



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY



FACULTAD DE
CIENCIAS
UDELAR | fciem.edu.uy

Evaluación del modelo regional WRF para pronósticos de radiación solar en superficie dentro del territorio uruguayo

Claudio Porrini

Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera
Facultad de Ingeniería, Facultad de Ciencias
Universidad de la República

Montevideo – Uruguay
Diciembre de 2017



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY



Evaluación del modelo regional WRF para pronósticos de radiación solar en superficie dentro del territorio uruguayo

Claudio Porrini

Trabajo Especial de la carrera de la Licenciatura en
Ciencias de la atmósfera, de la Universidad de la
República.

Director: Dr. Ing. Gabriel Cazes Boezio

Montevideo – Uruguay

Diciembre de 2017

Montevideo – Uruguay
Diciembre de 2017

RESUMEN

El presente trabajo analiza predicciones numéricas de radiación solar en superficie durante meses de verano en Uruguay. Las predicciones tienen un horizonte de 48 horas, y se basan en el uso del modelo regional WRF, con condiciones iniciales y de frontera provistas por el Global Forecast System de NOAA. Se optó por estudiar en mayor profundidad una configuración específica de parametrizaciones del modelo WRF, y utilizar una resolución horizontal relativamente bajas (30km), calculando pronósticos retrospectivos para los cuatro veranos más recientes. Esta opción se debe a que la experiencia de predicciones operativas en Uruguay de la variable de interés muestra ciertos desvíos sistemáticos aún habiendo utilizado cierta diversidad de parametrizaciones y resoluciones, prefiriéndose entonces aprender sobre posibles causas de estos desvíos con un esquema en particular. Las simulaciones se contrastan con datos de piranómetros operados por el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de la República, y con datos de análisis de nubosidad del sistema MODIS de NASA. El estudio muestra que las simulaciones tienden a subestimar la nubosidad, especialmente, en bajos niveles. Además se encuentran pronósticos relativamente frecuentes de cielo claro y radiación elevada erróneos, que contribuyen a un bias positivo y a tener un histograma de errores asimétrico. Se encuentra que la predicción de humedad relativa próxima al tope de la capa límite (en el interior de la misma), permite determinar condiciones en las que las predicciones de radiación elevada son muy confiables, y condiciones en las que son dudosas. En base a estos resultados se propone un post procesamiento empírico de los resultados numéricos que permite corregir el bias, mejorar los indicadores de calidad del pronóstico, y estimar los intervalos de confianza de las predicciones de manera que se discriminen casos de predicción más confiable y más dudosa. Adicionalmente el trabajo permite proponer hipótesis acerca de aspectos de la simulación que deben ser mejorados.

Palabras claves:

pronósticos solar, modelización numérica, WRF.

[sort=case,type=simbolos] [sort=case,type=acronym]

Tabla de contenidos

Lista de símbolos	VI
Lista de siglas	VI
1 Introducción	1
2 Radiación solar y modelización numérica de la atmósfera	8
2.1 Índice de claridad horario	8
2.2 Medidas de incertidumbre para evaluar errores del modelo . . .	9
2.3 Modelos numéricos de predicción del tiempo atmosférico	10
2.4 Descripción Modelos Global GFS	11
2.5 Descripción Modelos Regional WRF	12
2.6 Parametraciones físicas	13
2.7 Microfísica	13
2.8 Cumulus	13
2.9 Física de la superficie	14
2.10 Capa Límite Planetaria	14
2.11 Esquemas de Radiación	15
3 Datos utilizados	16
3.1 Clima de Uruguay	16
3.2 Modelo Operativo	16
3.2.1 Descarga datos de GFS	17
3.2.2 Ejecución de las simulaciones del WRF en cluster	18
3.2.3 MOS	18
3.3 Descripción de los datos utilizados	18
3.4 Configuración de las simulaciones del WRF	19
3.4.1 Dominio de las simulaciones WRF	19

3.4.2	Parametrizaciones WRF	20
3.5	Datos MODIS	21
3.6	Datos en superficie	22
3.6.1	Datos Piranómetros LES	22
3.6.2	Calidad de Datos	23
4	Resultados y análisis	24
4.1	Evaluación del pronóstico de GHI del WRF en el territorio Uruguayo	24
4.2	Climatología de imágenes satelitales MODIS	32
4.3	Comparación MODIS vs WRF	36
4.4	Estudio de la PBL para la formación de nubes en capas bajas	38
4.5	Aplicación de corrección estadística MOS	44
5	Consideraciones finales	47
6	Bibliografía	49
	Apéndices	52
Apéndice 1	Datos procesados complementarios	53
Apéndice 2	Imágenes complementarias	55

Capítulo 1

Introducción

En los últimos años ha habido una gran incorporación de energía fotovoltaica en la red eléctrica, un proceso que se ha desarrollado a escala mundial, y se espera que siga creciendo en el futuro. Esto ha incentivado a desarrollar diversos campos de investigación para mejorar su implementación en la red eléctrica, y en particular se han desarrollado líneas de investigación enfocadas en elaborar pronósticos de energía solar. Los pronósticos de energía solar se utilizan en la operativa de la red eléctrica para lograr un correcto uso de esta energía, combinándolo con el uso de las demás fuentes del sistema de generación eléctrica. En regiones de incidencia de nubosidad relativamente frecuente (como la nuestra), la generación de energía fotovoltaica es muy fluctuante en el tiempo y a su vez en nuestro país es “auto – despachable”. La energía auto-despachable o auto – gestionable no es almacenable y es inyectada directamente en la red eléctrica. Esto implica que toda la generación obtenida de esta fuente ingresa directamente al sistema eléctrico. Estos elementos crean nuevos desafío en su utilización, en comparación con la producción de energía a partir de fuentes convencionales, donde la carga eléctrica despachable es ajustada por los operadores para asegurar la continuidad y estabilidad de la red eléctrica. La radiación solar varía a lo largo de su trayecto desde el tope de la atmósfera hacia la superficie terrestre por la presencia de los componentes que se encuentran en suspensión en nuestra atmósfera. Los principales constituyentes atmosféricos que inciden en la radiación solar son la nubosidad, el vapor de agua, y los aerosoles; estos determinan la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie.

En la última década Uruguay ha desarrollado lineamientos políticos para

la introducción de energía de fuentes renovables por lo que la matriz energética ha cambiado substancialmente. El mayor porcentaje de esta incorporación se debe a la 1470 MW instalados de energía eólica que representan 34 % del total instalado en el país. La incorporación de energía solar en parques fotovoltaicos instalados es de 240 MW, un 5.5 % de la capacidad total instalada en el país. Las herramientas de pronósticos cumplen un rol fundamental y tienen como objetivo ayudar en la toma de decisiones en la elaboración de: (1) la programación semanal de la operación de las diferentes fuentes de generación y de intercambios con países vecinos, (2) elaboración de la programación diaria, programa de potencias horarias para el suministro de la demanda eléctrica, (3) determinación de los excedentes exportables (mercado de energía), y (4) análisis de los mantenimientos programados de unidades de generación y redes de transmisión [Ribeiro, M., 2006]. El pronóstico es importante en diferentes escalas de tiempo, desde pocos minutos hasta escala de años (en el caso de la planificación a largo plazo). Kostylev et al. 2011, definen tres horizontes de pronósticos (intra-horario, intra-diario y 'día hacia adelante') de acuerdo a los diferentes usos de los operadores de sistema eléctrico (eventos de rampa, variabilidad relacionada a la operación, programación de la transmisión, mercados de energía, planificación). Los pronósticos de "día hacia adelante" son útiles para la planificación y programación de las unidades térmicas de arranque lento. La programación de la operación se ajusta a medida que se acerca al tiempo real [Cheung, W., 2015]. Las predicciones de 'día hacia adelante' son de particular interés en los mercados de intercambio de energía y juegan un rol importante en muchos países [Perez, R., 2013]. Los pronósticos de radiación solar basados en modelos numéricos de atmósfera permiten resolver las escalas de tiempo 'intra-horario' y de 'día hacia adelante'; estas son las escalas de interés en este trabajo.

La experiencia en Uruguay con los pronósticos de energía eólica basados en modelos numéricos de atmósfera ha demostrado su gran utilidad en los despachos de energía y en la integración de la energía provenientes de fuentes renovables en el sistema eléctrico. Los pronósticos de energía eólica están basados en el modelo regional de atmósfera Weather Research and Forecasting (WRF). Estos pronósticos son calibrados con datos de campo de mediciones de viento a niveles de 100m sobre la superficie del suelo, así como datos de potencia eléctrica efectivamente generada por los parques eólicos operativos en el país.

Este trabajo previo motiva a evaluar el uso el mismo modelo numérico en pronósticos de radiación solar. A los efectos de evaluar y diagnosticar aspectos relevantes de las simulaciones numéricas, así como de calibrar post procesamientos empíricos de las mismas, se cuentan con los datos de una red piranómetros pertenecientes al Laboratorio de Energía Solar (LES) y a la Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE). Esta red de medidas se encuentra distribuida en todo el territorio uruguayo, y las observaciones obtenidas a través de la misma poseen un control de calidad realizado por el LES [Alonso, R., 2017].

El diagnóstico de los errores de las predicciones numéricas incluye un estudio de la nubosidad simulada, la cual será comprada con el análisis de observaciones de satélites del Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Los datos MODIS incluyen diferentes productos obtenidos a partir del análisis de mediciones de la emisión infrarroja y la reflectancia solar de las nubes, mediante algoritmos que permiten determinar características físicas y radiativas de las mismas.

A continuación referiremos trabajos previos que han evaluado el uso diferentes modelos numéricos de meso-escala para el pronóstico de irradiación solar en superficie en diferentes regiones del mundo. Deseamos destacar que la calidad de los pronósticos está afectada por los errores que se cometan en la simulación de la nubosidad. Esto implica que las propiedades estadísticas de estos errores estarán afectadas por la incidencia climatológica de los distintos tipos de nubes, la cual depende de cada región. En consecuencia se hacen necesarios estudios específicos para nuestra región, como el del presente trabajo.

En la mayoría de la bibliografía que citaremos a continuación se utilizan como estimadores del error el error cuadrático medio (RMSD) y el error medio absoluto (MAE). Se presentan los resultados encontrados en otras literaturas y por diversos autores, con respecto a los pronósticos de irradiación en superficie. La magnitud de interés más directo es la irradiación solar global en el plano horizontal (que incluye las componentes directa y difusa), que de ahora en más designaremos como GHI. En [Heinemann, D., 2006] utilizaron el modelo de meso-escala MM5 desarrollado por Pensilvania State University / National Center for Atmospheric Research (PSU/NCAR). Es un modelo de área limitada el cual puede ser configurado como hidrostático o no-hidrostático [Grell et al., 1995], y el cual fue diseñado para resolver circulaciones de escala regional. Los autores probaron 2 conjuntos de datos como condiciones iniciales

y de borde (CI+B) para realizar las predicciones del modelo MM5. Una de las inicializaciones corresponden a las del modelo global europeo del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) de resolución espacial aproximada de 60 km y una resolución temporal de 6 horas. El otro conjunto de datos utilizado de CI+B para realizar las simulaciones corresponden al modelo de macro escala LM-DWD del German Weather Service con una resolución espacial de 60 km y temporal de 3 horas. Los autores definen tres escenarios de nubosidad, para los cuales se diagnostican los errores que obtuvieron en cada caso. Estos casos son: cielos claros, cielos parcialmente nublados y cielos totalmente nublados. En el casos de cielos claros, los resultados que encontraron muestra que prácticamente no se tiene ninguna diferencia al inicializar el pronóstico con datos de CI+B que provienen de diferentes fuentes. Por otro lado, en el casos asociados a cielos cubiertos por nubosidad, las predicciones inicializadas con datos del modelo global LM-DWD sobrestiman la GHI calculada por pronosticar una gran mayor cantidad de cielos claros y mientras que los pronóstico inicializado con datos del modelo ECMWF reducen estos errores aunque de todas maneras sobrestima la GHI observada. Los autores realizaron una evaluación del modelo para un período de 40 días del verano 2003, en este caso calcularon los RMSD para las predicciones, los resultados obtenidos fueron de 50 % para los pronósticos MM5 inicializados con el modelo global ECMWF y de 54 % en el caso del MM5 inicializado con el modelo alemán LM-DWD. De manera de reducir los errores de pronósticos de GHI, los autores aplicaron una corrección estadística basada en la técnica MOS a la salida de los pronósticos del MM5 inicializados con el modelo global ECMWF. La técnica MOS es una herramienta utilizada para el post-procesamiento de las salidas del modelo numérico y es aplicada para realizar pronósticos en sitios específicos. Consiste en relacionar la observación de una variable meteorológica en el sitio de interés con alguna o algunas variables del modelo numérico (predictores). Esta relación, entre las variables y los predictores es estadístico. El MOS corrige errores sistemáticos del modelo, como son los "bias", de manera que toma en cuenta algunos efectos locales e incorpora características climáticas del sitio. Este tipo de corrección no puede predecir eventos de meso-escala ni corregir ciertas deficiencias del modelo que se deben a la física del modelo y sus parametrizaciones. Tampoco puede tomar en cuenta todos los efectos locales y los eventos climáticos extremos.

Jensenius, J. S. (1981) fue el primero en presentar una corrección utilizando

la técnica de MOS para pronósticos de GHI. Realizó una corrección para las primeras 48 horas de pronóstico utilizando una regresión lineal para un máximo de 12 variables que explicaran por lo menos hasta el 0.1% del total de la varianza pronosticada. Como predictores principales utilizó humedad relativa media, velocidad vertical en 750 hPa, vorticidad relativa en 850 hPa, velocidad de viento en 200 hPa, punto de rocío en 700 hPa, etc.

Lara-Fanego, V., 2012, estudiaron la incertidumbre del modelo de meso-escala WRF para el pronóstico de GHI en 4 sitios de Andalucía, en el sur de España. Estas predicciones utilizando datos del modelo global GFS con resolución espacial de 1° y temporal de 3 horas como condiciones de iniciales y de borde. El modelo WRF fue configurado con 3 dominios anidados, donde el primer dominio tiene una resolución espacial de 27 km, el segundo de 9 km y el tercero de 3 km. Se analizaron los años 2007 y 2008 y diferenciaron el comportamiento estacional. El análisis de la GHI se realizó en base diaria. Utilizaron el índice claridad diario k_t , esta índice es la relación entre la radiación en superficie respecto la radiación en el tope de la atmósfera integradas a lo largo del día, y clasificaron las condiciones de cielo en tres categorías: cielo claro, parcialmente nublado, totalmente nublado. El criterio de clasificación indica condiciones de cielo claro si k_t es mayor a 0.65, valores entre 0.65 y 0.40 indican condiciones parcialmente nublados y menores a 0.40 condiciones totalmente nubosas. Los resultados encontrados por los autores muestran que la GHI calculada por el WRF mejora a la persistencia. En esta región del planeta, durante el veranos que es una estación mas seca se tiene valores de RMSD de 18%, valores más bajos en comparación al resto de las estaciones del año que rondan en el 32% y son estaciones más lluviosas. Los resultados para las primeras 24 horas encuentran un MBE para condiciones de cielo claro es de 2% y 18% en condiciones de cielo nuboso. Los RMSD van desde 10% en cielo claro hasta 50% en condiciones de cielo nuboso. Esto refleja ciertas limitaciones del WRF para pronosticar apropiadamente condiciones de cielo nuboso, el modelo tiende a sobrestimar GHI y depende fuertemente de las condiciones del cielo.

Otros autores como Pérez,R.(2013) evaluaron una serie de diferentes modelos numéricos de atmósfera en diferentes sitios de Estados Unidos, Canada y Europa. Entre ellos evaluaron el modelo europeo ECMWF y simulaciones del WRF derivado de los datos del GFS. Estos autores obtuvieron 2 observaciones generales, (1) los modelos WRF que son derivados del GFS tienden a

cometer mayor errores que el modelo global ECMWF, y (2) el promedio de varias salidas de modelos tienden a dar mejores resultados de los pronósticos de GHI.

Por otra parte, Díaz, J. P. (2015) estudió el efecto de distintas parametrizaciones de nubes del WRF y su efecto en la nubosidad, precipitación y radiación sobre todo el continente africano. Estas salidas del WRF fueron comparadas con observaciones de datos de los satélites que provienen de la base de datos del Cloud Feedback Model Intercomparison Project (CFMIP), dentro de este banco de datos se encuentran imágenes de los satélites MODIS. Esta base no solo permite la comparación de la fracción nubosa, sino también la cantidad de nubosidad de diferentes tipos de nubes basado en el espesor óptico y la presión en el tope de las nubes. Evaluaron 9 simulaciones del WRF con diferentes parametrizaciones y configuraciones para el período 2002-2006. En general, las simulaciones muestran resultados similares, en todos los casos subestiman la nubosidad en toda la región geográfica que estudiaron. La mayor diferencia en las simulaciones aparece sobre las regiones subtropicales que son dominadas por nubes de la capa límite marítima, mayormente estas nubes que existen fuera de la costa de Namibia. Dentro de esta área, las simulaciones muestran nubes muy espesas y poca nubosidad con bajo espesor óptico. Como resultado neto se tiene una subestimación de la nubosidad en capas bajas. También se encuentra que la representación de la transición de nubes estratocumulus a pequeños cúmulus (shallow cumulus) lejos de la costa no es muy realista.

Hasta el momento, en Uruguay no existen estudios de este tipo, por lo que aún no se tienen estudios detallados sobre el uso de modelos numéricos de atmósfera para pronósticos de radiación solar, si bien se puede encontrar algunos avances preliminares en esta línea de trabajo, documentados en el congreso de IEEE [Porrini, C. 2016].

El presente trabajo estudiará en detalle las predicciones de radiación solar en superficie en diversos puntos del país realizadas mediante una configuración específica del modelo WRF. El estudio se centrará en la temporada de verano y en las horas centrales del día, entre las 10:00 y las 17:00, hora local. Además de evaluar la calidad de las predicciones, el trabajo propondrá hipótesis sobre aspectos específicos de las simulaciones que se asocian especialmente con los errores obtenidos y convendrá perfeccionar en trabajos posteriores. Adicionalmente, se propondrá un post procesamiento empírico de los resultados de las simulaciones, también llamado Model Output Statistic (MOS), orien-

tado a disminuir los errores sistemáticos y discriminar intervalos de confianza relacionados con condiciones pronosticadas propias de cada día.

Más en detalle, los objetivos específicos del trabajo son:

- Instalación y compilación del modelo WRF en el cluster de Facultad de Ingeniería.
- Simulaciones de los pronósticos del WRF con condiciones iniciales del GFS de las 00 UTC con horizonte de pronóstico de 48 horas.
- Comparación de la radiación solar del WRF con datos de superficie: construcción de histogramas de errores, cálculo de MAE, BIAS y RMDSD.
- Contrucción de climatología de nubes de las imágenes MODIS.
- Comparación entre las climatologías nubes del WRF y MODIS.
- Diagnóstico de errores: casos bien y mal pronosticados.
- Construcción de MOS y análisis de los errores los nuevos resultados.

Como la experiencia de predicciones operativas en Uruguay muestra deficiencias que se repiten en diferentes configuraciones de resolución y uso de parametrizaciones en el modelo WRF, el trabajo se centrará en el estudio detallado de una configuración particular, definida mas adelante.

En la sección dos de este trabajo se indica el marco teórico. En la sección tres se describen los datos utilizados y la configuración de las simulaciones realizadas. En la sección 4 se detallan aspectos metodológicos, y en la seccionan cinco se muestran los resultados. La sección 6 presenta las conclusiones y recomendaciones de trabajo futuro.

Capítulo 2

Radiación solar y modelización numérica de la atmósfera

En este capítulo se presentan los conceptos básicos de radiación y del cálculo de las medidas de la incertidumbre para evaluar el error del modelo que fueron utilizados en este trabajo. El recurso solar es un tipo de energía muy fluctuante en el tiempo debido a los cambios en las condiciones atmosféricas, por ejemplo, depende de cambios en el contenido de vapor de agua, aerosoles y principalmente de la nubosidad. Estos componentes, cuya concentración en la atmósfera es muy variable, interaccionan con la radiación solar en su recorrido hacia superficie. Las bases para una discusión más exhaustiva de los procesos se fundamenta en Liou, K. N. (2002).

