



# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO DE PUNO

## FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

### ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



## GENERACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS A PARTIR DE PRECIPITACIÓN GRILLADA A ESCALA ESPACIAL DE ALTA RESOLUCIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO ILAVE

TESIS

PRESENTADA POR:

**Bach. CHRISTIAN MARIO QUIÑONEZ TICONA**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO AGRÍCOLA**

**PUNO - PERÚ**

**2022**



## DEDICATORIA

*Para mis queridos padres Mario Quiñonez Acero y María Lupe Ticona Zapana, a mis hermanos Roxana Q., Vanessa Q., Paty Q., y Gustavo Q. Por su comprensión, soporte en mis tribulaciones por creer en mí y la paciencia que me tienen por ver mis objetivos cumplidos.*

*A mi prima Analí Flores y primo Wilson Chuctaya, y de más familiares que con mucha ilusión esperan verme realizado, por sus palabras motivacionales y el soporte familiar que me dieron cuando pase por situaciones difíciles agradecerles de desde lo más profundo de mis sentimientos y mi corazón decirles muchas gracias.*

*En honor a la memoria de mi abuelo Carlos Ticona Yucra y abuela Bonifacia Zapana Apaza, quienes llevo en mi corazón y siento un sentimiento muy especial hacia ellos por ser educar y orientar siempre a la educación.*

**CHRISTIAN MARIO, QUIÑONEZ TICONA**



## AGRADECIMIENTOS

Al gran Dios por el regalo de vida y esta segunda oportunidad, por sostenerme darme fuerzas y sostenerme en los momentos difíciles que he vivido, iluminando mi camino con conocimiento y llaves de tesoros de conocimiento.

Al licenciado Carlos Enrique Ruiz Vásquez y al M. Sc. Wilber Fermín Laqui Vilca, por sus apoyos y orientaciones hacia este trabajo. por comprender la importancia de esta investigación y aceptar el reto de poder ejecutarlo y terminarlo.

Un agradecimiento especial para los docentes de la Universidad Nacional del Altiplano y en especial a los docentes de mi Facultad de Ingeniería Agrícola, por sus experiencias y orientaciones cuando fui alumno y ahora egresado, siempre aconsejando y recomendando como deberíamos desempeñándonos en la vida profesional y la vida en general, agradezco el compartir de sus conocimientos y ser educado en esta prestigiosa universidad.

Y también a todas las personas que esperaron mucho de mi con sus palabras de motivación, confianza y soporte contribuyendo con sus aportes para la culminación de este trabajo de investigación.

**CHRISTIAN MARIO, QUIÑONEZ TICONA**



# ÍNDICE GENERAL

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTOS**

**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**ÍNDICE DE ACRÓNIMOS**

**RESUMEN ..... 16**

**ABSTRACT..... 17**

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

**1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ..... 20**

**1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA ..... 21**

**1.3 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN ..... 22**

1.3.1 Hipótesis general..... 22

1.3.2 Hipótesis específicas..... 22

**1.4 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO..... 22**

**1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN..... 23**

1.5.1 Objetivo general..... 23

1.5.2 Objetivos específicos ..... 23



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

<b>2.1 ANTECEDENTES.....</b>	<b>24</b>
<b>2.2 DATOS DE ANÁLISIS .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3 SISTEMA DE MODELAMIENTO .....</b>	<b>27</b>
2.3.1 Ecuaciones gobernantes .....	28
<b>2.4 CONDICIONES INICIALES.....</b>	<b>30</b>
<b>2.5 SISTEMA GLOBAL DE PREDICCIÓN (GFS).....</b>	<b>30</b>
<b>2.6 MODELO DE PRONÓSTICO E INVESTIGACIÓN METEREOLÓGICA... 31</b>	
2.6.1 Descripción del modelo mesoesalar WRF .....	31
2.6.2 Componentes del programa del sistema de modelado WRF .....	32
<b>2.7 HEC-HMS .....</b>	<b>35</b>
2.7.1 Modelo de cuenca .....	36
2.7.2 Modelo meteorológico.....	38
2.7.3 Especificaciones de control .....	38
2.7.4 Resultados de caudales máximos.....	38
<b>2.8 ANALISIS DE MAXIMAS AVENIDAS .....</b>	<b>39</b>
<b>2.9 COMPROBACIÓN MODELOS DE PREDICTIBILIDAD NUMÉRICA .....</b>	<b>40</b>
2.9.1 Medidas de precisión .....	40
<b>2.10 MEDIDAS DE BONDAD DE AJUSTE.....</b>	<b>43</b>
2.10.1 Criterio de Schultz (D).....	43



2.10.2 Desviación Media Acumulada (MAD).....	44
2.10.3 Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) .....	44
2.10.4 Raíz del error Cuadrático Medio (RSME).....	45
<b>2.11 REGRESIÓN LINEAL SIMPLE.....</b>	<b>45</b>

### CAPÍTULO III

#### MATERIALES Y MÉTODOS

<b>3.1 ZONA DE ESTUDIO .....</b>	<b>47</b>
3.1.1 Localización del proyecto .....	47
3.1.2 Vías de acceso.....	48
3.1.3 Características geomorfológicas de la cuenca .....	48
<b>3.2 MATERIALES.....</b>	<b>49</b>
3.2.1 Equipos y software.....	49
3.2.2 Datos meteorológicos .....	50
3.2.3 Datos hidrológicos .....	51
<b>3.3 METODOLOGÍA .....</b>	<b>52</b>
3.3.1 Extracción de datos de GFS (global forecasting system) en forma de grillas las precipitaciones esperadas para la cuenca Ilave.....	52
3.3.2 Obtención de las precipitaciones máximas con el modelo meteorológico WRF (weatherresearch and forecasting) para toda la cuenca Ilave. ....	53
3.3.2.1 Validación del pronóstico de precipitaciones máximas.....	56
3.3.3 Generación caudales máximos.....	66



3.3.3.1 Datos de precipitación .....	66
3.3.3.2 Diseño de hietogramas.....	67
3.3.3.3 Modelamiento hidrológico en HEC-HMS .....	68
3.3.3.4 Calibración modelamiento hidrológico .....	77

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>4.1 EXTRACCIÓN DE DATA DEL MODELO GLOBAL METEOROLÓGICO (GFS).....</b>	<b>83</b>
<b>4.2 OBTENCIÓN DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS CON EL MODELO METEOROLÓGICO WRF.....</b>	<b>86</b>
4.2.1 Validación del pronóstico de precipitaciones máximas.....	88
<b>4.3 GENERACIÓN DE LOS CAUDALES.....</b>	<b>89</b>
4.3.1 Generación de caudales a partir de las salidas de WRF .....	89
4.3.1.1 Tiempo de concentración y retardo .....	93
4.3.1.2 Calibración del modelamiento hidrológico.....	97
4.3.1.3 Resultados del modelamiento hidrológico.....	98
4.3.2 Generación de caudales a partir de la información existente.....	100
4.3.2.1 Tiempo de concentración y retardo .....	105
4.3.2.2 Calibración del modelamiento hidrológico.....	105
4.3.2.3 Resultados del modelamiento hidrológico.....	106
4.3.3 Validación del pronóstico de caudales máximos .....	111



<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>115</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>117</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>119</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>125</b>
<b>Anexo 1.</b> Configurado seleccionado para el preprocesamiento (WPS).....	125
<b>Anexo 2.</b> Configurado seleccionado para el procesamiento (WRF-ARW).....	126
<b>Anexo 3.</b> Scripts utilizados de extracción para el modelado WRF .....	128
<b>Anexo 4.</b> Resultados de los modelamientos hidrológicos .....	129
<b>Anexo 4.1.</b> Generación de caudales a partir de las salidas del WRF. ....	129
<b>Anexo 4.2.</b> Generación de caudales a partir de la información existente. ....	131
<b>Anexo 5.</b> Reporte de (INDECI) instituto nacional de defensa civil para la fecha 17/02/2012 desborde del río zapatilla e ilave distrito de Pilcuyo. ....	133
<b>Anexo 6.</b> Figuras de la completación de datos faltantes por el método de regresión lineal en las estaciones meteorológicas Ilave, Laraqueri, Mazo Cruz, Capazo, Juli y Vilacota. ....	135
<b>Anexo 7.</b> Solicitud de información hidrometereológica de precipitación de las estaciones Juli, Laraqueri, Mazo Cruz, Capazo, Vilacota para el 17/02/2012 y caudales en la estación hidrométrica Ilave. ....	137
<b>Anexo 8.</b> Mapa de precipitaciones grilladas modeladas en WRF. ....	138
<b>Anexo 8.1.</b> Mapa de precipitaciones grillada das de 27 kilómetros 07:00 am a 13:00 pm. ....	138





**Anexo 8.2.** Mapa de precipitaciones grilladas de 9 kilómetros 07:00 am a 13:00 pm.

..... 141

**Área** : Ingeniería y tecnología

**Línea** : Recursos Hídricos

**FECHA DE SUSTENTACIÓN, 11 de febrero del 2022**



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Vías de comunicación a la zona de estudio. ....	48
<b>Tabla 2.</b> Estaciones meteorológicas seleccionadas. ....	51
<b>Tabla 3.</b> Precipitaciones medidas (mm) a las 07 y 19 horas en las estaciones meteorológicas seleccionadas para el 17/02/2012 .....	51
<b>Tabla 4.</b> Estación hidrológica seleccionada para la validación.....	51
<b>Tabla 5.</b> Información hidrométrica ( $m^3/s$ ) para el 17/02/2012 para 06 horas.....	52
<b>Tabla 6.</b> Condición de inicio y de límites. ....	56
<b>Tabla 7.</b> Datos de entrada al modelo.....	56
<b>Tabla 8.</b> Generalidades seleccionadas para el modelo.....	59
<b>Tabla 9.</b> Parametrización física del modelo .....	60
<b>Tabla 10.</b> Secuencia de ejecuciones para el modelo. ....	61
<b>Tabla 11.</b> Características del ordenador donde se ejecutará el modelo. ....	62
<b>Tabla 12.</b> Total, de horas resultantes de los pronósticos.....	63
<b>Tabla 13.</b> Parámetros geomorfológicos para las 09 subcuencas.....	69
<b>Tabla 14.</b> Determinación del tiempo de concentración de las 09 subcuencas. ....	74
<b>Tabla 15.</b> Determinación del tiempo de retardo de las subcuencas. ....	74
<b>Tabla 16.</b> Caudales ingresados para calibrar el modelo.....	77
<b>Tabla 17.</b> Resultados de los parámetros optimizados en la calibración.....	79
<b>Tabla 18.</b> Resultados de los parámetros optimizados en la calibración.....	80
<b>Tabla 19.</b> Características data de entrada al modelo.....	84



<b>Tabla 20.</b> Data de entrada al modelo WRF.....	85
<b>Tabla 21.</b> Precipitaciones máximas promedio resultante.....	86
<b>Tabla 22.</b> Completación de precipitación por el método de regresión lineal para las 06 estaciones en estudio para el 17/02/2012 por cada hora. ....	78
<b>Tabla 23.</b> Cuadro resumen de la evaluación estadística medidas de precisión para las estaciones en estudio.....	83
<b>Tabla 24.</b> Características geomorfológicas .....	91
<b>Tabla 25.</b> Tiempo de concentración subcuencas ilave (WRF) .....	94
<b>Tabla 26.</b> Tiempo de retardo subcuencas (WRF) .....	96
<b>Tabla 27.</b> Resumen de caudal máximo para el 17 de febrero del 2012 resultante salidas del WRF.....	100
<b>Tabla 28.</b> Resumen de caudal máximo para el 17 de febrero del 2012 en base a la información existente.....	108
<b>Tabla 29.</b> Resumen de caudales simulados y observados para el 17 de febrero del 2012 .....	108
<b>Tabla 30.</b> Cuadro resumen medidas de bondad de ajuste para el caudal simulado salidas WRF y caudal simulado estaciones pluviométricas. ....	112



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Atmósfera separada por celdas tridimensionales. ....	28
<b>Figura 2.</b> Diagrama de flujo del sistema de modelado WRF versión 4.....	33
<b>Figura 3.</b> Representación de datos de los programas del WPS.....	34
<b>Figura 4.</b> Elementos hidrológicos. ....	37
<b>Figura 5.</b> Ubicación de la zona de estudio. (a) geográfica, (b)hidrográfica. ....	48
<b>Figura 6.</b> Ubicación zona de estudio, (a) política, (b)límites hidrográficos. ....	49
<b>Figura 7.</b> Ubicación de estaciones meteorológicas de estudio en la cuenca ilave. ....	50
<b>Figura 8.</b> Procedimiento de la metodología. ....	54
<b>Figura 9.</b> Delimitación de dominios, un dominio padre y dos anidamientos de 27, 9 y 3 km. ....	58
<b>Figura 10.</b> Diagrama de flujo del sistema de modelado WRF versión 4.....	61
<b>Figura 11.</b> Hietograma de diseño para 6 horas, precipitación promedio WRF de los seis puntos de estudio. ....	68
<b>Figura 12.</b> Hietograma de diseño para 6 horas, precipitación estaciones meteorológicas promedio de los seis puntos de estudios completadas por regresión lineal. .	68
<b>Figura 13.</b> Elementos hidrológicos interconectados – cuenca Ilave.....	72
<b>Figura 14.</b> Hietograma de diseño para 6 horas, caudales máximos observados.....	78
<b>Figura 15.</b> Proceso de calibración.....	79
<b>Figura 16.</b> Proceso de calibración.....	83
<b>Figura 17.</b> Hietograma de diseño para 6 horas, precipitación promedio WRF. ....	87



<b>Figura 18.</b> Grafica de 6 horas, precipitación promedio WRF.....	87
<b>Figura 19.</b> Variaciones bias promedio en cada punto de validación. ....	84
<b>Figura 20.</b> Variaciones mae promedio en cada punto de validación. ....	85
<b>Figura 21.</b> Variaciones rmse promedio en cada punto de validación. ....	86
<b>Figura 22.</b> Variación del bias, mae y rmse promedio para cada punto de validación. ..	88
<b>Figura 23.</b> Esquema de los elementos hidrológicos conectados – modelo de cuenca Ilave. ....	90
<b>Figura 24.</b> Hietograma de diseño para 6 horas, precipitación promedio (WRF). para toda la cuenca Ilave.....	93
<b>Figura 25.</b> Calibración del hec-hms para 24 horas salida final de la cuenca Ilave (WRF). ....	98
<b>Figura 26.</b> Hidrograma resultante de salida para 24 horas para el 17 de febrero del 2012 (WRF). ....	99
<b>Figura 27.</b> Esquema de los elementos hidrológicos conectados – modelo de cuenca.	101
<b>Figura 28.</b> Hietograma de diseño en 6 horas, estación Laraqueri.....	102
<b>Figura 29.</b> Hietograma de diseño en 6 horas, estación Mazo Cruz .....	102
<b>Figura 30.</b> Hietograma de diseño en 6 horas, estación Capazo .....	103
<b>Figura 31.</b> Hietograma de diseño en 6 horas, estación Juli .....	103
<b>Figura 32.</b> Hietograma de diseño en 6 horas, estación Ilave .....	104
<b>Figura 33.</b> Hietograma de diseño para 6 horas, estación Vilacota.....	104
<b>Figura 34.</b> Calibración del HEC-HMS para 24 horas en base a la información existente. .....	106



**Figura 35.** Hidrograma resultante de salida para 24 horas. .... 107



## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

**WRF** : Weather Research and Forecasting.

**GFS** : Global Forecasting System.

**HEC-HMS** : The Hydrologic Modeling System.

**RSME** : Raíz del Error Medio Cuadrático.

**MAE** : Error Medio Absoluto.

**BIAS** : Desviación Estándar Observado.

**D** : Criterio de Schultz.

**MAD** : Desviación Acumulada Media.

**E** : Eficiencia de Nash-Sutcliffe.

**INDECI** : Instituto Nacional de Defensa Civil.



## RESUMEN

En el análisis de máximas avenidas, la información hidro-meteorológica es escasa, pero, existen metodologías para obtenerlas, sin embargo, muchas de ellas presentan deficiencias en la modelación, visualización y precisión, convirtiéndolos en información de menor confiabilidad en sus predicciones y con baja resolución espacial, de ese modo se tiene como objetivo generar caudales máximos a partir de precipitación grillada con escala espacial de alta resolución para la cuenca Ilave. Para lo cual, primeramente, se extrajo del *Sistema de Pronóstico Global* (GFS), los datos de entrada para el preprocesamiento en el *Modelo de Pronóstico e investigación Meteorológica* (WRF) generando precipitaciones máximas horarias, se validó los resultados con parámetros estadísticos de desempeño como raíz del error cuadrático medio (RSME), el error absoluto medio (MAE) y el sesgo (BIAS) en seis puntos de validación, siendo altamente significativos. A partir de las precipitaciones máximas pronosticadas por el modelo “WRF”, se procedió a la obtención de los caudales máximos pronosticados implementando en el software hidrológico “HEC-HMS”, se validó los resultados con: el criterio de Schultz (D), desviación media acumulada (MAD), eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) y raíz del error cuadrático medio (RSME) donde el criterio de Schultz (D) y la eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) se considera muy buena el MAE y RMSE muestran valores altamente significativos, Como resultado de la modelación hidrológica se generó los caudales máximos obteniéndose  $558.3 \text{ m}^3/\text{s}$  a partir de las salidas de precipitaciones máximas del modelamiento en WRF, el cual fue calibrado y validado resultando muy buena, y además tener la utilidad en la gestión de riesgos de inundaciones.

**Palabras clave:** Caudales máximos, grillas, inundación, precipitación, WRF.





## ABSTRACT

In the analysis of maximum floods, hydro-meteorological information is scarce, but, there are methodologies to obtain it, however, many of them have deficiencies in modeling, visualization and precision, turning them into less reliable information in their predictions and with low spatial resolutions, in this way the objective is to generate maximum flows from gridded precipitation with a high resolution spatial scale in the Ilave river basin. For which, firstly, the input data was extracted from the *Global Forecast System* (GFS), for preprocessing in the *Weather Research and Forecasting* (WRF) generating maximum hourly rainfall, the results were validated with statistical performance parameters such as root mean square (RSME), mean absolute error (MAE) and bias (BIAS) at six validation points, being highly significant. From the maximum rainfall predicted by the "WRF" model, the maximum predicted flows were obtained by implementing the hydrological software "HEC HMS", the results were validated with: The Schultz criterion (D), mean deviation (MAD), Nash-Sutcliffe efficiency (E) and root mean square (RSME) where the Schultz criterion (D) and the Nash-Sutcliffe efficiency (E) are considered very good, the MAE and RMSE show values highly significant. As a result of the hydrological modeling, the maximum flows were observed, obtaining 558.3 m<sup>3</sup>/s was obtained from the maximum rainfall outputs of the WRF, which was calibrated and validated, being very good, and also having the utility in flood risk management.

**Keywords:** flood, grids, Maximum flows, precipitation, WRF.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

Las inundaciones debido a los ríos, estuarios, acción del mar o fuertes lluvias vienen a ser riesgo para los habitantes y generan gastos económicos. En la última década del siglo XX, las inundaciones provocaron el fallecimiento de 100.000 personas aproximadamente y de manera general un estimado de 1.4 millones de habitantes a nivel mundial, por otra parte, todo indica que el número de eventos (y fallecidos) es creciente. (Jonkman, 2005).

Estas inundaciones son producidas debido a la ocurrencia de las precipitaciones pluviales extraordinarias. Perú presenta precipitaciones intensas debido a la presencia del fenómeno natural de El Niño (FEN) y a la tendencia del cambio climático global cambiante siendo altamente vulnerable, considerando como una de las razones de alteración del ciclo natural normal por la presencia de precipitaciones siendo un motivo de estudio hidrometeorológico de nuestro medio natural (Cambio Climático y Migraciones en el Perú. 2009). Por tal razón, se han desarrollado diversos modelos matemáticos y esfuerzos por pronosticar el comportamiento de la atmósfera a una precisión determinada con innovaciones constantes de investigaciones científicas. La utilización de modelos de predictibilidad numérica requiere hacer estudios previos, uno de ellos, es la validación del modelo de pronóstico con el fin de definir si la modelación es significativa para el área de estudio.

El Modelo de Pronóstico e investigación Meteorológica (WRF) es una herramienta muy poderosa y versátil, siendo uno de los más usados mundialmente por ser un modelo numérico de predicción de tiempo e investigación, el cual ha sido empleado en la generación del pronóstico de las precipitaciones en diferentes regiones (Barraza et



al. 2017). Además, y puede ser acoplado en el modelamiento hidrológico para la generación de caudales máximos usando el software HEC-HMS, de esta manera este modelo puede ser empleado en cuencas con escasa o limitada información hidrometeorológica.

El modelado con WRF constituye un sistema de modelado atmosférico de última generación, es una tecnología más sofisticada a nivel mundial, es gratuito y trabaja en el sistema operativo Linux para simular eventos futuros y pasados. Sobresale en una extensa gama de aplicaciones a diferentes escalas siendo desde metros a decenas de kilómetros; ofrece realizar estudios meteorológicos, pronóstico en tiempo real, simulaciones idealizadas-asimilación de datos, acoplamiento de modelo del sistema terrestre, capacitación de modelos y apoyo educativo (Barraza et al. 2017).

La presente investigación denominada “Generación de caudales máximos a partir de precipitación grillada a escala espacial de alta resolución en la cuenca del río Ilave” se hizo con la finalidad de generar caudales máximos a partir de datos de precipitación grillada con escala espacial de alta resolución en la cuenca del río Ilave. Los resultados contribuirán en el establecimiento de una metodología para el análisis de máximas avenidas en regiones con escasa o limitada información hidrometeorológica que se pueda utilizar en la gestión de riesgos de inundaciones.

El presente trabajo está organizado en ocho capítulos; el capítulo I está referido a la introducción donde además se incluyen el planteamiento del problema, las hipótesis, la justificación y los objetivos de la investigación. El capítulo II corresponde a la revisión de literatura. Los materiales y métodos de la investigación se describen en el capítulo III, mientras que los resultados y discusiones se presentan en el capítulo IV. En los capítulos V y VI se consolidan las conclusiones y recomendaciones. Finalmente, las referencias



bibliográficas se muestran en el capítulo VII. Además, se ha incluido anexos donde se incluye la información complementaria de la investigación.

## **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La ocurrencia de precipitaciones pluviales extremas que generan máximas avenidas y consecuentemente inundaciones tienen una alta recurrencia en la región Puno. En la cuenca Ilave para el periodo del 2003 al 2019 se reportaron 494 emergencias por lluvias intensas y 503 emergencias por inundaciones, generando 58,275 personas afectadas (INDECI, 2020). Por tanto, surge la necesidad de conocer con anticipación la respuesta hidrológica de las cuencas ante eventos de precipitación extraordinaria.

En las cuencas altoandinas de la región Puno es limitada o escasa la información hidrometeorológica, principalmente, la hidrológica, es así que en toda la cuenca del lago Titicaca únicamente existen 12 estaciones hidrológicas que funcionan con regularidad. Desde una perspectiva hidrológica, cuando no se cuenta con estaciones hidrológicas se usan distintas metodologías para generarlos, y la selección del método está en función de distintos factores.

Los modelos hasta ahora desarrollados, tienen la finalidad de simular estos eventos extremos, cuentan con la capacidad de compilar extensos datos, pero tienen deficiencia en la claridad y precisión en los datos visualizados y modelados, estas limitaciones convierten a los modelos de previsión incompletos y con menor confiabilidad en sus predicciones y a una escala de resolución espacial deficiente. Para el estudio de las inundaciones se necesita estudiar las precipitaciones máximas con la finalidad de hallar los máximos caudales por medio de un modelamiento. Por consiguiente, es necesario pronosticar caudales máximos a partir de precipitaciones



grilladas a una escala espacial con alta resolución, que pueda ser aplicado y usado en los estudios ingenieriles y en la gestión de riesgo de desastres.

## 1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La limitada o escasa información hidrometeorológica en la cuenca Ilave dificulta el análisis y estimación de las máximas avenidas, por lo que, no se conoce con precisión la respuesta hidrológica de la cuenca Ilave a eventos de precipitación extraordinaria. Asimismo, para la cuenca del río Ilave existe poca evidencia científica del uso de precipitación grillada de alta resolución para la modelización de máximas avenidas, lo que constituye un vacío de conocimiento, además, surgen las siguientes interrogantes:

Pregunta general:

¿En la cuenca del río Ilave, si es posible generar caudales máximos a partir de precipitación grillada a escala de alta resolución?

Preguntas específicas:

¿Cuán representativos son los datos de precipitación grillada extraídos del modelo numérico de predicción meteorológica Sistema de Pronóstico Global (GFS) en la cuenca Ilave?

¿Los datos de precipitación grillada de alta resolución obtenidos a partir del uso del modelo meteorológico Modelo de Pronóstico e investigación Meteorológica (WRF) caracterizarán el comportamiento de las precipitaciones máximas en la cuenca Ilave?

¿Cuál es el grado de desempeño de la modelización hidrológica de caudales máximos realizada partiendo de datos de precipitación grillada de resolución alta en relación a los caudales observados en el río Ilave?



## **1.3 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.3.1 Hipótesis general**

- El uso de precipitación grillada de alta resolución proporciona un pronóstico de caudales máximos de alta confiabilidad en la cuenca Ilave.

### **1.3.2 Hipótesis específicas**

- Los datos de precipitación grillada extraídas del modelo numérico de predicción meteorológica Sistema de Pronóstico Global (GFS) son representativos para la cuenca Ilave.
- La precipitación máxima grillada de alta resolución obtenida del modelo de Pronóstico e investigación Meteorológica (WRF) caracterizan el comportamiento de las precipitaciones máximas para la cuenca Ilave.
- Los caudales máximos obtenidos a partir de la modelización hidrológica y datos de precipitación máxima de alta resolución presentan un alto nivel de desempeño al compararse con datos observados del río Ilave.

## **1.4 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO**

Se identificó como vacío de conocimiento en el planteamiento del problema, el desconocimiento de la respuesta hidrológica para la cuenca Ilave a eventos de precipitación extraordinaria y la existencia de poca evidencia científica del uso de precipitación grillada de alta resolución para la modelización de máximas avenidas. En razón a ello, surge la necesidad de desarrollar modelos de previsión y pronóstico de máximas avenidas que permitan gestionar el riesgo de inundaciones de manera anticipada. Por tanto, se propone el uso del Sistema de Pronóstico Global (GFS) y el Modelo de Predicción e investigación Meteorológica (WRF) para la obtención de precipitaciones máximas grilladas a



una escala espacial de alta resolución, los que constituirán los datos de entrada para generar caudales máximos en la plataforma HEC-HMS, los resultados permitirán cubrir los vacíos de conocimiento antes señalados y serán de utilidad en la gestión de riesgo de inundaciones en la cuenca Ilave.

Para esta investigación se decidió analizar el día 17 de febrero del 2012, debido a que en esta fecha se presentó una emergencia de desborde del río Zapatilla e Ilave margen derecho en el distrito de Pilcuyo que se encuentra en la cuenca Ilave, según lo reportado del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) ver anexo 5.

## **1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.5.1 Objetivo general**

Generar caudales máximos a partir de precipitación grillada con escala espacial de alta resolución en la cuenca Ilave.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Extraer del modelo numérico de predicción meteorológica Sistema de Pronóstico Global (GFS) las precipitaciones esperadas grilladas para la cuenca del río Ilave.
- Obtener las precipitaciones máximas grilladas de alta resolución con el Modelo de Pronóstico e Investigación Meteorológica (WRF) para la cuenca del río Ilave.
- Determinar el nivel de desempeño de la modelización hidrológica de máximas avenidas con HEC-HMS utilizando como datos de entrada la precipitación grillada de alta resolución en la cuenca Ilave.



## CAPÍTULO II

### REVISION DE LITERATURA

#### 2.1 ANTECEDENTES

Existen varios estudios realizados teniendo como objetivo observar el comportamiento de las variables hidrológicas y ver la relación que presentan con las características climatológicas locales en la zona de estudio, para la mayoría de los casos se usan modelos hidrológicos permitiendo ver el flujo de las aguas superficiales, entre ellos tenemos:

Enríquez et al. (2018) presentó un estudio mostrando los riesgos que enfrenta una determinada población, si se diera el caso de lluvias intensas produciendo inundaciones, analizando los riesgos de inundaciones por desborde del río Ilave en los barrios en el distrito de Ilave, por medio del estudio de riesgos o zonas inundables del río Ilave, utilizando el software Arc Map, Microsoft Excel y el Manual del Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres.

Escarcena (2014) determinó las zonas de riesgo mediante las simulaciones de inundación en el río en la Microcuenca de la provincia del Collao-Ilave, por medio de estudios topográficos, y la aplicación del software HEC-RAS, mostrando como resultado las áreas transversales del río y sus áreas inundables.

Moya et al. (2014) aplicó el modelo meteorológico WRF y verificó unos pronósticos de precipitaciones en Cuba períodos lluviosos año 2014, donde construyo dos dominios, dominio padre de 24 x 24 km y un dominio interno de 8 x 8 km de alta resolución. En su parametrización empleo el ACM 2 capa frontera y Kain-Fritsch para la convección. Haciendo una evaluación el pronóstico de precipitación desde las 6 a 42 horas. Con colaboración de la Red de Estaciones Meteorológicas de Cuba. Empleándose





dos métodos, pronóstico cuantitativo, y pronóstico alternativo. El resultado permitió la implementación del modelo WRF y su verificación, determinando el modelo subestima magnitudes de las precipitaciones, las variabilidades no sobrepasan los 5 mm respecto por lo observado por los atardeceres. Viéndolo desde la ocurrencia o no de la presencia de precipitaciones el modelamiento subestima, aunque alcanza niveles detectables altos, 81% para 6 a 12 horas de pronóstico y 73% para 30 -36 horas. Concluyo que la modelación en WRF subestima tenuemente las magnitudes de la precipitación, sin embargo, alcanza niveles altos detectables, por lo siendo de gran en los pronósticos de las precipitaciones.

Vílchez (2015) utilizó data meteorológica de precipitaciones y temperatura siendo regionalizado partiendo de una escena de cambio climático global con elevado forzamiento radiactivo usando el modelo atmosférico WRF y verificado con datos de estaciones meteorológicas cuenca del Rímac, efectuándose la demarcación de la cuenca Rímac utilizando un modelo de elevación digital de resolución elevada generándose datos de suelos y vegetaciones con información combinadas de datos de satélite y bases de datos globales de suelo. Asimismo, menciona que se configura la información de entrada del modelo hidrológico en formato apropiado por medio de programas de estudio y procesamiento, también se usa el Arc map.

Mourre (2016) empleó tres tipos diferentes de programas de precipitación basado en el suelo (Interpolación de Kriging), información satelital (TRMM3B42), y salidas de modelo atmosférico (WRF), comparándolos en un espacio temporal de un año hidrológico en 10,000 km<sup>2</sup> y en diferentes resoluciones (27.9 y 3 km) y en tres escalas de tiempo (total anual, tendencia de precipitación diaria, ciclo diurno); dando como resultado las diferencias entre estos modelos la interpolación de Kriging tiene debilidades en la predicción de precipitación máxima anual en las cumbres y laderas sobre todo en alturas

sobre los 3800 msnm, las limitaciones del TRMM en la pobre performance en áreas cubiertas de hielo por que el comportamiento del hielo en el suelo es similar a la gota de agua en la atmósfera.

Barraza et al. (2017) afirmó que, por la necesidad de mejorar las medidas de prevención con predicciones más acertadas de lluvias torrenciales, generó acercamientos para la detección y alertas tempranas de precipitación intensa que pueda perturbar a la población o construcción a partir del uso del modelo meso-escalar WRF, además del examen descriptivo aplicado a la previsión meteorológica e hidrológica, que para poder realizarlo se auxilió del software HEC-HMS.

## **2.2 DATOS DE ANÁLISIS**

Jacobson (2005) afirmó que, los modelos de predicciones numéricas representan matemáticamente codificada al lenguaje del ordenador en el proceso dinámico, físico, químico y radiativo en la atmósfera. Para los modelos atmosféricos, los métodos dependen del tiempo que se expresa con matemática mediante ecuaciones diferenciales usuales. Espacio y métodos a causa del tiempo se describen mediante ecuaciones diferenciales arbitrarias. Las diferenciales ecuaciones usuales y parciales se reemplazan por diferencias finitas u otras aproximaciones, luego computarizadas y resueltas.

Warner (2011) menciona “que a medida que se desarrollan los modelos numéricos y se tiene mejor soporte computacional para el modelo de predictibilidad numérica actualmente tiene múltiples usos”

Coiffer (2011) define que el modelo de predicciones numéricas es posible clasificarlo en modelos mundiales o globales cubriendo absolutamente toda la litosfera para modelos de meso escalares o comúnmente denominados modelos localizados.



Debido a que se entra un área específica donde se pueda simular para realizar sus simulaciones, se denominan a la vez como modelamientos de extensiones limitadas.

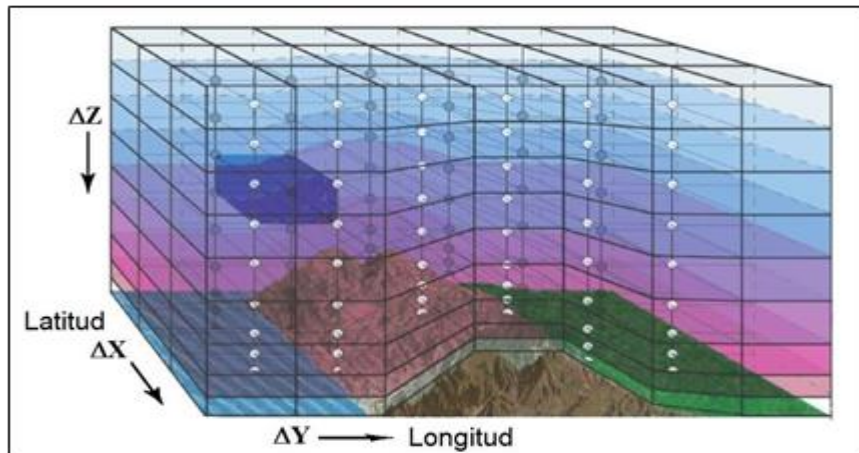
Dudhia (2014) menciona que “la comprensión del funcionamiento de un modelo numérico es necesario que este dicho modelo tiene dos componentes: uno dinámico y otro físico”

Con el fin de recolectar datos se han implementado muchos centros de servicios meteorológicos en el mundo, de los cuales se obtiene la data de las variables meteorológicas, recolectadas de forma aérea o terrestre, al análisis analítico de estos datos atmosféricos se le llama “Asimilación de Datos”, la interpretación de estos datos recolectados es usados para la simulación y/o pronóstico, siendo las condiciones iniciales de frontera de la data procesada.

### **2.3 SISTEMA DE MODELAMIENTO**

“la simulación del modelo enfoca aun objetivo de enmendar ecuaciones gobernantes en movimiento de la atmosfera resultantes de las celdas simuladas” (Warner, 2011). Como se muestra en la Figura 1.

De tal manera que la atmósfera es cambiante en el tiempo para cada celda hallándose cantidades para las variables meteorológicas en los específicos puntos según tiempo definido. Al método de hallar ecuaciones para los puntos en cada celda tridimensional y no variable continua más bien para variable discreta, en cada intervalo de tiempo de llama vértice discretizado (Coiffier, 2011).



**Figura 1.** Atmósfera separada por celdas tridimensionales (Warner, 2011).

**Fuente:** Elaboración propia.

Existe el modelo numérico de predicción meteorológica Sistema de Pronóstico Global (GFS), denominado también modelo espectral, teniendo como principal atributo que no utiliza las grillas tridimensionales lo que usa son las ondas.

### 2.3.1 Ecuaciones Gobernantes

“La ecuación del dinamismo gobernante del ambiente tienden a ser la base del desarrollo de las modelaciones de predicción numérica” (Warner, 2011). Las cuales son las siguientes:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{uv \tan \phi}{a} - \frac{uw}{a} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - 2\Omega(w \cos \phi - v \sin \phi) + Fr_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{u^2 \tan \phi}{a} - \frac{uw}{a} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - 2\Omega u \sin \phi + Fr_y \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{u^2 + v^2}{a} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - 2\Omega u \cos \phi - g + Fr_z \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} - w \frac{\partial T}{\partial z} + (\gamma - \gamma_d)w + \frac{1}{c_p} \frac{dH}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -u \frac{\partial \rho}{\partial x} - v \frac{\partial \rho}{\partial y} - w \frac{\partial \rho}{\partial z} - \rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} = -u \frac{\partial q_v}{\partial x} - v \frac{\partial q_v}{\partial y} - w \frac{\partial q_v}{\partial z} - Q_v \quad (6)$$

$$p = \rho RT \quad (7)$$

Las ecuaciones, (1 al 3), vienen a ser de momentum en Tierra esférica, simbolizando la segunda ley de Newton. La ecuación (4) es la conservación de energía (termodinámica). La ecuación (5) continuidad representa el peso final. La ecuación (6) análoga de la ecuación (5), aplicada al vapor de agua. Finalmente se tiene la ecuación (7) la ley de gases ideales. La variable meteorológica es interpretada estándar. Las variables independizadas  $u$ ,  $v$  y  $w$  variables de velocidades cartesianas,  $p$  es presión,  $\rho$  densidad,  $T$  temperatura,  $q_v$  humedad específica,  $\Omega$  frecuencia rotacional de la Tierra,  $\phi$  latitud,  $a$  radio de la tierra,  $\gamma$  gradiente de temperatura,  $\gamma_d$  gradiente adiabático seco,  $c_p$  calor específico del aire con presión firme,  $g$  aceleración de la gravedad,  $H$  significa disminución o aumento calorífico,  $Q_v$  resta o suma vapor agua mediante variables físicas, por ultimo  $Fr$  significa fricción general en las coordenadas direccionadas.

