

## Pronóstico de Precipitaciones Extremas en la Cuenca del Río Mantaro - Aplicación del Modelo Meteorológico WRF

 Miguel Saavedra J. <sup>\*1</sup> y Aldo Moya-Álvarez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

<sup>2</sup> Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

Recibido 11 Jul 2023 – Aceptado 29 Ago 2023 – Publicado 31 Ago 2023

### Resumen

En este estudio, se evalúan los resultados de la aplicación del modelo meteorológico *Weather Research and Forecasting Model (WRF)* en 103 días donde ocurrieron eventos de precipitación extrema (percentil 90) dentro de la cuenca del río Mantaro. Se utilizó el modelo atmosférico WRF para cuatro áreas mediante anidamiento múltiple, y se lograron obtener resoluciones espaciales de 18, 6,3 y 0.75 km, respectivamente. Se realizaron pronósticos de precipitación extrema y se evaluó la eficacia de las salidas numéricas, utilizando datos observados *in-situ*, mediante la red de estaciones meteorológicas del SENAMHI e información satelital. Los valores de estimadores estadísticos, muestran que el modelo tiende a subestimar los datos de lluvia en muchos casos y en otros los sobre-estima, teniendo limitaciones en representar la variabilidad espacial de los datos observados. Los datos satelitales de precipitación acumulada, siempre sobre estiman los valores de precipitación, pero tiene la capacidad de determinar las zonas específicas donde probablemente esta ocurriendo lluvias extremas.

**Palabras clave:** Precipitación extrema, Modelo WRF, Pronóstico de lluvias, Estadísticos.

### Extreme Rainfall Forecast in the Mantaro River Basin Application of the Meteorological Model WRF

#### Abstract

In this study, the results were evaluated of the application of the meteorological model *Weather Research and Forecasting Model (WRF)* in 103 days where extreme precipitation events (90th percentile) occurred within the Mantaro River basin. The WRF atmospheric model was used for four areas through nesting multiple, and spatial resolutions of 18, 6,3 and 0.75 km, respectively, were obtained. Extreme precipitation forecasts were made and the effectiveness of the numerical outputs was evaluated, using observed data *in-situ*, through the SENAMHI weather station network and satellite information. The values of statistical estimators show that the model tends to underestimate the rainfall data in many cases and overestimates it in others, having limitations in representing the spatial variability of the observed data. Accumulated precipitation satellite data always overestimates precipitation values, but has the ability to determine specific areas where extreme rainfall is likely to occur.

**Keywords:** Extreme Precipitation, WRF Model, Rainfall Forecast, Statistics.

### Introducción

La cuenca del río Mantaro, tiene importancia fundamental dentro del desarrollo de la actividad económica, no solo local sino también nacional, porque es la que provee de agua y alimentos a varias ciudades importantes,

entre ellas a Lima la capital del Perú.

Los primeros estudios que se conocen sobre esta cuenca, fueron realizados por Guizado y Landa [1], quienes hacen una descripción de la geomorfología de la cuenca. Silva et al. [2], analizaron datos mensuales de precipitación del periodo de 1970 - 2004 de 38 estaciones meteorológicas.

\*msaavedraj@unmsm.edu.pe

© Los autores. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



lógicas en la cuenca del río Mantaro, concluyendo que las precipitaciones importantes comienzan en septiembre y alcanzan sus valores máximos entre enero - marzo, disminuyendo abruptamente en abril. Además, determinaron que existe una correlación negativa entre *El Niño* - Oscilación Sur (*ENOS*) y las precipitaciones ocurridas en la cuenca.

Ducrocq [3] realizó la modelización numérica con *WRF*, [4], de cinco eventos de precipitación extrema, ocurridos en Francia, donde demostró que aumentando la resolución del modelo *WRF* y utilizando parametrizaciones físicas avanzadas, conjuntamente con el uso de condiciones iniciales de varias fuentes de observación, el modelo de alta resolución produce campos de precipitación más realistas, pudiendo realizar pronósticos acertados de los eventos extremos.

Entre los principales estudios sobre modelización numérica, realizado en la zona del Mantaro, se encuentran los trabajos de Moya et al. (2018) [5], quién estudió la sensibilidad del rendimiento del modelo *WRF* (versión 3.7), para el uso de las diferentes parametrizaciones de microfísica, cumulus y capa límite para el pronóstico de precipitación a corto y mediano plazo, para los Andes centrales del Perú. En el estudio [5], se concluye que todas las configuraciones sobrestiman la precipitación, pero la mejor configuración de rendimiento fue la combinación de Grell-Freitas para cúmulos con Morrison para la microfísica [5]. La verificación espacial mostró que, incluso si todas las configuraciones sobre estimaban la precipitación en cierta medida, los patrones espaciales de precipitación coinciden con los datos de precipitación de *TRMM* (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) y *PISCO* (*Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations*). Martínez [6] estudio el impacto de la microfísica de nubes en dos eventos de lluvia convectiva, sobre la compleja topografía de la Cordillera de los Andes, utilizando el modelo *WRF* encontrando que la parametrización de Morrison reproduce mejor los sistemas convectivos en el área de estudio y el modelo tiende a subestimar o sobrestimar los valores de precipitaciones, en comparación con datos del satélite *GOES* (Satélites Ambientales Operativos Geoestacionarios).

En otro estudio, Moya [7], evaluó la capacidad del modelo *WRF* para pronosticar lluvias extremas en la Cuenca del Río Mantaro, en los Andes centrales del Perú, basado en la clasificación de lluvia extrema adoptada por *SENAMHI* [8], se seleccionaron 40 eventos de observaciones recopiladas durante el período de 2009 – 2012. Las simulaciones del modelo *WRF* se llevaron a cabo utilizando 4 dominios anidados donde se encontró que las condiciones sinópticas promedio mostraron anomalías geopotenciales negativas y anomalías de humedad positivas en 700 y 500 hPa. A los 200 hPa, La cresta subtropical superior o *alta de Bolivia* estaba presente, con su flanco norte divergente sobre la Cuenca del Man-

taro. Los resultados de la simulación muestran que el modelo de investigación y pronóstico del tiempo (*WRF*) subestima los totales de lluvia en aproximadamente 50 a 60 % del acumulado total, principalmente en el sur de la cuenca y en el extremo oeste a lo largo de la cordillera y sobrestima los valores acumulados de precipitación en el resto de simulaciones realizadas, lo que concuerda con los resultados de Moya-Álvarez [7].

La ciudad de Huancayo ha soportado eventos de precipitación intensa, que con el paso de los años se producen con mayor frecuencia. Un evento de precipitación extrema ocurrió en febrero del año 2018, donde se produjo una intensa lluvia, acompañada de una fuerte granizada. Este evento produjo inundaciones, de manera que parte de la ciudad se inundó produciendo pérdidas incalculables. Este evento sorprendió a los ciudadanos que se encontraban en las calles, ya que no es muy común que ocurran lluvias intensas acompañada de granizada. En esas fechas los peatones sufrieron los estragos del evento, produjo el colapso de las alcantarillas pluviales ubicadas a los costados de las pistas. Las personas tuvieron que buscar refugio en locales comerciales o centros públicos hasta que cese la tormenta. En la figura 1, se muestra el impacto que tuvo ese evento sobre la ciudad, donde se produjeron inundaciones y daños en las propiedades. La gravedad de estos eventos radican, en que el cambio climático está provocando que las lluvias muy intensas se presenten en periodos muy cortos de tiempo, lo que provoca la saturación del suelo y por consiguiente produce inundaciones en las ciudades [9–11].



**Figura 1:** Evento extremo de precipitación en la ciudad de Huancayo en febrero del año 2018.

### Área de Estudio

La cuenca del río Mantaro (Figura 2) se halla comprendida entre los  $10^{\circ}30'$  –  $13^{\circ}30'$  de latitud sur y  $73^{\circ}57'$  –  $76^{\circ}40'$  de longitud oeste. Políticamente pertenece a las regiones de Pasco, Junín, Huancavelica y Ayacucho. “Limita por el Norte, con las cuencas de los ríos Huallaga y Paucartambo; por el Sur con la cuenca

del río Pampas; por el Este con las cuencas de los ríos Chanchamayo, Satipo y Ampato; y por el Oeste con las cuencas de los ríos Huaura, Chancay- Huaral, Chillón, Rímac, Mala, Cañete, San Juan y Pisco” [1].

La precipitación en la zona de estudio comienza en setiembre, con valores máximos entre enero - marzo, decayendo drásticamente en el mes de abril. Por esa razón, las actividades agrícolas más importantes en la cuenca se desarrollan entre septiembre y abril, cuando se produce el 92% de la precipitación anual” [11].

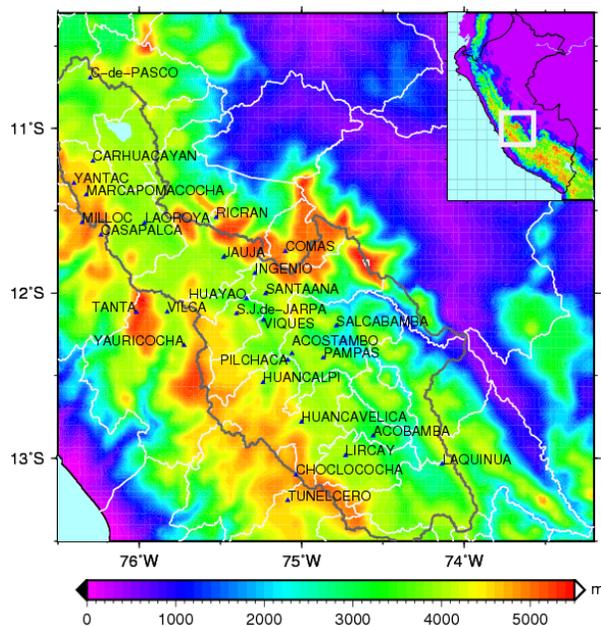


Figura 2: Red de estaciones meteorológicas del SENAMHI.

### Motivación

Los desastres originados por perturbaciones climáticas, se producen de manera recurrente en diferentes puntos de la Tierra. Estos eventos afectan a la población, a sus viviendas, a la agricultura y la ganadería, produciendo cuantiosas pérdidas económicas y de vidas humanas. Sumado a esto, en el área de estudio, se tiene una deficiente inversión del estado en la capacitación de las comunidades, en el manejo de los campos de cultivo y de enfrentamiento a los eventos adversos. Sumado a esto se tiene una limitada organización social y un sistema observacional con poca densidad, donde los datos son escasos y muchas veces de mala calidad.

Por ello, es necesario utilizar las herramientas libres disponibles, para poder tener un sistema de previsión de eventos extremos eficiente, en el cuál la población tenga la suficiente confianza para poder actuar en casos de alerta. Para establecer estos sistemas de previsión se de-

ben utilizar los modelos atmosféricos, que nos brindan la posibilidad de conocer las condiciones atmosféricas con algunos días de anticipación y nos brinda datos de diferentes parámetros climáticos donde no se tiene instrumentación para el registro de las observaciones.

### Materiales y Métodos

Para realizar el análisis de las precipitaciones en la cuenca del río Mantaro, se han utilizado datos de la red de estaciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI, que se encuentran dentro de la zona de estudio. Asimismo se utilizaron datos modelizados, mediante el modelo meteorológico The Weather Research and Forecasting model WRF, utilizando cuatro dominios anidados (Figura 3). Las características principales de este modelo, y la configuración utilizada se presenta en las secciones correspondientes a los detalles del modelo numérico.

