

Evaluación preliminar de la temperatura media en superficie del Ecuador para el año 2010, obtenida mediante el modelo Weather Research Forecasting (WRF)

René Parra*

*Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Ciencias e Ingeniería –El Politécnico–
Facultad de Ingeniería Ambiental, Diego de Robles y Vía Interoceánica, Quito, Ecuador*

**Autor principal/Corresponding author, e-mail: rparra@usfq.edu.ec*

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 12/01/2012. Aceptado/Accepted: 12/08/2012.

Publicado en línea/Published on Web: 12/28/2012. Impreso/Printed: 12/28/2012.

Abstract

Weather information is critical to diverse fields of research and environmental management. Meteorological observations are typically recorded in weather stations located at a few points within the area of interest. Through eulerian meteorological models it is possible to generate information for places where direct monitoring is not available. The Advanced Research WRF model was used to simulate the meteorological fields for the year 2010 for continental Ecuador. One master domain (cells of 36 km) and 2 nested subdomains (cells of 12 and 4 km) were used in the model. The modeled monthly mean variation for the temperature captured the tendency of the meteorological records for the 10 stations used in this study. Temperature monthly means for 3 stations were well reproduced, with differences between 0 – 1 °C. At 7 stations the model yielded higher or lower values in comparison with the records, with differences between 0.1 - 2.7 °C. The best correlation between modeled results and observational records happened for the 5 stations located on the coast side (Costa) (R2 between 0.90 – 0.97) whose topography is flat. The correlation coefficient was lower for the stations in the highlands (Sierra) (R2 between 0.69 - 0.89), possibly due to the influence of its complex topography. At 7 stations percentages higher than 90 % were obtained of modeled values that comply with the desired accuracy, according to European criteria. At all stations the average absolute error values were lower than the upper limit that considers the USEPA. At 3 stations values of bias were within the range recommended by the USEPA. Model maps provide an integrated and coherent description of the spatial and temporal variation of temperature throughout the territory. These model products can be very useful for applications in which marginal differences in temperature between model results and observations are not relevant. Assessments with more stations and meteorological parameters are required for a more accurate study. Likewise, it is necessary to evaluate the performance of the model, considering separately the Costa, Sierra and Amazonia; with a higher spatial resolution for the Sierra's simulations.

Keywords. Eulerian model, meteorology, INAMHI, desired accuracy, mean absolute gross error

Resumen

La información meteorológica es clave para diversos ámbitos de investigación y gestión ambiental. Los valores de los parámetros típicamente se registran en estaciones meteorológicas emplazadas en pocos puntos. Los modelos meteorológicos eulerianos permiten generar información en lugares exentos de monitoreo directo. Se utilizó el modelo Advanced Research WRF para simular la meteorología del año 2010 para la zona del Ecuador continental, mediante un dominio maestro (celdas de 36 km) y 2 subdominios anidados (celdas de 12 y 4 km). Los valores modelados de la temperatura media mensual capturaron la tendencia de los registros en las 10 estaciones utilizadas en el estudio. Los perfiles de 3 estaciones fueron bien reproducidos, con diferencias entre 0 y 1 °C. En 7 estaciones el modelo presentó valores mayores o menores a los registros, con diferencias entre 0.1 - 2.7 °C. La mejor correlación lineal entre registros y resultados modelados, se presentó en las 5 estaciones de la Costa (R2 entre 0.90 - 0.97), zona de topografía plana. La correlación fue menor en las estaciones de la Sierra (R2 entre 0.69 - 0.89), posiblemente por la influencia de su topografía compleja. En 7 estaciones se obtuvieron porcentajes mayores al 90 % de valores modelados que cumplen con la precisión deseada, según el criterio europeo. En todas las estaciones se obtuvieron valores del error medio absoluto menores al límite máximo que considera la USEPA. Los mapas del modelo describen de manera integrada y coherente, la variación espacial y temporal de la temperatura en todo el territorio. En 3 estaciones se obtuvieron valores del sesgo dentro del rango que recomienda la USEPA. Los resultados pueden ser de gran utilidad para aplicaciones para las que no es relevante las diferencias marginales con los registros. Para estudios de mayor alcance, se requieren evaluaciones con más estaciones y parámetros meteorológicos. Es necesario evaluar el desempeño del modelo, considerando por separado la Costa, Sierra y Amazonia; con una mayor resolución espacial para las simulaciones de la Sierra.

Palabras Clave. Modelo Euleriano, meteorología, INAMHI, precisión deseada, error medio absoluto

Introducción

La información meteorológica es clave para diversos ámbitos de investigación, gestión ambiental, energética y ecológica.

Históricamente los valores de la temperatura, radiación solar, dirección y velocidad del viento, humedad relativa, presión atmosférica y lluvia; entre otras variables, se registran en pocas estaciones localizadas en sitios seleccionados, en función del potencial uso de la información.