“con estos sistemas de ecuaciones se les denomina ecuaciones de gobierno en el dinamismo del medio natural o ecuaciones primarias” (Warner, 2011, p. 7). Siendo la



base de todos los modelos que trabajen con predicción numérica, ya sea de forma operacional o investigativa.

“A causa de que dichas ecuaciones no es posible resolverlo análogamente, debe ser convertido a ecuaciones que se puedan resolver” (Warner, 2011, p. 6). Para la resolución de las ecuaciones se usan normalmente los métodos numéricos.

## **2.4 CONDICIONES INICIALES (CI)**

“Las condiciones iniciales (CI) son datos de análisis ya que tienen características de precisión a diferencia de los datos pronosticados” (Kalnay, 2003).

Según Kalnay (2003), para las condiciones iniciales del modelo y la simulación de predictibilidad numérica es necesario empezar con las condiciones iniciales (CI), simulaciones para sondeos 1-D o 2-D y 3-D implicando una orografía deducida.

## **2.5 SISTEMA GLOBAL DE PREDICCIÓN (GFS)**

El modelo numérico de previsión meteorológica Global Forecasting Systems (GFS), en castellano Sistema Global de Predicción, Es un modelo global de pronóstico del tiempo elaborado por los centros nacionales de predicción ambiental (NCEP). Con docenas de variables atmosféricas y terrestres disponibles en conjuntos de datos, desde temperaturas, vientos y precipitaciones hasta humedad del suelo y concentraciones de ozono atmosférico. La tierra entera está cubierta por el GFS con resolución horizontal base de dieciocho millas (veintiocho kilómetros) de punto a punto de cuadrícula, siendo usado por investigadores que se dedican a predecir el clima dieciséis días en tiempo futuro. La imagen horizontal cae a 44 millas (setenta kilómetros) de punto a punto de cuadrícula pronosticado para una o dos semanas (Ticona, 2016).

El modelo GFS es un modelo conectado, combinado por 04 modelos apartados (01 modelo de atmósfera, 02 modelo oceánico, 03 modelo de tierra / suelo y 04 modelo



de hielo marino), los cuales sincronizan contiguos proporcionando una imagen precisa del medio climático. Se realizan cambios regularmente en el modelo GFS para mejorar su rendimiento y precisión de pronóstico. Es un modelo meteorológico en constante evolución y mejora. Los datos cuadriculados son disponibles para su descarga por medio del Sistema Nacional de Archivo y Distribución de Modelos Operativos de NOAA (NOMADS). Los productos de pronóstico y más información sobre GFS disponible en la página de comienzo del GFS (Ticona, 2016).

## **2.6 MODELO DE PRONÓSTICO E INVESTIGACIÓN METEOROLÓGICA**

### **2.6.1 Descripción del Modelo Mesoescalar WRF**

Ñavincopa (2018) refiere que, el desarrollo del WRF comenzó en la última década de 1990, fue el esfuerzo de una asociación de colaboración del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR), la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (representada por los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP) y el Laboratorio de Investigación del Sistema Terrestre), la Fuerza Aérea de los EE. UU, el Laboratorio de Investigación Naval, y la Universidad de Oklahoma.

El WRF es usado en NCEP actualmente y otros centros meteorológicos nacionales, también para configuraciones de pronóstico en tiempo real en laboratorios, universidades y empresas. El WRF, ha estado en desarrollo durante los últimos 18 años, el cual es un sistema numérico de predicción meteorológica meso escalar diseñada para la investigación meteorológica y la predicción numérica del clima, es un modelo considerado de próxima generación, es conveniente para extensas gamas de utilidades a diferentes, incluyendo: simulación idealizada, investigaciones de parametrización, investigaciones de asimilación de data, investigaciones de pronósticos, PNT en tiempo contante o



real, investigación de huracanes, investigación climática regional, investigación de incendios, aplicaciones de modelos aplicados.

El WRF ofrece pronósticos operativos con una plataforma elástica y computacional eficaz, reflejando adelantos nuevos en física, numérico y asimilaciones de datos contribuidos por los investigadores de la comunidad científica.

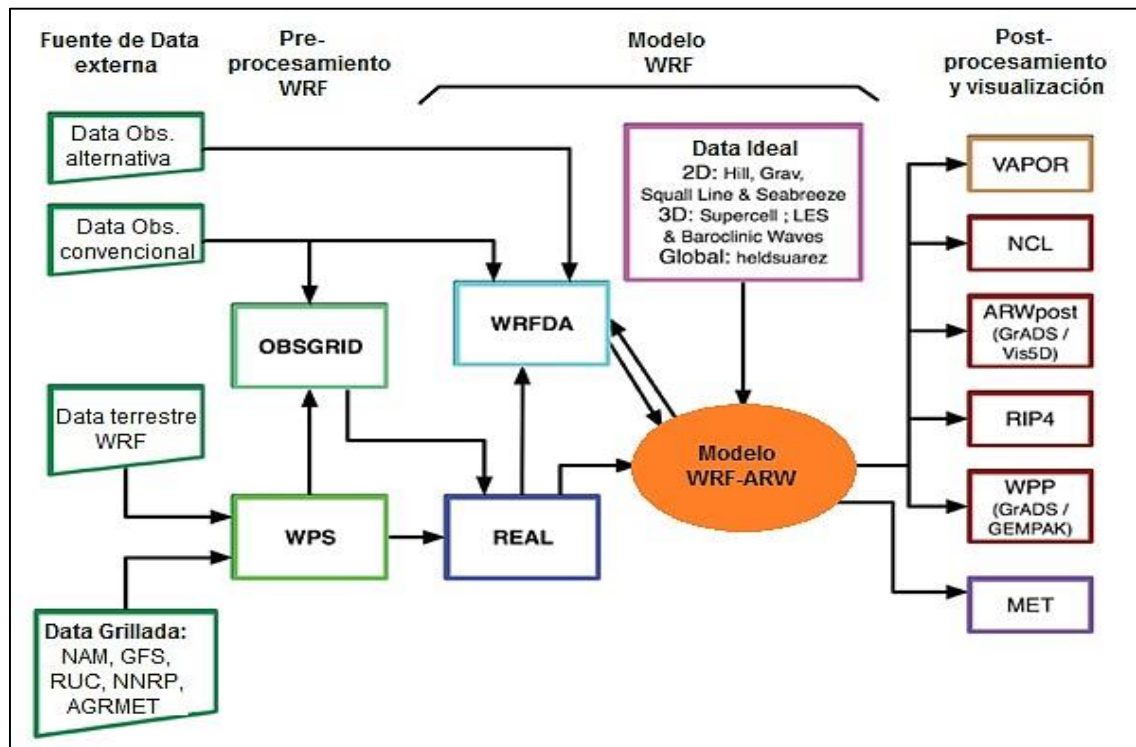
El sistema WRF tiene 02 componentes dinámicos, denominados núcleo ARW (Investigación Avanzada WRF) y núcleo NMM (Modelo de meso escala no hidrostática) ofreciendo pronósticos ejecutivos con una extensión manejable y computacionalmente útil, reflejando adelantos nacientes en física, numéricos y asimilación de data contribuidos por los investigadores de la comunidad cientista que se incrementa cada año tras año (Ñavincopa, 2018).

### **2.6.2 Componentes del Programa del Sistema de Modelado WRF**

El procedimiento del modelamiento en WRF se caracteriza por los siguientes principales programas:

- El sistema de pre procesamiento WRF (WPS).
- WRF-DA.
- Solucionador ARW.
- Post-procesamiento y herramientas de visualización.





**Figura 2.** Diagrama de flujo del sistema de modelado WRF versión 4.

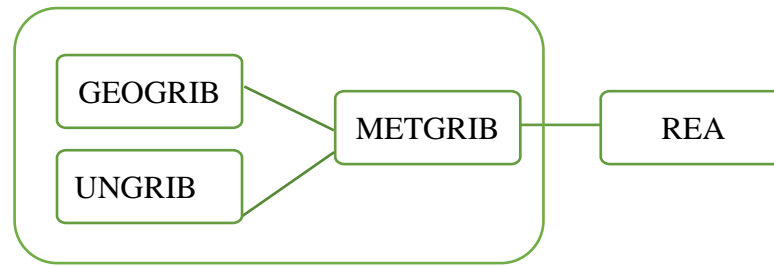
**Fuente:** Elaboración propia.

**Sistema de preprocesamiento WRF (WPS).** Consta de tres importantes programas su función principal es preparar los datos de entrada para el segundo componente del modelo los cuales son el geogrid, el ungrid y el metgrid.

**Geogrid.** Define los dominios de simulación estableciendo el lugar geográfico y las medidas de los dominios interpolando los datos terrestres estáticos horizontales.

**Ungrid.** Convierte la data de inicio de formato grib a otro formato de entrada para el metgrid que permita la interpolación de la malla del modelo.

**Metgrid.** Se encarga de la interpolación horizontal meteorológica a partir de la data de inicio extraído del ungrid con los dominios determinados del geogrid.



**Figura 3.** Representación de datos de los programas del WPS

**Fuente:** Elaboración propia.

**WRF-DA.** Este programa se encarga de realizar la integración numérica, puede usarse para ingerir exámenes de las interpolaciones analizadas creadas por el WPS. Basado de manera incremental en la asimilación de data variacionales y tiene capacidades 3D-Var y 4D-Var Tangente lineal y adjunto de WRF están completamente integrados con WRF para 4D-Var. También envuelve la cabida de asimilación de data híbrida 3D y 4D (Variacional + Conjunto).

Es un componente importante ya que realiza la integración numérica las coordenadas horizontales y verticales. El cual contiene dos programas: real y WRF,

**Solucionador ARW.** Viene a ser un módulo importante del procedimiento del modelamiento compuesto por diversos programas de inicio en la simulación idealizada y de data real, y usando la integración numérica, también incluye un programa para anidar en un sentido.

**Post-Procesamiento y Herramientas de Visualización.** Se admiten varios programas, incluidos RIP4 (basado en gráficos NCAR), lenguaje de comando de gráficos NCAR (NCL) y programas de conversión para otros paquetes gráficos fácilmente disponibles como GrADS. Es donde se postprocesa las salidas del modelo que permite la visualización y análisis conformado por el



programa ARWpost, el cual convierte los archivos en formato que sea interpretado por otro programa de computador. El más usado es GRADS debido a su facilidad de uso (Skamarock, 2021).

## 2.7 HEC-HMS

El Sistema de Modelado Hidrológico está diseñado para simular los procesos de precipitación-escorrentía de los sistemas de cuencas dendríticas. Está diseñado para ser aplicable en una amplia gama de áreas geográficas para resolver la gama más amplia posible de problemas. Esto incluye el suministro de agua de grandes cuencas hidrográficas y la hidrología de inundación, y la pequeña escorrentía de cuencas urbanas o naturales. Los hidrogramas producidos por el programa se usan directamente o junto con otro software para estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, pronóstico de flujo, impacto de urbanización futura, diseño de vertedero de embalses, reducción de daños por inundación, regulación de llanuras de inundación y operación de sistemas.

El Sistema de Modelado Hidrológico (HEC-HMS) es un software que está diseñado para modelar los procesos hidrológicos totales en los procedimientos para cuencas dendríticas. Este contiene varios métodos usuales en el estudio hidrológico, como infiltración de sucesos, hidrografía unitaria y enrutamiento hidrológico. HEC-HMS tiene los métodos precisos en una simulación perpetua, incluyendo la relación de evaporación-transpiración, deshielo y cantidad de humedad del suelo. A la vez tiene cabida avanzada en la simulación de escorrentía en cuadrícula usando la metamorfosis de escorrentía lineal semidistribuida (ModClark). Se tiene módulos de estudio adicionales en la optimización para el modelado, el pronóstico de flujo en la corriente, reducción del espacio de hondura, la estimación de duda del modelamiento, erosión, movilización de sedimentos y la calidad del agua.



El HEC-HMS contiene un ambiente de trabajo totalmente formado incluyendo una base de información, usado como ingreso de información, fuente computacional con módulos que reportan resultados. Una interfaz clara del beneficiario permitiendo al beneficiario una movilidad constante en los diversos componentes del HEC-HMS. Los resultados de las corridas se acumulan en HEC-DSS (Sistema de almacenamiento de datos) y son usados compilado con otro software en el análisis de disponibilidad de agua, drenaje urbano, previsión de flujo, impacto de urbanización futura, diseño de vertedero de presas, mitigación por inundaciones, regulaciones en las llanuras de inundables y operaciones de procedimientos (Villon, 2008).

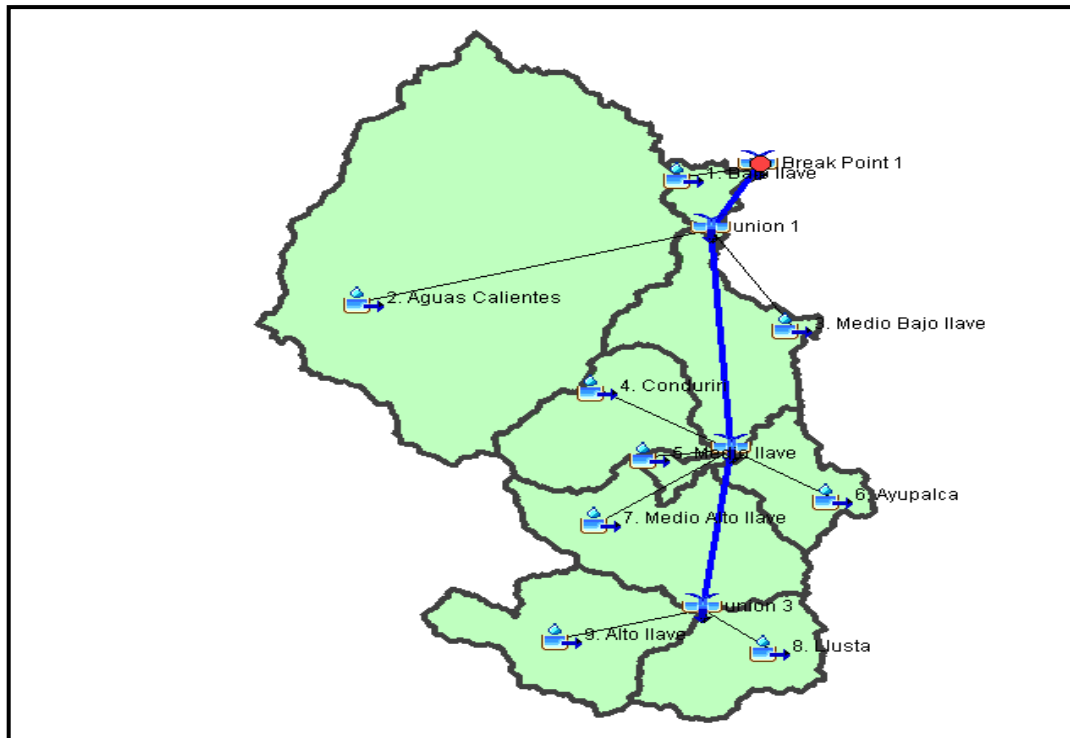
La modelación con el HEC-HMS se realiza tres procedimientos los cuales son los siguientes:

- Modelo de Cuenca
- Modelo Meteorológico
- Especificaciones de Control

### **2.7.1 Modelo de Cuenca**

El modelo de cuenca tiene los parámetros hidrológicos como: Microcuenca, distancia de cauce, convergencia, reservorio, fuente y sumidero (Figura 4).

La información agregada se completa con los tipos de las microcuencas y el procedimiento para determinar las abstracciones, conversión de precipitación-escorrentía y elecciones de recorrido hidrológico en cauce y laguna (Villón, 2008).



**Figura 4.** Elementos hidrológicos.

**Fuente:** Elaboración propia.

**Valores de abstracciones.** Vienen a ser la cantidad de precipitaciones pluviales infiltradas sobre la litosfera. El HEC-HMS utiliza métodos convencionales al hallar la pérdida o abstracción, como: inicial/constante, CN de SCS, CN grid SCS y zona de campo y Ampt, también tiene opciones de agotamiento en la humedad en la simulación en los intervalos de tiempo extensos (Villón, 2008).

El proceso escogido en la presente investigación, equivalente al NRCS (ex SCS), basado en la Curva Número, calculado en el ítem anterior.

**Transformación de precipitación a escorrentía.** Estos componentes transforman la abundancia de precipitaciones a escorrentía continua a las salidas de las subcuencas. Existen varias metodologías entre adheridos y distribución para la conversión de precipitaciones a escorrentías. En el procedimiento agregado, la escorrentía



se determina a través de hidrogramas unitarios como: Clark, Snyder y SCS. (Villón, 2008).

El método elegido para este estudio es el Hidrograma Unitario SCS, hidrograma que considera las peculiaridades de las microcuencas y el tiempo de retraso, estimado anteriormente (Villón, 2008).

**Tránsito en cauces.** Nos permite entender la corriente del flujo para los trayectos en microcuencas, subcuencas o cuencas. El procedimiento para el tránsito consiste en: Muskingum, Pulso Modificado, Onda Cinemática y Muskingum-Cunge. En el presente estudio no tiene tramos a transitar (Villón, 2008).

### **2.7.2 Modelo Meteorológico**

Define la tempestad de diseño para las microcuencas, usando simulaciones con el método precipitación-escorrentía.

Una metodología que crea una tempestad de diseño, viene a ser las distribuciones de tormentas del SCS de veinticuatro horas. Calculados y son introducidos en el HEC – HMS (Villón, 2007).

### **2.7.3 Especificaciones de Control**

Se introduce los intervalos de tiempo a simular (fecha-hora de comienzo y finalización) en el hidrograma de termino y la variación de tiempo ( $\Delta t$ ). Por recomendaciones generalizadas, la cantidad de discretización ( $\Delta t$ ) tiene que ser menor a un tercio del tiempo de retraso. (Villón, 2008).

### **2.7.4 Resultados de caudales máximos**

Los resultados de caudales máximos se determinan después de tener los componentes hidrológicos y definido la metodología de cálculo, se procede a la modelación de caudales



máximos en los puntos de interés para las salidas de la cuenca en análisis en periodos de retorno determinados. (Villón, 2008).

## 2.8 ANALISIS DE MAXIMAS AVENIDAS

Al planear una edificación hidráulica, es requisito indispensable conocer la cantidad de los caudales; el proyecto se ciñe de dimensionamientos y localizaciones de presas, puentes, diques, canales, conductos forzados, sistemas de drenaje, redes pluviales, estaciones de bombeo, plantas de tratamiento de agua y desagües, centrales hidroeléctricas, etc. El máximo caudal limite que debe resistir estas estructuras se llama caudal de diseño de proyecto. El ingeniero/a es consciente tiene conocimiento que está proyectando una obra que corre riesgos o ser destruido, por presencia de máximas avenidas. El estudio de máximas avenidas otorga metodologías basado en cimientos de principios matemáticos, considerando elegir el más recomendado y conveniente según sea el caso, y depende en gran importancia la disponibilidad de los datos hidrometeorológicos que se tenga.

diversos esclarecimientos fundamentales se requieren al comenzar el análisis del problema. Se entiende por avenida como caudal magno o grande de la escorrentía superficial que exceden la capacidad de transporte del área del canal lo que se conoce como inundación o desborde. estas inundaciones traen, se tiene conocimiento que traen problemas de todo ámbito de las actividades humanas. Por lo tanto, el objetivo de este texto enfoca al aspecto hidrológico de la determinación de los caudales del proyecto en obras hidráulicas, el que podría ser denominado predeterminación de descargas máximas, el cual consiste en el cálculo anticipado del caudal critico que no ha sucedido y siempre se considere la posibilidad que esta suceda (Villón, 2008).



## 2.9 COMPROBACIÓN MODELOS DE PREDICTIBILIDAD NUMÉRICA

Según Pérez et al. (2006) la validación de un modelo de predicción numérica operacional precisa hallar la estadística y gráficos al valorar la capacidad del modelo en obtener simulaciones de las variables escalares (precipitaciones, temperaturas, cantidad de humedad, etc). La validación científica establece el realismo y seguridad de los procesos básicos simulados por el modelo, conforme al conocimiento a priori de los mismos y de su identificación en las observaciones disponibles.

Warner (2011) considera que “es obligatorio tener en cuenta la validación del modelo en la predictibilidad numérica antes de su uso en una determinada región del globo, en prioridad para zonas de elevada inestabilidad orográfica” (p. 301).

### 2.9.1 Medidas de precisión

Jolliffe et al. (2003) al realizar la evaluación de calidad del pronóstico existe un umbral de exactitud, medida de agrupación, y medida de habilidad. Estos exámenes de medida son los más usados actualmente para examinar estadísticamente las pronosticaciones de variables discretas para los modelamientos de predicciones numéricas, principalmente el error medio absoluto (MAE) y la raíz del error cuadrático medio RMSE.

Por otro lado, “preexisten métodos diferentes formas de examinar los pronósticos con distintas medidas de precisión más desarrolladas y con diferentes medidas de mayor precisión, habilidad (skill) del modelo para pronosticar” (Wilks, 2006. p.280). para cada medida de precisión define un tipo de correspondencia que existe entre valores simulados y observados en base a la resta de valores simulados y observados; esta resta también se denomina residuo.



Por ello las medidas de precisión son de mayor uso actualmente para evaluar pronósticos o resultados de simulación.

**Raíz de Error Cuadrático Medio (RMSE).** Facilita cuantificar la desviación de los valores pronosticados y observados, se halla por la ecuación 8.

Según Izquierdo et al. (2007) la cantidad estimada que tiene que ser parecido al valor real de tal manera que el residuo, (diferencia entre ambos), tiene que ser lo más cercano a cero. Del error hallado para cada punto se calculó el RMSE (raíz de error cuadrático medio) como medida de precisión en la estimación realizado según el intervalo de tiempo estudiado.

$$RSME = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - o_n) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Donde:

RMSE: Raíz de error medio cuadrático.

$f_n$ : Es el valor medido en un punto dado.

$o_n$ : Es el valor pronosticado según el modelo.

$n$ : Es el número de datos analizados iniciales y finales.

$N$ : Número de datos.

**Error Medio Absoluto (MAE).** Wilks (2006) menciona que, “existe solo dos medidas escalares de precisión de pronóstico para predicciones continuas comunes en utilizar. El primero es el error absoluto medio. El MAE entrega una cantidad cercana de valores pronosticados y observados”. Se define por la ecuación 9.

$$MAE = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |f_n - o_n| \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$



Donde:

MAE: Error medio absoluto.

$f_n$ : Es el valor medido en un punto dado.

$o_n$ : Es el valor pronosticado según el modelo.

n: Es el número de datos analizados iniciales y finales.

N: Número de datos.

Aquí  $f_n$  y  $o_n$  son los n-ésimos de n pares de pronósticos y observaciones. El MAE es la aritmética promedio de las cantidades absolutas de las diferencias entre los miembros de cada par. Claramente, el MAE es cero si los pronósticos son perfectos (cada  $f_n = o_n$ ), y aumenta a medida que aumentan las discrepancias entre los pronósticos y las observaciones. Podemos esclarecer el MAE como una magnitud típica del error de pronóstico en un grupo de datos de verificación dado (Wilks, 2006).

**Bias o Sesgo.** Para Wilks (2006) no lo considera como una medida de precisión. Sin embargo, el BIAS tiene que ver con la exactitud es una diferencia de un valor medio con respecto al valor real otorga datos sobre la tendencia que posee el modelo al pronosticar una variable, es decir, sobrestimar o subestimar. Representado por la ecuación 10.

Según Restrepo (2004) el sesgo es una desviación sistemática de la verdad en una investigación que produce una estimación incorrecta de la asociación causa-efecto o de otras asociaciones. Los sesgos pueden operar en cualquier momento de la vía causa efecto, ya sea en el diseño, en el desarrollo o en el análisis de la investigación.

$$BE = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - o_n) \right\}^1 \quad (10)$$



Donde:

BE: Bias o sesgo.

N: Número de datos.

$f_n$ : Valor de simulación en el tiempo n.

$o_n$ : Valor observado en el tiempo n.

## 2.10 MEDIDAS DE BONDAD DE AJUSTE

Para la validación y calibración de los caudales generados se utilizará los siguientes:

### 2.10.1 Criterio de Schultz (D)

Según Pérez (2018) define que este criterio representa la desviación de los caudales simulados con los observados y se halla con la siguiente ecuación (11):

$$D=200 \frac{\sum_i^n |Q_{sim,i}-Q_i|*Q_i}{n*(Q_{max})^2} \quad (11)$$

Donde:

D= Criterio de Schultz.

$Q_{sim,i}$ = Caudal simulado inicial.

$Q_i$ = Caudal observado.

$Q_{max}$ = Caudal máximo observado en el periodo de retorno analizado.

Este discernimiento se recomienda para analizar eventos de elevada resolución temporal.

### 2.10.2 Desviación Media Acumulada (MAD)

Definida con la ecuación (12):

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{sim,i} - Q_i|}{n} \quad (12)$$

Donde: MAD= Desviación media acumulada,  $Q_{sim,i}$ = Caudal simulado inicial y  $Q_i$ = Caudal observado.

Cabrera (2012) da a conocer que la calibración la desviación media acumulada debe ser mínima de tal manera hallar un mejor ajuste de la variable simulada y observada.

### 2.10.3 Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E)

Coy (2017) define lo siguiente: el criterio de Nash-Sutcliffe es importante ya que es uno de los más recomendados y utilizados en modelos hidrológicos porque tiene un criterio de ajuste de acuerdo al valor referencial obtenido y así mismo de acuerdo a su variabilidad se puede igualmente ir calibrando es decir modificando parámetros significativos en el modelo para que los resultados arrojados se parezcan a los observados y así optimizar el modelo.

Uno de los más usados para evaluar los modelos hidrológicos, el cual se calcula con la siguiente ecuación (13):

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n ((Q_{sim,i} - Q_i)^2)}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (13)$$

Donde: E= Eficiencia de Nash-Sutcliffe,  $Q_{sim,i}$ = Caudal simulado inicial,  $Q_i$ = Caudal observado,  $\bar{Q}$ = Valor absoluto del caudal y Cuando la simulación es correcta tiende E=1, E=0.

#### 2.10.4 Raíz de Error Cuadrático Medio (RSME)

Según Cabrera (2012) la raíz de error cuadrático medio (RSME) accede medir la desviación de las cantidades pronosticados y observados, se halla por la ecuación (14):

$$RSME = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - o_n)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Donde: RMSE= Raíz de error medio cuadrático,  $f_n$ : Es el valor medido en un punto dado,  $o_n$ : Es el valor pronosticado según el modelo y n: Es el número de datos analizados iniciales y finales.

Al obtenerse un valor cero (0) significa un ajuste perfecto, si los valores son positivos crecientes muestra un mínimo ajuste.

#### 2.11 REGRESIÓN LINEAL SIMPLE

Sandoval (2002) define que las técnicas de regresión son el medio para estimar los parámetros de un modelo matemático que expresa la relación de una variable dependiente o respuesta Y, la cual no se puede controlar en un experimento, en función de una o más variables independientes o de regresión  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , las cuales se miden con un error despreciable y en algunos casos es controlable en el ensayo. A continuación, en la ecuación 11 se muestra la fórmula de regresión lineal simple.

$$Y = a + bX \quad (15)$$

Donde:  $X$ : Es la variable independiente (vendría a ser la precipitación de observación),  $Y$ : Es la variable dependiente (vendría a ser la precipitación simulada),  $a$ : Intercepto u ordenada de origen y  $b$ : Es la pendiente.



Según Carrera et al. (2016), la mejor metodología para el relleno de datos en series temporales para la región andina y costera del Ecuador es el método de regresión lineal simple debido a la gran cantidad de datos faltantes que provee el INAMHI.

Según Bowerman (2007), existen resultados que muestran a la regresión lineal no sensibles a livianas desorientaciones en este supuesto.



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 ZONA DE ESTUDIO

##### 3.1.1 Localización del proyecto

La zona de estudio corresponde a la cuenca del río Ilave, siendo este uno de los primordiales afluentes de la cuenca del Titicaca, ubicándose:

**Ubicación geográfica.** En el sistema de coordenadas UTM WGS84, Zona 19 sur, se localiza entre las coordenadas: Este: 352,353 – 452,052 y Norte: 8'104,770 – 8'248,751 (Figura 5a).

**Ubicación hidrográfica.** La cuenca del río Ilave hidrográficamente se localiza en la Región Hidrográfica del Titicaca que es fragmento del Sistema Hídrico Titicaca-Desaguadero-Lago Poopó-Salar de Coipasa (Sistema TDPS) (Figura 5b).

**Ubicación política.** Se localiza en la región Puno, en las provincias de Chucuito, El Collao y Puno, y los distritos de Acora, Capazo, Chucuito, Conduriri, Huacullani, Ilave, Juli, Laraqueri, Mazocruz, Pilcuyo, Pisacoma, Plateria, Puno, San Antonio de Esquilache, Tiquillaca (Figura 6a).

**Límites hidrográficos.** La cuenca del río Ilave, por el este limita con el lago Titicaca y cuencas de los ríos Zapatilla, Pusuma y Mauri Chico. Por el oeste limita con la cuenca del río Tambo y la laguna Loriscota. Por el norte limita con las cuencas de los ríos Illpa y la zona circunlacustre. Por el sur limita con la cuenca del río Maure (Figura 6b).

### 3.1.2 Vías de acceso

La articulación vial del distrito Ilave, no presenta mayores dificultades, conectándose con la capital de la región Puno, mediante vías principales hacia los límites de la cuenca Ilave ver (Tabla 1).

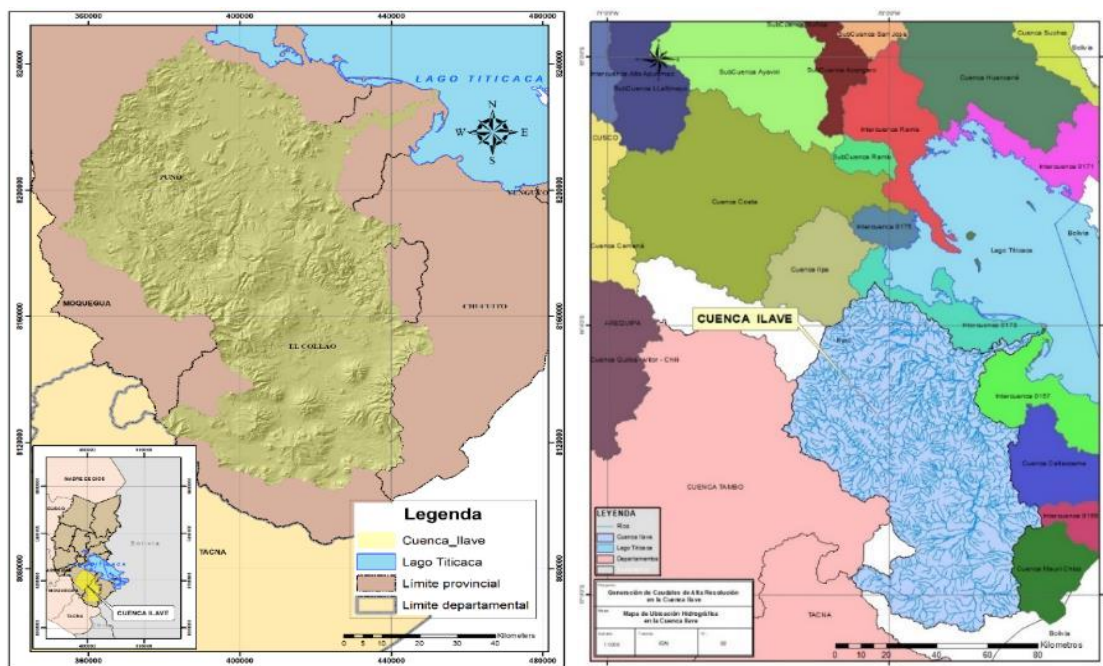
**Tabla 1.** Vías de comunicación a la zona de estudio.

Ruta		Distancia (km)
De	A	
Puno	Chucuito	19.00
Chucuito	Platería	10.00
Platería	Acora	4.00
Acora	Ilave	22.00

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.1.3 Características Geomorfológicas de la Cuenca

En la figura 5 se visualiza la ubicación de la zona de estudio, la ubicación geográfica (a) y la ubicación hidrográfica (b). En la figura 6 se observa la ubicación política (a) y los límites hidrográficos.



**Figura 5.** Ubicación de la zona de estudio. (a) geográfica, (b) hidrográfica.

**Fuente:** Instituto Geográfico Nacional (IGN).





Los programas de computador utilizados fueron los siguientes: WRF Model.4.1, WPS 4.1, ARWpost 4.1, GRADS, Python 3.9.2, ArcMap 10.8, Microsoft Office 2016: Word 2019, Excel 2019, Access 2019,y HEC-HMS 4.7.1.

### 3.2.2 Datos meteorológicos

La data de precipitaciones máximas en veinte cuatro horas fue entregada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) ver anexo 7, Dirección Regional Puno (DR13) y corresponde a las estaciones Ilave, Laraqueri, Mazocruz, Capazo, Juli y Vilacota (Tabla 2 y Figura 7). Los datos de precipitación corresponden a las lecturas de precipitación realizadas a las 7:00 y 19:00 horas del día 17/02/2012, a partir de esta información y mediante la metodología de regresión lineal simple se efectuó la disgregación horaria de la precipitación para cada estación seleccionada (Tabla 3).



**Figura 7.** Ubicación de estaciones meteorológicas de estudio en la cuenca Ilave.

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 2.** Estaciones meteorológicas seleccionada.

Estación	Longitud	Latitud	Altitud (m)	Cuenca	Código	Región
Ilave	69°38'25.4'	16°3'35.8''	3861	Zapatilla	000879	Puno
Laraqueri	70°2'45.2''	16°8'9.6''	3933	Ilave	000889	Puno
Mazocruz	69°42'55.6''	16°44'20''	3975	Ilave	000878	Puno
Vilacota	70°2'34.9''	17°4'44.6''	4468	Maure	000861	Tacna
Capazo	69°44'20.72''	17°10'57.69''	4530	Maure	158326	Puno
Juli	69°27'35.7''	16°12'13.6''	3830	Callacame	000880	Puno

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 3.** Precipitaciones medidas (mm) a las 07 y 19 horas en las estaciones meteorológicas seleccionadas para el 17/02/2012

Hora	Estación meteorológica					
	Laraqueri	Mazocruz	Capazo	Juli	Ilave	Vilacota
07:00	35.5	4.8	8	21.9	32.5	21.9
19:00	3.8	1.8	4	0.8	1	0.8

**Fuente:** SENAMHI.

### 3.2.3 Datos hidrológicos

Los caudales utilizados pertenecen a la estación Puente Carretera – Ilave de propiedad del SENAMHI y fueron registrados el 17/02/2012 (Tabla 4). La magnitud de los caudales para seis horas se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 4.** Estación hidrológica seleccionada para la validación.

Estación	Longitud	Latitud	Altitud (m)	Cuenca	Código	Región
Puente Carretera Ilave	69°37'53.95'	16°5'17.68''	3840	Ilave	210301	Puno

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 5.** Información hidrométrica ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) para el 17/02/2012 para 06 horas.

<b>Tiempo Hora</b>	<b>Caudales (<math>\text{m}^3/\text{s}</math>)</b>
07:00	557.16
08:00	557.16
09:00	557.16
10:00	557.16
11:00	557.16
12:00	557.16

**Fuente:** SENAMHI.

### **3.3 METODOLOGÍA**

Para la metodología con el fin de cumplir los 03 objetivos específicos de la presente investigación se trabajó en tres principales procedimientos. Como primer procedimiento se extrajo del Sistema de Pronóstico Global (GFS) en forma de grillas las precipitaciones máximas de 24 horas para el 17/02/2012. Como segundo procedimiento consiste en obtener las precipitaciones máximas de 24 horas con el modelo meteorológico WRF (Modelo de Pronóstico e Investigación Meteorológica) para el 17/02/2012. Y como última acción se genera los caudales máximos a través del software hidrológico HEC-HMS y su respectiva validación en la cuenca Ilave.

