

Evaluación del pronóstico de precipitación usando el modelo WRF en el Ecuador

Angela Iza¹, ...

¹aiza@inamhi.gob.ec

¹ Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, Nuñez de Vela y Corea, 170507, Quito, Ecuador.

Resumen: La información meteorológica es de suma importancia para el conocimiento del estado del tiempo y clima de una región. La información y las predicciones meteorológicas son una gran herramienta para la toma de decisiones en diferentes ámbitos de la sociedad, es así que dentro del pronóstico operativo en INAMHI se ha implementado el modelo Weather Research Forecasting (WRF) para generar pronósticos del tiempo sobre el Ecuador, con el cual se ha construido un dominio maestro de 36 km de resolución, y subdominios anidados de 12 km y 4 km, que circunscriben Ecuador Continental y Galápagos. Los valores modelados de precipitación han sido contrastados con los valores registrados en cuarenta y siete estaciones meteorológicas distribuidas en toda el área continental del Ecuador. Sobre la base de datos modelados y observados de los años 2013, 2014 a 2015, se aplicaron métodos de verificación estadísticas para evaluar el desempeño del pronóstico cuantitativo y métodos dicotómicos para evaluar eventos binarios sobre pronósticos que alcanzan o exceden umbrales especificados, dentro de esta metodología se utilizaron tres umbrales $a_1 = 0.5$ mm, $a_2 = 10$ mm y $a_3 = 50$ mm de precipitación diaria. Dentro de los resultados del modelo WRF se analiza la precipitación diaria pronosticada de 0 a 72 horas. Los resultados muestran correlaciones entre 0.3 y 0.6 durante el año 2015 para los pronósticos del primer día, mostrando mejor correlación sobre las estaciones de la región Interandina. La correlación más baja se observa sobre las estaciones de la región amazónica siendo de 0.17, 0.19 y 0.32 en los años 2013, 2014 y 2015 respectivamente. La correlaciones indican que el modelo presenta inconveniente en pronosticar la cantidad de precipitación sobre las estaciones de la región costa y amazónica, sin embargo al evaluar eventos binarios que sobrepasan el umbral de precipitación de 0.5 y 10 mm/día muestra una tasa de detección de 0.72 y una tasa de falsa alarma de 0.43 para el Ecuador para el año 2015. La proporción de eventos correctamente pronosticados oscila entre 0.65 y 0.89 para la mayoría de las estaciones del país, para los pronósticos del primer día y valores inferiores a 0.65 para pronósticos del segundo y tercer día.

Palabras-clave: Verificación, Weather Research Forecasting (WRF), Predicción numérica del tiempo, precipitación en Ecuador.

1. Introducción

El modelo meteorológico WRF (Weather Research and Forecasting) es un modelo numérico de mesoescala, diseñado para aplicaciones de predicción del tiempo operativa y de investigación atmosférica. El modelo WRF ha sido desarrollado por diversas entidades norteamericanas, entre ellas la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR), la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica. (Skamarock et al., 2008)

Entre las aplicaciones del modelo WRF incluyen la predicción numérica meteorológica en tiempo real, desarrollo y estudios de asimilación de datos, investigación de parametrizaciones físicas, simulaciones climáticas regionales, modelado de calidad del aire, acoplamiento atmósfera-oceano y simulaciones idealizadas, permitiendo utilizarlo para distintas configuraciones y aplicarlo a distintas regiones del planeta.

En el Ecuador existen diversas experiencias en la aplicación de modelos meteorológicos, en los que se ha utilizado el modelo WRF como insumo y aplicación en diferentes áreas, como en modelos de dispersión de contaminantes (Espinoza & Parra, 2016; Parra, 2014, 2016), en donde se ha utilizado el modelo WRF para generar mapas de temperatura a diferentes resoluciones para la ciudad de Cuenca, así como estudios de aplicación de las variables del modelo como insumo en modelos de dispersión de ceniza volcánica (Parra, 2019), además de estudios de la evaluación de temperatura sobre Ecuador obtenido mediante el modelo WRF (Parra Narváez, 2012). También se utilizó el modelo WRF para aplicaciones hidrológicas en donde se evalúa la variación espacio temporal de las precipitaciones sobre la zona centro del Ecuador (Heredia et al., 2018). Además de aplicaciones de reducción de escala dinámica utilizando el modelo WRF (Campozano et al., 2020; Ochoa et al., 2016; Trachte et al., 2017) y múltiples aplicaciones medio ambientales (Campozano, 2016; Campozano et al., 2016; Ochoa-Sánchez et al., 2014; Ochoa et al., 2016; Ulloa et al., 2018). Entre los primeros estudios de validación de precipitaciones del modelo numérico WRF en la ciudad de Quito se puede mencionar el estudio realizado en 2009 (Palacios et al., 2009).

El modelo numérico WRF en el INAMHI ha sido implementado desde el año 2010, y desde entonces se han realizado diversas configuraciones para la aplicación del modelo meteorológico en nuestro país. En el año 2012 se implementó el proceso automatizado de generación de los pronósticos numéricos mediante la configuración de dominios y parametrizaciones físicas, además se implementó el proceso de asimilación de datos de estaciones meteorológicas de superficie, el cual es un proceso cuyo objetivo es minimizar el error en las predicciones mediante técnicas variacionales. Sin embargo desde el año 2015 se implementó al proceso de asimilación de datos de sondeos atmosféricos además de las estaciones de superficie. En la actualidad los pronósticos numéricos del modelo WRF son una herramienta importante para la realización de los pronósticos meteorológicos operativos en el INAMHI, ya que proveen de información de distintas variables de la atmósfera a una resolución espacial y temporal más fina que los modelos meteorológicos globales.

La alta variabilidad tanto espacial como temporal de la precipitación en Ecuador hace compleja la predicción numérica de la misma (Morán-Tejeda et al., 2016). Es por tanto de mucha importancia evaluar desempeño de los pronósticos numéricos de precipitación y su comportamiento sobre la zona ecuatorial, además porque es una de las herramientas para la elaboración del pronóstico meteorológico operativo. Existen algunos estudios que evalúan el desempeño de esta variable en algunas zonas del Ecuador (Heredia et al., 2018; Palacios et al., 2009) mostrando diversos resultados dependiendo del área de estudio, sin embargo es de gran utilidad conocer los resultados en el pronóstico operativo y su desempeño en las diferentes regiones del país.

Para la evaluación se ha utilizado dos métodos, el primero basado en la verificación puntual para el pronóstico cuantitativo, y el segundo conocido como verificación de eventos categóricos, en el que se define un umbral para evaluar la precipitación que excede o iguala el umbral especificado (WWO, 2008). Mediante la elaboración de una tabla de contingencia categórica, se calculan el número de aciertos, falsas alarmas, errores y rechazos correctos para cada uno de los umbrales de precipitación definidos en el que se obtienen las métricas conocidas como probabilidad de detección (POD), proporción de falsas alarmas (FAR), índice de amenaza (TS), entre otros.

Para la verificación se utilizaron los registros de precipitación de cuarenta y siete estaciones meteorológicas distribuidas en el Ecuador facilitados por la Red de Estaciones Meteorológicas de INAMHI y los datos de aeropuertos de la Dirección General de Aviación Civil (DGAC) del Ecuador. Se evaluó el pronóstico numérico de precipitación desde 24 a 72 horas para cada día de pronóstico de los años 2013, 2014 y 2015.

2. Zona de estudio y datos

2.1. Descripción del modelo WRF

La configuración del modelo WRF cuenta con un dominio maestro y tres subdominios anidados que circunscriben Ecuador continental, la zona centro norte y sur del país respectivamente. El subdominio anidado que cubre Ecuador continental conforma una malla de 184 filas x 106 columnas, con longitud de celda de 12 km. Se utilizan como condición inicial y de frontera los análisis y pronósticos operativos del Global Forecast System (GFS) del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) / NCEP los cuales cuentan con una resolución horizontal de 1 grado geográfico, 34 niveles verticales y resolución temporal de 3 horas. Se utilizaron los datos del modelo GFS inicializados a las 00Z. Se considera el pronóstico numérico de precipitación desde 24 a 72 horas. Figura 1.

