource forecasting techniques has recently started in Uruguay, mainly motivated by the needs of the electricity sector that has incorporated 230 MW of solar PV installed capacity. In this work we evaluate the performance of a GFS driven WRF model for daily solar irradiation forecast. The evaluation is performed for daily solar irradiation up to 3 days-ahead and using one year of data recorded in the solar radiation network that is administrated by the Solar Energy Laboratory (LES), Udelar. It was found that the average rRMSD value in the region varies slightly with the time horizon, from 33.7 % to 35.0 % for 1 to 3 days-ahead, improving the persistence performance by 22 % and 31 %, respectively. A systematic overestimating bias is observed in the model's forecast due to the difficulty that it presents to predict cloudiness.*

**Keywords:** *solar irradiation forecasting, numerical weather predict, WRF.*