#### **3.3.1 Extracción de datos de GFS (Sistema de Pronóstico Global) en forma de grillas las precipitaciones esperadas para la cuenca Ilave.**

Como primera acción se realizó la instalación y configurado del modelo WRF versión 4.0 con estas parametrizaciones físicas: capa fronteriza ACM2, microfísica esquema de Lin, radiación esquema RRTMG, convección esquema Kain Fritsch, suelo modelado de 4 capas de suelo, técnica de anidamiento retroalimentación en dos direcciones. Posteriormente se obtendrá datos del modelo GFS (Sistema de Pronóstico Global) con una resolución de  $0.5 \times 0.5$  grados de resolución.

El área de estudio se centrará en el dominio anidado “d02” con resolución espacial de 9 km que cubre la cuenca Ilave, incluyendo la orografía de la región. Antes de ello será necesario desarrollar los dominios d01 y d02 de resolución espacial 27 y 9 km con la finalidad de reducir al mínimo los problemas de borde y/o frontera, los dominios se establecieron de tal manera que la simulación atmosférica tome en consideración la influencia de los sistemas meteorológicos de meso escala.

### **3.3.2 Obtención de las precipitaciones máximas con el modelo meteorológico WRF (Weather Research and Forecasting) para toda la cuenca Ilave.**

El modelo meteorológico WRF (Modelo de Pronóstico e Investigación Meteorológica) es un modelo mesoescalar de pronóstico y asimilación de datos; para simular en el WRF los escenarios primarios y de contorno del dominio padre son tomados del pronóstico del sistema de modelo global (GFS), para las 00:00 horas GMT con una resolución de 0.5 grados.

Se realizó tres pasos básicos para hallar la simulación numérica con el modelo (López y Zavala, 2009):

- **The WRF Preprocessing System (WPS).**

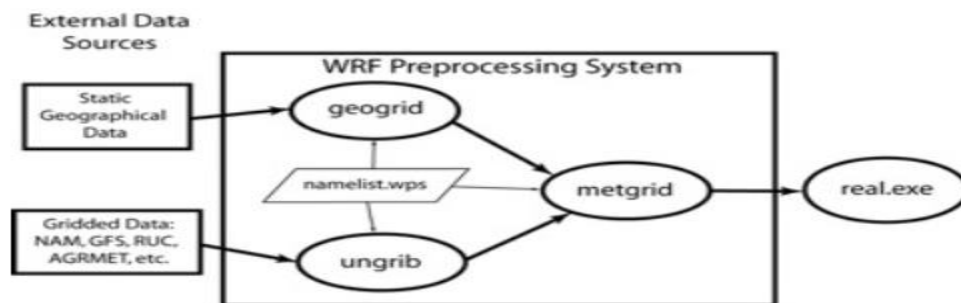
Este sistema de preprocesamiento contiene tres programas cuya finalidad es dar las condiciones iniciales para el modelamiento en WRF. Utiliza datos reales en la simulación los tres programas independientes son:

- **Geogrid.** Realiza un cálculo ubicando puntos de rejilla a la resolución especificada, la posición del centro, el número de puntos (6) y entre otros, interpolando la topografía, suelo, albedo, cobertura vegetal, etc.

- **Ungrid.** Es un programa que decodifica la data derivada en formato grib para pasarlo a formato metgrid de tal manera pueda ser interpolado en la grilla del modelo WRF.

- **Metgrid.** interpola de manera horizontal este programa la data atmosférica derivado del programa ungrid definida en el grillado.

La configuración elegida para el preprocesamiento (WPS) el namelist.wps se muestra en el anexo 1.



**Figura 8.** Procedimiento de la metodología.

**Fuente:** [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_v4/v4.0/users\\_guide\\_chap3.html#\\_Introduction](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_v4/v4.0/users_guide_chap3.html#_Introduction).

- **Data assimilation WRF-DA**

Es un programa opcional que tiene la finalidad de analizar las salidas del WPS. También actualiza condiciones iniciales en el modelamiento WRF.

La configuración elegida en el procesador (WRF-ARW) se muestra en el anexo 2, que corresponde al namelist.input.

- **ARW solver.**

Es un proceso intermedio que prepara la data para el preprocesamiento, definir e interpolar las variables en relación al tiempo.



- **Post-procesamiento y visualización.**

Para el post-procesamiento y visualización lo conforma el programa ARWpost, convierte los archivos simulados del WRF a otro formato para ser lecturado por un diferente software. El software GRADS facilita observar estos datos usando scripts en forma txt.

La metodología aplicada en el presente trabajo fue la siguiente:

Como primer paso consiste en el pre-procesamiento iniciando con la instalación y configuración del modelo WRF configurando el WPS (sistema de preprocesamiento) donde se prepara los archivos de entrada de los campos meteorológicos con el programa geogrid juntando con el programa ungrib.exe e interpolar los datos meteorológicos con el componente metgrid.exe; concatenando el archivo con las características del terreno se obtendrá la malla fina (grillas). Para la simulación con los datos reales del WRF donde se define los dominios de las simulaciones, se calcula la latitud y longitud de cada punto de la malla. Con las siguientes parametrizaciones físicas: radiación de onda larga RRTM, radiación de onda corta Dudhia, microfísica esquema WSM-6 y Cúmulos KainFritsch.

Como segundo paso se desarrollará un algoritmo en el lenguaje de programación NCAR (Command Language) NCL donde se extraerá los resultados del modelo las series de tiempo de las variables establecidas que correspondan a cada punto de rejilla más cercano a cada estación.

Los scripts utilizados para extraer los datos del modelo WRF (series de tiempo) se muestra en el anexo 3, que lleva el nombre de Script\_WRF.gs.

A continuación, se muestra los procedimientos a realizarse:

### 3.3.2.1 Validación del pronóstico de precipitaciones máximas

Carvalho (2012) recomienda “hacer una predicción determinada para modelos meso escalares” (p. 25), para nuestra investigación se analizó el día 17 de febrero del 2012 pero que en la modelación se analiza en 2 días desde el 17/02/2012 al 18/02/2012. Para el siguiente proyecto de investigación se analizó para 42 horas de previsión 02 días.

Ñavincopa (2018) define que el modelo muestra reproducir el comportamiento horario, donde valida el WRF hasta varios kilómetros en los puntos de validación.

#### a) **CONDICIÓN INICIAL Y DE FRONTERA**

La data de análisis viene a ser las condiciones iniciales y la data de pronóstico viene a ser las condiciones de frontera como se observan en la tabla 6 esta data es derivada del sistema global de pronóstico (GFS) en resolución temporal de 24 horas, data en intervalos de 00Z, 06Z, 12Z y 18Z para 01 día requeridos de tal manera hacer una sola ejecución del modelo. El modelado de hizo para la fecha 17/02/2012. Haciendo una ejecución del modelo. Hecho para un pronóstico de 42 horas.

**Tabla 6.** Condición de inicio y de límites.

	<b>Condiciones iniciales</b>	<b>Condiciones de frontera</b>
<b>Tipo de datos</b>	Data de estudio	Data de estudio
<b>Modelo global</b>	GFS	GFS
<b>Resolución espacial</b>	0.5°*0.5°	0.5°*0.5°
<b>Resolución temporal</b>	3h	3h
<b>Formato de archivo</b>	GRIB2	GRIB2

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 7.** Datos de entrada al modelo

<b>Periodo</b>	<b>N° de ejecuciones</b>	<b>Resolución temporal</b>	<b>CI</b>	<b>CF</b>	<b>Total</b>
17/02/2012	01	3 horas	55 km	9 km	64

**Fuente:** Elaboración propia.





En la tabla 7 se muestran los datos de entrada al modelo donde se realizó 01 ejecución, a una resolución de 3 horas y analizada a 9 km.

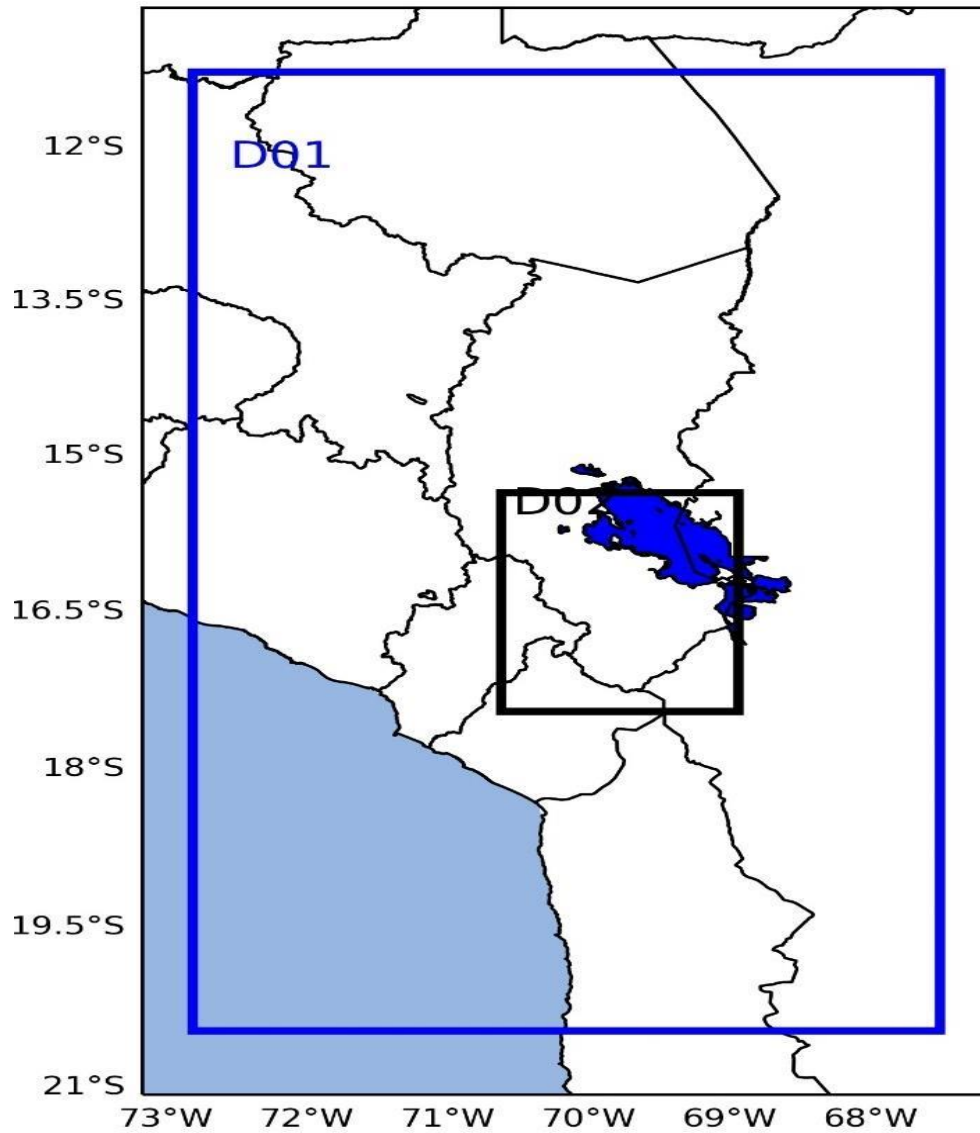
## **b) CONFIGURACIÓN DEL MODELO**

Se realizó usando la guía de usuario del modelo WRF, también se tomó en cuenta algunas pautas de la página oficial del modelo WRF (<https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>) en el cual se puede encontrar el modelo guías, videos, tutoriales, foros y más para la ejecución del modelado.

### **b.1 Dominios y anidamientos en la simulación**

Al utilizar este modelo de mesoescala incluye analizar el espacio tridimensional del globo planetario donde se estudia el pronóstico meteorológico. Sin embargo, se puede analizar en un espacio tridimensional más reducido, siendo de pequeñas dimensiones llamadas anidamientos. A la dimensión tridimensional más grande se le denomina dominio padre.

Para este proyecto de investigación se establecieron un dominio padre establecido y tres anidamientos. Con una resolución espacial de 27 km para el dominio padre y 9 km para el primer anidamiento el cual es el dominio de interés.



**Figura 9.** Delimitación de dominios, un dominio padre y dos anidamientos de 27 y 9 km.

**Fuente:** Elaboración propia.

El anidamiento fue establecido simétricamente de manera telescópica.  
Coordenadas de centro utilizada para dominio padre y un anidamiento.

## b.2 Generalidades escogidas para el modelo

La generalización de opciones seleccionadas del modelo para hacer el pronóstico se observa en la tabla 8 tiene que ver con el configurado del modelo en dimensión espacial y dimensión temporal. La resolución horizontal en el eje x eje vertical y oscilan de acuerdo al dominio simulado, escogiéndose así en base a la data de entrada de  $0.5^\circ$ . La cantidad de niveles verticales difieren a la altura considerada al modelo. Con tiempo pasante escogido de (Kalnay, 2003, p. 06). Para la cantidad de puntos de los ejes x, y y z son vinculados a la cantidad de celdas tridimensionales obtenidas del modelamiento. Con un tipo de anidamiento two-way, permitiendo una retroalimentación al dominio padre así enriqueciendo la mecánica de simulación (Guía de usuario WRF, 2018, pág. 6-13). eligiendo el núcleo dinámico ARW ya que es adecuado para este proyecto de investigación. Se eligió una resolución temporal equivalente a 6, 2, 1 y 1 horas con el fin de obtener precipitaciones máximas pronosticadas horarias, habilitando una evaluación de cómo se comporta las precipitaciones máximas en la cuenca Ilave.

Esto se hizo en base a los namelist.wps, y namelist.input. que pueden apreciarse en los anexos correspondientes.

**Tabla 8.** Generalidades seleccionadas para el modelo.

<b>Dominios Opciones</b>	<b>Dominio padre (1er dominio)</b>	<b>1er anidamiento (2do dominio)</b>
Niveles verticales	35	35
Resol. Horizontal dx	27 km	9 km
Resol. Horizontal dy	27 km	9 km
Resolución temporal	6 h	2 h
Tiempo de paso (seg.)	3600	3600
Nº de puntos (X, Y)	29x38	43x52
Tipo de anidamiento		Two-way
Núcleo Dinámico		ARW
Versión del modelo WRF		4.0

**Fuente:** Elaboración propia.

### b.3 Selección física del modelo

La parametrización física del modelo WRF tiene vital importancia para el pronóstico meteorológico.

En este proyecto de investigación se está utilizando la parametrización recomendada de la tabla 9, donde se muestra la parametrización.

**Tabla 9.** Parametrización física del modelo

	<b>Dominio padre (1er dominio)</b>	<b>Primero anidamiento (2do dominio)</b>
Capa Límite Planetaria	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) Tke (2)	
Microfísica de Nubes	Wsm 5-Class (4)	
Interacción Superficie-tierra	Unified Noah (2)	
Cúmulus	New Kain-Fritsch (1)	New Kain-Fritsch (1)
Capa Superficial	Monin-Obukhov (Jajic Eta) (2)	
Radiación de Onda Larga	Rrtmg (1)	
Radiación de Onda Corta	(Old) Goddard (2)	

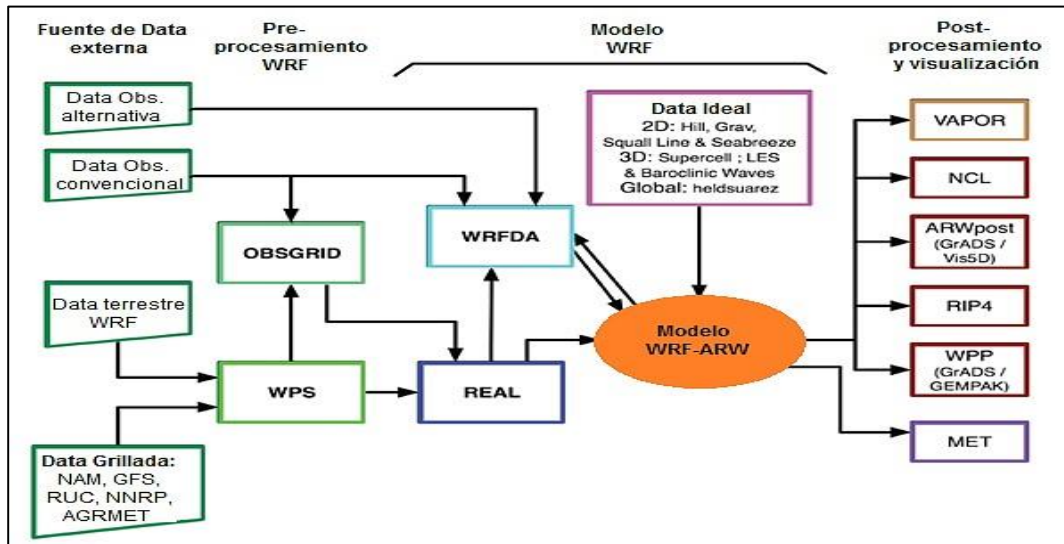
**Fuente:** Elaboración propia.

### c) CONFIGURACIÓN DEL MODELO

#### c.1. Esquema de flujo escogido en la ejecución del modelo

Para el modelado WRF se toma varios caminos de simulación o flujos para llegar al fin del pronóstico.

Para este proyecto de investigación se utiliza el flujo de simulación recomendado por la guía de usuario del modelo WRF-ARW (2020). Por las ventajas que tiene este modelamiento permite el acceso a herramientas que permite la corrida y según este diagrama efectuará el modelamiento.



**Figura 10.** Diagrama de flujo del sistema de modelado WRF versión 4.

**Fuente:** Guía de usuario del modelo WRF-ARW (2018).

## c.2. Número de ejecuciones del modelo

Al verificar la precisión de pronósticos ejecutado al modelo una sola vez. El número de ejecuciones fueron de solo una vez (01). En la tabla 10 se observa la hora de inicialización 00Z 17 de febrero del 2012 y la hora de finalización 18Z 18 de febrero del 2012 lo que significa que esta ejecución duro 42 horas de pronóstico.

Para este proyecto de investigación se obtuvo la precipitación: precipitación máxima para cada hora. Debido al efecto spin-up (Coiffier, 2011).

**Tabla 10.** Secuencia de ejecuciones para el modelo.

	Pronósticos	Hora de inicialización	Hora de finalización
17/02/2012	1ra ejecución	00Z 17 febrero 2012	18Z 18 febrero 2012

**Fuente:** Elaboración propia.

Total, se hizo 01 ejecución del modelamiento como se observa en la tabla 10.

### c.3. Procedimiento para una sola ejecución del modelo

Se siguió según las recomendaciones y guía del manual del sistema de modelado WRF de la versión 4 tanto en formato web (html), como formato pdf. Que se encuentra en el siguiente link:

[https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_v4/contents.html](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_v4/contents.html).

La modelación se elaboró bajo la colaboración del grupo de investigación (APCENDA).

Se utilizó un ordenador con las características especificadas en la tabla 11. En total se utilizaron tres ordenadores, instalándose el modelo, extensiones y softwares necesarios para correr el modelo.

**Tabla 11.** Características del ordenador donde se ejecutará el modelo.

<b>Características</b>	<b>Tipo</b>
<b>Procesador</b>	Intel core i7 8750 2.20Ghz
<b>Memoria RAM</b>	32Gb
<b>Capacidad disco duro</b>	1TB
<b>Número de núcleos</b>	12
<b>Sistema Operativo (SO)</b>	Ubuntu mate 18.04

**Fuente:** Elaboración propia.

La preparación de instalación de librerías extensiones y adecuaciones del ordenador para el modelado tomo un tiempo de dos semanas, y con un tiempo de 24 horas para el pronóstico de precipitaciones máximas.

La data obtenida para la simulación ingresados tuvo resultados en (horas Z) Meridiano de Greenwich.

### c.3.1 Manejo del preprocesador - WRF preprocessing system (WPS)

Continuando con los procedimientos de la modelación se tiene al WPS el cual consiste en variar la data textual ubicada según la ruta. Denominada con el nombre `namelist.wps` (anexo 1), en esta data se encuentra las alternativas requeridas en la configuración del componente que contiene el WPS: `Geogrid`, `ungrib` y `metgrid`.

Con el archivo de texto `namelist.wps` procesado, se ejecutó el programa WPS sucesivamente, primero `geogrid`, después `ungrib`, y finalmente `metgrid`. finalizada la corrida del WPS se obtuvo las fuentes de salida del WPS, de tipo: `met_em. d0*. yyyy-mm-dd _ hh:mm:ss.nc`, como datos de inicio en la siguiente simulación.

### c.4 Manejo del procesador WRF

Como se observa en la tabla 12 el número de pronósticos que es uno la resolución temporal de 3 horas (intervalo), una condición inicial de seis horas con un total de horas pronosticadas obtenidos de 42 horas para el 17 de febrero del 2012.

**Tabla 12.** Total, de horas resultantes de los pronósticos.

Día/Mes/Año	Nº de Pronósticos	Resolución temporal de salida	CI	Horas pronosticadas obtenidas	Total, de horas obtenidas
17/02/2012	1	3h	6h	42	42
Total	1	3h	6h	42	42

**Fuente:** Elaboración propia.

### d. POSTPROCESAMIENTO DE LOS PRONOSTICOS

El postprocesamiento de salida después de la corrida en WRF se mantiene en formato `.nc` el cual no se puede observar desde el mismo Linux, para ello se debe procesar y transformarlo en una salida en formato que se requiere para graficarlo en este caso se usó el `grads`, de tal manera trabajarlos con Python.

También consiste en procesar el componente AWRpost, antes de ello se debió procesar en formato namelist.ARWpost. el cual consiste en definir las fechas y resolución temporal para el pronóstico de los dominios padre y anidado de 27 y 9 kilómetros, ya configurado se ejecuta el ARWpost, en archivo de formato. ctl y .dat.

Una vez que se obtuvieron estos dos archivos en. ctl y .dat, recién los resultados se visualizan con el software GRADS.

## e. **EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS PRONOSTICOS**

### e.1. **Cálculo de las medidas de precisión**

Para la validación y calibración de la precipitación máxima generada con el modelo WRF se utiliza el:

#### **Raíz del error cuadrático medio (RMSE):**

Raíz del error cuadrático medio (RSME) que permite medir la desviación de los valores pronosticados y observados, se halla por la ecuación 16.

$$RSME = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - o_n)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

Donde:

RMSE: raíz de error medio cuadrático.

$f_n$ : Es el valor medido en un punto dado.

$o_n$ : Es el valor pronosticado según el modelo.

n: Es el número de datos analizados iniciales y finales.

N: Número de datos.



Indica una medida típica de equivocación en la predictibilidad, siendo así más sensible ya que es exponencialmente al cuadrado, teniendo mayor precisión con respecto al MAE. Al igual que el MAE un valor cero indicaría un pronóstico ideal.

**Error absoluto medio (MAE):**

El MAE da una cantidad cercana entre valores pronosticados y observados. Se define por la ecuación 17.

$$\text{MAE} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |f_n - o_n| \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

Donde:

MAE: Error medio absoluto.

$f_n$ : Es el valor medido en un punto dado.

$o_n$ : Es el valor pronosticado según el modelo.

n: Es el número de datos analizados iniciales y finales.

N: Número de datos.

En todas las ejecuciones q se simulo se promedió el error absoluto medio (MAE) que representa que representa a la fecha de simulación de las ejecuciones del modelo, representando una validación determinada así un grado preciso al pronóstico si se aproxima a un valor cero indicaría un pronóstico ideal.

**Desviación estándar precipitaciones máximas observadas (BIAS):**

El BIAS otorga datos sobre la tendencia del modelo al pronóstico una variable, quiere decir, sobrestimar. Representado por la ecuación 18.

El BÍAS es resta de la variable estimada y observada, proporcionando así resultados de sobrestimación y subestimación de la variable. Según Pielke (1984).

$$BE = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - o_n) \right\}^1 \quad (18)$$

Donde:

*BE*: Sesgo BIAS (desviación estándar observado).

*f<sub>n</sub>*: Es el valor medido en un punto dado.

*o<sub>n</sub>*: Es el valor pronosticado según el modelo.

*n*: Es el número de datos analizados iniciales y finales.

*N*: Número de datos.

### 3.3.3 Generación caudales máximos

Para la obtención de los caudales horarios pronosticados se aplica software hidrológico “HEC-HMS” con las salidas de precipitación del WRF para el día 17 de febrero del 2012 y la información horaria de las 06 estaciones proporcionadas por SENAMHI para la fecha ya indicada, modelándose la respuesta que tendrá en la cuenca Ilave para ello se realizará lo siguiente:

#### 3.3.3.1 Datos de precipitación

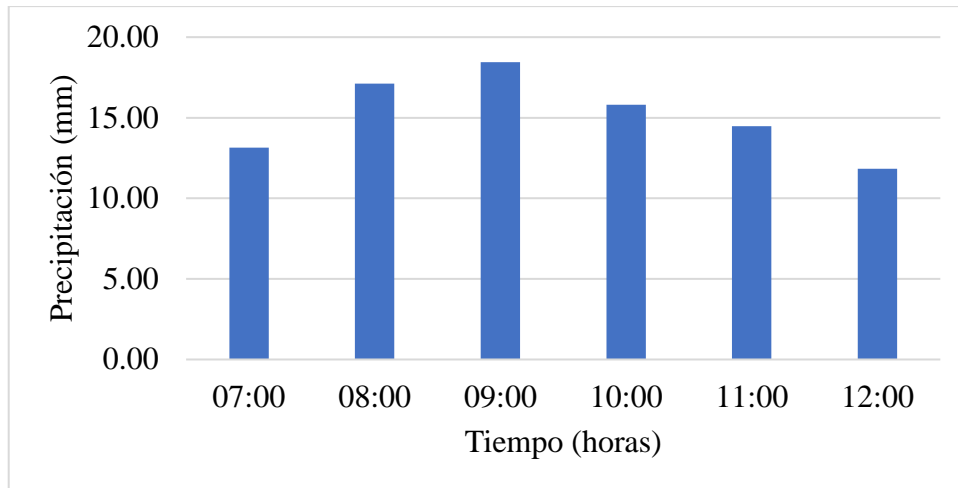
Se obtienen a partir de las salidas resultantes del modelamiento en WRF y de las estaciones pluviométricas del departamento de Puno que corresponden a seis puntos específicos (estaciones meteorológicas) para el día 17/02/2012 de la cuenca Ilave suficientes para ser utilizados en la configuración del modelo y las estaciones meteorológicas fueron: Ilave, Laraqueri, Mazo Cruz, Capazo, Juli y Vilacota los cuales fueron seleccionados por la influencia de aporte de estudio a la cuenca.



### 3.3.3.2 Diseño de hietogramas

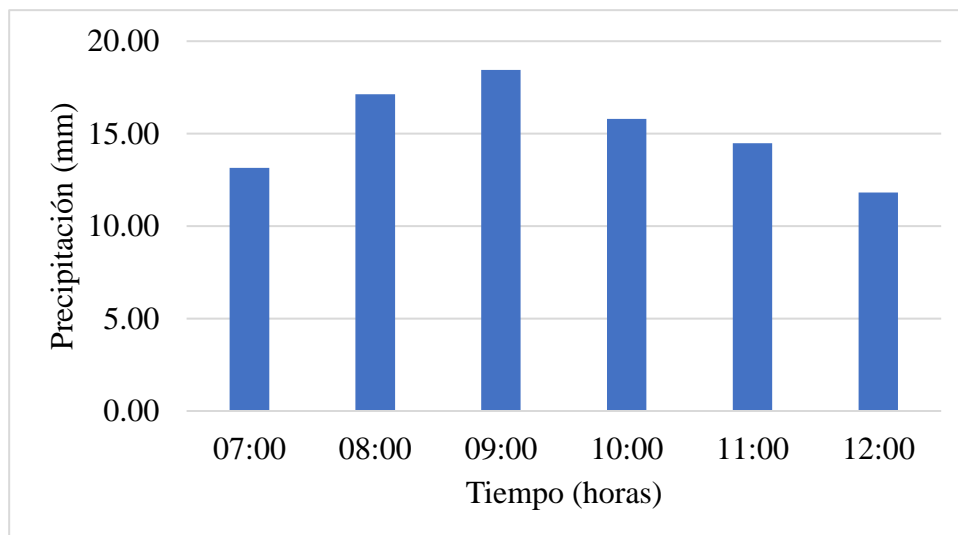
El Natural Resources Conservation Service del U.S Department of Agriculture (1986) - NRCS ex SCS, desarrollo hietogramas sintéticos de tormentas con duraciones de 6 y 24 h. Existen cuatro métodos de análisis de tormentas de 24 hora de duración, llamadas Tipo I, IA, II y III, respectivamente. Para el presente estudio se aplica tormentas del Tipo II, que se asemeja a las condiciones de la sierra peruana. Falta perfiles de formato tipo 1 2 y 3

El hietograma es una manera gráfica de representar la lluvia incremental, donde se presenta un diagrama de barras mediante el método de los bloques en una secuencia temporal alternos, esto produce un histograma mostrando los umbrales de precipitación en  $n$  intervalos periodos de tiempo  $|T|$ , estas cantidades de precipitación o bloques se ordenan de manera el ímpetu máximo se de en la mitad o zona central requerida y los demás bloques se ordenen descendentemente por el lado derecho e izquierdo, también se puede ordenar de manera incremental y descendente, para este estudio se ordenó de manera donde la intensidad máxima este en el bloque central. En la figura 11 y 12 se muestra el hietograma de diseño para un intervalo de seis horas precipitaciones máximas modelado del WRF promedio de los seis puntos de análisis y hietograma de diseño promedio para seis horas de las seis estaciones meteorológicas completadas por regresión lineal.



**Figura 11.** Hietograma de diseño para 6 horas, precipitación promedio WRF de los seis puntos de estudio.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 12.** Hietograma de diseño para 6 horas, precipitación estaciones meteorológicas promedio de los seis puntos de estudios completadas por regresión lineal.

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.3.3.3 Modelamiento hidrológico en HEC-HMS

El software HEC-HMS creado por la USACE (United States Army Corps of Engineers).



Utilizando el software HEC-HMS se procede con la modelación escorrentía superficial utilizando la precipitación, representado en toda la cuenca siendo un sistema interconectado de los componentes hidrológicos.

Los componentes hidrológicos se interconectaron en las 09 subcuencas en la red hidrológica y se calcula en sentido de la gravedad desde aguas arriba hacia aguas abajo.

Aplicando el software HEC-HMS para obtener los caudales máximos en el día 17 de febrero del 2012 se graficaron los hidrogramas de caudales máximos, en el punto de análisis (puente llave estación hidrométrica).

Se procedió el modelamiento en HEC-HMS en cuatro componentes:

- Modelamiento de la cuenca (Basin Model).
- Data de serie instantánea (Time Series Data).
- Modelo meteorológico (Metereologic Model).
- Especificaciones de control (Control Especifications).

## **a. MODELADO CUENCA**

### **a.1 Parámetros geomorfológicos de la cuenca.**

Para el modelamiento hidrológico es necesario conocer los parámetros geomorfológicos previos datos como: área, longitud del cauce principal y pendiente para cada subcuenca.

Los parámetros geomorfológicos a usar se obtienen del software HEC-HMS 4.7.1 los cuales las unidades de medida son: Área en (km<sup>2</sup>), distancia del cauce principal en (km) y pendiente adimensional en (m/m).

**Tabla 13.** Parámetros geomorfológicos para las 09 subcuencas.

Sub - cuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Longitud del cauce P. (km)	Pendiente (m/m)
Bajo Ilave	143,97	29,57419	0,01542
Aguas Calientes	3698,1	137,73633	0,00778
Medio Bajo Ilave	728,86	68,83265	0,00959
Conduriri	627,72	54,99822	0,02224
Medio Ilave	78,724	20,65332	0,01063
Ayupalca	364,25	40,01707	0,02469
Medio Alto Ilave	890,07	60,11919	0,02148
Llusta	519,82	39,57172	0,02667
Alto Ilave	720,41	66,99278	0,02052

**Fuente:** Elaboración propia.

## a.2 Discretización de la cuenca

Consiste en la división de la cuenca en 09 subcuencas las cuales se conectarán a una red de drenaje (arroyos, ríos, etc.), por medio del software HEC-HMS se generan las subcuencas que sumadas engloban toda el área de la cuenca.

Para ello se realizó lo siguiente:

1. Partiendo del DEM descargado de la USGS (ciencia para un mundo cambiante) entrega 06 DEM generalizados que contempla la cuenca Ilave, esto se procesa en Arcmap 10.8 con la herramienta Mosaic to New raster (uniendo los DEM a un solo DEM). Se extrae el DEM con la herramienta clip superponiendo la cuenca Ilave; obteniéndose así el DEM para la cuenca Ilave.
2. En el software HECHMS se carga el DEM de la cuenca Ilave y se coloca las coordenadas del sistema “WGS\_1984\_UTM\_Zona\_19S” en el Ítem GIS y la herramienta Coordinate System.
3. Luego en el Ítem GIS se procesa con la herramienta Preprocess Skin. Hace la corrección de imperfecciones del DEM.



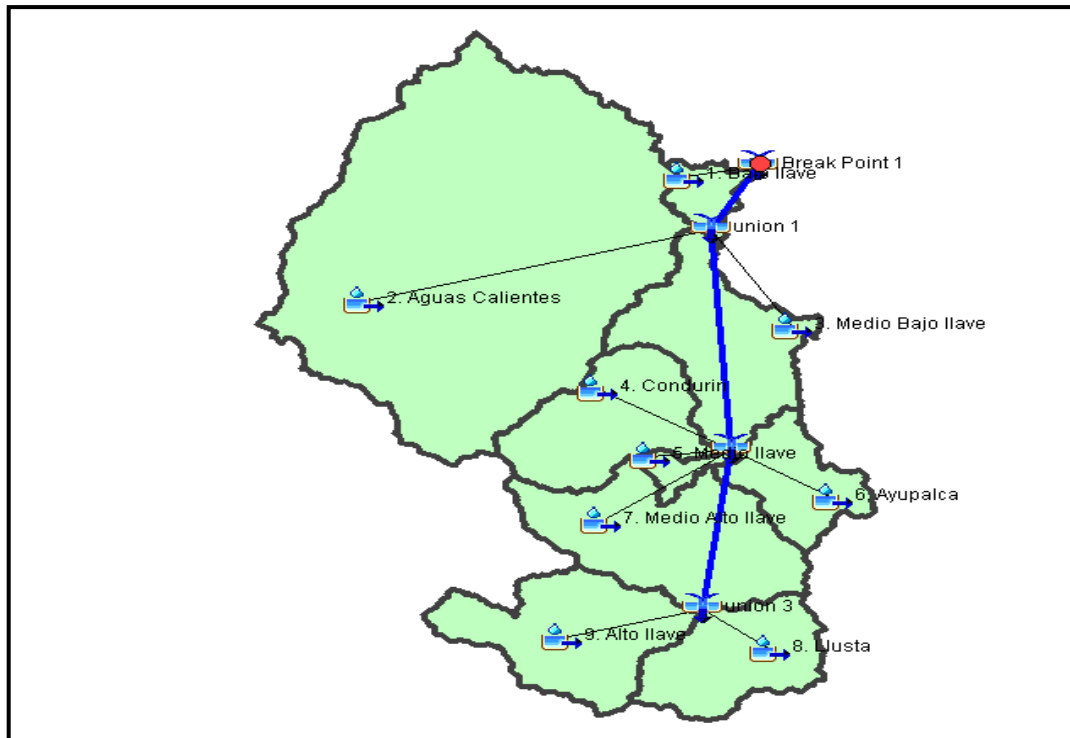
4. Continuando en el Ítem GIS se hace clic en la herramienta Preprocess Drainage con un rango de 250 km. que procesa el drenaje.
5. En el mismo ítem GIS clic en la herramienta Identify Streams; el cual procesa la dirección de flujo, el flujo acumulado y la localización de depreciaciones.
6. Finalmente se identifica el punto de aforo o de salida de la cuenca y se hace clic en la herramienta delineate elements (delineación de elementos) y con la herramienta merge elements se obtiene las 09 subcuencas.

### **a.3 MODELO CUENCA ILAVE**

El modelado interpreto a la cuenca Ilave interconectados de los componentes como sistema hidrológico. Convirtiendo precipitación-escorrentía para cada subcuenca; teniendo los componentes de subcuencas (subbasins), el tránsito de ríos denominado (reachs), y los nodos de salidas, el análisis y combinaciones de hidrogramas (junction).

La cuenca fue dividida en subcuencas. Teniendo el objetivo de obtener características físicas, pendiente, tasa de infiltración, etc.

Para el modelamiento hidrológico en la cuenca Ilave, se discretizo la cuenca en nueve subcuencas (subbasin) elementos de escorrentía superficial, 04 tramos (reach) de flujo de caudal y 4 uniones (juntion). El esquema se observa en la figura 13.



**Figura 13.** Elementos hidrológicos interconectados – cuenca Ilave.

**Fuente:** Elaboración propia.

## METODOLOGIA DEL HIDROGRAMA UNITARIO DE CLARK

Esta metodología permite hallar un hidrograma unitario para la cuenca Ilave, convirtiendo el excedente de precipitaciones a escorrentía directa. Calculando el tiempo de concentración ( $T_c$ ) y de retardo (lag time) que se ingresan estos datos al modelamiento a realizar.