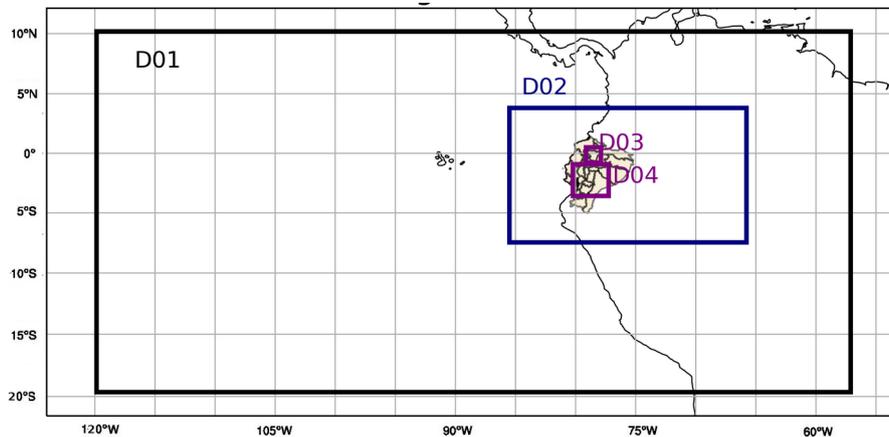


Figura 1 - Dominios utilizados en la configuración espacial del modelo WRF para la simulación meteorológica en el Ecuador.

Las configuraciones físicas del modelo numérico se seleccionaron en base a diferentes experimentos para casos específicos y se eligió la que más favorecía al pronóstico en la región de estudio. Las configuraciones se muestran en la tabla 1. Para el esquema de microfísica se escogió el esquema Lin et al. Scheme (Lin et al., 1983), un esquema sofisticado que tiene procesos de hielo, nieve y granizo, adecuado para simulaciones de alta resolución con datos reales. El modelo de radiación seleccionado fue el RRTM (Rapid Radiative Transfer Model (Iacono et al., 2008) un esquema que representa múltiples bandas, trazas de gases y especies de microfísica. Para el esquema de cúmulus se utilizó el esquema de ensamble *Grell-Devenyi* (Grell & Dévényi, 2002) esquema con un enfoque generalizado para parametrizar la convección combinando técnicas de conjunto y asimilación de datos. El esquema de capa límite utilizado es el de Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE scheme (Janjić, 1994), un modelo de coordenadas con desarrollos de los esquemas de convección, subcapa viscosa y turbulencia. El modelo de suelo utilizado es el Noah Land Surface Model (LSM) (Ek et al., 2003) esquema unificado NCEP / NCAR con temperatura y humedad del suelo en varias capas.

Tabla 1 - Parámetros de simulación con el modelo WRF para Ecuador

Parámetro		Dominios		Subdominios	
		D01	D02	D03	D04
Longitud horizontal de celda (km)	<i>dx</i>	36	12	4	4
Longitud vertical de celda (km)	<i>dy</i>	36	12	4	4
Número de celdas horizontales	<i>e_we</i>	195	184	37	85
Número de celdas verticales	<i>e_sn</i>	95	106	37	76
Número de niveles verticales	<i>e_vert</i>	28	28	28	28
Parámetros Físicos					
<i>mp_physics</i>		<i>Lin et al. scheme</i>			
<i>ra_lw_physics</i>		<i>RRTM scheme: Rapid Radiative Transfer Model.</i>			
<i>ra_sw_physics</i>		<i>Goddard Shortwave scheme</i>			
<i>sf_sfclay_physics</i>		<i>Monin-Obukhov (Janjic Eta)</i>			
<i>sf_surface_physics</i>		<i>Noah land-surface model</i>			
<i>bl_pbl_physics</i>		<i>Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE scheme</i>			
<i>cu_physics</i>		<i>Grell-Devenyi ensemble scheme</i>			

2.2 Datos y verificación del pronóstico de precipitaciones

Se utilizan los registros de precipitación de cuarenta y siete estaciones meteorológicas distribuidas en el Ecuador facilitados por la Red de Estaciones Meteorológicas de INAMHI y los datos de aeropuertos de la Dirección General de Aviación Civil (DGAC) del Ecuador, estos datos se detallan en la Figura 2 y Tabla 2.

Tabla 2 - Descripción de estaciones meteorológicas. Precipitación total (mm) durante el año 2015 y precipitación total (mm) simulada por WRF a una resolución de 12 y 4 km

Estación N.º	Elevación [m]	Longitud [°]	Latitud [°]	Ubicación	Precipitación Observada [mm]	Precipitación WRF [mm] D02 – 12 Km	Precipitación WRF [mm] D03 – D04 – 4 Km
Región Costa							
1	4	-79.98	-3.43	C	729.80	192.35	230.22
2	5	-79.88	-2.15	C	945.90	1195.03	1743.20
3	5	-80.01	0.62	C	1577.00	1607.89	
4	6	-80.98	-2.20	C	52.20	114.74	
5	7	-79.40	0.85	C	854.10	960.52	
6	12	-80.68	-0.95	C	116.80	109.27	
7	23	-79.59	-2.11	C	1165.10	2424.11	2215.29
8	36	-80.08	-0.68	C	1311.10	586.95	
9	46	-80.46	-1.03	C	527.90	229.70	
10	120	-79.46	-1.10	C	2929.00	7472.95	8648.17
11	215	-79.25	-0.92	C	3664.30	5359.50	
12	319	-79.34	-0.47	C	3153.10	3888.02	
13	379	-79.37	-0.03	C	4263.60	3042.79	
14	554	-79.17	-0.25	C	3001.90	4878.36	
Región Interandina							
15	1230	-79.37	-3.99	RI	341.60	494.59	
16	1471	-79.06	-1.13	CO	2373.00	4369.29	6420.71
17	1904	-79.95	-4.10	RI	1363.50	7610.25	
18	1950	-79.56	-4.32	CO	1442.30	3140.54	
19	2160	-79.19	-4.03	RI	1109.60	1360.12	
20	2194	-78.76	-2.80	RI	761.60	476.83	
21	2214	-78.14	0.33	RI	458.00	895.69	557.21
22	2230	-78.77	-2.88	RI	591.00	607.75	

23	2321	-78.60	-2.60	RI	2003.40	495.16	
24	2480	-78.37	-0.22	RI	540.70	337.49	328.46
25	2515	-78.57	-1.20	RI	391.30	366.46	339.76
26	2516	-78.98	-2.89	RI	655.10	846.10	627.97
27	2525	-79.23	-3.62	RI	672.80	1185.06	
28	2685	-78.68	-1.02	RI	383.90	320.51	191.71
29	2700	-78.92	-2.82	RI	531.60	643.51	
30	2785	-78.62	-0.91	RI	375.80	203.25	
31	2789	-78.48	-0.17	RI	771.90	1229.32	984.45
32	2790	-78.23	0.03	RI	421.80	879.97	646.23
33	2794	-78.49	-0.14	RI	582.40	337.49	
34	2850	-78.66	-1.65	RI	446.20	380.75	165.56
35	2860	-77.82	0.60	RI	671.70	1098.47	
36	2870	-78.60	-1.37	RI	591.10	368.59	528.11
37	2934	-77.70	0.82	RI	575.80	677.06	
38	3058	-78.55	-0.36	RI	1050.10	2373.01	3266.92
39	3083	-78.94	-2.55	RI	372.50	446.61	440.33
40	3140	-78.73	0.27	CO	739.80	3542.46	3202.65