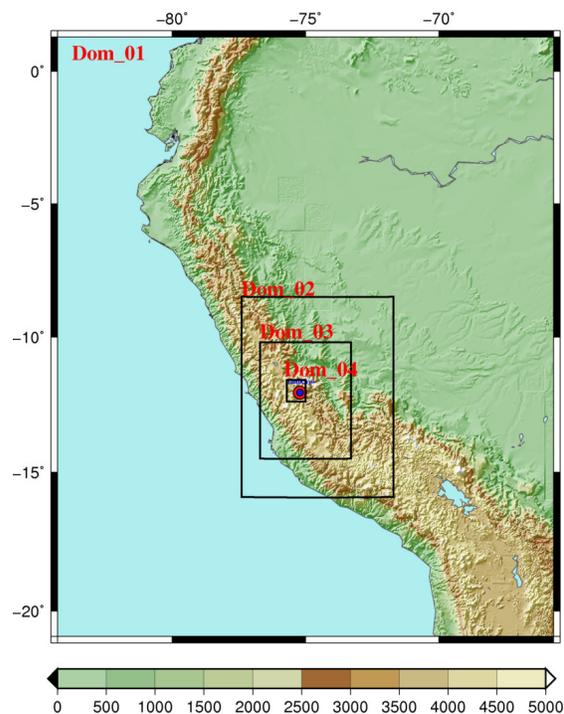


Figura 3: Areas consideradas en las simulaciones con WRF.

### Datos Observados

Es importante el registro de la precipitación, mediante instrumentación adecuada, ya que ayuda a entender las frecuencias principales de eventos extremos, ya que generalmente son recurrentes. Además es muy importante desarrollar herramientas que nos permitan pronosticar si en un tiempo futuro ocurrirá un evento extremo,

que puede causar destrucción, para poder mantener a la población alerta y para establecer estrategias de mitigación de los impactos sobre las ciudades. Por otro lado, el cambio climático viene produciendo variaciones en la distribución espacio temporal de lluvias sobre el planeta, haciendo que las cantidades de lluvia se produzcan, en tiempos cada vez más cortos, produciendo un aumento del número de eventos extremos sobre la Tierra [10, 11].

En este trabajo se utilizaron datos de precipitaciones extremas observados mediante la “red de estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú” (SENAMHI), ubicadas dentro de la cuenca del río Mantaro, donde se encuentran ubicadas 30 estaciones meteorológicas y se dispusieron de registros correspondientes a eventos de precipitación extrema desde el año 1981 hasta el 2012.

En la Figura 2, se muestra la región central del Perú, donde se resalta los límites de la cuenca del río Mantaro y se observa la distribución geográfica de las estaciones sobre la cuenca, que tienen la particularidad de estar ubicadas a altitudes mayores a 3000 m y que la topografía es abrupta. En la Tabla 1, se muestran las estaciones ubicadas en la cuenca con su ubicación geográfica y altitud.

Estación	Lat(°)	Lon(°)	Altitud (m)
Santa-Ana	-12.004	-75.221	3302
Jauja	-11.783	-75.479	3360
Pampas	-12.393	-74.866	3240
Marcapomacocha	-11.405	-76.325	4479
Comas	-11.748	-75.100	3300
Cerro de Pasco	-10.693	-76.300	4260
S.J. de Jarpa	-12.125	-75.400	3726
La-Oroya	-11.576	-75.966	4007
Viques	-12.163	-75.234	3186
Acostambo	-12.366	-75.059	3675
Huayao	-12.034	-75.339	3360
Tunelcero	-13.254	-75.085	4475
Pilchaca	-12.406	-75.085	3650
Huancavelica	-12.780	-75.000	3676
Lircay	-12.983	-74.729	3513
Acobamba	-12.864	-74.559	3356
La-Quinua	-13.034	-74.135	3316
Salcabamba	-12.199	-74.786	3275
Carhuacayan	-11.200	-76.284	4150
Yantac	-11.334	-76.400	4684
Pachamachay	-11.050	-76.834	4385
Ricran	-11.542	-75.525	3687
Ingenio	-11.881	-75.288	3422
Casapalca	-11.648	-76.234	4100
Yauricocha	-12.317	-75.723	4675
Milloc	-11.572	-76.350	4361
Tanta	-12.117	-76.017	4355
Vilca	-12.115	-75.826	3810
Huancalpi	-12.542	-75.237	4450
Choclococha	-13.100	-75.034	5069

Tabla 1: Ubicación geográfica de las estaciones, de la red de observación del SENAMHI, ubicadas en la zona de estudio.

### Datos observados 1981 - 2015

Los datos, ordenados según el percentil 90, con la cantidad de eventos extremos ocurridos cada año, desde 1981 hasta el año 2012, se encuentran representados en

la Figura 4, donde la particularidad es que en el periodo anterior a 1995, en los años secos, eventualmente no ocurrían eventos de precipitación extrema, a diferencia al periodo posterior a 1995, donde los eventos extremos ocurren cada año y con valores de precipitación mayor. En este trabajo solo se han representado, por cuestión de espacio los eventos de 8, de las 30 estaciones ubicadas en la zona de estudio. Las figuras correspondientes a las demás estaciones tienen un comportamiento similar a las figuras mostradas en este trabajo.

En la Figura 5, se presentan los valores de número de precipitaciones extremas del percentil 90, promediadas para cada mes del año y para algunas estaciones meteorológicas, donde se muestra que en la mayoría de las estaciones los valores máximos se producen entre los meses de enero-marzo. En general el número de precipitaciones extremas (percentil 90), se reducen drásticamente entre los meses de abril y mayo, obteniendo sus valores mínimos en los meses de junio y julio, que esta de acuerdo con los análisis de precipitaciones realizadas por Silva et al., [2], quién realizó un estudio del comportamiento de las precipitaciones durante el periodo de 1970 – 2004, utilizando el concepto del Índice de Precipitación Estandarizado (*Standardized Precipitation Index, SPI*), para determinar los periodos húmedos y de sequía que sucedieron en la cuenca del río Mantaro.

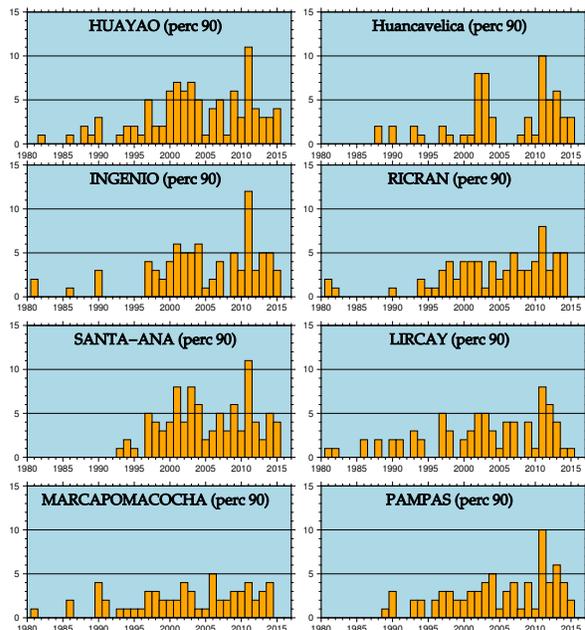


Figura 4: Número de eventos extremos que superan el percentil 90, para la Red de estaciones meteorológicas del SENAMHI, por cada año, desde el año 1981, hasta el 2015

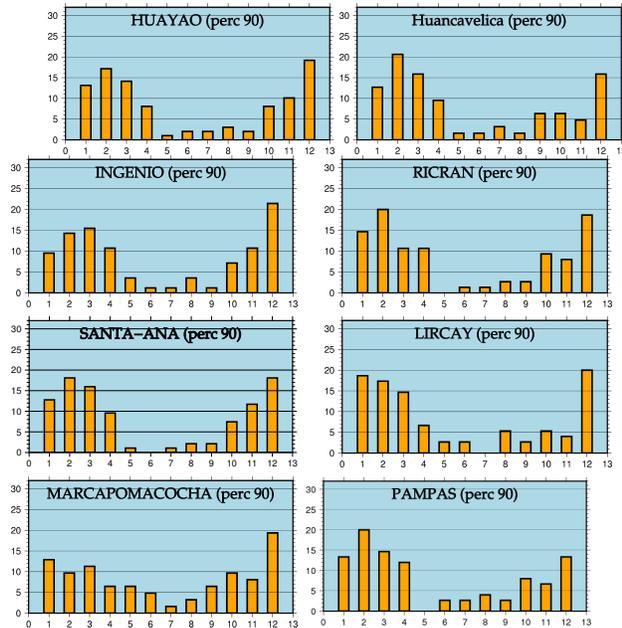


Figura 5: Número de eventos extremos que superan el percentil 90, para la Red de estaciones meteorológicas del SENAMHI. Climatología de número de eventos cada mes del año, promediada desde el año 1981, hasta el 2015

Datos observados 2000 - 2012

Para el presente análisis sólo se utilizaron los datos observados durante el periodo 2000 - 2012, ya que las fechas anteriores presentan muchos datos faltantes en las diferentes estaciones meteorológicas.

Para este periodo se calcularon los promedios de precipitaciones para cada estación meteorológica de la red del SENAMHI. Se realizó el cálculo de los promedios diarios de precipitaciones extremas, para cada una de las estaciones que se encuentran dentro de la cuenca.

La representación de los valores de precipitaciones extremas promediadas (Figura 6 y Tabla 6), muestra variabilidad entre los valores de las diferentes estaciones meteorológicas. Considerando estos promedios, se puede concluir que la estación de San Juan de Jarpa y Pilchaca ubicado en la franja central de la cuenca, son las estaciones que tienen valores de precipitación mayores a 14 mm en promedio, ambas estaciones se encuentran entre los 3500 y 4000 msnm.

De la misma forma las estaciones de Yantac y Casapalca ubicadas en la parte norte de la cuenca, son los lugares que presentan las precipitaciones con menores promedios, obteniendo valores menores a 9 mm, ambas estaciones se encuentran por encima de los 4000 msnm.

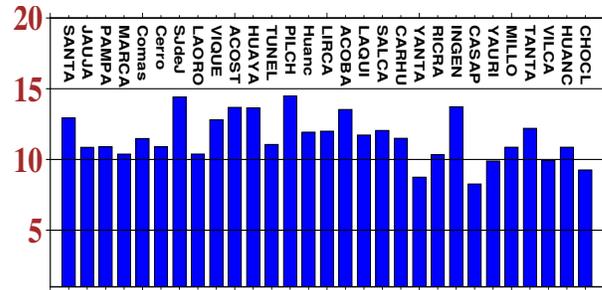


Figura 6: Promedio de precipitaciones extremas en mm para cada estación meteorológica, durante el periodo 2000 - 2012. datos observados mediante estaciones meteorológicas.

Nro	Estación	Promedio observado precipitación (mm)
01	Santa Ana	12.9290
02	Jauja	10.8580
03	Pampas	10.8946
04	Marcapomacocha	10.3775
05	Comas	11.4787
06	Cerro de Pasco	10.8968
07	San Juan de Jarpa	14.4069
08	La Oroya	10.3831
09	Viques	12.8023
10	Acostambo	13.6795
11	Huayao	13.6479
12	Tunelcero	11.0568
13	Pilchaca	14.4816
14	Huanc	11.9282
15	Lircay	11.9949
16	Acobamba	13.5296
17	La Quinua	11.7248
18	Salcabamba	12.0478
19	Carhuacayan	11.4945
20	Yantac	8.7483
21	Ricran	10.3397
22	Ingenio	13.7216
23	Casapalca	8.2627
24	Yauricocha	10.8626
25	Milloc	10.8626
26	Tanta	12.1982
27	Vilca	9.9269
28	Huancalpi	10.8651
29	Choclococha	9.2583

Tabla 2: Promedio de precipitaciones extremas observadas, en las estaciones ubicadas en la cuenca del río Mantaro.