### TIEMPO DE CONCENTRACIÓN Y RETARDO

#### - TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Para hallar el tiempo de concentración de este proyecto de investigación se utilizó las fórmulas de Kirpick, Temez y California en minutos.

#### -Formula Kirpick:

$$T_c = 0.01947 * L^{0.77} * S^{-0.385} \quad (19)$$





Donde:

$T_c$  = Tiempo de concentración

L = Longitud del cauce desde aguas arriba hasta la salida, m.

S = Pendiente promedio de la cuenca m/m.

**- Formula de Temez:**

$$T_c = 0.3 * \left( \frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76} \quad (20)$$

Donde:

$T_c$  = Tiempo de concentración.

L = Longitud del cauce desde aguas arriba hasta la salida, km.

S = Pendiente promedio de la cuenca m/m.

**- Formula de California:**

$$Tc = 60 * \left( 0.066 \left( \frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77} \right) \quad (21)$$

Donde:

$T_c$  = Tiempo de concentración

L = Longitud del cauce desde aguas arriba hasta la salida, km.

S = Pendiente promedio de la cuenca m/m.

El tiempo de concentración ( $T_c$ ) de las nueve subcuencas: Bajo Ilave, Aguas Calientes, Medio Bajo Ilave, Conduriri, Medio Ilave, Ayupalca, Medio Alto Ilave, Llusta y Alto Ilave con el método Kirpick, Temez y California en (min).

**Tabla 14.** Determinación del tiempo de concentración de las 09 subcuencas.

Sub - cuenca	Área (km)	Longitud del cauce P. (km)	Pendiente (m/m)	Kirpich (min)	Temez (min)	Formula California (min)
Bajo Ilave	143,97	29,57419	0,01542	268,9	217,5	267,8
Aguas Calientes	3698,1	137,73633	0,00778	1143,9	797,4	1139,6
Medio Bajo Ilave	728,86	68,83265	0,00959	618,7	452,3	616,3
Conduriri	627,72	54,99822	0,02224	376,5	325,1	375,1
Medio Ilave	78,724	20,65332	0,01063	235,3	177,7	234,4
Ayupalca	364,25	40,01707	0,02469	283,1	250,3	282,0
Medio Alto Ilave	890,07	60,11919	0,02148	408,7	350,1	407,1
Llusta	519,82	39,57172	0,02667	272,5	244,5	271,4
Alto Ilave	720,41	66,99278	0,02052	452,1	383,5	450,3

**Fuente:** Elaboración propia

#### - TIEMPO DE RETARDO (LAG TIME)

Para este tiempo se considera el ochenta por ciento (60%) del tiempo de concentración debido a que se necesitó calibrar y al ajustar el tiempo de concentración.

$$Tr = 60\% * Tc \quad (22)$$

Donde: Tr = tiempo de retardo y Tc = tiempo de concentración.

**Tabla 15.** Determinación del tiempo de retardo de las subcuencas.

Sub - cuenca	Tc promedio (min)	Lag Time Tr (min)
Bajo Ilave	251,4	150,8
Aguas Calientes	1027,0	616,2
Medio Bajo Ilave	562,4	337,5
Conduriri	358,9	215,3
Medio Ilave	215,8	129,5
Ayupalca	271,8	163,1
Medio Alto Ilave	388,6	233,2
Llusta	262,8	157,7
Alto Ilave	428,6	257,2

**Fuente:** Elaboración propia



En la tabla 15 se muestra el tiempo de concentración promedio en minutos y el tiempo de retardo (lag time) en minutos para las nueve subcuencas discretizadas.

### **MÉTODO DEL SERVICIO DE CONSERVACIÓN DE SUELOS (SCS)**

A partir de esta metodología se determinó el excedente de precipitaciones, siendo la diferencia en relación a las abstracciones de las precipitaciones. Ingresando las abstracciones iniciales (Ia) y números de curva (CN) para cada subcuenca.

### **NUMERO DE CURVA (CN)**

Esta metodología pide la determinación del valor CN (curva número). Esto se determinará mediante la información del uso del suelo y del tipo de suelo, dividiendo cada subcuenca que tendrá distintos usos de suelo en CN, para esto se necesitará un CN ponderado.

$$CN = \frac{\sum C_{ni}A_i}{\sum A_i} \quad (23)$$

y de esta manera hallar el número de curva CN para toda la cuenca llave.

Para la determinación del número de curva se definió en base a la recopilación bibliográfica de estudios realizados sobre la cuenca llave y recomendaciones como tablas y gráficos.

Para el Perú el CN tiene que ser igual o mayor a 80 en regiones de cuenca de Sierra y costa según las como aplica ELECTROPERU.

En base a estudios anteriores, del marco teórico y del estudio hidrológico volumen I evaluación de los recursos hídricos en la cuenca llave estudio realizado en el año 2009 toma como valor de CN=82 el cual se optó para este estudio.



## **MÉTODO DE RECESIÓN CONSTANTE DEL FLUJO BASE**

El hidrograma resultante del caudal máximo para la cuenca llave, es la suma de los hidrogramas de salida de las subcuencas con escorrentía directa y flujo base. Y como constante de recesión se usó de 0.6 de valor considerándolo como flujo superficial.

### **b. SERIE DE DATA INSTANTÁNEOS**

Con la herramienta Time Series Data se ingresan las series de data de precipitación instantáneas calculados tanto de las salidas del modelamiento en WRF y la información meteorológica que se tiene de las estaciones proporcionadas por SENAMHI que previamente fueron completadas y también se ingresaron los caudales insitu en la calibración del modelo.

### **c. MODELO METEREOLÓGICO**

Para el modelamiento meteorológico se definió una avenida:

Avenida 17/02/2012:

En esta fecha seleccionada según INDECI se ha dado máximas avenidas como eventos extremos causando inundaciones desbordes daños en general, por ello se ha definido analizar ese día.

- Se tiene dos hietogramas de precipitación uno a partir de las salidas del modelamiento en WRF para los seis puntos de estudio y los otros datos proporcionados por SENAMHI en 24 horas, los cuales no eran completos y se completaron con regresión lineal simple.

- El tiempo de concentración ( $T_c$ ) y tiempo de retardo (lag time) se consideró según tabla 14.

- El tiempo de estudio es de 07:00 am a 12:00 m separados en intervalos de 1 hora.

- Para la presente investigación se consideró tormentas del Tipo II, similares al medio natural de la serranía peruana.

#### **d. ESPECIFICACIONES DE CONTROL**

Como especificación de control definió la fecha 17 de febrero del 2012 de 07:00 am como inicio y finalización a 12:00 m horas en el computado del modelo, en intervalos de 1 hora de tiempo.

#### **3.3.3.4 Calibración Modelamiento Hidrológico**

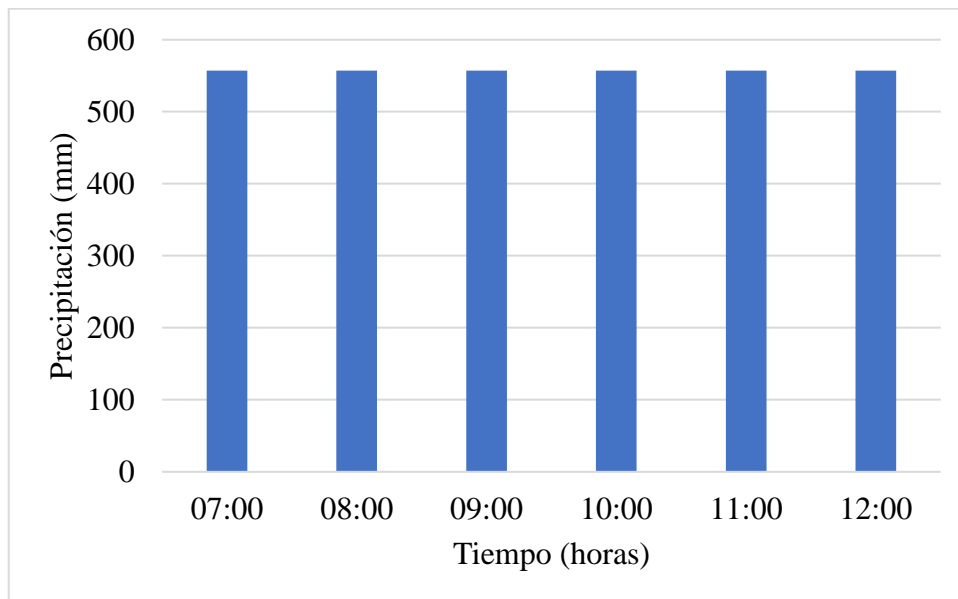
Para la calibración del modelamiento hidrológico se usó el método iterativo ingresando caudales de 24 horas para el día 17/02/2012; corriendo el programa el hidrograma resultante de la cuenca Ilave modelado en HEC-HMS posteriormente estos son comparados con los caudales proporcionados por SENAMHI observando que no exista mucha diferencia entre sí. En la tabla 16 se muestra los caudales ingresados para la calibración del caudal modelamiento para seis horas, debido a que la solicitud de información a la institución SENAMHI el pedido de caudales horarios para el día 17/02/2012 solo se nos proporcionó un caudal de 557.16 m<sup>3</sup>/s esto se toma para cada hora desde las 00:00 horas del 17/02/2012 al 00:00 horas del 18/02/2012.

**Tabla 16.** Caudales ingresados para calibrar el modelo

<b>Tiempo</b>	<b>Caudales</b>
<b>Hora</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>
07:00	557.16
08:00	557.16
09:00	557.16
10:00	557.16
11:00	557.16
12:00	557.16

**Fuente:** Elaboración propia

Debido a que SENAMHI nos proporcionó un solo caudal de 557.16 para el 17 de febrero del 2012 se le considera constante para la calibración.



**Figura 14.** Hietograma de diseño para 6 horas, caudales máximos observados

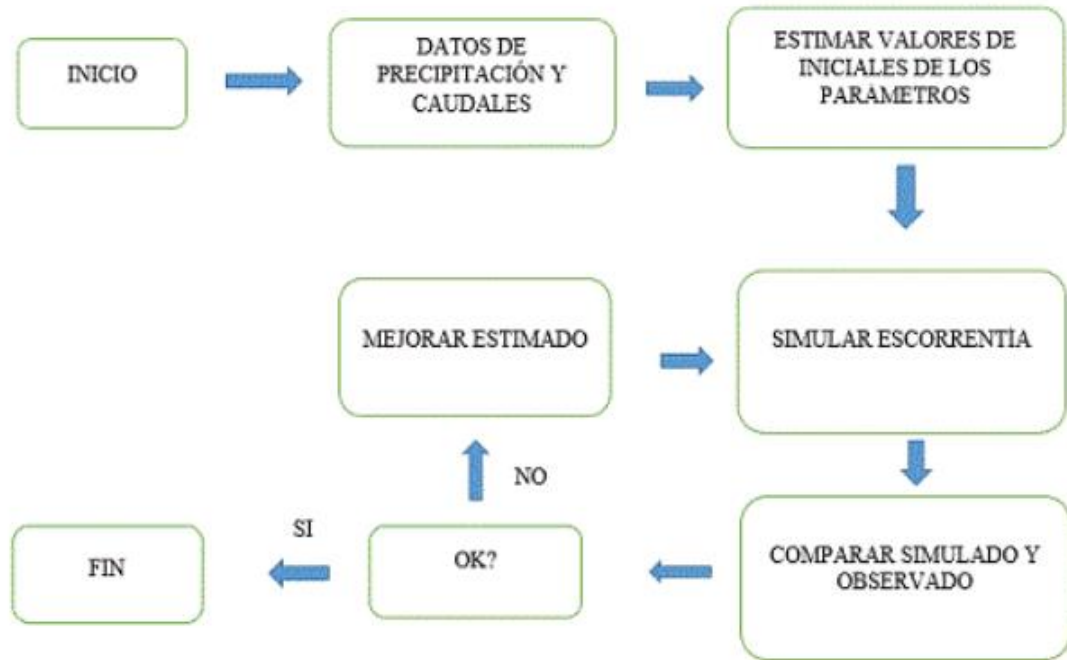
**Fuente:** Elaboración propia

La figura 14 muestra el hietograma de diseño para seis horas caudales observados máximos con el cual se ajustó a la calibración.

En el proceso iterativo se observa que los caudales disminuyen al aumentar el tiempo de retardo al 60% donde es próximo a los caudales observados.

Una vez simulado en el software HEC-HMS 4.7.1, se lograron los caudales elevados a partir de los hidrogramas para la cuenca ya simulados. Posteriormente se compara con los caudales observados ver tabla 16, la comparación permite ver que no exista mucha diferencia entre estos y sea lo más mínimo posible.

El procedimiento para la calibración se muestra en la figura 14.



**Figura 15.** Proceso de calibración

**Fuente:** HEC-HMS Technical Reference Manual. 2000.

Para la calibración se optimizaron los parámetros trial como se muestra a continuación:

- Generación de caudales a partir de las salidas de WRF:

**Tabla 17.** Resultados de los parámetros optimizados en la calibración.

Descripción	Parámetro	Calibración de las abstracciones iniciales	Valor óptimo
Subcuenca Bajo Ilave	SCS Curva Numero-Curva Numero	32	32
Subcuenca Aguas Calientes	SCS Curva Numero-Curva Numero	35	35
Subcuenca Medio Bajo Ilave	SCS Curva Numero-Curva Numero	33	33
Subcuenca Conduriri	SCS Curva Numero-Curva Numero	34.8	34.8
Subcuenca Medio Ilave	SCS Curva Numero-Curva Numero	30	30
Subcuenca Ayupalca	SCS Curva Numero-Curva Numero	37.5	37.5
Subcuenca Medio Alto Ilave	SCS Curva Numero-Curva Numero	32	32
Subcuenca Llusta	SCS Curva Numero-Curva Numero	36	36
Subcuenca Alto Ilave	SCS Curva Numero-Curva Numero	38.6	38.6

**Fuente:** Elaboración propia

- Generación de caudales a partir de la información existente:

**Tabla 18.** Resultados de los parámetros optimizados en la calibración.

Descripción	Parámetro	Calibración de las abstracciones iniciales	Valor optimo
Subcuenca Bajo Ilave	SCS Curva Numero-Curva Numero	35	35
Subcuenca Aguas Calientes	SCS Curva Numero-Curva Numero	33.846	33.846
Subcuenca Medio Bajo Ilave	SCS Curva Numero-Curva Numero	30	30
Subcuenca Conduriri	SCS Curva Numero-Curva Numero	35	35
Subcuenca Medio Ilave	SCS Curva Numero-Curva Numero	30	30
Subcuenca Ayupalca	SCS Curva Numero-Curva Numero	40	40
Subcuenca Medio Alto Ilave	SCS Curva Numero-Curva Numero	32	32
Subcuenca Llusta	SCS Curva Numero-Curva Numero	35	35
Subcuenca Alto Ilave	SCS Curva Numero-Curva Numero	35	35

**Fuente:** Elaboración propia

Después de aplicado la modelación hidrológica, se obtuvieron los caudales máximos para el día 17/02/2012 en intervalos de una hora, después de ello es necesario ver el tránsito de las avenidas en todos los tramos del cauce de aguas arriba hacia aguas debajo de tal manera obtener caudales óptimos.

Para la validación de los caudales generados se utilizará las siguientes metodologías:

#### **Criterio de Schultz (D):**

Este criterio simboliza el desvío de los caudales simulados con los observados y se determina con la siguiente ecuación (24):

$$D=200 \frac{\sum_i^n |Q_{sim,i}-Q_i|*Q_i}{n*(Q_{max})^2} \quad (24)$$

Donde: D= Criterio de Schultz,  $Q_{sim,i}$ = Caudal simulado inicial,  $Q_i$ = Caudal observado y  $Q_{max}$ = Caudal máximo observado en el periodo de retorno analizado.

Este criterio se recomienda al analizar eventos de elevada resolución temporal.



### **Desviación media acumulada (MAD):**

Definida con la ecuación (21):

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{sim,i} - Q_i|}{n} \quad (25)$$

Donde: MAD= Desviación acumulada media,  $Q_{sim,i}$ = Caudal simulado inicial,  $Q_i$ = Caudal observado.

En la calibración la desviación media acumulada debe ser minimizada para obtener un mejor ajuste de la variable simulada y observada.

### **Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E):**

Uno de los más usados para evaluar los modelos hidrológicos, el cual se calcula con la siguiente ecuación (22):

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n ((Q_{sim,i} - Q_i)^2)}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (26)$$

Donde: E= Eficiencia de Nash-Sutcliffe,  $Q_{sim,i}$ = Caudal simulado inicial,  $Q_i$ = Caudal observado y  $\bar{Q}$ = Valor absoluto del caudal.

Cuando la simulación es correcta tiende E=1, E=0 si se quiere ajustar lo observado con un valor promedio.

### **Raíz del error cuadrático medio (RSME):**

Raíz del error cuadrático medio (RSME) que facilita medir la desviación de los valores pronosticados y observados, se halla por la ecuación (d).

$$RSME = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - o_n)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

Donde:



RMSE: Raíz de error medio cuadrático.

$f_n$ : Es el valor medido en un punto dado.

$o_n$ : Es el valor pronosticado según el modelo.

n: Es el número de datos analizados iniciales y finales.

El límite de la cantidad que puede tomar es desde el cero (0) hasta el infinito positivo. Siendo cero a un ajuste perfecto y cantidades mayores o elevadas representa un ajuste menor.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 EXTRACCIÓN DE DATA DEL MODELO GLOBAL METEOROLÓGICO (GFS).

Según Ticona (2016) menciona que es un modelo global de pronóstico de tiempo.

El área de estudio se centró en el dominio anidado d02 con resolución espacial de 9 km que cubre la cuenca Ilave, considerando la orografía de la región. Antes de ello fue necesario desarrollar los dominios d01 (dominio padre), d02 (dominio de anidamiento), de resolución espacial 27 y 9 km con el objetivo de minimizar las dificultades de frontera y/o borde haciendo que los dominios padre y anidado estén influenciados por el sistema meteorológico mesoescalar.

```
#!/bin/sh

for m in 15 16 17 18 ;do

for i in 00 06 12 18;do

for l in 0 ;do

iyear=2012
imonth=02
dayy=$m

horaa=$i

cdh=$l

wget https://www.ncei.noaa.gov/data/global-forecast-system/access/historical/analysis/${iyear}
${imonth}/${iyear}${imonth}${dayy}/gfsanl_4_${iyear}${imonth}${dayy}_${horaa}00_00${cdh}.grb2
#wget ftp://nomads.ncdc.noaa.gov/GFS/analysis_only/${iyear}${imonth}/${iyear}${imonth}${dayy}
/gfsanl_4_${iyear}${imonth}${dayy}_${horaa}00_00${cdh}.grb2

done

done

done

#mkdir ${imonth}${iyear}
#mv *.grb2 ${imonth}${iyear}
```

**Figura 16.** Proceso de calibración.

**Fuente:** HEC-HMS Technical Reference Manual. 2000.



Se descargó la data del Sistema de Pronóstico Global (GFS) para el 17 de febrero 2012. De forma horaria.

La descarga de los datos se realizó desde el Sistema de Pronóstico Global, GFS, con resolución espacial de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  y transitorio de 6 hora. Estos datos están en formato GRIB2.

La información proveniente del sistema de pronóstico global (GFS) con resolución transitorio de seis horas, descargados para las 00Z, 06Z, 12Z, 18Z horas de tal manera hacer una sola ejecución del modelo, con lo cual se generó el pronóstico para 24 horas centrándonos en el día 17/02/2012, “en las primeras 12 horas los pronósticos se obvian ya que se da un efecto spin-up” (Coiffier, 2011) las causas de este efecto derivan ya que las horas de empiezo en la integración del pronóstico se observa vaivenes debido a la formación de ondas inerciales y gravitacionales propagandose, y que en un intervalo de tiempo, se esparcen y se aminoran debido a la disipación del modelo.

**Tabla 19.** Características data de entrada al modelo

	<b>Condiciones iniciales</b>	<b>Condiciones de frontera</b>
<b>Tipo de datos</b>	Datos de análisis	Datos de análisis
<b>Modelo global</b>	GFS	GFS
<b>Resolución espacial</b>	$0.5^\circ * 0.5^\circ$	$0.5^\circ * 0.5^\circ$
<b>Resolución temporal</b>	3h	3h
<b>Formato de archivo</b>	GRIB2	GRIB2

**Fuente:** Elaboración propia.

En la tabla 19 se muestra las características de datos iniciales al modelado condiciones primarias y condiciones de frontera se muestra las características de datos que vendría a ser información de estudio, del sistema de pronóstico global (GFS), con

resolución espacial de  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ , resolución temporal de 6h y formato del archivo GRIB2; la cantidad de datos a ser recopilados dependerá del tiempo del pronóstico (24 horas), de la cantidad de ejecuciones y la resolución temporal como data de entrada para seis horas para las condiciones iniciales se descargó 5 datos y como condiciones finales se descargó 4 como condición de frontera. Teniendo una condición inicial de 55 km y condición final de 9 km en la única ejecución del modelo, como se observa en la tabla 20 considerándose que son datos descargados del modelo GFS.

**Tabla 20.** Data de entrada al modelo WRF

Periodo	N° de ejecuciones	Resolución temporal	CI	CF	Total
17/02/2012	01	3 horas	55 km	9 km	64 km
TOTAL	01	3 horas	55 km	9 km	64 km

**Fuente:** Elaboración propia.

En la tabla 20 se muestra el periodo comprendido para el día 17 de febrero del 2012 con un total de 01 ejecuciones a una resolución temporal de 06 horas, una condición inicial de 55 km, y condición final de 9 km resultando un total de 64 km.

Moya (2015) construyo 02 dominios un externo e interno de  $24 \times 24$  km y  $8 \times 8$  km resolutive, evaluando desde 6 hasta 42 horas, como condición inicial tomo 24 km y como condición final 8 km, teniendo como resultado una resolución menor en nuestra presente investigación se tomó como condición inicial 55 km y condición final 1 km teniendo como resultado una mejor resolución a 1km.

Según Naabil (2017) en su investigación determino un dominio externo (condición inicial) de 25 km ( $160 \times 130$  grid points) de resolución horizontal y un dominio interno (condición final) de 5 km ( $111 \times 111$  grid points) resolución horizontal; su

condición final tiene una mayor resolución con diferencia a 4 km ya que es próximo a 1km en nuestra investigación también menciona que la diferencia en las resoluciones una vez simulado podría deberse a los diferentes dominios y tamaños de la cuadrícula, es posible que debido al tamaño del dominio interno, las condiciones de contorno no se resolvieran bien.

Según Pennelly (2013) en su investigación analizo a 30 km, 15 km y 6 km distribuido para 48 horas indicando que a 6 km la condición final presenta una alta resolución en la simulación y altos errores a 15 kilómetros en la simulación, comparando con los resultados de pennelly en nuestra investigación la condición final a 1km mostraría una mayor resolución.

#### **4.2 OBTENCIÓN DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS CON EL MODELO METEOROLÓGICO WRF.**

Como resultado final del modelamiento en WRF se obtuvo las siguientes salidas de precipitaciones máximas para el día 17 de febrero del 2012 simulada para seis horas:

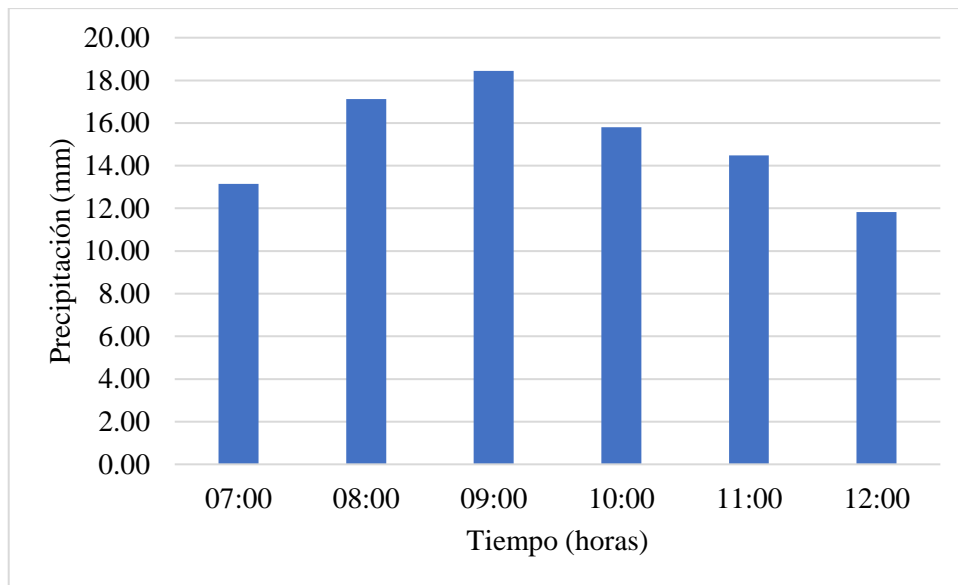
**Tabla 21.** Precipitaciones máximas promedio resultante.

<b>Hora (h)</b>	<b>Precipitación máxima (mm)</b>
07:00	18.45
08:00	17.13
09:00	15.80
10:00	14.48
11:00	13.15
12:00	8.74

**Fuente:** Elaboración propia.

En la tabla 21 se muestra precipitaciones máximas promedio resultante desde las 07:00 horas hasta las 12:00 horas en intervalos de una hora para la fecha ya mencionada.

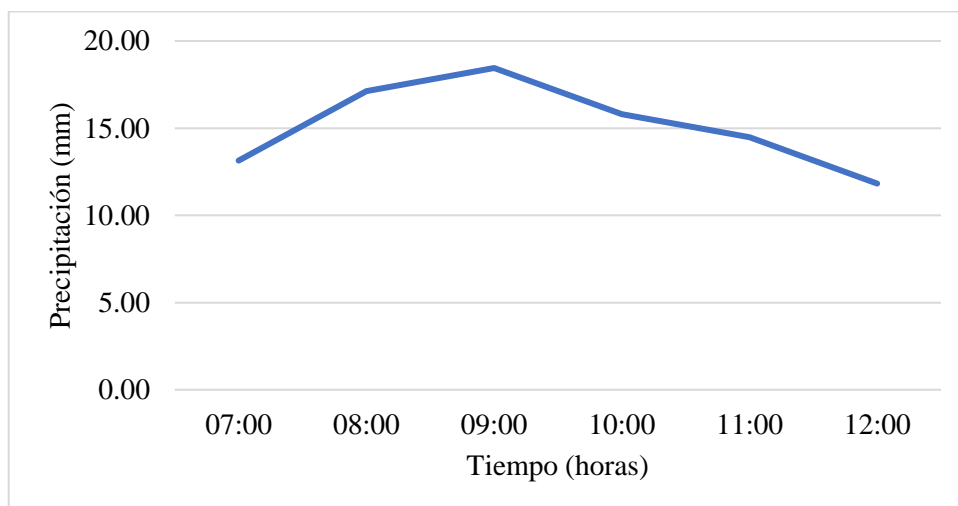
Se generó el hietograma resultante para un periodo de diseño de seis horas.



**Figura 17.** Hietograma de diseño para 6 horas, precipitación promedio WRF.

**Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 17 se muestra el hietograma de diseño resultante promedio de las precipitaciones resultantes del modelamiento en WRF, donde el máximo valor se da a las 09:00 con una precipitación de 18.45 mm y el mínimo valor a las 12:00 con 11.83 mm de precipitación.



**Figura 18.** Grafica de 6 horas, precipitación promedio WRF.

**Fuente:** Elaboración propia.



En la figura 18 se muestra el comportamiento de las precipitaciones promedio a partir de las salidas en WRF resultante después de ser modelado, obteniéndose como resultado máximo de 18.45 mm el pico más y la precipitación menor se presenta a las 12:00 con 11.83 mm; además se observa que en la gráfica toma forma similar a la campana de Gauss una oscilación con subida y caída.

El mapa de precipitaciones grilladas de alta resolución de 27 y 9 km se muestra en el anexo 8, para el día 17 de febrero del 2012 en intervalos de 3 horas desde las 07:00 am hasta las 12: 00 pm.

#### **4.2.1 Validación del pronóstico de precipitaciones máximas**

Para la validación de data obtenida se analizó las salidas del WRF precipitaciones máximas horarias con los datos observados de las estaciones meteorológicas completadas con el método de regresión lineal simple.

Completación de datos faltantes con el método regresión lineal simple:

Para completar las precipitaciones faltantes para el 17/02/2012 de los datos existentes proporcionados por SENAMHI de las estaciones meteorológicas: Ilave, Laraqueri, Mazo Cruz, Capazo, Juli y Vilacota se completó con el método de regresión simple a partir de la data existente de manera horaria, se muestra en la tabla 22:





**Tabla 22.** Completación de precipitación por el método de regresión lineal para las 06 estaciones en estudio para el 17/02/2012 por cada hora.

<b>Hora (h)</b>	<b>Estación Laraqueri Precipitación (mm)</b>	<b>Estación Mazo Cruz Precipitación (mm)</b>	<b>Estación Capazo Precipitación (mm)</b>	<b>Estación Juli Precipitación (mm)</b>	<b>Estación Ilave Precipitación (mm)</b>	<b>Estación Vilacota Precipitación (mm)</b>
01:00	51.3503	6.3000	9.9997	32.4497	48.2500	10.0503
02:00	48.7086	6.0500	9.6664	30.6914	45.6250	9.7086
03:00	46.0669	5.8000	9.3331	28.9331	43.0000	9.3669
04:00	43.4252	5.5500	8.9998	27.1748	40.3750	9.0252
05:00	40.7835	5.3000	8.6665	25.4165	37.7500	8.6835
06:00	38.1418	5.0500	8.3332	23.6582	35.1250	8.3418
07:00	35.5001	4.8000	7.9999	21.8999	32.5000	8.0001
08:00	32.8584	4.5500	7.6666	20.1416	29.8750	7.6584
09:00	30.2167	4.3000	7.3333	18.3833	27.2500	7.3167
10:00	27.5750	4.0500	7.0000	16.6250	24.6250	6.9750
11:00	24.9333	3.8000	6.6667	14.8667	22.0000	6.6333
12:00	22.2916	3.5500	6.3334	13.1084	19.3750	6.2916
13:00	19.6499	3.3000	6.0001	11.3501	16.7500	5.9499
14:00	17.0082	3.0500	5.6668	9.5918	14.1250	5.6082
15:00	14.3665	2.8000	5.3335	7.8335	11.5000	5.2665
16:00	11.7248	2.5500	5.0002	6.0752	8.8750	4.9248
17:00	9.0831	2.3000	4.6669	4.3169	6.2500	4.5831
18:00	6.4414	2.0500	4.3336	2.5586	3.6250	4.2414
19:00	3.7997	1.8000	4.0003	0.8003	1.0000	3.8997
20:00	1.1580	1.5500	3.6670	-0.9580	-1.6250	3.5580
21:00	-1.4837	1.3000	3.3337	-2.7163	-4.2500	3.2163
22:00	-4.1254	1.0500	3.0004	-4.4746	-6.8750	2.8746
23:00	-6.7671	0.8000	2.6671	-6.2329	-9.5000	2.5329
00:00	-9.4088	0.5500	2.3338	-7.9912	-12.1250	2.1912

**Fuente:** Elaboración Propia.



En la tabla 22 se muestra que se completaron las precipitaciones faltantes por el método de regresión lineal para el 17/02/2012 en intervalos de cada hora, esta información se utilizó para graficar los hietogramas de diseño que se usó para la modelación hidrológica en el software HEC-HMS cuyo fin tiene generar caudales máximos.

Para las estaciones meteorológicas: Ilave, Laraqueri, Mazo Cruz, Capazo, Juli y Vilacota el coeficiente de correlación resulto  $R=1$  como se muestra en el anexo 6, lo que indica una correlación positiva perfecta. Por lo cual, se toma estos resultados para la modelación hidrológica en la cuenca Ilave.

Carrera (2016) define que el mejor método para la completación de datos en series temporales en la región andina y costera del Ecuador es el método de regresión lineal simple a causa de que no se tiene los valores y son carentes que proporciona el INAMHI.

El cual valido sus resultados por la prueba de rachas donde calculo la media anual de cada estación de su estudio calculando el NA, NB y NS sus datos se encontraron en el rango del 10% y 90%; también utilizo para validar el método de curva de doble masa o de acumulación donde de los dos métodos concluyo que su coeficiente de correlación R se aproxima a la unidad cumpliéndose su validación. Esto no difiere a los resultados obtenidos.

Según Gómez (2019), el método de regresión lineal simple permite obtener una ecuación que describe el comportamiento de dos variables diferentes en función de los datos obtenidos. Esta ecuación establece una relación bivariado que es útil para inferir datos desconocidos en la variable de interés. Para su aplicación se debe verificar o asumir ciertos supuestos sobre los datos de la normalidad donde tomo la no colinealidad de la



estimación aplicando el método Q-Q plot un análisis de cuartiles y el método de Shapiro Wilk.

En sus resultados obtiene valores altos de coeficiente de correlación lo que representa en general un buen ajuste de las estimaciones a la variable real.

Pizarro (2010) obtuvo resultados de coeficiente de correlación sobre los 0.75 lo que considera aceptables. Siendo próximo a 1 con respecto al valor obtenido a la correlación obtenida de las 06 estaciones estudiadas.

Herrera (2017), menciona para completar datos faltantes de precipitación pluvial anual para 13 estaciones climatológicas en la cuenca Guadalupe realizó una regresión lineal entre estaciones cercanas obteniendo un coeficiente de correlación lineal ( $r$ ) en todos los casos se obtuvo un alto valor que en promedio fue  $r=0.89$ . este valor es próximo del resultado obtenido en nuestra investigación  $r=1$  en las 06 estaciones analizadas.

Pizarro (2009) define que es un método de los más usados, donde se requiere una regresión y correlación lineal entre una estación patrón y la estación de información se considera aceptable una correlación mayor a  $R=0.8$  donde considera como un método de bondad de ajuste. Sin embargo, define que el mejor método de completación fue el de regresión múltiple con dos o tres estaciones cercanas según el análisis de Bland y Altman. En regresión lineal no obtuvo los mejores resultados.

En los resultados obtenidos de Ramos (2018) menciona que la regresión lineal es un método de gran aceptación, los datos analizados presentan un buen grado de correlación.

Sus resultados concluyen que no se obtuvo buenos resultados frente a otros métodos.



Luna (2015), concluye los resultados obtenidos por el tet ACBA, la regresión lineal se presenta como mejor método en MAG y LEV lo más idóneo es utilizar los métodos de regresión.

Hernández (2018), define que la correlación lineal es una de las más importantes y tal vez en la que más errores de interpretación se cometen el coeficiente de Pearson mide la dirección de la relación linealmente las variables. cómo se realizó en este análisis con los datos existentes.

En la investigación de Sotelo (2017) obtiene que la variable dependiente crezca junto con la variable independiente lo que indica que hay una linealidad positiva usando la variable Y crece a medida que la variable X también lo hace, donde obtuvo un coeficiente de correlación de  $r=0.864$ . siendo un valor aceptable al igual al valor obtenido de las 06 estaciones estudiadas.

Según Bermejo (2020), la suma de cuadrados de la regresión está por encima de la suma de cuadrados de los residuos, lo que es una medida del buen ajuste del modelo, por lo que se demuestra la baja significación.

Quien obtuvo un coeficiente de determinación de  $r^2 = 0.634$  un valor menor al obtenido un valor de 1.

Debido a que se obtuvo un coeficiente de correlación  $r = 1$  un valor positivo perfecto es aceptable los valores obtenidos con los cuales se utilizó.

Las figuras de completación lineal para las seis estaciones analizadas se muestran en el anexo 6.

Para la validación de los resultados del pronóstico de precipitaciones máximas a partir del modelamiento en WRF se utilizó las siguientes las medidas de precisión: error

medio absoluto (MAE), raíz del error medio cuadrático (RMSE) y desviación estándar precipitaciones máximas observadas (BIAS). En los seis puntos de análisis (estaciones meteorológicas), como se observa a continuación en la tabla 23:

**Tabla 23.** Cuadro resumen de la evaluación estadística medidas de precisión para las estaciones en estudio.

<b>Estaciones</b>	<b>Periodo</b>	<b>BIAS</b>	<b>MAE</b>	<b>RMSE</b>
Capazo	17/02/2012	1.34	2.12	2.78
Ilave	17/02/2012	1.78	2.78	3.4
Juli	17/02/2012	1.03	2.04	3.16
Laraqueri	17/02/2012	2.4	2.84	3.2
Mazo Cruz	17/02/2012	2.89	2.78	2.93
Vilacota	17/02/2012	1.38	1.29	1.93

**Fuente:** Elaboración propia.

La tabla 23 muestra la variabilidad en los puntos de observación un resumen de la evaluación estadística de medidas de precisión para las estaciones meteorológicas Capazo, Ilave, Juli, Laraqueri, Mazo Cruz y Vilacota en la tabla se muestra el promedio para el día 17/02/2012.