Región Amazónica

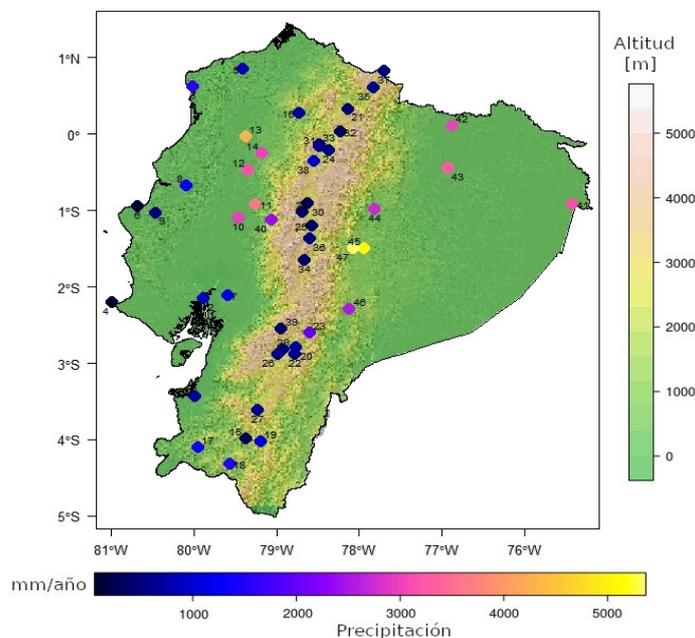
41	265	-75.42	-0.92	A	3107.50	1792.79	
42	297	-76.88	0.10	A	2994.00	3467.57	
43	298	-76.93	-0.45	A	3251.90	2942.06	
44	665	-77.82	-0.99	A	2722.10	2718.93	4109.50
45	960	-77.94	-1.50	A	5058.70	8499.63	8658.88
46	995	-78.12	-2.29	A	2548.70	7240.27	6433.88
47	1038	-78.07	-1.50	CR	5369.30	8397.56	

C=Región Costa; RI = Región Interandina; A= Región Amazónica; CO=Cordillera Occidental; CR=Cordillera Oriental

D04
D03

Para el proceso de verificación se utilizaron tres de los cuatro dominios del modelo WRF, específicamente el dominio de 12 Km y los dos dominios de 4 Km, y los registros de precipitación de cuarenta y siete estaciones meteorológicas. Se evaluó el pronóstico numérico de precipitación desde 24 a 72 horas para cada día de pronóstico de los años 2013, 2014 y 2015.

Figura 2 - Distribución geográfica de estaciones meteorológicas. Precipitación observada durante el año 2015



3. Metodología

Se utilizó dos métodos para la evaluación del pronóstico numérico, el primero evalúa los pronósticos de cantidad de lluvia mediante la verificación puntual entre los datos observados y pronosticados, con el cual se determinan diferentes valores estadísticos. En las expresiones siguientes, F_i indica el valor pronosticado para el punto i , O_i indica el valor observado y N es el número de muestras.

Una estadística descriptiva que se analiza es la varianza (s^2) el cual describe la variabilidad de la lluvia.

$$s_O^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2, s_F^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2 \quad (1)$$

La desviación estándar de la muestra es igual a la raíz cuadrada de la varianza de la muestra, y proporciona la medida de variabilidad.

$$s_O = \sqrt{s_O^2}, s_F = \sqrt{s_F^2} \quad (2)$$

El error cuadrático medio (RMSE) mide la magnitud del error promedio.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \quad (3)$$

El coeficiente de correlación de Pearson (r) mide el grado de asociación lineal entre el pronóstico y los valores observados. Este puntaje es muy sensible a los grandes errores, de ahí la transformación de la raíz cuadrada de las cantidades de lluvia.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (4)$$

El segundo método conocido como verificación de eventos categóricos se ha empleado para evaluar los pronóstico de lluvia que alcanzan o exceden umbrales especificados, en el que se emplean tablas de contingencia cuyo objeto es representar el número de eventos para las cuales las observaciones y el modelo alcanzan o exceden un umbral de precipitación definido. Con la información de la tabla de contingencia se calculan métricas comúnmente utilizado para conocer los eventos de aciertos y falsas alarmas del pronóstico de precipitación, como la Probabilidad de Detección (POD), Tasa de Falsa Alarma (FAR), sesgo (BIAS). Se han definido tres umbrales $a_1 = 0.5$ mm, $a_2 = 10$ mm y $a_3 = 50$ mm. El procedimiento utilizado para la verificación de pronósticos es el que recomienda la Organización Meteorológica Mundial. (WMO, 2008) En donde se toman en cuenta las siguientes definiciones:

Verdadero positivo o acierto (a): día con lluvia identificado por WRF como día con lluvia.

Falso positivo o falsa alarma (b): día sin lluvia identificado por WRF como día con lluvia.

Falso negativo o evento perdido (c): día con lluvia identificado por WRF como día sin lluvia.

Verdadero negativo (d): día sin lluvia identificado por WRF como día sin lluvia.

Entre las métricas mayormente recomendadas para evaluar la ocurrencia de lluvia mayor o igual a umbrales específicos, se mencionan el sesgo de frecuencia (Bias) el cual da la relación entre la frecuencia de lluvia pronosticada y la frecuencia de lluvia observada.

$$Bias = \frac{a+b}{a+c} \quad (5)$$

La proporción de eventos correctos (PC) que determina la fracción de todos los pronósticos que fueron correctos. $PC = \frac{a+d}{a+b+c+d}$ (6)

La probabilidad de detección (POD), también conocida como la tasa de aciertos, mide la fracción de eventos observados que se pronosticaron correctamente. $POD = \frac{a}{a+c}$ (7)

El índice de falsa alarma (FAR) proporciona la fracción de eventos pronosticados que se observaron como no eventos.
$$FAR = \frac{b}{b+d} \quad (8)$$

El índice de amenaza (TS), también conocido como índice de éxito crítico y tasa de aciertos, proporciona la fracción de todos los eventos pronosticados y / u observados que se diagnosticaron correctamente.

$$TS = \frac{a}{a+c+b} \quad (9)$$

El índice de habilidad de Heidke (HSS) mide el aumento en la proporción correcta para el sistema de pronóstico, en relación con la probabilidad aleatoria.
$$HSS = \frac{a+d - \text{correcto}(\text{aleatorio})}{N - \text{correcto}(\text{aleatorio})}$$
 donde

$$N = a+b+c+d, \text{ total} \quad (10)$$

$$\text{correcto}(\text{aleatorio}) = \frac{1}{N} (\text{Observados Si} * \text{Pronósticos Si} + \text{Observados No} * \text{Pronósticos No})$$

4. Resultados

En la Figura 3 se muestra la serie temporal de precipitación observada y los datos pronosticados con el modelo WRF para los dominios de 12 y 4 km, para los años 2013 a 2015.

