

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Evaluación de configuraciones de parametrización física
para la simulación numérica de temperatura y lluvia en el
Ecuador**

Proyecto de Investigación

Sebastián Peralta Almeida

Ingeniería Ambiental

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Ambiental

Quito, 22 de julio de 2016

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Evaluación de configuraciones de parametrización física para la simulación
numérica de temperatura y lluvia en el Ecuador**

Sebastián Peralta Almeida

Calificación:

Nombre del profesor

René Parra, Ph. D

Firma del profesor

Quito, 22 de julio de 2016

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Sebastián Peralta Almeida

Código: 102554

Cédula de Identidad: 1002603668

Lugar y fecha: Quito, julio de 2016

RESUMEN

La simulación numérica de la meteorología en el Ecuador se encuentra en una etapa preliminar, por lo que es prioritario evaluar los resultados obtenidos con diferentes configuraciones de parametrización de los procesos físicos. Con este objetivo, se simuló la meteorología de agosto de 2010 por medio del modelo Weather Research & Forecasting (WRF - V3.2), bajo 12 configuraciones que combinan opciones físicas para la Capa Superficial (CS), Suelo Superficial (SS), Capa Límite Planetaria (CLP) y esquema Convectivo - Cúmulo (CCU). Las simulaciones se desarrollaron con un dominio maestro y dos subdominios anidados. El segundo subdominio anidado circunscribe a todo el territorio continental del Ecuador y se conforma de una malla de 199 filas y 199 columnas, con celdas de 4 km de lado. Los resultados de la temperatura en superficie y lluvia fueron comparados con los registros de estaciones (14 para temperatura, 23 para precipitación) localizadas en la Costa, Sierra y Oriente; operadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Para la evaluación de la temperatura se usaron como indicadores estadísticos el Error Medio Absoluto (EMA, $< 2K$), Sesgo Medio (SM, entre -0.5 y 0.5). Para la evaluación de la precipitación se usaron el Error Medio Absoluto (EMA, $\leq 8mm$), Error Medio Cuadrático (EMC, $\leq 8mm$) y el Índice BRIER (IB, < 0.3). También se calculó el porcentaje de eficiencia del modelo (% eficiencia, ≥ 0.666). Los criterios de aceptación indican que las configuraciones 8 (SS=MM5 similarity, CS=5-layer thermal diffusion, CLP=Yonsei University scheme, CCU=Betts-Miller-Janjic scheme) y 9 (SS=MM5 similarity, CS=5-layer thermal diffusion, CLP=Yonsei University scheme, CCU= Grell 3d ensemble cumulus scheme) presentaron globalmente el mejor desempeño. Para la temperatura, el EMA fue valorado positivamente en 2 de 3 estaciones en la Costa, 5 de 8 en la Sierra y 2 de 3 en el Oriente. El SM fue valorado positivamente sólo en 4 de 14 estaciones. En cuanto a la lluvia, el EMA fue valorado positivamente en 21 de 23 estaciones (6 de 6 en la Costa, 13 de 13 en la Sierra y 2 de 4 en el Oriente). El EMC fue evaluado positivamente en 19 de 23 estaciones. El Índice BRIER indica un desempeño aceptable del modelo en 12 de 23 estaciones (5 de 6 en la Costa, 7 de 13 en la Sierra y 0 de 4 en el Oriente). El PE fue exitoso en 12 de 23 estaciones (5 de 6 en la Costa, 7 de 13 en la Sierra y 0 de 4 en el Oriente). Esta evaluación es preliminar y requiere ser complementada con estudios que cubran otros periodos temporales y variables meteorológicas.

Palabras clave: WRF, INAMHI, subdominio anidado, Costa, Sierra, Oriente

ABSTRACT

Numerical simulation of Ecuador's meteorology is currently at an early stage, making it a priority to evaluate the results obtained using different physical parameterization schemes. In consequence, August 2010's meteorology was simulated with the Weather Research & Forecasting (WRF – V3.2) model using 12 schemes that combine physical options for Surface Layer (SL), Land Surface (LS), Planetary Boundary Layer (PBL) and Cumulus Parameterization (Cu). The simulations were developed with one domain and two subdomains. The second subdomain circumscribes Ecuador's continental territory and is formed by a grid with 199 rows and 199 columns using 4 km side cells. Temperature and rain results were compared with meteorology station records (14 for temperature, 23 for rain) located on the Coast, Sierra and Amazon; operated by National Institute of Meteorology and Hydrology (INAMH). Temperature evaluation was performed using as statistical indicators the Mean Absolute Error (MAE, < 2K) and Mean BIAS (BIAS, between -0.5 and 0.5). Rain evaluation was performed using Mean Absolute Error (EMA, $\leq 8\text{mm}$), Mean Square Error (MSE, $\leq 8\text{mm}$) and BRIER Score (BS, < 0.3). Model efficiency was also calculated (% efficiency, ≥ 0.666). Acceptance criteria shows that schemes 8 (SL=MM5 similarity, LS=5-layer thermal diffusion, PBL=Yonsei University scheme, Cu=Betts-Miller-Janjic scheme) and 9 (SL=MM5 similarity, LS=5-layer thermal diffusion, PBL=Yonsei University scheme, Cu= Grell 3d ensemble cumulus scheme) presented the best overall performance. For temperature evaluation, MAE was positively assessed in 2 of 3 Coast stations, 5 of 8 Sierra stations and 2 of 3 Amazon stations. BIAS was positively assessed in 4 of 14 stations. For rain evaluation, MAE was positively assessed in 21 of 23 stations (6 of 6 in the Coast, 13 of 13 in the Sierra and 2 of 4 in the Amazonia). MSE was positively assessed in 19 of 23 stations. Brier Score shows an acceptable performance in 12 of 23 stations (5 of 6 in the Coast, 7 of 13 in the Sierra and 0 of 4 in the Amazon). Model efficiency was successful in 12 of 23 stations (5 of 6 in the Coast, 7 of 13 in the Sierra and 0 of 4 in the Amazon). This is a preliminary evaluation and it requires new studies that cover other temporal periods and meteorological variables.

Key words: WRF, INAMHI, subdomain, Coast, Sierra, Amazon

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
Justificación.....	13
Objetivos.....	13
General.....	13
Específicos	13
DESARROLLO.....	15
Marco Teórico.....	15
Método	19
Análisis Estadístico.....	26
Resultados y Discusión.....	29
CONCLUSIONES	56
Recomendaciones	59
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de modelos atmosféricos según su escala espacial	16
Tabla 2: Parámetros de simulación meteorológica para el territorio continental del Ecuador	19
Tabla 3: Configuración de esquemas utilizados en la simulación de la meteorología en el Ecuador mediante el modelo Weather Research & Forecasting (WRF V3.2)	20
Tabla 4: Estaciones meteorológicas con registros de temperatura para agosto del 2010.....	23
Tabla 5: Estaciones meteorológicas con registros de precipitación para agosto del 2010	25
Tabla 6: Número de estaciones que cumplen con los estadísticos de temperatura para agosto del 2010	29
Tabla 7: Resultados de la evaluación del EMA para temperatura en el Ecuador	31
Tabla 8: Resultados de la evaluación del SM para temperatura en el Ecuador	33
Tabla 9: Número de estaciones que cumplen con los estadísticos de precipitación diaria para agosto del 2010	35
Tabla 10: Resultados de la evaluación del EMA para precipitación en el Ecuador	37
Tabla 11: Resultados de la evaluación del EMC para precipitación en el Ecuador.....	39
Tabla 12: Resultados de la evaluación del IB para precipitación en el Ecuador	41
Tabla 13: Resultados de la evaluación del PE para precipitación en el Ecuador	42
Tabla 14: Comparación entre configuraciones de referencia V3.2, configuraciones 8 y 9 del presente estudio, y configuraciones utilizadas en estudios realizados en México, Colombia y Argentina	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Procesos físicos que se dan cerca de la superficie que suelen parametrizarse.....	17
Figura 2: Dominios de simulación meteorológica para el territorio continental del Ecuador	19
Figura 3: Localización de las estaciones meteorológicas operadas por el INAMHI que se consideraron para la evaluación de la temperatura	24
Figura 4: Localización de las estaciones meteorológicas operadas por el INAMHI que se consideraron para la evaluación de la precipitación.....	25
Figura 5: Comparación de temperatura media medida en la estación “Guayaquil U. Estatal” con los datos obtenidos por las 12 configuraciones del modelo y su promedio (Agosto 2010).....	44
Figura 6: Comparación por grupos de precipitación acumulada medida en la estación “Guayaquil U. Estatal” con los datos obtenidos por las 12 configuraciones del modelo y su promedio (Agosto 2010)	45
Figura 7: Comparación de temperatura media medida en la estación “Quito INAMHI- Iñaquito” con los datos obtenidos por las 12 configuraciones del modelo y su promedio (Agosto 2010)	46
Figura 8: Comparación por grupos de precipitación acumulada medida en la estación “Quito INAMHI-Iñaquito” con los datos obtenidos por las 12 configuraciones del modelo y su promedio (Agosto 2010).....	48
Figura 9: Comparación de temperatura media medida en la estación “Nuevo Rocafuerte” con los datos obtenidos por las 12 configuraciones del modelo y su promedio.....	49
Figura 10: Comparación por grupos de precipitación acumulada medida en la estación “Nuevo Rocafuerte” con los datos obtenidos por las 12 configuraciones del modelo y su promedio (Agosto 2010).....	51

Este proyecto de investigación fue presentado en el Congreso Anual de Meteorología y Calidad del Aire (CAMCA 2016) del 28 y 29 de abril del 2016, desarrollado en la Universidad San Francisco de Quito

INTRODUCCIÓN

Los modelos son representaciones de sistemas reales y de las relaciones que existen entre elementos que conforman los sistemas. Los modelos sirven para entender los procesos que gobiernan un sistema.

Los modelos se clasifican en tres categorías: físicos, analíticos y numéricos (Steyn y Galmarini, 2008). Los modelos físicos son representaciones a pequeña escala del sistema. Los modelos analíticos y numéricos relacionan variables mediante un sistema de ecuaciones matemáticas, con propiedades y magnitudes ambientales. Éstos se diferencian en que los primeros utilizan ecuaciones que se resuelven analíticamente, mientras que los segundos utilizan ecuaciones que se resuelven de manera numérica.

Uno de los sistemas ambientales que se ha estudiado por medio de modelos es el sistema climático, el cual consiste de 5 componentes: la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la geosfera y la biosfera (IPCC, 2001).

Para estudiar la atmósfera, se utilizan ciencias como la meteorología y la climatología; que buscan entender su comportamiento a corto y largo plazo, respectivamente (McDaniel et al., 2012). Estas ciencias se apoyan en modelos, con el fin de describir y predecir el comportamiento de parámetros como la temperatura, la precipitación, la humedad, o la velocidad y dirección del viento. Para estudiar la meteorología, se utilizan modelos numéricos con el fin de obtener estimaciones de las condiciones a corto plazo de la atmósfera. Entre los modelos más utilizados para el pronóstico de la meteorología a escala global, se encuentran el Global Forecast System (GFS), operado por el National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos; el Integrated Forecast System (IFS), desarrollado por el European Centre for

Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) de Inglaterra; el Global Environmental Multiscale Model (GEM), desarrollado por el Centre de Recherche en Prévision Numérique (RPN) y el Canadian Meteorological Centre (CMC) de Canadá; el North American Ensemble Forecast System (NAEFS), desarrollado de manera conjunta entre el United States National Weather Service (NWS), el Meteorological Service of Canada (MSC) y el National Meteorological Service of Mexico (NMSM) (OpenWeatherMap, 2016). Para escalas más pequeñas como la mesoescala, se utilizan el Mesoscale Model 5 (MM5), el Weather Research and Forecasting (WRF), y el Regional Atmospheric Soaring Prediction (RASP) (OpenWeatherMap, 2016). Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA), se espera que en los próximos años, el modelado meteorológico en tiempo real se base en el modelo WRF (EPA, 2015). Este modelo es considerado como la evolución del MM5, y es un sistema numérico para investigación y pronóstico atmosféricos (WRF, 2016).

En el Ecuador, se han utilizado modelos como el sistema regional PRECIS, el modelo japonés TL959 y el ETA, para describir los diferentes escenarios de cambio climático (MAE, 2013), (Muñoz, 2010). Estos modelos describen el clima en términos de precipitación y temperatura, realizando una comparación con la base de datos CRU de la East Anglia University. El modelo WRF ha empezado a ser utilizado con fines de investigación y de pronóstico. En el ámbito de la investigación, *Cárdenas (2013)* ha automatizado el uso del modelo empleando herramientas de software libre; *Parra y Páez (2006)* han utilizado el modelo WRF como base para simular la calidad del aire en el Distrito Metropolitano de Quito; *Izurieta y Zambrano (2012)* han utilizado el modelo para analizar las variables meteorológicas para el proyecto Plataforma de Gran Altitud en Ambato; *Palacios et al. (2009)* utilizaron el modelo para estudiar la atmósfera ecuatorial, empleando perfiles

verticales de la velocidad del viento; *Gualán y Solano (2014)* estudiaron la escalabilidad del modelo en un equipo de alto rendimiento computacional (HPC), tomando en cuenta el número de procesadores, nodos, comunicaciones y librerías; y *Parra (2012)* ha realizado una evaluación preliminar sobre la temperatura media en superficie en el Ecuador, mediante la simulación de la meteorología del año 2010. En relación al pronóstico, el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), utiliza el modelo para predecir la meteorología en el país a diferentes escalas de tiempo, y para generar mapas diarios de precipitación, temperatura, humedad y viento (INAMHI, 2016). Además, la USFQ emplea el modelo WRF como generador de los campos de viento y otras variables, y para pronosticar la dispersión y sedimentación de ceniza proveniente del volcán Tungurahua (USFQ, 2016).

Los modelos numéricos tienen un papel importante en la meteorología, ya que los registros están disponibles solo en aquellos lugares donde hay estaciones meteorológicas (Stensrud, 2007). Las actividades de gestión e investigación requieren de información meteorológica con mayor alcance espacial, en relación a la que proporcionan las estaciones, por lo que los modelos se han convertido en una herramienta muy útil para complementar la información en los lugares en donde no hay registros directos (Parra, 2012). Además, los modelos meteorológicos son claves a la hora de tomar decisiones sobre actividades cotidianas, o sobre temas relacionados con el estado actual y futuro de la atmósfera (Stensrud, 2007).

Uno de los componentes más importantes de los modelos numéricos meteorológicos son los esquemas de parametrización. Estos esquemas determinan por ejemplo la cantidad de energía solar que llega a la superficie del planeta; la evolución de la capa límite planetaria; la producción de lluvia cuando hay movimientos convectivos a una escala de

menor tamaño que la resolución espacial de la simulación; determinan la influencia a escala subcuadrícula que tiene la orografía en la atmósfera; y la influencia de la topografía en la dinámica de la atmósfera (Stensrud, 2007).

Justificación

La identificación de los esquemas de parametrización que presentan el mejor desempeño, constituye una actividad clave en la aplicación de los modelos meteorológicos en una región en particular. Esta actividad no se ha desarrollado todavía en el Ecuador.