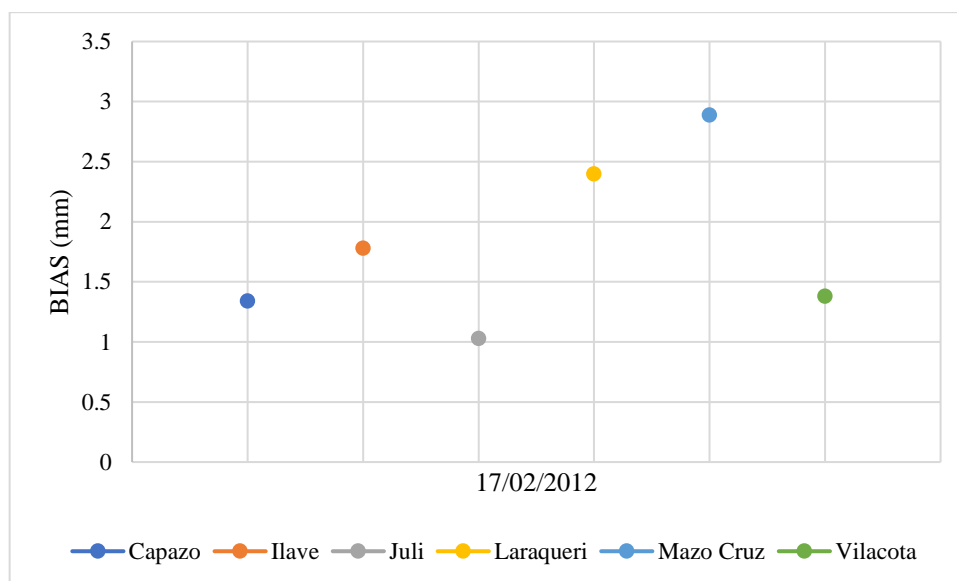
El BIAS menor de la evaluación estadística de medidas de precisión muestra que tiene menos cantidad de error en la estación de estudio de Juli con un valor de 1.03, y el BIAS mayor que menos precisión tiene vendría a ser en la estación Mazo Cruz con 2.89.

El MAE menor de la evaluación estadística de medidas de precisión muestra que tiene menos cantidad de error en la estación de estudio de Vilacota con un valor de 1.29 y el MAE mayor que menos precisión tiene vendría a ser en la estación Laraqueri con 2.84.

El RMSE menor de la evaluación estadística de medidas de precisión muestra que tiene menos cantidad de error en la estación de estudio de Vilacota con un valor de

1.93 y el MAE mayor que menos precisión tiene vendría a ser en la estación Ilave con 3.4.

En la tabla 23 se muestra los RMSE's similares para la estación Juli y Laraqueri existiendo una precisión similar en el pronóstico de estos dos puntos, sin embargo, el MAE (2.12, 2.78, 2.04, 2.84, 2.78, 1.29 respectivamente) logra mejor resultado que en el punto Vilacota, por lo tanto, se asevera el mayor valor de precisión ocurre en el punto Vilacota.



**Figura 19.** Variaciones BIAS promedio en cada punto de validación.

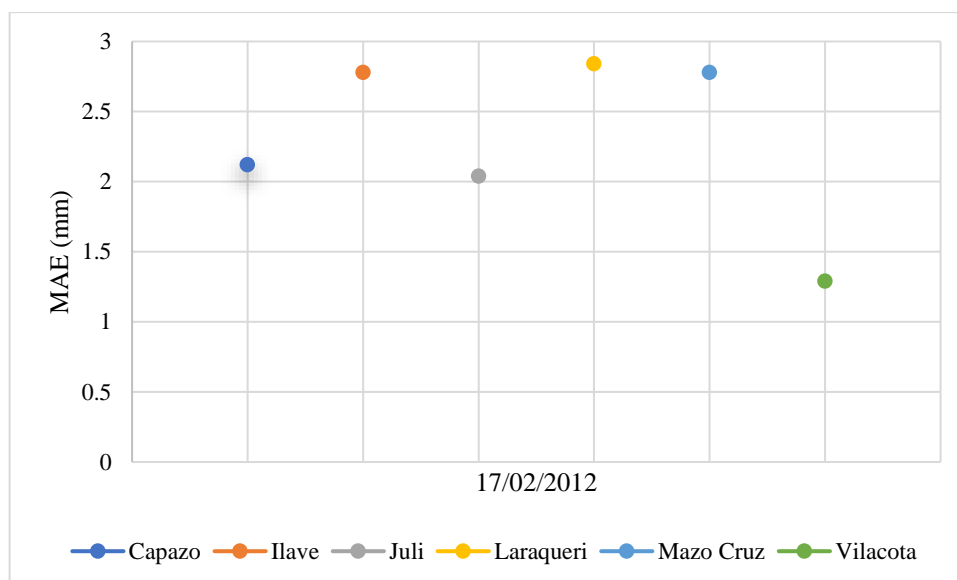
**Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 19 se observa las variaciones del BIAS promedio para los seis puntos de validación estaciones: Capazo, Ilave, Juli, Laraqueri, Mazo Cruz y Vilacota. Donde el BIAS menor presenta la estación Juli con 1.03, y el BIAS mayor presenta la estación Mazo Cruz con 2.89, el cual presenta sobreestimaciones. Se ha deducido que la parametrización escogida no asegura el pronóstico de calidad. Se debe realizar más pruebas con diferentes parametrizaciones y conocer más errores en los pronósticos

consecuentemente lograr reducir los errores en estas estaciones como se muestra en la figura 23.

Para Jiménez (2014) el BIAS es una estadística tradicional que se determina con la fórmula de la ecuación (10), calcula en variable continua, en su investigación encontró que el BIAS presenta altas sobreestimaciones al igual que en nuestra investigación.

Estas sobreestimaciones se deben debido a que existes carencia de observaciones (datos). En tal forma se concluye que el BIAS no solo está asociado a la orografía, también a la falta de datos.



**Figura 20.** Variaciones MAE promedio en cada punto de validación.

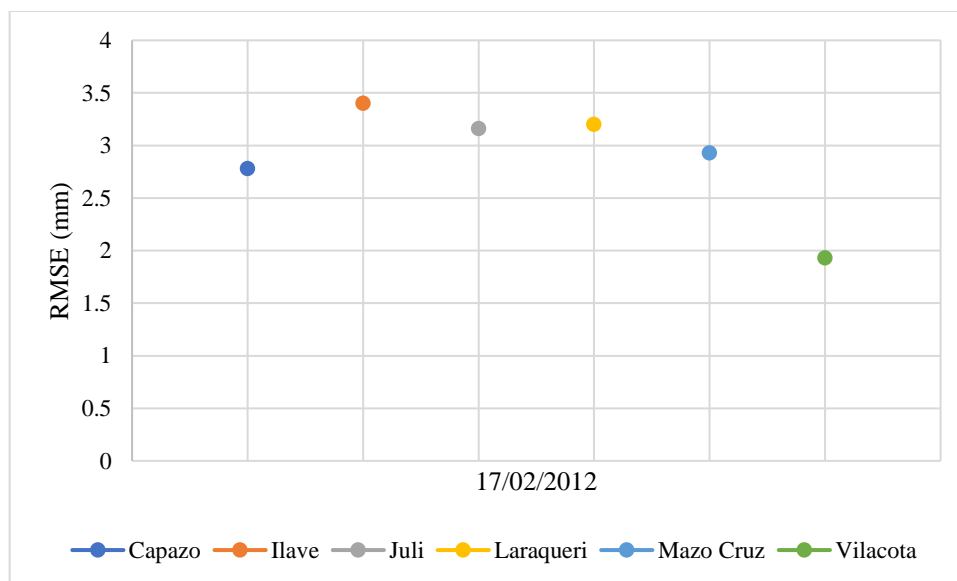
**Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 20 muestran las variaciones del MAE promedio para los puntos de validación en las seis estaciones: Capazo, Ilave, Juli, Laraqueri, Mazo Cruz y Vilacota. Donde la variación del MAE promedio (ver figura 22) se observa que el MAE menor es la estación Vilacota con 1.29 y el MAE mayor presenta la estación Laraqueri con 2.84. donde se aprecia sobreestimaciones, para determinar el MAE se aplica la ecuación (9), existe discrepancias entre los datos, esto se puede deber a que la formula MAE aplica

valor absoluto restando entre lo simulado y observado sin considerar los valores negativos. Los resultados no son casi nada confiables ya que no se cuenta con datos observados en toda la cuenca Ilave.

Jiménez (2014), encontró en su investigación que el MAE sobrestima los datos teniendo sobreestimaciones más intensas al oeste de la cordillera occidental, al oeste en el departamento de Antioqui. Concluyendo que no son confiables sus datos ya que no se tiene datos completos.

En tal sentido se concluye que el MAE no es confiable esto se debe a que toma como valor absoluto los valores, no considera las cantidades negativas esto hace que se sobreestime, también el MAE no es preciso ya que no se cuenta con datos observados en toda la zona de estudio existiendo falencias de data.



**Figura 21.** Variaciones RMSE promedio en cada punto de validación.

**Fuente:** Elaboración propia.

La figura 21 muestran las variaciones del RMSE promedio para los puntos de validación en las seis estaciones: Capazo, Ilave, Juli, Laraqueri, Mazo Cruz y Vilacota. Donde la variación del RMSE promedio (ver figura 23) se observa que el RMSE menor





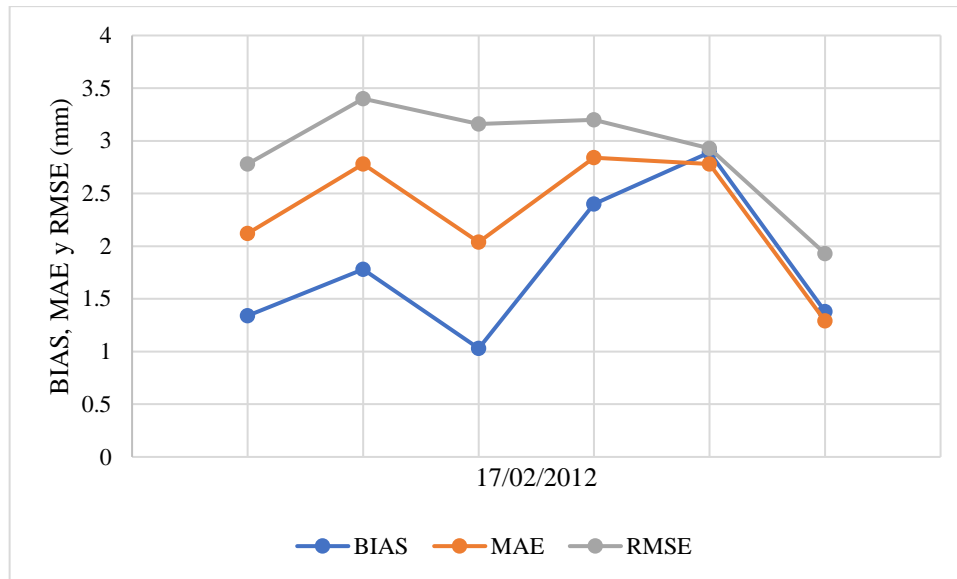
es la estación Vilacota con 1.93 y el RMSE mayor presenta la estación Ilave con 3.4. para determinar la ecuación del RMSE se aplica la fórmula de la ecuación (8). Al igual que en el BIAS Y MAE de las anteriores figuras 21 y 22 se observa sobrestimaciones mucho más representativas.

Arnault (2015), menciona que el RMSE sobre valora las estimaciones esto se debe a la elevación al cuadrado, la influencia de precipitación cambia dependiendo de la dimensión del dominio, es sobreestimado a un nivel elevado; con referencia a nuestros resultados encontrados están sobreestimados podría decirse que se comparte la idea en ambas investigaciones.

Para Jiménez (2014), la aplicación del RMSE usando la raíz cuadrada a los resultados muestran mayores valores sobre la cordillera occidental y norte central en su investigación valores más elevados a diferencia de nuestra investigación.

Se concluye que el RMSE tiene más sobreestimación marcada presentando entre discrepancias entre lo simulado – observado, esto se debe a que su ecuación sus diferencias son elevadas al cuadrado por tal razón se encuentran las sobreestimaciones.

El RMSE mayor ocurre en la estación Ilave; concluyéndose que la parametrización escogida no garantiza pronósticos de alta calidad para punto de estudio, es necesario aplicar otras parametrizaciones (microfísica) y comparar con otros resultados.



**Figura 22.** Variación del BIAS, MAE y RMSE promedio para cada punto de validación.

**Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 22 se muestra la variación del BIAS, MAE y RMSE promedio para cada punto de validación, apreciándose que el BIAS presenta menos valores de errores en la estimación, aunque presente sobreestimaciones con referencia al MAE y RMSE que se encuentran por encima de los valores del RMSE. Concluyéndose así que el BIAS es más óptimo en este análisis.

A menudo sucede que en los puntos de validación el error simulado no aumenta rápidamente pasado los dos a tres días de simulación, para pronosticar en mesoescala, ¿existe alguna razón de que los errores lleguen a ser elevados sabiendo que se simuló para un día (24 horas) y no haya llegado, se eleven desmedidamente a los dos a tres días de la simulación? Lo normal sería que los errores aumenten a los 2 a 3 días simulación, pero no se dio el caso ya que los errores eran ya aumentados esto se pudo dar debido a las condiciones de frontera condiciones iniciales, finales y la falta de datos observados. Para Kalnay, (2003) las exactitudes de las simulaciones este sujeto a las precisiones de



condiciones primarias y frontera. La información de estudio tiene la característica de ostentar elevada precisión que los datos de pronóstico por ser datos sofisticados corridos derivados de resultados reales discretos in situ.

En la presente investigación se ha estudiado el comportamiento del modelamiento solo para el día 17 de febrero del 2012 estos resultados dan razón que se podría obtener mejores resultados para análisis de fechas o intervalos más según estaciones del año preferentemente en verano y primavera, ya que según Warner (2011) los errores de pronóstico suelen a ser elevados para los meses fríos del año, siendo en verano y primavera donde se encuentre menores errores, por lo tanto, un mejor pronóstico.

### **4.3 GENERACIÓN DE LOS CAUDALES.**

#### **4.3.1 Generación de caudales a partir de las salidas de WRF**

Teniendo la cuenca Ilave discretizada en 09 subcuencas ver figura 21, los componentes hidrológicos definidos, las características geomorfológicas, el tiempo de concentración-retardo y el hietograma de diseño de las precipitaciones máximas a partir del modelamiento en WRF resultante promedio se procede a la modelación hidrológica de tal manera hallar los caudales máximos para 24 horas en intervalos de 1 hora para el 17 de febrero del 2012, principalmente ver el comportamiento del caudal para seis horas de análisis desde las 07:00 hasta las 12:00 horas.



**Figura 23.** Esquema de los elementos hidrológicos conectados – modelo de cuenca Ilave.

**Fuente:** Elaboración propia.

Para el modelamiento de la cuenca Ilave se discretizó como se muestra en la figura 23 contemplando las subcuencas: Bajo Ilave, Aguas Calientes, Medio Bajo Ilave, Conduriri, Medio Ilave, Ayupalca, Medio Alto Ilave, Llusta y Alto Ilave.

Para la generación de los caudales máximos se requiere hallar previamente los parámetros geomorfológicos ya que es indispensable esta información como se muestra a continuación en la tabla 24.

### - PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS:

Es necesario contar o tener los parámetros geomorfológicos siendo variables indispensables para el modelamiento hidrológico.

En la tabla 24 se muestra las características geomorfológicas importantes como: El área, longitud del río principal y pendiente para las subcuencas resultados obtenidos En el software HEC-HMS 4.7.1.

**Tabla 24.** Características geomorfológicas

Sub - cuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Longitud del cauce P. (km)	Pendiente (m/m)
Bajo Ilave	143.97	29.57419	0.01542
Aguas Calientes	3698.1	137.73633	0.00778
Medio Bajo Ilave	728.86	68.83265	0.00959
Conduriri	627.72	54.99822	0.02224
Medio Ilave	78.724	20.65332	0.01063
Ayupalca	364.25	40.01707	0.02469
Medio Alto Ilave	890.07	60.11919	0.02148
Llusta	519.82	39.57172	0.02667
Alto Ilave	720.41	66.99278	0.02052

**Fuente:** Elaboración propia.

La cuenca Ilave está dividida en nueve subcuencas como se muestra en la tabla 24, donde se determinó tres parámetros geomorfológicos claves para la modelización hidrológica.

Según Mendez (2005), en su investigación de la quebrada Curucutí (microcuenca) sobre geomorfología con el fin de evaluar los procesos de análisis obtuvo resultados de área 9.31 km<sup>2</sup>, longitud de la corriente principal 7.48 km y pendiente promedio 0.175;



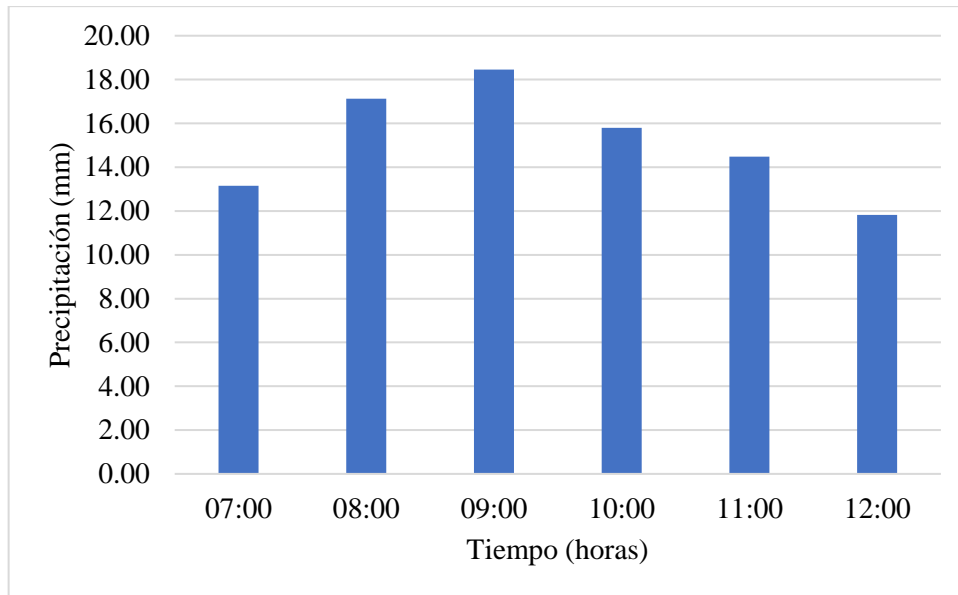
concluye que el drenaje en la microcuenca está determinada por la respuestas hidrológicas del área pequeña del mismo, fuertes pendientes, aportando así para la concepción y reevaluación en diseños hidrológicos e hidráulicos modelaciones y demás. Con relación a nuestra investigación los valores son superiores ya que son subcuencas y el uso es para la modelación hidrológica.

En la Tabla 24 se muestran valores calculados correspondientes a las características geomorfológicas de las subcuencas Ilave, citado por (Viramontes, 2007).

Gumindoga (2016) menciona necesario obtener la densidad de drenaje de la cuenca Ilave y ver su red de drenaje, parámetros importantes para el estudio de escorrentía de captación y otros procesos hidrológicos.

Saavedra (2001), establece que el presente valor de pendiente media se clasificaría, por el criterio de relieve o topografía según el terreno. Para nuestra investigación lo calculo el software HEC-HMS 4.7.1.

Para la generación de caudales máximos se trabajó a partir de las salidas del modelamiento en WRF. Resultados obtenidos del punto 4.2 de los resultados.



**Figura 24.** Hietograma de diseño para 6 horas, precipitación promedio (WRF).  
Para toda la cuenca Ilave.

**Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 24 se muestra el hietograma de diseño para un intervalo de seis horas resultado de la salida del modelamiento en (WRF) para toda la cuenca Ilave. Para la generación de caudales a partir del modelamiento en WRF se empleó el hietograma de la figura 22 para seis horas.

#### 4.3.1.1 Tiempo de concentración y retardo

El tiempo de concentración es el tiempo mínimo necesario para todos los puntos de la cuenca Ilave, estando apartados agua escurrida de manera sincronizada al punto de salida (puente Ilave). El tiempo de concentración analizado desde la subcuenca Alto Ilave (cuenca alta) aguas arriba hasta la subcuenca Bajo Ilave (cuenca baja) aguas abajo.

En la tabla 25 se hallaron los tiempos de concentración para las nueve subcuencas discretizadas de la cuenca Ilave.

Para el tiempo de concentración se tiene para las subcuencas Bajo Ilave, Aguas calientes, Medio bajo Ilave, Conduriri, Medio Ilave, Ayupalca y Medio alto Ilave obtenidos en HEC-HMS.

**Tabla 25.** Tiempo de concentración subcuencas Ilave (WRF)

Sub - cuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Longitud del cauce P. (km)	Pendiente (m/m)	Kirpich (min)	Temez (min)	Formula California (min)
Bajo Ilave	143.97	29.57419	0.01542	268.9	217.5	267.8
Aguas Calientes	3698.1	137.73633	0.00778	1143.9	797.4	1139.6
Medio Bajo Ilave	728.86	68.83265	0.00959	618.7	452.3	616.3
Conduriri	627.72	54.99822	0.02224	376.5	325.1	375.1
Medio Ilave	78.724	20.65332	0.01063	235.3	177.7	234.4
Ayupalca	364.25	40.01707	0.02469	283.1	250.3	282.0
Medio Alto Ilave	890.07	60.11919	0.02148	408.7	350.1	407.1
Llusta	519.82	39.57172	0.02667	272.5	244.5	271.4
Alto Ilave	720.41	66.99278	0.02052	452.1	383.5	450.3

**Fuente:** Elaboración propia.

Se obtuvieron los tiempos de concentración para las nueve subcuencas con tres metodologías seleccionadas Kirpich, Temez y Formula de California: resultando para la subcuenca Bajo Ilave 268.9 min, 217.5 min y 267.8 min, para la subcuenca Aguas Calientes 1143.9 min, 797.4 min y 1139.6 min; para la subcuenca Medio Bajo Ilave 618.7 min, 452.3 min y 616.3 min; para la subcuenca Conduriri 376.5 min, 325.1 min y 375.1 min; para la subcuenca Medio Ilave 235.3, 177.7 min y 234.4 min; para la subcuenca Ayupalca 283.1 min, 250.3 min y 407.1 min; para la subcuenca Medio Alto Ilave 408.7 min, 350.1 min, 407.1; para la subcuenca Llusta con 272.5 min, 244.5 min y 271.4 min; para la subcuenca Alto Ilave 452.1 min, 383.5 min y 450.3 respectivamente, los mayores tiempos de concentración se tiene en la subcuenca aguas calientes esto se debe a que tiene





un área de 3698.1 mayor con diferencia a las demás subcuencas. Se observa que no existe mucha diferencia entre resultados.

Para Vélez (2011) trabajo para 33 eventos en función a los hietogramas registrados, donde obtuvo el tiempo de concentración  $T_c$  promedio de 29 minutos, usando ecuaciones empíricas, considera que el valor de la mediana  $T_c$ -4 de 20 minutos el más conservador desde el punto de vista de diseño de obras hidráulicas, cuyas ecuaciones empíricas que más se acercan son las propuestas por Passini, el SCS y kirpich, con relación a nuestros resultados el método Kirpich es el más utilizado y recomendado en base a otras investigaciones, aun así se promedió de los tres resultados para usar un solo tiempo de concentración promedio  $T_c$ .

Betancor (2014) realizo 68 eventos para (04) microcuencas los  $T_c$  observados en las microcuencas varían de 10 min a 150 min y de 5 a 30 min, el tiempo de concentración estimado por las ecuaciones Kirpich, Izzard y Onda Cinemática define que no son satisfactorios ya que producen valores superiores que los observados habitualmente para el diseño de obras hidráulicas para zonas rurales, recomienda dos ecuaciones para determinar el tiempo de concentración: Izzard modificado ecuación general ajustada; en nuestra investigación se analizó con tres ecuaciones de Kirpich, Temez y Formula California será necesario probar con la formula Izzard y ecuación general ajustada que resultados se obtiene a lo que recomienda Betancor probar con más eventos y más cuencas, de todas maneras en nuestros resultados no se observa mucha diferencia para no ser considerados en la investigación solo la fórmula de Temez presenta valores más conservadores.

Sarría (2008), señala para mejorar los valores simulados se modificó los valores de los parámetros como el número de curva y el tiempo de retraso (lag time) del modelo,

para nuestra investigación no se modificó la curva número ni el tiempo de retardo (lag time) aunque si se probó si se podría aumentar al 70%, 80% del tiempo de concentración, pero no se encontró mejores resultados.

**Tabla 26.** Tiempo de retardo subcuencas (WRF)

Sub - cuenca	Tc promedio (min)	Lag Time (min)
Bajo Ilave	251.4	150.8
Aguas Calientes	1027.0	616.2
Medio Bajo Ilave	562.4	337.5
Conduriri	358.9	215.3
Medio Ilave	215.8	129.5
Ayupalca	271.8	163.1
Medio Alto Ilave	388.6	233.2
Llusta	262.8	157.7
Alto Ilave	428.6	257.2

**Fuente:** Elaboración propia.

La tabla 26 muestra el tiempo de concentración (Tc) resultante promedio para las subcuencas de la cuenca Ilave fueron de: subcuenca Bajo Ilave 251.4 min, subcuenca Aguas Calientes 1027 min, subcuenca Medio Bajo Ilave 562.4 min, subcuenca Conduriri 358.9 min, subcuenca Medio Ilave 215.8 min, subcuenca Ayupalca 271.8 min, Subcuenca Medio Alto Ilave 388.6 min, subcuenca Llusta 262.8 min y subcuenca Alto Ilave con 428.6 min. estos valores son los promedios de las tres metodologías Kirpich, Temez y Formula california.

Para determinar el tiempo de retardo o de rezago (Lag Time) para cada subcuenca (09) en la cuenca Ilave, se consideró el 60% del tiempo de concentración para cada subcuenca, esto se debe a que la calibración del modelamiento hidrológico ajuste próximo al caudal observado que es 557.2 m<sup>3</sup>/s. por lo que generalmente se considera el 60% del tiempo de concentración.

Obteniendo resultados de tiempo de rezago para la: subcuenca Bajo Ilave 150.8 min, subcuenca Aguas Calientes 616.2 min, subcuenca Medio Bajo Ilave 337.5 min, subcuenca Conduriri 215.3 min, subcuenca Medio Ilave 129.5 min, subcuenca Ayupalca 163.1 min, Subcuenca Medio Alto Ilave 233.2 min, subcuenca Llusta 157.7 min y subcuenca Alto Ilave con 257.2 min. el valor mínimo presento la subcuenca Medio Ilave con 129.5 min y el valor mayor la subcuenca Aguas calientes con 616.2 min, para esta investigación el cual se introdujo estos valores para el modelamiento hidrológico en el software HEC-HMS 4.7.1.

Vélez (2011), estimo el tiempo de rezago empleando ecuaciones empíricas para la cuenca quebrada San Luis empleando (6) ecuaciones resaltando ecuaciones propuestas por Snyder, Putnam y (Taylor y Schwartz) donde entregan resultados similares, obteniendo tiempo de rezago similares a los tiempos de concentración  $Tr-1$  y  $Tr-2$  valores estimados con las ecuaciones empíricas estas diferencias crean controversias en la comunidad ya que crean la urgencia de consolidar definiciones únicas, se nota que el tiempo de retardo es más estable que el tiempo de concentración se observa más variabilidad; dado que en otras investigaciones recomienda usar el 60% del tiempo de concentración para el tiempo de retardo se usó esta metodología el cual es más estable y no presenta mucha variabilidad.

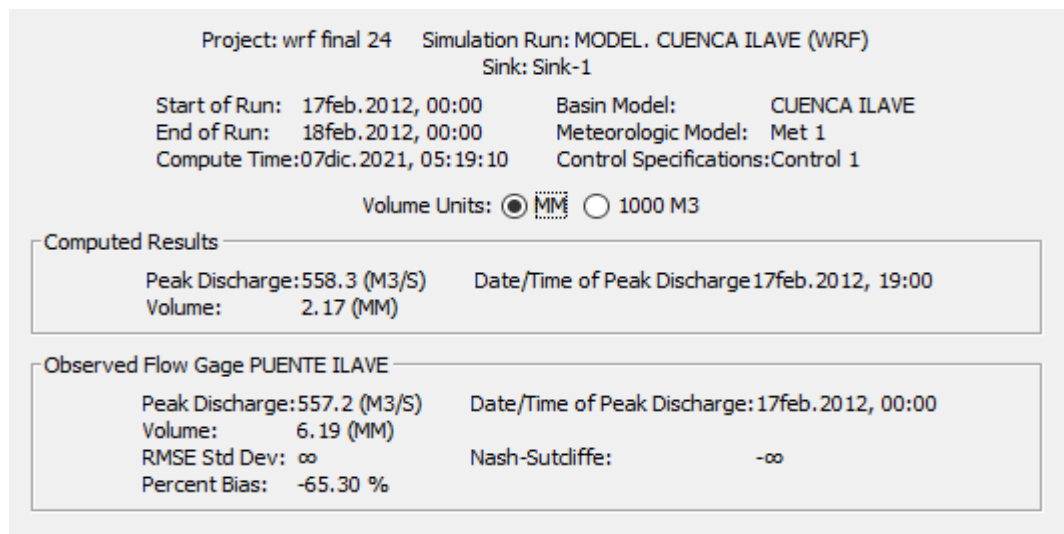
#### **4.3.1.2 Calibración del modelamiento hidrológico**

El resultado de la calibración de la modelación hidrológica para la salida final de la cuenca Ilave se muestra en la figura 26, analizado para veinticuatro horas.

La calibración de los parámetros optimizados: parámetro SCS curva número-curva número iniciales abstracciones y valor optimo se muestran en la tabla 22.

Se tiene un caudal constante de  $557.16 \text{ m}^3/\text{s}$  esto se toma para cada hora desde las 00:00 horas del 17/02/2012 al 00:00 horas del 18/02/2012 para la calibración.

En la figura 25 muestra el caudal mayor del hidrograma de caudales, pronosticados en el software HEC- HMS 4.7.1, resultando  $558.3 \text{ m}^3/\text{s}$  caudal simulado y el caudal observado  $557.2 \text{ m}^3/\text{s}$ , proporcionado por SENAMHI para el día 17 de febrero del 2012 ver tabla 5, se simuló del 17/02/2012 al 18/02/2012.



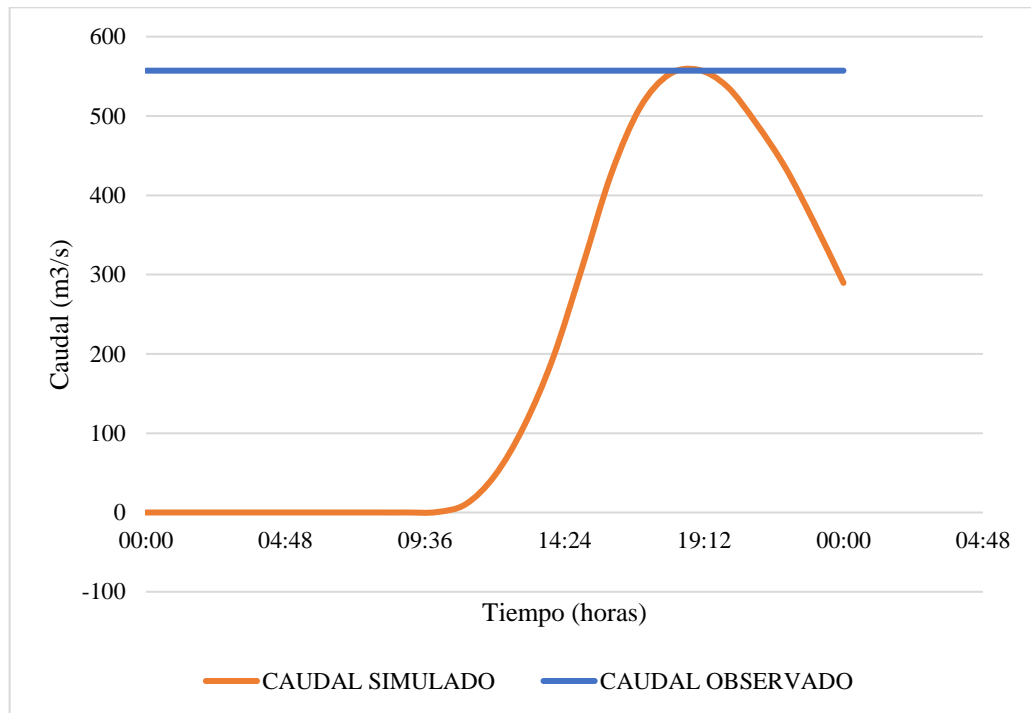
**Figura 25.** Calibración del HEC-HMS para 24 horas salida final de la cuenca Ilave (WRF).

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.3.1.3 Resultados del modelamiento hidrológico

Después de implementar los componentes hidrológicos y fijar el método de cálculo (de abstracciones, transformaciones de escorrentía y tránsitos de cauces en el HEC – HMS 4.7.1 y teniendo el hidrograma de diseño de tormenta diseñado para seis horas, se continuo a la generación de caudales máximos para la fecha 17 de febrero del 2012, analizado en un intervalo de 24 horas. Para la generación de caudales máximos a partir de las salidas en WRF (Modelo de Pronóstico e Investigación Meteorológica).

A continuación, se observa la gráfica del caudal máximo simulado tomando las salidas de precipitación del (WRF) en 24 horas para la fecha 17 de febrero del 2012 al 18 de febrero del 2012 como se observa en la figura 26.



**Figura 26.** Hidrograma resultante de salida para 24 horas para el 17 de febrero del 2012 (WRF).

**Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 26 se visualiza el hidrograma de caudal máximo simulado de 558.3 m<sup>3</sup>/s y caudal máximo observado de 557.2 m<sup>3</sup>/s. Analizado para 24 horas. Se observa que el caudal simulado llega al pico más alto a las 19:00 horas y el caudal observado es constante en línea recta para las 24 horas. Cuyos caudales fueron calibrados con la opción optimization trial manager en el software HEC.HMS 4.7.1.

Ver anexo 4.1 donde se muestra el hidrograma resultante de los caudales simulados y observados directamente del HEC-HMS 4.7.1.

**Tabla 27.** Resumen de caudal máximo para el 17 de febrero del 2012 resultante salidas del WRF.

<b>Fecha</b>	<b>Cuenca llave (m<sup>3</sup>/s)</b>
17/02/2012	558.3

**Fuente:** Elaboración propia.

En la tabla 27 se muestra el resumen del caudal simulado a partir de las salidas en el modelamiento en WRF (Modelo de Pronóstico e Investigación Meteorológica) para el día 17/02/2012 en 24 horas desde las 00:00 horas del 17/02/2012 hasta las 13:00 horas del 18/02/2012 resultado de las (09) subcuencas discretizadas resultado final para toda la cuenca llave.

#### **4.3.2 Generación de caudales a partir de la información existente**

Teniendo la cuenca llave discretizada en 09 subcuencas ver figura 29, los componentes hidrológicos definidos, las características geomorfológicas, el tiempo de concentración-retardo y el hietograma de diseño a partir de la información existente resultante promedio se procede a la modelación hidrológica de tal manera hallar los caudales máximos para 24 horas en intervalos de 1 hora para el 17 de febrero del 2012, principalmente ver el comportamiento del caudal para seis horas de análisis desde las 07:00 hasta las 12:00 horas. Pero que se alargaron a 24 horas para ver el comportamiento del caudal.



**Figura 27.** Esquema de los elementos hidrológicos conectados – modelo de cuenca.

**Fuente:** Elaboración propia.

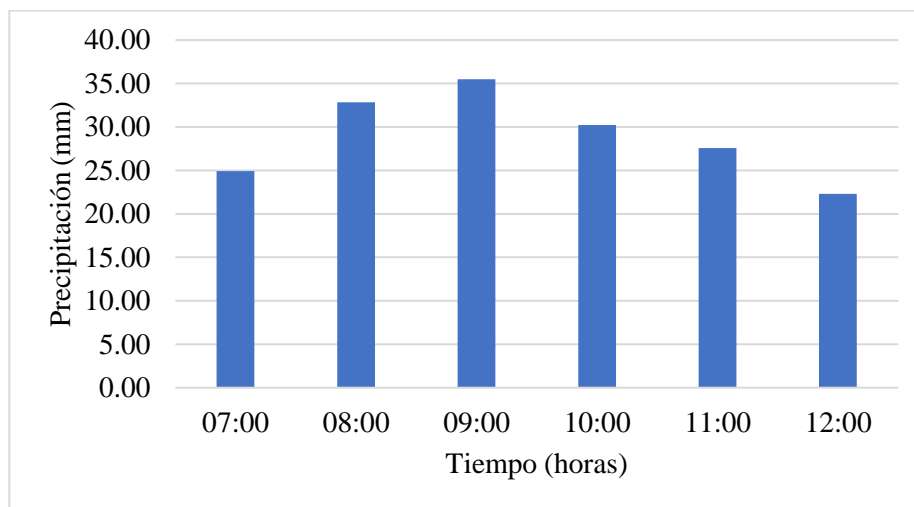
Para el modelamiento de la cuenca Ilave se discretizó como se muestra en la figura 27 contemplando las subcuencas: Bajo Ilave, Aguas Calientes, Medio Bajo Ilave, Conduriri, Medio Ilave, Ayupalca, Medio Alto Ilave, Llusta y Alto Ilave.