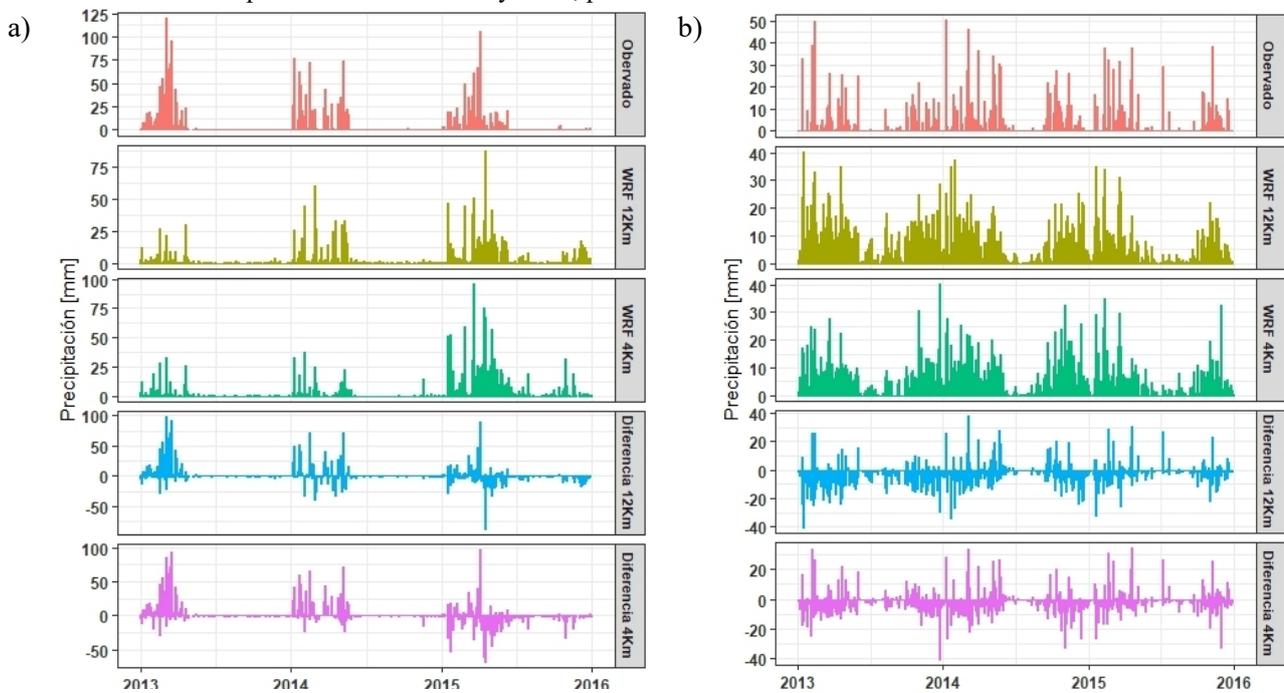


Figura 3 – Serie temporal de precipitación para una estación de la región costa (a) (estación N° 2) y región Interandina (b) (estación N° 31), en la que se muestra la precipitación observada durante los años 2013 a 2015 y la precipitación simulada por el modelo WRF de 12 y 4 km, también se muestra la diferencia de precipitación para cada pronóstico.

La serie temporal muestra el patrón de precipitación de los años 2013 a 2015 en una estación de la región costa e interandina, del cual el modelo WRF consigue representar dicho patrón. Para el año 2013 la diferencia de precipitación en la estación de la región costa muestra una subestimación de la cantidad de precipitación sin embargo este patrón tiende a mejorar en los años 2014 y 2015. Para la estación de la

región interandina las cantidades de precipitación son más representativas, mostrando acumulados similares, sin embargo se muestra una ligera sobreestimación de la cantidad de lluvia.

Verificación Puntual

Mediante diagramas de Taylor se muestran el coeficiente de correlación Pearson (r), la raíz de error cuadrático medio (RMSE) y la desviación estándar (s) normalizada de los datos observados y pronosticados del modelo WRF.

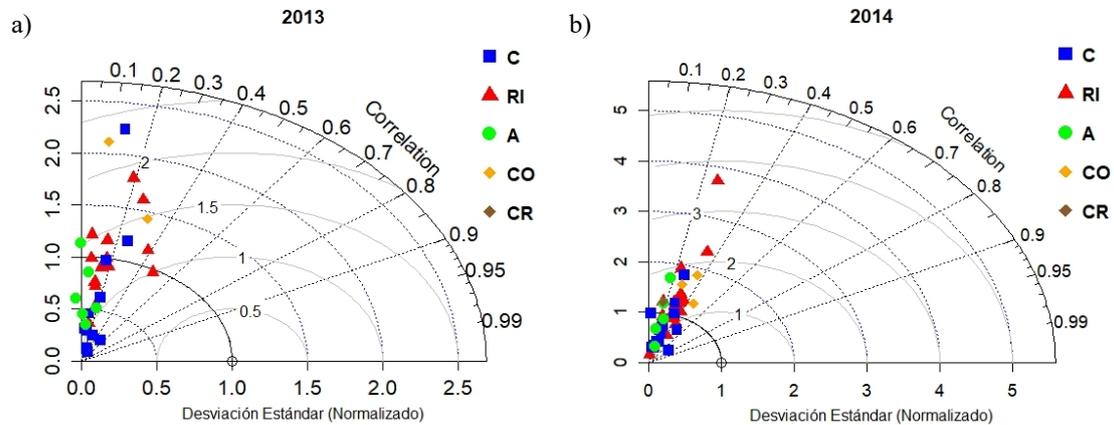


Figura 4 – Diagrama de Taylor que muestra la correlación de los datos observados y pronosticados del modelo WRF - 12 Km. a) 2013 Primer día de pronóstico (0-24h), b) 2014 Primer día de pronóstico (0-24h). Los puntos muestran estaciones diferenciadas por regiones, C=Región Costa, RI = Región Interandina, A= Región Amazónica, CO=Cordillera Occidental, CR=Cordillera Oriental.

La figura 4(a), representa los valores de correlación para el año 2013, se observa que el coeficiente de correlación oscila entre 0.15 y 0.3 para la mayoría de los puntos analizados, mostrando menor correlación los puntos que caen sobre la región amazónica (puntos en verde) incluso mostrando una correlación negativa. La figura 4(b), que representa el análisis de datos del año 2014, muestra un coeficiente de correlación entre 0.15 y 0.4 para la mayoría de los puntos analizados, mostrando mayor correlación las estaciones de la región interandina con alrededor de 0.4.

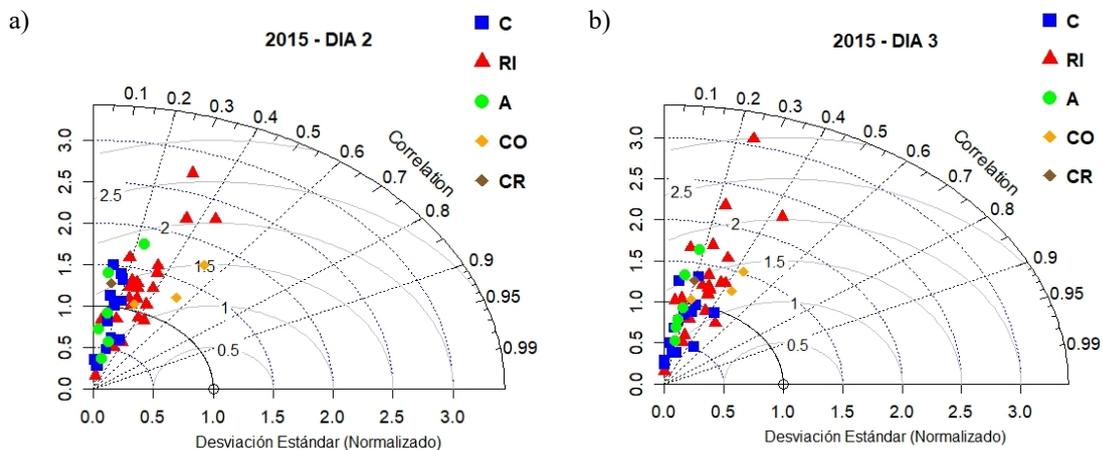


Figura 5 – Diagrama de Taylor, Precipitación del año 2015 comparado con el pronóstico del modelo WRF a 12 Km. a) 2015 Segundo día de pronóstico (24-48h) y b) 2015 Tercer día de pronóstico (48-72h). Los puntos muestran estaciones diferenciadas por regiones, C=Región Costa; RI = Región Interandina; A= Región Amazónica; CO=Cordillera Occidental; CR=Cordillera Oriental.

Para los pronósticos 24 a 72 horas (Día 2 y Día3), Figura 5 (a y b), se muestra que la correlación en casi todas las estaciones se mantiene por los 0.2 a 0.5 puntos.