Objetivos

General

Identificar la configuración de parámetros para la simulación meteorológica, cuyos resultados reproduzcan de la mejor manera los registros de temperatura y lluvia en estaciones localizadas en las zonas de la Costa, Sierra y Oriente del Ecuador.

Específicos

-Identificar la configuración de parámetros cuyos resultados reproduzcan de la mejor manera los registros de temperatura y lluvia, por región (Costa, Sierra y Oriente) en el Ecuador.

-Identificar si hay una configuración única que proporciona los mejores resultados tanto para las zonas de la Costa, Sierra y Oriente en el Ecuador.

DESARROLLO

Marco Teórico

El sistema atmosférico está gobernado por leyes físicas que se pueden describir mediante un conjunto complejo de ecuaciones que no pueden ser resueltas analíticamente. Por este motivo, los modelos meteorológicos se expresan mediante ecuaciones equivalentes que pueden ser resueltas numéricamente, aprovechando la gran capacidad de cálculo que actualmente tienen los ordenadores (Llebot, 2009).

Los modelos meteorológicos pueden clasificarse según el sistema de referencia y según su escala espacial. En relación al sistema de referencia, los modelos se clasifican en eulerianos y lagrangianos. Los eulerianos usan un sistema de coordenadas fijo, y la región a modelar se divide en celdas verticales u horizontales, que se ordenan dentro de una malla en tres dimensiones. Los lagrangianos utilizan un sistema de coordenadas que se ajusta al movimiento atmosférico, basándose en un volumen de aire determinado que cambia su posición según la velocidad y dirección del viento (INECC, 2014).

Un aspecto importante de los modelos eulerianos es la resolución espacial, que define el tamaño de las celdas. Mientras más alta sea la resolución espacial, en principio el modelo reproduce de mejor manera los registros de las estaciones meteorológicas. No obstante, mientras más alta sea la resolución espacial, se requieren mayores recursos computacionales (UCAR, 2008). En centros de diferentes países, se generan pronósticos con alta resolución espacial bajo la disponibilidad de una mayor capacidad de cómputo (Matsudo et al., 2013). La Tabla 1 indica la clasificación de los modelos, en función de su escala espacial.

Tabla 1: Clasificación de modelos atmosféricos según su escala espacial

Modelo	Dominio Típico	Resolución Espacial Típica
Microescala	200 x 200 x 100 m	5 m
Mesoescala	100 x 100 x 5 km	2 km
Regional	1000 x 1000 x 10 km	20 km
Sinóptico	3000 x 3000 x 20 km	80 km
Global	65000 x 65000 x 20 km	5° x 5°

Fuente: (Seinfeld y Pandis, 1998)

En simulaciones meteorológicas a mesoescala, con resoluciones espaciales típicas de hasta 2 km, hay fenómenos que no pueden ser representados explícitamente por los modelos numéricos. Por ejemplo, la formación convectiva de nubes pequeñas, con tamaños menores a 2 km.

La parametrización se refiere a la técnica por la cual los procesos físicos que se desarrollan a una escala menor a la resolución espacial, se representan por medio de sus efectos (Stensrud, 2007). Los esquemas de parametrización son importantes porque afectan directamente en los resultados de los modelos, y además porque interactúan unos con otros. Estos esquemas solo describen los aspectos esenciales de los procesos físicos que representan, ya que en general constituyen simplificaciones, por la dificultad de reproducir completamente el proceso al que representan (Stensrud, 2007). La parametrización es un método de emular los efectos de un proceso en lugar de modelar el efecto en sí mismo (Corrales et al., 2013). Existe una variedad de parametrizaciones que sirven para describir la

capa límite planetaria y difusión turbulenta, los procesos convectivos, la radiación, las nubes, la relación entre superficie terrestre-atmósfera, suelo-vegetación-atmósfera, agua superficial-atmósfera, y la microfísica de la atmósfera (Stensrud, 2007). La Figura 1 indica algunos de los procesos físicos que se dan cerca de la superficie, que suelen ser parametrizados.

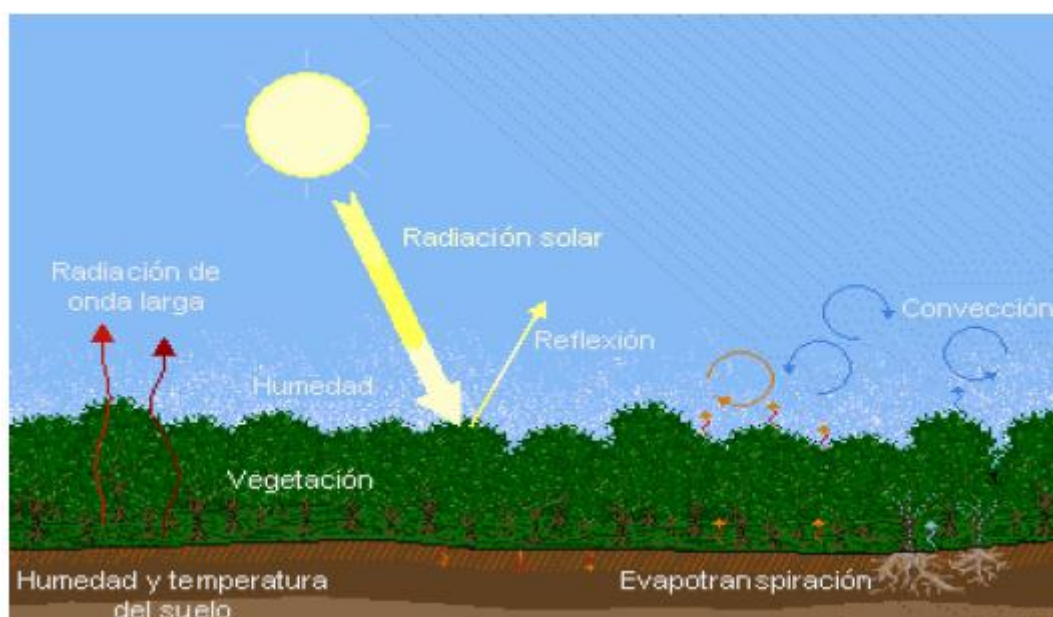


Figura 1: Procesos físicos que se dan cerca de la superficie que suelen parametrizarse

Fuente: (Corrales et al., 2013)

Los modelos han mostrado una creciente capacidad para simular de mejor manera la meteorología (Gates et al., 1992). Los resultados de los modelos necesitan ser evaluados para determinar si reproducen de manera aceptable, la magnitud y comportamiento de las variables meteorológicas, mediante la comparación con registros de estaciones de monitoreo. Para este propósito se pueden utilizar indicadores estadísticos. Al aplicar un análisis estadístico para evaluar el desempeño de un modelo, se utilizan parámetros para cuantificar que tan bien el modelo se ajusta a las observaciones (EEA, 2011). Existen varios estudios sobre validación de modelos meteorológicos alrededor del mundo, que proponen y

usan una diversidad de indicadores estadísticos. Se han propuesto grupos de estadísticos para evaluar parámetros meteorológicos como la velocidad y dirección del viento, la temperatura y humedad (Emery et al., 2001), (Tesche, 2002), (Léon y Zea, 2001). El *WCRP* (2015), Ruiz (2008), y Matsudo et al. (2013), han propuesto estadísticos para evaluar la precipitación en términos probabilísticos. Corrales et al. (2014) y Rau y Condom (2010), han propuesto estadísticos para evaluar la precipitación de manera cuantitativa. La evaluación de los modelos meteorológicos se basa en la comparación entre un par de valores (valor observado vs. valor modelado); y según la variable y aplicación de los resultados, se aplican diferentes estadísticos (EEA, 2011).

Los registros provienen de las mediciones realizadas en las estaciones meteorológicas. En el Ecuador, el INAMHI es la entidad encargada de proporcionar este tipo de información a nivel nacional. Adicionalmente, el INAMHI es el ente oficial para el suministro de información sobre la meteorología, el clima y los recursos hídricos (INAMHI, 2016). Actualmente la mencionada entidad opera 377 estaciones meteorológicas, entre convencionales y automáticas.

El modelo WRF es utilizado alrededor del mundo, tanto para investigación como para pronóstico (Arango y Ruiz, 2011). Se utiliza para un amplio rango de aplicaciones meteorológicas a través de escalas desde los 10 m, hasta los 1000 km (WRF, 2016). El modelo WRF incorpora varias alternativas de esquemas físicos, opciones numéricas y dinámicas, rutas de inicialización y paquetes de asimilación de datos (Skamarock, 2008).

Método

Se utilizó el modelo WRF (ARW) versión 3.2 para simular la meteorología del Ecuador durante agosto del 2010 por medio de un dominio maestro y dos subdominios anidados (Figura 2).

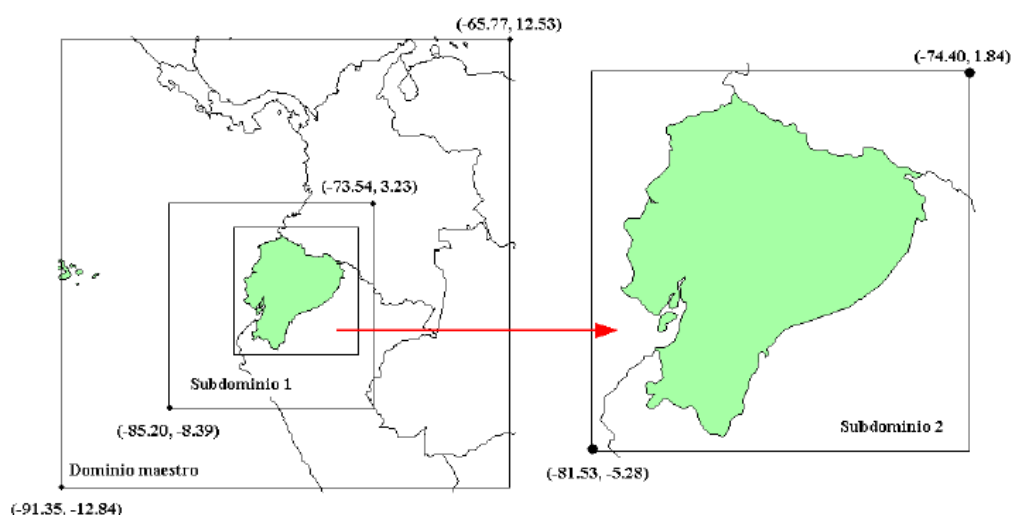


Figura 2: Dominios de simulación meteorológica para el territorio continental del Ecuador
Fuente: (Parra, 2012)

Las condiciones iniciales de contorno se generaron a partir de la base de datos de análisis final (NCEP-FNL) del National Center for Atmospheric Research de los Estados Unidos (Parra, 2012). Los archivos de análisis final se generaron por el Global Data Assimilation System (GDAS). La Tabla 2 indica la configuración de dominios para las simulaciones meteorológicas.

Tabla 2: Parámetros de simulación meteorológica para el territorio continental del Ecuador

Parámetro	Dominio Maestro	Subdominio 1	Subdominio 2	Observaciones
e_we	80	109	199	Número de celdas horizontales
e_sn	80	109	199	Número de celdas verticales
e_vert	26	26	26	Número de niveles verticales
Dx	36	12	4	Dimensión horizontal de celda (km)
Dy	36	12	4	Dimensión vertical de celda (km)

Fuente: (Parra, 2012)

En el presente proyecto, se utilizó el software *QGIS versión 2.8.2* para georeferenciar las estaciones meteorológicas del INAMHI que se consideraron para la evaluación de la temperatura y la precipitación, dentro del subdominio del modelo que cubre la zona del Ecuador continental. Este subdominio se conforma por una malla de 199 filas x 199 columnas con celdas de 4 km de lado. Con la ubicación de cada estación en su respectiva celda dentro de la malla, se procedió a realizar simulaciones para los primeros 27 días de agosto del 2010. Se emplearon 12 configuraciones de parametrización física para realizar la simulación meteorológica. Las características de cada configuración se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Configuración de esquemas utilizados en la simulación de la meteorología en el Ecuador mediante el modelo Weather Research & Forecasting (WRF V3.2)

Opciones físicas	Configuraciones											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sf_sfclay_physics	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
Sf_surface_physics	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
Bl_pbl_physics	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
Cu_physics	1	2	5	1	2	5	1	2	5	1	2	5

Sf_sfclay_physics: Surface layer (1 MM5 similarity, 2 Eta similarity).

Sf_surface_physics: Land surface (1 5-layer thermal diffusion, 2 Noah Land Surface Model)

Bl_pbl_physics: Planetary Boundary Layer (1 Yonsei University scheme, 2 Mellor-Yamada-Janjic scheme)

Cu_physics: Cumulus Parameterization (1 Kain-Fritsch scheme, 2 Betts-Miller-Janjic scheme, 5 Grell 3d ensemble cumulus scheme)

Todas las simulaciones se desarrollaron manteniendo fijas las siguientes opciones físicas:

- Mp_physics (microphysics) = 16 (Double-Moment 6-class scheme)

- Ra_lw_physics (longwave radiation) = 1 (Rapid Radiative Transfer Model, RRTM)
- Ra_sw_physics (shortwave radiation) =1 (Dudhia scheme)

A más de las 12 configuraciones, se construyó un escenario adicional, que corresponde al promedio de los resultados de las 12 configuraciones anteriores.

Como se puede apreciar en la Tabla 3, se variaron las opciones físicas de los esquemas de parametrización para la capa superficial, suelo superficial, capa límite planetaria y para el esquema convectivo-cúmulo. Los esquemas de capa superficial (Surface layer) calculan las velocidades de fricción y los coeficientes de intercambio de los flujos de calor superficial y de humedad (Skamarock et al., 2008). Para el presente proyecto, se utilizaron dos esquemas: el *MM5* y el *Eta*. El esquema *MM5*, utiliza funciones de estabilización para calcular los coeficientes de calor, humedad y momento. El esquema *Eta*, incluye parametrizaciones para una subcapa viscosa (Skamarock et al., 2008).

Los esquemas de suelo superficial (Land surface) introducen en el modelo las interacciones entre el suelo, la superficie, la vegetación, y la atmósfera (García, 2014). Para el presente proyecto, se utilizaron dos esquemas: *5-layer thermal diffusion*, y *Noah Land Surface Model*. En el modelo *5-layer thermal diffusion*, las capas del suelo tienen un grosor de 16 cm, y los requerimientos energéticos incluyen radiación y flujo de calor latente y sensible. El modelo *Noah Land Surface* divide al suelo en 4 capas con grosores de 10 cm, 30 cm, 60 cm y 100 cm, hasta una profundidad de 2 m. Incluye la zona donde se encuentran las raíces, y se generan los procesos de evapotranspiración y drenaje tomando en cuenta la vegetación y textura del suelo (Skamarock et al., 2008).