Para la generación de los caudales máximos se requiere hallar previamente los parámetros geomorfológicos ya que es necesario esta información, el cual se muestra en la tabla 24. Las características geomorfológicas vienen a ser las mismas mostradas en la tabla 24 para la generación de caudales a partir de la información existente, ya que se

analiza para las 09 subcuencas discretizadas de la cuenca Ilave, teniéndose el área, longitud del río principal y pendiente como parámetros geomorfológicos importantes.

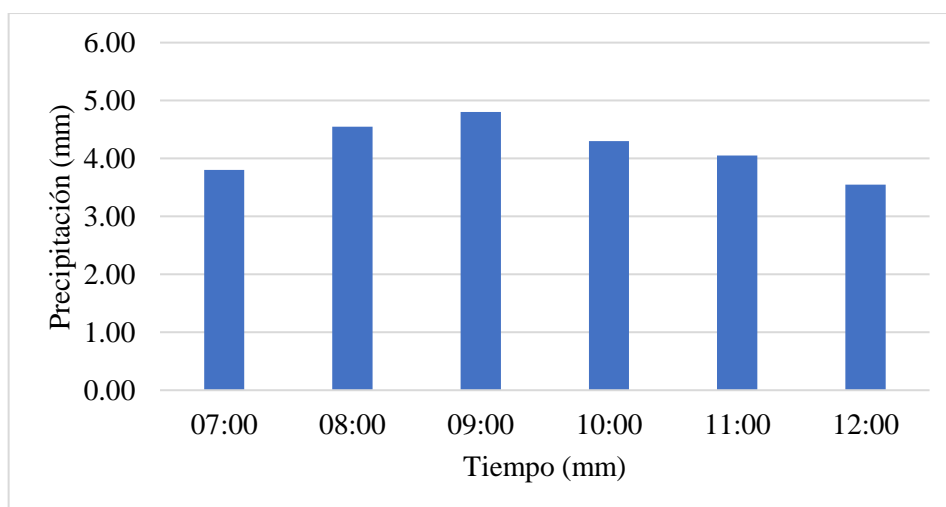
La información existente proporcionada por la institución SENAMHI fue analizada para un intervalo de 6 horas. Cuya información fue completada por el método de regresión lineal simple.

Los hietogramas resultantes de diseños para las seis estaciones meteorológicas:



**Figura 28.** Hietograma de diseño en 6 horas, estación Laraqueri

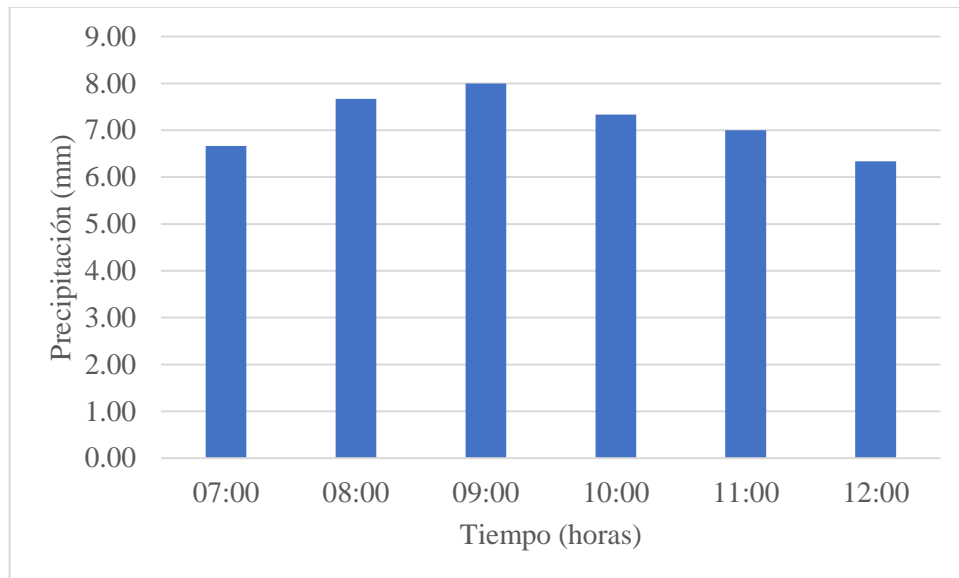
**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 29.** Hietograma de diseño en 6 horas, estación Mazo Cruz

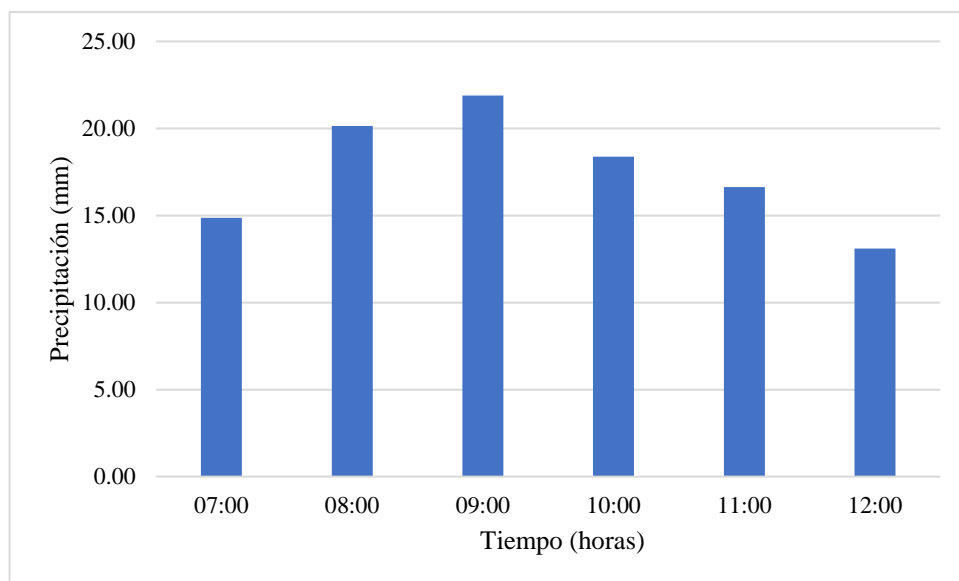
**Fuente:** Elaboración propia.





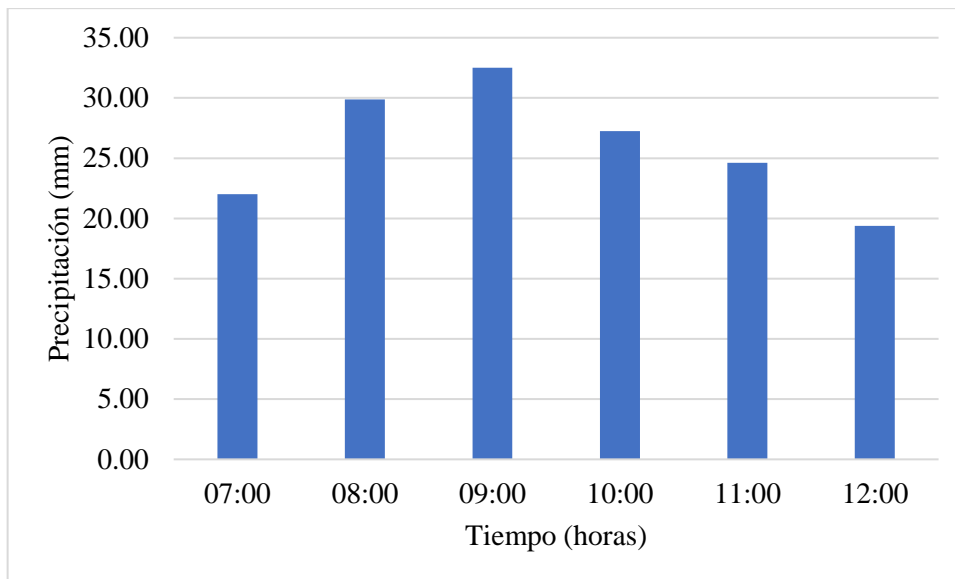
**Figura 30.** Hietograma de diseño en 6 horas, estación Capazo

**Fuente:** Elaboración propia.



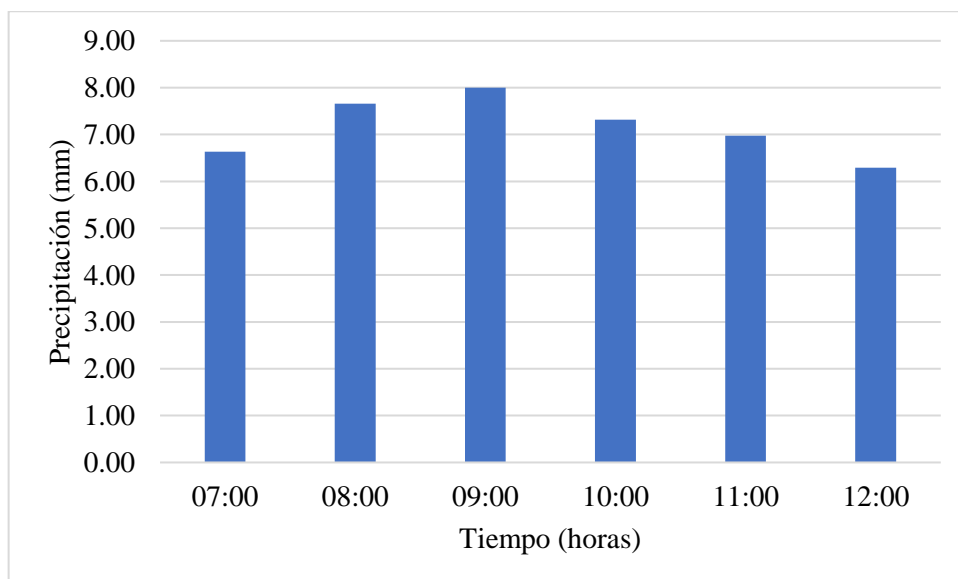
**Figura 31.** Hietograma de diseño en 6 horas, estación Juli

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 32.** Hietograma de diseño en 6 horas, estación Ilave

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 33.** Hietograma de diseño para 6 horas, estación Vilacota

**Fuente:** Elaboración propia.

En las figuras 28, 29, 30, 31, 32 y 33 se observan los hietogramas de diseño para seis horas siendo las estaciones Laraqueri, Mazo Cruz, Capazo, Juli, Ilave, Vilacota. Presentando la estación Laraqueri precipitaciones más altas siendo la más elevada es de



35.5 mm a las 09.00 horas y la estación Mazo Cruz presenta precipitaciones más bajas siendo la más baja de 3.55 mm a las 12:00 horas.

#### **4.3.2.1 Tiempo de concentración y retardo**

Los datos obtenidos para el tiempo de concentración ( $T_c$ ) y de retardo o rezago (Lag Time) para la modelación de caudales a partir de la información existente es igual para la generación de caudales a partir de las salidas WRF ver ítem (4.3.1.1) donde se observa en la tabla 30 los resultados del tiempo de concentración ( $T_c$ ) y en la tabla 31 los resultados del tiempo de rezago o retardo (Lag Time) que se utilizaron para la modelación hidrológica valores iguales considerados para este modelamiento.

Para el tiempo de concentración y de rezago se halló para las subcuencas (09): Bajo Ilave, Aguas calientes, Medio bajo Ilave, Conduriri, Medio Ilave, Ayupalca y Medio alto Ilave obtenidos en HEC-HMS 4.7.1.

Los resultados se muestran en el ítem 4.3.1.1.

retardo se usó esta metodología el cual es más estable y no presenta mucha variabilidad.

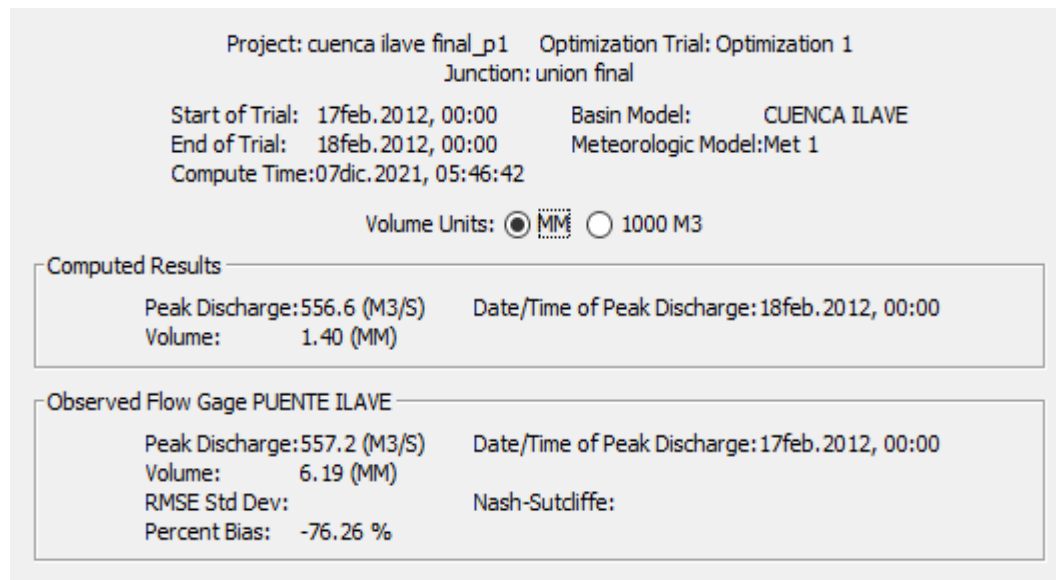
#### **4.3.2.2 Calibración del modelamiento hidrológico**

El resultado de la calibración de la modelación hidrológica para la salida final de la cuenca Ilave se muestra en la figura 34, analizado para veinticuatro horas.

La calibración de los parámetros optimizados: parámetro SCS curva número-curva número iniciales abstracciones y valor optimo se muestran en la tabla 18.

Se tiene un caudal constante de  $557.2 \text{ m}^3/\text{s}$  esto se toma para cada hora desde las 00:00 horas del 17/02/2012 al 13:00 horas del 18/02/2012 para la calibración.

En la figura 34 muestra el caudal máximo del hidrograma de caudales, simulados en el software HEC- HMS 4.7.1, resultando 556.6 m<sup>3</sup>/s caudal simulado y el caudal observado 557.2 m<sup>3</sup>/s, proporcionado por SENAMHI para el día 17 de febrero del 2012 ver tabla 5, se simuló para el 17 de febrero del 2012 al 18 de febrero 2012.



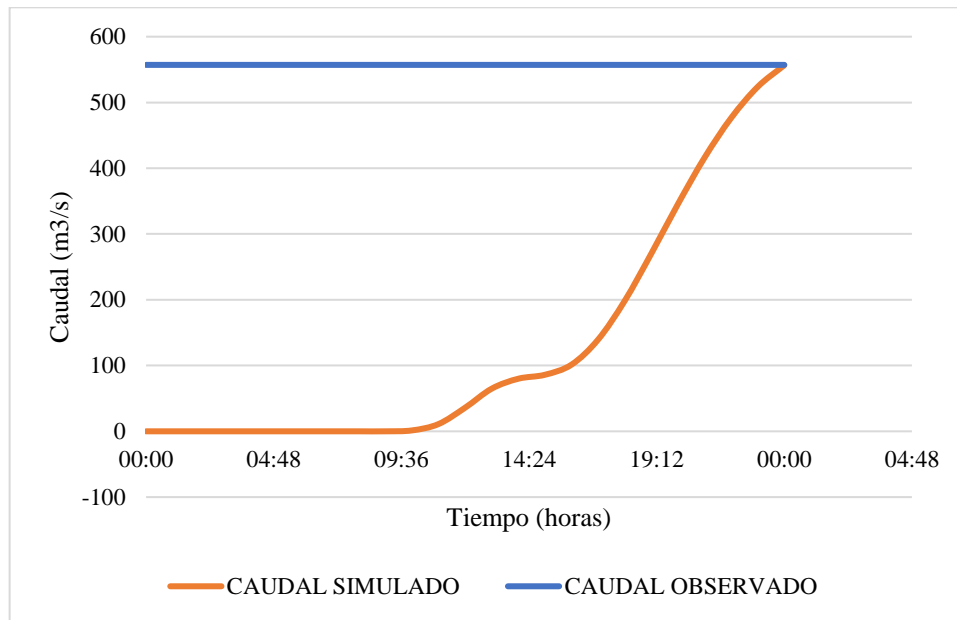
**Figura 34.** Calibración del HEC-HMS para 24 horas en base a la información existente.

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.3.2.3 Resultados del modelamiento hidrológico

Después de implementar los componentes hidrológicos y fijar el método de cálculo (de abstracciones, transformaciones de escorrentía y tránsitos de cauces en el HEC – HMS 4.7.1 y teniendo el hidrograma de diseño de tormenta diseñado para seis horas, se continuo a la modelación de caudales máximos para la fecha 17 de febrero del 2012, analizado en un intervalo de 24 horas. Para la generación de caudales máximos a partir de la información existente.

A continuación, se observa la gráfica del caudal máximo simulado tomando las salidas de precipitación de los hietogramas de diseño resultantes para 24 horas para la fecha 17 de febrero del 2012 al 18 de febrero del 2012, como se observa en la figura 35.



**Figura 35.** Hidrograma resultante de salida para 24 horas.

**Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 35 se visualiza el hidrograma de caudal máximo simulado de 556.6 m<sup>3</sup>/s y caudal máximo observado de 557.2 m<sup>3</sup>/s. Analizado para 24 horas. Se observa que el caudal simulado llega al pico más alto a las 00:00 horas y el caudal observado es constante en línea recta para las 24 horas. Cuyos caudales fueron calibrados con la opción optimización trial manager en el software HEC.HMS 4.7.1.

Ver anexo 4.2 donde se muestra el hidrograma resultante de los caudales simulados y observados directamente del HEC-HMS 4.7.1.

**Tabla 28.** Resumen de caudal máximo para el 17 de febrero del 2012 en base a la información existente.

Fecha	Cuenca llave ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
17/02/2012	556.6

**Fuente:** elaboración propia.

En la tabla 28 se visualiza el resumen del caudal simulado a partir de la información existente siendo  $556.6 \text{ m}^3/\text{s}$  para el día 17/02/2012 en 24 horas desde las 00:00 horas del 17/02/2012 hasta las 00:00 horas del 18/02/2012 resultado de las (09) subcuencas discretizadas resultado final para toda la cuenca llave.

En resumen, se tiene los caudales simulados y observados:

**Tabla 29.** Resumen de caudales simulados y observados para el 17 de febrero del 2012

Fecha	Caudal simulado salida P.P. WRF ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Caudal simulado de P.P. existente ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Caudal observado ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
17/02/2012	558.3	556.6	557.16

**Fuente:** Elaboración propia.

En la tabla 29 se muestra el resumen de los caudales simulados y observados para el día 17 de febrero del 2012 analizado en 24 horas. El caudal resultante simulado a partir de las salidas del WRF (Modelo de Pronóstico e Investigación Meteorológica) fue de  $558.3 \text{ m}^3/\text{s}$ , mayor al caudal simulado existente que resulto  $556.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , para la calibración se utilizó el caudal observado de  $557.16 \text{ m}^3/\text{s}$  proporcionado por SENAMHI que se consideró constante para el análisis en 24 horas a intervalos de una hora para la calibración se aprecia que los caudales simulados no presentan diferencias significativas abismales sino que son próximos al caudal observado de  $557.16 \text{ m}^3/\text{s}$ .

A primera impresión en la tabla 29 se observa que en conjunto los caudales simulados tienen una diferencia de  $1.7 \text{ m}^3/\text{s}$ , siendo representativos y próximos al caudal



observado de  $557.16 \text{ m}^3/\text{s}$ . Sin embargo, se tendría que analizar más modelamientos y métodos para reducir esa variación y aumentar la precisión.

Al comparar los resultados de los caudales máximos simulados y observado es necesario tener criterios de admisibilidad al comparar como lo indica (Estrada, 2012), aplico los modelos de tormenta de frecuencia y del SCS al aplicar el software HEC-HMS y obteniendo resultado favorable recomienda el uso para cuencas montañosas orientales; que en nuestra investigación no es el caso pero que si es una cuenca que se encuentra a una altitud considerable más de los 3500 m.s.n.m. El modelamiento para avenidas de varios picos es complicado a causa de la ausencia de hietogramas reales observados.

Según Hamdan (2021) Deduce que las simulaciones en HEC-HMS es adecuada para las simulaciones hidrológicas en su cuenca de estudio Gilgel Abay, comparando con nuestras simulaciones en el software HEC-HMS 4.7.1 podemos concluir que es adecuado para la modelación hidrológica en la cuenca Ilave.(Angulo, 2018) obtuvo resultados de caudales de salida a partir de las precipitación máxima en la cuenca Maylanco calibrado los resultados de la modelación fueron de  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $142 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $172 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $196 \text{ m}^3/\text{s}$  en periodos de retorno 25, 50, 75 y 100 años, para nuestra investigación se simularon los caudales solo para un día el 17/02/2012 en intervalos de 01 hora. Estos caudales son diferentes a los obtenidos en la investigación de ángulo por los periodos de retorno. También analizo para fechas puntuales como es el caso de nuestra investigación.

Ángulo (2018) simulo los eventos para los días del 15 al 17 de febrero, cuyo efecto de este evento produjo inundaciones temporales de 5 cm aguas abajo del puente “Abra” teniendo zonas potencialmente inundables obteniendo un caudal de  $18 \text{ m}^3/\text{s}$ ; comparando con los resultados de nuestra investigación los caudales simulados dieron caudales de



558.3 m<sup>3</sup>/s y 556.6 m<sup>3</sup>/s. Esta diferencia puede estar implicada a las áreas de cuenca y hietogramas de diseño, así como las metodologías calibración del modelo principalmente.

López (2012), implemento el modelo HEC-HMS en la cuenca Arga en pamplona aplicando el método SCS, numero de curva CN, pérdidas iniciales  $I_a$ , tiempo de circulación en cauces k y un hidrograma observado, obteniendo resultados de caudales con una mejor sensibilidad, pero de menor medida, la aplicación del modelo tiene un aporte de mejores resultados para los caudales máximo. A diferencia de nuestros caudales simulados no tiene un análisis profundo de sensibilidad.

Valencia (2014), aplico el hidrograma unitario de Clark, el hidrograma unitario SCS obteniendo valores de precisión aceptable menciona que el modelo caracteriza excelentemente los picos de las crecidas, aunque no exista datos observados fidedignos; comparando con nuestra elección de usar el hidrograma unitario SCS se podría decir que los valores obtenidos de los caudales simulados son aceptables.

Patiño (2019), encontró caudales de 1.7 m<sup>3</sup>/s, 1.8 m<sup>3</sup>/s y 1.9 m<sup>3</sup>/s en periodos de retorno de 25, 50 y 100 años, comparando con nuestros resultados difieren esto se puede deber a las diferencias de áreas y metodologías aplicadas para la obtención de caudales, aun así, recomienda ser útil para cuencas en el Ecuador.

Según Duque (2019) con respecto a la aplicación del método del Numero de Curva del SCS define se aplica para cuencas por debajo de los 250 km<sup>2</sup>, en su investigación sus resultados de caudales puntas son aceptables teniendo limitada km<sup>2</sup>nformación para nuestra investigación nuestras subcuencas superan por mayoría los 250 km<sup>2</sup>, solo la subcuenca Bajo llave está por debajo de los 250 km<sup>2</sup> teniendo 143.97 km<sup>2</sup> solo se cumpliría para esta subcuenca. Los caudales simulados pueden aumentar o disminuir si





se aplica otro método que no sea el Numero de Curva del SCS sería necesario aplicar otras metodologías.

En las figuras 28 y 37 se muestra los caudales simulados y observado para el punto de análisis desagüe de la cuenca Ilave, para obtener estos caudales se realizaron las calibraciones semiautomáticas, con el componente “optimization trial” del software HEC-HMS 4.7.1 como lo señala (Feldman, 2000).

Para Carrera (2013), los caudales máximos estimados en el software HEC-HMS, pueden ser considerados como insumos para hacer modelos hidráulicos de inundación generando manchas de inundación, garantizando la utilización del HEC.HMS; de esta manera se garantiza el empleo del software HEC-HMS 4.7.1 en base a las recomendaciones de diversos autores e investigaciones.

De esta manera, esta investigación presenta caudales generados resultados simulados y observado anteriormente ya expuestos a partir de las salidas del modelamiento meteorológico WRF para obtener precipitaciones y las precipitaciones proporcionadas por SENAMHI para el día 17 de febrero del 2012.

#### **4.3.3 Validación del pronóstico de caudales máximos**

A partir de los parámetros obtenidos de la calibración se empezó la validación empleando el evento 17 de febrero del 2012 en 24 horas (inspeccionando si con los parámetros resultantes se obtiene buenos resultados) El proceso de validación del modelamiento hidrológico en el software HEC-HMS 4.7.1, se hizo con la finalidad de generar o simular máximos caudales futuros.

Para la validación del modelamiento de los caudales máximos se analizó el caudal simulado en WRF y el caudal simulado de las estaciones pluviométricas, siendo las medidas de bondad de ajuste: el error medio absoluto (MAE), la raíz del error medio

cuadrático (RMSE), el criterio de Schultz (D) y la eficiencia de Nash-Sutcliffe (E). Como se muestra a continuación en la siguiente tabla 30:

**Tabla 30.** Cuadro resumen medidas de bondad de ajuste para el caudal simulado salidas WRF y caudal simulado estaciones Pluviométricas.

Estaciones	Periodo	MAE	RMSE	(D)	(E)
Caudal simulado P.P. WRF (m <sup>3</sup> /s)	17/02/2012	1.14	1.17	0.41	0.72
Caudal simulado de estaciones pluviométricas (m <sup>3</sup> /s)	17/02/2012	0.56	0.66	0.2	0.64

**Fuente:** Elaboración propia.

El MAE menor de la evaluación estadística de medidas de precisión muestra menor cantidad de error y mayor precisión, para el caudal simulado de las estaciones pluviométricas con un valor de 0.56 y el MAE mayor que menos precisión tiene vendría a ser caudal simulado precipitaciones pluviales WRF con 1.14, siendo un valor superior con relación a la demás medida de bondad de ajuste.

El RMSE menor de la evaluación estadística de medidas de precisión muestra que tiene menos cantidad de error y mayor precisión, es el caudal simulado de las estaciones pluviométricas tiene un valor de 0.66 y el RMSE mayor que menos precisión tiene vendría a ser caudal simulado precipitaciones pluviales WRF con 1.17, se observa que es un valor mayor y está por encima a las demás medidas de bondad de ajuste.

Barbosa (2019), utiliza siete métodos diferentes para investigar el rendimiento del modelo HEC-HMS: MAE, RMSE, RSR, NSE, PBIAS, R2, y KGE. El investigador concluyo que el modelo HEC-HMS representa de manera eficiente los procesos hidrológicos de la cuenca bajo investigación, dentro de su investigación incluye al MAE y RMSE al igual que en nuestra investigación lo tomamos en cuenta cuyos valores son permisibles.



Para el criterio de Schultz (D) el menor valor de la evaluación estadística de medidas de precisión muestra que tiene menos cantidad de error y mayor precisión, es el caudal simulado de las estaciones pluviométricas con un valor de 0.2, el criterio de Schultz (D) de valor mayor, pero que tiene menos precisión vendría a ser el caudal simulado precipitaciones pluviales WRF con 0.41; según valores referenciales de criterio de Schultz debe estar a un rango de 0-3 según (Molnar, 2011). Nuestros resultados se encuentran dentro del rango, por lo tanto, se considera muy bueno.

Para la eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) el menor valor de la evaluación estadística de medidas de precisión muestra que tiene menos cantidad de error y mayor es el caudal simulado de las estaciones pluviométricas con un valor de 0.64, la eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) de mayor valor, pero que posee menos precisión tiene corresponde al caudal simulado precipitaciones pluviales WRF con 0.72; según valores referenciales de la eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) debe encontrarse en un rango de 0.6-0.8 según (Molnar, 2011). se considera muy bueno. Los resultados obtenidos se encuentran dentro del rango recomendado, por lo tanto, se considera muy bueno.

En la estimación del hidrograma de crecidas con modelación determinística y precipitación derivada de radar hecho por (magaña, 2013) utiliza el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) como criterio de validez de ajuste (Nash y Sutcliffe, 1970) siendo E adimensional, indica que este coeficiente establece una relación entre el comportamiento real y el modelado. Teniendo como dominio matemático desde  $-\infty$  a 1, donde la unidad representa una simulación perfecta, lo que significa que el modelo produce valores del promedio de las observaciones en todos los intervalos si es negativo el valor esto demuestra un desempeño peor del modelo. Evaluó en el evento de setiembre del 2006 donde obtuvo  $E=0.96$  siendo casi una simulación perfecta ya que se aproxima a la unidad (1); en nuestra investigación se obtuvo un valor de  $E = 0.72$  para el caudal



simulado precipitaciones pluviales WRF y  $E = 0.64$  para el caudal simulado de las estaciones pluviométricas, esto indica que nuestra simulación es una simulación buena pero no perfecta ya que supera el 50% pero no llega al 100% pero aun así se podría considerar que es una simulación muy buena y buena.

En la calibración y validación del modelado hidrológico SWAT en la cuenca Durango, México investigación de (Caciano, 2007) para validar sus resultados comparando sus datos obtenidos con sus datos medidos (estación Sardinias) calculo el coeficiente de Nash-Sutcliffe (E) teniendo un mejor arreglo geométrico para  $m^3$  (15% de la cuenca en estudio) debido a que presenta menos complejidad en su ajuste de sus parámetros de calibración, obteniendo  $E = 0.70$ ; en nuestro estudio se obtuvieron valores de  $E = 0.72$  para el caudal simulado precipitaciones pluviales WRF y  $E = 0.64$  para el caudal simulado de las estaciones pluviométricas, por lo tanto podemos decir que la validación comparando nuestros resultados con la previa investigación es aceptable los valores obtenidos presentando menos complejidad donde se puede considerar que la simulación es muy buena y buena.



## V. CONCLUSIONES

Se obtuvo las precipitaciones esperadas grilladas del modelo global meteorológico GFS (Sistema de Pronóstico Global) para la cuenca Ilave para el día 17 de febrero del 2012 descargado de forma horaria a una resolución espacial de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  y transitoria en intervalos de seis horas (00Z, 06Z, 12Z y 0018Z) datos en formato GRIB2. Se establecieron dominios de d01 y d02 de 27 y 9 km de resolución espacial centrándonos en el dominio d02 (dominio de anidamiento) para 9 km, para un total de 01 ejecución, de tal forma que la simulación atmosférica considere la influencia de los sistemas meteorológicos de meso escala.

El modelo meteorológico WRF (Modelo de Pronóstico e Investigación Meteorológica) permitió obtener las precipitaciones máximas para toda la cuenca del río Ilave para el día 17 de febrero del 2012, en intervalos de 01 hora desde las 07:00 horas del 17 de febrero del 2012 hasta las 12:00 horas del 17 de febrero del 2012 simuladas de forma horaria, donde la precipitación máxima obtenida fue a las 09:00 horas con 18.45 mm y la precipitación menor se presentó a las 12:00 horas con 11.83 mm para el análisis estadísticos de las bondades de ajuste de precisión en los seis puntos de validación se utilizó el (BIAS, MAE y RMSE), obteniéndose el BIAS con menor cantidad de error en la estación Juli con un valor de 1.03, el MAE con menor cantidad de error en la estación Vilacota con un valor de 1.29 y el RMSE con menor cantidad de error en la estación Vilacota con un valor de 1.93, concluyéndose que el BIAS es el más óptimo en la validación por tener el valor más mínimo. Mostrando así valores altamente significativos; el modelo WRF sintetiza la física atmosférica y además muestra una capacidad de pronóstico altamente representativa en esta zona altoandina de Ilave, justificando así el uso del modelo donde no se tenga estaciones meteorológicas.



La modelación hidrológica permitió generar los caudales máximos a través del software hidrológico HEC-HMS 4.7.1 previamente se discretizó la cuenca en 09 subcuencas, se definió las características geomorfológicas, el tiempo de concentración-retardo el hidrograma de diseño de las precipitaciones máximas para dos simulaciones para 24 horas, resultando un caudal simulado de precipitación pluvial WRF de 558.3 m<sup>3</sup>/s y un caudal simulado de precipitación pluvial (información existente) de 556.6 m<sup>3</sup>/s; además, que se calibro las simulaciones con un caudal observado equivalente a 557.2 m<sup>3</sup>/s. para la validación se utilizó el análisis estadístico de las bondades de ajuste para el criterio de Schultz (D) donde el que tiene menos cantidad de error y mayor precisión, es el caudal simulado de las estaciones pluviométricas con un valor de 0.2 por lo tanto se considera muy buena y la eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) el que tiene menos cantidad de error y mayor precisión es el caudal simulado de las estaciones pluviométricas con un valor de 0.64 por lo que se considerada muy buena, para el MAE el que muestra menor cantidad de error y mayor precisión, es el caudal simulado de las estaciones pluviométricas con un valor de 0.56 siendo un valor altamente significativo y el RMSE el que tiene menos cantidad de error y mayor precisión, es el caudal simulado de las estaciones pluviométricas que tiene un valor de 0.66 mostrando un valor altamente significativo. Concluyéndose así que los modelos hidrológicos para las dos simulaciones están calibrados y validados, además que con la simulación de pronóstico de caudales máximos tenga la utilidad en la gestión riesgo de inundaciones para la cuenca Ilave.



## VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda una buena selección previa para la operacionalidad del modelo, definir bien las condiciones meteorológicas dominantes en la zona de estudio. Definir también la parametrización (usar otras parametrizaciones para la zona) que se pueda implementar del modelamiento que modelo se puede usar y más aún, tener claro las definiciones teóricas de predictibilidad numérica. Ya que se necesita estas variables para el modelado, si no se tiene esto puede retrasar la culminación del estudio.

Se recomienda implementar un pronóstico operativo para la zona de estudio (cuenca Ilave) se necesitaría estudios adicionales para encontrar la parametrización adecuada y que más se ajuste representando las mejores condiciones meteorológicas predominantes para esta zona. Un valor de error de pronóstico menor a 1 mm vendría a ser adecuado para que sea operacional.

Se recomienda la utilización del modelo hidrológico desarrollado en esta investigación para generar hidrogramas de crecidas tanto para el uso ingenieril, como diseño de obras hidráulicas dentro del río Ilave y sus tributarios, así como también con fines de prevenir inundaciones y la evaluación de amenazas por riesgos de inundación en la cuenca Ilave.

Se recomienda establecer una red hidrométrica o una estación hidrométrica como mínimo de tal manera poder validar completamente el modelo, una igual a la estación puente-Ilave que tiene registro de caudales históricos como el que nos proporcionó, estas tormentas históricas ocasionaron inundaciones, en el distrito de Pilcuyo desbordándose el río zapatilla e Ilave margen derecho. Y de esta manera prevenir alertar este tipo de inundaciones.



Se recomienda realizar más simulaciones, de tal manera ver cómo se comporta la compilación de la modelación meteorológica del WRF y el modelamiento hidrológico con HEC-HMS con la finalidad de generar caudales simulados y ver los resultados de las simulaciones a un menor grado de sensibilidad y obtener una mejor calibración-validación.





## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Barraza Gallegos, E. N., Choto Duran, L. J., & Cortez Alvarez, J. A. (2017). *Aplicación del modelo mesoescalar WRF (Weather Research Forecast Model) en la modelación hidrológica de la cuenca del río Sucio*. San Salvador.
- Bowerman, B. L., Oconnell, R. T., & Koehler, A. B. (2007). *Pronósticos, Series de Tiempo y Regresión*. Mexico: Cengage Learning.
- C. Skamarock, W., B. Klemp, J., & Dudhia, J. (July de 2021). A description of the Advanced Research WRF Model Version 4.
- Cabrera, J. (2012). *Calibración de modelos hidrológicos*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Carrera Vilacres, D. V., Guevara Garcia, P. V., Tamayo Bacacela, L. C., & Balarezo Aguilar, A. L. (Junio de 2016). Relleno de series anuales de datos meteorológicos mediante métodos estadísticos en la zona costera e interandina del Ecuador, y cálculo de la precipitación media. *IDESIA*, 34(3), 81-90.
- Carrera Villacrés, D. V., Guevara García, P. V., Tamayo Bacacela, L. C., Balarezo Aguilar, A. L., Naváez Rivera, C. A., & Morocho López, D. R. (Junio de 2016). Relleno de series anuales de datos meteorológicos mediante métodos estadísticos en la zona costera e interandina del Ecuador, y cálculo de la precipitación. *Scielo*, 34(3), 79-88. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292016000300010>
- Coiffier, J. (2011). *Fundamentals of Numerical Weather Prediction* (Vol. Primera edición). New York, Estados Unidos de América.
- Coy Murcia, L. C. (2017). Ajustes y Validación del modelo precipitación - Escorrenia GR2M aplicado a la subcuenca Nevado. *Ingenio Mgno*.