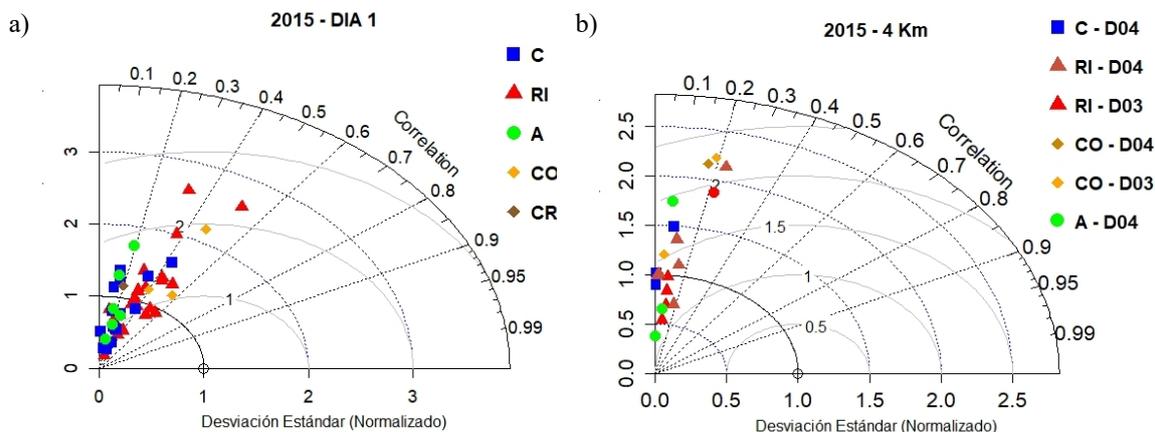


Figura 6 – a) Diagrama de Taylor, Precipitación del año 2015 comparado con el pronóstico del modelo WRF a 12 Km. Primer día de pronóstico (0-24h), b) Diagrama de Taylor de los datos observados y pronosticados del modelo WRF - 4 Km, de los dominios D03 y D04, Primer día de pronóstico (0-24h) Los puntos muestran estaciones diferenciadas por regiones, C=Región Costa; RI = Región Interandina; A= Región Amazónica; CO=Cordillera Occidental; CR=Cordillera Oriental.

Para el año 2015, para los pronósticos del primer día (0-24h) Figura 6(a), la correlación para las estaciones de la región interandina muestra valores sobre los 0.4 y 0.6, 0.2 puntos por encima de los años anteriores. Asimismo para las estaciones de la región costa la correlación se encuentra entre los 0.2 y 0.4 puntos mientras que las estaciones de la región amazónica muestran una correlación de alrededor 0.2 y 0.3. En la figura 6(b) se observa que la mayoría de las estaciones representadas por el dominio de 4 km, D03 y D04, muestran un coeficiente de correlación entre el 0.2 y 0.5 puntos. La mayoría de estaciones corresponden a la región interandina y estribaciones de cordillera occidental y oriental. Las estaciones de la costa muestran un valor de correlación de 0.4.

Verificación de eventos categóricos

Del análisis de verificación de eventos categóricos se ha considerado tres umbrales de precipitación diaria $a_1 = 0.5$ mm, $a_2 = 10$ mm y $a_3 = 50$ mm, del año 2015 para el periodo del año 2013, 2014 y 2015, y se analizan los tres días de pronóstico en donde se ha representado el Dia1 como el periodo de 0-24 horas, el Dia2 de 24-28h y el Dia3 de 48-72h y es analizado para cada región del país.

El análisis de la Proporción de Eventos Correctos (PC) muestra un incremento en los índices de esta métrica en los pronósticos del año 2015 respecto a los del año 2013, Figura 7. En la región interandina el PC se incrementó para pronósticos del primer día de 0.60 en el año 2013 a 0.90 en el año 2015, para esta región los valores más altos se observan de mayo a noviembre. En la región costa los valores oscilan entre valores mínimos de 0.7 y máximos de 0.9, siendo los valores más altos entre los meses de mayo a diciembre. En la Región amazónica los valores permanecen casi constantes entre 0.6 y 0.75 para pronósticos del primer día. Para los pronósticos del segundo y tercer día la Proporción de Eventos Correctos sigue el mismo comportamiento, sin embargo muestra puntos ligeramente inferiores en algunos casos, como en la región costa con mínimos de 0.6 en 2013. En algunos casos esta métrica es ligeramente superior como en el caso de la región interandina en el que la PC es 0.65 para pronósticos del tercer día.

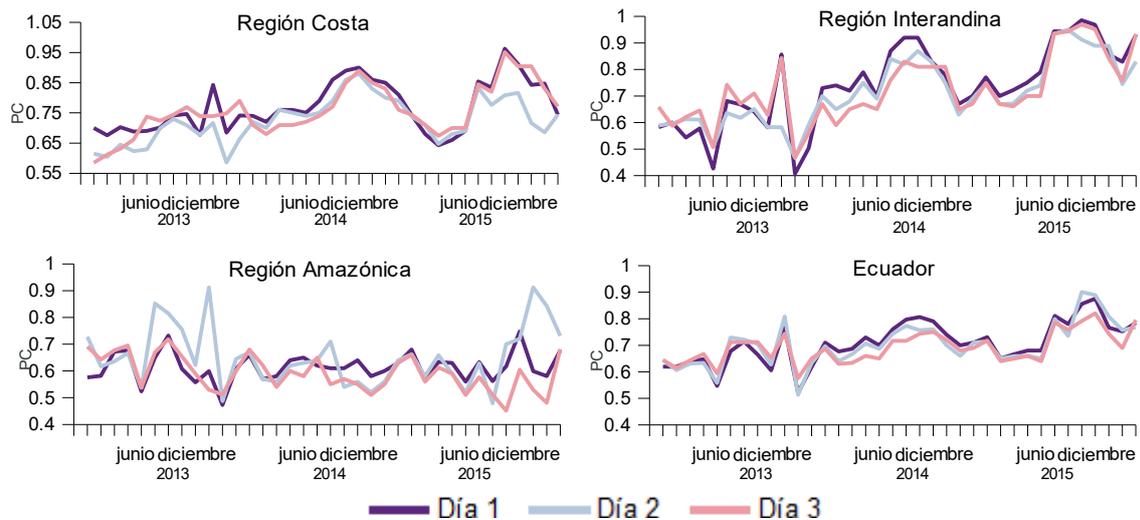


Figura 7 – Proporción de eventos correctos (PC) durante los años 2013 a 2015 para los tres días de pronóstico y distribuido por regiones. El valor perfecto de esta métrica es 1.

De la figura 8 se observa que la Probabilidad de Detección (POD) del modelo WRF depende de la región analizada. En la región costa la probabilidad de detección se mantiene sobre los 0.60 y 0.80 puntos a lo largo de los tres años, con pico mínimos de 0.50 en los meses de abril y mayo, mientras que el índice de Falsa Alarma (FAR) oscila entre los 0.30 y 0.50. En la región interandina la Probabilidad de Detección varía entre 0.60 y 0.90 con valores mínimos de 0.50 para los meses de julio a agosto, mientras que el índice de Falsa Alarma se encuentra entre los 0.20 y 0.60 puntos. En la región Amazónica la Probabilidad de Detección se mantiene sobre los 0.70, alcanzando valores máximos de 0.95. El índice de Falsa Alarma oscila entre los 0.10 y 0.40. En general en todo el Ecuador la Probabilidad de Detección oscila entre los 0.60 y 0.80 con valores mínimos de 0.50, la tasa de falsa alarma oscila entre 0.3 y 0.4.