2.1. Índice de claridad horario

El índice de claridad es la relación entre la irradiación solar en la superficie horaria I y la irradiación solar en el tope de la atmósfera I_o , dada según la ecuación,

$$k_t = \frac{I}{I_o} \quad (2.1)$$

este índice es un valor adimensionado, y es una estimación de las condiciones de nubosidad y turbidez atmosférica. Para cielos claros, sin nubosidad este valor se encuentra entre 0,65 y 0,85. En el caso con mucha nubosidad este valor se encuentra por debajo de 0,4. Es utilizado en este trabajo para clasificar la atmósfera según condiciones de cielo claro, cielo parcialmente nublado y cielos

totalmente cubiertos según se describe más adelante.

2.2. Medidas de incertidumbre para evaluar errores del modelo

Los indicadores del desempeño de los modelos utilizado en la mayoría de las literaturas y por diferentes autores de otros trabajos relacionados son la media del error absoluto (MAE), la raíz del error cuadrático medio (RMSD) y la medio del error (BIAS), estos se definen a continuación.

Media del Error (BIAS): es el promedio de la diferencia entre lo pronosticado y lo observado, y por lo tanto expresa el sesgo. El BIAS no expresa información acerca de la magnitud usual de los errores individuales. Si nos dice si el modelo subestima o sobrestima la magnitud de interés que se esta evaluando.

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n X_{modelo} - X_{observado} \quad (2.2)$$

Donde X_{modelo} y $X_{observado}$ es la magnitud de interés del modelo y observada, respectivamente y n la cantidad de casos que se están evaluando.

Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSD por sus siglas en inglés, root mean square deviation): es la raíz cuadrada del promedio de la diferencia al cuadrado entre el pronóstico y la observación. Esta medida es más sensible a los errores grandes o extremos. Con la raíz se tiene las mismas dimensiones que los pronósticos y las observaciones y se utiliza en muchas literaturas como medida típica del error.

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (X_{modelo} - X_{observado})^2} \quad (2.3)$$

Media del Error Absoluto (MAE por sus siglas en inglés): es el promedio del valor absoluto de las diferencias entre el valor pronosticado y el observado. Es una medida típica de los errores del pronostico y es frecuentemente usado como una medida de performance de un modelo. Si un MAE es igual a cero el pronóstico es perfecto y aumenta a valores positivos a medida que el pronóstico se desvía de la observación.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (|X_{modelo} - X_{observado}|) \quad (2.4)$$

2.3. Modelos numéricos de predicción del tiempo atmosférico

Los modelos numéricos de predicción del tiempo atmosférico (mejor conocido por su sigla en inglés, NWP) son capaces de resolver las ecuaciones de la dinámica de los fluidos y termodinámicas que gobiernan el comportamiento de la atmósfera. Los modelos permiten calcular la evolución de las diferentes variables meteorológicas como por ejemplo lo son: viento, radiación, temperatura, etc. Se denominan "modelos globales" si estos cubren la Tierra entera o "modelos regionales" si solamente cubren un región particular. Los modelos de escala global en general son utilizados para proveer de condiciones iniciales y de borde a los modelos regionales, son de menor resolución espacial en general entre 100 km y 15 km y alcanzan hasta un horizonte temporal de 15 días. De todas maneras pueden ser utilizados para estudios y análisis en sitios particulares. Los modelos regionales en general tienen una resolución espacial mayor y su horizonte temporal es de unos pocos días debido a sus altos costos computacionales. Cualquiera sea el tipo de modelos estos son utilizados en forma operacional para la predicción del tiempo en escalas de tiempo desde unas pocas horas a varios días.

Los modelos numéricos utilizan información meteorológica como datos iniciales para generar las simulaciones para la predicción del tiempo. Esta información es recolectada según estándares de la Organización Mundial Meteorológica (OMM) y proviene de diferentes fuentes como lo son barcos, aviones, radio-sondeos, estaciones meteorológicas en superficie, boyas marinas e información de satélite. Se construye con esta información un análisis de la situación atmosférica inicial y este proceso se denomina asimilación de datos. El pronóstico dependerá de la calidad de los datos observados que son asimilados en este proceso.

En nuestro caso interesa la predicción de la radiación solar a corto y mediano plazo, esto abarcaría desde unas pocas horas hasta unos pocos días. En el caso de la predicción de irradiación, los pronósticos basados en modelos numéricos son inherentemente probabilísticos ya que los modelos no pueden

predecir la posición exacta y extensión de nubes individuales o campos de nubes que afectan el recurso solar en un lugar determinado. Los procesos de radiación son una de las partes más complejas y de altos costos computacionales de los modelos numéricos de atmósfera. Estos procesos son fundamentales porque conectan, directamente e indirectamente, todos los procesos físicos con la dinámica del modelo, y regulan en promedio los intercambios y transformaciones de energía entre la superficie y la atmósfera. Los modelos consideran como única fuente de energía de onda corta al Sol y consideran los procesos de absorción, reflexión y scattering en la atmósfera y superficie. En consecuencia, la radiación simulada está relacionada a la predicción de la distribución de vapor de agua y nubes, como también del dióxido de carbono y ozono.

En este estudio se eligió trabajar con el modelo regional de atmósfera Weather and Research Forecasting (WRF). La elección de este modelo se debe a la experiencia previa y el conocimiento alcanzado en el desarrollo de pronósticos de energía eólica. El WRF es un modelo numérico mesoescala desarrollado para realizar investigaciones científicas en el campo de las ciencias de la atmósfera y para cubrir necesidades de pronósticos operativos en diferentes aplicaciones. El modelo fue desarrollado por National Center for Atmospheric Research (NCAR) y con apoyo de otras instituciones como lo son la National Centers for Environmental Prediction (NCEP), Forecast System Laboratory (FSL), Air Force Weather Agency (AFWA), Naval Research Laboratory (NLR), University of Oklahoma y la Federal Aviation Administration (FAA). Es un modelo de dominio público y código libre lo que permite que exista una gran comunidad de usuarios quienes aportan al continuo desarrollo del mismo. Las simulaciones del WRF fueron realizadas en el cluster de Facultad de Ingeniería y utiliza como datos iniciales y de contorno las salidas del modelo global Global Forecast System (GFS).

2.4. Descripción Modelos Global GFS

El modelo GFS es un modelo numérico global el cual cubre toda la Tierra y que fue desarrollado por la National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Sus productos son actualizados cada 6 horas y ofrecen docenas de variables de atmósfera. Estos datos se encuentran públicamente accesible a través de la National Ocean and Atmospheric Administration (NOAA). La resolución horizontal de este modelo alcanza aproximadamente hasta los 27 km

en nuestras latitudes y su resolución temporal es de 3 horas y predice hasta unos 16 días. El GFS es un modelo acomplado compuesto por 4 modelos separados: un modelo de atmósfera, un modelo de océano, modelo de superficie/tierra y un modelo de hielo marino. Sus salidas son utilizadas como las condiciones de borde e iniciales del modelo regional WRF.

2.5. Descripción Modelos Regional WRF

El modelo se componen de 2 módulos para resolver las ecuaciones que gobiernan la dinámica atmosférica. Uno es el WRF-ARW (Advanced Research WRF) y es el que se utiliza en este trabajo, el otro es el WRF-NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) el cual es una variante del modelo ETA y del NMM del NCEP. Este modelo fue desarrollado tanto para investigación como para su uso operativo. La descripción completa del modelo se encuentra en [Skamarock, W. C.,2005]. Se describen las principales características de este modelo:

- Ecuaciones: flujo compresible, ecuaciones de Euler no - hidrostático. Escritas en forma de flujo conservativo siguiendo la filosofía de Ooyama K. V.(1990)
- Coordenadas verticales: coordenadas que siguen el terreno, descritas por Laprise R. (1992). Son formuladas a partir de la presión hidrostática. Permiten el estiramiento vertical de la columna. El tope del modelo es una superficie de presión constante.
- Grilla horizontal: Arakawa-C
- Tiempo de integración: utiliza los esquemas de Runge - Kutta de orden 2 y 3 con pasos de tiempos más pequeños para los ondas acústicas y de gravedad.
- Condiciones iniciales: datos reales tridimensionales.
- Condiciones de borde: periódicas, abiertas, simétricas.
- Rotación terrestre: términos de Coriolis completamente incluidos.
- Anidado: en una dirección, en dos direcciones, anidados móviles.
- Nudging (asimilación de datos): permite asimilar análisis y observaciones.

2.6. Parametraciones físicas

En el caso de los modelos, la resolución espacial se ve limitada por la capacidad computacional que se puede emplear. Por ejemplo, en los modelos globales de atmósfera su resolución espacial es de cientos de kilómetros. Por otro lado, existen procesos físicos que tienen escalas espaciales bastante menores y que tienen un efecto sobre la circulación atmosférica de gran escala. Como sucede en el caso de la microfísica de nubes, la cual resuelve los procesos responsables de la formación de gotas de agua y cristales de hielo en las nubes. Las nubes tienen un efecto importante sobre el clima y estos procesos se deben representar de alguna manera en el modelo de baja resolución, la manera acoplar esto se hace es de forma aproximada y los algoritmos que se encargan de esto se denominan "parametrizaciones". Estos son métodos semi empíricos basados en observaciones realizadas en condiciones particulares y que podrían no ser apropiadas para otras. Dentro del modelo, estas parametrizaciones se dividen en cinco módulos.

2.7. Microfísica

Resuelve los procesos de nubes, vapor de agua y precipitación. Proveen los intercambios de calor en la atmósfera y las tendencias de humedad. Estos esquemas van desde versiones simplificados hasta los más sofisticados que consideran fases mezcladas.

2.8. Cumulus

Estos esquemas son responsables de los efectos de las nubes convectivas y/o poco profundas que ocurren en la escala de la sub-grilla. Representan los flujos verticales debido a corrientes ascendentes y descendentes que no son resueltas y compensan el movimiento fuera de las nubes. Operan solo en columnas individuales donde el esquema se activa y proporcionan el calentamiento vertical y los perfiles de humedad. Algunos de estos esquemas proporcionan los campos de tendencias nubes y precipitaciones dentro de la columna. Todos los esquemas proporcionan la componente convectiva que causa la precipitación en superficie. Las parametrizaciones de cúmulos son teóricamente válidas solo para tamaños de grilla mayores a 10 km, donde son necesarios para liberar ade-

cuadramente el calor latente en una escala de tiempo realista en las columnas convectivas. Los Δt convectivos pueden ser resueltos para escalas menores a 5 km, por lo que en estos casos no deben ser activada la parametrizaciones de cúmulus.

2.9. Física de la superficie

Utiliza modelos de superficie multicapas, estos pueden ser un simple modelo térmico hasta un modelo complejo que incluye vegetación, humedad de suelos, cobertura de nieve y hielo marino. Los modelos de superficie terrestre (LSM) utilizan como información el forzante radiativo que se obtiene del esquema de radiación y el forzante de la precipitación que proviene de los esquemas de microfísica y cúmulus, además utilizan información interna del esquema sobre las variables de estado del suelo y las propiedades de la superficie, para proporcionar los flujos de calor y humedad sobre los puntos de grilla en tierra y en hielo marino. Estos flujos proporcionan las condiciones laterales e inferiores de los transportes verticales que son realizados en la PBL.

2.10. Capa Límite Planetaria

La capa límite planetaria (PBL, por sus siglas en inglés) es responsable de los flujos verticales, en la escala de la sub-grilla, que es transportada por los Δt en toda la columna atmosférica del modelo, y no solo dentro de la capa límite. Por lo tanto, cuando el esquema de la PBL es activado, el proceso de la difusión vertical que se resuelve explícitamente se desactiva con la suposición de que el propio esquema se encargará de resolver este proceso. Los esquemas de PBL determinan los flujos dentro de una PBL bien mezclada y una PBL estable, y proporcionan así los perfiles de las tendencias de temperatura, humedad (incluyendo nubes) y de momento horizontal en toda la columna atmosférica. Los esquemas son unidimensionales, y asumen que hay una clara separación de escalas entre los Δt dentro de la sub-grilla y los resueltos.

2.11. Esquemas de Radiación

Los esquemas de radiación proporcionan el calentamiento atmosférico debido a los flujos radiativos de la radiación de onda corta y onda larga. La radiación de onda larga incluye radiación infrarroja absorbida y emitida por gases y superficies. El flujo de radiación de onda larga desde el suelo hacia arriba está determinado por la emisividad superficial que a su vez depende del tipo de uso de la tierra como de la temperatura del suelo (piel). La radiación de onda corta incluye las longitudes de onda visibles y restantes que componen el espectro solar. Por lo tanto, la única fuente es el Sol, pero los procesos incluyen la absorción, la reflexión y la dispersión en la atmósfera y en superficie. Para la radiación de onda corta, el flujo ascendente es el reflejado debido al albedo superficial. Dentro de la atmósfera, la radiación responde a las distribuciones de nubes y vapor de agua pronosticadas por el modelo, así como a las concentraciones de dióxido de carbono, ozono y (opcionalmente) gases traza. Hasta el momento, todos los esquemas de radiación en el WRF son esquemas de columna (unidimensionales), por lo que cada columna se trata de manera independiente, y los flujos corresponden a aquellos de la teoría de planos horizontales infinitos, que son una buena aproximación si el espesor vertical de las capas del modelo es mucho menor que la longitud de la grilla horizontal. Esta suposición se vuelve menos precisa a alta resolución horizontal.

Capítulo 3

Datos utilizados

En esta sección se presenta la metodología empleada para los cálculos y los análisis realizados y se presentan el conjunto de datos que fueron utilizados en este estudio.

3.1. Clima de Uruguay

El área de estudio se sitúa en la latitudes de 30°S a 35°S y entre los meridianos 53°W y 58°W . En el este del país se encuentra el límite del Océano Atlántico y sobre el Sur su límite es el Río de la Plata. Esta región es particular debido a ser una zona de transición dentro de las latitudes medias, la transición es de clima extra-tropical a tropical con un alto pasaje de frentes a lo largo de todo el año. La mayor cantidad de estos frentes ocurren durante los meses de invierno [(tesis natalia gil o reboita)]. La precipitaciones en Uruguay son irregulares en todo el año, no existe una estación seca o lluviosa, y también es irregular año a año. En promedio la precipitación acumulada anual es 1400 mm aproximadamente, siendo mayor al norte del país y decreciendo hacia el sur, una región donde la nubosidad es muy variante. . La región no cuenta con relieves orográficos muy importantes siendo las zonas de mayor altura entre 250 y 350 metros y en promedio de 100 a 150 metros sobre el nivel del mar.

3.2. Modelo Operativo

El objetivo de este estudio es presentar las bases para la construcción de un modelo operativo de pronósticos de energía solar de las plantas fotovoltaicas

instaladas en Uruguay. Un modelo operativo, además de conocer la incertidumbre de los errores, debe contemplar los costos computacionales que es inherente de la modelización numérica, es decir el tiempo de las simulaciones. La modelización numérica de la atmósfera es característica por sus elevados costos computacionales, puede llevar desde unos pocos minutos a unas cuantas horas de cálculos dependiendo de los recursos computacionales disponibles y las configuraciones de la resolución espacial y dimensiones del área geográfica que es simulada por el modelo regional. En la figura 3.1, se muestra un diagrama con las etapas del modelo operativo que se plantea construir a futuro, en base a los resultados del análisis de errores de la GHI que se encontraron en este trabajo. Para cada una de estas etapas se dará una estimación de las horas que insumen cada proceso desde que es inicializado el modelo global hasta la primer hora útil de pronóstico. El modelo operativo está compuesto en 3 etapas principales estas son: (1) descarga de datos del GFS, (2) ejecución del WRF en el cluster y (3) post procesamiento de las salidas del WRF utilizando la técnica MOS. Se explican a continuación cada uno de estos pasos.

3.2.1. Descarga datos de GFS

Los datos del modelo global GFS son actualizados cada 6 horas y se encuentran disponibles cuatro veces por día para las inicializaciones de las 00, 06, 12 y 18 GMT. Estos datos tienen un horizonte de pronóstico hasta 15 días y son de una resolución temporal de 3 horas. Se encuentran disponibles para todo público en la web de la NOAA <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>. Desde que el modelo global es inicializado con datos observados hasta que los pronósticos se encuentran disponibles en la web para su descarga, transcurren un tiempo aproximado de 3 a 4 horas. La duración de la descarga de estos datos dependen de la resolución espacial y el horizonte de pronóstico que se quiera utilizar para inicializar las simulaciones del modelo regional. La resolución espacial de los datos es de 1° , 0.5° y 0.25° . A tener en cuenta, que al ser datos del modelo global los archivos que sea descargar ocupan un volumen considerable y dependiendo del ancho de banda utilizado para la descarga esta puede llevar de varios minutos a unas 2 horas aproximadamente.

3.2.2. Ejecución de las simulaciones del WRF en cluster

Un modelo operativo requiere de una máquina de cómputo que pueda cumplir con la demanda de la operación. Para esto, en general se utilizan cluster de cómputo. El WRF permite procesamiento de cálculos en paralelo lo que permite utilizar varios procesadores de un cluster para mejorar y disminuir los tiempos de simulaciones. Depende de: la resolución temporal del modelo, el dominio elegido, la máquina utilizada y el número de procesadores utilizados; los costos computacionales pueden variar considerablemente, desde unos minutos a unas cuantas horas.

3.2.3. MOS

La última etapa corresponde al post procesamiento de la salida de las simulaciones del WRF. Este proceso tiene un costo computacional elevado y es del orden de unos pocos minutos.

Contemplando estas tres etapas, desde que un pronóstico es inicializado hasta que encuentra disponible transcurren un mínimo del orden 4 horas y que pueden llegar aproximadamente a 7 - 8 horas. Este trabajo plantea analizar los errores del pronóstico para una de estas inicializaciones. En este caso se elige la inicialización de las 00 GMT (21 locales). Las simulaciones de 48 horas de pronóstico que se realizaron tuvieron un tiempo medio de cómputo del orden de 1 hora.

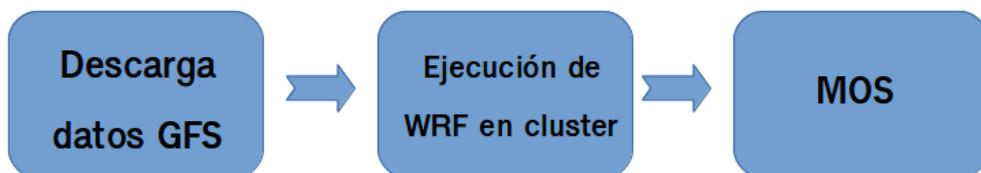


Figura 3.1: Diagrama de un modelo operativo de energía solar fotovoltaica

3.3. Descripción de los datos utilizados

Se trabajó con diferentes conjuntos de datos, estos son:

- (1) simulaciones del modelo regional WRF.
- (2) datos irradiación en superficie.

- (3) datos de los sensores MODIS.

3.4. Configuración de las simulaciones del WRF

Las simulaciones son inicialadas cada día a las 00 GMT para un horizonte temporal de 48 horas. Se utilizan condiciones iniciales y de borde del modelo global GFS. La resolución espacial de los datos del GFS son 1° y su resolución temporal de 6 horas. La versión del modelo WRF que se utilizó es la 3.5.1, ya que que se encontró en las versiones anteriores a ésta no se incorpora la ecuación del tiempo en los cálculos de radiación, produciendo así desfases de hasta 20 minutos en los pronósticos de irradiación horizontal. La salida de los datos de las simulaciones son promedios horarios y el paso temporal es de 60 segundos. Se utilizó el cluster de Facultad de Ingeniería para realizar las simulaciones.