- Dra. Bermejo Salmon, M. C. (2020). Tratamiento del nivel de competencias laborales desde la regresión lineal simple. *Retos de la Dirección*, 14(1).
- Dudhia, J. (2014). *A History of mesoscale model development*. Obtenido de <http://staff.ucar.edu/browse/people/7309/OSGC-000-000-020-352>
- Enriquez Lopez, L., Maron Mollinedo, L., Tacora Mariaca, S., & Quispe Mamani, E. J. (15 de Julio de 2018). Análisis del riesgo por inundación a causa del desborde de río Ilave, Distrito de Ilave - Collao. *Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 4(1), 10-14. doi:<https://doi.org/10.17162/rictd.v4i1.1067>
- Escarcena Quiza, F. Y. (2014). *Determinación de áreas inundables de la parte media de la microcuenca del Río Zapatilla - Centro Poblado de Ancoamaya - Ilave*. Puno.
- Gómez Guerrero, J. S., & Aguayo Arias, M. I. (20 de Junio de 2019). Evaluación de desempeño de métodos de relleno de datos pluviométricos en dos zonas morfoestructurales del Centro Sur de Chile. *Instituto de Geografía UNAM*. doi:<https://doi.org/10.14350/rig.59837>
- Hernández Lalinde, J. D., Espinosa Castro, F., Rodríguez, J. E., & Chacón Rangel, J. G. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 37(5). Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=55963207025>
- Herrera Oliva, C. S., Campos Gaytán, J. R., & Carrillo Gonzáles, F. M. (Mayo-Agosto de 2017). Estimación de datos faltantes de precipitación por el método de regresión lineal: Caso de estudio Cuenca Guadalupe, Baja California, Mexico. *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES*, 25(71), 34-44.



- Izquierdo, T., & Márquez, A. (2007). Estudio comparativo de diferentes metodos de interpolación para la realización de mapas de precipitación en las Islas de la Gomera (Isla Canarias) : Evaluación de la incorporación de la altura. *GEOGACETA*, 134.
- Jacobson, M. Z. (2005). *Fundamentals of atmospheric modeling* (Second ed.). New York, United State of America.
- Jolliffe Iant, D. (2003). *Forecast Verification, a Practitioner's Guide in Atmospheric Science* (Vol. Primera Edición). (A. R. Ltd, Ed.) Gran Bretaña, Inglaterra: Jhon Wiley & Sons Ltd.
- Kalnay, E. (2003). *Atmospheric modeling, Data Assimilation and Predictability*. New York, Estados Unidos de America: Cambridge University Press.
- Lujano Laura, E. (12 de 2013). *Caracterización hidroclimatica, modelización hidrológica y eventos extremos en las cuencas de los ríos Coata e Ilave*. Puno. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4675>
- Lujano Laura, E. (2013). *Monitoreo y pronóstico de caudales cuenca de los ríos Ilave y Coata* . Puno.
- Luna Romero, E., & Lavado Casimiro, W. (Noviembre de 2015). Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la ceuna Jetepeque, Perú. *Revista Tecnológica ESPOL*, 28(3), 42-52. Obtenido de <http://www.rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/400>
- Mourre, L., Condom, T., Junquas, C., Lebel, T., Sicart, J. E., Figueroa, R., & Cochachin, A. (2016). Cálculo espacio temporal de WRF y TRMM e in situ de datos de



precipitación en el entorno montañoso tropical ( Cordillera Blanca, Perú).

*Hydrology and Earth System Sciences.*

Moya Álvarez, A. S., & Ortega León, J. M. (30 de junio de 2015). Aplicación del modelo meteorológico WRF para el pronóstico de precipitaciones en período lluvioso de Cuba. 135.

Ñavincopa Muñoz, V. M. (2018). *Validación del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) al simular temperaturas en zonas altoandinas de Puno y Arequipa.* Lima, Peru.

Perez Martinez, J. C., & Barbosa Cadena, C. D. (2018). *Aplicación de modelo de simulación hidrológico e hidraulico Hec-Hms y Hec-ras para la estimación de manchas de inundación a una escala de 1:25.000 en la cuenca del río Chicú .* Bogota.

Pizarro Tapia, R., Cabrera Jofre, C., & Morales Calderon, C. (06 de Noviembre de 2010). Variación temporal de las precipitaciones y caudales en la cuenca del Maipo, y la potencial influenciar glaciario en la producción de agua (1963-2006). *SciELO.* Obtenido de *Tecnol. cienc. agua* vol.2 no.3 Jiutepec jul./sep. 2011

Pizarro, R., Ausensi, P., Aravena, D., Saguesa, C., León, L., & Balocchi, F. (19 de Sep de 2009). Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la región del Maule, Chile. *Aqua-LAC, 1(2)*, 172-185.

Ramos Alonso, R., & Alva, H. M. (29 de Noviembre de 2018). Análisis del mejor método para completar datos de precipitación en el sector alto de las cuencas de Camaná y Chili, Arequipa, Perú. *Investigaciones Sociales, 22(40)*, 97-110. doi:DOI: <http://dx.doi.org/10.15381/is.v22i40.15889>



- Restrepo Sarmiento, M. M., & Gomez Restrepo, C. (2004). *Sesgos en diseños analíticos. Scielo.*
- Sandoval, E. (2002). *Técnicas estadísticas en hidrología.* Mexico.
- Sotelo Asef, J. G., & Figueroa González, E. G. (Julio-Diciembre de 2017). El clima organizacional y su correlación on la alidad en el servicio en una institución de educaión de nivel medio superior. *RIDE. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Eduativo*, 8(15). doi:DOI: 10.23913/ride.v8i15.312
- Ticona Jara, J. L. (2016). *Aplicación de modelos numéricos e imágenes de satélite para la identificación de zonas afectadas por heladas metereológicas en la región Arequipa .* Arequipa.
- Vilchez Shapiama, J. G. (2015). *Aplicación delos modelos WRF y VIC paramodelización hidrológica en la cuenca del río Rímac.*
- Warner, T. T. (2011). *Numerical Weather and Climate Prediction* (Vol. Primera edición). New York, Estados Unidos de America.
- Wilks, D. S. (2006). *Statical Methods in the Atmospheric Sciences* (Vol. Second Edition). (D. H. Renata Dmowska, Ed.) Estados Unidos: Elseiver Inc.
- A. Angulo, M., & C. Saavedra, O. (18 de Junio de 2018). Modelación hidrológica de la cuenca Maylanco utilizando HEC-HMS. *UPB - Investigación y desarrollo*, 18(1), 53-67. doi:DOI: 10.23881/idupbo.018.1-4i
- Ahmed Hamdan, A. N. (26 de marzo de 2021). Rainfall-Runoff Modeling Using the HEC-HMS Model for the Al-Adhamin River Catchment, Northern Iraq. *Hydrology*, 17. doi:https://doi.org/10.3390/hydrology8020058



- Duque Sarango, P., M. Patiño, D., & E. López, X. (diciembre de 2019). Evaluación del sistema de Modelamiento Hidrológico HEC-HMS para la simulación hidrológica de una microcuenca andina tropical. *Información tecnológica*, 30(6), 351-362. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000600351>
- Patel, P., Ghosh, S., & Kaginalkar, A. (1 de march de 2019). Performance evaluation of WRF for extreme flood forecasts in a coastal urban environment. *Atmospheric*, 39-48. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.03.005>
- Trucios Caciano, R., Martínez Rodríguez, J., Blando Navarrete, J. L., & Sánchez Cohen, I. (2007). Calibración y validación del modelo hidrológico Swat en la cuenca del río Sextin en Durango, Mexico. *Revista Chapingo Serie Zonas Aridas*, vol. VI(1), 91-101. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=455545068010>

## ANEXOS

### Anexo 1. Configurado seleccionado para el preprocesamiento (WPS)

#### Namelist. WPS

```
&share
wrf_core = 'ARW',
max_dom = 2,
start_date = '2012-02-17_00:00:00', '2012-02-17_00:00:00', '2012-02-17_00:00:00',
end_date = '2012-02-18_18:00:00', '2012-02-18_18:00:00', '2012-02-18_18:00:00',
interval_seconds = 21600,
io_form_geogrid = 2,
opt_output_from_geogrid_path = '/media/ChristianQuiñonez/DATOS/WRF_MODEL/RUN_CRIS_9k/',
debug_level = 0,
/

&geogrid
parent_id = 1,1,
parent_grid_ratio = 1,3,
i_parent_start = 1,10,
j_parent_start = 1,14,
e_we = 23,22,
e_sn = 40,28,
geog_data_res = '10m','10m',
dx = 27000,
dy = 27000,
map_proj = 'mercator',
ref_lat = -15.945,
ref_lon = -70.162,
truelat1 = -15.945,
truelat2 = 0,
stand_lon = -70.162,
geog_data_path = '/media/kike/DATOS/WRF_MODEL/DATA/WPS_GEOG',
opt_geogrid_tbl_path = '/media/ChristianQuiñonez/DATOS/WRF_MODEL/RUN_CRIS_9k/',
ref_x = 11.5,
ref_y = 20.0,
/

&ungrib
out_format = 'WPS',
prefix = 'FILE',
/

&metgrid
fg_name = 'FILE',
io_form_metgrid = 2,
opt_output_from_metgrid_path = '/media/ChristianQuiñonez/DATOS/WRF_MODEL/RUN_CRIS_9k/',
opt_metgrid_tbl_path = '/media/ChristianQuiñonez/DATOS/WRF_MODEL/RUN_CRIS_9k/',
/

&mod_levs
press_pa = 201300 , 200100 , 100000 ,
          95000 , 90000 ,
          85000 , 80000 ,
          75000 , 70000 ,
          65000 , 60000 ,
          55000 , 50000 ,
          45000 , 40000 ,
          35000 , 30000 ,
          25000 , 20000 ,
          15000 , 10000 ,
          5000 , 1000
/
```

## Anexo 2. Configurado seleccionado para el procesamiento (WRF-ARW)

### Namelist.input.

```
&time_control
run_days           = 01,
run_hours          = 18,
run_minutes        = 0,
run_seconds        = 0,
start_year         = 2012,      2012,
start_month        = 02,      02,
start_day          = 17,      17,
start_hour         = 00,      00,
start_minute       = 00,      00,
start_second       = 00,      00,
end_year           = 2012,      2012,
end_month          = 02,      02,
end_day            = 18,      18,
end_hour           = 18,      18,
end_minute         = 00,      00,
end_second         = 00,      00,
interval_seconds   = 21600,
input_from_file    = .true.,    .true.,
history_interval   = 180,      60,
frames_per_outfile = 1000,     1000,
restart            = .false.,
restart_interval   = 5000,
io_form_history    = 2,
io_form_restart    = 2,
io_form_input      = 2,
io_form_boundary   = 2,|
debug_level        = 0,
/

&domains
time_step          = 162,
time_step_fract_num = 0,
time_step_fract_den = 1,
max_dom            = 2,
e_we               = 23,      22,
e_sn               = 40,      28,
e_vert             = 35,      35,
p_top_requested    = 5000,
num_metgrid_levels = 27,
num_metgrid_soil_levels = 4,
dx                 = 27000,    9000,
dy                 = 27000,    9000,
grid_id            = 1,      2,
parent_id          = 1,      1,
i_parent_start     = 1,      10,
j_parent_start     = 1,      14,
parent_grid_ratio   = 1,      3,
parent_time_step_ratio = 1,    3,
feedback           = 1,
```





```
smooth_option          = 0,  
/  
&physics  
mp_physics             = 6,          6,  
ra_lw_physics         = 1,          1,  
ra_sw_physics         = 1,          1,  
radt                  = 27,         9,  
sf_sfclay_physics    = 1,          1,  
sf_surface_physics   = 2,          2,  
bl_pbl_physics       = 1,          1,  
bldt                  = 0,          0,  
cu_physics            = 5,          5,  
cudt                  = 5,          5,  
isfflx                = 1,  
ifsnow                = 1,  
icloud                = 1,  
surface_input_source = 1,  
num_soil_layers       = 4,  
sf_urban_physics     = 0,          0,  
maxiens               = 1,  
maxens                = 3,  
maxens2               = 3,  
maxens3               = 16,  
ensdim                = 144,  
/  
&fdda  
/  
&dynamics  
w_damping              = 0,  
diff_opt               = 1,  
km_opt                 = 4,  
diff_6th_opt           = 0,          0,  
diff_6th_factor       = 0.12,      0.12,  
base_temp              = 290.,  
damp_opt               = 0,  
zdamp                  = 5000.,     5000.,  
dampcoef               = 0.2,       0.2,  
khdif                  = 0,          0,  
kvdif                  = 0,          0,  
non_hydrostatic       = .true.,     .true.,  
moist_adv_opt          = 1,          1,  
scalar_adv_opt         = 1,          1,  
/  
&bdy_control  
spec_bdy_width        = 5,  
spec_zone              = 1,  
relax_zone             = 4,
```

```
specified               = .true.,   .false.,  
nested                  = .false.,  .true.,  
/  
&grib2  
/  
&namelist_quilt  
nio_tasks_per_group    = 0,  
nio_groups              = 1,  
/
```

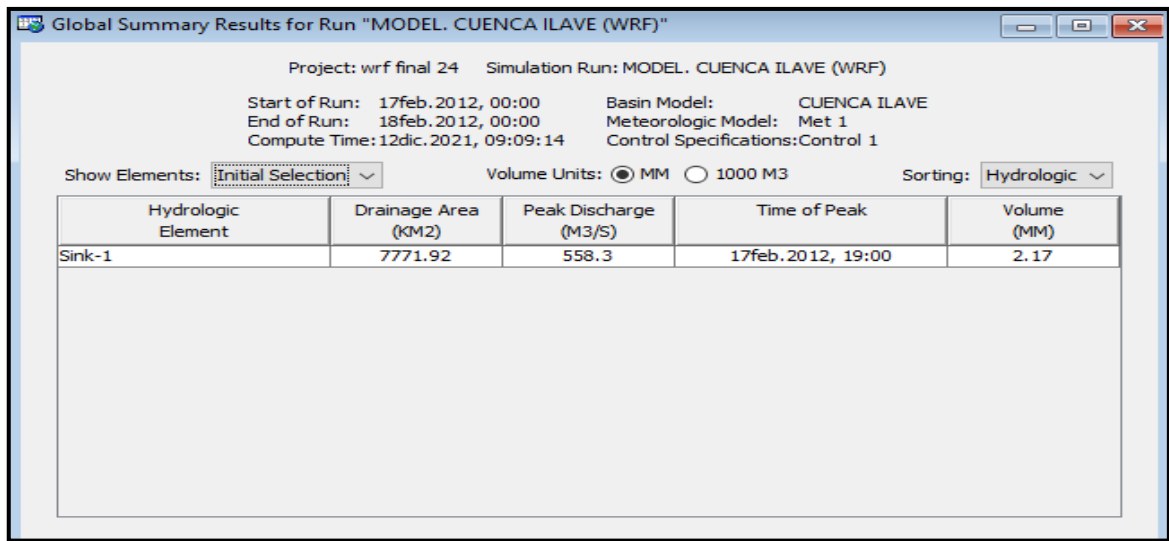
### Anexo 3. Scripts usados de extracción para el modelado WRF.

#### Script\_WRF.gs

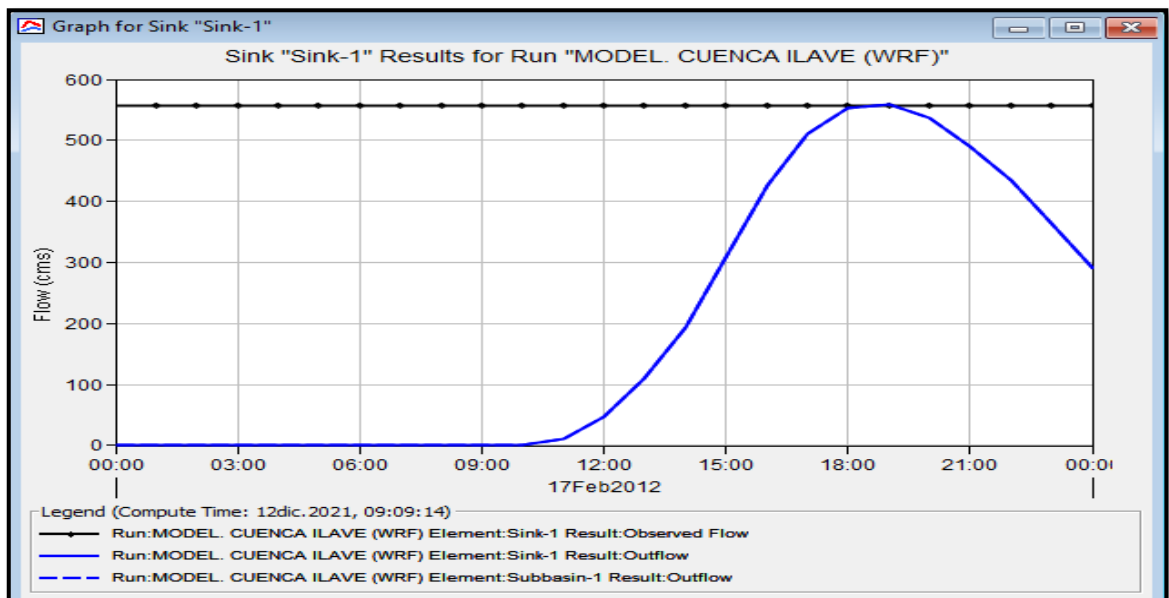
```
*
'open wrfout_domain_year_month_day.ct1'
*
num=1
while (num <= 24)
num=num+1
'set t 'num''
*
'set gxout shaded'
'set display color white'
'set grads off'
'set grid on'
*
*_
'set rgb 20 171 249 254'
'set rgb 21 0 150 254'
'set rgb 22 0 40 254'
'set rgb 23 77 238 96'
'set rgb 24 7 187 57'
'set rgb 25 0 101 0'
'set rgb 26 254 252 0'
'set rgb 27 244 177 5'
'set rgb 28 229 101 0'
'set rgb 29 254 0 0'
'set rgb 30 154 0 0'
'set rgb 31 97 0 0'
'set rgb 32 225 0 195'
'set rgb 33 147 103 231'
*_
'set clevs 2 5 10 15 20 25 30 50 70 90 100 120 150 170'
'set ccols 0 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33'
*_
*
'defline r1=(rainc-rainc(t-1))'
'defline r2=(rainnc-rainnc(t-1))'
'd r1+r2'
*
*_
'run cbarn.gs 1 1 8.6 4.2'
*_
'q dims'
*
line1=sublin(result,4)
line2=sublin(result,5)
itime1=subwrd(line1,6)
*
'draw shp /media/christian/DATOS/WRF_MODEL/RUN_PRONOSTICO/shp_puno/no_puno.shp'
'draw shp /media/christian/DATOS/WRF_MODEL/RUN_PRONOSTICO/shp_puno/Puno_prov.shp'
'draw shp /media/christian/DATOS/WRF_MODEL/RUN_PRONOSTICO/shp_puno/Lago_puno.shp'
*
'set font 5'
*
*****TITULO*****
*
'set string 2 c 2'
'set strsiz 0.13 0.13'
'draw string 5.5 8.38 '@PRONOSTICO DE TIEMPO - MODELO WRF 3 Km '
'set strsiz 0.11 0.11'
itit=substr(itime1,1,6)
itime1=subwrd(line2,6)
itime=substr(itime1,1,12)
*
h=substr(itime1,1,2)
d=substr(itime1,4,2)
m=substr(itime1,6,3)
y=substr(itime1,9,4)
pt = '@PRONOSTICO LLUVIAS(mm) 'd'/'m'/'y'/HORA:'h' '
'draw string 5.6 8.14 'pt
*****
'printim lluvia_'y'_'m'_'d'_'h'_'num'.png'
'c'
*--
endwhile
*--
*'quit'
```

## Anexo 4. Resultados de los modelamientos hidrológicos

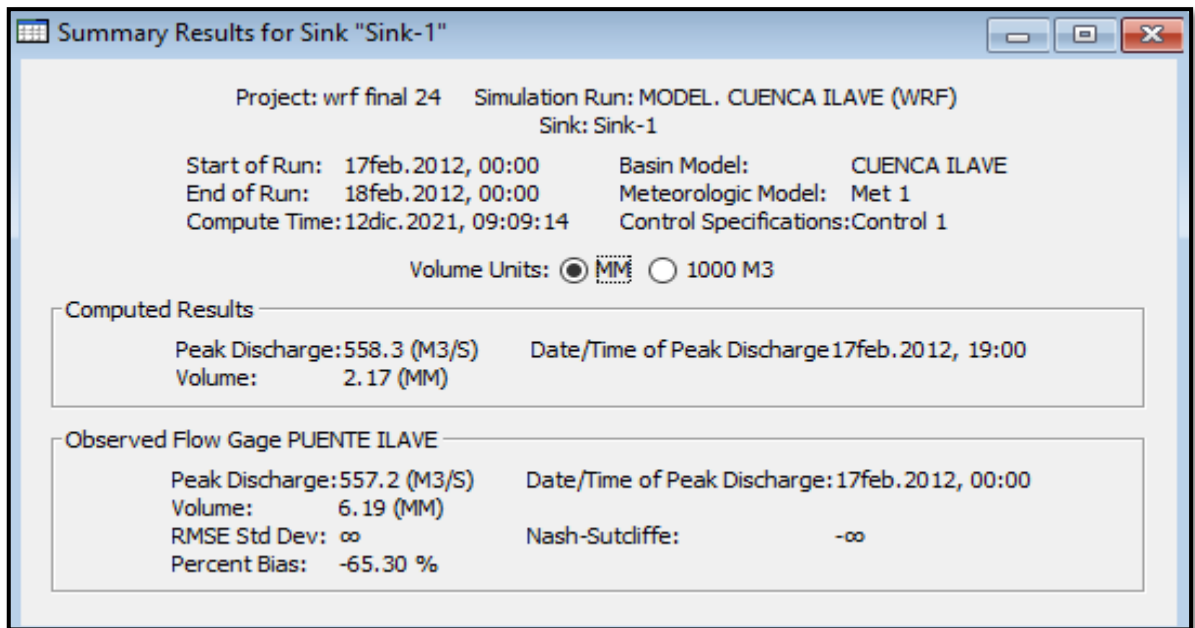
### Anexo 4.1. Generación de caudales a partir de las salidas del WRF.



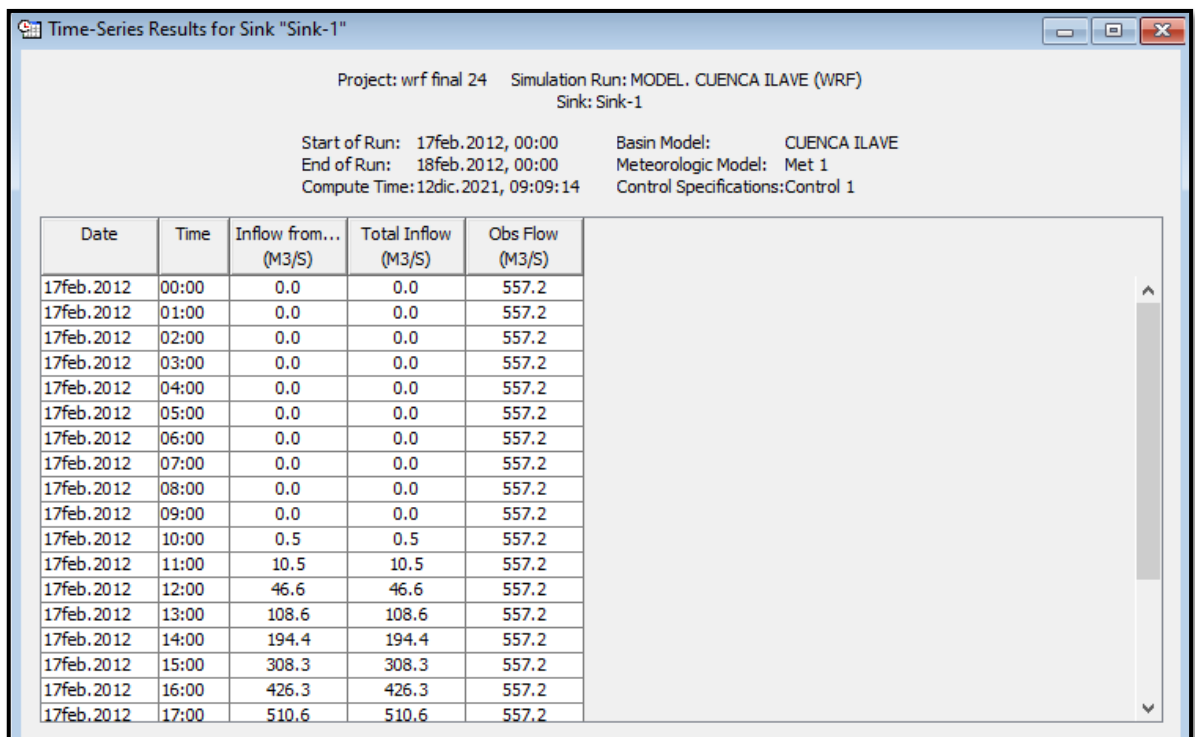
Resultado de resumen global para la ejecución a partir de las salidas del modelamiento en WRF en la cuenca Ilave (peak discharge) de  $558.3 \text{ m}^3/\text{seg}$ , para el 17 de febrero del 2012.



Resultado de hidrograma para la ejecución a partir de las salidas del modelamiento en WRF caudales simulados y observados en la cuenca Ilave para el 17 de febrero del 2012.

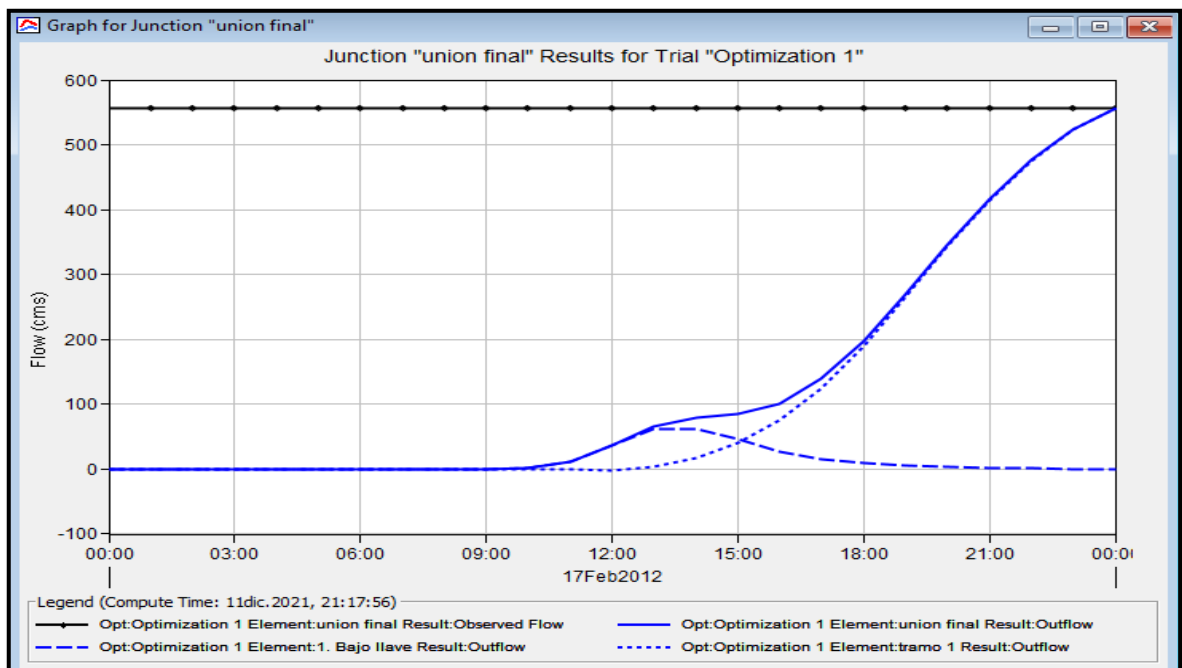


Resultados resumidos de sumidero resultante final para la ejecución a partir de las salidas del modelamiento en WRF en la cuenca Ilave para el 17 de febrero del 2012.

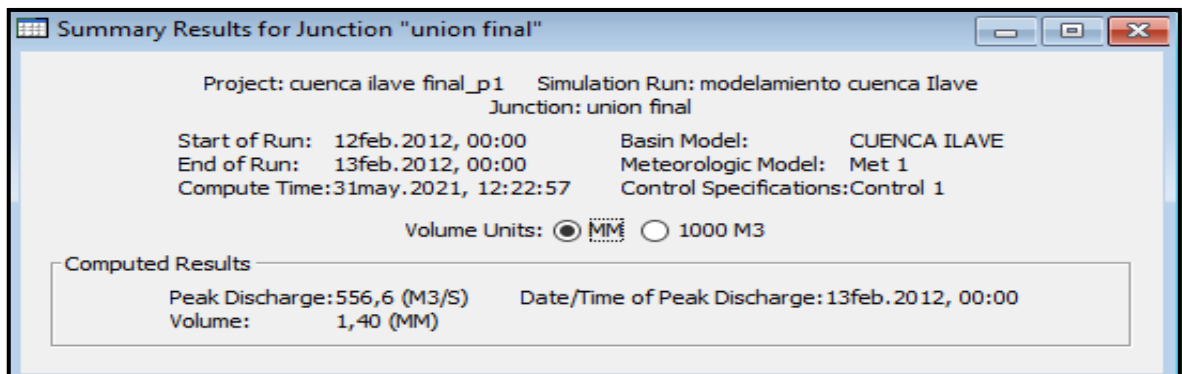


Resultado de serie de tiempos para la ejecución a partir de las salidas del modelamiento en WRF para el 17 de febrero del 2012 en la cuenca Ilave.

#### Anexo 4.2. Generación de caudales a partir de la información existente.



Resultado de hidrograma para la ejecución a partir de la información existente caudales simulados y observados para el 17 de febrero del 2012 en la cuenca Ilave.



Resultados resumidos de sumidero resultante final para la ejecución a partir de la información existente en la cuenca Ilave para el 17 de febrero del 2012.



Time-Series Results for Junction "union final"

Project: cuenca ilave final\_p1 Optimization Trial: Optimization 1  
Junction: union final

Start of Trial: 17feb.2012, 00:00 Basin Model: CUENCA ILAVE  
End of Trial: 18feb.2012, 00:00 Meteorologic Model:Met 1  
Compute Time: 12dic.2021, 09:36:32

Date	Time	Inflow from... (M3/S)	Inflow from... (M3/S)	Outflow (M3/S)	Obs Flow (M3/S)
17feb.2012	02:00	0.0	0.0	0.0	557.2
17feb.2012	03:00	0.0	0.0	0.0	557.2
17feb.2012	04:00	0.0	0.0	0.0	557.2
17feb.2012	05:00	0.0	0.0	0.0	557.2
17feb.2012	06:00	0.0	0.0	0.0	557.2
17feb.2012	07:00	0.0	0.0	0.0	557.2
17feb.2012	08:00	0.0	0.0	0.0	557.2
17feb.2012	09:00	0.0	0.0	0.0	557.2
17feb.2012	10:00	1.4	-0.2	1.4	557.2
17feb.2012	11:00	11.1	-1.1	11.1	557.2
17feb.2012	12:00	36.0	-1.2	36.0	557.2
17feb.2012	13:00	61.2	3.7	64.9	557.2
17feb.2012	14:00	62.8	17.2	80.0	557.2
17feb.2012	15:00	45.9	40.1	86.0	557.2
17feb.2012	16:00	26.8	74.7	101.4	557.2
17feb.2012	17:00	15.5	124.1	139.5	557.2
17feb.2012	18:00	9.1	189.3	198.4	557.2
17feb.2012	19:00	5.3	265.0	270.2	557.2
17feb.2012	20:00	3.0	342.4	345.4	557.2
17feb.2012	21:00	1.8	414.2	416.0	557.2
17feb.2012	22:00	1.0	475.3	476.3	557.2
17feb.2012	23:00	0.6	523.1	523.7	557.2
18feb.2012	00:00	0.3	556.3	556.6	557.2

Resultado de serie de tiempos para la ejecución a partir de la información existente en la cuenca llave para el 17 de febrero del 2012.

**Anexo 5.** Reporte de (INDECI) Instituto Nacional de Defensa Civil para la fecha  
17/02/2012 desborde del río Zapatilla e Ilave distrito de Pilcuyo.