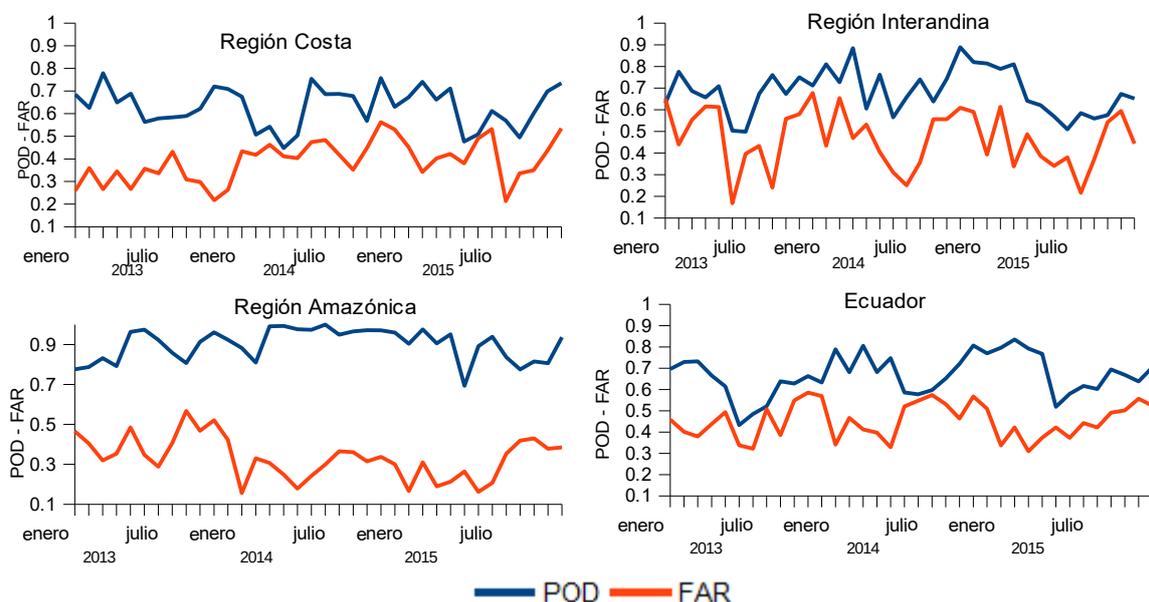


Figura 8 – Probabilidad de Detección (POD) e índice de Falsa Alarma (FAR) durante los años 2013 a 2015 para los tres días de pronóstico y distribuido por regiones. Puntuación perfecta de $POD=1$ y $FAR=0$.

El análisis de la Proporción de Eventos Correctos (PC) para los tres umbrales $a_1 = 0.5$ mm, $a_2 = 10$ mm y $a_3 = 50$ mm del año 2015, muestra valores que oscilan entre 0.60 y 0.90 para el umbral a_1 Figura 9, incrementando este valor para los valores los umbrales a_2 y a_3 , mostrando mejor representación sobre las estaciones de la región interandina. Valores entre 0.50 y 0.70 se muestran en la región costa y estribación de cordillera oriental. La Probabilidad de Detección Figura 10, muestra mejor representación para el umbral a_1 con mejor índice sobre la región costa central, región centro norte de la región interandina y sobre la región amazónica. El valor disminuye para los dos últimos umbrales definidos. El Índice de Falsa Alarma, Figura 11 se encuentra bajo los 0.50 en la mayoría de las estaciones de la región interandina y aumenta ligeramente para los dos umbrales definidos. El sesgo de frecuencia, Figura 12, muestra valores sobre el valor de referencia (BIAS=1) para el primer umbral definido y disminuye para los dos umbrales restantes, indicando sobreestimación de cantidad de lluvia para la mayoría de las estaciones sobre el Ecuador para el año analizado. El Índice de amenaza (TS) muestra valores entre 0.50 y 0.70 en la zona central de la región costa y amazónica, con valores mas bajos para la región interandina, para el primero umbral definido a_1 , para los dos siguientes umbrales disminuye ligeramente a valores entre 0.30 y 0.60. El Índice de habilidad Heidke HSS muestra valores entre 0.05 y 0.40 para las regiones del país, mostrando valores cercanos a 0.40 a lo largo de la región interandina.

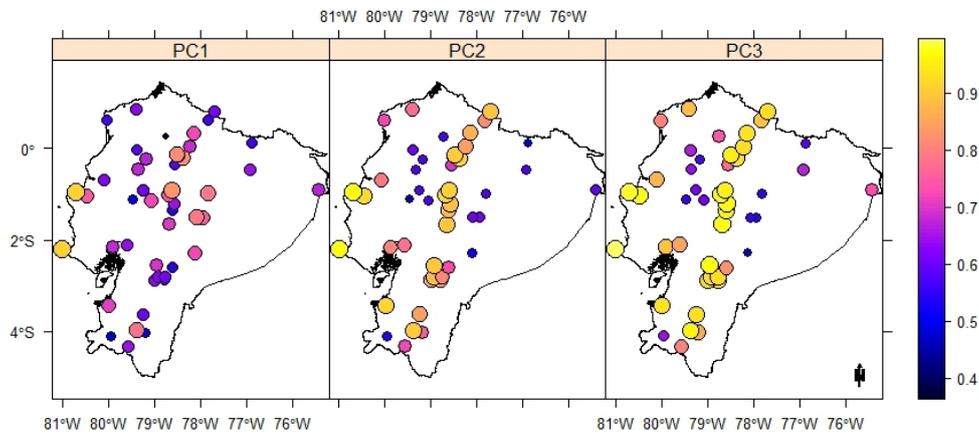


Figura 9 – Proporción de Eventos Correctos (PC) para los tres umbrales definidos $a_1 = 0.5$ mm, $a_2 = 10$ mm y $a_3 = 50$ mm, del año 2015.

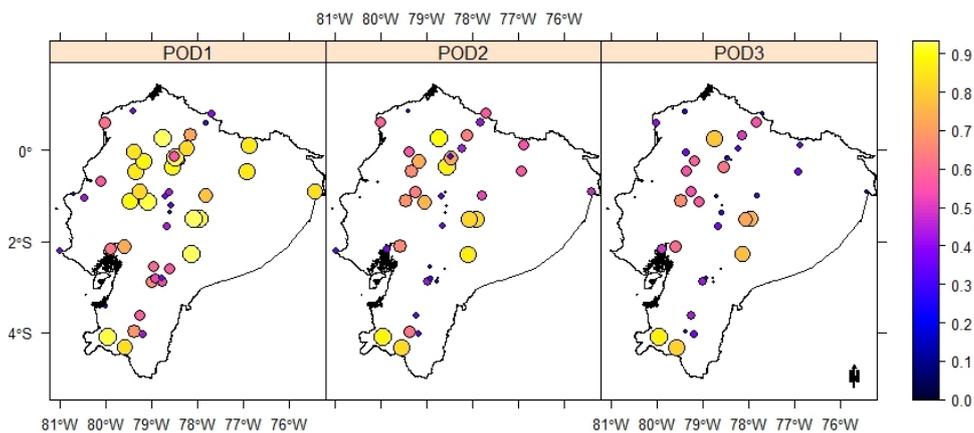


Figura 10 – Probabilidad de Detección (POD) para los tres umbrales definidos $a_1 = 0.5$ mm, $a_2 = 10$ mm y $a_3 = 50$ mm, del año 2015.