Estaciones seleccionadas por su altitud y ubicación

Se ha calculado la cantidad de precipitación promediada en las partes norte, centro y sur de la cuenca del río Mantaro. En la Tabla 3, se han seleccionado las estaciones según su ubicación dentro de la cuenca, para determinar, si existe alguna relación entre la ubicación y la cantidad de precipitación promediada, para todo el periodo de estudio. La cuenca tiene una topografía variada, y es por ello se seleccionaron las estaciones por su altitud sobre el nivel del mar. En la Tabla 4, se muestran las estaciones, ordenadas según su altitud, desde los 3000 m hasta los 5100 m, cada 500 m. En la parte inferior del Cuadro 4, se muestran los valores promedio de las precipitaciones promediadas entre todas las estaciones que

se ubican en ese rango de altitudes. Los resultados muestran que en general las estaciones meteorológicas, que registran valores altos de lluvia son aquellas que se encuentran por debajo de los 4000 m, además que se cumple una relación inversa, a mayor altitud, las precipitaciones son menores.

Norte	Centro	Sur
Cerro de Pasco	Jauja	Yauricocha
Carhuacayán	Comas	Acostambo
Marcapomacocha	Ingenio	Pampas
Milloc	Santa Ana	Pilchaca
La Oroya	Huayao	Huancalpi
Ricrán	Tanta	Huancavelica
Casapalca	Vilca	Acobamba
	San Juan de Jarpa	Lircay
	Viques	La Quinua
	Salcabamba	Choclococha
		Tunelcero

Tabla 3: Estaciones ordenadas según su ubicación dentro de la cuenca.

3000-3500	3500-4000	4000-4500	4500-5000
Santa Ana Jauja Pampas Comas Viques Huayao Acobamba La Quinua Salcabamba Ingenio	San Juan J. Acostambo Pilchaca Huancavelica Lircay Ricran Vilca	Cerro de Pasco La Oroya Tunelcero Carhuacayan Marcapomacocha Casapalca Milloc Tanta Huancalpi	San Juan J. Yantac Yauricocha Choclococha
Promedio de Precipitación	Promedio de Precipitación	Promedio de Precipitación	Promedio de Precipitación
12.363	12.394	10.710	9.299

Tabla 4: Estaciones ordenadas según su altitud, sobre el nivel del mar.

## Datos Modelizados

Para realizar las simulaciones, se implementó el modelo WRF en el “Sistema Computacional de Alto Rendimiento de última generación (HPC-Linux-Clúster)” que es un equipo de cómputo de alta eficiencia computacional, compuesto por 25 nodos de cómputo y con capacidad de almacenamiento de 400 Terabytes, que se encuentra ubicado en las instalaciones del Instituto Geofísico del Perú (IGP).

Las simulaciones fueron realizadas, para las fechas donde ocurrieron eventos extremos, comenzando a la 00 horas del Tiempo Universal (UTC), realizando un total de 180 ejecuciones del modelo, con un horizonte temporal de 72 horas, en cuatro áreas anidadas, con resoluciones de 18, 6, 3 y 0.75 km respectivamente (Figura 3).

## Características del Modelo WRF

El modelo WRF consta de varios módulos, donde el principal es el *Advanced Research Weather* (ARW), las principales características de este Módulo pueden encontrarse en el artículo de Skamarock [4]. Por otro lado, “Las ecuaciones básicas que utilizan todos los modelos numéricos de circulación atmosférica y las que son utilizados por el modelo WRF se encuentran en muchos estudios y libros de texto” [12–15].

En este estudio se evalúan las salidas numéricas del Modelo de Investigación y Previsión Meteorológica WRF en pronósticos cuantitativos de precipitaciones extremas ocurridas en los Andes centrales del Perú, específicamente en la cuenca del río Mantaro, durante el periodo comprendido entre el año 2000 y 2012. La evaluación se realiza utilizando datos observados obtenidos de la red de estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI, que consta de alrededor de 30 pluviómetros distribuidos sobre el área de estudio. El modelo fue ejecutado para un horizonte temporal de 72 horas, de donde se obtuvieron los datos del primer día de pronóstico, los que fueron comparados con la información observada.

Para realizar este trabajo, se utilizó el modelo WRF v3.7 para realizar simulaciones sobre el área que abarca la Cuenca del Río Mantaro, para el análisis de las simulaciones en fechas específicas, donde ocurrieron precipitaciones extremas. La configuración del modelo en general se basa en el análisis de sensibilidad realizado por Moya et al. (2018), [5], donde las condiciones iniciales y de contorno, se toman del “Análisis Operativo Global del Centro Nacional de Predicción Ambiental” (NCEP), análisis final FNL. Los datos disponibles, se encuentran con resolución temporal cada 6 horas, y con grilla horizontal de  $1^\circ \times 1^\circ$ .

El análisis contiene datos de superficie y 26 niveles verticales, incluyendo las siguientes variables superficiales: presión a nivel del mar, datos atmosféricos en la vertical como altura geopotencial, temperatura del aire, componentes zonales, meridionales y velocidad vertical del viento. Adicionalmente se tienen datos de temperatura superficial del mar y parámetros de suelo.

Los detalles de la configuración, de las áreas anidadas, se presentan en la Figura 3, donde se muestra la ubicación geográfica de las mallas utilizadas, con cuatro dominios. El dominio mayor abarca todo el territorio peruano y el de mayor resolución contiene la mayor parte de la cuenca del río Mantaro. En el Cuadro 5 se presentan las dimensiones horizontales de las mallas utilizadas, para cada uno de los dominios utilizados, donde se delimita las latitudes y longitudes de cada una de las grillas utilizadas.

Características	Dominio 2	Dominio 3	Dominio 4
Latitud	-15.977610 -8.485573	-14.51044 -10.20232	-12.36192 -11.56448
Longitud	-77.392000 -8.485573	-76.7399 -73.3149	-75.7364 -74.9760
Niveles de grilla X, Y, Z	115 × 142 ×35	127 × 163 ×35	113 × 121 × 35
Dimension de grilla X-Y (km)	6 × 6 km	3 × 3 km	0.75 × 0.75 km

Tabla 5: Configuración de los dominios, para las simulaciones de WRF.

En la Tabla 6 se muestra la configuración utilizada para las parametrizaciones físicas aplicadas en el estudio. Como se mencionó anteriormente la configuración está basada en el estudio de Moya et al., [5], donde la técnica de anidamiento unidireccional ha sido aplicada en las simulaciones, ejecutando los cuatro dominios al mismo tiempo.

Parámetro	Esquema (dom 1,2,3 y4)
Microfísica	Morrison
Radiación lw	RRTGM (Rapid Radiative Transfer Model)
Radiación sw	RRTMG
Modelo de suelo	Unified Noah Land Surface Model.
Capa superficial	MM5 similarity scheme
Boundary layer	Yonsei university scheme (YSU)
Convección	Grell-Freitas ensemble scheme

Tabla 6: Parametrizaciones utilizadas en la configuración de los dominios, para las simulaciones de WRF.

Para evaluar la habilidad del modelo para realizar pronósticos de precipitaciones extremas, se utilizan métodos de verificación tanto visuales como estadísticos para proporcionar resultados complementarios. Se pone énfasis a pruebas estadísticas como diagramas de dispersión, error promedio o sesgo (BIAS), Error Absoluto medio (MAE) y el Error Cuadrático Medio (RMSE). Estos estadísticos se calculan para conjunto total de datos, para la agrupación de los datos por años, por meses y por cada estación.

### Verificación de Modelos Numéricos.

La verificación es la evaluación y cuantificación de la relación entre un conjunto coincidente de pronósticos y observaciones. La verificación comienza con un conjunto de datos que consiste en valores de pronóstico realizados mediante modelos atmosféricos y observaciones que deben coincidir tanto espacial como temporalmente. Para la correspondencia espacial, los datos de observación deben analizarse en la grilla de los datos de pronóstico, o los datos de pronóstico deben interpolarse en el espacio a los puntos de observación. El primero es realizado con mayor frecuencia, lo que a veces lleva al resultado, que el conjunto de datos modelizados, analizado no es

tan representativo con los datos de observación. Después de realizar la interpolación, por lo general, la correlación entre datos modelizados y observados aumenta.

### Datos Utilizados.

Para el análisis estadístico se utilizaron los resultados de las simulaciones con el modelo atmosférico WRF y se complementaron con registros observados, de la “red de estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú” (SENAMHI). Del conjunto de datos de esta red, se seleccionaron aquellos, de cada estación, donde se registraron precipitaciones extremas (Percentil 90), para el periodo de tiempo de los años 2000 – 2012. Para determinar si el evento era considerado como una precipitación extrema, se calcularon los percentiles 90, para cada una de las estaciones ubicadas en el área de estudio. Fueron considerados 103 eventos ocurridos en el periodo de estudio, para 30 estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca del río Mantaro. En la Figura 7, se observa que los datos presentaron un mayor número de eventos durante el año 2011, donde ocurrieron 464 eventos en total, sumados para cada estación meteorológica. Otros años donde se presentaron muchos eventos meteorológicos extremos, fueron los años 2002 (406 eventos) y 2003 (348 eventos).

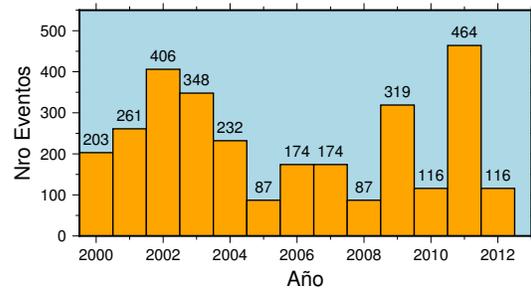


Figura 7: Datos ordenados, según el número de eventos por cada año, para el periodo 2000 – 2012.

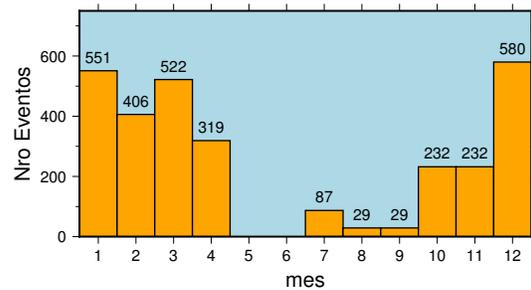


Figura 8: Datos ordenados, según el número de eventos por cada mes, para el periodo 2000 – 2012.

Estac	Nro de even	Prom WRF	Prom Obs	Var WRF	Var Obs	Std Dev WRF	Std Dev Obs
Santa	100	4.84	12.93	30.40	58.84	5.51	7.67
Jauja	100	4.77	10.86	33.47	55.76	5.79	7.47
Pampa	093	6.49	10.89	42.19	48.97	6.50	7.00
Marca	089	7.90	10.38	85.15	33.49	9.23	5.79
Comas	098	6.97	11.48	48.89	44.53	6.99	6.67
Cerro	096	6.96	10.90	65.63	50.49	8.10	7.11
SJdeJ	101	7.55	14.41	70.72	70.40	8.41	8.39
LaOro	095	5.29	10.38	31.65	39.13	5.63	6.26
Vique	086	4.21	12.80	27.21	63.84	5.22	7.99
Acost	093	5.90	13.68	41.16	51.14	6.42	7.15
Huaya	100	4.10	13.65	22.79	67.51	4.77	8.22
Tunel	095	6.09	11.06	84.88	79.12	9.21	8.90
Pilch	087	5.95	14.48	49.67	62.23	7.05	7.89
Huanc	092	4.91	11.93	32.33	50.13	5.69	7.08
Lirca	099	4.75	11.99	40.35	67.68	6.35	8.23
Acoba	091	5.25	13.53	38.30	64.08	6.19	8.01
LaQui	097	7.15	11.72	55.89	70.67	7.48	8.41
Salca	094	11.89	12.05	128.18	71.86	11.32	8.48
Carhu	091	10.23	11.49	104.41	69.74	10.22	8.35
Yanta	091	7.87	8.75	80.34	31.76	8.96	5.64
Ricra	098	7.33	10.34	71.90	53.68	8.48	7.33
Inge	097	6.43	13.72	48.75	71.23	6.98	8.44
Casap	086	5.04	8.26	37.93	33.04	6.16	5.75
Yaur	094	6.36	9.89	67.41	69.95	8.21	8.36
Millo	091	6.24	10.86	62.29	40.55	7.89	6.37
Tanta	090	5.21	12.20	52.27	48.59	7.23	6.97
Vilca	078	7.29	9.93	65.64	54.05	8.10	7.35
Huanc	097	5.65	10.87	51.82	74.10	7.20	8.61
Chocl	024	8.42	9.26	71.24	47.87	8.44	6.92

Tabla 7: Valores estadísticos para cada estación de la cuenca del Mantaro.