En el Ecuador, el Instituto Ecuatoriano de Meteorología e Hidrología (INAMHI) es la entidad con competencias de implementación y operación las estaciones meteorológicas. Actualmente hay unas 260 estaciones a nivel nacional [1]. La Dirección General de Aviación Civil (DGAC) opera y mantiene estaciones meteorológicas en los aeropuertos del país. Las estaciones de la DGAC operan desde las 06h00 hasta las 19h00. No hay monitoreo meteorológico durante la noche.

Las estaciones meteorológicas forman parte de las redes de monitoreo de la calidad del aire. La Secretaría de Ambiente del Municipio de Quito opera y mantiene 6 estaciones meteorológicas [2]. La Empresa de Movilidad y Transporte EMOV-EP, desde mayo de 2012 opera una estación meteorológica emplazada en el centro histórico de Cuenca [3].

Las actividades de gestión e investigación requieren de información meteorológica con mayor alcance espacial, en relación a la que proporcionan las estaciones; considerando la influencia de las condiciones orográficas. Por ejemplo, la línea base de los estudios de impacto ambiental, frecuentemente requiere de datos de variables atmosféricas, en lugares en donde no hay estaciones.

Una alternativa para generar información meteorológica, virtualmente para cualquier parte del mundo, se encuentra en los modelos meteorológicos de tipo euleriano.

En el Ecuador hay experiencias en la aplicación de modelos meteorológicos. Para los inventarios de emisiones de contaminantes del aire en Quito, de los años 2005 [4] y 2007 [5]; y en Cuenca, años 2007 [6] y 2009, se utilizó el modelo *Weather Research and Forecasting (WRF)*, para generar mapas de temperatura, radiación solar y viento en superficie, con resoluciones de hasta 1 km. Los mapas de temperatura y radiación solar, son los parámetros físicos más importantes para las emisiones de la vegetación [7, 8, 9].

El WRF es un modelo numérico euleriano, de última generación, de código libre; que se utiliza para pronóstico e investigación meteorológica. Es aplicable a escalas global, mesoesalar, regional o local. Permite el procesamiento numérico en paralelo con gran eficiencia [10]. Trabaja con dominios tridimensionales con respecto a un sistema de referencia x, y, sigma. Los valores sigma definen la configuración vertical, mediante superficies

planas para las capas altas de la atmósfera, que van tomando la forma de la topografía de la zona de simulación, a medida que las capas se acercan a la superficie.

Se simuló la meteorología de un año completo para la zona continental del Ecuador, a fin de disponer datos con mayor alcance espacial, y entender mejor el comportamiento de las variables atmosféricas en el ciclo anual.

De manera preliminar, se presenta la evaluación de la temperatura media mensual en superficie, parámetro básico, que en la gestión de la calidad del aire se relaciona directamente con el comportamiento emisor de la vegetación, las tasas de estabilización de la materia orgánica, la tendencia de evaporación de las fracciones más volátiles de los combustibles, la estabilidad atmosférica y su rol en la dispersión de contaminantes del aire; entre otros.

Método

Se desarrollaron simulaciones para el año 2010, mediante el modelo Advanced Research WRF (ARW) versión 3.2 [11], con un dominio maestro y dos subdominios anidados (Fig. 1). El segundo dominio 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. Las condiciones iniciales y de contorno se generan a partir de la base de datos de análisis final (NCEP-FNL) del National Center for Atmospheric Research de los Estados Unidos [12]. Estos archivos proporcionan información meteorológica global, 4 veces por día (horas 00, 06, 12 y 18; hora universal), en celdas de 1 grado geográfico de lado (aproximadamente 110 km). Los archivos de análisis final son generados por el Global Data Assimilation System (GDAS) [13], sistema que permanentemente colecta registros del Global Telecommunications Systems (GTS) y otras fuentes.

La Tabla 1 presenta los principales parámetros de simulación.

Los componentes, las ecuaciones numéricas, tratamiento de las condiciones iniciales y de borde, las opciones físicas, anidamiento y demás características del modelo WRF, pueden ser consultados en la documentación técnica del modelo [11].

Las simulaciones se desarrollaron para los días 1 hasta 27 de cada mes. Se obtuvieron mapas representativos (valores medios mensuales), mediante el promedio de todos los resultados horarios.

El procesamiento numérico se desarrolló en una estación de trabajo de 12 GB de memoria RAM, con 12 procesadores (2 componentes de 6 cores) de 2.4 GHz cada uno. Las simulaciones se desarrollaron en grupos de 3 días. Los resultados por grupo se obtuvieron en aproximadamente 10 horas.