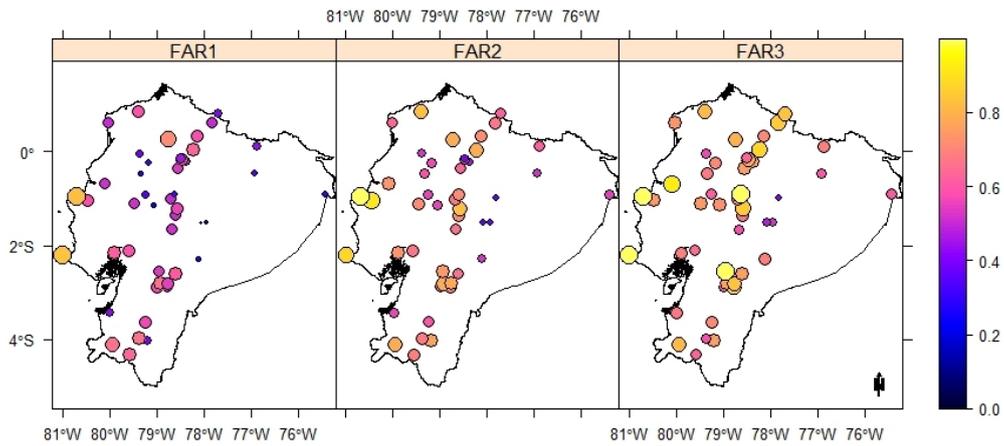


Figura 11 – Índice de Falsa Alarma (FAR) para los tres umbrales definidos $a_1 = 0.5$ mm, $a_2 = 10$ mm y $a_3 = 50$ mm, del año 2015.

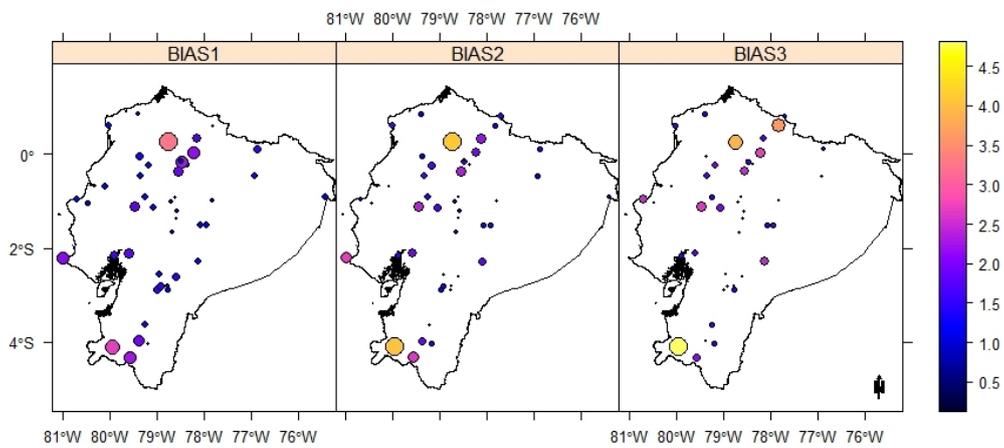


Figura 12 – Sesgo de frecuencia (Bias) para los tres umbrales definidos $a_1 = 0.5$ mm, $a_2 = 10$ mm y $a_3 = 50$ mm, del año 2015. Valor de referencia 1, Bias < 1 el pronóstico subestima y Bias > 1 el pronóstico sobre estima la cantidad de precipitaciones.

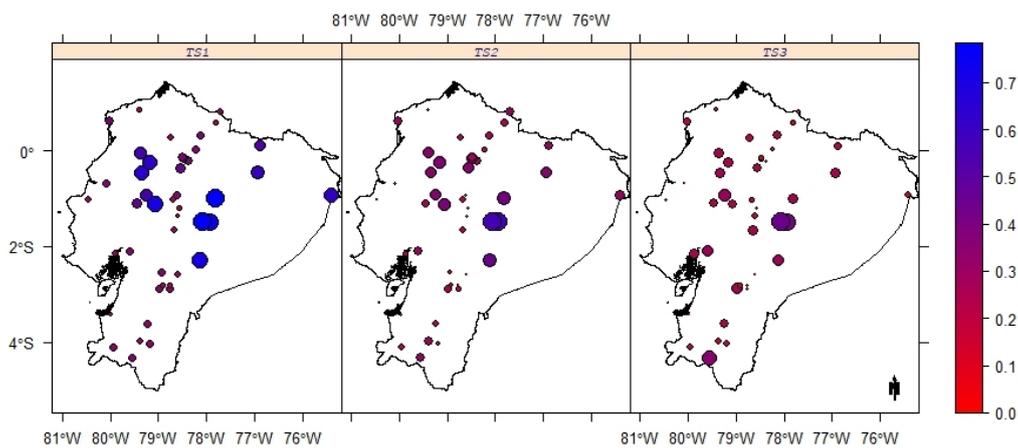


Figura 13 – Índice de amenaza (TS) para los tres umbrales definidos $a_1 = 0.5$ mm, $a_2 = 10$ mm y $a_3 = 50$ mm, del año 2015. Valor de referencia TS=1.

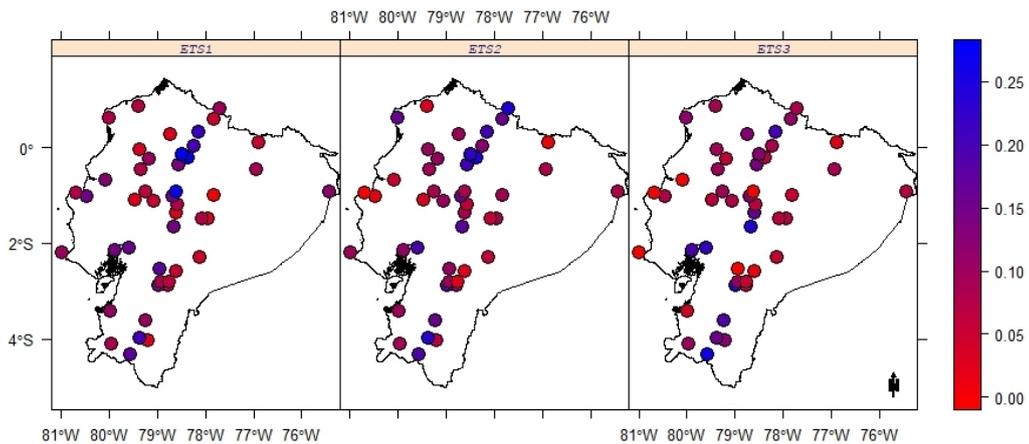


Figura 14 – El índice de habilidad de Heidke (HSS) para los tres umbrales definidos $a_1 = 0.5$ mm, $a_2 = 10$ mm y $a_3 = 50$ mm, del año 2015. Valor de referencia HSS=1.

Tabla 4 - Coeficiente de correlación de Pearson para los años 2015 a 2013 para el primer día de pronóstico del modelo WRF 12 Km. Representado por regiones, C=Región Costa, RI = Región Interandina, A= Región Amazónica, Ecuador = E.

	2015				2014				2013			
	C	RI	A	E	C	RI	A	E	C	RI	A	E
r	0.36	0.55	0.32	0.41	0.37	0.37	0.19	0.31	0.25	0.21	0.17	0.21
me	1.96	2.97	0.49	1.81	3.69	2.27	0.93	2.30	1.60	1.76	0.13	1.16
mae	8.67	4.67	15.44	9.59	5.80	4.99	17.51	9.43	4.86	3.89	13.99	7.58
stde	14.92	7.44	20.50	14.29	11.56	8.34	22.13	14.01	12.01	6.44	18.61	12.35
rmse	15.16	12.31	6.35	11.27	14.34	12.75	6.10	11.06	13.27	9.66	6.79	9.90
POD	0.65	0.63	0.87	0.72	0.61	0.67	0.78	0.69	0.76	0.67	0.51	0.65
FAR	0.51	0.52	0.24	0.43	0.37	0.49	0.74	0.53	0.55	0.49	0.29	0.45
PC	0.80	0.89	0.65	0.78	0.78	0.74	0.56	0.69	0.83	0.77	0.52	0.71
BIAS	1.33	1.41	1.17	1.30	1.73	1.63	1.61	1.66	1.39	1.77	0.86	1.34
TS	0.37	0.33	0.68	0.46	0.19	0.20	0.44	0.28	0.45	0.42	0.39	0.42
HSS	0.35	0.35	0.24	0.32	0.27	0.28	0.21	0.26	0.23	0.24	0.36	0.28