Año	Nro De Dat	Prom WRF	Prom Obs	Var WRF	Var Obs	Std Dev WRF	Std Dev Obs
2000	186	6.09	11.90	39.61	60.26	6.29	7.76
2001	227	7.77	11.97	72.42	59.11	8.51	7.69
2002	358	3.63	9.95	32.63	47.92	5.71	6.92
2003	284	1.50	11.74	10.09	60.00	3.18	7.75
2004	204	4.11	12.45	52.19	83.53	7.22	9.14
2005	072	2.73	10.39	15.90	55.16	3.99	7.43
2006	161	2.88	12.03	21.16	47.83	4.60	6.92
2007	159	4.82	11.45	24.27	50.19	4.93	7.08
2008	078	10.40	10.86	74.90	37.05	8.65	6.09
2009	274	7.97	10.81	52.96	59.64	7.28	7.72
2010	107	7.01	12.01	43.10	56.87	6.57	7.54
2011	427	11.70	12.83	74.31	53.71	8.62	7.33
2012	106	11.85	12.09	87.11	102.16	9.33	10.11

Tabla 8: Valores estadístico para cada estación año del registro de datos.

Características	Dominio 1	Dominio 2	Dominio 3
Punto central	Lat 10° S Lon 75° S	Lat 12.25819° S Lon 74.8356° S	Lat 12.39203° S Lon 75.0548° S
grilla horiz	18 km	6 km	3 km
Dim (XYZ)	115 × 140 × 2857	115 × 142 × 28	125 × 161 × 28
Δt	90 s	36 s	18 s
Condiciones iniciales y contorno	FNL1 × 1	Simulación del dominio 1	Simulación del dominio 2

Tabla 9: Características de dominios, condiciones iniciales y de frontera.

## Datos Satelitales

Para realizar la evaluación de los resultados del modelo, se utilizaron datos del satélite GOES, que brinda datos horarios de la temperatura de las nubes. Este satélite es el sexto en una serie de naves espaciales geosíncronas y operacionales desarrolladas por la NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio), operadas por NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica).

La nave lleva una sonda atmosférica VISSR (Radiómetro de barrido por giro infrarrojo visible), para proporcionar datos de cobertura de nubes de día y noche de

alta calidad. Además toma temperaturas derivadas de la radiación del sistema Tierra - atmósfera y determina la temperatura atmosférica y contenido de vapor de agua en varios niveles.

## Resultados y Discusión

### Verificación de los resultados

Para el análisis estadístico se utilizaron datos simulados con el modelo atmosférico WRF y datos observados, de la “red de estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú” (SENAMHI).

Del conjunto de datos de la red del SENAMHI, se seleccionaron aquellos, de cada estación, donde se registraron precipitaciones extremas, para el periodo que comprende, desde el año 2000 hasta el año 2012. Para determinar si el evento era considerado como una precipitación extrema, se calcularon los percentiles 90, para cada una de las estaciones ubicadas en el área de estudio. Fueron considerados 103 eventos ocurridos en el periodo de estudio, para 29 estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de estudio.

Para observar los pronósticos del modelo WRF y los datos observados, se realizaron gráficos de histogramas (Figuras 9, 10, 11), donde se presentan los valores pronosticados obtenidos mediante el modelo (color azul) y los valores observados (rojo), registrados en las estaciones meteorológicas consideradas, para cada una de las fechas seleccionadas (con percentil 90). En las Figuras 9 se tienen graficados los valores obtenidos de pronósticos del modelo (en color azul), con los valores de observación (rojo) para cada una de las estaciones meteorológicas del SENAMHI, para los años 2002 – 2003. De forma similar se presentan algunos valores para los años 2003 – 2006 (Figura 9), 2008 - 210 (Figura 10) y 2010 – 2011 (Figura 11).

Se presentan las figuras de algunos eventos ocurridos durante el periodo de simulaciones. Se observan algunas particularidades durante el periodo 2002 – 2007, donde en la mayoría de casos, el modelo no realiza un buen pronóstico de los eventos lluviosos. En este periodo subestima los valores de precipitación, en muchos de los casos pronostica valores nulos de precipitación, cuando los datos observados representan cantidades significativas de precipitaciones. En particular, para el día 26 de noviembre de 2002, el modelo pronosticó valores casi nulos para todas las estaciones meteorológicas, mientras que en los datos observados se presentan valores significativos de hasta 18 mm. Este día el modelo tuvo un desacierto total, posiblemente por la rapidez del fenómeno meteorológico, que el modelo global no pudo simularlo.

Para el periodo 2008 – 2012, el modelo mejora sus pronósticos, pero en muchos casos los valores pronosticados mediante WRF sobre estima las cantidades de precipitación observadas, y en otros tantos subestima los mismos, pero en líneas generales las simulaciones realizadas para los años posteriores al 2008, presentan mejores resultados que el periodo 2000 – 2007.

En las figuras que se presentan a continuación, se representan mediante barras los valores de precipitación observados en color rojo y las cantidades obtenidas mediante las simulaciones numéricas con WRF en color azul. Cada estación tiene un valor observado y modelizado.

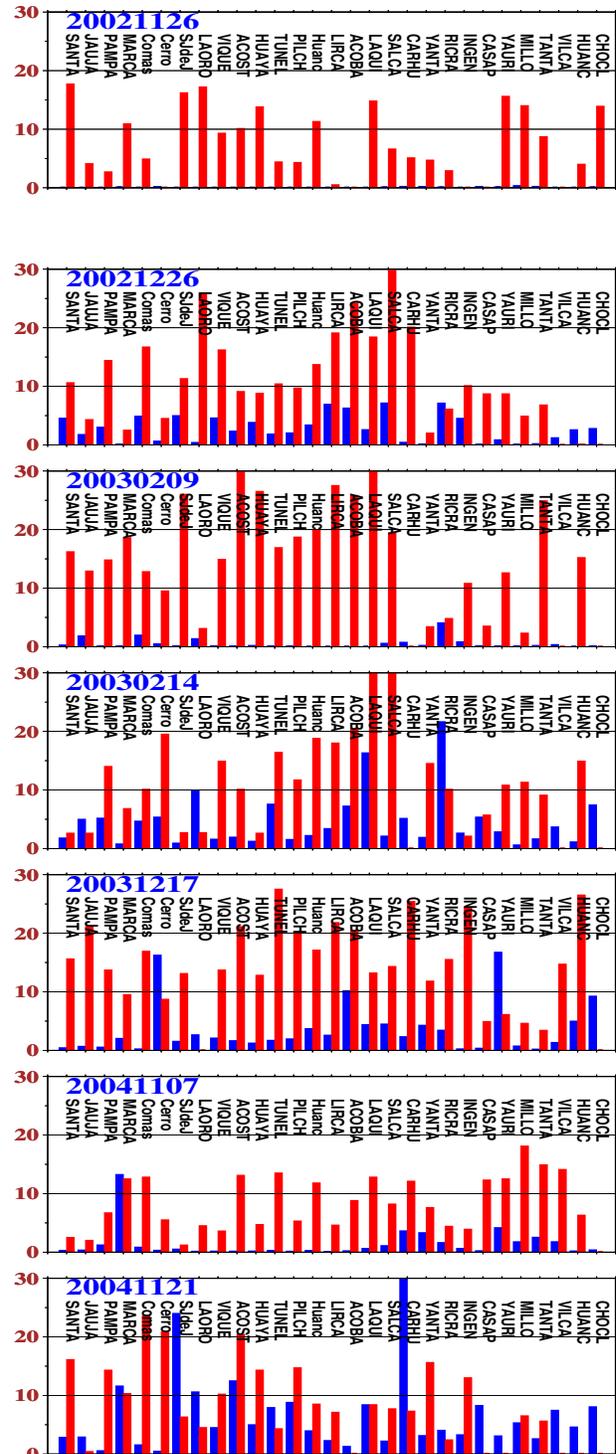


Figura 9: Histograma de valores de precipitación Observados (rojo) y pronosticados con el modelo WRF (azul), para algunos eventos ocurridos durante los años 2002-2004

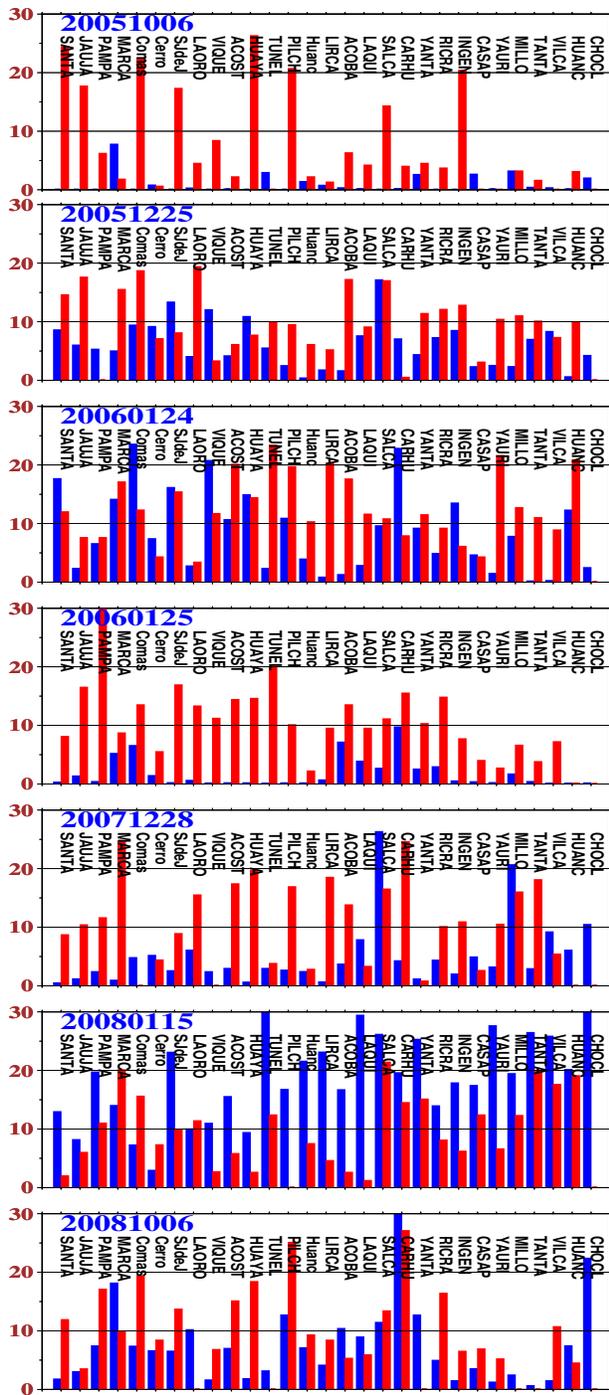


Figura 10: Histograma de valores de precipitación observados (rojo) y pronosticados con el modelo WRF (azul), para algunos eventos ocurridos durante los años 2005-2008