La capa límite planetaria (Planetary Boundary Layer) es aquella que interacciona directamente con la superficie del planeta. Este tipo de esquemas son responsables de representar los flujos verticales turbulentos de calor, momento y humedad dentro de la capa límite planetaria, y a través de la atmósfera (Skamarock et al., 2008). Para el presente proyecto, se utilizaron dos esquemas de capa límite planetaria: *Yonsei University* y *Mellor-Yamada-Janjic*. El *Yonsei University* es un esquema de primer orden que usa coeficientes de difusión turbulenta no locales para el cálculo de los flujos turbulentos (García, 2014). El *Mellor-Yamada-Janjic* es un esquema de cierre local donde se utiliza ecuaciones de los flujos de calor y humedad (García, 2014).

Los esquemas convectivo-cúmulo (Cumulus parameterization) simulan los efectos a escala sub-cuadrícula en las nubes convectivas y/o superficiales, y proporcionan información sobre la precipitación dentro de las celdas de la cuadrícula (Skamarock et al., 2008). Para el presente proyecto, se utilizaron tres esquemas convectivo-cúmulo: *Kain-Fritsch scheme*, *Betts-Miller-Janjic scheme* y *Grell 3d ensemble cumulus scheme*. El *Kain-Fritsch* es un esquema de flujo de masa que utiliza un modelo simple para las nubes y la microfísica (Skamarock et al., 2008). El *Betts-Miller-Janjic* es un esquema de control de capa profunda que elimina la energía potencial disponible para la convección, sin tener en cuenta el forzamiento superficial (García, 2014). El *Grell 3d ensemble cumulus* es un esquema que se distingue de los demás en que permite que se propaguen los efectos entre las celdas vecinas en la malla, haciendo el método más apropiado para tamaños de cuadrícula menores a 10 km (Skamarock et al., 2008).

Posteriormente, se realizó la evaluación de los resultados del modelo para los parámetros de temperatura y precipitación; utilizando registros provenientes de las estaciones meteorológicas del INAMHI para agosto del año 2010. Estos datos fueron obtenidos a partir de 14 estaciones para temperatura, y de 23 estaciones para precipitación. Dichas estaciones se distribuyen en las 3 regiones del Ecuador continental: Costa, Sierra y Oriente. La Tabla 4 y la Figura 3, muestran en detalle las estaciones meteorológicas consideradas para la evaluación de la temperatura.

Tabla 4: Estaciones meteorológicas con registros de temperatura para agosto del 2010

TEMPERATURA		
COSTA	SIERRA	ORIENTE
1- Julcuy 2- Santa Elena-Universidad 3- Guayaquil U. Estatal	4- San Vicente de Pusir 5- Quito INAMHI-Iñaquito 6- Papallacta 7- Pilalo 8- Calamaca Convenio INAMHI HCPT 9- Cañar 10- Pucara-Colegio Tec. Agrop. 11- Zapotillo	12- Lumbaqui 13- Nuevo Rocafuerte 14- Macas San Isidro-PNS

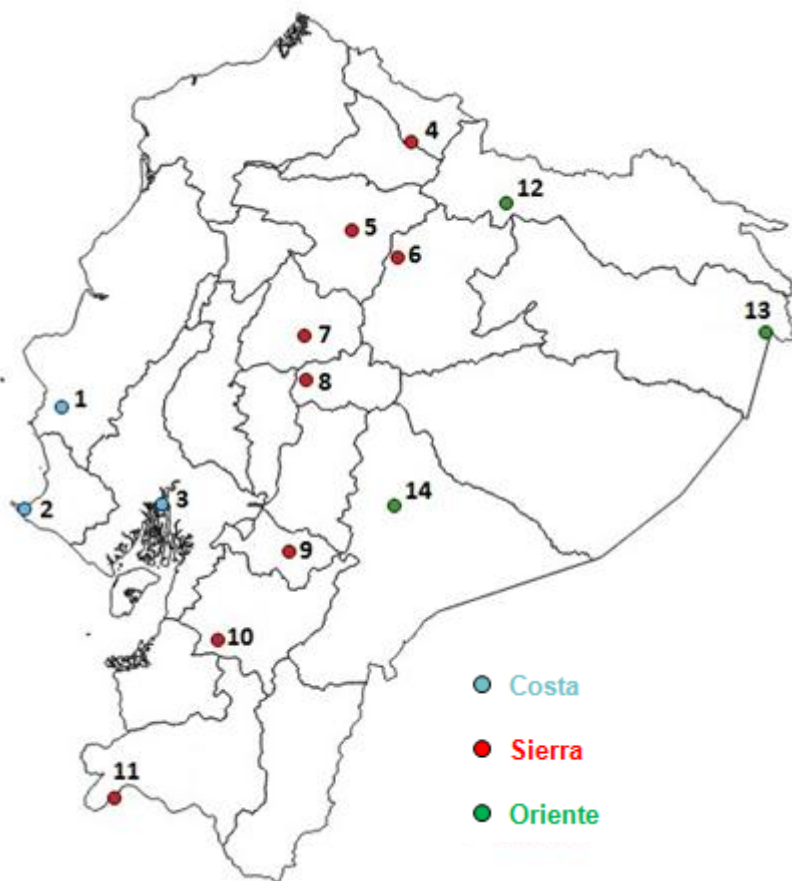


Figura 3: Localización de las estaciones meteorológicas operadas por el INAMHI que se consideraron para la evaluación de la temperatura

La Tabla 5 y la Figura 4, muestran en detalle las estaciones meteorológicas consideradas para la evaluación de la precipitación.

Tabla 5: Estaciones meteorológicas con registros de precipitación para agosto del 2010

PRECIPITACIÓN		
COSTA	SIERRA	ORIENTE
1- Bahía de Caráquez-PUCE	7- Ambuquí	20- Lumbaqui
2- Julcuy	8- Topo-Imbabura (Angla)	21- Chonta Punta
3- Vinces INAMHI	9- Cayambe	22- Nuevo Rocafuerte
4- Santa Elena-Universidad	10- Calderón	23- Macas San Isidro-PNS
5- Guayaquil U. Estatal	11- Quito INAMHI-Iñaquito	
6- Isla Puna Sector Bellavista	12- Papallacta	
	13- Loreto Pedregal	
	14- Pilalo	
	15- Calamarca Convenio INAMHI HCPT	
	16- Cebadas	
	17- Cañar	
	18- Pucara-Colegio Tec. Agrop.	
	19- Zapotillo	

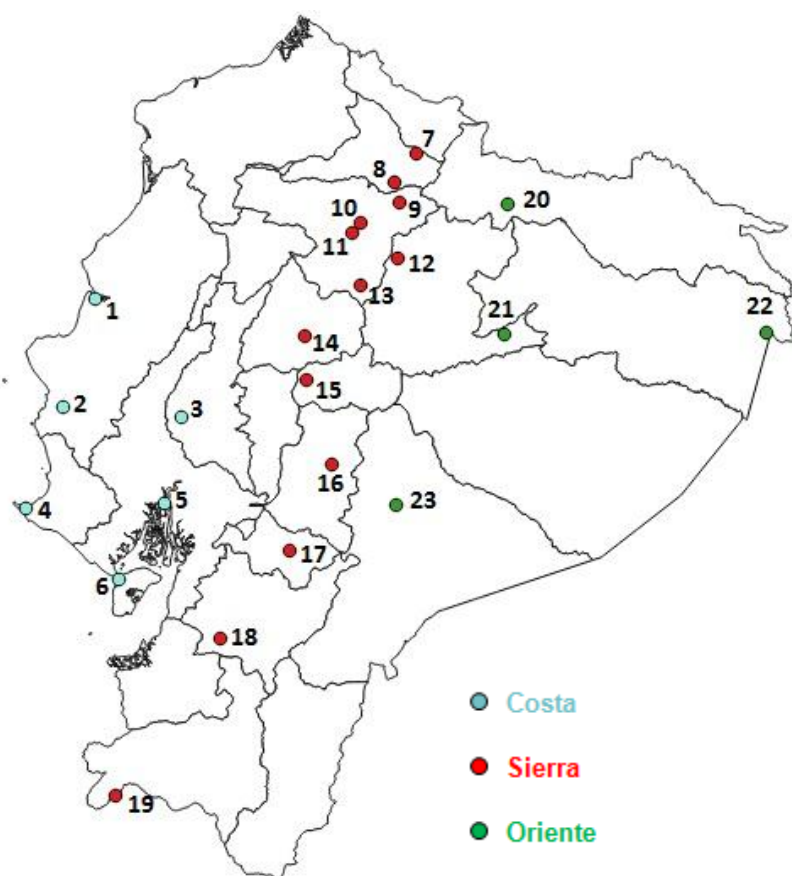


Figura 4: Localización de las estaciones meteorológicas operadas por el INAMHI que se consideraron para la evaluación de la precipitación

Análisis Estadístico

Con los registros de las estaciones meteorológicas y los resultados de las simulaciones, se procedió a efectuar la evaluación utilizando estadísticos para temperatura y para precipitación. Para la temperatura, se obtuvo el valor medio diario a partir de tres observaciones realizadas a las 07h00, 13h00 y 19h00 (INAMHI, 2014). Para la precipitación se utilizó el registro diario que se obtiene al realizar la suma de todos los datos horarios durante un período equivalente a un día (24 horas).

Para la temperatura se utilizaron los siguientes indicadores:

Error Medio Absoluto (EMA)

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i|$$

Donde P_i es el resultado modelado, O_i es el registro y N es el número de días. El valor de aceptación es $EMA < 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (EEA, 2011). Este estadístico representa el promedio de las diferencias absolutas entre los registros y los resultados del modelo (Arango y Ruiz, 2011). Este estadístico indica el valor promedio de los errores del modelo (WCRP, 2015).

Sesgo Medio BIAS (SM)

$$SM = \bar{P} - \bar{O}$$

Donde \bar{P} es el promedio de los datos obtenidos con el modelo, \bar{O} es el promedio de los registros y N es el número de datos. El valor de aceptación debe estar entre -0.5 y $0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$

(EEA, 2011). Este estadístico indica la tendencia del modelo a subestimar o sobrestimar una variable, en este caso, la temperatura (Arango y Ruiz, 2011).

En cuanto a la precipitación, se utilizaron los siguientes estadísticos:

Error Medio Cuadrático (EMC)

$$EMC = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$$

Donde N es el número de días, P_i es el valor modelado y O_i es el registro. El valor óptimo de este estadístico es igual a 0 (Arango y Ruiz, 2011). Para el presente estudio, se consideró que el valor de aceptación debe ser ≤ 8 mm/día debido a la dificultad para simular este parámetro. Este estadístico señala el grado de correspondencia promedio entre los registros y los valores modelados (Arango y Ruiz, 2011). Indica el valor promedio de los errores del modelo, y proporciona más peso a los errores grandes en relación a los errores pequeños (WCRP, 2015).

Error Medio Absoluto (EMA)

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i|$$

Donde P_i es el valor modelado, O_i es el registro y N es el número de datos. El valor óptimo de este estadístico es igual a 0 (Arango y Ruiz, 2011). Para el presente estudio, se consideró que su valor de aceptación debe ser ≤ 8 mm/día. Este estadístico nos brinda información similar al EMC, ya que indica el valor promedio de los errores del modelo.

También se realizó una comparación para evaluar si el modelo identifica la ocurrencia de lluvia. Para ello se utilizó el Índice de Brier y se calculó el porcentaje de eficiencia del modelo.

Índice de Brier (IB)

$$IB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2$$

Donde N es la cantidad de pares de valores modelados/registrados, P_i es el valor modelado y O_i es el registro. En este caso, O_i es igual a 1 si se registró lluvia, y 0 cuando no se registró nada. El valor óptimo del Índice Brier es igual a cero (predicción con 100% de exactitud). Para el presente estudio, se consideró que su valor de aceptación debe ser ≤ 0.3 (Ruiz, 2008).

Porcentaje de Eficiencia

$$PE = \frac{\text{Número de días donde se predijo exitosamente la ocurrencia de lluvia}}{\text{Número de días evaluados}}$$

Para el presente estudio, se consideró que su valor de aceptación debe ser ≥ 0.66 , porque equivaldría a predecir correctamente los eventos en 18 de 27 días.

Resultados y Discusión

En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos por medio de la aplicación de los indicadores estadísticos de temperatura. La Tabla 6 indica directamente el número de estaciones que cumplen con el criterio de aceptación del EMA y del SM.

Tabla 6: Número de estaciones que cumplen con los estadísticos de temperatura para agosto del 2010

EMA	Configuraciones												Prom
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
COSTA (3 estaciones)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
SIERRA (8 estaciones)	4	4	4	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
ORIENTE (3 estaciones)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
TOTAL (14 estaciones)	8	8	8	7	7	7	9	9	9	9	9	9	9
SM	Configuraciones												Prom
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
COSTA (3 estaciones)	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
SIERRA (8 estaciones)	2	2	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	3
ORIENTE (3 estaciones)	0	0	0	2	2	1	1	2	2	1	0	1	0
TOTAL (14 estaciones)	3	3	2	3	3	2	3	4	4	3	2	3	3

*Nota: En amarillo las configuraciones que presentan el mayor cumplimiento de los estadísticos

Como se puede ver en la Tabla 6, las configuraciones 8 y 9 son las que mejor desempeño presentan en la evaluación de la temperatura a nivel nacional. Para el EMA, el cumplimiento de este estadístico se considera bueno ya que a nivel de país, 9 de 14 estaciones cumplen con el criterio de aceptación. Tanto para la Costa como para el Oriente,

todas las configuraciones generan resultados aceptables en 2 de 3 estaciones. En la Sierra, las configuraciones 7 hasta la 12, y el escenario promedio, presentaron resultados aceptables en 5 de 8 estaciones.

Para el SM, el cumplimiento de este estadístico se considera bajo ya que a nivel de país, 4 de 14 estaciones cumplen con el criterio de aceptación. Los resultados son bueno a nivel del Oriente, donde el estadístico se cumple en 2 de 3 estaciones.

La Tabla 7 presenta los resultados del cumplimiento del criterio de aceptación del EMA, en las 14 estaciones consideradas para la evaluación de la temperatura.