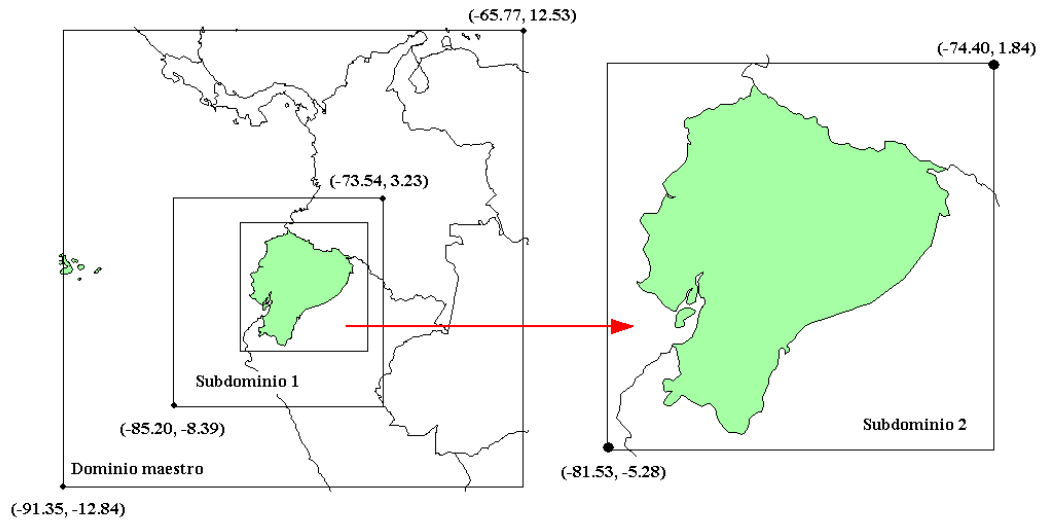


Figura 1: Dominios de simulación meteorológica para el territorio continental del Ecuador.

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)
Parámetros físicos				
mp_physics		16		WRF Double-Moment 6-class scheme
sf_surface_physics		1		Monin-Obuknov
bl_pbl_physics		2		Mellor-Yamada-Janjic

Tabla 1: Parámetros de simulación meteorológica para el Ecuador continental, año 2010.

Como periodo de prueba, se seleccionó el año 2010, año reciente del cual se requiere información meteorológica con alcance nacional y suficiente detalle espacial, para otras actividades de investigación, entre las que se destacan el primer inventario de emisiones de compuestos orgánicos volátiles de la vegetación y la estimación de las emisiones de material particulado por erosión eólica del Ecuador.

Resultados y discusión

Las Figs. 2 - 3 presentan los mapas de la temperatura media por mes. Tanto la variación espacial y temporal son coherentes. La temperatura disminuye con la altura. En todo el territorio, los valores más bajos se presentaron en agosto, mes de poca lluvia y escasa nubosidad, con temperaturas mínimas más bajas y una mayor pérdida de calor nocturno en la superficie.

Los valores medios mensuales simulados de la temperatura se compararon con los registros de 10 estaciones, 5 localizadas en la Costa (aeropuertos de Esmeraldas, Manta, Santo Domingo, Portoviejo y estación en Milagro) y 5 en la Sierra (aeropuertos de Ibarra, Latacunga, Ambato, Riobamba y Cuenca)(Fig. 4). Para el cálculo de la temperatura media mensual, solamente se consideraron los resultados simulados desde las 06h00 hasta las 19h00; que corresponde al periodo de monitoreo de las estaciones de los aeropuertos.

Los valores simulados capturan la tendencia mensual de los registros en las 10 estaciones (Figs. 5 - 6). Los valores de Esmeraldas (diferencias entre 0 y 0.6 °C), Riobamba (diferencia entre 0 y 0.9 °C) y Cuenca (diferencias entre 0.1 y 0.9 °C) fueron los mejor capturados por el modelo. En Santo Domingo, Manta, Portoviejo, Milagro, Latacunga y Ambato el modelo presentó valores mayores a los registros (diferencias entre 0.1 y 2.7 °C, sesgo positivo). En Ibarra el modelo presentó valores menores a los registros (diferencias entre 1 y 2.4 °C, sesgo negativo).

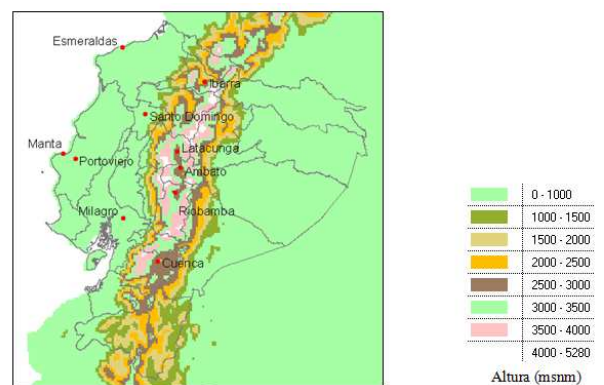


Figura 4: Localización de estaciones meteorológicas (puntos rojos) cuyos registros se comparan con los resultados modelados de la temperatura de la temperatura media en superficie.