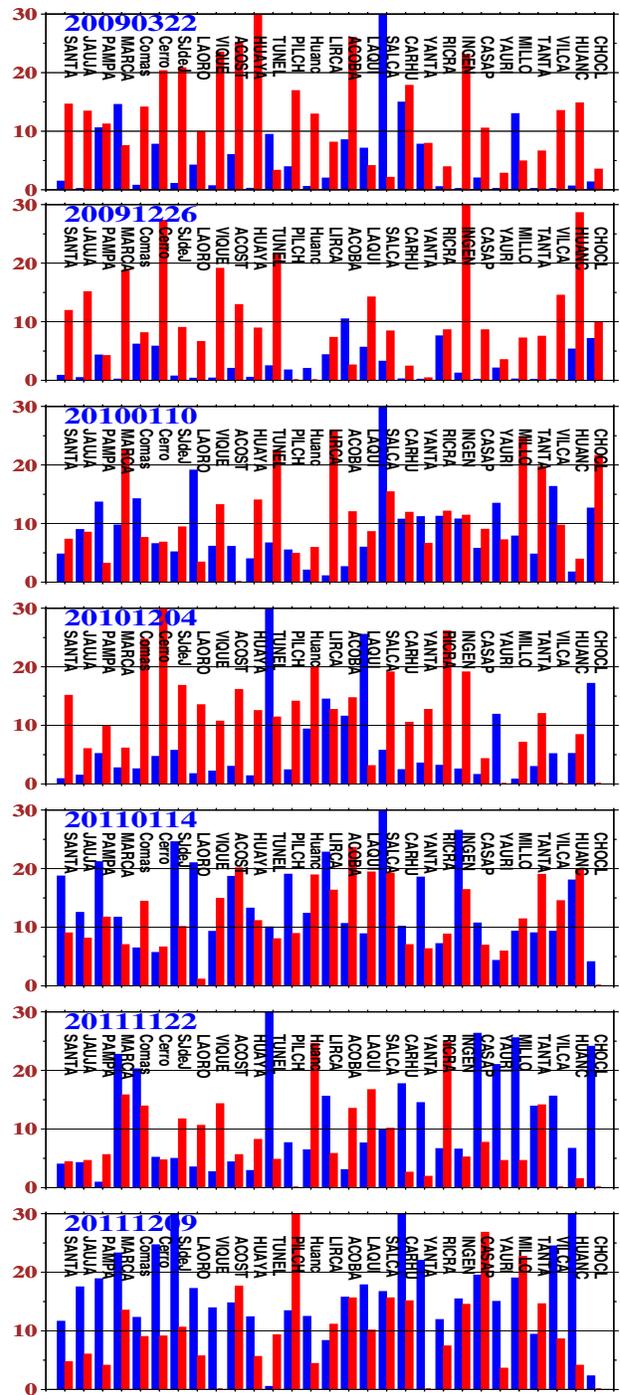


Figura 11: Histograma de valores de precipitación observados (rojo) y pronosticados con el modelo WRF (azul), para algunos eventos ocurridos durante los años 2009-2011

En la Figura 12, se puede determinar, cuales son los años donde se han registrado un mayor número de even-

tos extremos en la región de estudio. Se observa que los datos presentaron un mayor número de eventos durante el año 2011, donde ocurrieron 464 eventos en total, sumados para cada estación meteorológica. Otros años donde se presentaron muchos eventos meteorológicos extremos, fueron el año 2002 (406 eventos) y el año 2003 (348 eventos).

En la Figura 13, se presenta la gráfica de barras de los eventos, ordenados por el mes de ocurrencia. Aquí se confirma el comportamiento estacional que tienen las precipitaciones en el área de estudio. Los eventos extremos se concentran principalmente durante los meses de verano, desde el mes de diciembre hasta febrero. Durante los meses de mayo y junio (otoño-invierno), no se presenta ningún evento y en los meses entre julio-septiembre la ocurrencia de eventos van en aumento con valores menores a los obtenidos para los meses de verano. Por lo tanto, queda claro que igual que los eventos de lluvias tienen un comportamiento estacional, los eventos extremos también se ajustan a esa distribución.

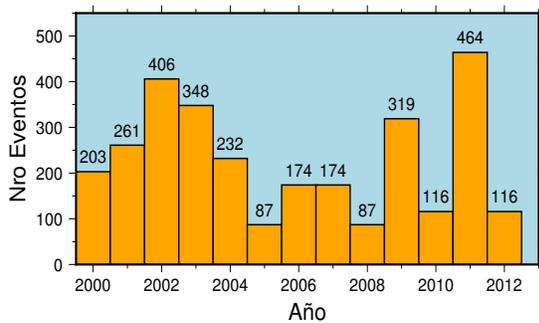


Figura 12: Numero de eventos extremos por año.

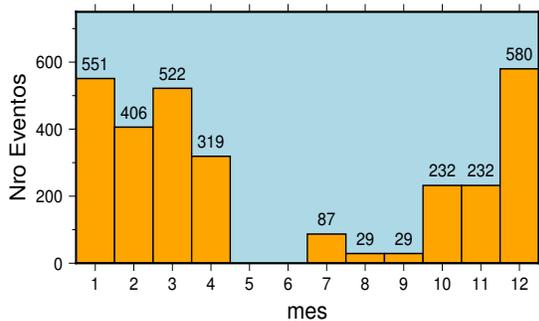


Figura 13: Numero de eventos extremos por mes.

En la Figura 14, se han representado en el eje X, los valores de precipitación pronosticada con el modelo WRF, y sobre el eje Y, el número de eventos, para cada valor de precipitación. Similarmente en la Figura 15 se presentan el número de eventos versus los valores de precipitación. En estas figuras se observa que mientras los valores con poca precipitación, tiene pocos elementos en los datos observados (Los valores escogidos, fueron

precipitaciones anormales), en el caso de los datos pronosticados con el modelo, el número de eventos de poca precipitación son máximos, lo que indica, que el modelo registró valores por debajo de los valores observados, para cierta cantidad de eventos lluviosos. Además hay que tener presente, que estas dos últimas figuras representan al periodo 2000 - 2012, donde existe un periodo (2000 - 2007), donde las simulaciones presentan problemas al subestimar las lluvias. Efectivamente, si solo consideramos el periodo 2008 - 2012, estos gráficos, de datos modelizados, se aproximan más a los datos observados.

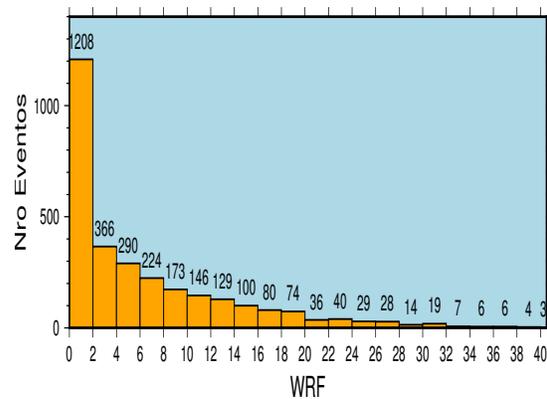


Figura 14: En el eje X, se representa los valores pronosticados de precipitación y en el eje Y el número de eventos, para las fechas de ocurrencia de precipitaciones extremas.

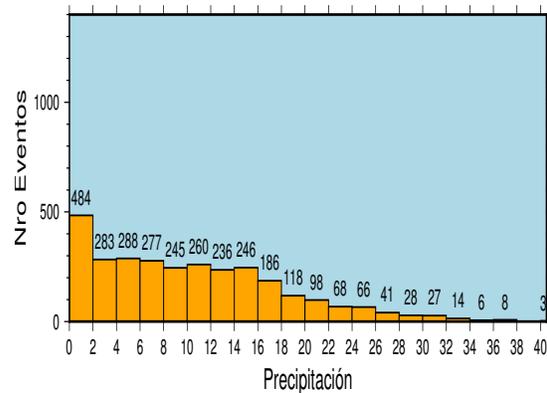


Figura 15: Número de eventos observados según su valor de precipitación.

## Verificación del modelo utilizado

### Gráficos de Dispersión

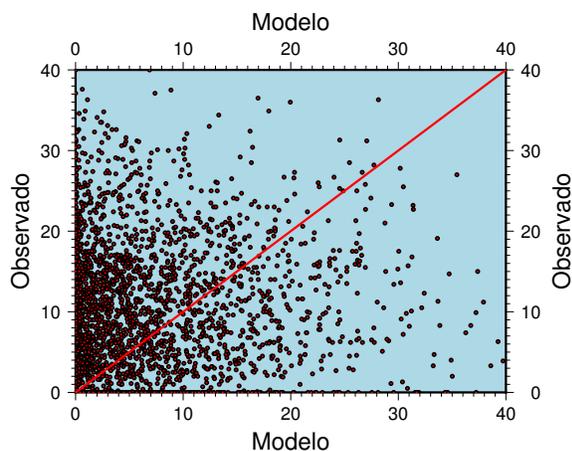
En la Figura 16, se representa un diagrama de dispersión para pronósticos de precipitaciones en la cuenca del río Mantaro. Tanto las observaciones como los pronósticos se expresan como un par ordenado (x, y), donde

cada  $\mathbf{x}$  representa los datos del modelo y los datos  $\mathbf{y}$  son los datos observados.

Un análisis visual rápido a la Figura 16, revela las principales características del comportamiento de los datos: La mayor densidad de los puntos sobre el eje  $\mathbf{y}$ , nos indica que la mayoría de casos, de precipitaciones extremas, los valores observados son mayores que los resultados del modelo. Además, en un buen porcentaje de los datos, ocurren eventos extremos, indicados por los valores observados y el modelo presenta valores cercanos a cero. El gráfico tiene una alta dispersión, ya para que haya buena correlación, los puntos deben alinearse sobre la línea de los  $45^\circ$ .

Una comparación de la orientación de la línea de regresión y la línea de  $45^\circ$  proporciona una representación visual de la calidad relativa de los pronósticos. A medida que disminuye la calidad, la línea de regresión tiende más hacia la horizontal. Una línea horizontal significa que no hay habilidad; las observaciones son independientes del pronóstico o, dicho de otro modo, la media de las observaciones (climatología) es tan buen predictor como el método de pronóstico.

Además, se puede ver en el gráfico, que existe la tendencia a que los puntos se encuentren por encima de la línea de  $45^\circ$ , lo que indica un ligero sesgo negativo; las precipitaciones se pronostican con valores por debajo de los observados. Se debe tener en cuenta que una estimación visual de sesgo debe incluir una estimación visual de la distancia acumulativa de los puntos desde la línea, y que los sucesos en un único punto de trazado. Deben tenerse en cuenta los eventos perdidos, y todos los puntos donde el pronóstico se encuentra dentro del rango de extremos y la observación no, son llamadas falsas alarmas. Las áreas de falsa alarma y eventos perdidos se describen en el gráfico (Figura 16)



**Figura 16:** Gráfico de dispersión de las precipitaciones, sobre el eje  $X$ , se plotean los datos modelizados y en el eje  $Y$  los datos observados.

## Bias

El error sistemático medio, sesgo o BIAS se define como: Los valores pronosticados menos los observados.

$$BIAS = \frac{1}{N} \left[ \sum_{i=1}^N (F_i - O_i) \right]$$

Donde :  
 $N$  : Número de datos  
 $F_i$  : Datos Modelizados  
 $O_i$  : Datos Observados

El BIAS indica la dirección promedio de la desviación de los valores observados, pero no refleja la magnitud del error. Un sesgo positivo, indica que el valor del pronóstico excede al valor observado en el promedio, mientras que un sesgo negativo corresponde a una predicción inferior del valor observado en el promedio, mientras que un sesgo negativo corresponde a una predicción inferior del valor observado en el promedio.

El sesgo puede expresarse como el valor medio de pronóstico menos el valor medio observado para la muestra de verificación. Como la media es independiente del orden, uno podría por ejemplo, intercambiar el orden de los pronósticos de invierno y verano para la temperatura máxima y no cambia el sesgo para el año.

En la Figura 17, se muestran el BIAS, calculado para cada estación sobre el área de estudio, para el registro total de datos para el periodo 2000 – 2012, donde los colores y los radios de cada círculo, son proporcionales a los valores calculados para el BIAS. Los círculos rojos (con radios pequeños), nos indican que las diferencias entre los datos del modelo y los datos observados, son pequeños, mientras que los círculos en azul presentan diferencias significativas entre los valores observados y modelizados, siendo los valores del BIAS, negativos, lo que indica que el modelo subestima las precipitaciones. En la Figura 17, se identifica que las estaciones de Yantac y Carhuacayan, presentan valores de sesgos, cercanos a cero, lo que indica que el modelo pronosticó los eventos extremos con buen porcentaje de aciertos.