3.4.1. Dominio de las simulaciones WRF

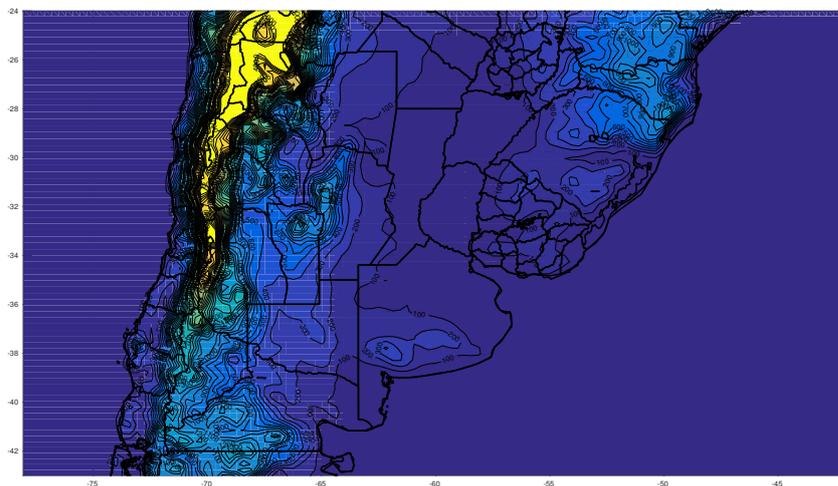


Figura 3.2: Dominio de las simulaciones del WRF. Resolución espacial 30 km

El dominio utilizado en las simulaciones se muestra en la figura 3.2. Se utilizó un dominio que cubre el desde el Océano Pacífico hasta el Océano Atlántico desde 78°W a 42°W y cubre las latitudes desde 24°S a 43°S . Este

dominio tiene una resolución espacial de 30 km. Son 117 puntos de grilla en la dirección oeste-este y 75 puntos de grilla en la dirección norte-sur.

3.4.2. Parametrizaciones WRF

Las simulaciones fueron configuradas utilizando las parametrizaciones que se encuentran en la tabla 3.1. El módulo de radiación es llamado cada 15 minutos. El modelo cuenta con 54 niveles verticales con una resolución mayor dentro en las capas más bajas de la atmósfera.

Módulo Físico	Parametrización	Referencia
Microfísica	WSM3	[Hong, Dudhia and Chen (2004, MWR)]
Parametrización Cumulus	Old Simplified Arakawa-Schubert	[Pan and Wu (1995), NMC Office Note 409]
Modelo de Superficie	Noah Land Surface Model	Niu, G., Yang, Z. (2011)
Capa Límite Planetaria	Yonsei University	Hong, Noh and Dudhia (2006, MWR)
Radiación onda corta	Dudhia	Dudhia (1989, JAS)
Radiación onda larga	Dudhia	Dudhia (1989, JAS)

Tabla 3.1: Parametrizaciones del modelo

El esquema de radiación solar de onda corta utilizado fue el MM5 (Dudhia, 1989) que tiene un simple integración del flujo solar descendente, que representa la dispersión del cielo claro, vapor de agua absorción y albedo y absorción de las nubes [Lacis, A. 1974]. Utiliza tablas de búsqueda para nubes de Stephens, G. (1978). Este es el esquema de radiación solar más simple del WRF.

La componente de flujo de radiación 'hacia abajo' es evaluada en el esquema tomando en cuenta las siguientes consideraciones: (1) los efectos de ángulo zenital, el cual influye en la componente 'hacia abajo' y en la longitud de trayectoria, (2) la nubosidad, que considera su propio albedo y absorción, (3) el cielo claro, donde se encuentra la absorción y scattering del vapor de agua. Por lo tanto, el flujo de radiación de onda corta hacia superficie se calcula como,

$$S_d(z) = \mu S_o - \int_z^{TOPE} (dS_{cs} + dS_{ca} + dS_a + dS_s) \quad (3.1)$$

Donde μ es el coseno del ángulo zenital, S_o es la constante solar, z es el nivel vertical y $TOPE$ último nivel vertical. Los subíndices cs y ca se refieren a la absorción y el scattering de nubes, mientras que a y s refieren a la transmisividad de absorción, y transmisividad de scattering. La fracción de nubosidad del modelo dentro de una caja de grilla puede tomar los valores 0 o 1 porque

se asume nubes estratiformes. El "back-scattering" (albedo) y la absorción son interpoladas bilinealmente de funciones tabuladas de μ y $\ln(w/\mu)$ (donde w es el contenido de vapor de agua integrada verticalmente dentro de la nube) derivada de resultados teóricos de Stephens [citar paper Stephens]. El efecto total de las capas de nubes por encima de un nivel z se encuentra desde la ecuación 4.1 como el porcentaje de flujo de radiación solar "hacia abajo." absorbido o reflejado. Por lo tanto, a una altura $z - \delta z$, un nuevo porcentaje es calculado mediante tablas permitiendo estimar el efecto total de la capa δz . Este porcentaje solo se aplica a $\mu S_o - \delta S$ (cielo claro), es decir, se remueve el efecto del cielo claro por arriba de ese nivel z . La absorción del vapor de agua en la atmósfera de cielo claro debida se calcula como función de contenido de vapor de agua. El scattering del cielo claro es uniforme y es propocional al coeficiente de masa de aire de la atmósfera.

3.5. Datos MODIS

Los datos del Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) se encuentran disponibles publicamente. En este trabajo se utilizaron los datos diarios MODIS nivel L2 de los veranos Enero y Febrero 2014 y de Diciembre a Febrero de los períodos, 2014-2015, 2015-2016 y 2016-2017. Los sensores MODIS se encuentran a bordo de 2 plataformas, los satélites de orbita polar Terra y Aqua. Estos sensores proporcionan observaciones realizadas en 36 bandas espectrales, las cuales fueron elegidas para permitir estudios avanzados de suelos, océanos y de las propiedades atmosféricas. La resolución espacial de estas bandas varía entre 250 y 1000 metros, las cuales son suficientes para caracterizar las propiedades de nubes de la meso escala. En esta trabajo se utilizaron los productos de nubosidad de las imágenes MODIS nivel L2 que alcanzan una resolución espacial aproximada de 1 y 5 km. Los productos de nubosidad de MODIS son parte de una extensa red de trabajo y cuentan con una calibración precisa y geolocalización de la radiancias medidas por los sensores. La probabilidad de la existencia de nubes se realiza a través de unas series de pruebas multiespectrales documentadas en (Ackerman et. al 1998). La presión en el tope de la nubes (cloud top pressure, CTP) y la cantidad efectiva de nubosidad son inferidas para cada punto de grilla nubosos a través del algoritmo descrito en detalle por Menzal et al. (2006). La fase termodinámica cerca del tope de la nube es inferida usando la temperatura de brillo infrarroja bi - espectral y la

temperatura de brillo en 11 micrometros (Ackerman et al 1990; Strabala et al 1994); Baum et al 2000). Este método permite diferenciar nubes de hielo, agua o de fase mixta a través de las propiedades radiativas. Una serie de pruebas son realizadas para descartar y eliminar píxeles que no son buenos candidatos para la ocurrencia de nubes.

De los productos de nubosidad, se eligieron para trabajar la CTP que es de una resolución espacial de 5 km y el espesor óptico de las nubes (cloud optical thicknes, COT) resolución espacial de 1 km aproximadamente. Los datos utilizados tienen una frecuencia diaria y nos concentramos en las horas diurnas del día. Para las horas de interés de este trabajo en el cual nos concentramos en las horas centrales del día, el sensor Aqua captura imágenes en nuestra región entre las 10.30 y las 12:00 GMT, mientras que el sensor Terra lo hace entre las 16.30 y las 18 GMT. Los datos son interpolados a la resolución de la grilla del modelo para realizar la comparación.

3.6. Datos en superficie

3.6.1. Datos Piranómetros LES

En el trabajo se utilizan datos que integran la Red de Medida Continua de Irradiancia Solar (RMCIS) del Laboratorio de Energía Solar (LES). El LES se encarga de medir sistemáticamente el recurso solar dentro del territorio nacional. Actualmente cuentan con mediciones en 9 sitios del territorio uruguayo, incluyendo el territorio antártico. El LES se encarga de generar datos de alta confiabilidad, para ello utiliza equipos de primera calidad como los KippZonen o incluso de calidad superior en alguna de sus estaciones. Las mediciones siguen los estándares propuestos por la radiométrica mundial (WRC, World Radiation Center). En cada sitio la medición se conforma por un piranómetro de Primera Clase o Estándar Secundario para mediciones primarias de GHI. Los piranómetros de Estándar Secundario es un equipo capaz de medir con una incerteza diaria menor al 2%, y puede ser utilizado como patrón nacional si se calibra cada 5 años contra la referencia de la radiométrica mundial en el WRC (incerteza menor a 0,3%). Una segunda estación de respaldo existe en cada sitio, se utilizan radiómetros Li-Cor salvo en Artigas, Tacuarembó y Treinta y Tres donde se utilizan sensores DeltaT SPN1 para la medida de respaldo que a su vez registra irradiación difusa. Esta red, debido al mantenimiento diario

que recibe y equipamiento instalado tiene asignada una incerteza del orden de 3 a 5 % [Alonso, R., 2017]. Las estaciones registran con intervalos de 1 minuto. Los registros estadísticos son existentes desde el año 2010. Las calibraciones de los equipos siguen las normas internacionales cada 2 años como lo indica lo Organización Mundial Meteorológica (OMM) y las recomendaciones del fabricante. La calibración sigue la norma ISO 9847:1992[2] utilizando un equipo Estándar Secundario, Kipp Zonen CMP22, de alta estabilidad el cual el LES mantiene calibrado cumpliendo los estándares de la radiométrica mundial.

3.6.2. Calidad de Datos

En este trabajo se han utilizado datos de 4 piranómetros ubicados en: Artigas, Salto, Las Brujas y Rocha. El control de la calidad de estos datos se describe en Alonso. R (2017). por el LES, por lo que cuentan con los criterios necesarios para trabajar con ellos.

Capítulo 4

Resultados y análisis

4.1. Evaluación del pronóstico de GHI del WRF en el territorio Uruguayo

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación del pronóstico de GHI simulada con el modelo regional de pronóstico de tiempo WRF para un horizonte de pronóstico de 48 horas. Cada uno de pronósticos son comparados con las observaciones de GHI de la red mediciones mencionada en la sección anterior. La evaluación del modelo WRF se realizó para los meses de verano del hemisferio sur, estos son los Enero, Febrero y Diciembre de los años 2014,2015,2016 y 2017. Las simulaciones de los pronósticos son inicializados cada día con las condiciones de borde e iniciales del modelo GFS de las 00 GMT (21 horas locales, UY). La salida de la GHI del modelo es un promedio horario y esta se compara con la GHI observada promedio de una hora.

La evaluación del modelo se presenta en la figura 4.1 mediante los indicadores de desempeño MAE, RMSD y BIAS. Estos estimadores representan medidas del error y son presentados en términos porcentuales relativos al ciclo diario observado para los meses de Diciembre-Enero-Febrero, como se suele utilizar en la mayoría de las literaturas. En el panel inferior de la figura 4.1 se presenta el rBIAS de la GHI del modelo en los sitios de observación en función del horizonte de pronóstico (hora del día). Los resultados del rBIAS del modelo muestran la existencia de un sesgo positivo para cada hora de pronóstico dentro de las primeras 48 horas, siendo este sesgo mayor en las horas centrales del día cuando la GHI observada en superficie es mayor. El sesgo positivo que se encontró se debe a una sobreestimación del recurso solar pronosticado

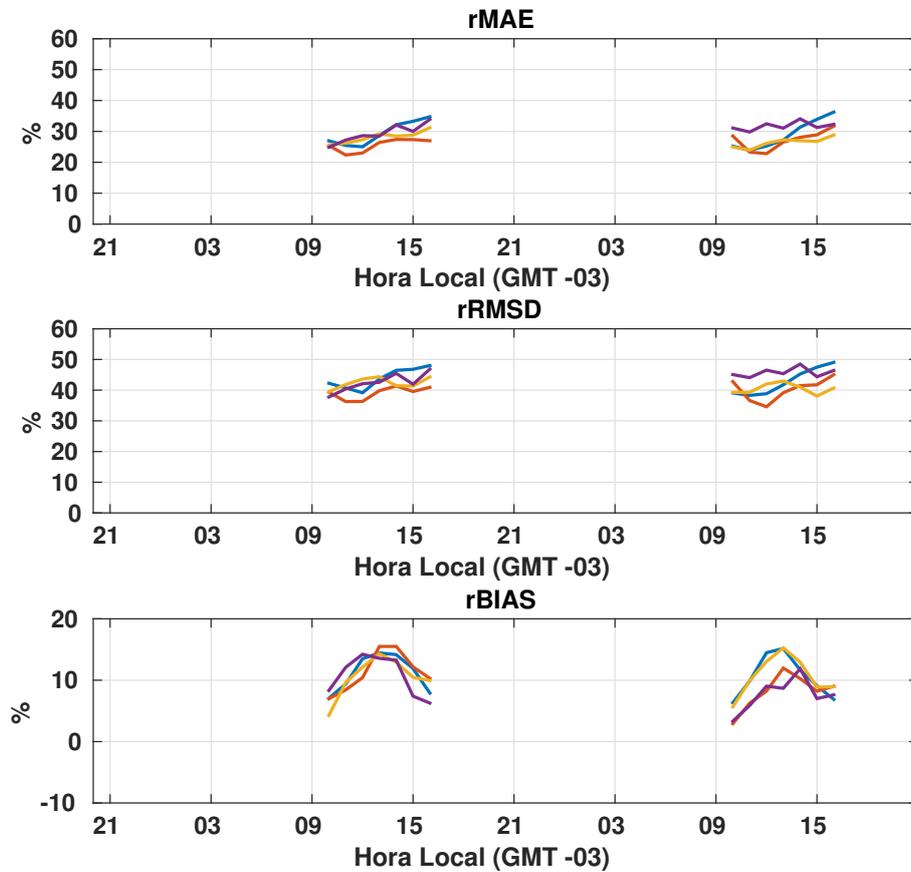


Figura 4.1: Medidas del error horarios para cada sitios. Panel superior rMAE. Panel medio: rRMSD. Panel inferior: rBIAS. Estos valores son relativos al ciclo diario de cada estación

en la superficie para todas las horas. Durante las horas centrales a lo largo del día, desde las 12 hasta las 14 horas locales, se obtuvo que los valores del rBIAS oscilan entre 12 y 15 % para cada una de las estaciones. En la tabla 1 se encuentran los resultados de rBIAS para cada una de las hora del pronóstico dentro de las primeras 24 horas de todas las estaciones.

En la figura 4.1 se graficaron también los valores de rMAE y rRMSD de todos los sitios. Estos muestran como los errores aumentan con el horizonte de pronóstico. Dentro de las horas centrales del día entre las 12 y las 14 horas locales, los valores de rMAE varían entre 23 y 32 % dependiendo de la estación, mientras que los resultados de rRMSD encontrados oscilan entre 36 y 46 %. En las tabla 4.1, 4.2 y 4.3 se encuentran tabulados los resultados de la figura 4.1 de todos los sitios para las horas diurnas de las primeras 24 horas del pronóstico.

El desempeño del modelo fue mejor en la estación de observación de Las Brujas (LB) donde los valores encontrados de rMAE y rRMSD son menores para el pronóstico de GHI.

Hora	9	10	11	12	13	14	15	16	17
AR	2.4	7.1	9.4	13.5	14.5	14.2	11.9	7.9	4.0
LB	1.3	7.0	8.4	10.4	15.5	15.5	12.2	10.3	9.8
RO	6.5	8.3	12.1	14.2	13.6	13.3	7.4	6.3	4.1
SA	0.5	4.3	9.6	12.1	14.3	12.9	10.5	9.9	13.0

Tabla 4.1: rBIAS por hora, primeras 24 horas

Hora	9	10	11	12	13	14	15	16	17
AR	30.2	26.9	25.4	25.0	28.7	32.1	33.3	34.7	38.9
LB	25.9	25.4	22.3	23.0	26.4	27.4	27.3	27.0	32.2
RO	28.0	24.9	27.2	28.6	28.4	32.1	30.0	33.9	37.4
SA	29.1	25.6	26.2	27.3	29.2	28.5	28.8	31.2	36.9

Tabla 4.2: rMAE por hora, primeras 24 horas

Hora	9	10	11	12	13	14	15	16	17
AR	44.4	42.2	40.7	39.2	43.6	46.5	46.7	48.0	52.8
LB	39.1	39.4	36.3	36.3	39.8	41.3	39.6	40.9	46.0
RO	41.5	37.8	40.4	42.1	42.6	45.5	41.9	46.9	51.0
SA	43.1	39.5	41.8	43.6	44.4	41.5	41.3	44.3	50.6

Tabla 4.3: rRMSD por hora, primeras 24 horas

Los resultados de estos gráficos (y sus valores en las respectivas tablas) se resumen haciendo énfasis en las horas centrales del día. Para esto se realizó el promedio, entre las 10 y las 15 horas locales, de los resultados obtenidos del BIAS, MAE y RMSD, obteniendo así los errores horarios promedios de las horas centrales del día. Los resultados son presentados en porcentaje relativos a la media del ciclo diario en estas horas. Se calcula también los errores en base diaria, es decir el error de la energía acumulada diaria que fue pronosticada, para los primeros 2 días de pronóstico. Los valores de BIAS, MAE y RMSD a nivel diario se presentan relativo a las medias de la energía acumulada de la GHI observada. En la figura 4.2 se comparan estos 2 resultados obtenidos de todas las estaciones de observación de GHI que se evalúan. Estos resultados muestran que los errores a nivel diario son menores que los de nivel horario

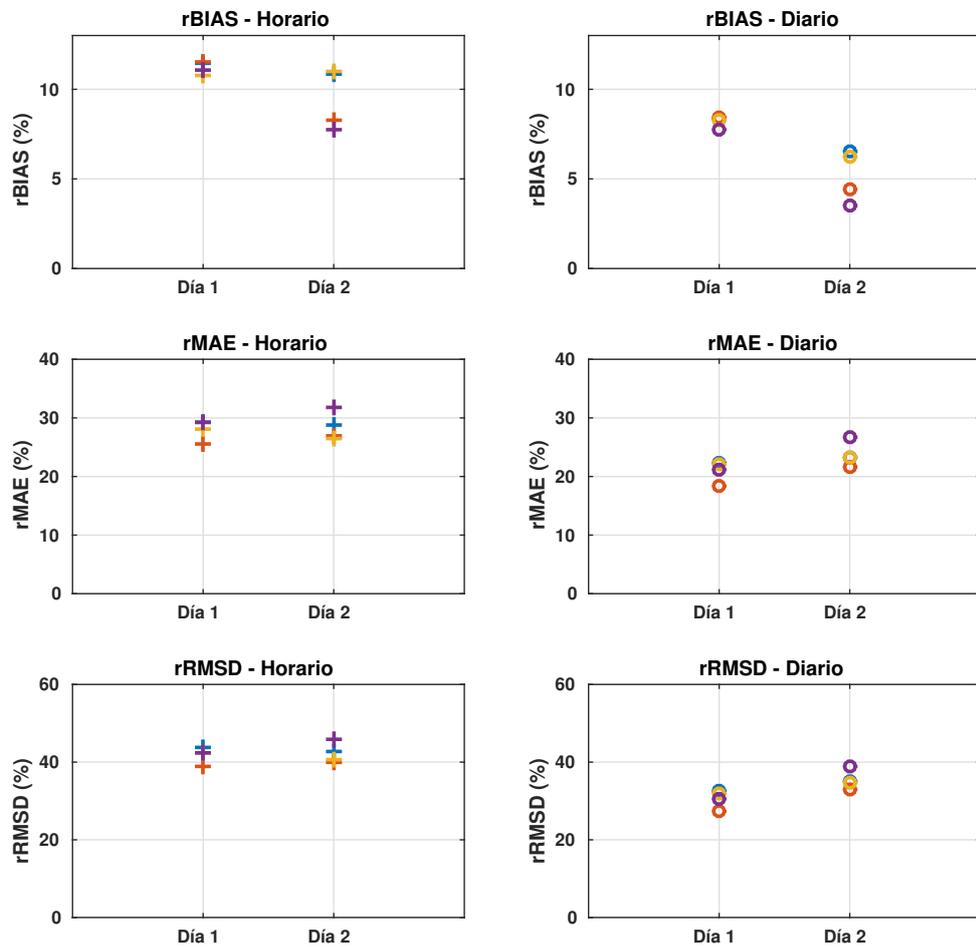


Figura 4.2: Errores horarios y diarios en todas las estaciones.

para cualquiera de las medidas de error. En las primeras 24 horas, los rMAE horarios obtenidos oscilan entre 26 y 29 % para las todas las estaciones, mientras que a nivel diario estos rMAE se encuentran entre un 18 y 22 %. Los errores cuadráticos medios (rRMSD) se encuentran entre 39 y 43 % para los datos horarios y a nivel diario se encuentran entre un 27 y 33 %. En las segundas 24 horas de pronóstico, los rMAE horarios de las estaciones se encuentran entre 26 y 32 % y a nivel diario entre 22 y 27 %. Los rRMSD del segundo día están entre 40 y 46 % para los valores horarios y para valores diarios entre 32 y 39 %. Estos resultados concluyen que los pronósticos de GHI producen menos errores a nivel diario que a nivel horario. Los errores que se obtienen a nivel horario logran compensarse al aumentar la ventana temporal de la predicción

y evaluar estos resultados a escala diaria. Los resultados del modelo que fueron evaluados en un punto interpolado de la grilla, donde los errores pueden ser producidos por un proceso físico el cual no es representado por el modelo, o un proceso que el modelo logra simular el pero el mismo se encuentra desfasado en el tiempo o en otra posición del espacio, que es cercano al punto de observación que se está evaluando. En el caso de la GHI pronosticada, el modelo debería reproducir con exactitud la nubosidad en ese punto, y las condiciones dentro de la columna vertical del modelo que permiten calcularla.