Tabla 7: Resultados de la evaluación del EMA para temperatura en el Ecuador

Error Medio Absoluto (EMA) (< 2 °C)													
COSTA													
Estación	Configuraciones												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Prom
Julcuy	2.38	2.34	2.37	3	2.86	2.93	2.63	2.44	2.44	2.15	2.09	2.25	2.46
Santa Elena-Universidad	1.49	1.4	1.42	1.72	1.61	1.68	1.86	1.76	1.76	1.19	1.29	1.4	1.63
Guayaquil U. Estatal	0.8	0.92	0.73	1.25	1.21	1.23	1.03	1.03	1.03	0.91	0.88	0.82	0.87
TOTAL	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
SIERRA													
San Vicente de Pusir	2.07	2.3	2.41	2.45	2.75	2.82	1.67	1.94	1.94	1.67	1.74	1.7	1.9
Quito INAMHI-Iñaquito	0.74	0.72	0.81	1.01	1.24	1.1	0.81	0.84	0.84	0.82	0.77	0.82	0.74
Papallacta	2.86	3.08	3.1	3.43	3.94	3.77	3.34	3.43	3.43	2.61	3.11	2.66	3.14
Pilalo	6.66	6.73	6.57	7.23	7.49	7.38	7.02	7.25	7.25	6.57	6.95	6.73	7.08
Calamaca Convenio INAMHI HCPT	1.79	1.78	1.72	2.18	2.41	2.27	1.73	1.75	1.75	1.43	1.57	1.43	1.9
Cañar	2.89	2.93	2.76	3.36	3.65	3.43	3.01	3.11	3.11	2.6	2.83	2.53	3.07
Pucara-Colegio Tec. Agrop.	1.01	0.93	0.9	0.9	0.85	0.87	1.11	1.03	1.03	1.14	1.04	0.96	0.8
Zapotillo	1.04	0.98	1.02	1.73	1.57	1.74	0.9	1.03	1.03	1.19	1.3	1.25	0.97
TOTAL	4	4	4	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
ORIENTE													
Lumbaquí	1.55	1.57	1.46	1.07	0.96	0.99	1.2	1.17	1.17	1.24	1.13	1.1	1.06
Nuevo Rocafuerte	1.54	1.53	1.44	0.85	0.77	0.96	0.99	1.15	1.15	0.88	1.05	0.96	0.89
Macas San Isidro-PNS	4.96	5.02	5.11	5.41	5.75	5.74	5.73	5.67	5.67	5.09	5.39	6.17	6.2
TOTAL	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

***Nota:** Los valores con fondo amarillo indican los casos en que el estadístico cumple con el criterio de aceptación

En base a los resultados obtenidos con el EMA, se puede ver que en la Costa y en el Oriente, las configuraciones simulan aceptablemente la temperatura, con excepción de una estación para cada región: “Julcuy” que se ubica en la provincia de Manabí (Costa), y “Macas San Isidro” que se ubica en la provincia de Morona Santiago (Oriente). En la estación “Julcuy”, no se cumple con el EMA por un margen pequeño (hasta 1 °C), mientras que para

la estación “Macas San Isidro”, no se cumple con el EMA por un margen de diferencia mayor (hasta 3 °C).

En la Sierra, el cumplimiento del EMA es intermedio ya que las configuraciones simulan aceptablemente la temperatura en 5 de 8 estaciones para las configuraciones 7 en adelante. Las estaciones “Cañar” y “Papallacta” no cumplen con el criterio de validación para el EMA por un margen muy pequeño (hasta 1.5 °C). Para el caso de la estación “Pilalo”, el estadístico se comporta como en la estación “Macas San Isidro”, donde no se cumple con los criterios de aceptación por un amplio margen, ya que el modelo proporciona temperaturas más bajas, en relación a los registros.

La Tabla 8 presenta los resultados del cumplimiento del criterio de aceptación del SM, en las 14 estaciones consideradas para la evaluación de la temperatura.

Tabla 8: Resultados de la evaluación del SM para temperatura en el Ecuador

Sesgo Medio Bias (SM) (-0.5 °C < SM < 0.5 °C)													
COSTA													
Estación	Configuraciones												Prom
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Julcuy	-2.25	-2.21	-2.26	-2.98	-2.83	-2.92	-2.41	-2.37	-2.37	-1.96	-1.9	-2.02	-2.39
Santa Elena-Universidad	-1.45	-1.32	-1.39	-1.7	-1.58	-1.68	-1.86	-1.76	-1.76	-0.91	-0.73	-0.86	-1.41
Guayaquil U. Estatal	-0.39	-0.37	-0.31	-1.15	-1.12	-1.2	-0.97	-0.89	-0.89	0.06	0.08	-0.04	-0.61
TOTAL	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
SIERRA													
San Vicente de Pusir	-2.04	-2.28	-2.38	-2.44	-2.75	-2.82	-1.13	-1.46	-1.46	-1.25	-1.42	-1.58	-1.79
Quito INAMHI-Iñaquito	0.13	-0.19	0	-0.95	-1.22	-1.01	-0.03	-0.34	-0.34	0.35	0.08	0.42	-0.19
Papallacta	-2.86	-3.06	-3.1	-3.43	-3.94	-3.77	-3.34	-3.43	-3.43	-2.61	-3.11	-2.82	-3.31
Pilalo	-6.66	-6.73	-6.57	-7.23	-7.49	-7.38	-7.02	-7.25	-7.25	-6.57	-6.95	-6.74	-7.09
Calamarca Convenio INAMHI HCPT	-1.67	-1.74	-1.61	-2.12	-2.41	-2.25	-1.72	-1.75	-1.75	-1.09	-1.49	-1.2	-1.82
Cañar	-2.89	-2.93	-2.76	-3.36	-3.65	-3.43	-3.01	-3.11	-3.11	-2.6	-2.83	-2.61	-3.14
Pucara-Colegio Tec. Agrop.	0.47	0.49	0.55	-0.28	-0.47	-0.4	0.77	0.74	0.74	0.96	0.82	0.92	0.41
Zapotillo	-0.66	-0.53	-0.69	-1.59	-1.39	-1.6	0.3	0.45	0.45	1	1.16	1.05	-0.13
TOTAL	2	2	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	3
ORIENTE													
Lumbaquí	1.43	1.56	1.4	0.38	0.41	0.43	0.43	0.49	0.49	0.38	0.63	0.34	0.56
Nuevo Rocafuerte	1.43	1.29	1.33	0.49	0.39	0.6	0.64	0.4	0.4	0.67	0.65	0.55	0.58
Macas San Isidro-PNS	-4.96	-5.02	-5.11	-5.41	-5.75	-5.74	-5.73	-5.67	-5.67	-5.09	-5.39	-5.49	-5.52
TOTAL	0	0	0	2	2	1	1	2	2	1	0	1	0

***Nota:** Los valores con fondo amarillo indican los casos en que el estadístico cumple con el criterio de aceptación

En relación al SM, los resultados del modelo para la Costa no se consideran buenos, ya que en general, se subestima la temperatura en relación a los registros medidos en las 3 estaciones. No obstante, la subestimación es mínima para todas las estaciones (hasta 2.5 °C),

y las configuraciones 1 a la 3 y 10 a la 12, cumplen con el SM en la estación Guayaquil U. Estatal.

En la Sierra, el criterio de aceptación se cumple para las configuraciones 1 a 3, y 7 en adelante para la estación “Quito INAMHI-Iñaquito” ubicada en la provincia de Pichincha, al norte del país. Para la estación “Pucara Colegio Tec. Agrop.” que se ubica en la provincia de Azuay, el criterio de aceptación del SM se cumple para las configuraciones 1 a 2, y 4 a 6. Para la estación “Zapotillo” ubicada en la provincia de Loja, el criterio de aceptación del SM se cumple para las configuraciones 7 a 9. En las 5 estaciones restantes de la Sierra, el modelo subestima la temperatura como en el caso de la Costa. Cabe resaltar que en las estaciones “San Vicente de Pusir” y “Calamaca Convenio INAMHI HCPT”, la subestimación es mínima (hasta 1.5 °C).

En el Oriente, el cumplimiento del SM es bueno ya que el estadístico es aceptable en 2 de 3 estaciones: “Nuevo Rocafuerte” ubicada en la provincia del Napo, y “Lumbaquí” ubicada en la provincia de Sucumbíos. Las configuraciones 4 en adelante, cumplen o sobrestiman mínimamente este estadístico (hasta 0.15 °C) en las dos estaciones anteriores, mientras que el modelo subestima de gran manera la temperatura en la estación “Macas San Isidro”, para todas las configuraciones (hasta 5 °C).

En la Tabla 9 se presentan los resultados de los indicadores estadísticos para precipitación, e indica directamente el número de estaciones que cumplen con el criterio de aceptación del EMA, el EMC, el IB y el PE.

Tabla 9: Número de estaciones que cumplen con los estadísticos de precipitación diaria para agosto del 2010

EMA	Configuraciones												Prom
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
COSTA (6 estaciones)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
SIERRA (13 estaciones)	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
ORIENTE (4 estaciones)	0	2	1	1	3	1	1	2	2	1	2	1	3
TOTAL (23 estaciones)	19	21	20	20	22	20	20	21	21	20	21	20	22
EMC	Configuraciones												Prom
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
COSTA (6 estaciones)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	6
SIERRA (13 estaciones)	12	12	12	12	13	12	12	12	12	12	13	12	13
ORIENTE (4 estaciones)	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	2	0	0
TOTAL (23 estaciones)	18	18	18	19	20	18	18	19	19	19	21	17	19
IB	Configuraciones												Prom
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
COSTA (6 estaciones)	5	5	5	4	5	4	5	5	5	5	5	4	1
SIERRA (13 estaciones)	7	5	8	2	6	6	6	7	7	5	6	7	2
ORIENTE (4 estaciones)	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
TOTAL (23 estaciones)	12	10	13	6	11	10	12	12	12	10	11	11	3
PE	Configuraciones												Prom
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
COSTA (6 estaciones)	5	5	5	4	5	4	5	5	5	5	5	4	1
SIERRA (13 estaciones)	7	5	8	2	6	6	6	7	7	5	6	7	2
ORIENTE (4 estaciones)	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
TOTAL (23 estaciones)	12	10	13	6	11	10	12	12	12	10	11	11	3

*Nota: En amarillo las configuraciones que presentan el mayor cumplimiento de los estadísticos

Como se puede ver en la Tabla 9, las configuraciones 3, 5, 8, 9 y 11 son los que mejor desempeño presentan a nivel nacional. Es importante recalcar que la precipitación es uno de los parámetros más difíciles de simular, por lo que se determinaron valores de aceptación más flexibles para cada estadístico aplicado (Corrales et al., 2013). Por ejemplo, *Litta et al. (2012)*, obtuvieron valores para el EMA entre 8 y 30 mm para 4 esquemas diferentes de microfísica del modelo WRF, y consideraron aceptable al esquema que dio un valor del EMA igual a 8 mm. Por ello, se consideró para el presente estudio, valores de aceptación para el EMA y el EMC iguales a 8 mm.

En base a la Tabla 9, se observa que el cumplimiento del valor de aceptación del EMA es bueno a nivel nacional, ya que es positivo en 21 de 23 estaciones para las configuraciones 2, 8, 9, 11 y la promedio, y es positivo en 22 de 23 estaciones para la configuración 5. En relación al EMC, el cumplimiento del valor de aceptación también es bueno ya que es positivo en 21 de 23 estaciones para las configuraciones 5 y 11, mientras que para las configuraciones 4, 8, 9, 10 y la promedio, se considera aceptable en 19 de 23 estaciones. Para el IB y el PE, el cumplimiento del valor de aceptación es medio ya que se considera aceptable en 12 de 23 estaciones para las configuraciones 1, 7, 8 y 9, mientras que para la configuración 3, es aceptable en 13 de 23 estaciones.

La Tabla 10 presenta los resultados del cumplimiento del criterio de aceptación del EMA, en las 23 estaciones consideradas para la evaluación de la precipitación.

Tabla 10: Resultados de la evaluación del EMA para precipitación en el Ecuador

Error Medio Absoluto (EMA) $[\leq 8 \text{ mm}]$													
COSTA													
Estación	Configuraciones												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Prom
Bahía de Caráquez-PUCE	0.06	0.15	0.1	0.13	0.85	0.3	0.05	0.09	0.09	0.16	0.41	0.28	0.13
Julcuy	0.88	0.88	0.98	0.99	1.19	1.41	0.86	0.9	0.9	1.05	1.09	1.12	1
Vinces INAMHI	0.58	1.34	0.86	2	2.03	2.84	0.35	0.88	0.88	0.63	1.53	0.98	1.24
Santa Elena-Universidad	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.03
Guayaquil U. Estatal	0.09	0.1	0.15	0.18	0.16	0.19	0.08	0.13	0.13	0.12	0.15	4.78	0.51
Isla Puna Sector Bellavista	0.02	0.01	0.06	0.04	0.01	0.07	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.05	0.03
TOTAL	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
SIERRA													
Ambuquí	0.15	0.05	0	0.02	0.03	0	0.03	0	0	0.1	0	0	0.03
Topo-Imbabura (Angla)	4.3	2.06	3.74	2.57	2.35	2.78	3.25	2.25	2.25	2.82	2.38	2.09	2.7
Cayambe	1.6	0.98	2.02	2.1	1.95	1.36	1.41	0.79	0.79	2.19	1.22	1.43	1.5
Calderón	0.5	0.19	0.24	0.54	0.40	0.25	0.47	0.2	0.2	0.41	0.38	0.23	0.35
Quito INAMHI-Iñaquito	2.22	2.69	1.85	5.13	2.99	2.98	2.33	1.99	1.99	3.1	2.09	2.07	2.79
Papallacta	6.09	5.83	5.03	5.65	4.95	5.38	6.45	6.11	6.11	5.38	5.06	5.23	5.31
Loreto Pedregal	0.54	1.3	1.55	1.7	0.8	1.65	0.48	0.98	0.98	2.18	0.68	1.19	1.25
Pilalo	0.29	0.53	0.2	0.34	0.15	0.19	0.43	0.34	0.34	0.48	0.16	0.25	0.32
Calamaca Convenio INAMHI HCPT	1.84	1.98	1.79	1.63	1.68	1.69	1.72	1.75	1.75	1.75	1.73	1.82	1.67
Cebadas	0.57	0.55	0.56	0.58	0.59	0.56	0.56	0.7	0.7	0.57	0.63	0.56	0.59
Cañar	1.33	1.8	0.73	0.89	1.14	0.75	1.25	1.48	1.48	1.1	1.27	0.65	1.06
Pucara-Colegio Tec. Agrop.	4.11	4.2	4.18	4	4.04	4.36	4.08	4.13	4.13	4.05	4.12	4.12	4.1
Zapotillo	0.06	0	0	0.23	0.39	0.33	0.02	0	0	0.01	0	0	0.07
TOTAL	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
ORIENTE													
Lumbaquí	19.12	10.31	19.4	15.07	9.44	17.27	18.52	10.96	10.96	17.45	10.46	16.18	12.67
Chonta Punta	10.76	9.33	9	9.44	3.20	10.24	9.9	4.05	4.05	8.48	3.38	8.53	7.5
Nuevo Rocafuerte	8.15	5.19	5.25	8.4	4.54	7.33	6.7	5.28	5.28	9.25	2.93	5.74	6.35
Macas San Isidro-PNS	9.2	7.79	15.71	3.13	5	9.02	8.41	8.81	8.81	3.44	8.01	8.98	7.58
TOTAL	0	2	1	1	3	1	1	2	2	1	2	1	3

*Nota: Los valores con fondo amarillo indican los casos en que el estadístico cumple con el criterio de aceptación

En la Costa, todas las configuraciones para todas las estaciones cumplen con los criterios de aceptación del EMA para precipitación. Los mayores valores obtenidos para el EMA, corresponden a la estación “Vinces INAMHI” (hasta 2.84 mm). Estos resultados son coherentes a los obtenidos por *Arango y Ruiz (2011)*, y a los obtenidos por *Corrales et al. (2013)*, quienes utilizaron el EMA para evaluar la simulación de la precipitación con el modelo WRF, en la sabana de Bogotá y en México, respectivamente.