Los valores calculados para el sesgo para cada mes del año (Figura 18), muestra que las mayores diferencias entre los valores pronosticados y observados se presentan para el mes de agosto, seguido del mes de febrero. Los valores mínimos se encuentran en el mes de setiembre, ya que, durante los meses de mayo y junio, no se registran eventos de precipitación extremas. En la Figura 19, se presentan los valores de los sesgos, calculados para cada año del periodo de estudio. Los máximos valores (en valor absoluto), se presentan durante el año 2003, y 2006 donde se deben haber producido eventos extremos, que no fueron pronosticados por el modelo, razón por la que los valores tienen un máximo (en valor absoluto). Para el año 2012 y 2008 se presenta valo-

res mínimos (en valor absoluto), del sesgo. En la Figura 20, se presentan los valores de los sesgos, calculados para estación, en la región de estudio. Errores mínimos se registran en la estación de Salcabamba, Carhuacayán y Yantac, mientras que máximos errores se presentan en las estaciones de Huayao, Vique, Pilchaca entre otros.

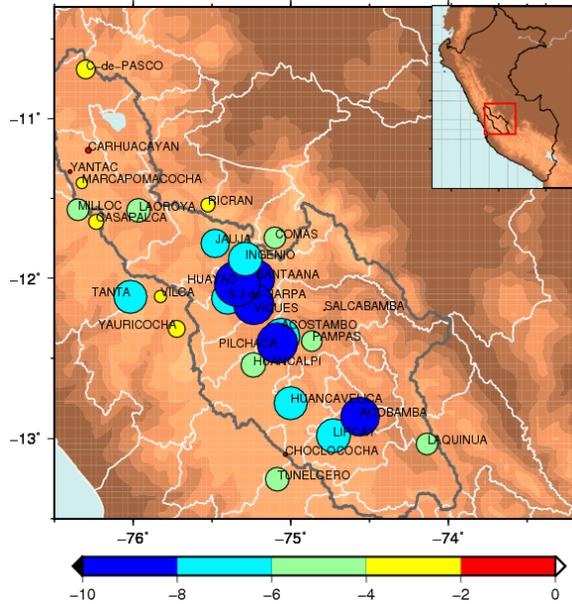


Figura 17: Gráfico de los valores de sesgo (BIAS), calculados para cada estación, para el periodo 2000 - 2012.

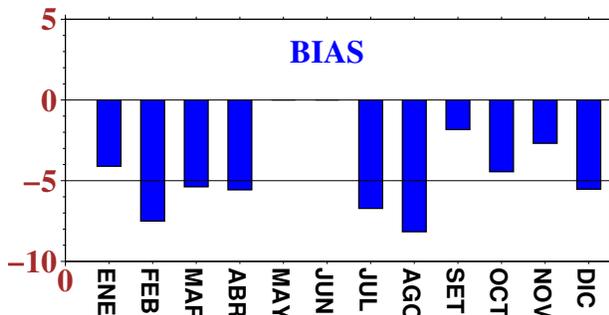


Figura 18: Gráfico de los valores de sesgo (BIAS), calculados para cada mes, para el periodo 2000 - 2012.

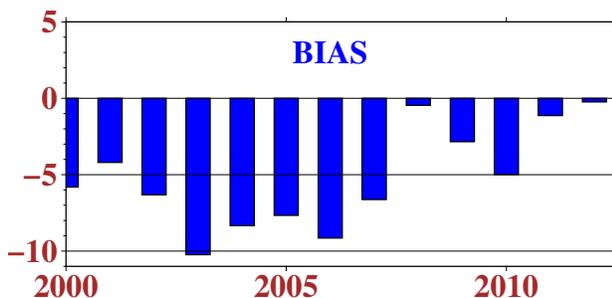


Figura 19: Gráfico de los valores de sesgo (BIAS), calculados para cada año, para el periodo 2000 - 2012.

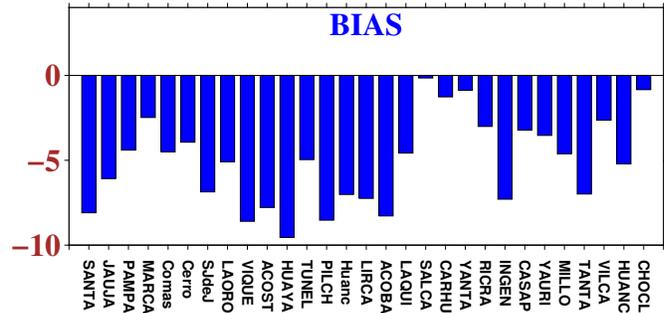


Figura 20: Gráfico de los valores de sesgo (BIAS), calculados para cada estación, para el periodo 2000 - 2012.

### MAE

El error sistemático medio (BIAS), es una medida inadecuada para medir la habilidad del modelo, ya que errores negativos se pueden compensar con errores positivos, proporcionándonos falsas expectativas para el comportamiento del modelo. Una forma simple de proporcionar una compensación errores de pronósticos positivos y negativos, es considerar el error absoluto medio (MAE), definido como la media de los valores absolutos. El MAE, es una medida de exactitud general, que se define como:

$$MAE = \frac{1}{N} \left[ \sum_{i=1}^N |(F_i - O_i)| \right]$$

- Donde :
- N : Número de datos.
- $F_i$  : i-ésimo pronóstico del modelo.
- $O_i$  : i-ésimo dato Observado.

En la Figura 21, se ha graficado los valores de MAE para cada estación meteorológica, para el periodo de estudio. Se observa que las estaciones de Ingenio, Huayao, San Juan de Jarpa, Pilchaca, Acobamba y Tunelcero tienen los máximos valores de RMSE. Por otro lado las estaciones de Ricrán y Casapalca tienen los valores mínimos de este estimador. En la Figura 21, el color y tamaño del gráfico son proporcionales a los valores calculados del MAE. Como indica la paleta de colores, los colores azules - celestes son aquellos que tienen valores mínimos de MAE y los colores amarillo - Rojo son aquellos que presentan valores grandes de este estimador.

Las figuras 22, 23 y 24 se presentan gráficos de barras de los valores de MAE respecto al mes, año y estación meteorológica respectivamente.

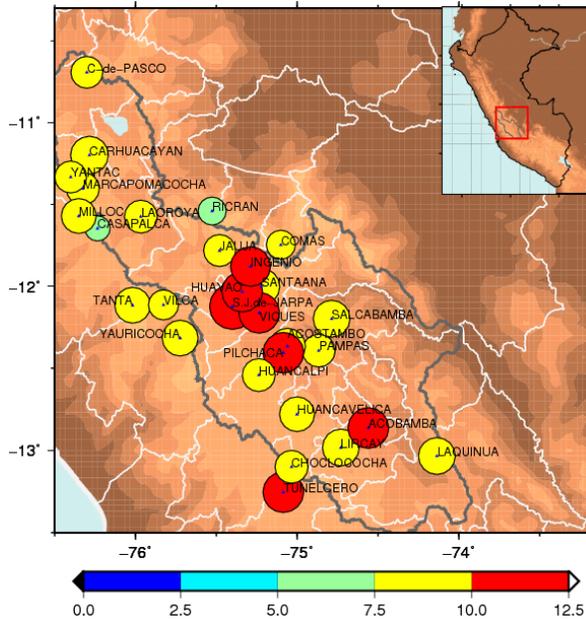


Figura 21: Gráfico de los valores del MAE, calculado para cada estación, para el periodo 2000 – 2012.

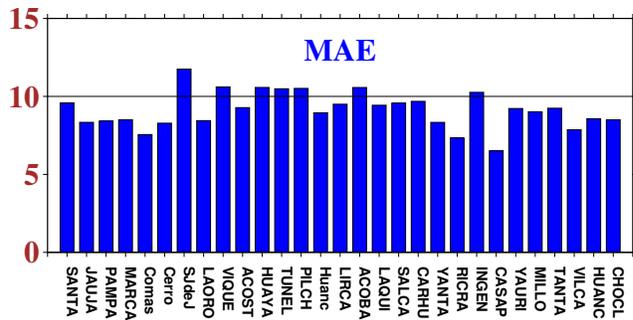


Figura 24: Gráfico de los valores de MAE, calculados para cada estación, para el periodo 2000 – 2012.

RMSE

El error cuadrático medio (RMSE), calcula el error existe entre dos conjuntos de datos. El cálculo puede estar orientado a un conjunto de valores observados, con otro de valores pronosticados utilizando modelos numéricos.

Este es un estimador estadístico cuadrático que da la magnitud promedio de errores, ponderado de acuerdo con el cuadrado del error. Al igual que el MAE, no indica la dirección de la desviación. En comparación con el error absoluto medio, el RMSE otorga mayor peso a los errores grandes que a los errores pequeños en el promedio. Por lo tanto, es apropiado estadísticamente para usar cuando los errores grandes son particularmente indeseables. Su sensibilidad a grandes errores también significa que no brinda estimaciones estables de error si se usan muestras pequeñas.

En la Figura 25, se ha graficado los valores de RMSE para cada estación meteorológica, para el periodo de estudio. Se observa que las estaciones de Ingenio, Huayao, San Juan de Jarpa, Pilchaca, y Viques tienen los máximos valores de RMSE. Por otro lado las estaciones de Comas y Casapalca tienen los valores mínimos de este estimador. En esta Figura (25), el color y tamaño del gráfico son proporcionales a los valores calculados del RMSE. Como indica la paleta de colores, los colores azules - celestes son aquellos que tienen valores mínimos y los colores amarillo - Rojo son aquellos que presentan valores grandes de RMSE. Los valores de RMSE son mayores que el MAE, lo que indica una alta varianza del error.

Las figuras 26, 27 y 28 se presentan gráficos de barras de los valores de RMSE respecto al mes, año y estación meteorológica respectivamente.

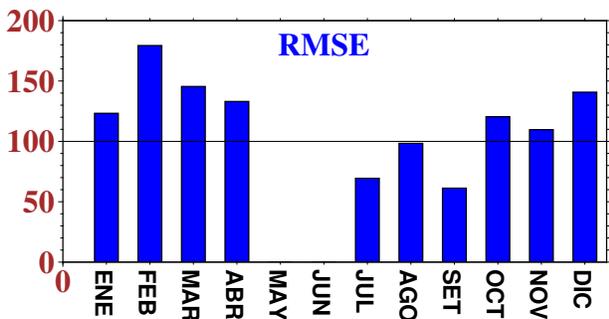


Figura 22: Valores del MAE, calculados para cada mes, del periodo de estudio 2000 – 2012.

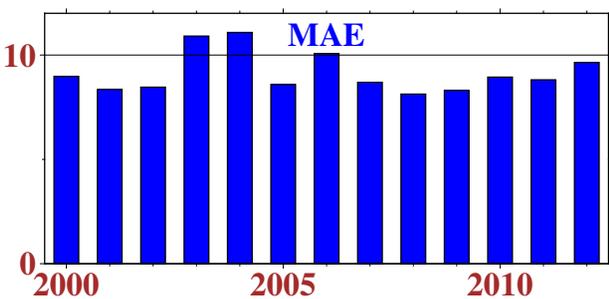


Figura 23: Valores del MAE, calculados para cada año, del periodo de estudio 2000 – 2012.

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2 \right]^{1/2}$$

Donde :  
 $F_i$  : i-ésimo pronóstico del modelo.  
 $O_i$  : i-ésimo dato Observado.