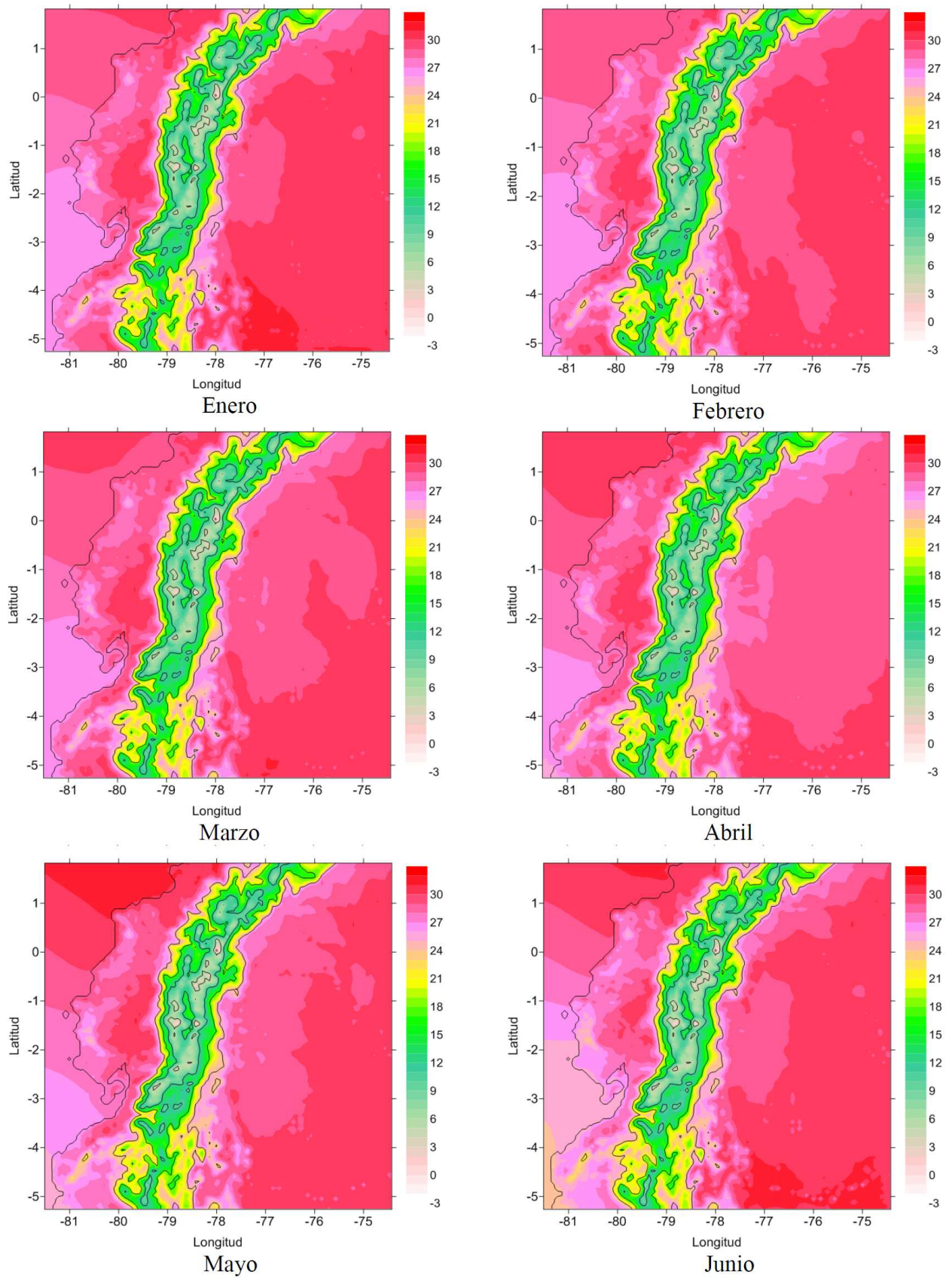


Figura 2: Mapas de temperatura media en superficie (°C) del año 2010 para la zona continental del Ecuador. Enero - Junio.