En la Sierra, el cumplimiento del EMA es bueno, ya que es aceptable en todas las estaciones para todas las configuraciones del modelo. Solo en las estaciones “Papallacta” y “Pucara-Colegio Tec. Agrop.” se registraron valores altos para el EMA (hasta 6 y 4 mm, respectivamente), mientras que en las demás estaciones, este estadístico presentó valores similares a los obtenidos en los estudios de *Arango y Ruiz (2011)* y *Corrales et al. (2013)*.

En el Oriente, el cumplimiento del valor de aceptación del EMA fue medio ya que fue positivo en 2 de 4 estaciones para las configuraciones 2, 8, 9 y 11, mientras que con la configuración 5 y la promedio, fue positivo en 3 de 4 estaciones. Las demás configuraciones del modelo presentaron valores del EMA fuera del rango de aceptación.

La Tabla 11, presenta los resultados del cumplimiento del criterio de aceptación del EMC, en las 23 estaciones consideradas para la evaluación de la precipitación.

Tabla 11: Resultados de la evaluación del EMC para precipitación en el Ecuador

Error Medio Cuadrático (EMC) [≤ 8 mm]													
COSTA													
Estación	Configuraciones												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Prom
Bahía de Caráquez-PUCE	0.23	0.58	0.29	0.34	2.8	0.77	0.21	0.30	0.30	0.48	0.93	0.98	0.28
Julcuy	4.08	4.09	4.12	4.11	4.16	4.30	4.08	4.09	4.09	4.17	4.13	4.16	4.10
Vinces INAMHI	1.05	2.72	1.54	3.32	3.43	5.41	0.74	2.25	2.25	1.15	3.08	1.96	2.00
Santa Elena-Universidad	0.05	0.05	0.07	0.05	0.07	0.10	0.07	0.06	0.06	0.06	0.13	0.17	0.05
Guayaquil U. Estatal	0.31	0.27	0.43	0.42	0.5	0.52	0.24	0.34	0.34	0.41	0.43	8.33	0.82
Isla Puna Sector Bellavista	0.05	0.05	0.22	0.10	0.04	0.25	0.07	0.09	0.09	0.07	0.08	0.23	0.10
TOTAL	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	6
SIERRA													
Ambuquí	0.43	0.22	0.02	0.06	0.10	0.00	0.09	0.00	0.00	0.47	0.00	0.00	0.10
Topo-Imbabura (Angla)	6.49	2.81	5.33	3.24	3.35	3.74	5.29	2.93	2.93	4.17	2.88	3.17	3.33
Cayambe	3.77	2.45	4.32	3.72	2.92	3.03	2.92	2.28	2.28	3.72	2.42	2.91	2.80
Calderón	1.03	0.62	0.64	1.06	0.9	0.71	0.86	0.62	0.62	0.83	0.86	0.68	0.69
Quito INAMHI-Iñaquito	4.12	4.95	4.66	7.21	4.89	5.64	4.58	4.38	4.38	4.90	4.34	5.16	4.77
Papallacta	9.29	8.63	8.28	8.41	7.61	8.55	9.74	9.54	9.54	8.29	7.61	8.51	7.98
Loreto Pedregal	1.71	3.15	3.76	3.94	2.31	4.29	1.70	2.94	2.94	4.89	1.88	3.10	2.85
Pilalo	0.52	1.43	0.41	0.69	0.32	0.50	0.93	1.01	1.01	1.00	0.35	0.77	0.59
Calamaca Convenio INAMHI HCPT	2.97	3.13	2.96	2.86	2.71	2.85	2.91	2.86	2.86	2.87	2.91	2.99	2.86
Cebadas	1.39	1.32	1.39	1.39	1.34	1.39	1.38	1.50	1.50	1.38	1.41	1.39	1.39
Cañar	2.87	3.11	1.60	1.86	2.26	1.55	2.96	3.06	3.06	2.34	2.38	1.49	2.11
Pucara-Colegio Tec. Agrop.	7.21	7.29	7.43	7.18	7.14	7.37	7.34	7.25	7.25	7.31	7.36	7.45	7.29
Zapotillo	0.13	0.02	0.00	0.32	1.04	1.17	0.06	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.14
TOTAL	12	12	12	12	13	12	12	12	12	12	13	12	13
ORIENTE													
Lumbaquí	29.04	14.34	23.40	20.74	15.75	22.03	24.79	18.19	18.19	24.20	18.01	20.19	16.47
Chonta Punta	17.95	24.82	13.61	12.49	4.85	15.88	15.85	6.75	6.75	12.02	4.87	10.93	10.19
Nuevo Rocafuerte	14.90	12.65	8.27	11.82	8.34	11.08	12.35	9.59	9.59	14.68	5.25	8.67	9.24
Macas San Isidro-PNS	14.02	11.88	20.39	4.87	8.03	11.74	12.81	12.66	12.66	4.72	11.32	12.66	9.42
TOTAL	0	0	0	1	2	0	0	1	1	1	2	0	0

*Nota: Los valores con fondo amarillo indican los casos en que el estadístico cumple con el criterio de aceptación

En la Costa, se observa que todas las configuraciones en todas las estaciones, cumplieron el criterio de aceptación del EMC. Solo la estación “Julcuy” muestra valores altos aceptables del EMC, en relación a los de las demás estaciones.

En la Sierra, el cumplimiento del criterio de aceptación del EMC fue bueno, ya que fue positivo en todas las estaciones para las configuraciones 5 y 11. Los valores del EMC para la Costa y la Sierra, son similares a los obtenidos por *Arango y Ruiz (2011)* en su estudio realizado en la sabana de Bogotá.

En el Oriente, el cumplimiento del criterio de aceptación fue medio, ya que fue positivo en 2 de 4 estaciones (“Chonta Punta” y “Nuevo Rocafuerte”) para la configuración 11. Para las configuraciones 8 y 9, se obtuvieron valores del EMC iguales a 6.75 mm para la estación “Chonta Punta”. Estos valores son congruentes a los reportados por *Corrales et al. (2014)* en su estudio para la República Mexicana (6-7 mm), aunque si comparamos los mismos valores encontrados por *Corrales et al. (2014)* con los obtenidos en la Sierra y la Costa del presente estudio, los de este estudio se acercan mucho más al valor ideal del EMC.

Como se pudo evidenciar en la evaluación de la precipitación en las tres regiones (Costa, Sierra y Oriente), el EMC es similar al EMA, ya que los dos estadísticos indican el valor promedio de los errores. No obstante, el EMC le da más peso a los grandes errores que a los pequeños (WCRP, 2015). Por esa razón, hay una pequeña diferencia en los resultados obtenidos con los dos estadísticos. Además, una de las ventajas del EMC es que nos permite ponderar los errores positivos y negativos, “por lo cual en él están incluidos los errores sistemáticos y aleatorios del modelo” (Mejía y Ruíz, 2015).

Tabla 12: Resultados de la evaluación del IB para precipitación en el Ecuador

Índice de Brier (IB) [≤ 0.33]													
COSTA													
Estación	Configuraciones												Prom
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Bahía de Caráquez-PUCE	0.08	0.13	0.13	0.25	0.33	0.25	0.04	0.08	0.08	0.29	0.29	0.17	0.54
Julcuy	0.21	0.13	0.21	0.33	0.33	0.42	0.17	0.17	0.17	0.25	0.33	0.29	0.71
Vinces INAMHI	0.58	0.54	0.58	0.83	0.63	0.83	0.54	0.42	0.42	0.67	0.50	0.63	0.92
Santa Elena-Universidad	0.17	0.25	0.13	0.17	0.07	0.17	0.25	0.25	0.25	0.17	0.17	0.17	0.54
Guayaquil U. Estatal	0.17	0.21	0.17	0.38	0.29	0.29	0.17	0.21	0.21	0.08	0.21	0.46	0.67
Isla Puna Sector Bellavista	0.13	0.08	0.08	0.17	0.04	0.13	0.08	0.13	0.13	0.08	0.04	0.08	0.21
TOTAL	5	5	5	4	5	4	5	5	5	5	5	4	1
SIERRA													
Ambuquí	0.17	0.04	0.04	0.08	0.08	0.00	0.17	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.29
Topo-Imbabura (Angla)	0.67	0.67	0.63	0.67	0.63	0.75	0.63	0.58	0.58	0.67	0.67	0.58	0.67
Cayambe	0.54	0.29	0.54	0.54	0.71	0.42	0.50	0.21	0.21	0.63	0.50	0.29	0.71
Calderón	0.33	0.13	0.29	0.38	0.25	0.21	0.42	0.21	0.21	0.38	0.25	0.13	0.54
Quito INAMHI-Iñaquito	0.54	0.46	0.33	0.75	0.67	0.63	0.54	0.50	0.50	0.67	0.50	0.42	0.83
Papallacta	0.38	0.38	0.33	0.38	0.38	0.58	0.42	0.38	0.38	0.25	0.38	0.50	0.33
Loreto Pedregal	0.29	0.42	0.29	0.38	0.33	0.25	0.25	0.25	0.25	0.46	0.33	0.25	0.54
Pilalo	0.33	0.38	0.25	0.38	0.25	0.21	0.29	0.29	0.29	0.33	0.25	0.21	0.46
Calamaca Convenio INAMHI HCPT	0.67	0.42	0.63	0.42	0.42	0.58	0.46	0.46	0.46	0.46	0.38	0.67	0.38
Cebadas	0.29	0.25	0.21	0.29	0.25	0.21	0.21	0.42	0.42	0.25	0.29	0.21	0.58
Cañar	0.29	0.46	0.38	0.50	0.38	0.46	0.33	0.29	0.29	0.50	0.46	0.38	0.38
Pucara-Colegio Tec. Agrop.	0.46	0.54	0.63	0.58	0.75	0.67	0.50	0.63	0.63	0.50	0.63	0.67	0.50
Zapotillo	0.21	0.04	0.00	0.71	0.25	0.21	0.13	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.75
TOTAL	7	5	8	2	6	6	6	7	7	5	6	7	2
ORIENTE													
Lumbaquí	0.38	0.38	0.42	0.42	0.42	0.42	0.46	0.38	0.38	0.46	0.38	0.42	0.42
Chonta Punta	0.67	0.58	0.67	0.75	0.67	0.63	0.67	0.58	0.58	0.54	0.63	0.71	0.79
Nuevo Rocafuerte	0.42	0.38	0.42	0.50	0.46	0.38	0.33	0.46	0.46	0.38	0.46	0.46	0.54
Macas San Isidro-PNS	0.50	0.45	0.50	0.50	0.55	0.45	0.55	0.55	0.55	0.41	0.55	0.59	0.55
TOTAL	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Tabla 13: Resultados de la evaluación del PE para precipitación en el Ecuador

Porcentaje de Eficiencia (PE) ≥ 0.67													
COSTA													
Estación	Configuraciones												Prom
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Bahía de Caráquez-PUCE	0.92	0.88	0.88	0.75	0.67	0.75	0.96	0.92	0.92	0.71	0.71	0.83	0.46
Julcuy	0.79	0.88	0.79	0.67	0.67	0.58	0.83	0.83	0.83	0.75	0.67	0.71	0.29
Vinces INAMHI	0.42	0.46	0.42	0.17	0.38	0.17	0.46	0.58	0.58	0.33	0.50	0.38	0.08
Santa Elena-Universidad	0.83	0.75	0.88	0.83	0.79	0.83	0.75	0.75	0.75	0.83	0.83	0.83	0.46
Guayaquil U. Estatal	0.83	0.79	0.83	0.63	0.71	0.71	0.83	0.79	0.79	0.92	0.79	0.54	0.33
Isla Puna Sector Bellavista	0.88	0.92	0.92	0.83	0.96	0.88	0.92	0.88	0.88	0.92	0.96	0.92	0.79
TOTAL	5	5	5	4	5	4	5	5	5	5	5	4	1
SIERRA													
Ambuquí	0.83	0.96	0.96	0.92	0.92	1.00	0.83	1.00	1.00	0.88	1.00	1.00	0.71
Topo-Imbabura (Angla)	0.33	0.33	0.38	0.33	0.38	0.25	0.38	0.42	0.42	0.33	0.33	0.42	0.33
Cayambe	0.46	0.71	0.46	0.46	0.29	0.58	0.50	0.79	0.79	0.38	0.50	0.71	0.29
Calderón	0.67	0.88	0.71	0.63	0.75	0.79	0.58	0.79	0.79	0.63	0.75	0.88	0.46
Quito INAMHI-Iñaquito	0.46	0.54	0.67	0.25	0.33	0.38	0.46	0.50	0.50	0.33	0.50	0.58	0.17
Papallacta	0.63	0.63	0.67	0.63	0.63	0.42	0.58	0.63	0.63	0.75	0.63	0.50	0.67
Loreto Pedregal	0.71	0.58	0.71	0.63	0.67	0.75	0.75	0.75	0.75	0.54	0.67	0.75	0.46
Pilalo	0.67	0.63	0.75	0.63	0.75	0.79	0.71	0.71	0.71	0.67	0.75	0.79	0.54
Calamaca Convenio INAMHI HCPT	0.33	0.58	0.38	0.58	0.58	0.42	0.54	0.54	0.54	0.54	0.63	0.33	0.63
Cebadas	0.71	0.75	0.79	0.71	0.75	0.79	0.79	0.58	0.58	0.75	0.71	0.79	0.42
Cañar	0.71	0.54	0.63	0.50	0.63	0.54	0.67	0.71	0.71	0.50	0.54	0.63	0.63
Pucara-Colegio Tec. Agrop.	0.54	0.46	0.38	0.42	0.25	0.33	0.50	0.38	0.38	0.50	0.38	0.33	0.50
Zapotillo	0.79	0.96	1.00	0.29	0.75	0.79	0.88	1.00	1.00	0.92	1.00	1.00	0.25
TOTAL	7	5	8	2	6	6	6	7	7	5	6	7	2
ORIENTE													
Lumbaquí	0.63	0.63	0.58	0.58	0.58	0.58	0.54	0.63	0.63	0.54	0.63	0.58	0.58
Chonta Punta	0.33	0.42	0.33	0.25	0.33	0.38	0.33	0.42	0.42	0.46	0.38	0.29	0.21
Nuevo Rocafuerte	0.58	0.63	0.58	0.50	0.54	0.63	0.67	0.54	0.54	0.63	0.54	0.54	0.46
Macas San Isidro-PNS	0.50	0.55	0.50	0.50	0.45	0.55	0.45	0.45	0.45	0.59	0.45	0.41	0.45
TOTAL	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

*Nota: Los valores con fondo amarillo indican los casos en que los estadísticos cumplen con el criterio de aceptación

Las Tablas 12 y 13, presentan los resultados del cumplimiento del criterio de aceptación del IB y PE respectivamente, en las 23 estaciones consideradas para la evaluación de la precipitación.

En la Costa, se observa que los criterios de aceptación del IB y del PE se cumplen en 5 de 6 estaciones para las configuraciones 1 a la 3, 5, y 6 a la 12, por lo que se considera que el modelo identifica aceptablemente los días con lluvia en esta región.