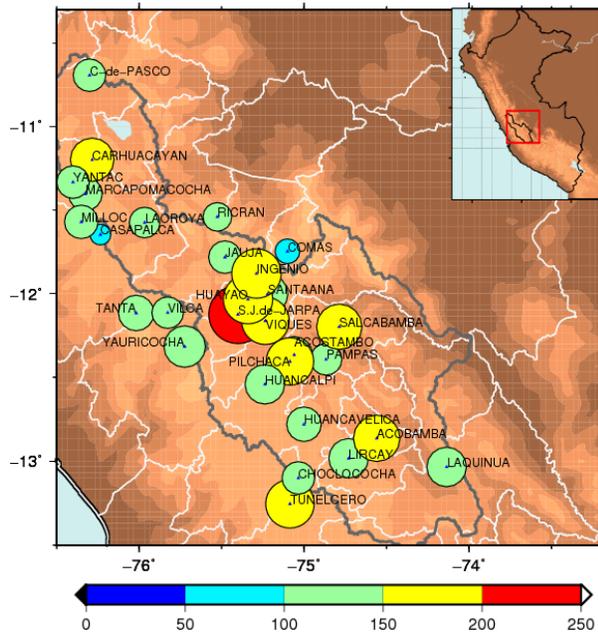


Figura 25: Gráfico de los valores del RMSE, calculado para cada estación, para el periodo 2000 – 2012.

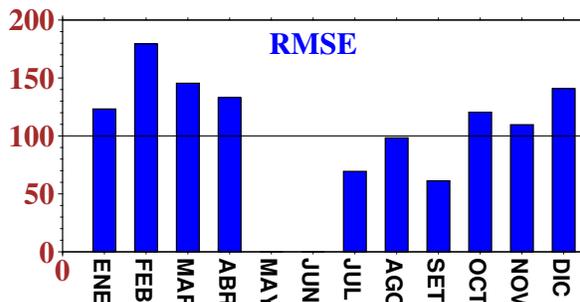


Figura 26: Gráfico de los valores de RMSE, calculados para cada mes del año, para el periodo 2000 – 2012.

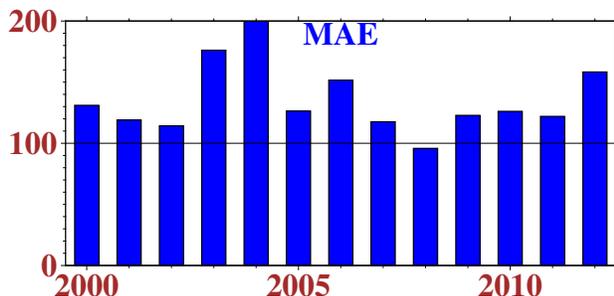


Figura 27: Gráfico de los valores de RMSE, calculados para cada año, durante el periodo 2000 – 2012.

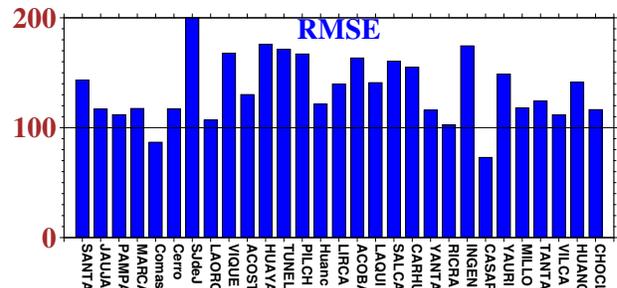


Figura 28: Gráfico de los valores de RMSE, calculados para cada estación meteorológica, para el periodo 2000 – 2012.

### Verificación con datos satelitales

#### Datos del hidroestimador PERSIANN

Para verificar los resultados se utilizaron datos de lluvia calculados mediante el Hidro-Estimador PERSIANN-CCS (Estimación de la Precipitación Mediante Sensoramiento Remoto) que se encuentra de manera operacional y utiliza Redes neuronales artificiales para calcular las precipitaciones acumuladas. Este producto utiliza datos en la banda del infrarrojo (IR) de los satélites geoestacionarios GOES, para estimar las tasas de lluvia.

PERSIANN-CCS, es un producto de precipitación mediante satélite que proporciona datos en tiempo real a alta resolución (4 × 4 km). Este producto ha sido desarrollado por el Centro de Hidrometeorología y sensoramiento Remoto de la Universidad de California Irvine. Los datos están disponibles para fechas posteriores a enero del 2003 hasta la actualidad. El producto cubre parte del globo terrestre, abarcando desde los 60°N hasta los 60°S.

Se tienen tres fuentes de datos y se quiere verificar la coherencia de los datos modelizados y satelitales contrastados con los datos observados. Es importante resaltar que a veces estos datos, no son totalmente confiables por que las estaciones meteorológicas convencionales, dependen de la pericia de los observadores. Por otro, lado muchas veces el personal que realiza los registros de datos, viven lejos de las estaciones, por lo que en un evento de lluvia severa, la demora de horas en la toma de datos, tendrá un efecto importante en la exactitud de las observaciones. Además, se tiene que los datos observados entre estaciones cercanas, a veces tienen valores muy diferentes, esto debido a la topografía variable hace que las condiciones atmosféricas, cambien rápidamente de un lugar a otro.

**Para el día 22 de noviembre del 2011:** En la Figura 29 (izquierda), se muestra los valores de precipitación acumulada mediante información satelital, y en la derecha se presentan los resultados de la simulación con el

modelo WRF correspondiente al día 22 de noviembre del 2011. En la Figura 30 (izquierda) se presentan los valores observados, registrados en las estaciones meteorológicas para ese mismo día.

En las figuras 29 y 30, se observa que los datos de satélite, aunque sobre estiman frecuentemente los valores observados, pueden determinar, ciertas regiones pequeñas, donde se está produciendo precipitación extrema. Esto concuerda con las observaciones realizadas en regiones con topografía muy variable, donde suelen ocurrir lluvias localizadas en pequeñas áreas, que por su configuración espacial tienden a atrapar la humedad. Por otro lado el modelo tiende a representar los eventos en áreas extensas, no pudiendo representar eventos puntuales. Asimismo, los valores obtenidos mediante modelización coinciden con los datos observados en algunas estaciones.

En la estación Cerro de Pasco, se presentaron valores entre 10 – 15 mm, 0 – 5 mm y 0 – 5 mm para los datos de satélite, WRF y observados respectivamente, en esta estación el modelo, representa mejor los valores de los datos observados. En la estación de La Quinua los valores son entre 40 – 50, y 0 – 5 mm 15 – 20 mm, para los datos satelitales, WRF y observado, respectivamente. Aquí se nota claramente los altos valores de los datos satelitales en comparación con los datos observados.

Para la estación de Salcabamba los valores de las tres fuentes de datos presentan precipitaciones de 0-5, 10-15 y 15-20 respectivamente. En la estación de Acobamba los valores de las tres fuentes son alrededor de 35 mm, 20 y 15 – 20 mm para los datos satelitales, WRF y observados respectivamente.

En el área entre las estaciones de Jauja, Ingenio y Santa Ana, se tienen valores entre 0 – 5, 10 – 40 y 0 – 15 mm donde los datos satelitales representan valores más cercanos a los datos observados.

Para este día en la parte central de la cuenca, cerca a la estación de Pilchaca, los datos observados presentan valores superiores a 35 mm de precipitación, que no es reflejado por los datos satelitales, pero los datos pronosticados con WRF se acercan a estos valores.

Para la estación de Salcabamba presenta valores de 0 – 5, 10 – 15 y 15 – 20 mm respectivamente. Aquí nuevamente los valores pronosticados con el modelo son similares a los datos observados. Para la estación de Acobamba los valores de las tres fuentes son diferentes, se tienen valores entre 50 – 60, 15 – 20 y 10 – 15 mm para los datos satelitales, WRF y observados respectivamente. De la misma forma hay zonas cercanas a la estación de Salcabamba, donde los datos satelitales registran valores de más de 100 mm de precipitación, pero no hay estaciones meteorológicas en estos lugares, para poder comprobar si esos valores son reales.

Una buena coincidencia se logra en las tres bases de datos en el área entre las estaciones de Jauja, Ingenio y

Santa Ana, donde las tres fuentes presentan valores entre 0 – 15 mm.

En general los datos observados en todas las estaciones presentan valores entre 0 – 30 mm de precipitación, mientras los datos satelitales presenta valores mayores a 70 mm en la zona sur de la cuenca. Los datos pronosticados con WRF presentan altos valores (superiores a 40 mm) en la zona sur oeste de la cuenca

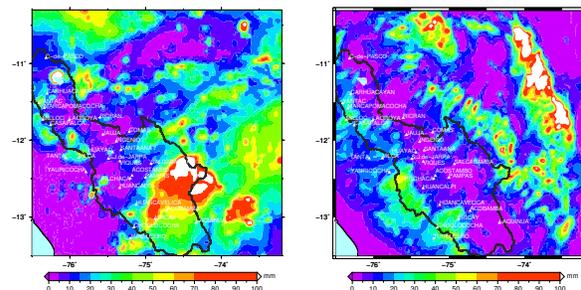


Figura 29: Datos satelitales y salidas del modelo WRF para el día 22 de noviembre del 2011.

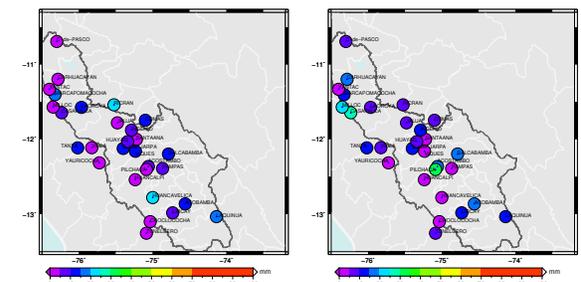


Figura 30: Datos observados en las estaciones los días 22 de noviembre y 9 de diciembre del 2011

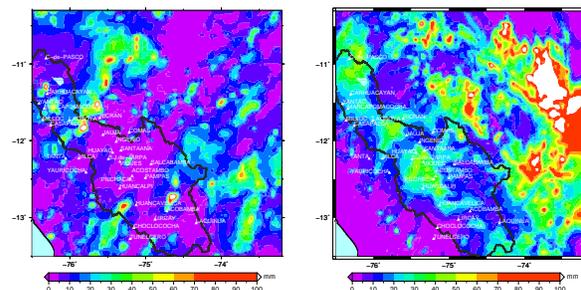


Figura 31: Datos satelitales y salidas del modelo WRF para el día 9 de diciembre del 2011.

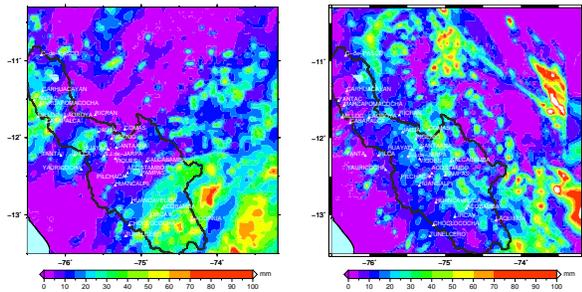
**Para el día 9 de diciembre del 2011:** En la Figura 31 (izquierda) se encuentran representados los datos satelitales y del modelo WRF, respectivamente. En la Figura 30 (derecha) se, presentan los valores registrados en las estaciones meteorológicas ubicado en la cuenca del Mantaro.

Para este día, en la estación Cerro de Pasco, se presentaron valores entre 5 – 10 mm, 40 – 45 mm y 5 – 10 mm para los datos de satélite, WRF y observados respectivamente. en esta estación el modelo pronostica altos valores de precipitación que no se reflejan en los datos observados. En la estación de La Quinua los valores son entre 0 – 5, 15 – 20 mm y 10 – 15 mm, para los datos satelitales, WRF y observados, respectivamente. En esta estación, los valores pronosticados se aproximan a los datos observados.

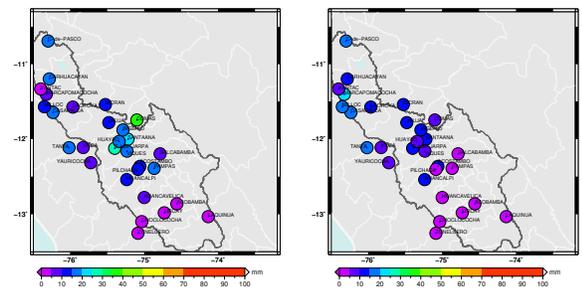
Para la estación de Salcabamba los valores de las tres fuentes de datos presentan precipitaciones de 0–5, 10–15 y 15 – 20 mm respectivamente. En la estación de Acobamba los valores de las tres fuentes son alrededor de 35 mm, 20 y 15 – 20 mm para los datos satelitales, WRF y observados respectivamente.