4. Discusión

Respecto al análisis realizado se evidencia que la cantidad de precipitación observada es un componente complejo de determinar con exactitud por el modelo WRF. De los análisis realizados con los pronósticos numéricos del modelo WRF de 12 km durante el año 2015, las correlaciones muestran valores entre 0.4 y 0.6, reflejando un mejor desempeño sobre la región interandina. Las correlaciones en el año 2015 se encuentra 0.2 puntos por encima en relación a la correlación mostrada en el año 2013, esto se estima que puede deberse a la implementación de la asimilación de datos de radios sondeos, los cuales fueron

incorporados diariamente al modelo numérico, ya que durante ese periodo no se modificó el sistema de parametrizaciones físicas utilizado. La correlación encontrada con el dominio de 4 km, muestran un coeficiente de correlación entre 0.2 y 0.5 puntos. De la evaluación de eventos categóricos se muestra que para los tres umbrales definidos el que muestra el mejor desempeño se relaciona con el primer umbral ($a_1 = 0.5$ mm), es decir el umbral que representa eventos de lluvia o no lluvia. De estas consideraciones se estima que la proporción de eventos correctos, que determina los eventos que fueron correctamente pronosticados y que no identifica eventos extremos, oscila entre 0.65 y 0.89 para la mayoría de las estaciones del país, cuyo índice se ha incrementado desde los 0.60 en 2013 a 0.90 en 2015. La probabilidad de detección, el cual mide la fracción de eventos observados que se pronosticaron correctamente, depende de la región analizada, muestra valores de 0.72 para el Ecuador en el año 2015, Tabla 4, donde los valores más altos se muestran en la región amazónica, 0.87. El índice de falsas alarmas se encuentra bajo los 0.5 puntos en los tres años analizados, mostrando un valor de 0.43 en Ecuador para el año 2015. El análisis de frecuencia Bias en general muestra valores mayores que el de la referencia (Bias=1) el cual indica que los pronósticos sobre estiman la cantidad de precipitación para la mayoría de las estaciones del país, no así en el año 2013 en cual se obtuvieron valores de Bias por debajo de la referencia, indicando una subestimación del pronóstico de la cantidad de lluvia. El índice crítico de éxito el cual mide los eventos anómalos, muestra valores entre 0.50 y 0.70 en la región central de la costa y la región amazónica. El índice de habilidad de Heidke muestra habilidad de predicción cuyos valores varían hasta 0.40. En cuanto a los pronósticos mayores de 24 h, es decir del segundo y tercer día, las métricas siguen el mismo comportamiento que los mostrados en los pronósticos de las primeras 24 horas (pronósticos del primer día), mostrando puntos ligeramente inferiores (o superiores) en algunos casos. La evaluación del desempeño del modelo numérico WRF sobre las precipitaciones en Ecuador nos permite reconocer los puntos débiles y fuertes de los pronósticos numéricos, siendo necesarios estudios posteriores en los que se determinen diferentes configuraciones de parámetros físicos y diferentes configuraciones de dominios espaciales.

4. Referencias bibliográficas

- Campozano, L. (2016). *Climate Across Scales: The Downscaling of Precipitation Ecuador., for a Basin in a Tropical Mountain Region in the Andes of Southern*. Ermittelbar., Verlag nicht.
- Campozano, L., Ballari, D., Ambrosi, M., & Avilés, A. (2020). Citation: Future Meteorological Droughts in Ecuador: Decreasing Trends and Associated Spatio-Temporal Features Derived From CMIP5 Models. *Frontiers in Earth Sciences*, 8, 17. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00017>
- Campozano, L., Tenelanda, D., Sánchez Cordero, E., Samaniego, E., & Feyen, J. (2016). Comparison of Statistical Downscaling Methods for Monthly Total Precipitation: Case Study for the Paute River Basin in Southern Ecuador. *Advances in Meteorology*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/6526341>
- Ek, M. B., Mitchell, K. E., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Koren, V., Gayno, G., & Tarpley, J. D. (2003). Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D22). <https://doi.org/10.1029/2002JD003296>
- Espinoza, C., & Parra, R. (2016). *Informe de la Calidad del Aire de Cuenca, año 2015 Cuenca-Ecuador*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1257.6240>
- Grell, G. A., & Dévényi, D. (2002). A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, 29(14), 34–38. <https://doi.org/10.1029/2002GL015311>

- Heredia, M. B., Junquas, C., Prieur, C., & Condom, T. (2018). New statistical methods for precipitation bias correction applied to WRF model simulations in the Antisana Region, Ecuador. *Journal of Hydrometeorology*, 19(12), 2021–2040. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0032.1>
- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., & Collins, W. D. (2008). Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D13). <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>
- Janjić, Z. I. (1994). The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. *Monthly Weather Review*, 122(5), 927–945. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2)
- Lin, Y.-L., Farley, R. D., & Orville, H. D. (1983). Bulk Parameterization of the Snow Field in a Cloud Model. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22(6), 1065–1092. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2)
- Morán-Tejeda, E., Bazo, J., López-Moreno, J. I., Aguilar, E., Azorin-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., Martínez, R., Nieto, J., Mejía, R., Martín-Hernández, N., & Vicente-Serrano, S. (2016). Climate trends and variability in Ecuador (1966-2011). *International Journal of Climatology*, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/joc.4597>
- Ochoa-Sánchez, A., Pineda, L., Crespo, P., Willems, P., & Leuven, K. (2014). Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the Pacific–Andean region of Ecuador and Peru. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 3179–3193. <https://doi.org/10.5194/hess-18-3179-2014>
- Ochoa, A., Campozano, L., Sánchez, E., Gualán, R., & Samaniego, E. (2016). Evaluation of downscaled estimates of monthly temperature and precipitation for a Southern Ecuador case study. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1244–1255. <https://doi.org/10.1002/joc.4418>
- Palacios, E., Serrano, S., & Núñez, P. (2009). Equatorial climatology study with numerical methods: weather forecasting, validations and atmospheric reconstruction. *La Granja*, 10, 16–26.
- Parra Narváez, R. (2012). Evaluación preliminar de la temperatura media en superficie del Ecuador para el año 2010, obtenida mediante el modelo Weather Research Forecasting (WRF). *ACI Avances En Ciencias e Ingenierías*, 4(2). <https://doi.org/10.18272/aci.v4i2.110>
- Parra, R. (2014). *Resumen del Inventario de emisiones atmosféricas del Cantón Cuenca, año 2011. Cuenca - Ecuador.*
- Parra, R. (2016). *Inventario de Emisiones Atmosféricas del Cantón Cuenca 2014.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17665.66405>
- Parra, R. (2019). *Influence of the startup period from initial conditions in modeling the dispersion of volcanic ash in Ecuador.*

- Skamarock, C., Klemp, B., Dudhia, J., Gill, O., Barker, D., Duda, G., Huang, X., Wang, W., & Powers, G. (2008). *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. 113. <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>
- Trachte, K., Rollenbeck, R., Campozano, L., Celleri, R., & Bendix, J. (2017). Exploring climate changes in mountainous ecosystems in the Andes of South Ecuador. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 14575. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017EGUGA..1914575T>
- Ulloa, J., Samaniego, E., Campozano, L., & Ballari, D. (2018). A Variational Merging Approach to the Spatial Description of Environmental Variables. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(8), 4027–4044. <https://doi.org/10.1002/2017JD027982>
- WMO. (2008). Recommendations for the Verification and Intercomparison of QPFs and PQPFs from Operational NWP Models. *World Meteorological Organization*, 41(1485), 43. http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/WWRP2009-1_web_CD.pdf