En la Sierra, el cumplimiento de los criterios de aceptación del IB y del PE se considera medio, ya que fue positivo en 7 de 13 estaciones para las configuraciones 1, 8, 9 y 12, mientras que para la configuración 3, fue positivo en 8 de 13 estaciones.

En el Oriente, en ninguna estación se cumplió con los criterios de aceptación del IB y del PE. Estos resultados se podrían deber a la variabilidad en la ocurrencia de las precipitaciones en la temporada de verano, ya que el Ecuador no cuenta con 4 estaciones bien definidas como en otros países ubicados al norte o al sur del planeta, donde este parámetro es menos complicado de simular. Como indica *Matsudo et al. (2013)*, en verano predominan las precipitaciones de origen convectivo en Sudamérica, las cuales se asocian a una menor predictibilidad, impactando de manera negativa en la calidad de la identificación de la ocurrencia de días con lluvia/sin lluvia.

De manera de ejemplo, en la Figura 5 se presenta la curva de temperatura con registros provenientes de la estación de la Costa (Guayaquil U. Estatal), y las curvas obtenidas con las 12 configuraciones y su promedio.

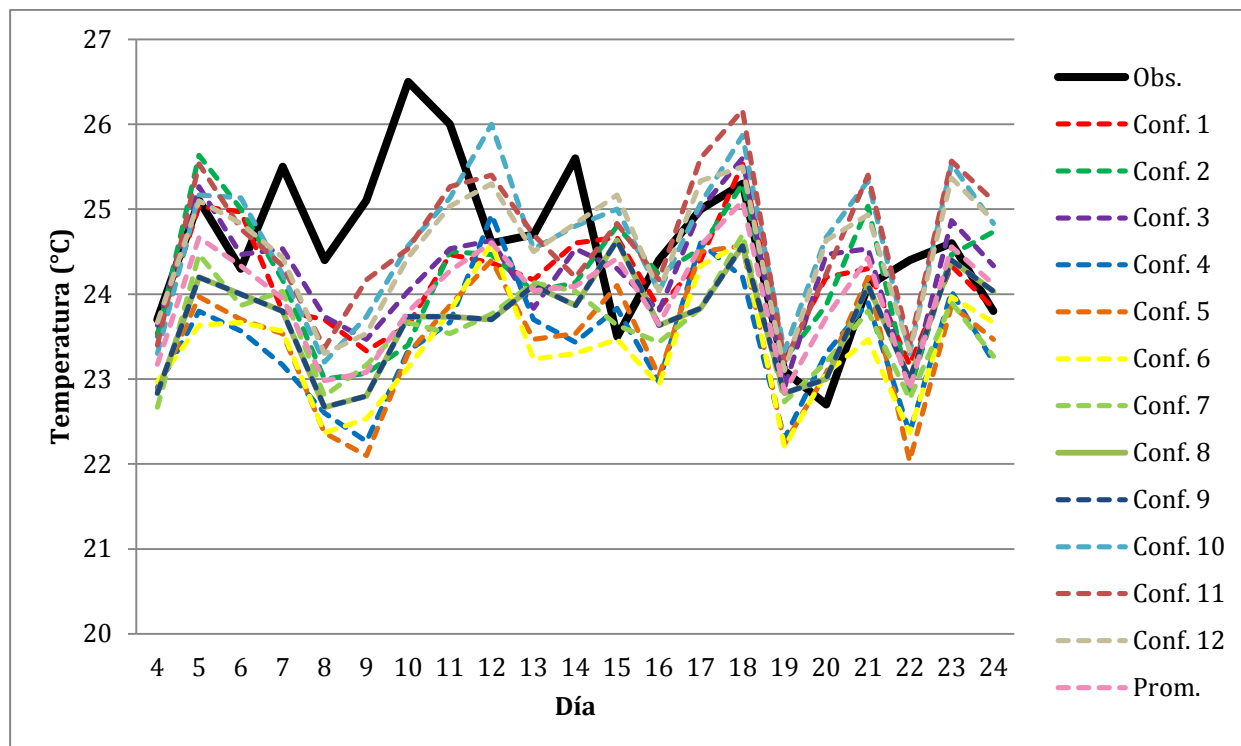


Figura 5: Comparación de temperatura media medida en la estación “Guayaquil U. Estatal” con los datos obtenidos por las 12 configuraciones del modelo y su promedio (Agosto 2010)

En la Figura 5 se puede ver que las configuraciones del modelo, simulan de manera aceptable la temperatura en la estación “Guayaquil U. Estatal”. De manera general, todas las configuraciones tienen un desempeño bueno en este caso, sobre todo en los días 4 al 6 y 11 al 24 de agosto del 2010.

De manera de ejemplo, en la Figura 6 se presenta la comparación de la precipitación por grupos de 3 configuraciones del modelo vs registros para la estación de la Costa (Guayaquil U. Estatal).

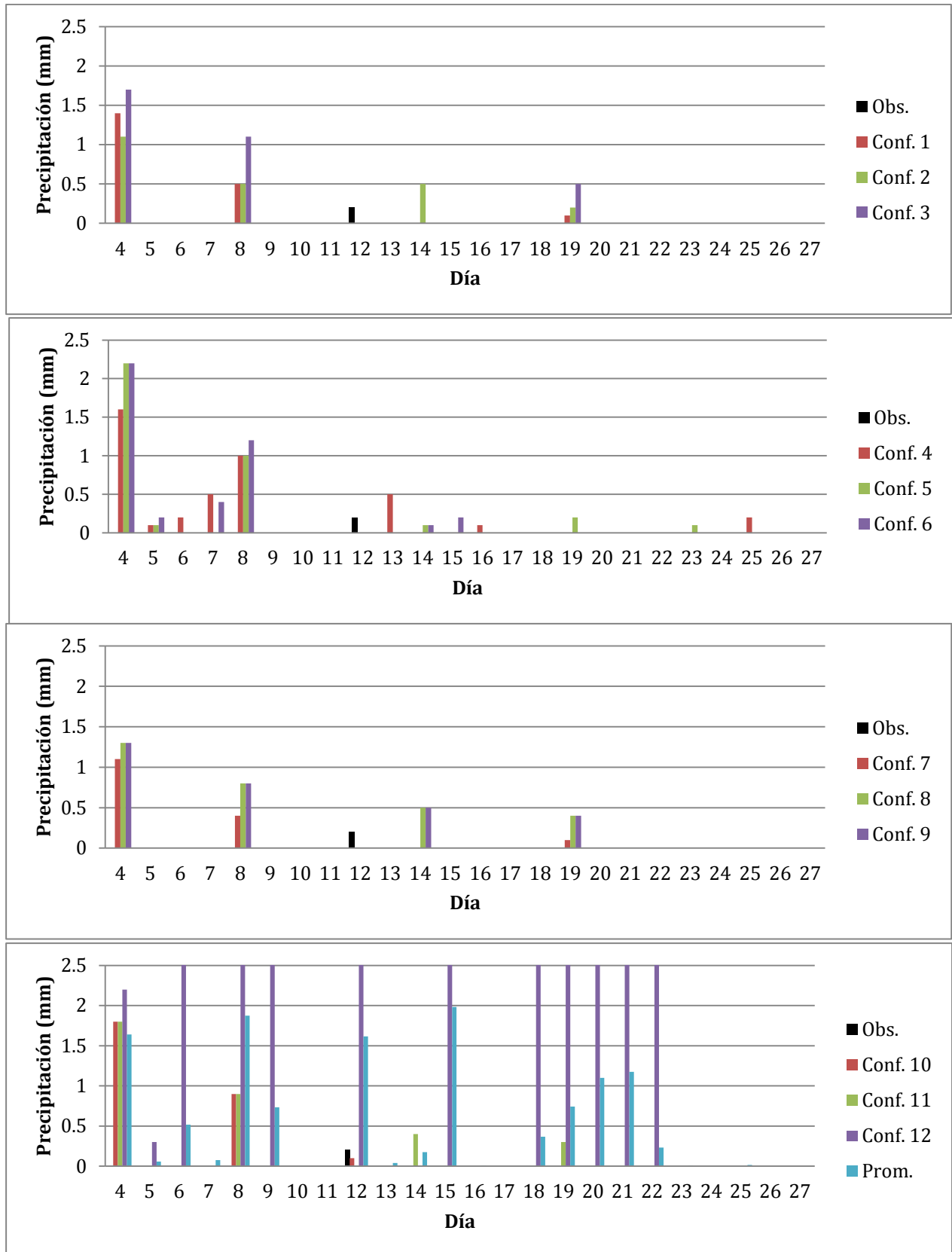


Figura 6: Comparación por grupos de precipitación acumulada medida en la estación “Guayaquil U. Estatal” con los datos obtenidos por las 12 configuraciones del modelo y su promedio (Agosto 2010).

Como se observa en la Figura 6, los días con lluvia se identifican de manera aceptable en la estación “Guayaquil U. Estatal”, sobre todo con las configuraciones 1, 3, 7 y 10. Los registros de esta estación muestran que solo llovió el día 12 de agosto, y la única configuración que logró identificar dicho evento fue la configuración 10. También se puede ver que la configuración 12 y la promedio son las que presentaron el desempeño más bajo.

De manera de ejemplo, en la Figura 7 se presenta la curva de temperatura con registros provenientes de la estación de la Sierra (Quito INAMHI-Iñaquito), y las curvas obtenidas con las 12 configuraciones y su promedio.

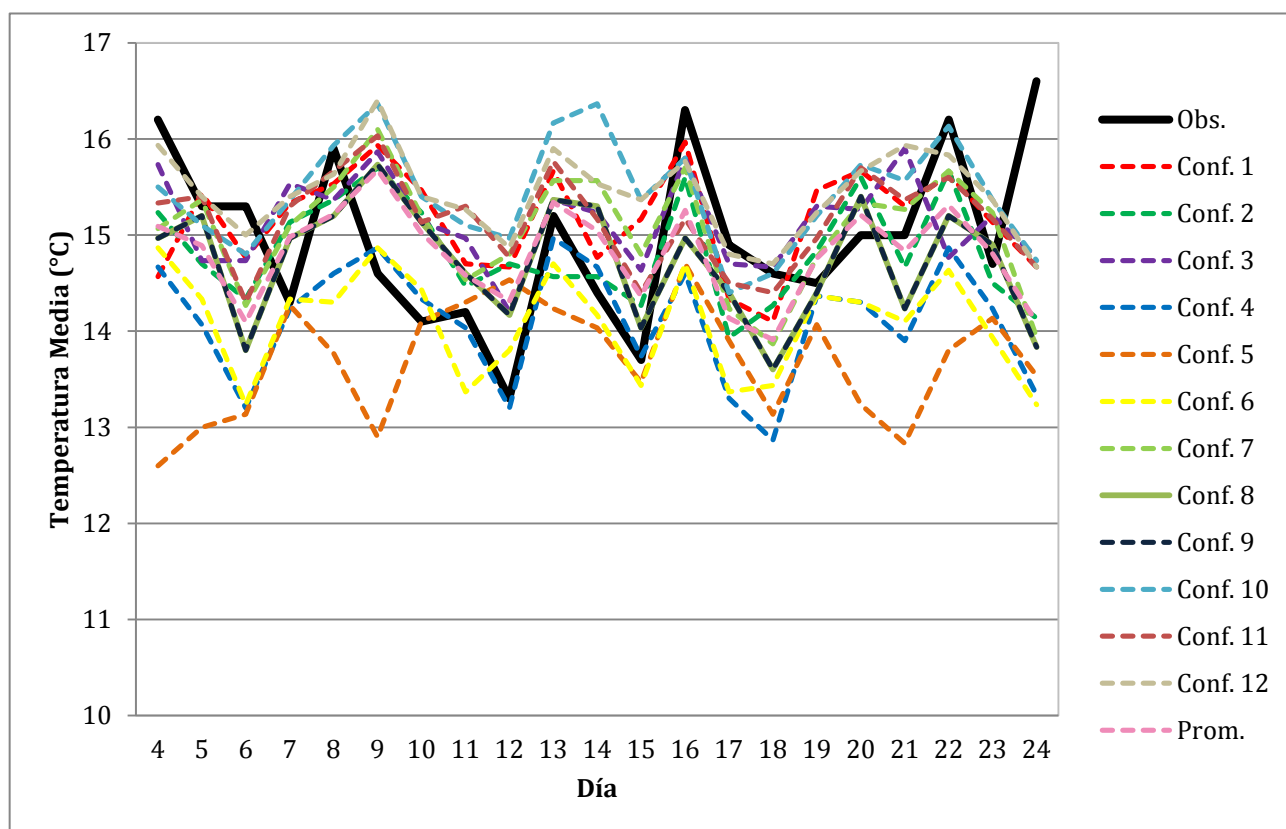


Figura 7: Comparación de temperatura media medida en la estación “Quito INAMHI-Iñaquito” con los datos obtenidos por las 12 configuraciones del modelo y su promedio (Agosto 2010)

En la Figura 7 se observa que las configuraciones del modelo, simulan de manera aceptable la temperatura en la estación “Quito INAMHI-Iñaquito”. Los días donde mejor se ajustan las configuraciones a los registros son del 11 al 17 y del 20 al 23 de agosto del 2010. Las configuraciones 5 y 6 son las que mostraron el desempeño más bajo, mientras que las configuraciones 1 a la 3 y 7 a la 12 fueron las que mejor desempeño mostraron para el caso de esta estación.

De manera de ejemplo, en la Figura 8 se presenta la comparación de la precipitación por grupos de 3 configuraciones del modelo vs registros para la estación de la Sierra (Quito INAMHI-Iñaquito).