En el área entre las estaciones de Jauja, Ingenio y Santa Ana, se tienen valores entre 0 – 5, 10 – 40 y 0 – 15 mm donde los datos satelitales representan valores más cercanos a los datos observados.

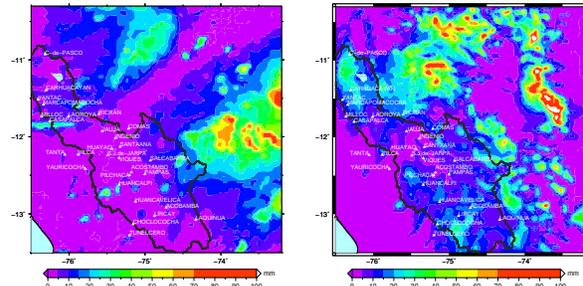
Para este día en la parte central de la cuenca, cerca a la estación de Pilchaca, los datos observados presentan valores superiores a 35 mm de precipitación, que no es reflejado por los datos satelitales, pero los datos pronosticados con WRF se acercan a estos valores.



**Figura 32:** Datos satelitales y salidas del modelo WRF para el día 10 de diciembre del 2011.



**Figura 33:** Datos observados en las estaciones en los días 10 y 25 de diciembre del 2011.



**Figura 34:** Datos satelitales y salidas del modelo WRF para el día 25 de diciembre del 2011.

### Discusión

Este estudio tuvo la finalidad de implementar el modelo meteorológico WRF para realizar pronósticos de precipitaciones extremas sobre el área que comprende la cuenca del Mantaro, para determinar si los resultados obtenidos mediante las simulaciones presentan un buen grado de realismo, comparada con datos registrados en las estaciones meteorológicas.

Estudios recientes demuestran que para poder mejorar los resultados del modelo, para que sus datos sean más confiables se tienen que emplear técnicas de asimilación de datos, implementación de estaciones confiables y también la asimilación de un espectro amplio de datos como datos satelitales, radar, estación GPS, cruceros oceanográficos, vuelos comerciales, etc. También se pueden mejorar los pronósticos numéricos mediante la aplicación de modelización por conjuntos (ensembles), pero para ello se requiere de una capacidad computacional que aún no existe en nuestro país. Como se ha discutido, los modelos numéricos son un instrumento de ayuda para realizar los pronósticos de las condiciones atmosféricas, para mitigar los desastres producidos por eventos meteorológicos extremos. Pero la eficacia de estos modelos es alta, cuando las condiciones de topografía no presentan mayor problema a la hora de efectuar los cálculos de pronóstico. Para regiones de topografía abrupta, como es el caso de la región de estudio, los modelos numéricos deben complementarse mediante la aplicación de técnicas de asimilación de datos.

Algunos aspectos importantes que pueden ser tratados en estudios posteriores son:

- Implementar plataformas de asimilación de datos observados (in situ), mediante información observada en superficie, para pequeñas áreas piloto y comprobar si en realidad los pronósticos mejoran.
- Explorar nuevas técnicas de pronósticos con modelos numéricos utilizando simulaciones mediante ensembles, con diferentes parametrizaciones y mediante la perturbación de las condiciones iniciales.

- Desarrollar estudios sobre el procesamiento de información satelital y su uso como insumo para que los modelos asimilen esos datos y mejoren su eficiencia.
- Explorar la ampliación de estudios a escalas temporales más largas (estacionales, interanuales, periodo El Niño).
- Extender los estudios a parámetros diferentes de la lluvia, para encontrar lugares que sean de utilidad para el desarrollo de tecnologías limpias (vientos).

## Conclusiones

Los estudios realizados sobre los eventos meteorológicos extremos, sin excepción, demuestran que los eventos meteorológicos extremos se han incrementado en la misma proporción que las variables meteorológicas están cambiando. Por lo tanto, el aumento de catástrofes debido a eventos meteorológicos extremos como precipitaciones, sequías, olas de calor y frío, etc.

Es por ello, que se hace vital el desarrollo de técnicas que ayuden en el pronóstico de dichos eventos extremos, para que se pueda mitigar los efectos de esto fenómenos. Es aquí, donde los modelos nos brindan un soporte importante, ya que con ellos se pueden calcular como será la evolución de las variables atmosféricas en un futuro cercano, lo cual permitirá diseñar sistemas de alerta ante la ocurrencia de eventos adversos.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la realización presente trabajo, se pueden enumerar las siguientes conclusiones:

1. Se realizaron simulaciones para 180 casos de eventos extremos, de donde se seleccionaron 103 casos, con los cuales se efectuaron las evaluaciones de la calidad del modelo. La simulación para cada caso (fecha), demoró aproximadamente 7 horas de uso de máquina, para un horizonte de tiempo de 72 horas.
2. Según los resultados de los análisis empleados, se observa que el comportamiento de los eventos extremos es muy variable entre estaciones cercanas, debido a la topografía irregular de la zona y a la altitud de las mismas. Los modelos numéricos funcionan eficientemente en regiones de topografía suave. En lugares de topografía abrupta, los resultados de los modelos tienen algunas limitaciones y deben interpretarse con mucho cuidado. Es por ello que se verificó que cuando ocurren eventos extremos, hay algunas estaciones que son muy afectadas por el exceso de precipitación, mientras otras estaciones, que pueden estar cercanas no reciben cantidades importantes de precipitación.
3. Se cumplieron los objetivos trazados al inicio del este estudio los cuales fueron de efectuar pronósticos de eventos de precipitación extrema, utilizando el modelo *WRF*, y evaluar su eficacia, utilizando información observada in-situ, mediante la red de estaciones meteorológicas del *SENAMHI* e información satelital. También se estudiaron los resultados obtenidos mediante las simulaciones con el modelo *WRF* para el área de estudio se analizó el comportamiento de la precipitación simulada, para diferentes regiones del área de estudio.
4. Los diagramas de barras elaborados para las fechas de eventos procesados, nos indican que para el periodo 2000 - 2007, las simulaciones generalmente no simulan los datos de lluvia registrados en las estaciones meteorológicas. Además se encontró, que para el periodo 2008-2012, el número de aciertos de modelo aumentó, detectando la mayoría de eventos extremos, sobreestimando en algunos casos y subestimando los valores en otros casos.
5. Los valores de estimadores estadísticos, muestran que el modelo tiende a subestimar los datos de lluvia. Si se calculan los estadísticos para el periodo 2008 - 2012, la eficiencia del modelo mejora significativamente.
6. El análisis de los datos satelitales de precipitación acumulada, calculados mediante técnica de redes neuronales artificiales demuestran que éstos, siempre sobre estiman los valores de precipitación, pero tienen la capacidad de determinar las zonas específicas donde puede estar ocurriendo un evento de lluvia extrema.
7. El análisis de los datos satelitales de precipitación, datos modelizados con *WRF* y datos observados demuestran que los datos simulados, tienen problemas en determinar pequeñas áreas donde se producen eventos extremos, y realiza el pronóstico mostrando áreas grandes donde ocurre abundante lluvia, teniendo limitaciones en representar la variabilidad espacial de los datos. Por su parte datos satelitales si pueden representar la variabilidad espacial de estos eventos.
8. Los datos obtenidos mediante simulaciones numéricas son importantes y útiles, ya que nos brindan información acerca de los eventos que pueden suceder en las regiones estudiadas. Las simulaciones brindan información continua de los procesos atmosféricos aún en lugares donde no se cuenta con instrumentación para el registro de datos, sin importar si los lugares son inaccesibles.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la UNMSM y al Instituto Geofísico del Perú, por dar todas las facilidades para el uso del “HPC-Linux- Cluster, del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos Computaciona-

les del Instituto Geofísico del Perú (Subvenciones 101-2014-FONDECYT, SPIRALES2012 IRD-IGP, Manglares IGP-IDRC, PPR068)”. Además agradecemos el apoyo brindado por la Dra Yamina Silva, en el desarrollo del presente trabajo.

## Referencias

- [1] J. Guizado y C. Landa. Geología del cuadrángulo de Pampas (Hoja 25 - n). Comisión Carta Geológica nacional, Boletín No **12**, (1964)
- [2] Y. Silva K. Takahashi y R Chavez. Dry and wet rainy seasons in the Mantaro river basin (Central Peruvian Andes). *Adv. Geosci.*, **14**, 261-264 (2008).
- [3] V. Durocq, D. Ricard, J. Lafore, and F. Orain. Storm - Scale Numerical Rainfall Prediction for five Precipitating Event over France: On the Importance of the Initial Humidity Field. *Wea. Forecasting*, **17**, 1236-1256 (2002)
- [4] W. Skamarock, J. Klemp, J. Dudhia, D. Gill, D. Barker, M. Duda, X. Huang, W. Wang, J. Powers. A description of the advanced research WRF version 3. NCAR technical note, NCAR/TN-468+STR. National Center for Atmospheric Research (NCAR), mesoscale and microscale meteorology division, Boulder, Colorado, USA (2008). Doi: <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>.
- [5] A. Moya-Alvarez, Daniel Martínez-Castro, José Flores and Yamina Silva. Sensitivity Study on the Influence of Parametrization Schemes in WRF- ARW Modelo Short - and Medium-Range Precipitation Forecast in the Central Andes of Peru. *Advances in Meteorology*, vol **2018**, Article ID 1381092. 16 p (2018).
- [6] D. Martínez-Castro, K. Shailendra, J. Flores Rojas, A. Moya-Álvarez, J. Valdivia-Prado, E. Villalobos-Puma, C. Del Castillo-Velarde and Y. Silva-Vidal. The Impact of Microphysics Parameterization in the Simulation of Two Convective Rainfall Events over the Central Andes of Peru Using WRF-ARW. *Atmosphere*, **10**442, pp 1-29.
- [7] A. Moya-Alvarez, J. Gálvez, A. Holguín, R. Estevan, S. Kumar, E. Villalobos, D. Martínez-Castro and Y. Silva. Extreme Rainfall Forecast with WRF-ARW Model in the Central Andes of Perú. *Atmosphere*, **99**, 362.
- [8] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Estimación de umbrales de Precipitaciones Extremas Para la Emisión de Avisos Meteorológicos, Nota Técnica 001, SENAMHI - DGM - 2014, Lima, Perú, (2014).
- [9] Instituto Geofísico del Perú. Atlas Climatológico de precipitaciones y temperaturas en la Cuenca del Mantaro, Fondo Editorial CONAM, Lima, Perú, (2005).
- [10] Instituto Geofísico del Perú. Diagnóstico de la cuenca del Mantaro bajo la visión del Cambio Climático, Fondo Editorial CONAM, Lima Perú (2005).
- [11] Instituto Geofísico del Perú. Vulnerabilidad y adaptación al Cambio Climático en la cuenca del río Mantaro , Fondo Editorial CONAM, Lima Perú (2005).
- [12] M. Saavedra. Sensibilidad de la circulación oceánica a escalas intra-estacional y estacionales frente a la costa del Perú debido al forzamiento atmosférico en un modelo regional a alta resolución, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Tesis para optar el Título de Licenciado en Física, 153 pp (2010).
- [13] G. Grell, J. Dudhia, and D. Stauffer. A description of the fifth generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR, 117 pp, (1994).
- [14] G. Haltiner y Frank Martin, R. T. Meteorología Dinámica y Física. McGraw-Hill Book Company S.A., nueva York John Wiley and Sons, Inc. 2nd edition, 450 pp, (1957).
- [15] J. Holton. An Introduction to Dynamic Meteorology. Elsevier, Academic Press, Fourth Edition, 535 pp, (2004).