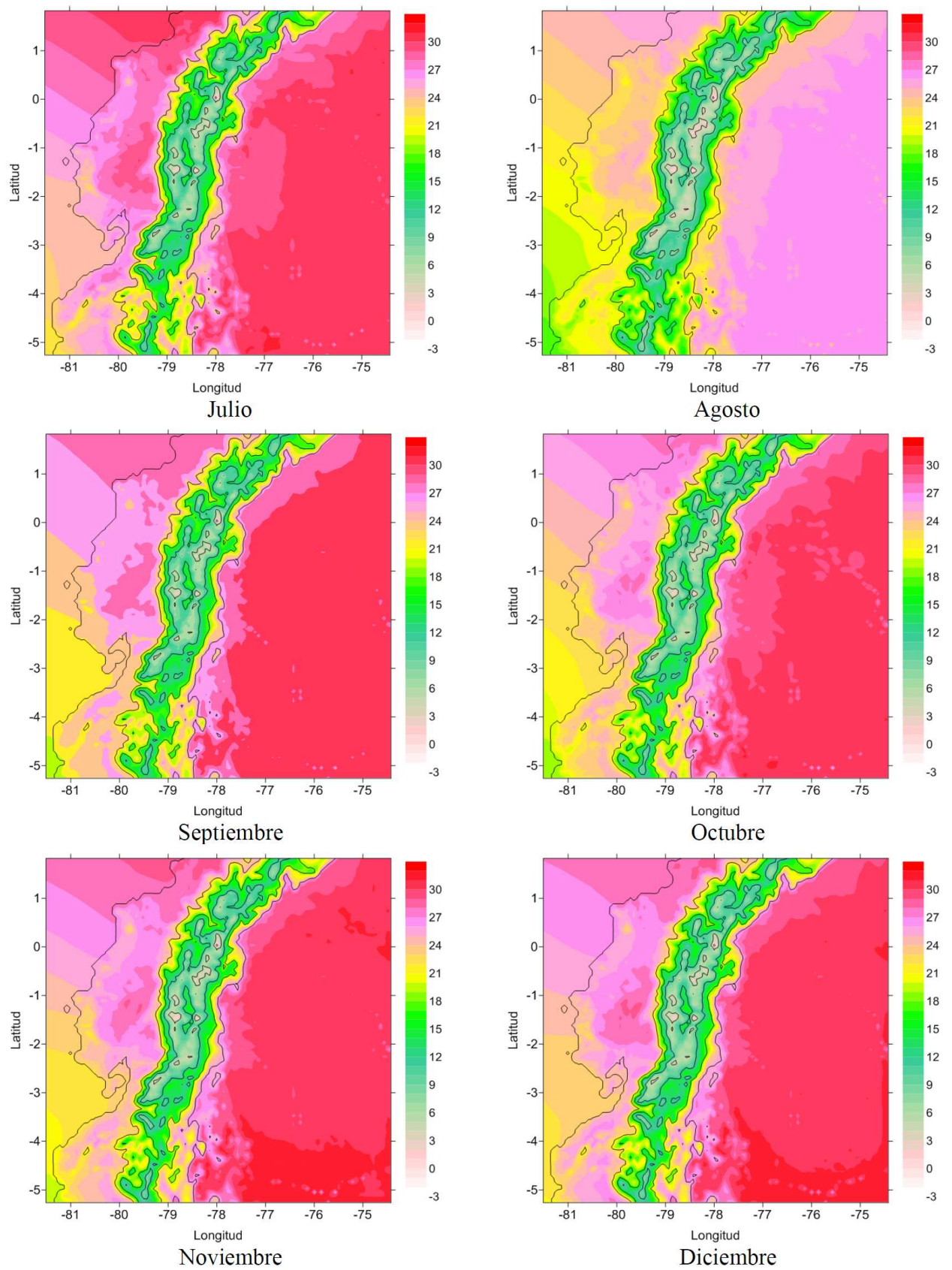


Figura 3: Mapas de temperatura media en superficie ($^{\circ}\text{C}$) del año 2010 para la zona continental del Ecuador. Julio - Diciembre.

Estación	Región	Porcentajes de valores modelados que cumplen el criterio europeo para la precisión deseada (<math><2^{\circ}\text{C}</math>, EEA)		Error medio absoluto (mean absolute gross error) <math><2\text{ K}</math>, USEPA	Sesgo (bias) <math><\pm 0.5\text{ K}</math>, USEPA	Índice de congruencia (index of agreement) $>\pm 0.8\text{ K}$, USEPA
Esmeraldas		100.0		0.3	0.1	0.88
Santo Domingo		91.7		1.7	1.7	0.35
Manta	Costa	83.3		1.6	1.6	0.37
Portoviejo		91.7		1.4	1.4	0.37
Milagro		75.0		1.7	1.7	0.31
Ibarra		50.0		1.9	-1.9	0.73
Latacunga		91.7		1.7	1.7	0.79
Ambato	Sierra	100.0		0.9	0.9	0.90
Riobamba		100.0		0.5	-0.5	0.97
Cuenca		100.0		0.5	-0.1	0.97

Tabla 2: Resumen de parámetros de evaluación de simulación de la temperatura media mensual en superficie.

Las Figs. 7 - 8 presentan la correlación entre los registros (eje x) y los valores modelados (eje y). La línea azul presenta una pendiente de 45° . En una correlación perfecta, todos los pares de valores (puntos rojos) deberían alinearse con la recta azul. Las líneas de correlación de los pares, son aproximadamente paralelas a la recta de 45° , e indican con claridad los casos en los que el modelo generó valores mayores o menores a los registros.

El coeficiente R2 describe con la correlación lineal entre los registros y valores modelados. Los mejores valores de R2 se presentan en las estaciones de la Costa, con valores entre 0.90 y 0.97. La correlación es menor en las estaciones de la Sierra, con valores de R2 entre 0.69 y 0.89.

La mejor correlación en las estaciones de la Costa se explicaría por la topografía plana. Para la Sierra, zona con topografía compleja, se podría mejorar la correlación con resoluciones menores a 4 km. A fin de mejorar la correlación, es necesario investigar el desempeño del modelo al simular por separado las zonas de la Costa, Sierra y Amazonía; con una mayor resolución espacial para las simulaciones de la Sierra.

En la Unión Europea se considera como precisión deseada, para gestión de la calidad del aire, que la temperatura modelada presente variaciones de hasta $\pm 2^{\circ}\text{C}$ con relación a los registros [14].

Con igual finalidad, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) establece valores menores a 2 K para el error medio absoluto (mean absolute gross error, MAE) de la temperatura simulada, menores de $\pm 0.5\text{ K}$ para el sesgo (bias), y mayores o iguales a 0.8 para el índice de congruencia (index of agreement, IOA) [14].