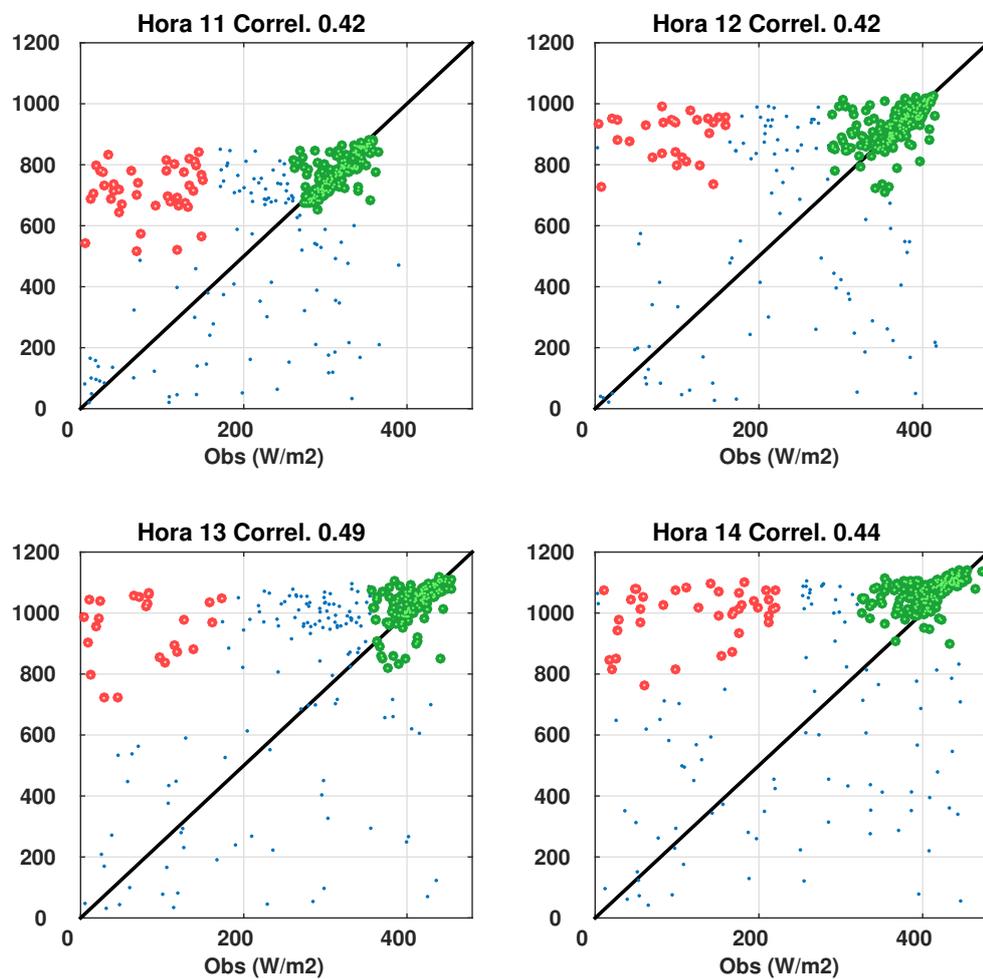


Figura 4.3: Scatter-plot por hora en Artigas.

Se analizan los resultados hora a hora, en la figura 4.3 se muestran los scatter-plot de las horas centrales del día de la estación de Artigas (resultados similares se encuentran en el resto de las estaciones). Esta figura de los scatter-

plots permite ver 2 comportamientos diferentes: (1) en cuanto a pronósticos exitosos, los que se encuentran próximos a la recta $y = x$, puntos verdes en las figuras, y (2) los de los casos mal pronosticados. Los casos bien pronosticados (puntos verdes), o de error relativamente bajo, corresponden a casos donde la GHI observada es muy alta, estos son horas del día prácticamente de cielos despejados de nubosidad, los que llamaremos días de cielo claro. Para estos casos, el modelo tiende a simular una atmósfera con condiciones de cielo claro, obteniendo pronosticos muy acertados y cercanos a su valor real. En el caso de los pronósticos erróneos (puntos rojos), puede verse que la GHI observada es muy baja, corresponde a horas con cielos cubiertos de nubosidad y que impiden la llegada de la radiación solar a la superficie. Para estos casos, el modelo simula elavada GHI en superficie, por lo que no reproduce las condiciones de nubes adecuada ese punto de la grilla. Las correlaciones se muestran en la tabla 4.4 para cada hora son del orden de 0.34 a 0.54 dependiendo la estación de observación y la hora del día.

Hora	9	10	11	12	13	14	15	16	17
AR	0.45	0.38	0.42	0.42	0.49	0.44	0.36	0.34	0.33
LB	0.50	0.54	0.48	0.49	0.50	0.47	0.43	0.43	0.44
RO	0.49	0.53	0.56	0.49	0.45	0.43	0.40	0.45	0.43
SA	0.54	0.52	0.52	0.44	0.37	0.36	0.44	0.39	0.38

Tabla 4.4: Correlaciones por hora

A partir de lo observado se decide usar un criterio más objetivo para clasificar estos casos que dependen de la GHI observada en superficie. Para realizar esto se utiliza el índice de claridad horario kt tal como es utilizado en [ref artículo] para definir 3 tipos de condiciones de cielo. Estos casos quedan definidos a continuación como:

- $kt < 0.4$ totalmente nublados (nb).
- $0.4 \leq kt < 0.65$ parcialmente nublados (pnb).
- $kt \geq 0.65$ cielos claros (dc).

Con esta clasificación por k_t , se calcula nuevamente los indicadores de desempeño del modelo para cada una de las condiciones deinidas con el índice. En la figura 4.4 se muestran los resultados del BIAS, MAE y RMSD en la estación de Artigas (resultados análogos se encuentran para el resto de los piranómetros, se encuentran en el apéndice 2), los resultados se presentan en

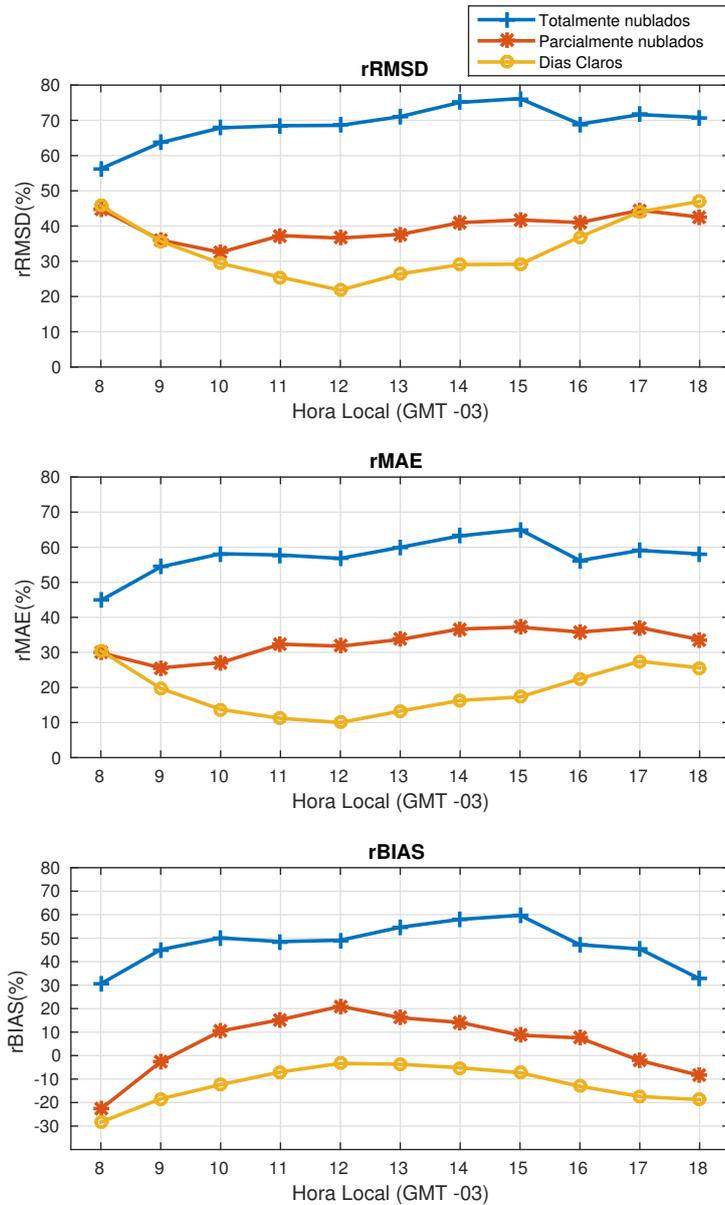


Figura 4.4: rBIAS, rMAE y rRMSD según la clasificación de índice de claridad k_t en la estación de Artigas.

porcentaje y relativos al ciclo diario y son para las primeras 24 horas. Esta clasificación permite distinguir claramente una diferencia entre los horas de cielo claro y horas con nubosidad. En las horas con cielo claro (dc) observado es donde los errores de la GHI del modelo es menor. Los rBIAS muestra una subestimación de la GHI pronosticada para las horas del día de las primeras

24 horas de pronóstico. Estos son mayores por las mañanas y tardes del día, mientras que en las horas centrales del día, entre las 10 y las 16 los valores varían entre -3.3 y -13.7%. Para las condiciones de cielo claro, los rMAE se encuentran entre 13.7 y 22.5% mientras que los rRMSD se encuentran entre 21.8 y 36.9%. Los casos parcialmente nublados, tienen errores mayores a los de cielo claro y los casos más difícil de pronosticar por el modelo son los casos de k_t observado muy bajo, con cielos totalmente cubiertos. Los rMAE, varía entre 31.8 y 37.1% para los cielos parcialmente cubiertos(pnb) y entre 56.8 y 65.0% para los cielos totalmente cubiertos (nb). En el caso del rRMSD estos varían entre 32.6 y 41.7% para los casos parcialmente nublados y entre 68.5 y 76.2% en los casos totalmente nublados. En las condiciones de cielo parcialmente cubierto (pnb) y totalmente cubierto (nb) definidas por k_t , el modelo sobreestima la GHI en superficie con los errores mencionados. Todos estos resultados se encuentran tabulados en 4.5, 4.6 y 4.7 para la estación de Artigas (las otras tablas se encuentran en el apéndice 1).

Hora	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
nb	56.3	63.7	67.9	68.5	68.6	71.1	75.1	76.2	68.9	71.6	70.8
pnb	44.8	36.1	32.6	37.3	36.6	37.6	40.9	41.7	40.9	44.5	42.6
dc	45.8	35.7	29.4	25.5	21.8	26.4	29.0	29.2	36.9	44.0	47.0

Tabla 4.5: Clasificación por kt en Artigas: rRMSD por hora

Hora	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
nb	44.8	54.4	58.1	57.8	56.8	59.9	63.2	65.0	56.2	59.1	58.1
pnb	29.9	25.6	27.1	32.3	31.8	33.7	36.7	37.2	35.8	37.1	33.7
dc	30.5	19.7	13.7	11.2	9.9	13.3	16.3	17.3	22.5	27.5	25.6

Tabla 4.6: Clasificación por kt en Artigas: rMAE por hora

Hora	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
nb	30.5	45.1	50.1	48.5	49.1	54.6	57.9	59.7	47.2	45.4	32.7
pnb	-22.7	-2.6	10.4	15.3	20.9	16.1	14.1	8.7	7.5	-2.1	-8.4
dc	-28.3	-18.4	-12.6	-6.9	-3.3	-3.7	-5.2	-7.3	-13.1	-17.4	-18.8

Tabla 4.7: Clasificación por kt en Artigas: rBIAS por hora

Por último se hace una comparación diaria, integrando la GHI para las para el primer y segundo día de pronóstico. La figura 4.5 muestran los scatter-plot

e histogramas del error. En el caso de los errores diarios los histogramas del error se encuentran centrados y se tiene que el 43% de los casos los errores oscilan entre -2.5 y 2.5 MJ/m^2 . Se observa que a escala diaria el modelo tiende a reproducir mayores errores por sobreestimar que los errores por subestimación. La correlación entre la serie de GHI pronosticada y observada es de 0.54. Los resultados para el resto de las estaciones se encuentran en el apéndice.

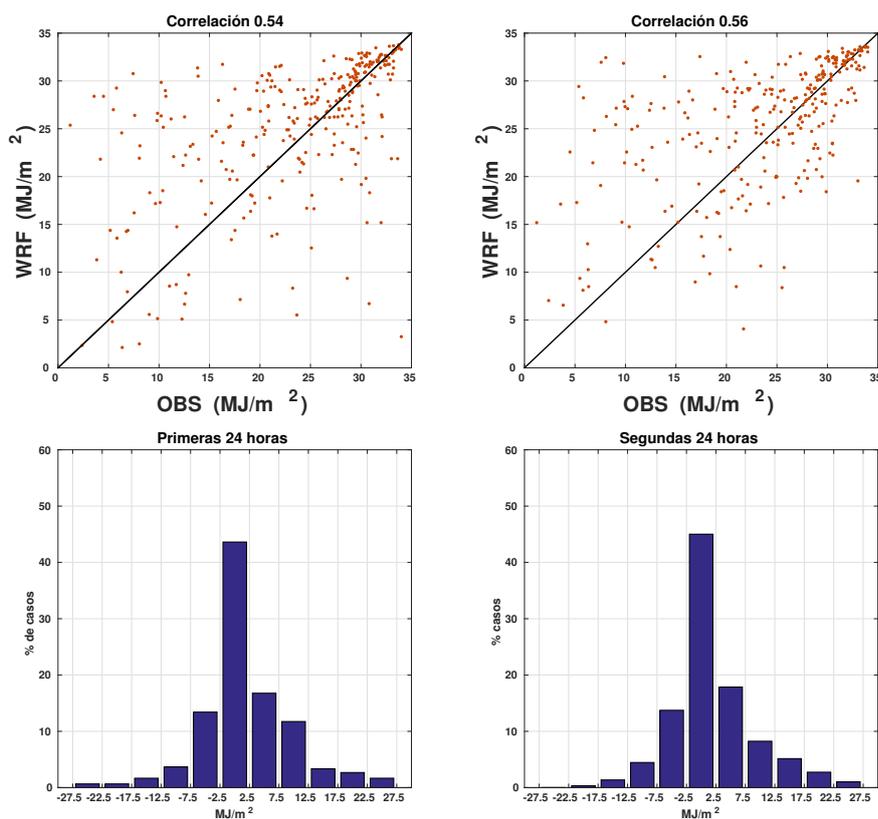


Figura 4.5: Errores diarios: Scatter-plot y Histogramas en Artigas

4.2. Climatología de imágenes satelitales MODIS

Las imágenes MODIS cuentan con unos productos de nubosidad para realizar diferentes tipos de estudios. En este trabajo se utilizaron tres productos: el espesor óptico (Cloud Optical Thickness, COT), el nivel de presión el tope de la nube (Cloud Top Pressure, CTP) y fracción de nubosidad (Cloud Fraction, CLDFRA) La fracción de nubosidad medido por el satélites es la fracción de

la superficie cubierta por una nube. El algoritmo que provee estas variables se describe en [referencia]. Los productos de COT tiene resolución espacial de 1 km y los de CTP y CLDFRA de 5 km. Estos se obtienen de los sensores en las plataformas AQUA y TERRA que observan nuestra región entre las 10 y 12 horas locales y las 15.30 y las 17.30 locales, respectivamente. Los productos se interpolaron a la grilla del modelo para lograr la comparación con la salida de nubosidad del WRF.

En la figura 4.6 se muestra la climatología calculada de COT, CTP y CLDFRA para los meses de Diciembre, Enero y Febrero de los veranos 2014, 2014-2015, 2015-2016 y 2016-2017, en esta figura se muestra la climatología correspondiente a al sensor TERRA y AQUA. Las imágenes del sensor TERRA corresponden al promedio de las mismas entre las 10.30 y las 12.00 y muestran 2 escenarios diferentes en cuanto a la fracción de nubosidad. Un escenario se encuentra sobre la costa oceánica y este del país, esta región presenta mayor cobertura nubosa sobre los departamentos de Maldonado, Rocha, Treinta y Tres y Cerro Largo con una CLDFRA entre 60 y 70 %. Sobre el litoral oeste del país se encuentra los mínimos de nubosidad y el mínimo se da sobre la entrada del Río de la Plata frente al departamento de Colonia. La climatología de sensor AQUA que corresponde a las horas de la tarde, entre las 15.30 y 17.30 locales, muestra como aumentó la cobertura nubosa a lo largo de todo el país, respecto a las horas de la mañana, siendo aún mayor sobre la costa oceánica. Los topes nubosos que se infieren a partir de la CTP, indican también sus diferencias entre la región este y la zona litoral oeste. Sobre la costa oceánica del país, estos topes nubosos se encuentran en niveles de presión más altos que sobre los que se encuentran en la región del litoral oeste, es decir sus topes se encuentran a menor altitud. Respecto al espesor óptico (COT), la Climatología muestra que sobre la costa este la nubosidad en promedio es de espesores menores a que atraviesan el litoral oeste del país. La combinación de los resultados de COT y CTP, indican la posibilidad de formación de las nubes en niveles más abajo de la tropósfera, como lo son los estratocumulus y pequeños cumulus (shallow cumulus). Sobre el litoral oeste, la COT elevados y de bajos CTP, indican la presencia de nubes de alto desarrollo, como lo son las torres nubosas convectivas, que son asociadas a una tropósfera muy inestable durante los meses de verano.