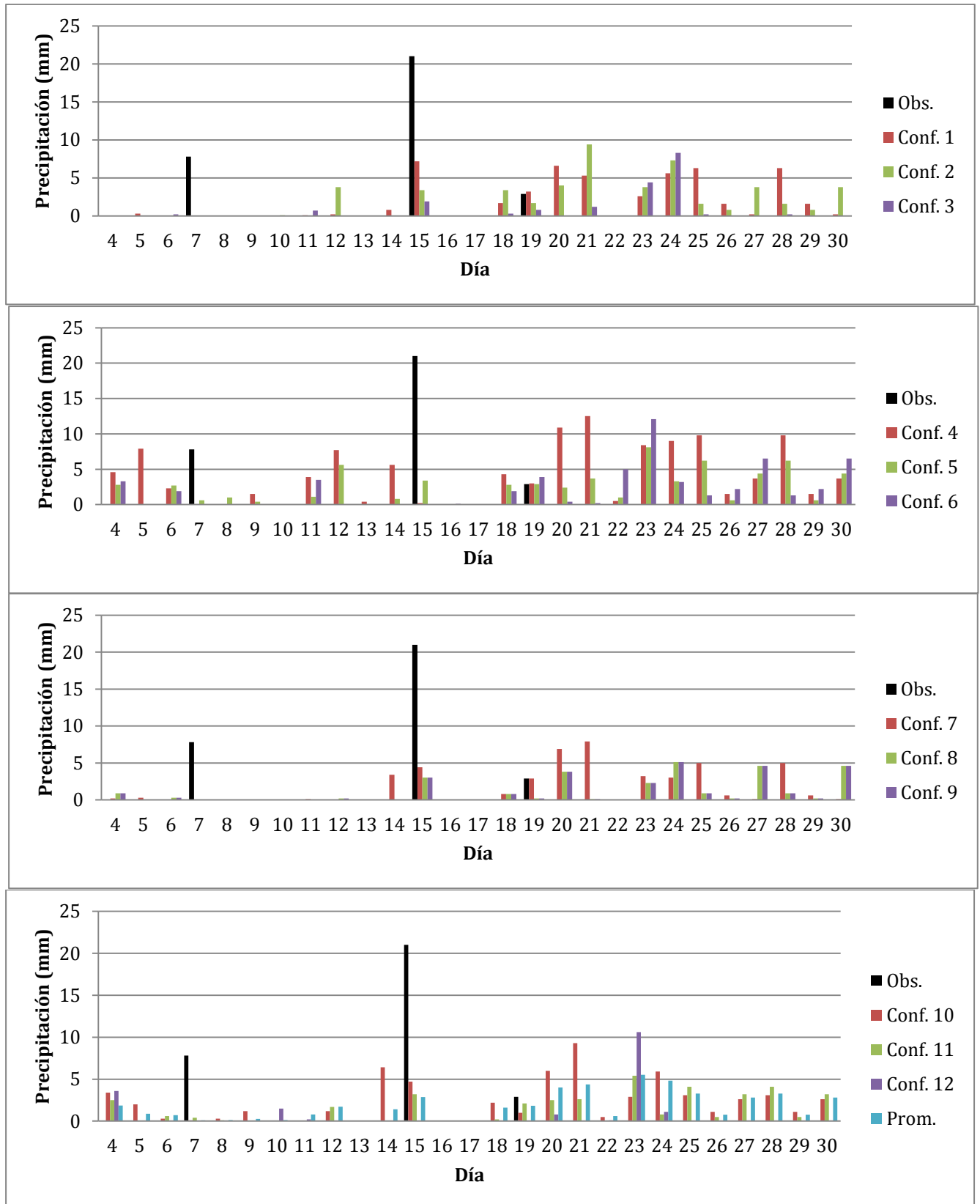


Figura 8: Comparación por grupos de precipitación acumulada medida en la estación “Quito INAMHI-Iñaquito” con los datos obtenidos por las 12 configuraciones del modelo y su promedio (Agosto 2010)

En la Figura 8 se observa que las configuraciones del modelo simulan de manera aceptable la precipitación en la estación “Quito INAMHI-Iñaquito”. Se puede apreciar que a excepción de los días 7 y 15 de agosto del 2010, los demás días se reproducen positivamente con todas las configuraciones en esta estación, sobre todo con el grupo de configuraciones 7 a la 9. Además, se puede observar que la configuración 3 es la que mejor desempeño muestra al identificar los días con lluvia.

De manera de ejemplo, en la Figura 9 se presenta la curva de temperatura con registros provenientes de la estación de la Oriente (Nuevo Rocafuerte), y las curvas obtenidas con las 12 configuraciones y su promedio.

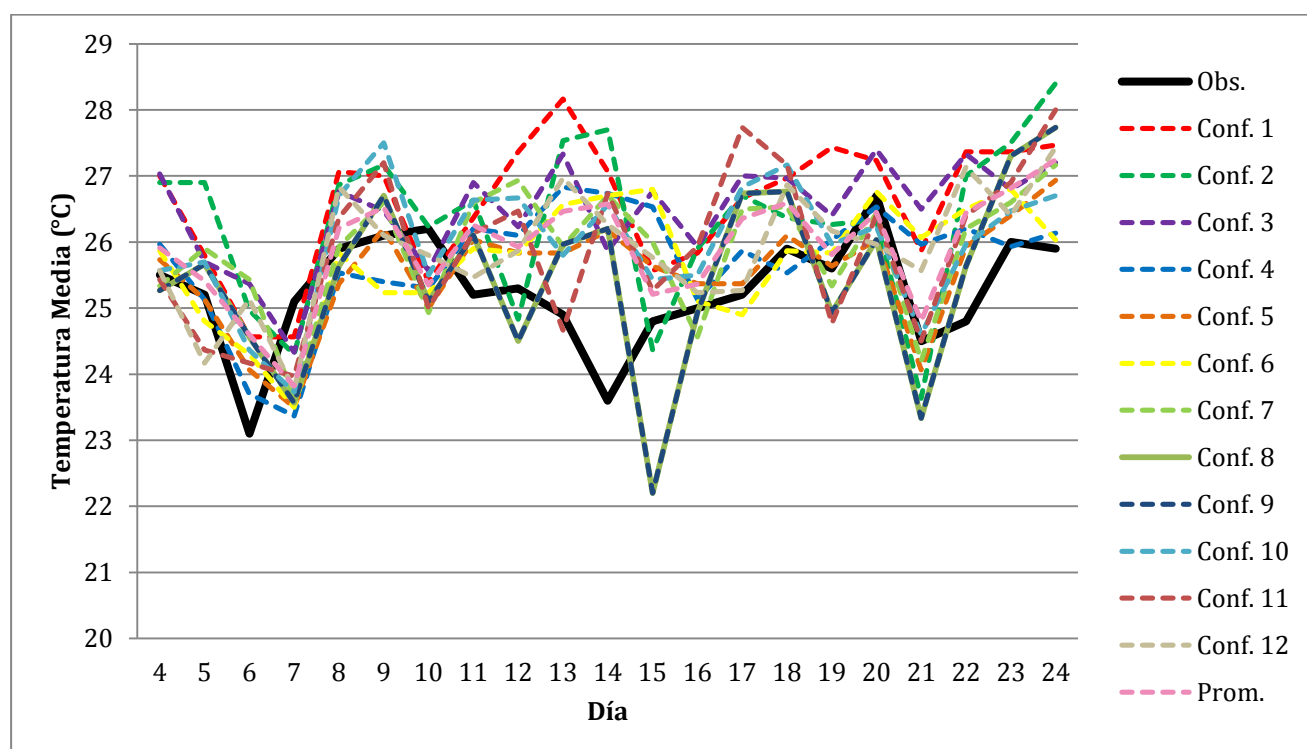


Figura 9: Comparación de temperatura media medida en la estación “Nuevo Rocafuerte” con los datos obtenidos por las 12 configuraciones del modelo y su promedio

En la Figura 9 se observa que de manera general, todas las configuraciones del modelo simulan de manera aceptable la temperatura en la estación “Nuevo Rocafuerte”. Los días donde mejor se ajustan las configuraciones a los registros son del 4 al 8 y del 16 al 22 de agosto del 2010. Las configuraciones 4, 5, 8 y 9 son las que mostraron el mejor desempeño en esta estación, mientras que para este mismo caso, las configuraciones 1 y 3 son las que mostraron el desempeño más bajo.

De manera de ejemplo, en la Figura 10 se presenta la comparación de la precipitación por grupos de 3 configuraciones del modelo vs registros para la estación del Oriente (Nuevo Rocafuerte).

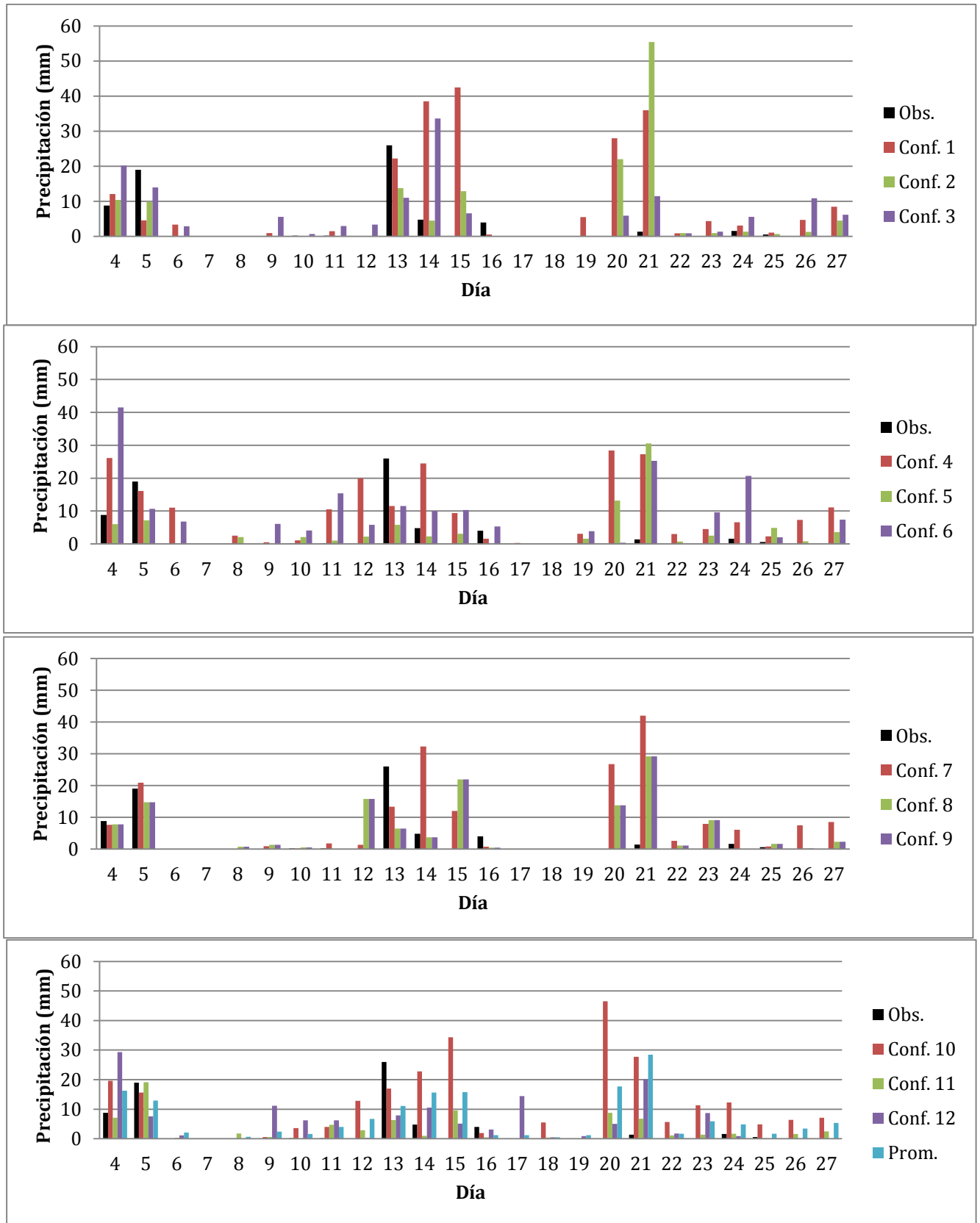


Figura 10: Comparación por grupos de precipitación acumulada medida en la estación “Nuevo Rocafuerte” con los datos obtenidos por las 12 configuraciones del modelo y su promedio (Agosto 2010)

En la Figura 10 se observa que las configuraciones del modelo, simulan de manera aceptable la precipitación en la estación “Nuevo Rocafuerte”. Se puede apreciar que la configuración 11 es la que mejor simula la precipitación, mientras que la configuración 7 es la que mejor desempeño tiene en identificar los días con lluvia.

En la Tabla 14 se presenta la comparación entre las configuraciones de referencia del modelo WRF V3.2, las configuraciones 8 y 9 que presentaron los mejores resultados a nivel global en el presente estudio, y las configuraciones utilizadas en 3 estudios realizados en América (México, Colombia y Argentina).

Tabla 14: Comparación entre configuraciones de referencia V3.2, configuraciones 8 y 9 del presente estudio, y configuraciones utilizadas en estudios realizados en México, Colombia y Argentina

Physics and dynamic options	Configuración de Referencia "AFWA Configuration"	Configuración de Referencia "QNSE-replacement Configuration"	Configuración 8	Configuración 9	México (Corrales et al., 2013)	Bogotá, Colombia (Arango y Ruiz, 2011)	Cuyo, Argentina (Fernández et al., 2011)
Microphysic (mp_physics)	WRF Single-Moment	WRF Single-Moment	Double-Moment	Double- Moment	Millbrandt-Yau	WRF Single-Moment	WRF Single Moment 5
Longwave Radiation (ra_lw_radiation)	RRTM	RRTM	RRTM	RRTM	RRTM	RRTM	RRTM
Shortwave Radiation (ra_sw_radiation)	Dudhia	Dudhia	Dudhia	Dudhia	Dudhia	Dudhia	Goddard
Surface layer (sf_sfclay_physics)	Monin-Obukhov similarity theory	Quasi-Normal Scale Elimination	MM5 Similarity	MM5 Similarity	Monin-Obukhov similarity theory	Monin-Obukhov similarity theory	----- (no menciona)
Land surface (sf_surface_physics)	Noah	Noah	5-layer thermal diffusion	5-layer thermal diffusion	Noah	Noah	Noah
Planetary boundary layer (bl_pbl_physics)	Yonsei University	Quasi-Normal Scale Elimination	Yonsei University	Yonsei University	Mellor-Yamada-Janjic	Yosei University	Yonsei University
Cumulus parameterization (cu_physics)	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch	Betts-Miller-Janjic	Grell 3d ensemble cumulus	Betts-Miller Janjic	Grell-Devenyi ensemble	Grell 3d ensemble cumulus

Fuente para configuraciones de referencia: (DTC, 2016) *Nota: Estudio en México no menciona que versión 3 del modelo se usó, estudio en Colombia utilizó la versión 3.1 del modelo, estudio en Argentina no menciona que versión 3 del modelo se usó.

En la Tabla 14 se puede ver las diferencias y similitudes entre las configuraciones de referencia, las configuraciones 8 y 9 que presentaron los mejores resultados a nivel global en el presente estudio, y las configuraciones utilizadas en estudios realizados en México, Colombia y Argentina.

La Tabla 14 muestra que la única parametrización que se repite en todas las configuraciones es la de radiación de onda larga (Rapid Radiative Transfer Model "RRTM"). Otra parametrización que se repite en la mayoría de configuraciones (menos en la utilizada en el estudio realizado en Cuyo, Argentina) es la de radiación de onda corta (Dudhia).

Se puede observar que las parametrizaciones para la microfísica que se utilizaron en las configuraciones 8 y 9 del estudio (Double-Moment), no se repiten en las configuraciones de referencia ni en las configuraciones utilizadas en los estudios realizados en México, Colombia y Argentina.

Se puede observar que las parametrizaciones para la capa superficial y suelo superficial que se utilizaron en las configuraciones 8 y 9 del presente estudio (MM5 Similarity y 5-layer thermal diffusion, respectivamente), no se repiten en las configuraciones de referencia ni en las configuraciones utilizadas en estudios realizados en México, Colombia y Argentina. Es importante notar que las configuraciones de referencia y las utilizadas en estudios realizados para México, Colombia y Argentina, utilizaron la misma parametrización para suelo superficial (Noah scheme).