Para cada estación, se calculó el error medio absoluto mediante la Ecn 1:

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i - O_i \quad (1)$$

Siendo:

MAE: error medio absoluto

n: número de valores evaluados (12)

Mi: valor modelado de orden i

Oi: valor observado de orden i

El sesgo se calculó mediante la Ecn 2:

$$\text{BIAS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_m - O_m \quad (2)$$

Siendo:

BIAS: sesgo

n: número de valores evaluados (12)

Mm: promedio aritmético de los valores modelados

Om: promedio aritmético de los valores medidos

El índice de congruencia se calculó mediante la Ecn 3:

$$\text{IOA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n [|M_i - M_m| + |O_i - O_m|]} \quad (3)$$

Siendo:

IOA: índice de congruencia

n: número de valores evaluados

Mi: valor modelado de orden i

Mm: promedio aritmético de los valores modelados

Om: promedio aritmético de los valores medidos

Oi: valor observado de orden i

Los resultados se indican en la Tabla 2.

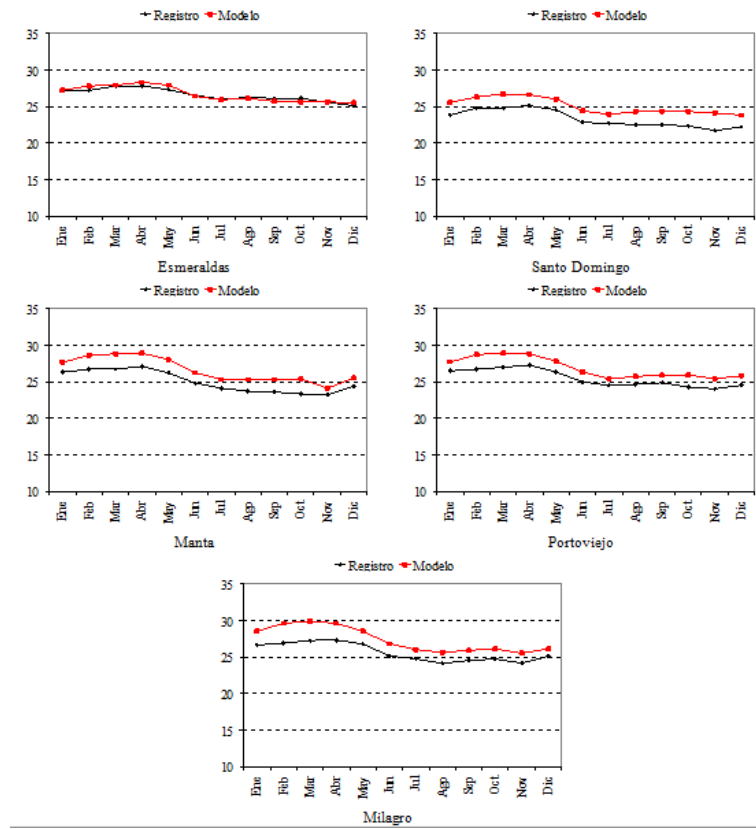


Figura 5: Comparación de la temperatura media mensual (°C). Registro Vs. Modelo. Estaciones de la Costa.

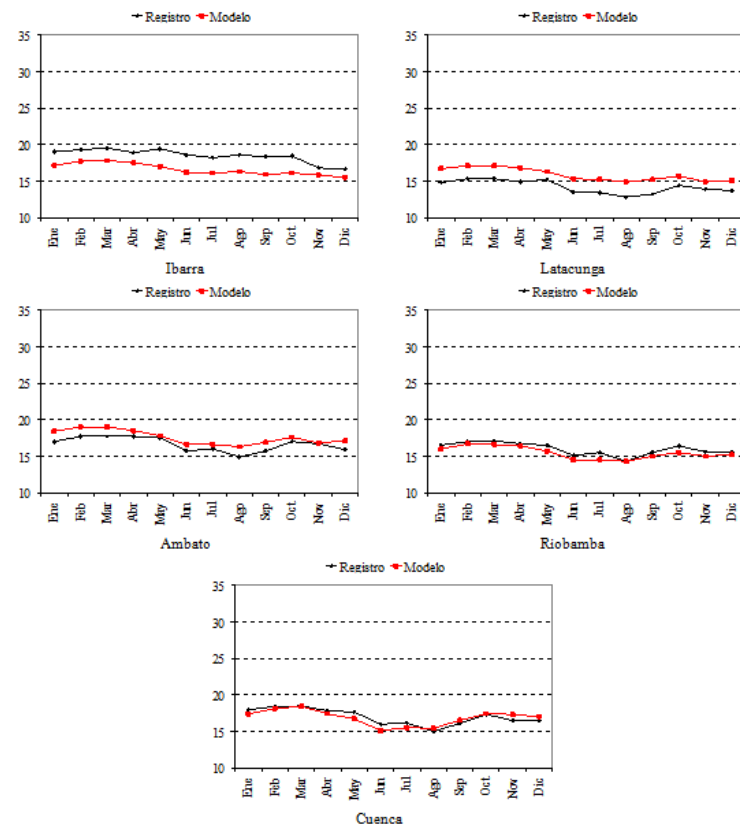


Figura 6: Comparación de la temperatura media mensual (°C). Registro Vs. Modelo. Estaciones de la Sierra.