De manera de poder clasificar la nubosidad según la altura a la que se encuentran sus topes, se utilizó el criterio empleado que fue empleado por

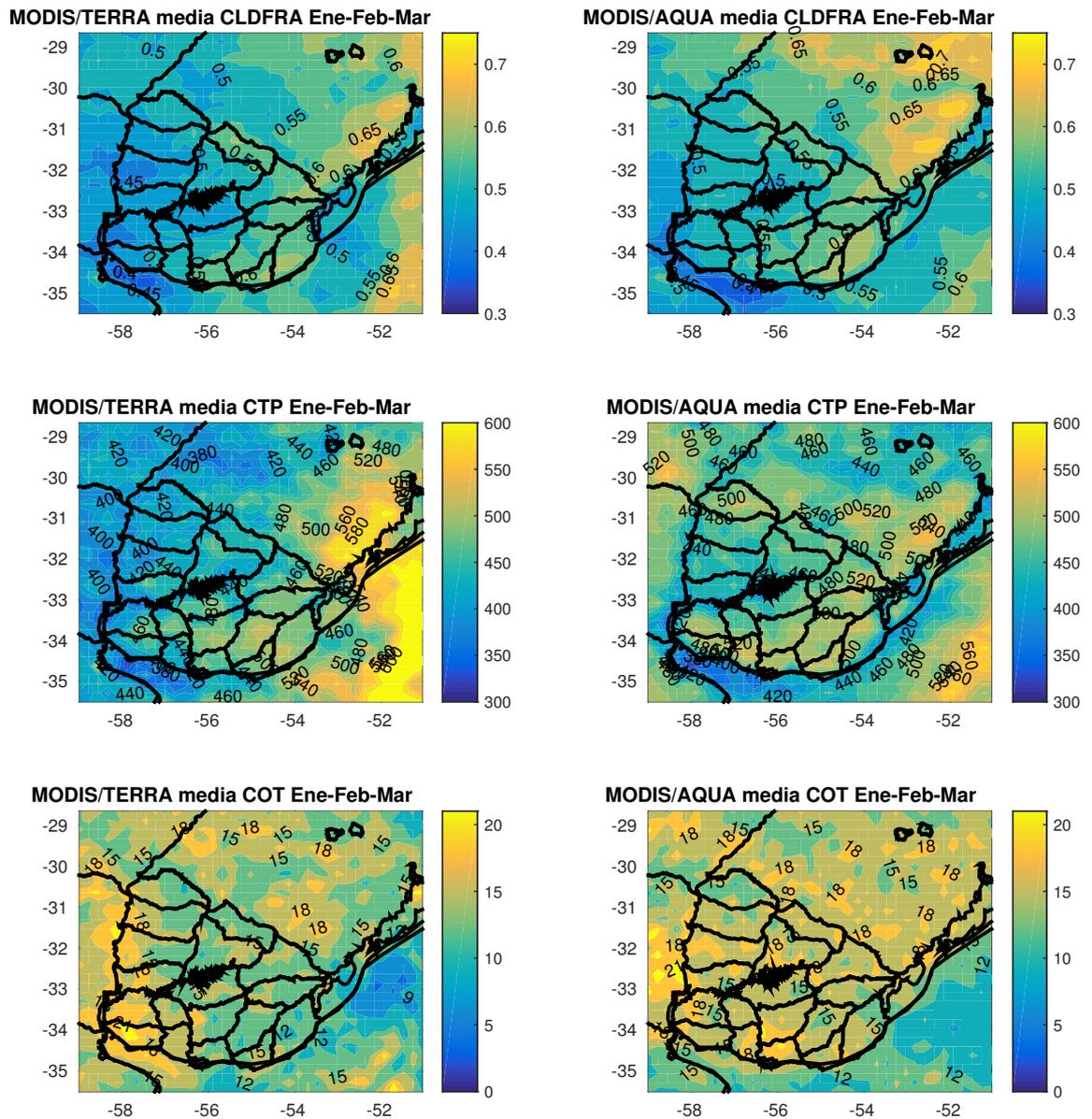


Figura 4.6: Climatología imágenes MODIS de los sensores AQUA y TERRA

los autores en [artículo nubes WRF africa] a partir de los datos de CTP. Este criterio posibilita clasificar la nubosidad en diferentes niveles de la tropósfera. La clasificación consiste en 3 categorías:

- CTP < 440 hPa nubes altas (NA).

- $680 \text{ hPa} \leq \text{CTP} < 440$ nubes medias(NM).
- $\text{CTP} \geq 680 \text{ hPa}$ nubes bajas (NB).

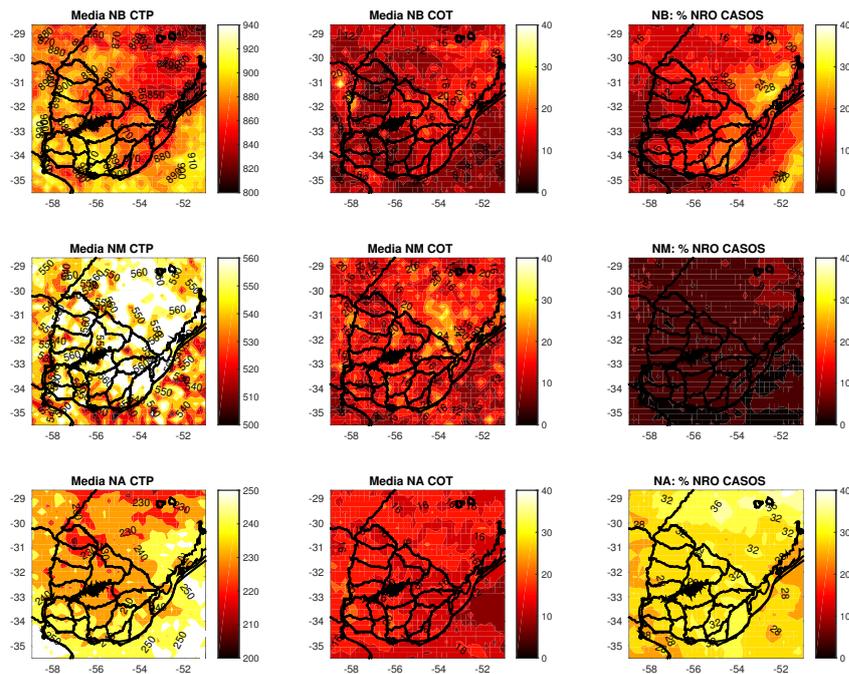


Figura 4.7: Climatología Datos MODIS por niveles de nubosidad

Dada esta clasificación, se presenta en la figura 4.7 la climatología de CTP, COT y la frecuencia de estos casos (en porcentaje) de la nubosidad en los diferentes niveles de la tropósfera. En la figura 4.7 se observa que la presencia de nubes bajas presenta un gradiente horizontal en la dirección NW-SE con mayor presencia de nubes bajas en la región sureste del país. En esta región, al sureste del país, se encuentra que los valores del COT son menores sobre el océano atlántico a los que se observan dentro del continente. En el caso de la nubosidad por niveles medios, la frecuencia de estos casos muestra que existe un porcentaje muy bajos de toques de nubes en este nivel. En cambio, se encontró que la mayor cantidad de nubosidad se da en los niveles altos. Sobre el departamento de Artigas, se encuentra un mínimo de CTP el cual puede estar asociado a torres convectivas que atraviesan o se desarrollan en esta zona.

4.3. Comparación MODIS vs WRF

En esta sección se muestra la comparación de la nubosidad simulada por el modelo con la obtenida con la observada en las imágenes MODIS. El WRF tiene como variable de salida la fracción de nubosidad (CLDFRA). Este valor de CLDFRA toma el valor entre 0 y 1 y es el porcentaje de nubosidad dentro de la caja de la grilla del modelo. Se elaboró un algoritmo a partir de la CLDFRA para recuperar el nivel de presión del tope de las nubes (CTP) de modelo, como el espesor de las nubes en la columna. En el caso del el espesor de las nubes, se define por la diferencia de presiones entre la base y el tope de las nubes en la columna.

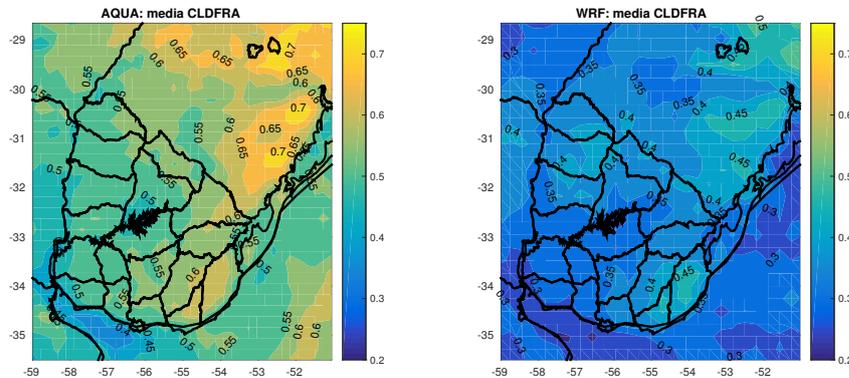


Figura 4.8: Climatología Datos MODIS y WRF

Primero, se comparó la CLDFRA del modelo con la CLDFRA de los sensores AQUA del MODIS. En la figura 4.8 se muestra la comparación de la climatología de CLDFRA simulada por el modelo WRF de las 13 horas locales. Se observa que la CLDFRA del WRF subestimada en todo el país, aunque si logra simular en mejor medida la estructura espacial del campo de nubes. En esta comparación es posible ver como la climatología del modelo reproduce la estructura media de la nubosidad sobre el este del país, en los departamentos de Rocha y Maldonado. En la figura presentada, también se observa como el modelo simula con precisión la posición del máximo local de CLDFRA que ocurre en el sur de Brasil, como también el mínimo de CLDFRA sobre la entrada del Río de la Plata. Los errores en la subestimación varían en el orden de 10 a 30 % dependiendo de la región.

En la figura 4.9 se muestra las comparación entre la imágenes MODIS y el WRF discriminando a partir de la clasificación de nubosidad por niveles de

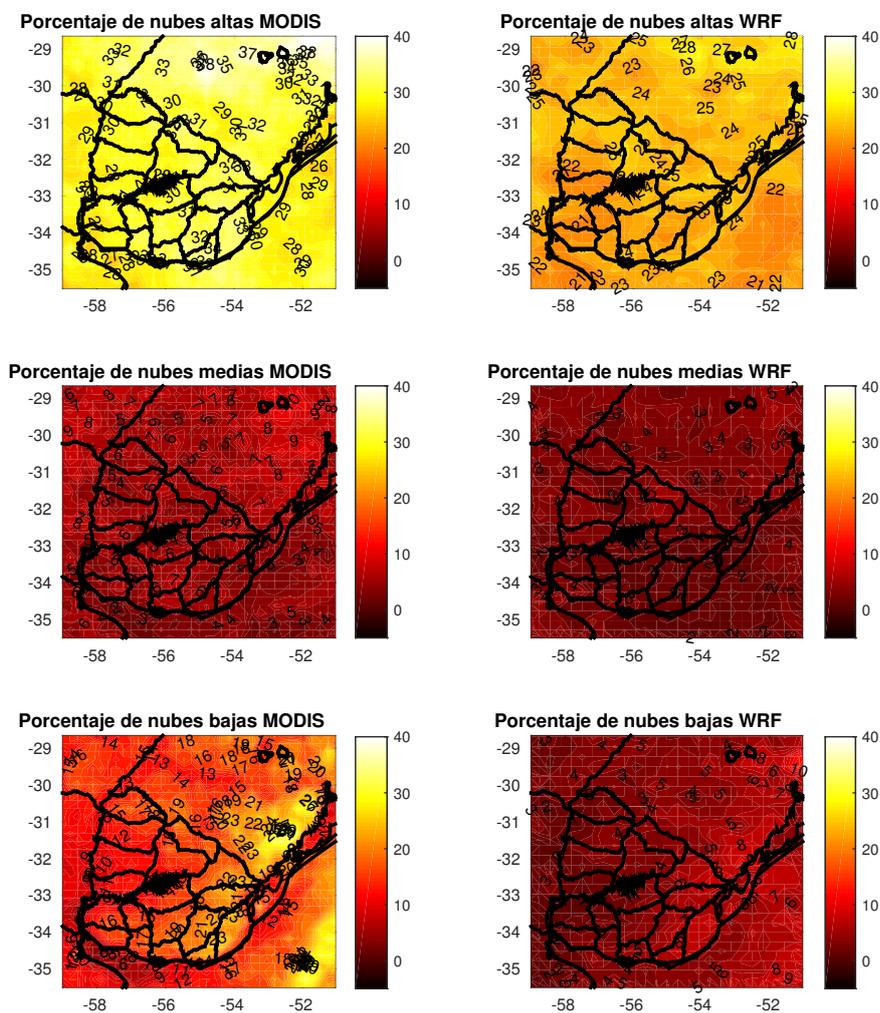


Figura 4.9: Climatologías Datos MODIS y WRF clasificadas según CTP

CTP. En esta figura, se observa que la subestimación de la cobertura nubosa por el WRF se da en los tres niveles de CTP, sobre toda la región. La sobrestimación del modelo es mucho mayor en niveles bajos que en niveles más altos de la tropósfera. En los niveles altos la cobertura nubosa observada por las imágenes MODIS varía entre 27 y 37 %, la nubosidad del modelo WRF se encuentra entre 21 y 28 %, en promedio la subestimación es del orden de 20 al 30 % en este nivel. Los niveles medios presentan bajos porcentajes de topes nubosos, en este nivel el modelo también subestima en promedio con un orden del 20 al 30 %. En los niveles bajos es donde se produce la mayor

subestimación, y es en promedio del 60 al 70 %. En los niveles bajos, es donde se encuentra la presencia de las nubes estratocumulus y los cúmulos someros que son un problema conocido en los modelos numéricos de atmósfera.

4.4. Estudio de la PBL para la formación de nubes en capas bajas

Por lo visto en las secciones anteriores, la comparación entre simulaciones de pronóstico y el análisis MODIS indica una subestimación de la nubosidad en todos los niveles, pero especialmente en niveles bajos. Las predicciones de radiación en la superficie es especialmente sensible a esta subestimación, pues estas nubes son de albedo elevado. La subestimación de la cobertura nubosa en niveles bajos, es del orden de 60 a 70 %, con respecto a la nubosidad de las imágenes MODIS. La representación de las nubes de la PBL son un desafío en el estado del arte de las simulaciones de los modelos numéricos. En esta sección se presenta un estudio de casos de los pronósticos que presentaron errores elevados.

Las nubes de niveles bajos pueden corresponder a nivel de condensación (LCL) dentro de la altura de la capa límite o muy próximo a la misma. Se señalan como tipos de nubosidad baja importante tanto los estratocúmulos como los cúmulos someros (shallow cúmulus). El hecho de tener un LCL relativamente bajo se correlaciona con una humedad relativa elevada en niveles relativamente elevados dentro de la capa límite. El modelo WRF, con la configuración de parametrizaciones estudiada aquí, podría tener una subestimación sistemática de la humedad relativa próxima al tope de la capa límite, lo que implicaría la subestimación de nubes bajas observada. De todas maneras, si la predicción de humedad relativa en niveles altos de la PBL es relativamente elevada, sería relativamente mas probable que se haya fallado en la simulación de una nube que efectivamente se observó, en comparación con casos en que la predicción de humedad relativa sea muy baja.

Motivados por esta hipótesis, presentamos en la figura 4.10 un scatter plot entre el error de la GHI del modelo y la humedad relativa (HR) en el tope de la capa límite, para cada uno de las estaciones de medición con piranómetros indicadas en la sección 3. Esta HR corresponde a la simulada en el último nivel vertical más próximo al tope de la capa límite, dentro de la misma. Los

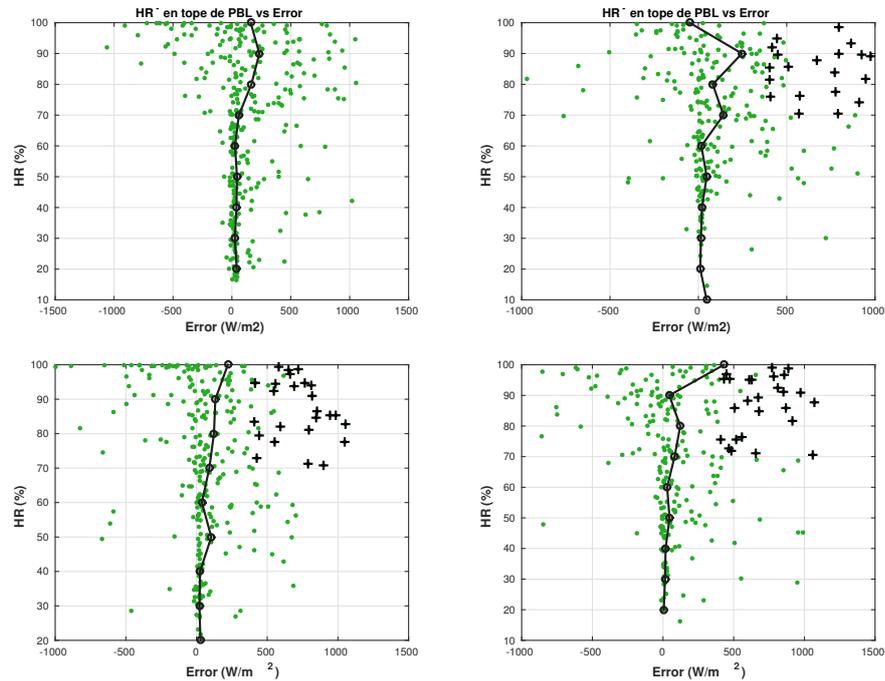


Figura 4.10: Error GHI en función de la Humedad Relativa del modelo en el tope de PBL

puntos del scatter-plot corresponden a una hora en particular, en este caso a las 13 horas locales, dentro de las primeras 24 horas de pronóstico. De este modo se tiene un solo punto por día. El resto de las horas de pronosticadas cercanas al mediodía solar muestran resultados muy similares. Considerando la importante dispersión de errores observada en los casos en que el modelo pronostica bajos niveles de k_t (Fig. 4.3), esta figura solo incluye los casos en los que el pronóstico de irradiancia resultó superior a los 700 W/m^2 . En línea negra, la figura muestra la mediana del error calculada en una ventana móvil de HR de 10% de amplitud. Se encuentra que para valores de HR inferiores al 60%, la mediana del error es muy próxima a cero. Esto indica que cuando se pronostican valores bajos de HR, la predicción, que corresponde a niveles de insolación elevada, tiende a ser correcta. Esto indica que cuando se pronostican valores bajos de HR, la predicción, que corresponde a niveles de insolación elevada, tiende a ser correcta. Para valores de HR superiores a 70% comenzamos a observar medianas positivas, que indican una tendencia a errores mayoritariamente positivos; es decir, en estos casos el modelo tiende a sobrestimar la radiación, posiblemente debido a fallas en simular nubes de bajos niveles.

A partir de estas consideraciones, decidimos discriminar los casos de radia-

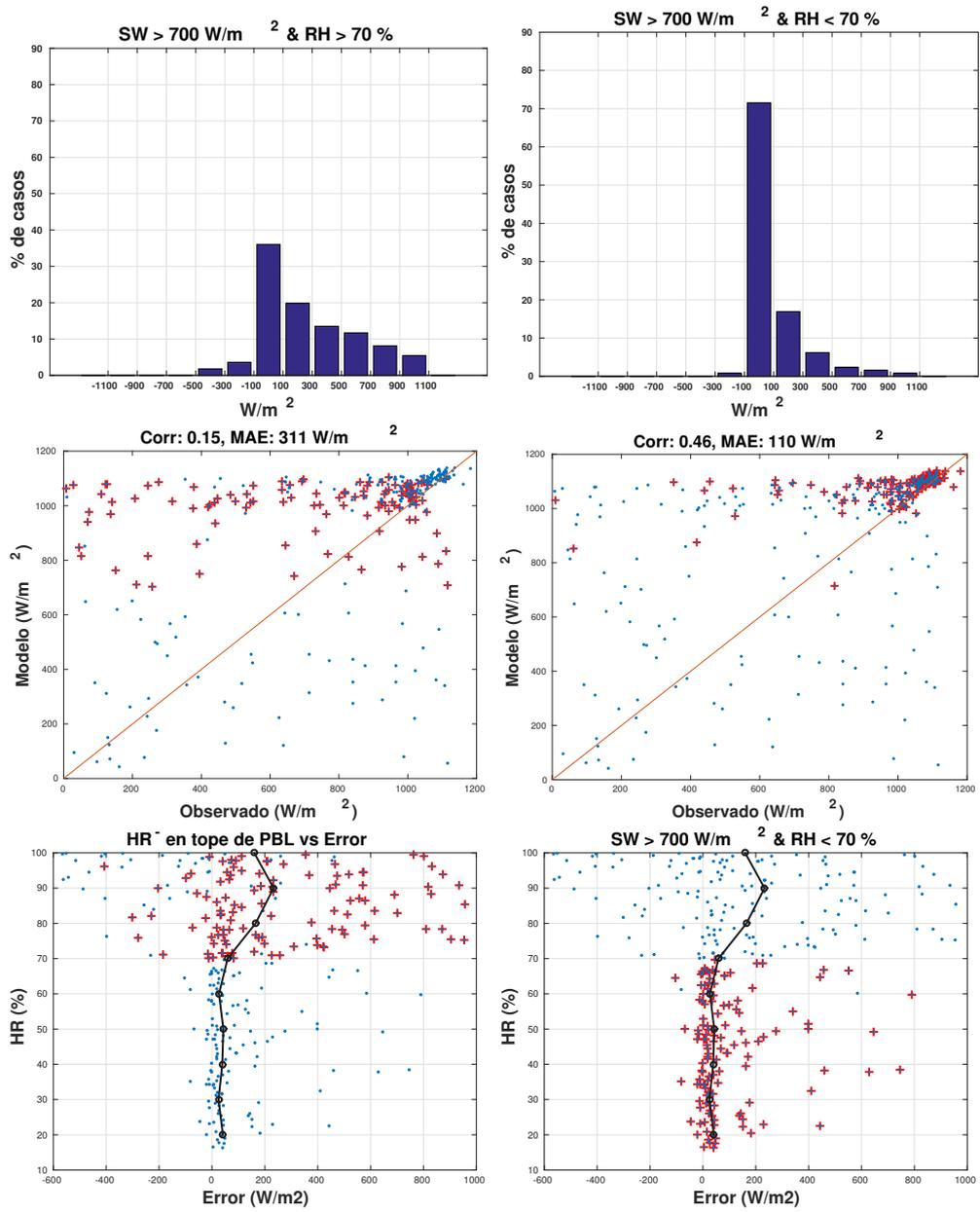


Figura 4.11: Histogramas, scatter-plot y error de GHI en función de HR en Artigas.

ción pronosticada superior a $700\text{W}/\text{m}^2$ y humedad relativa pronosticada en el tope de la capa límite superior a 70 %, y los casos de radiación pronosticada también superior a $700\text{W}/\text{m}^2$ y humedad relativa menor al 70 %. En la figura 4.11 se muestran los histogramas del error, el scatter-plot de la GHI modelada vs. la observada y el scatter plot del error de las predicciones (abscisas) vs. humedad relativa en el tope de la PBL (ordenadas), para cada una de estas dos categorías. La figura se concentra en los resultados para la estación de Artigas, encontrándose para las demás resultados muy similares. Se encuentra que para los casos de PBL "húmedas" (HR pronosticada mayor a 70 %) los errores de la GHI tienen un sesgo de sobrestimación mayor a los casos de PBL "seca". (HR pronosticada mayor a 70 %). La figura sugiere que en varios casos de HR mayores a 70 % existirían condiciones favorables para la formación de nubes bajas, pero el modelo no las simula obteniendo así errores de sobrestimación elevados. En el casos de PBL seca, el histograma de errores indica que los casos de pronósticos exitosos son notoriamente mas frecuentes. El MAE de los casos de PBL húmeda, es de $311\text{W}/\text{m}^2$, mientras que los casos de PBL seca es de $110\text{W}/\text{m}^2$. La significancia estadística de esta diferencia, estimada mediante un test de Student, es superior al 95 %.