La Tabla 14 indica que la parametrización para la capa límite planetaria utilizada en las configuraciones 8 y 9 del presente estudio (Yonsei University), se repite en la configuración de referencia "Air Force Weather Agency (AFWA) Configuration" y en las utilizadas en estudios realizados en Colombia y Argentina.

La parametrización para el esquema convectivo cúmulo utilizada en la configuración 8 del presente estudio (Betts-Miller-Janjic) no se repite en las configuraciones de referencia, pero si se repite en el estudio realizado en México. La parametrización para el esquema convectivo cúmulo utilizada en la configuración 9 del presente estudio (Grell 3d ensemble cumulus) no se repite en las configuraciones de referencia, pero si se repite en el estudio realizado en Cuyo, Argentina.

CONCLUSIONES

Se identificó que a nivel nacional, las configuraciones 8 y 9 del modelo WRF V3.2 fueron las que presentaron el mejor desempeño en la simulación de la temperatura y la lluvia durante agosto de 2010.

La combinación de los siguientes esquemas de parametrización son los que mejor desempeño presentaron a nivel del Ecuador continental, para el periodo evaluado:

Capa Superficial: *MM5 similarity* (Configuraciones 8 y 9)

Suelo Superficial: *5-layer thermal diffusion* (Configuraciones 8 y 9)

Capa Límite Planetaria: *Yonsei University* (Configuraciones 8 y 9)

Cumulo-Convectivo: *-Betts-Miller-Janjic* (Configuración 8)

-Grell 3d ensemble cumulus (Configuración 9)

Los resultados tienen sentido ya que los esquemas de parametrización *MM5 similarity* (Capa superficial) y el *Yonsei University* (Capa límite planetaria) suelen ir emparejados, y hacen uso de la teoría de semejanza de Monin-Obukhov para calcular flujos turbulentos en superficie (García, 2014). Además, el esquema *Yonsei University* es un esquema no local que incluye un flujo contragradiante, que permite simular de manera adecuada la evolución de la capa límite planetaria (Ruíz y Saulo, 2010).

El esquema *5-layer thermal diffusion* es un modelo simplificado del suelo que predice su temperatura en 5 niveles. En este esquema, la humedad del suelo permanece constante y se determina por medio de tablas con valores que difieren según la temporada y tipo de suelo (Ruíz y Saulo, 2010).

El esquema *Betts-Miller-Janjic* ha sido utilizado con frecuencia en los Centros Nacionales de Predicción Ambiental y ha experimentado una constante mejora a través de los años. Este esquema elimina la energía potencial convectiva disponible sin tener en cuenta el forzamiento superficial (Ruíz y Saulo, 2010).

El esquema *Grell 3d ensemble cumulus* es un esquema que permite la propagación de los efectos entre celdas vecinas en la malla, lo que lo convierte en la opción más apropiada para tamaños de cuadrícula menores a 10 km (Skamarock et al., 2008).

Para la Costa, las configuraciones 1, 2, 3, 10 y 11 son las que mejores resultados presentaron en la simulación de la temperatura y lluvia, inclusive en comparación con las configuraciones 8 y 9.

Para la Sierra y Oriente las configuraciones 8 y 9 son las que mejores desempeños presentaron en la simulación de la temperatura y lluvia.

Las configuraciones de los esquemas de parametrización física 8 y 9 que mejor desempeño presentaron en el Ecuador para agosto de 2010, no son congruentes con las configuraciones de referencia del modelo WRF V3.2, excepto por las parametrizaciones para la radiación de onda corta y larga, y la parametrización para la capa límite planetaria de la configuración de referencia "AFWA". Además, se ha comparado las configuraciones 8 y 9 del presente estudio con las de otros estudios realizados en América (México, Colombia y Argentina), y se han encontrado similitudes en las parametrizaciones para la radiación de onda corta y larga, la capa límite planetaria y el esquema convectivo cúmulo.

Se ha visto que los estudios en otros países han tendido a utilizar las configuraciones de referencia, ya que se han tratado de aplicaciones directas.

Realizar este tipo de evaluaciones es muy importante, porque se demuestra que las configuraciones de referencia no necesariamente funcionan para todos los lugares del planeta, debido a que cuentan con diversas características climáticas y topográficas.

Recomendaciones

La evaluación presentada en este documento debe ser complementada con estudios que cubran otros periodos, en lo posible todo el ciclo anual.

Se requiere evaluar el desempeño de las configuraciones de parametrización física identificadas en el presente estudio con el mejor desempeño, en relación con otras variables como la humedad, la velocidad y dirección del viento.

Dependiendo de los resultados que se obtengan con nuevos periodos de estudio, se debe explorar si es conveniente realizar simulaciones con configuraciones diferenciadas, por una parte para la Costa; y otra, para las regiones Sierra y Oriente.

Para futuras evaluaciones, se debería incluir un número mayor de estaciones, especialmente para las regiones Costa y Oriente, de manera que los estudios sean más representativos para estas regiones.

Se recomienda explorar a futuro, nuevas opciones de configuración que se hayan implementado en versiones recientes del modelo WRF.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arango C., Ruiz J. (2011) *Implementación del modelo WRF para la sabana de Bogotá*.

IDEAM. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Colombia.

Obtenido el 30 de abril del 2016 desde

http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21132/Modelo_WRF_Bogota.pdf/f1d346

38-e9f8-4689-b5f4-31957c231c46

Cárdenas P. (2013) *Automatización del modelo de predicción meteorológica WRF empleando*

herramientas de software libre. Escuela Politécnica Nacional. Tesis de Grado.

Corrales A., González L., Narváez M., González M., Osuna E., Ruíz O., Maciel L. (2013)

Generación y evaluación estadística del pronóstico lluvia a cinco días. Folleto

Técnico No. 53. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y

Pecuarias. Centro de Investigación Regional Norte Centro, Campo Experimental

Pabellón. Pabellón de Arteaga, Ags. México. 23p

Corrales A., Narváez M., Ruíz O., Flores H., González L., González M., Maciel L. (2014)

Validación del pronóstico de lluvia acumulada mediante el modelo WRF para la

República Mexicana. Memoria de la XXVI Semana Internacional de Agronomía FAZ-

UJED.

DTC (2016) *WRF Reference Configurations*. Obtenido el 30 de abril del 2016 desde

<http://www.dtcenter.org/config/>

EEA (2011) *The application of models under the European Union's Air Quality Directive: A technical reference guide*. ISSN: 1725-2237.

Emery C., Tai E., Yarwood G. (2001) *Enhanced Meteorological Modeling and Performance Evaluation for Two Texas Ozone Episodes*. Environ. International Corporation. Obtenido el 30 de abril del 2016 desde <http://www.tceq.state.tx.us/assets/public/implementation/air/am/contracts/reports/mm/EnhancedMetModelingAndPerformanceEvaluation.pdf>

EPA (2015) *Meteorological Models*. U.S. Environmental Protection Agency. Obtenido el 30 de abril del 2016 desde <http://www3.epa.gov/ttn/scram/metmodel.htm#datapatt>

Fernández R., Lakkis G., Allende D., Santos R., Cremades P., Puliafito E. (2011) *Modelación de un evento meteorológico de mesoescala utilizando el modelo WRF*. Contaminación Atmosférica e Hídrica en Argentina. E. Puliafito (Ed.) Universidad Tecnológica Nacional, 2011, pp: 289-298.

García M. (2014) *Realismo físico, valor añadido y sensibilidad a la elección de las parametrizaciones de un Modelo Regional del Clima sobre Europa*. Universidad de Cantabria. Tesis Doctoral.

Gates W., Mitchell J., Boer G., Cubasch U., Meleshko V. (1992) *Climate Modelling, Climate Prediction and Model Validation*. IPCC Supplement Report 1992. Obtenido el 30 de abril del 2016 desde

https://www.ipcc.ch/ipccreports/1992%20IPCC%20Supplement/IPCC_Suppl_Report_1992_wg_I/ipcc_wg_I_1992_suppl_report_section_b.pdf

Gualán R., Solano L. (2014) *Análisis de rendimiento y profiling del modelo WRF en un clúster HPC*. MASKANA, I+D+ingeniería 2014. Obtenido el 30 de abril del 2016 desde

http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/21399/1/TIC.EC_13_Gual%C3%A1n%20%26%20Solano.pdf

INAMHI (2014) Anuario Meteorológico No. 51-2011. Quito, Ecuador.

INAMHI (2016) *Modelos Numéricos*. Obtenido el 30 de abril del 2016 desde <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/modelos-hidrometeorologicos/#>

INECC (2014) *Tipos de Modelos Atmosféricos*. SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). México. Obtenido el 30 de abril del 2016 desde <http://www.inecc.gob.mx/calibre-herramientas-analisis/582-calibre-tipos-modelos>

IPCC (2001) *Climate Change 2012: Synthesis Report. Contribution of Working Group I: The Scientific Basis*. IPCC Third Assessment Report: Climate Change 2001 (TAR). Obtenido el 7 de mayo del 2016 desde <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/>

Izurieta N., Zambrano M. (2012) *Área de modelación matemática proyecto Plataforma de Gran Altitud*. Revista Politécnica, 2010, Vol. 31(1): 15-29

León E., Zea A. (2001) *Comparación del clima estacional simulado por el modelo CCM3 y los datos del Reanalysis NCEP/NCAR con los datos observados de la temperatura del aire y la precipitación sobre Colombia*. Meteorol. Colomb. 3:39- 51. ISSN 0124-6984. Bogotá D.C. – Colombia.

Litta A., Mohanty U., Idicula S. (2012) *The diagnosis of severe thunderstorms with high-resolution WRF models*. J. Earth Syst. Sci. 121, No. 2, April 2012, pp. 297–316.

Llebot J. (2009) *Bases de la modelización climática*. Agua y Cambio Climático. Diagnóstico de los impactos previstos en Cataluña. Universidad Autónoma de Barcelona. Obtenido el 30 de abril del 2016 desde https://aca-web.gencat.cat/aca/documents/es/publicacions/escenaris_climatics/capitol4_lowress.pdf

MAE (2013) *Descripción de Escenarios Climáticos*. Proyecto de Adaptación al Cambio Climático. Obtenido el 23 de abril del 2016 desde <http://www.pacc-ecuador.org/escenarios-climaticos/descripcion/>

Matsudo C., García Y., Ferreira L., Ruiz J., Salio P., Vidal L., Nicolini M. (2013) *Pronóstico determinístico y probabilístico en alta resolución con el modelo BRAMS*. Instituto Nacional del Agua. Argentina.

McDaniel M., Sprout E., Boudreau D., Turgeon A. (2012) *Meteorology*. Education Revista National Geographic. Obtenido el 7 de mayo del 2016 desde <http://education.nationalgeographic.org/encyclopedia/meteorology/>

- Mejía S., Ruíz J. (2015) *Validación de los pronósticos de precipitación con los modelos GFS, MM5, WRF, CMM5 y CWRF sobre el territorio colombiano*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. Obtenido el 7 de mayo del 2016 desde [http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21132/Validaci%C3%B3n_Modelos_MM5_WRF_\(Ruiz.pdf/13192c3b-a59f-4114-9eb0-220d3c897cef](http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21132/Validaci%C3%B3n_Modelos_MM5_WRF_(Ruiz.pdf/13192c3b-a59f-4114-9eb0-220d3c897cef)
- Muñoz A (2010) *Validación y Análisis de Consenso de Modelos de Escenarios de Cambio Climático para Ecuador*. Proyecto MAE-SCN-PRAA-PACC-INAMHI. Obtenido el 23 de abril del 2016 desde <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/07/Informe-An%C3%A1lisis-de-Consenso.pdf>
- OpenWeatherMap (2016) *Meteorological Models*. Obtenido el 7 de mayo del 2016 desde <http://openweathermap.org/models>
- Palacios E., Serrano S., Núñez P. (2009) *Estudio de la climatología ecuatorial andina con métodos numéricos: pronósticos de tiempo, validaciones y reconstrucción de la atmósfera*. La Granja. Vol.10 (2). Pp.16-26. ISSN: 1390-3799.
- Parra R., Páez C. (2006) *Aplicación del modelo WRF-CHEM en la simulación numérica de la calidad del aire del Distrito Metropolitano de Quito*. CORPAIRE. Quito. Ecuador. Obtenido el 30 de abril del 2016 desde http://modelos.quitoambiente.gob.ec/EmisionesWWW/images/page5/docs/Aplicacion_WRF_Chem_DMQ_dic_2006.pdf

- Parra R. (2012) *Evaluación preliminar de la temperatura media en superficie del Ecuador para el año 2010, obtenida mediante el modelo Weather Research Forecasting (WRF)*. Avances, 2012, Vol.4, No.2, Pags: C27-C35.
- Rau P., Condom T. (2010) *Análisis espacio temporal de la precipitación en las zonas de montaña de Perú (1998-2007)*. REVISTA PERUANA GEO-ATMOSFÉRICA RPGA (2), 16-29 (2010).
- Ruíz J. (2008) *Aplicación de los pronósticos por ensambles a la predicción del tiempo a corto plazo sobre Sudamérica*. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires.
- Ruíz J., Saulo C. (2010) *WRF Model Sensitivity to Choice of Parameterization over South America: Validation against Surface Variables*. American Meteorology Society. Vol. 138. DOI: : 10.1175/2010MWR3358.1
- Seinfeld J.H y Pandis S.N. (1998). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley and Sons Inc. EUA.
- Skamarock W., Klemp J., Dudhia J., Gill D., Barker D., Duda M., Huang X., Wang W., Powers J. (2008) *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. NCAR Technical Note. Boulder, Colorado, USA. Obtenido el 30 de abril del 2016 desde http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf

Stensrud D. (2007) *Parameterization Schemes. Keys to Understanding Numerical Weather Prediction Models*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. ISBN:

Steyn D., Galmarini S. (2008) *Evaluating the Predictive and Explanatory Value of Atmospheric Numerical Models: Between Relativism and Objectivism*. The Open Atmospheric Science Journal, 2008, 2, 38-45

Tesche T., McNally D., Tremback C. (2002) *Operational Evaluation of the MM5 Meteorological Model over the Continental United States. Protocol for Annual and Episodic Evaluation*. EPA. Obtenido el 30 de abril del 2016 desde https://www3.epa.gov/scram001/reports/tesche_2002_evaluation_protocol.pdf

UCAR (2008) *Funcionamiento de los modelos de mesoescala*. Obtenido el 30 de abril del 2016 desde http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/models_es/print.htm

USFQ (2016) Grupo de Investigación sobre la Ceniza Volcánica en el Ecuador (GICVE) – Colegio de Ciencias e Ingeniería. Obtenido el 30 de abril del 2016 desde https://www.usfq.edu.ec/programas_academicos/colegios/politecnico/institutos/gicve/Paginas/default.aspx

WCRP (2015) WWRP/WGNE Joint Working Group on Forecast Verification Research. Collaboration for Australian Weather and Climate Research. Obtenido el 30 de abril del 2016 desde <http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/>

WRF (2016) *The Weather Research and Forecasting Model*. Obtenido el 23 de abril del 2016 desde <http://www.wrf-model.org/index.php>