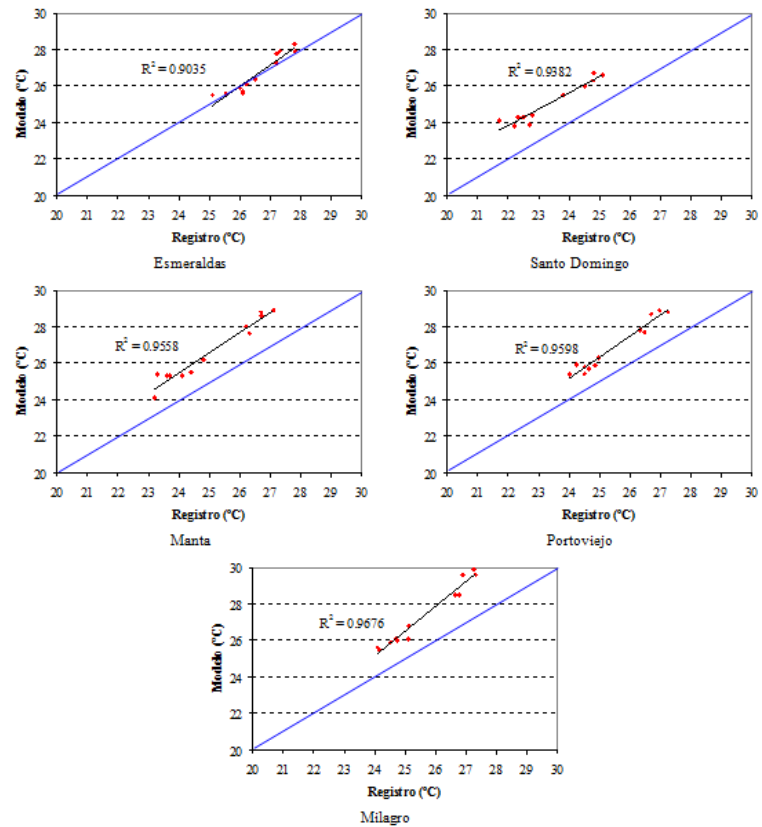


Figura 7: Pares de valores (puntos rojos) de la temperatura media mensual (°C). Registro (eje x), modelo (eje y). Estaciones de la Costa.

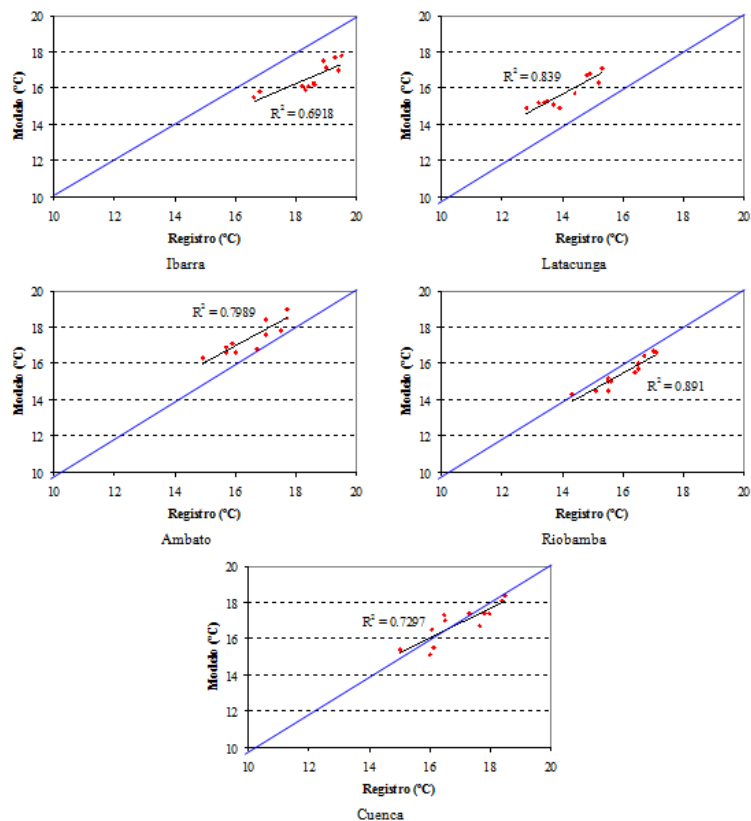


Figura 8: Pares de valores (puntos rojos) de la temperatura media mensual (°C). Registro (eje x), modelo (eje y). Estaciones de la Sierra.