A los efectos de realizar una exploración primaria de los regímenes de circulación asociados a los casos en que los pronósticos indican GHI simulada mayor a $700\text{W}/\text{m}^2$ y HR próxima al tope de la PBL mayor a 70 %, se seleccionaron, dentro de estos casos, para cada estación, aquellos con errores de predicción de GHI mayores a $400\text{W}/\text{m}^2$, calculando la anomalía de viento pronosticado en el nivel de 850hPa, y la correlación entre el error de pronóstico con el viento meridional en 850 mb. Nos concentramos en predicciones para las 13:00, hora local. Las anomalías se calculan en toda el dominio de la simulación, respecto a la climatología de predicciones para esa hora, y para las cuatro temporadas de verano simuladas. En las figuras 4.12 a 4.15 se muestran los mapas de correlaciones y de anomalía media de circulación para cada una de las estaciones. En todos los casos se encuentra una correlación negativa con V850 mb al norte de Uruguay, que corresponde al ingreso de un flujo de viento con componentes NW y N. Estos flujos, corresponden al ingreso de aire cálido y húmedo, proveniente bajas latitudes, y pueden estar asociados a eventos donde la corriente en capas bajas (LLJ) se encuentra activa o a eventos donde el anticiclón semi-permanente del Atlántico se extiende sobre el continente con flujos de vientos predominantes del sector Norte sobre Uruguay. Se realizaron

cálculos similares correlacionando el error de la predicción de GHI con el viento zonal en 850 mb y con la humedad relativa, que dieron resultados consistentes con el que señalamos, y no mostramos aquí. La exploración de la relación entre estos regímenes de circulación y el funcionamiento de las simulaciones de capa límite será explorada en detalle en trabajos próximos.

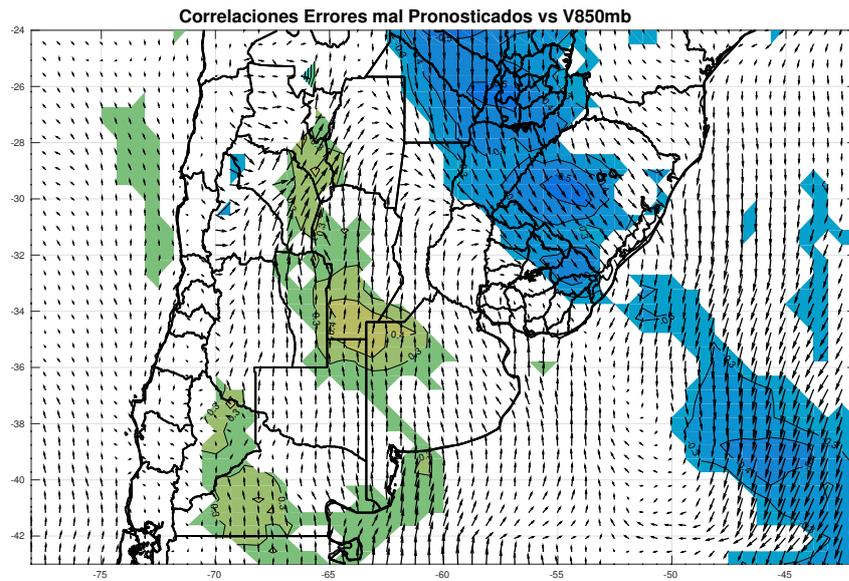


Figura 4.12: Mapa de las correlaciones del error y V en 850 mb para los casos seleccionados en Artigas

Correlaciones Errores mal Pronosticados vs V850mb

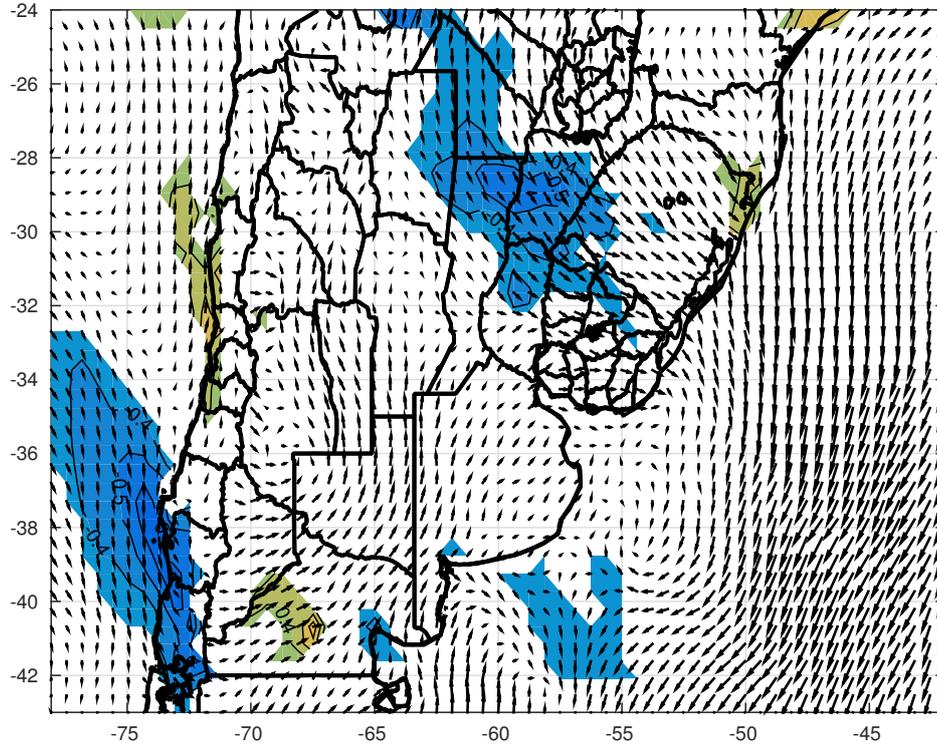


Figura 4.13: Mapa de las correlaciones del error y V en 850 mb para los casos seleccionados en Las Brujas

Correlaciones Errores mal Pronosticados vs V850mb

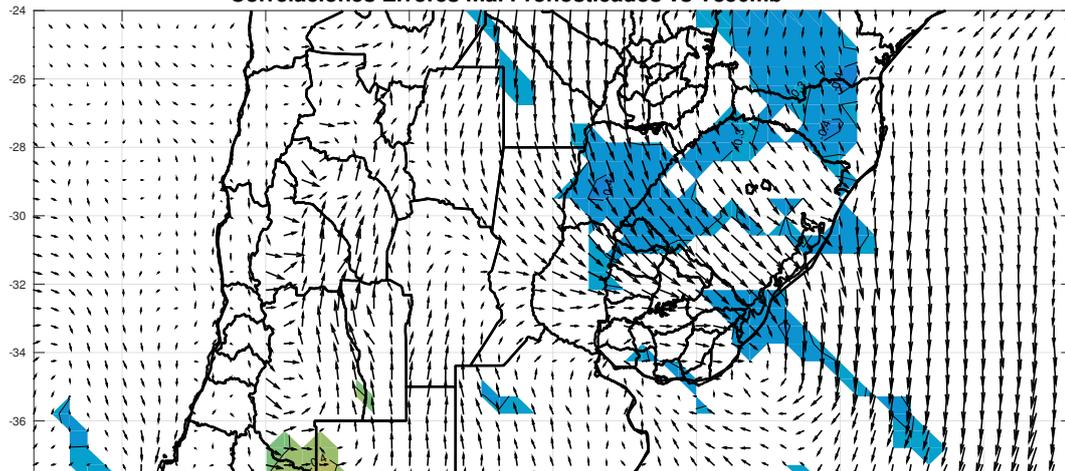


Figura 4.14: Mapa de las correlaciones del error y V 850 mb para los casos seleccionados en Rocha

Correlaciones Errores mal Pronosticados vs V850mb

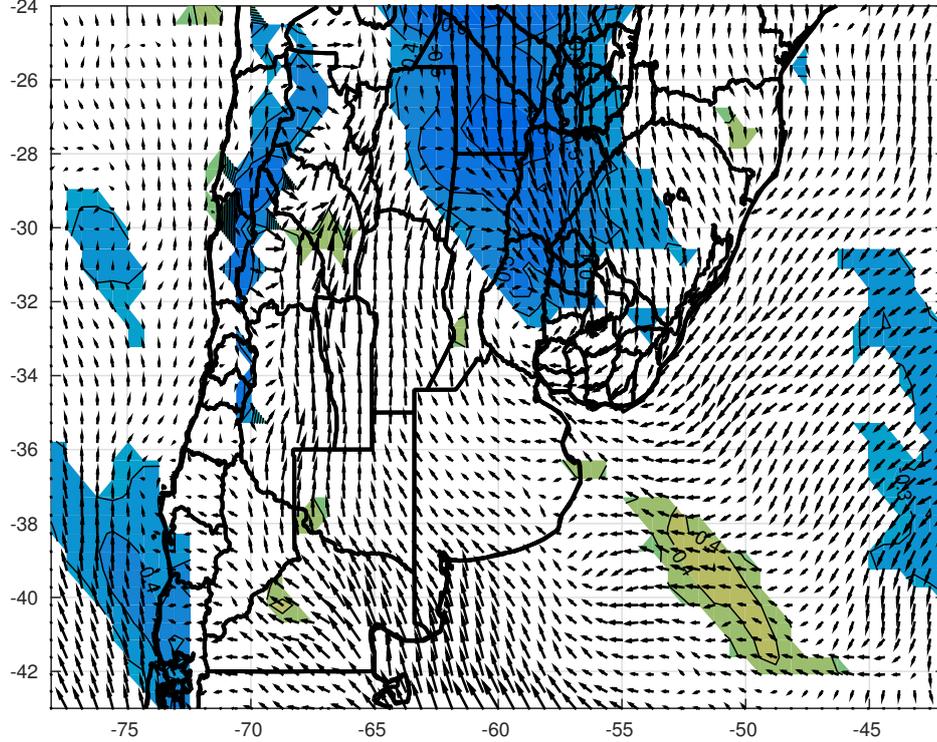


Figura 4.15: Mapa de las correlaciones del error y V en 850 mb para los casos seleccionados en Salto

4.5. Aplicación de corrección estadística MOS

En la sección anterior, se encontraron casos donde el modelo falla por exceso de GHI en superficie cuando se tiene la combinación de GHI pronosticada elevada (mayor a 700 W/m^2) y una capa límite relativamente húmeda.

En consecuencia, proponemos la siguiente corrección:

Para los casos con GHI pronosticada mayor a 700 W/m^2 ,

$$GHI_{MOS}(hr) = GHI_{wrf}(hr) - BIAS(HR, hr) \quad (4.1)$$

Para los casos con GHI pronosticada menor a 700 W/m^2 , no realizamos correcciones.

La función BIAS de la ecuación 4.1 depende de la humedad relativa HR y la hora del día hr, y es calculada como la mediana del error en función de la humedad relativa en el tope de la PBL, como se mencionó anteriormente. La nueva GHI a partir del MOS depende de la GHI pronosticada, la hora del día y la HR en el tope de la PBL. De esta manera, a los casos de GHI mayores a

700 W/m^2 se les resta el sesgo positivo que se encontró a partir de la mediana del error en función de la HR del tope de la PBL

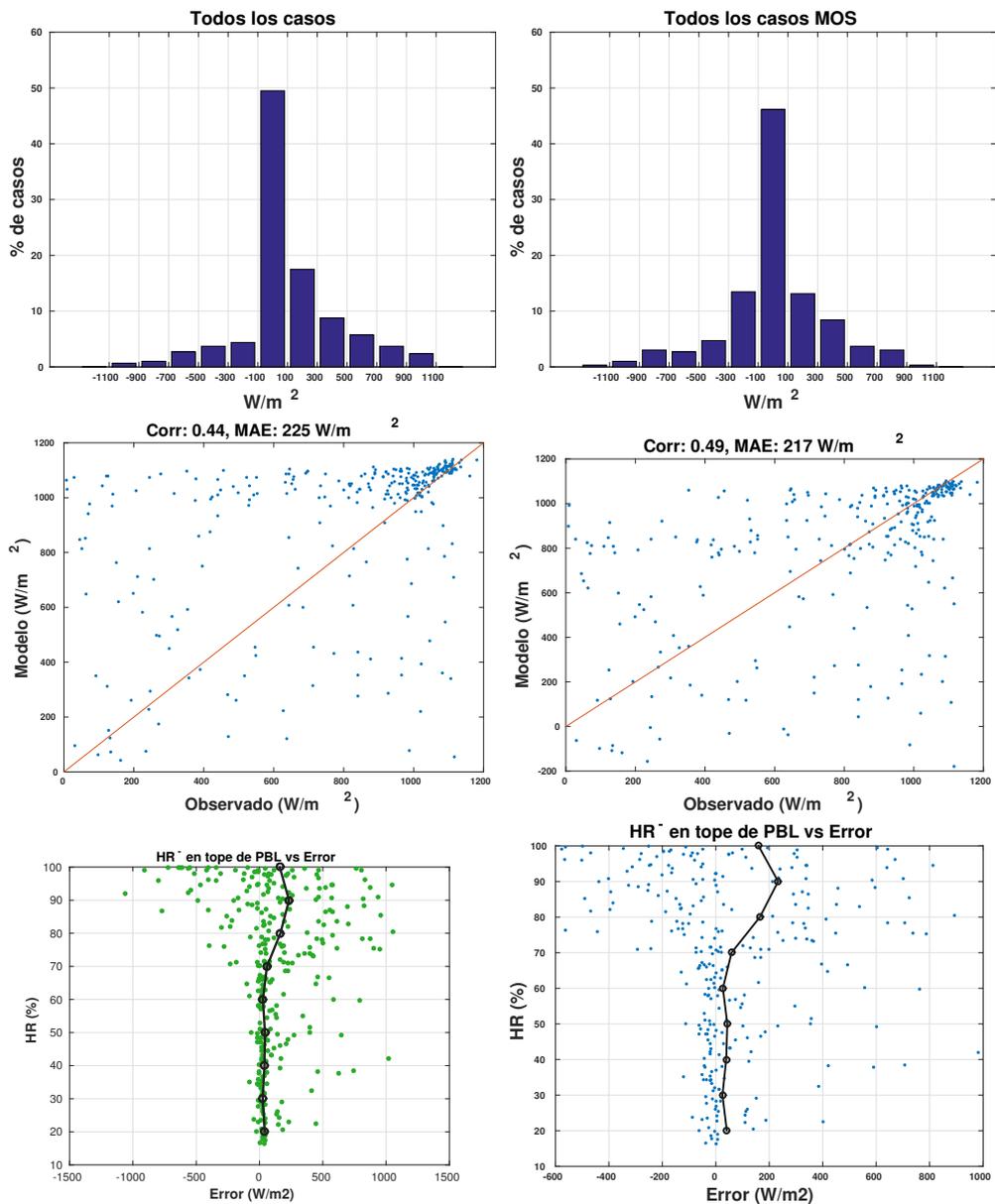


Figura 4.16: MOS: todos los casos, en Artigas.

En la figura 4.16, se muestran los resultados con y sin esta corrección estadística, para el caso de la estación de Artigas.. El histogramas del error es considerablemente mas simétrico en el caso de resultados corregidos, lo que implica un éxito importante en la corrección de los errores sistemáticos. El bias corregido es prácticamente nulo ($0.32 W/m^2$), mientras que el bias sin corregir es de $112 W/m^2$. Esta diferencia es estadísticamente significativa con

un nivel superior al 95 %.

Por otra parte, en el uso operativo de predicciones que utilicen la corrección propuesta, se considera conveniente estimar los intervalos de confianza de estas predicciones discriminando de acuerdo a los umbrales sugeridos en este trabajo, o de acuerdo a metodologías similares.

Capítulo 5

Consideraciones finales

En este capítulo se sintetizan los resultados expuestos en el capítulo anterior. Las predicciones de elevada irradiancia resultan acertadas en muchos casos, pero también muestran fallas que implican sobrestimaciones ocasionales pero relativamente frecuentes. La nubosidad es subestimada respecto al análisis MODIS, lo cual es consistente con el resultado mencionado arriba. La HR pronosticada muestra una buena relación con errores de sobrestimación de radiación: los casos de HR elevada en el tope de la PBL (mayores al 70%, por ejemplo), se asocian con un desvío sistemático importante de las predicciones de irradiancia. Esto por un lado permite elaborar hipótesis sobre aspectos del modelo que podrían mejorarse, y por otro lado permite proponer un sistema de correcciones empíricas o MOS a las predicciones obtenidas por el modelo, aún en su estado actual. El MOS propuesto mejora el MAE y en menor medida la correlación, y en especial, simetriza el histograma de errores, lo que indica que contribuye a la corrección de errores sistemáticos. Adicionalmente permite la estimación de intervalos de confianza que dependen de las condiciones de cada pronóstico.

En cuanto a las hipótesis que se pueden plantear respecto a la causa de la deficiencia apuntada en la simulación de nubes bajas, proponemos que el modelo podría exagerar la mezcla de aire de la PBL con aire directamente encima de la misma, el cual es más cálido y seco. La incidencia de nubes bajas, y en particular de estatocúmulos es sensible a la magnitud de esta mezcla (Stevens et al. 2005, Konor et al. 2009). Esto puede conducir a la predicción de HR correlacionada con la que efectivamente ocurre, pero sistemáticamente por debajo de la misma, lo que de ser el caso, produciría la subestimación de

nubosidad en niveles bajos. El estudio de esta hipótesis, mediante la prueba de modificaciones en el cálculo de la mezcla realizada por el modelo en el tope de la PBL, o mediante el uso de modelos LES; puede ser motivo de trabajos a realizar a continuación del que se presenta aquí.

Capítulo 6

Bibliografía

Ribeiro, M. (2016) - Utilización de pronósticos de generación eólica y solar en la programación de corto plazo - UTE, Seminario Pronos, Montevideo, Uruguay.

Kostylev, V., Pavlovski, A. (2011, October). Solar power forecasting performance-towards industry standards. In 1st International Workshop on the Integration of Solar Power into Power Systems, Aarhus, Denmark.

Cheung, W., Zhang, J., Florita, A., Hodge, B. M., Lu, S., Hamann, H. F., ... Lehman, B. (2015). Ensemble Solar Forecasting Statistical Quantification and Sensitivity Analysis: Preprint (No. NREL/CP-5D00-64960). NREL (National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States)).

Perez, R., Lorenz, E., Pelland, S., Beauharnois, M., Van Knowe, G., Hemker, K., ... Steinmauer, G. (2013). Comparison of numerical weather prediction solar irradiance forecasts in the US, Canada and Europe. *Solar Energy*, 94, 305-326.

Alonso, R. (2017) Estimación del recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales. Tesis de Doctorado en Ingeniería Eléctrica, Universidad de la República, Uruguay.

Heinemann, D., Lorenz, E., Girodo, M. (2006). Forecasting of solar radiation. Solar energy resource management for electricity generation from local level to global scale. Nova Science Publishers, New York.

Jensenius, J. S. and Cotton, G. F. (1981): The Development and Testing of Automated Solar Energy Forecasts Based On The Model Output Statistics (MOS) Technique. Proc. 1st Workshop on Terrestrial Solar Resource Forecasting and on the Use on Satellites for Terrestrial Solar Resource Assessment,

Newark, 1981, American Solar Energy Society.

Lara-Fanego, V., Ruiz-Arias, J. A., Pozo-Vázquez, D., Santos-Alamillos, F. J., Tovar-Pescador, J. (2012). Evaluation of the WRF model solar irradiance forecasts in Andalusia (southern Spain). *Solar Energy*, 86(8), 2200-2217.

Perez, R., Lorenz, E., Pelland, S., Beauharnois, M., Van Knowe, G., Hemker, K., ... Steinmauer, G. (2013). Comparison of numerical weather prediction solar irradiance forecasts in the US, Canada and Europe. *Solar Energy*, 94, 305-326.

Díaz, J. P., González, A., Expósito, F. J., Pérez, J. C., Fernández, J., García [U+2010] Díez, M., Taima, D. (2015). WRF multi [U+2010] physics simulation of clouds in the African region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(692), 2737-2749.

Porrini, C., Gutiérrez, A., Boezio, G. C., Hermida, G., Oroño, D., Puppo, M. (2015, October). Development of a Model Output Statistic and implementation of an operational solar photovoltaic energy forecast model based in WRF. In *Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)*, 2015 IEEE PES (pp. 248-253). IEEE.

Liou, K. N. (2002). *An introduction to atmospheric radiation* (Vol. 84). Academic press.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., Powers, J. G. (2005). A description of the advanced research WRF version 2 (No. NCAR/TN-468+ STR). National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div.

Ooyama, K. V. (1990). A thermodynamic foundation for modeling the moist atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47(21), 2580-2593.

Laprise, R. (1992). The Euler equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable. *Monthly weather review*, 120(1), 197-207.

Hong, S. Y., Dudhia, J., Chen, S. H. (2004). A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review*, 132(1), 103-120.

Pan, H., Wu, W. (1995). Implementing a mass flux convective parameterization package for the NMC Medium-Range Forecast model, NMC Office Note, 409.

Niu, G. Y., Yang, Z. L., Mitchell, K. E., Chen, F., Ek, M. B., Barlage, M., ... Tewari, M. (2011). The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah [U+2010]MP): 1. Model description and

evaluation with local [U+2010] scale measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D12).

Hong, S. Y., Noh, Y., Dudhia, J. (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly weather review*, 134(9), 2318-2341.

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.

Lacis, A. A., Hansen, J. E. "A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere", *J. Atmos. Sci.*, 31 (1974) 118–133.

Stephens, G. L. (1978). Radiation profiles in extended water clouds. I: Theory. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 35(11), 2111-2122.

Ackerman, S. A., Strabala, K. I., Menzel, W. P., Frey, R. A., Moeller, C. C., Gumley, L. E. (1998). Discriminating clear sky from clouds with MODIS. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D24), 32141-32157.

Menzel, W. P., R. A. Frey, B. A. Baum, and H. Zhang, 2006: Cloud top properties and cloud phase algorithm theoretical basis document. MODIS ATBD-MOD-04, 56 pp.

Baum, B. A., P. F. Soulen, K. I. Strabala, M. D. King, S. A. Ackerman, W. P. Menzel, and P. Yang, 2000: Remote sensing of cloud properties using MODIS Airborne Simulator imagery during SUCCESS. II. Cloud thermodynamic phase. *J. Geophys. Res.*, 105, 11 781–11 792.

Strabala, K. I., S. A. Ackerman, and W. P. Menzel, 1994: Cloud properties inferred from 8–12- [U+242E] m data. *J. Appl. Meteor.*, 33, 212–229.

Ackerman, S. A., W. L. Smith, J. D. Spinhirne, and H. E. Revercomb, 1990: The 27–28 October 1986 FIRE IFO Cirrus Case Study: Spectral properties of cirrus clouds in the 8–12 window. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 2377–2388

APÉNDICES

Apéndice 1

Datos procesados complementarios

Hora	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
nb	55.6	58.7	65.3	62.2	63.5	70.5	72.2	66.4	70.4	70.3	61.9
pnb	33.9	34.1	34.8	31.2	30.6	36.5	34.6	31.9	29.7	38.3	38.8
dc	53.9	30.2	26.0	23.5	24.6	20.9	23.1	24.5	28.4	33.1	46.3

Tabla 1.1: Clasificación por kt en Las Brujas: rRMSD por hora

Hora	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
nb	41.5	46.6	54.2	50.5	53.4	61.3	62.3	55.7	59.4	58.9	51.1
pnb	24.1	29.8	30.7	25.8	25.9	32.9	30.3	28.3	25.6	33.6	29.5
dc	31.2	16.5	13.3	11.9	12.5	10.9	12.5	15.4	15.2	19.1	26.3

Tabla 1.2: Clasificación por kt en Las Brujas: rMAE por hora

Hora	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
nb	20.9	40.5	50.3	45.7	47.5	55.6	58.6	52.7	53.7	50.4	36.9
pnb	-9.1	5.3	12.9	15.2	20.6	23.3	23.5	18.0	12.1	10.6	-1.0
dc	-31.1	-15.5	-10.6	-6.1	-4.6	-2.6	-4.6	-6.5	-7.2	-9.6	-20.2

Tabla 1.3: Clasificación por kt en Las Brujas: rBIAS por hora

Hora	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
nb	54.7	61.5	58.9	63.9	69.4	69.3	72.3	60.9	61.6	66.7	58.9
pnb	39.7	35.1	35.5	37.9	36.7	38.4	40.3	38.7	42.7	43.9	49.1
dc	47.9	28.3	22.5	24.3	25.8	26.3	27.6	31.3	37.1	42.2	47.3

Tabla 1.4: Clasificación por kt en Rocha: rRMSD por hora

Hora	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
nb	44.5	50.7	46.9	53.2	59.5	57.9	61.8	51.4	49.6	54.6	45.6
pnb	28.9	28.8	31.5	35.2	32.7	33.8	35.7	33.6	38.3	38.8	36.7
dc	30.2	14.1	10.5	11.8	12.9	13.7	15.3	18.5	22.9	25.1	24.6

Tabla 1.5: Clasificación por kt en Rocha: rMAE por hora

Hora	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
nb	32.6	41.7	38.8	45.4	53.5	54.9	56.7	46.8	41.7	43.3	22.5
pnb	-15.4	4.4	8.6	18.8	18.7	16.1	10.6	6.7	5.9	-1.8	-10.6
dc	-30.2	-12.9	-6.8	-6.1	-5.3	-4.9	-6.6	-10.3	-14.8	-18.5	-20.1

Tabla 1.6: Clasificación por kt en Rocha: rBIAS por hora

Hora	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
nb	51.3	61.4	62.9	72.5	77.7	78.3	70.1	69.1	69.1	74.8	69.0
pnb	43.5	36.1	37.8	38.2	43.1	41.3	35.8	33.8	36.4	39.1	45.9
dc	51.4	34.3	25.1	24.1	21.1	25.2	25.3	28.9	30.9	35.9	34.5

Tabla 1.7: Clasificación por kt en Salto: rRMSD por hora

Hora	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
nb	40.0	51.5	53.4	62.9	67.7	68.7	60.6	57.9	56.5	63.4	55.4
pnb	32.3	26.4	32.1	33.8	37.9	36.5	31.9	30.5	32.7	33.7	34.6
dc	33.8	19.7	12.4	11.1	10.0	13.1	14.9	17.2	18.2	21.8	21.4

Tabla 1.8: Clasificación por kt en Salto: rMAE por hora

Hora	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
nb	16.8	43.4	39.7	57.6	61.9	63.9	58.8	52.3	55.1	57.4	44.2
pnb	-22.3	0.2	8.9	11.5	9.7	23.9	17.7	20.7	8.5	6.2	-5.6
dc	-33.9	-19.6	-11.5	-7.9	-4.8	-6.1	-6.4	-9.8	-10.9	-11.4	-8.1

Tabla 1.9: Clasificación por kt en Rocha: rBIAS por hora

Apéndice 2

Imágenes complementarias

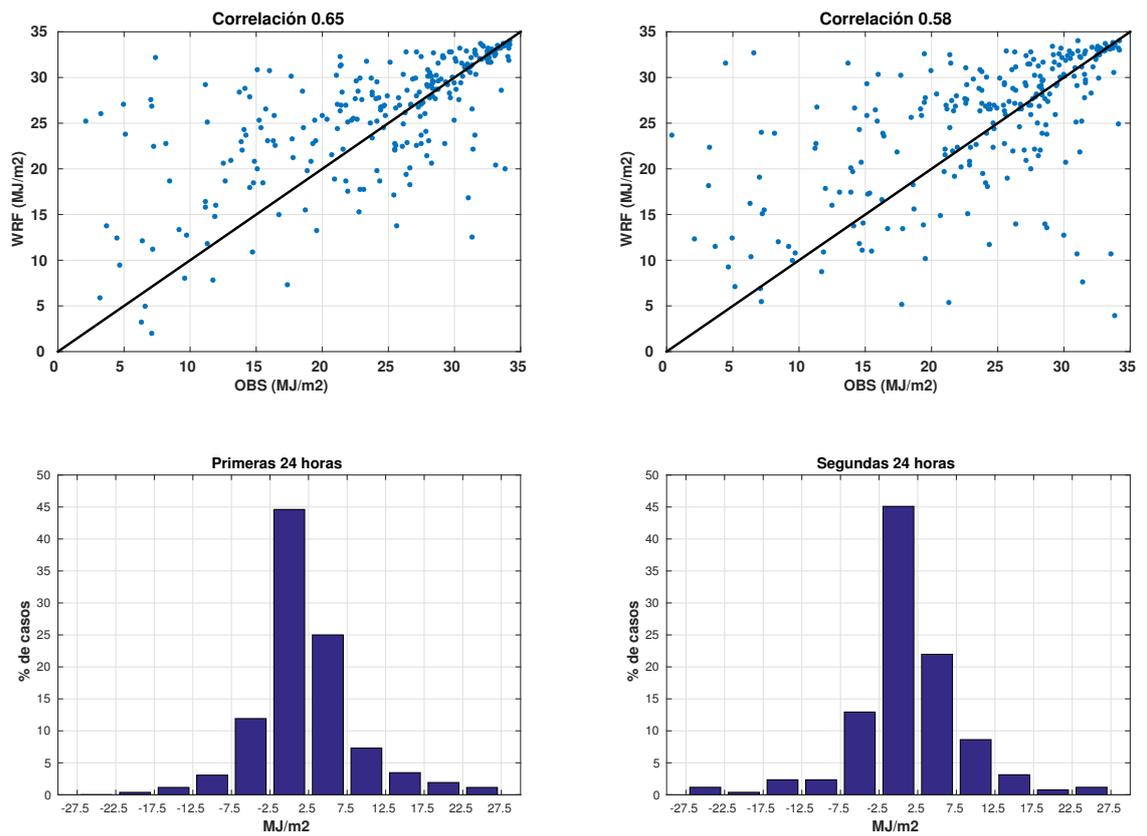


Figura 2.1: Histograma y scatter-plot en base diaria: Las Brujas

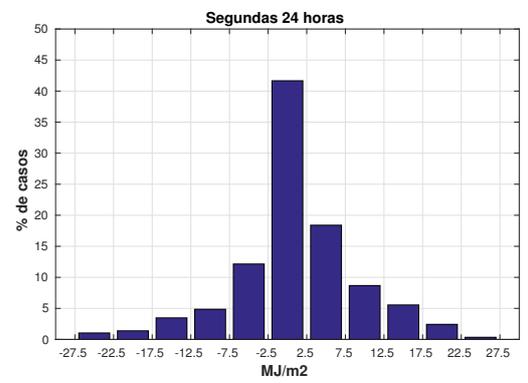
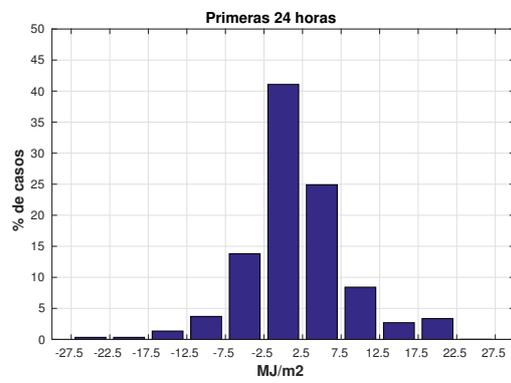
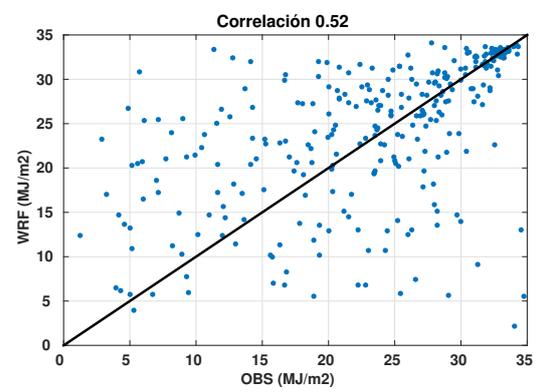
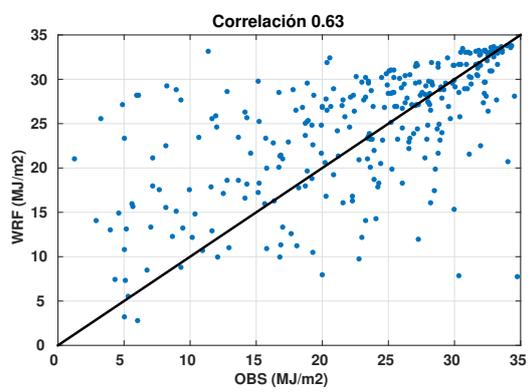


Figura 2.2: Histograma y scatter-plot en base diaria: Rocha

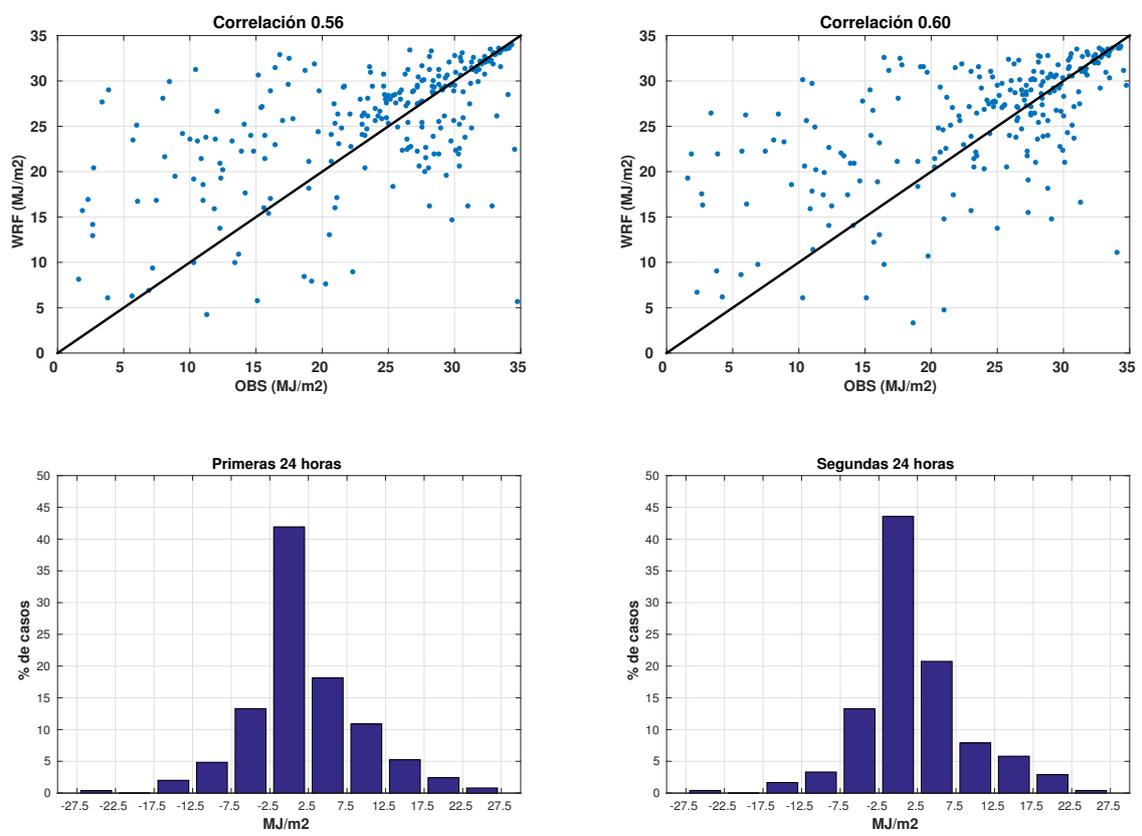


Figura 2.3: Histograma y scatter-plot en base diaria: Salto

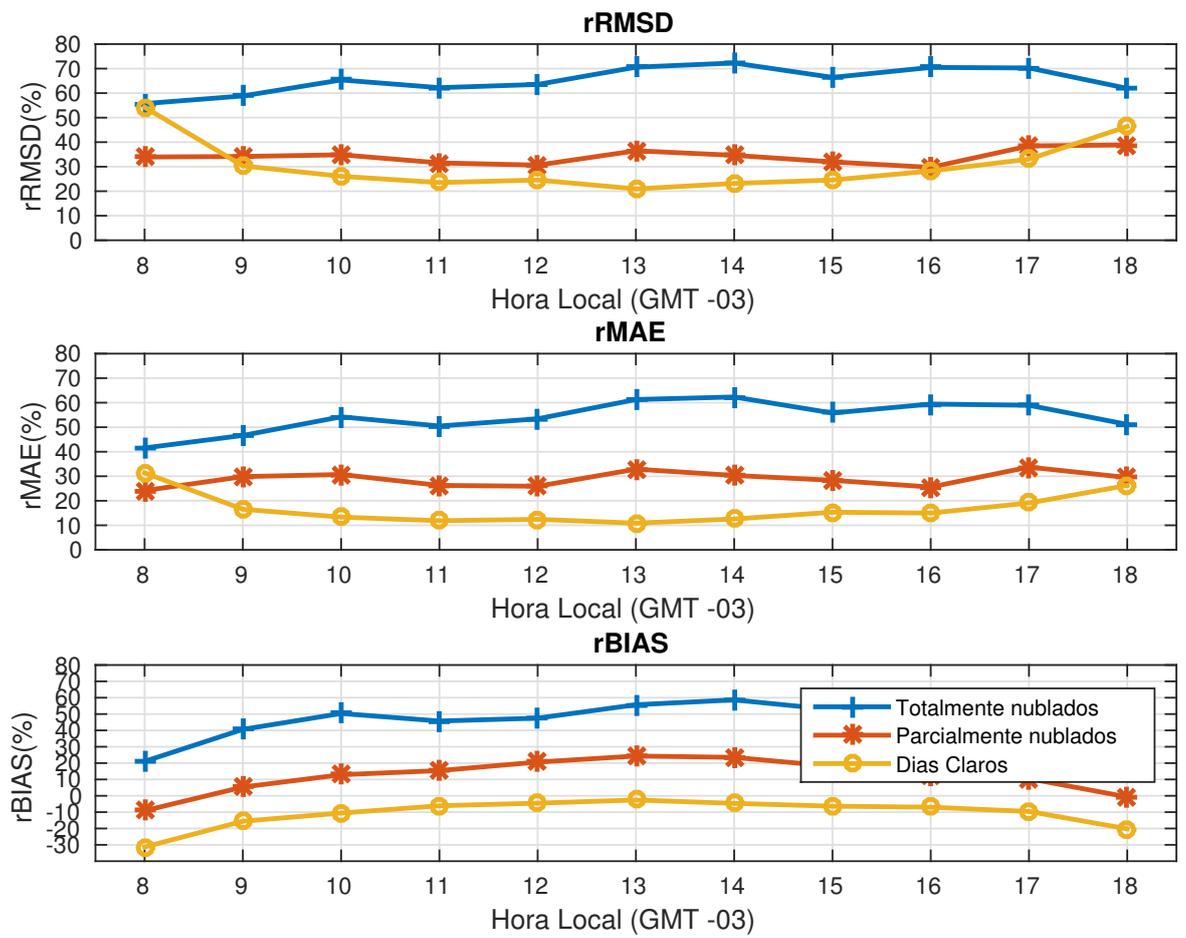


Figura 2.4: Scatter-plot por hora en Las Brujas.