En 7 de 10 estaciones se obtuvieron porcentajes mayores al 90 % de valores modelados que cumplen con la precisión deseada, según el criterio europeo. En todas las estaciones se obtuvieron valores del error medio absoluto menores al límite máximo que considera la USEPA. En 3 estaciones (Esmeraldas, Riobamba y Cuenca) se obtuvieron valores del sesgo dentro del rango que recomienda la USEPA. En 4 estaciones se obtuvieron valores del índice de congruencia dentro del rango que establece la USEPA.

Los mapas modelados describen de manera integrada la variación espacial y temporal de la temperatura media en todo el territorio. Aunque el modelo proporcionó valores mayores (hasta 2.7 °C) o menores (hasta 2.4 °C) en relación con los registros de algunas estaciones, los resultados pueden ser de gran utilidad, para aplicaciones en donde no es relevante estas diferencias marginales, como es el caso de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles de la vegetación.

La evaluación preliminar presenta un balance positivo, siendo necesario a futuro analizar periodos mayores, considerando registros diarios u horarios.

Estos resultados pueden ser de gran utilidad para aplicaciones para las que no es relevante las diferencias marginales con los registros. Para estudios de mayor alcance, se requieren evaluaciones con más estaciones y parámetros meteorológicos, incluyendo a la región amazónica. Es necesario evaluar el desempeño del modelo, considerando por separado la Costa, Sierra y Amazonía; con una mayor resolución espacial para las simulaciones de la Sierra. Se deberán incluir otros parámetros como la radiación solar, dirección - velocidad del viento y lluvia, considerando diferentes alternativas de parametrización del modelo.

A fin de mejorar el desempeño del modelo, se debe investigar el potencial aporte de los archivos de reanálisis para las condiciones iniciales y de contorno; archivos que incorporan a los resultados simulados a escala global, una cantidad importante de registros de monitoreo.

Un número suficiente de estaciones y un modelo validado constituye una combinación óptima para el monitoreo meteorológico.

Agradecimientos

Al INAMHI, por la entrega de la información de los registros meteorológicos.

A María del Carmen Cazorla, por sus observaciones y sugerencias; así como por la revisión del texto en inglés.

Referencias

- [1] Inamhi. 2012. Enlace: [http : //www.inamhi.gob.ec](http://www.inamhi.gob.ec) Fecha de consulta: 7 diciembre 2012.
- [2] Secretaria de Ambiente. 2012. Enlace: [http : //www.quitoambiente.gob.ec](http://www.quitoambiente.gob.ec) Fecha de consulta: 7 diciembre 2012.
- [3] EMOV EP. 2012. "Informe de la calidad del aire de la Ciudad de Cuenca durante el año 2011". En prensa.
- [4] Corpaire. 2007. "Inventario de Emisiones del Distrito Metropolitano de Quito 2005". Quito, Ecuador.
- [5] Corpaire. 2009. "Inventario de Emisiones del Distrito Metropolitano de Quito 2007". Quito, Ecuador.
- [6] Fundación Natura - Cuencaire - CGA. 2009. "Resumen del Inventario de Emisiones atmosféricas del Cantón Cuenca, Año Base 2007". Cuenca.
- [7] Guenther, A. B.; Zimmerman, P.R.; Harley, P.C. 1993. "Isoprene and Monoterpenes Emission Rate Variability: Model Evaluations and Sensitivity Analysis". *Journal of Geophysical Research*. 98(D7): 12609 – 12617.
- [8] Guenther, A.; Hewitt, C.N.; Erickson, D.; Fall, R.; Geron, C.; Graedel, T.; Harley, P.; Klinger, L.; Lerdau, M.; McKay, W.A.; Pierce, T.; Scholes, B.; Steinbrecher, R.; Tallamraju, R.; Taylor, J.; Zimmerman, P. 1995. "A global model of natural volatile organic compound emissions". *Journal of Geophysical Research*. 100(D5): 8873 – 8892.
- [9] Guenther, A.; Karl, T.; Harley, P.; Wiedinmyer, C.; Palmer, P. I.; Geron, C. 2006. "Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature)". *Atmos. Chem. Phys.* 6: 3181-3210.
- [10] Michalakes, J.; Dudhia, J.; Gill, D.; Henderson, T.; Klemp, J.; Skamarock, W.; Wang W. 2004. "The Weather Research and Forecast Model: Software Architecture and Performance". Eleventh ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology. Walter Zwiefelhofer and George Mozdzyński Eds., World Scientific. 156 – 168.
- [11] WRF. 2012. "The Weather Research and Forecasting Model". Enlace: [http : //www.wrf-model.org](http://www.wrf-model.org). Fecha de consulta: 7 diciembre 2012
- [12] NCAR. 2012. "CISL Research Data Archive". Enlace: [http : //rda.ucar.edu](http://rda.ucar.edu) Fecha de consulta: 7 diciembre 2012
- [13] ARL. 2012. "Global Data Assimilation System (GDAS1) Archive Information". Enlace: [http : //ready.arl.noaa.gov/gdas1.php](http://ready.arl.noaa.gov/gdas1.php) Fecha de consulta: 13 diciembre 2012
- [14] EEA. 2011. "The application of models under the European Union's Air Quality Directives. A technical reference guide". *European Environment Agency, Technical report No 10/2011*, 70.