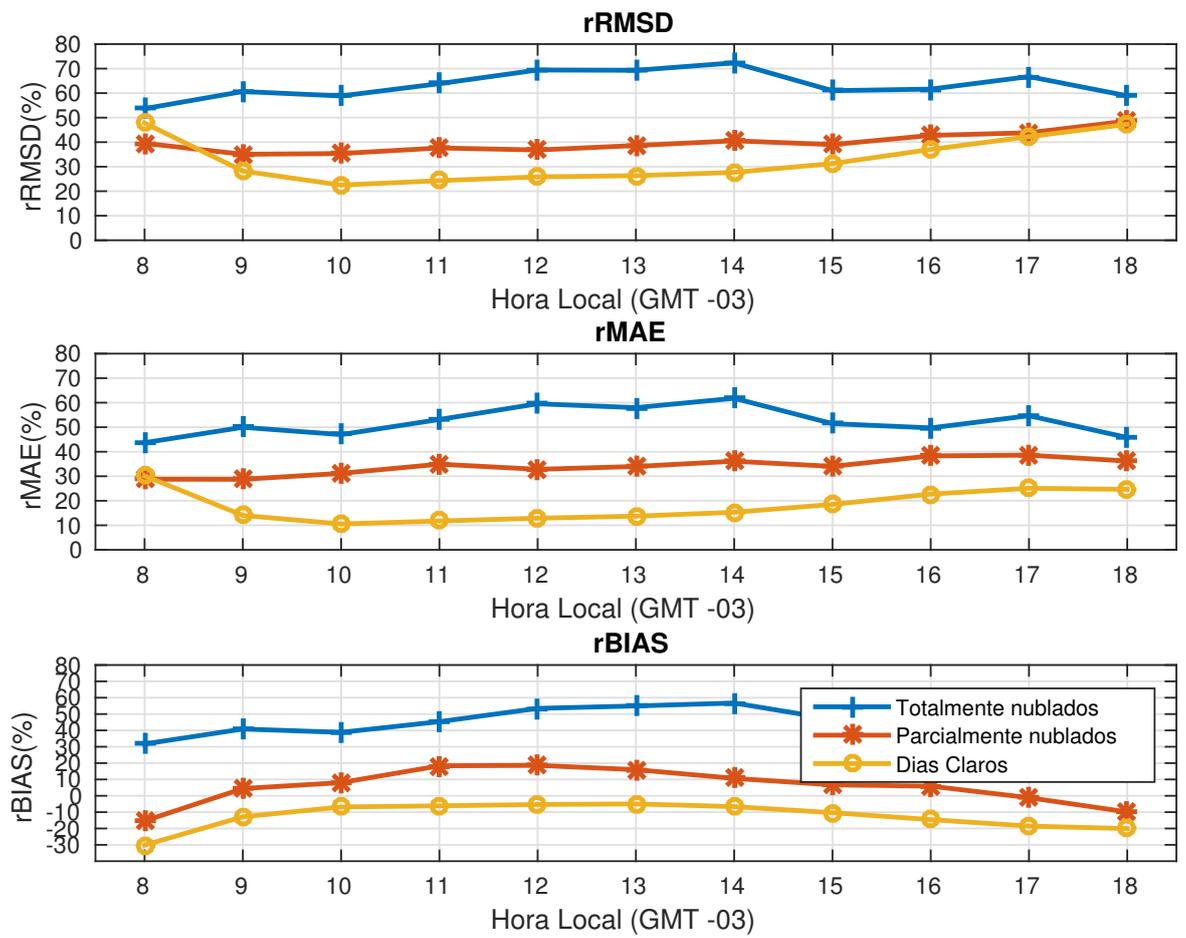


Figura 2.5: Scatter-plot por hora en Rocha.

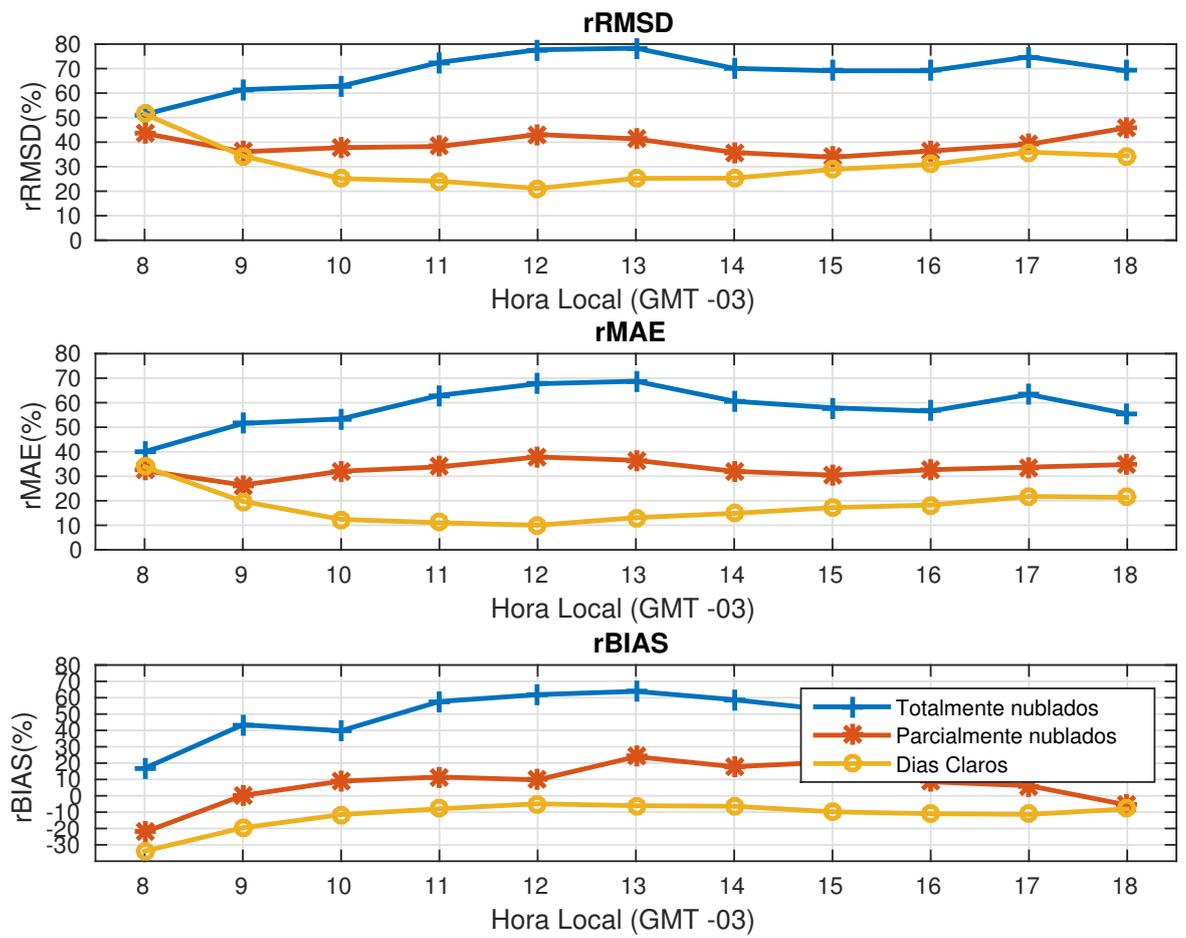


Figura 2.6: Scatter-plot por hora en Salto.

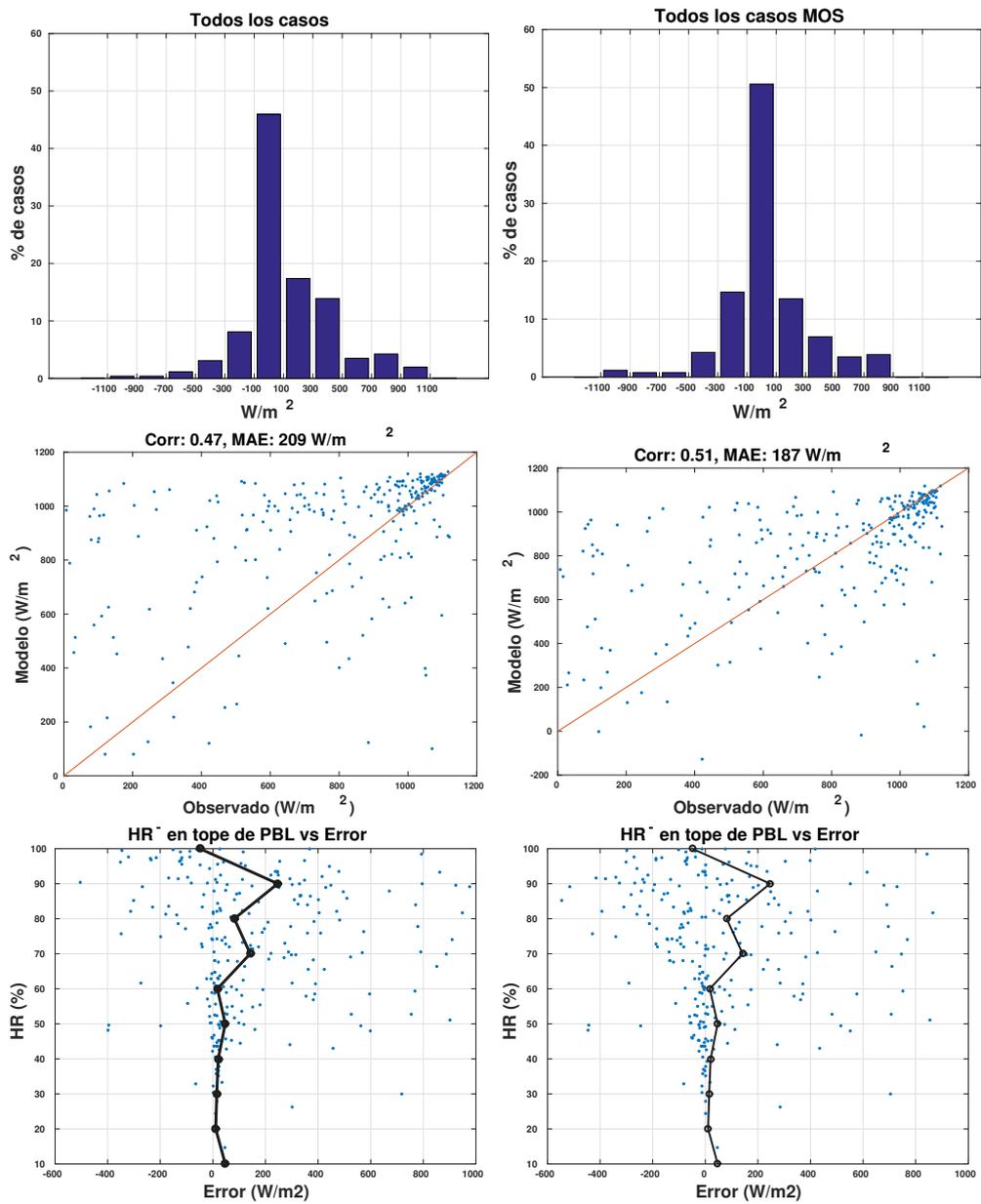


Figura 2.7: Histogramas, scatter, sin corrección (izq) con MOS (der) de todos los casos: Las Brujas.

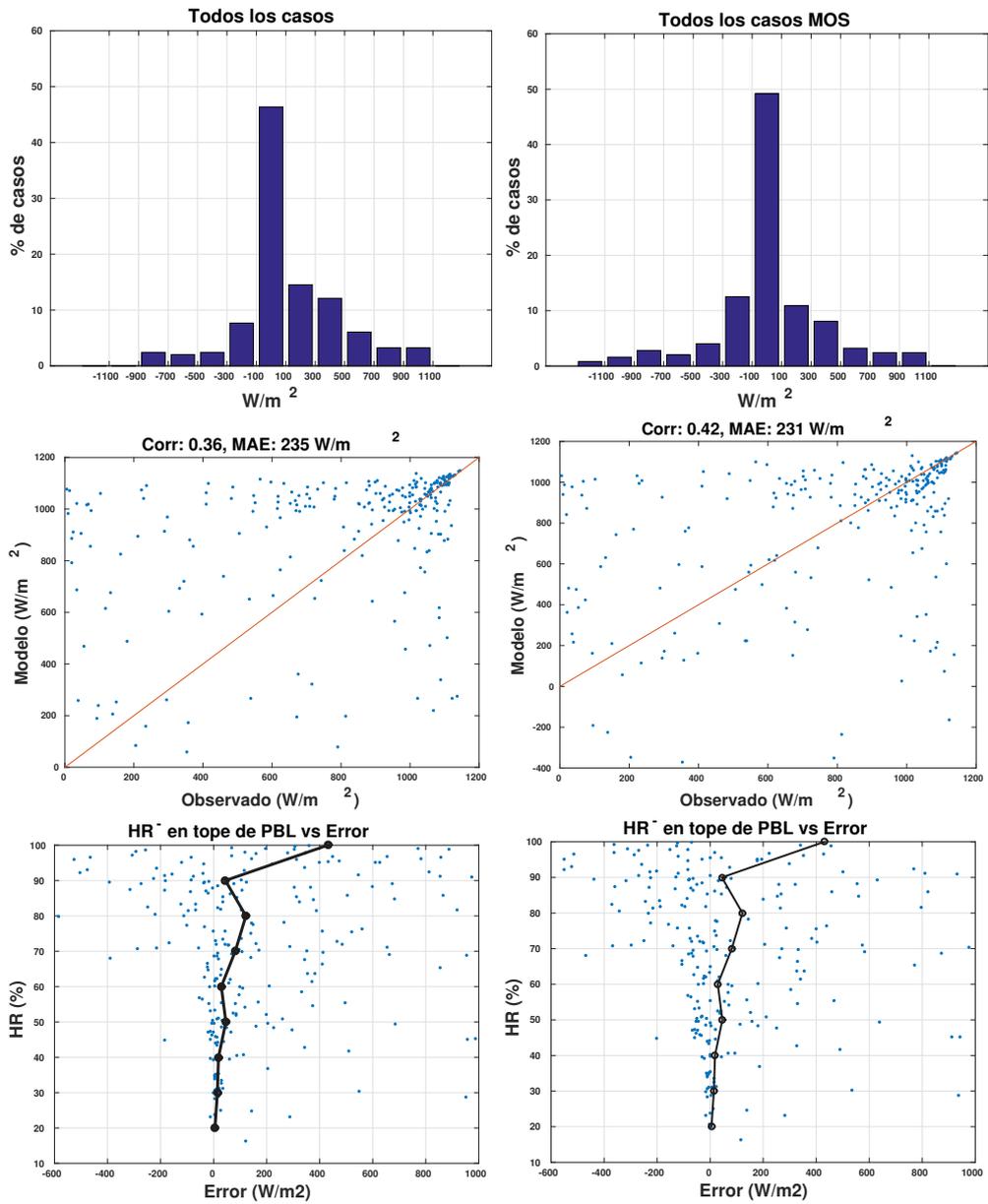


Figura 2.8: Histogramas, scatter, sin corrección (izq) con MOS (der) de todos los casos: Salto

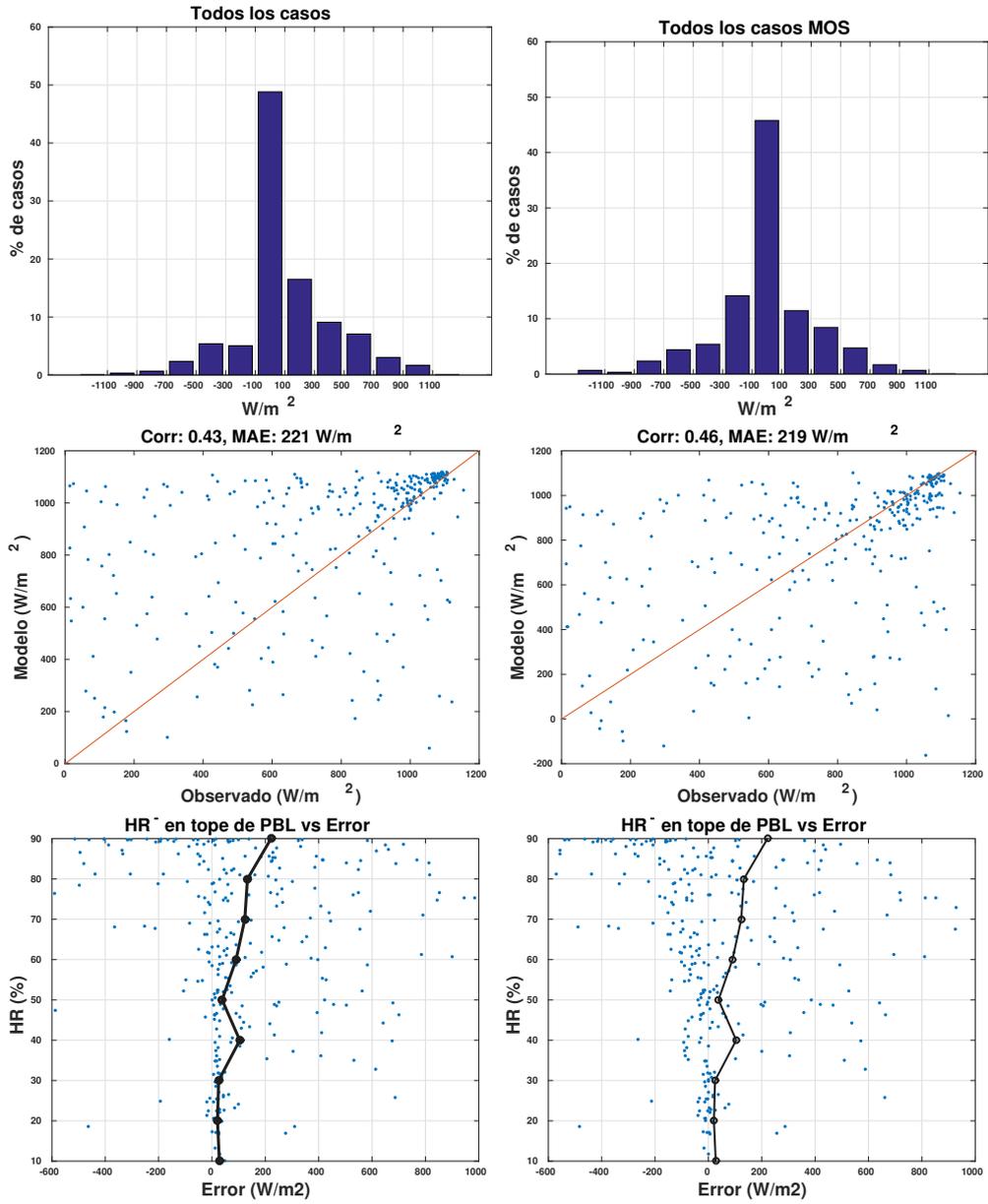


Figura 2.9: Histogramas, scatter, sin corrección (izq) con MOS (der) de todos los casos: Rocha