25/6/2020

Instituto Nacional de Defensa Civil

Estado Situacional de la Emergencia			
<b>EMERGENCIA</b>			
<b>DESBORDE DEL RÍO ZAPATILLA E ILAVE MARGEN DERECHO EN EL DISTRITO DE PILCUYO REG PUNO (00049764)</b>			
<b>Grupo Fenómeno</b>		METEOROLOGICOS, OCEANOGRAFICOS	<b>Fecha</b> 17/02/2012 10:30:00
<b>Fenómeno</b>		INUNDACION	<b>Fuente</b> COMITE REGIONAL DE DEFENSA CIVIL-NANCY
<b>Latitud y Longitud</b>	-16,07092	<b>Longitud</b> -69,50909	<b>Usuario</b> CRDCPUNO03
<b>INFORME PRELIMINAR</b>			
<b>Hechos</b>	DESBORDE DEL RIO ILAVE MARGEN DERECHO COMUNIDADES CAMPESINAS DEL DISTRITO DE PILCUYO PROVINCIA DE EL COLLAO REGION PUNO		
<b>Daños</b>	1329 VIVIENDAS DESTRUIDAS 6645 PERSONAS DAMNIFICADAS 12202 VIVIENDAS AFECTADAS 02 FALLECIDOS POR COLAPZO DE VIVIENDA Y AHOGAMIENTO		
<b>Acciones</b>	EL COMITE REGIONAL DE DEFENSA CIVIL, ATRAVES DEL AREA DE OPERACIONES, REALIZO LAS EVALUACIONES DE DAÑOS EN SITU, DEBIDO AL DESBORDE DEL RIO ILAVE EN EL MARGEN DE DERECHO LA MISMA QUE AFECTO ESPECIALMENTE A LAS VIVIENDAS, CULTIVOS, ANIMALES Y OTROS, PARA DICHO EFECTO EL COMITE REGIONAL DE DEFENSA CIVIL, SOLICITO CON OFICIO APOYO HUMANITARIO PARA ATENDER A LOS DAMNIFICADOS Y AFECTADOS.		
<b>ZONAS AFECTADAS</b>			
Región	Provincia	Distrito	Localidad
PUNO	EL COLLAO	PILCUYO	ARICOLLO
PUNO	EL COLLAO	PILCUYO	CACHI
PUNO	EL COLLAO	PILCUYO	CHIPANA
PUNO	EL COLLAO	PILCUYO	HUAYLLATA
PUNO	EL COLLAO	PILCUYO	MAQUERCOTA
PUNO	EL COLLAO	PILCUYO	PILCUYO
PUNO	EL COLLAO	PILCUYO	PUCARA
PUNO	EL COLLAO	PILCUYO	SANTIAGO MUCHO
<b>EVALUACION DE DAÑOS GENERAL</b> <a href="#">Mas Detalle</a>			
Grpo.Daño	Daño	Cantidad	Und.Med.
<b>VIDA Y SALUD (PERSONAS)</b>	FALLECIDOS	2.00	PERSONAS
	DAMNIFICADOS	211.00	PERSONAS
<b>VIVIENDAS Y LOCALES PUBLICOS</b>	VIVIENDAS COLAPSADAS	1.00	UNIDAD
	INSTITUCIONES EDUCATIVAS AFECTADAS	22.00	UNIDAD
	SIMILARES(Has)	5958.00	HECTAREAS
<b>VIDA Y SALUD (PERSONAS)</b>	HERIDOS AFECTADOS	4.00	PERSONAS
		11556.00	PERSONAS
<b>VIVIENDAS Y LOCALES PUBLICOS</b>	VIVIENDAS INHABITABLES	55.00	UNIDAD
	VIVIENDAS AFECTADAS	3495.00	UNIDAD
	INSTITUCIONES EDUCATIVAS INHABITABLES	11.00	UNIDAD
	ESTABLECIMIENTOS DE SALUD AFECTADOS	4.00	UNIDAD
<b>TRANSPORTES</b>			

sinpad.indeci.gob.pe/sinpad/emergencias/Evaluacion/Reporte/pt\_eme\_situacion\_emergencia.asp?EmergCode=00049764

1/2



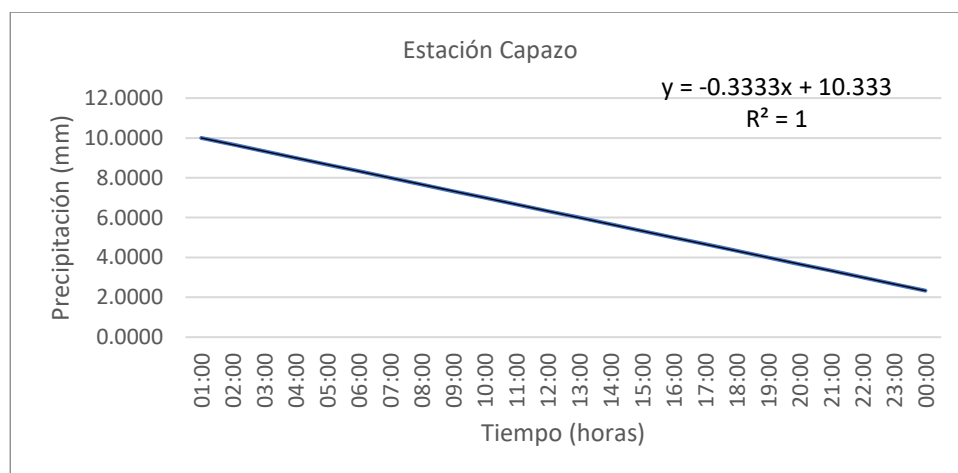
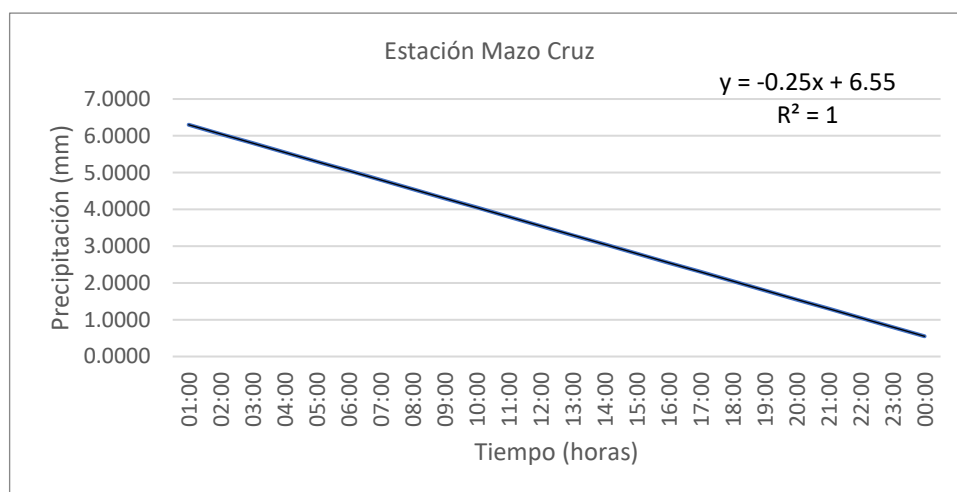
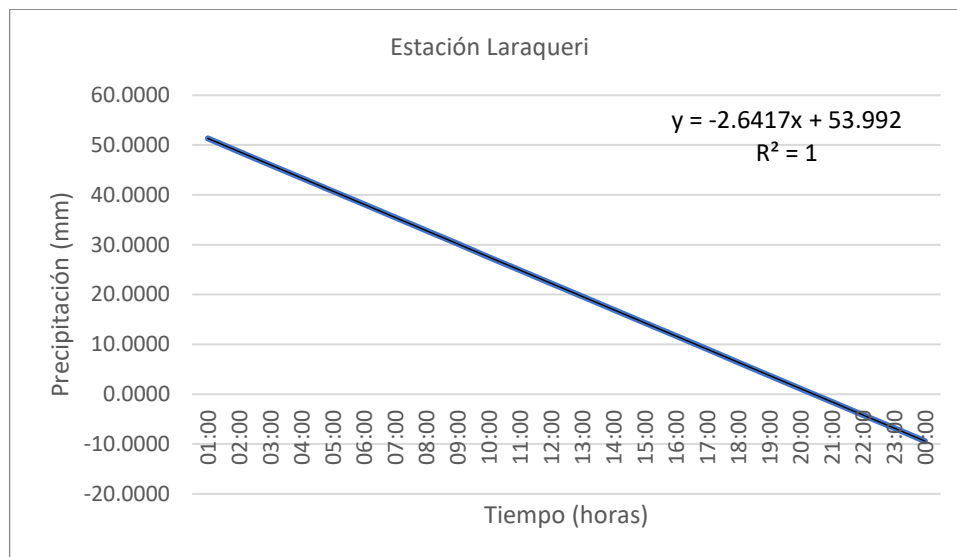
25/6/2020

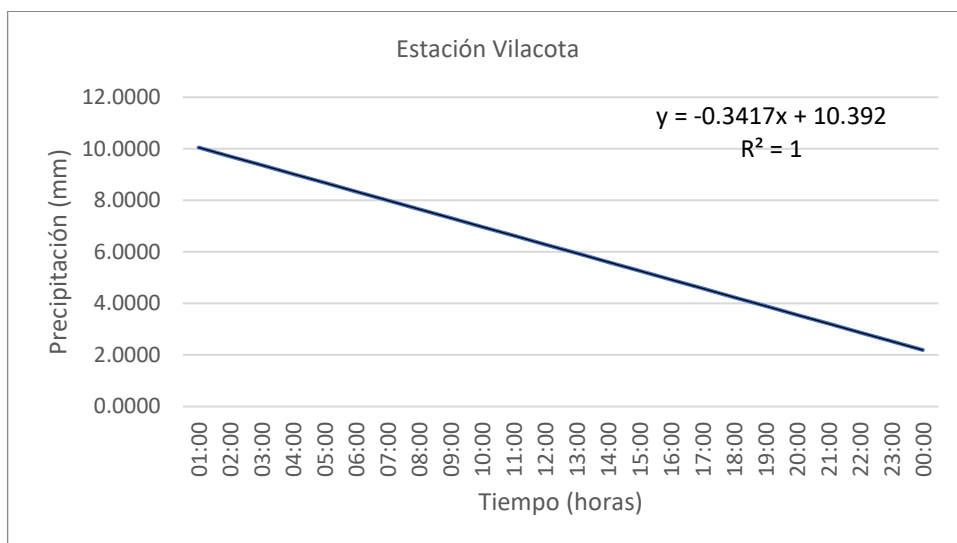
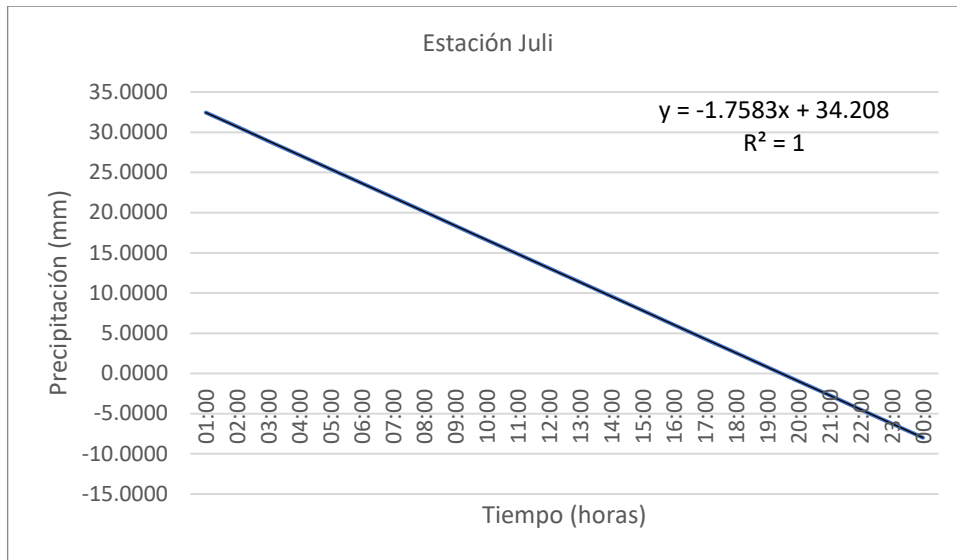
Instituto Nacional de Defensa Civil

AGRICULTURA - ANIMALES AFECTADOS	CARRETERAS AFECTADAS PUENTES COLAPSADOS	0.50 KILOMETROS 5.00 UNIDAD	
	OTROS ANIMALES	125.00 UNIDAD	
<b>ACCIONES REALIZADAS</b>			
<b>Dpto.</b>	<b>Prov.</b>	<b>Dist.</b>	<b>Localidad</b>
<b>PUNO</b>	<b>EL COLLAO</b>	<b>PILCUYO</b>	<b>PILCUYO</b>
<p><b>17/02/2012 - 0:00:00</b> : SE COORDINO CON EL GOBERNADOR, POLICIA NACIONAL, CUARTA BRIGADA DE MONTAÑA, PRONAA, PARA REALIZAR EL MONITOREO DE LA ZONA DEBIDO A QUE TIENE UNA POBLACION MUY EXTENSA AFECTADA. IGUALMENTE EL CONSEJERO DELEGADO, ASU VEZ REPRESENTANTE CONSEJERO POR EL COLLAO, VIENE APOYANDO EN EL TRASLADO DE AYUDA HUMANITARIA, DEL ALMACEN NACIONAL UBICADO EN LA CIUDAD DE JULIACA.</p> <p><b>17/02/2012 - 0:00:00</b> : EL COMITE REGIONAL DE DEFENSA CIVIL DE PUNO, REALIZO ACCIONES CONJUNTAS CON EL COMITE PROVINCIAL DE EL COLLAO ILAVE, COMITE DISTRITAL DE PILCUYO, PARA LA EVALUACION DE DAÑOS.</p> <p><b>17/02/2012 - 0:00:00</b> : EL ING. JOSE MARON VASQUES DEL AREA DE OPERACIONES VIENE REALIZANDO LAS EVALUACIONES DE LOS DAÑOS EN EL LUGAR DE LOS HECHOS, DETERMINANDO LA CANTIDAD DE DAMNIFICADOS Y AFECTADOS, YA QUE ESTOS CRECEN PROGRESIVAMENTE DEBIDO A QUE LA ZONA ES BASTE POBLADA. POR SU PARTE EL PRESIDENTE DEL SIREDESI PUNO, VIENE GESTIONANDO AYUDA HUMANITARIA CON OFICIO NRO 193-2012-GR-PUNO/PR, DEL INDECI LIMA, ALMCAEN NACIONAL DE PUNO, CON EL FIN DE ATENDER A LOS DAMNIFICADOS Y AFECTADOS.</p> <p><b>17/02/2012 - 0:00:00</b> : SE COORDINO EN FORMA INMEDIATA CON PRONAA, QUIEN VIENE ENTREGANDO A LA ZONA DE DESASTRES 18 TONELADAS DE ALIMENTOS CONSISTENTE EN ARROZ, AZUCAR, ACEITE, HABAS, HARINA, CONSERVAS. QUE DEBEN SER COMPARTIDAS CON EL DISTRITO DE ILAVE.</p> <p><b>17/02/2012 - 0:00:00</b> : EL PRESIDENTE DEL GOBIERNO REGIONAL PUNO, SECRETARIO TECNICO DE DEFENSA CIVIL, LA GOBERNACION Y OTRAS AUTORIDADES, EL DIA DE HOY A LAS 4:30 DE LA MAÑANA SE DIRIGIERON AL LUGAR DE DESASTRE, LLEVANDO LA AYUDA HUMANITARIA RESPECTIVA. ASIMISMO UN ELICOPTERO, SOBREVOLARA LA ZONA DE DESASTRE, PERO DEBIDO A QUE CONTINUAN LAS LLUVIAS PERSISTENTES, NO SE PUEDE REALIZAR TAL ACCION.</p> <p><b>18/02/2012 - 0:00:00</b> : EL PRESIDENTE DEL GOBIERNO REGIONAL PUNO, SECRETARIO TECNICO DE DEFENSA CIVIL, LA GOBERNACION Y OTRAS AUTORIDADES, EL DIA DE HOY A LAS 4:30 DE LA MAÑANA SE DIRIGIERON AL LUGAR DE DESASTRE, LLEVANDO LA AYUDA HUMANITARIA RESPECTIVA. ASIMISMO UN ELICOPTERO, SOBREVOLARA LA ZONA DE DESASTRE, PERO DEBIDO A QUE CONTINUAN LAS LLUVIAS PERSISTENTES, NO SE PUEDE REALIZAR TAL ACCION.</p> <p><b>25/02/2012 - 0:00:00</b> : CABE MENCIONAR QUE LOS DAÑOS QUE SE INFORMOS SON DE LA EVALUACION DE DAÑOS REALIZADA AL DESBORDE DEL RIO ILAVE MARGEN DERECHO DEL TRAMO ARICOLLO, EL MISMO QUE HA AFECTADO LAS COMUNIDADES Y PARCIALIDADES DE ARICOLLO, EL , VILCA TURPO, YAJACIRCATUYO, FORA Y ACCASO DE LA JURISDICCION, ASIMISMO SE HA CONSIDERADO EL DESBORDE DEL RIO ZAPATILLA, TRAMO PILCUYO, LA MSIMA QUE HA CAUSADO DAÑOS MATERIALES Y HUMANOS EN LAS DIFERENTES COMUNIDADES RIBEREÑAS DEL MARGEN DERECHO E IZQUIERDO DE LAS COMUNIDADES DE HUARIQUISANA, BARRIO 18 DE ENERO, MACHACAMARCA, BARRIO SAN BARTOLOME Y OTRAS COMUNIDADES ALEDAÑAS.</p> <p><b>25/02/2012 - 0:00:00</b> : DE IGUAL FORMA LA COMISION QUE SE HA HECHO PRESENTE, DEL INDECI LIMA, ING. RAUL BONIFAZ, Y EL ING. ERICK CORTIJO, VIENEN VISITANDO LAS ZONAS DE DESASTRE A CONSECUENCIA DE LOS DESBORDES DEL RIO ILAVE Y ZAPATILLA.</p> <p><b>25/02/2012 - 0:00:00</b> : CON OFICIO NRO 027-2012-MDP/A; EN LA FECHA SE MODIFICO LOS DATOS INICIALES, REALIZADOS DE ACUERDO A LA EVALUACION DE DAÑOS, REALIZADA POR EL ING. JOSE MARON, QUE INFORMO DE LOS HECHOS EN SITU, LA MISMA QUE HOY ESTAS SIENDO MODIFICADA DE ACUERDO A LA EVALUACION DE DAÑOS REALIZADA POR EL PRESIDENTE DEL COMITE DISTRITAL DE DEFENSA CIVIL DE PILCUYO.</p>			
<b>REQUERIMIENTO DE ATENCIÓN</b>			
<b>Item N°</b>	<b>Artículo / Bien</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Und.Med</b>
<b>APOYO HUMANITARIO</b>			
<b>Item N°</b>	<b>Artículo / Bien</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Und.Med</b>
1	BALDE PLASTICO 15 LITROS	150	UNIDAD
2	BIDON PLASTICO DE 131 LTS	150	UNIDAD
3	CAMA PLEGABLE DE LONA 3/4 PLAZA	300	UNIDAD
4	CARPA FAMILIAR PARA 6 PERSONAS (PNUD)	150	UNIDAD
5	COLCHON DE ESPUMA DE 3/4 DE PLAZA X 2 1/2 PULG.	150	UNIDAD
6	FRAZADA DE POLAR DE 2.00 M X 1.50 M	600	UNIDAD
<b>Total Ayuda en TM 9,5925</b>			
Fecha y Hora de Reporte	25/06/2020 17:19:51		
<a href="#">Imprimir</a>			



**Anexo 6.** figuras de la completación de datos faltantes por el método de regresión lineal en las estaciones meteorológicas Ilave, Laraqueri, Mazo Cruz, Capazo, Juli y Vilacota.







**Anexo 7.** Solicitud de información hidrometeorológica de precipitación de las estaciones Juli, Laraqueri, Mazo Cruz, Capazo, Vilacota para el 17/02/2012 y caudales en la estación hidrométrica Ilave.



**DIRECCION ZONAL 13**

**PROVEIDO N° D000075-2021-SENAMHI-DZ13-APL**

EXPEDIENTE : **2021-0003570**

ASUNTO: solicita información hidrometeorológica de Precipitación de Juli, Laraqueri, Mazocruz, Capazo, Vilcanota 2012, y Caudales de llave 2012

FECHA
<b>22/06/2021</b>

**Atender en 0 días**

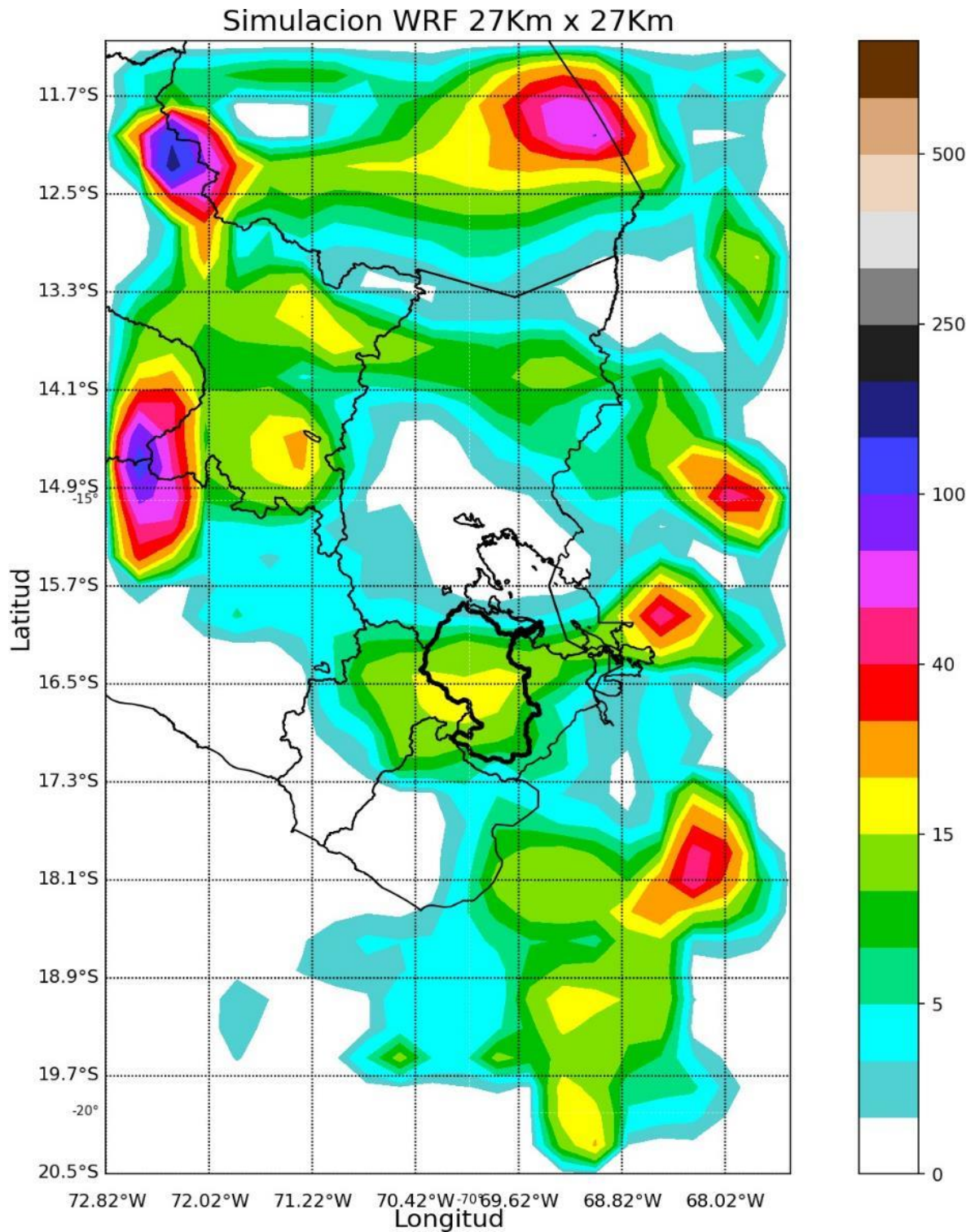
REFERENCIA : PROVEIDO N° 001144-2021-DZ13 solicita información hidrometeorológica de Precipitación de Juli, Laraqueri, Mazocruz, Capazo, Vilcanota 2012, y Caudales de llave 2012

DEPENDENCIA DESTINO	TRAMITE	PRIORIDAD	INDICACIONES
DIRECCION ZONAL 13 ORTEGA DIAZ LISBETH	ORIGINAL	NORMAL	ESTIMADA LISBETH ILAVE EN DATOS HORARIOS ESTA DISPONIBLE DESDE EL 2015 LARAQUERI DESDE AGOSTO DEL 2013 MAZO CRUZ NO EXISTEN DATOS HORARIOS VILACOTA DESDE ABRIL 2014 CAPAZO NO EXISTEN DATOS HORARIOS JULI NO TIENE DATOS HORARIOS ES POR ELLO QUE ESTOY MANDANDO LOS DATOS TOTALES DEL DIA

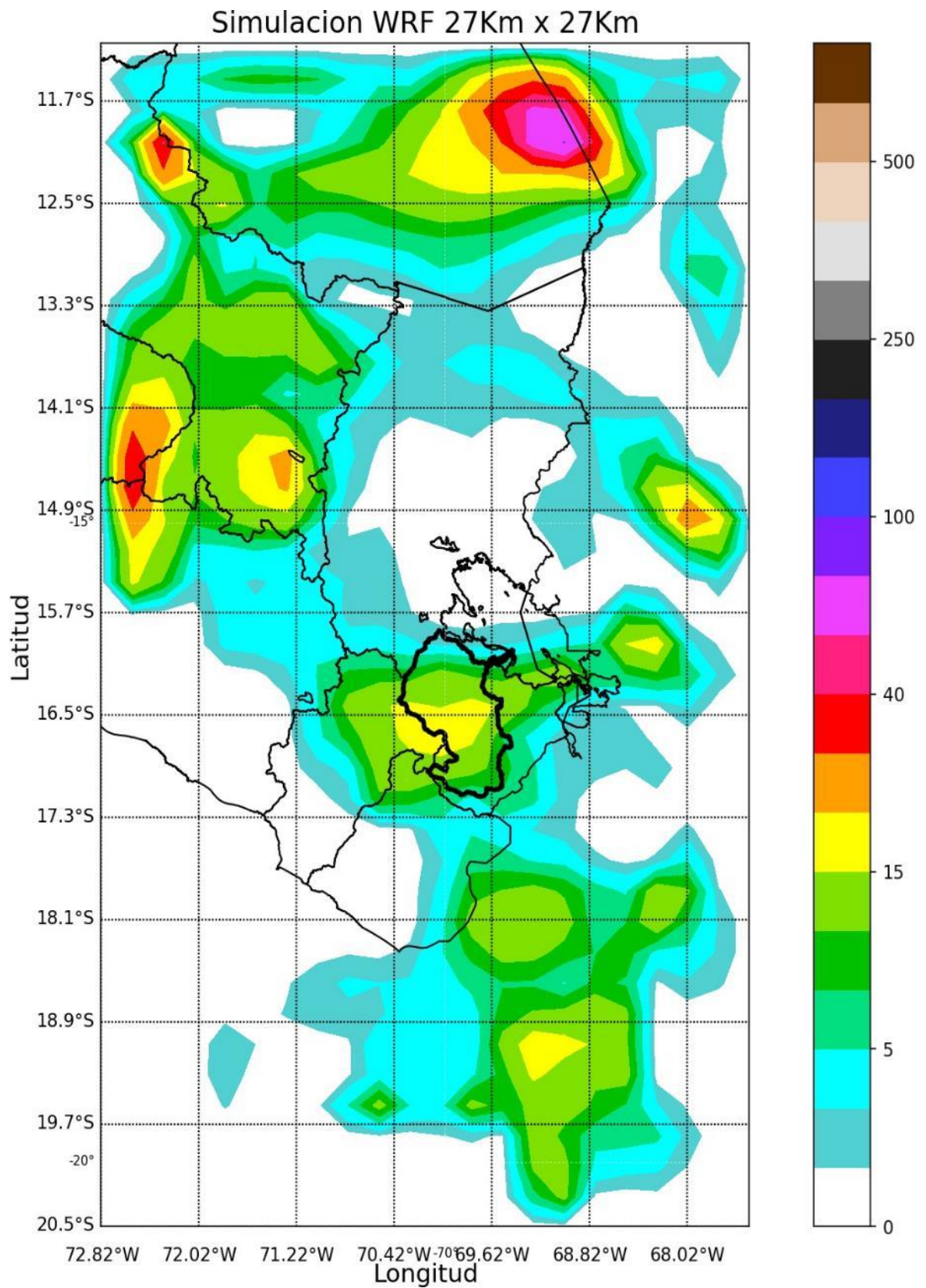
**PEÑA LOZANO ANGELA MARLENY  
ASISTENTE HIDROMETEOROLOGICO**

### Anexo 8. Mapa de precipitaciones grilladas modeladas en WRF.

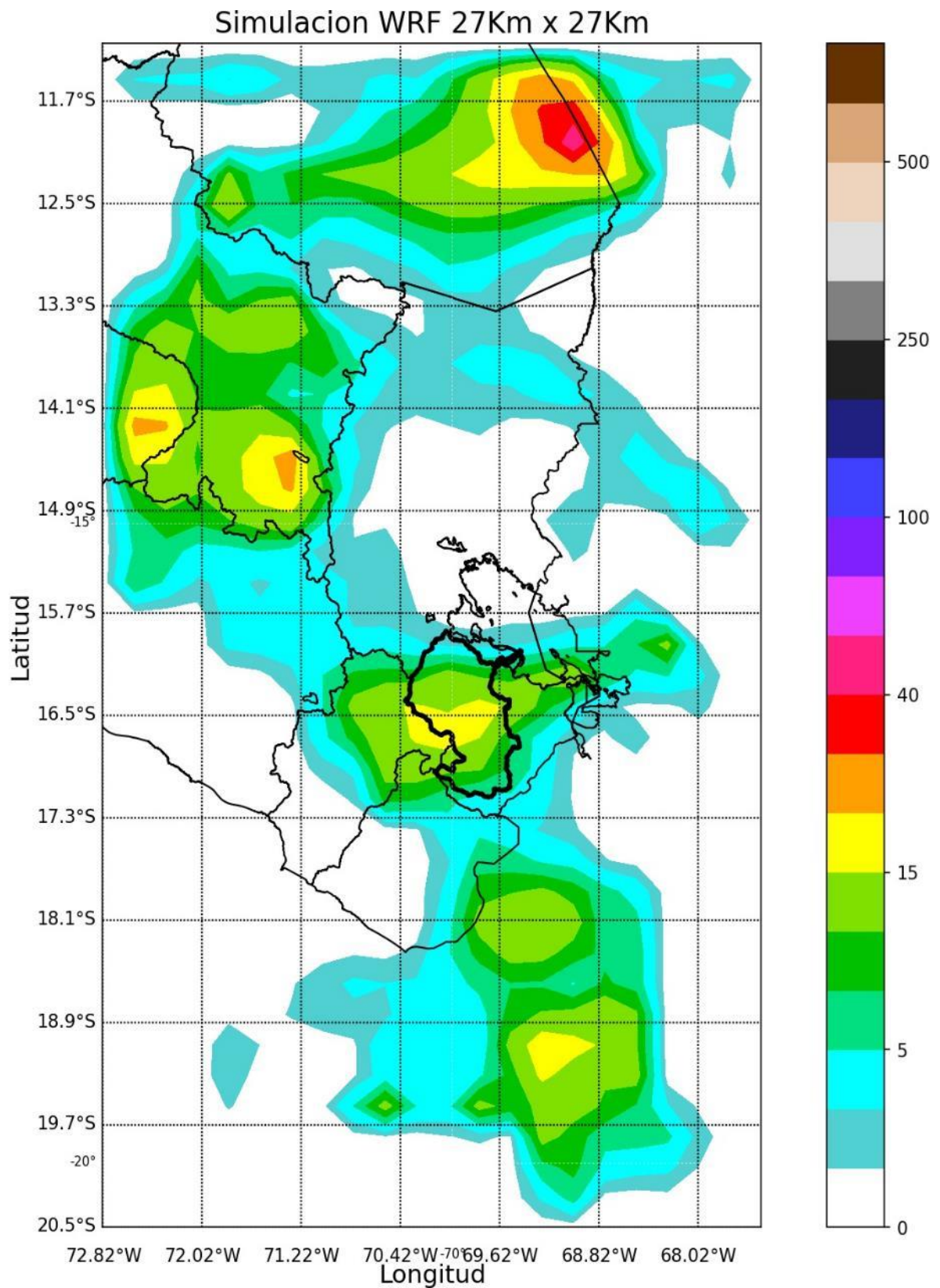
Anexo 8.1. Mapa de precipitaciones grillada das de 27 kilómetros 07:00 am a 13:00 pm.



Se observa la precipitación grillada pronosticada d12z a las 07:00 am para 27 km.

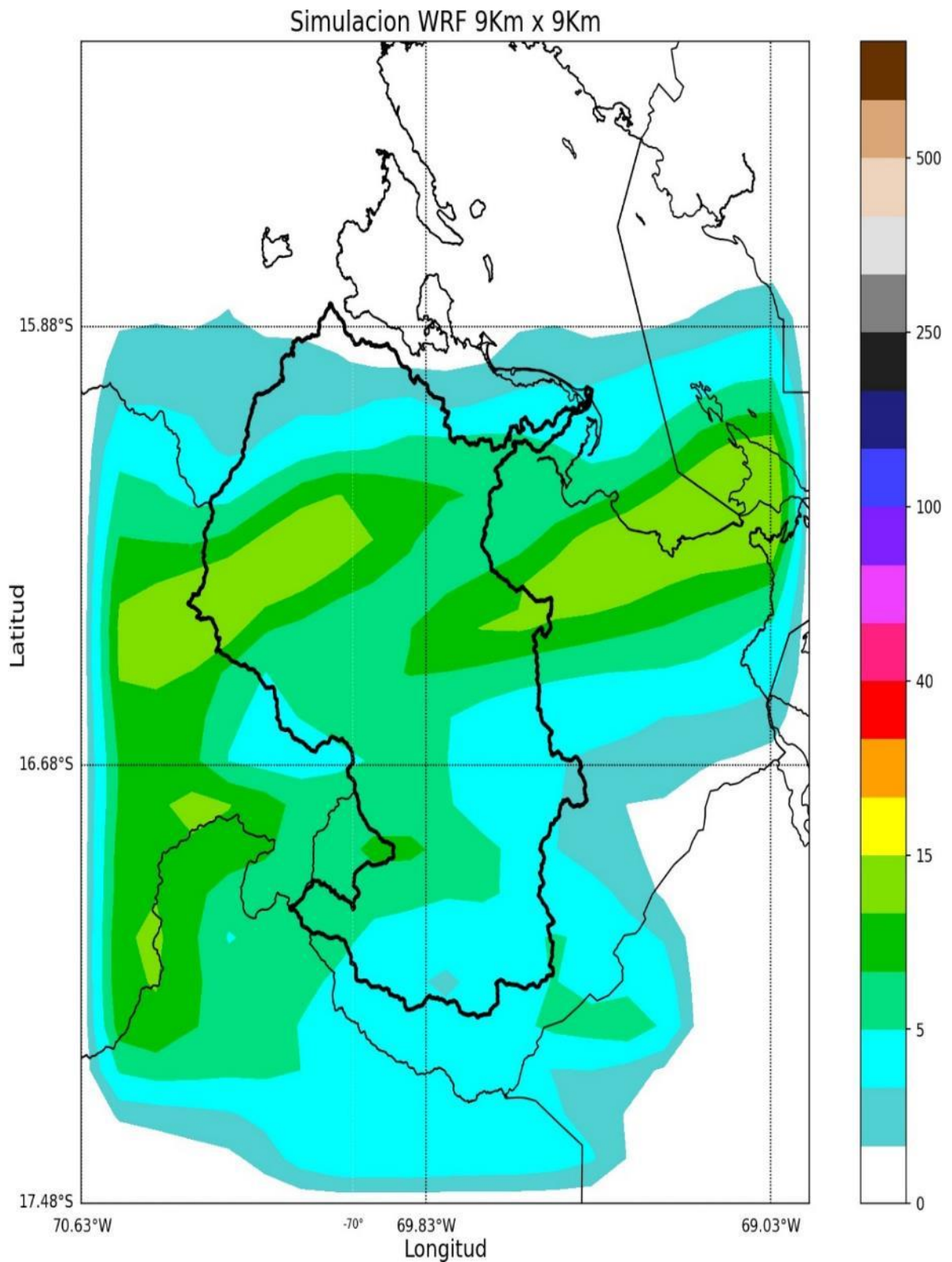


Se observa la precipitación grillada pronosticada d15z a las 10:00 am para 27 km.

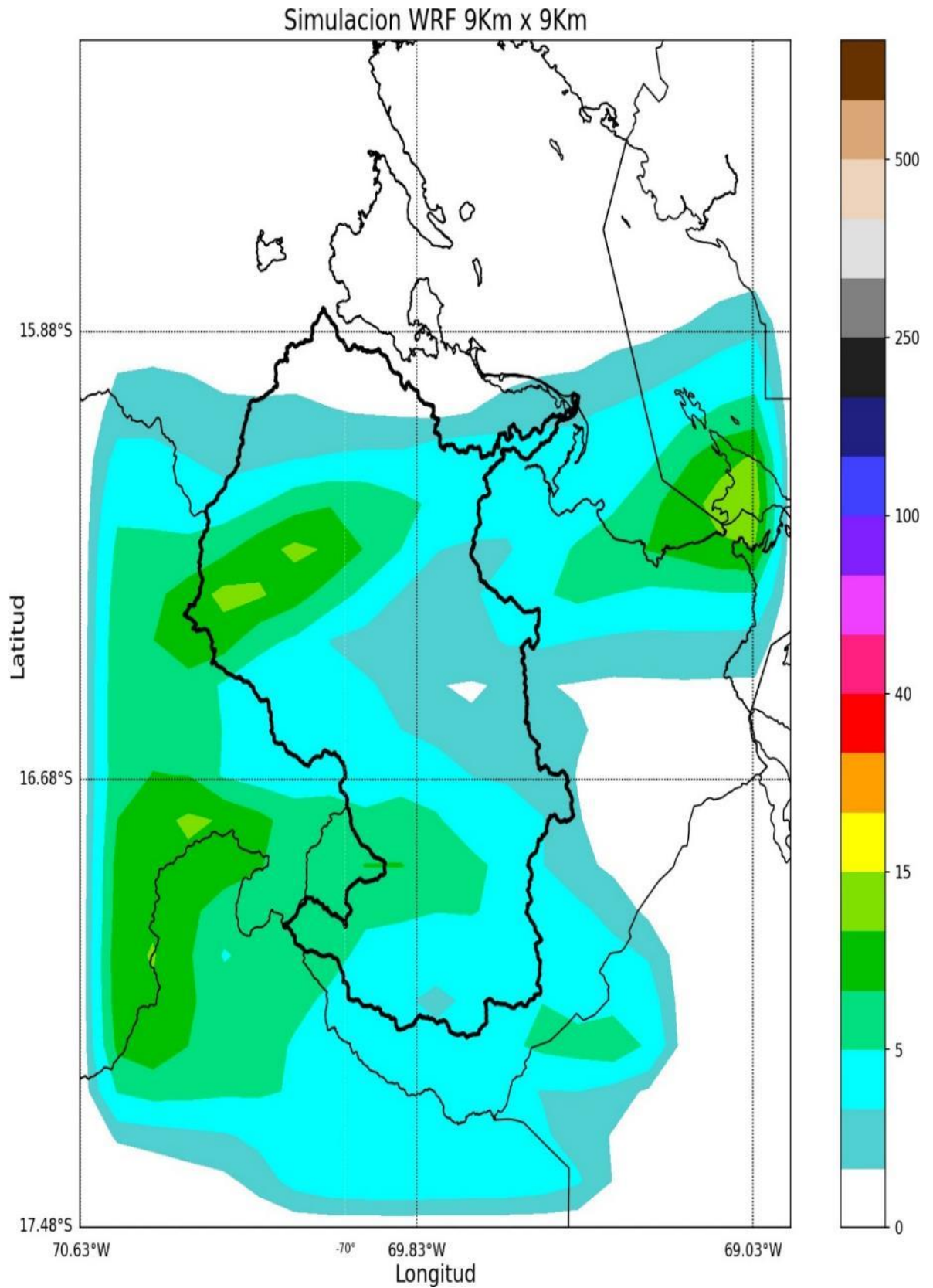


Se observa la precipitación grillada pronosticada d18z a las 13:00 pm para 27 km.

Anexo 8.2. Mapa de precipitaciones grilladas de 9 kilómetros 07:00 am a 13:00 pm.

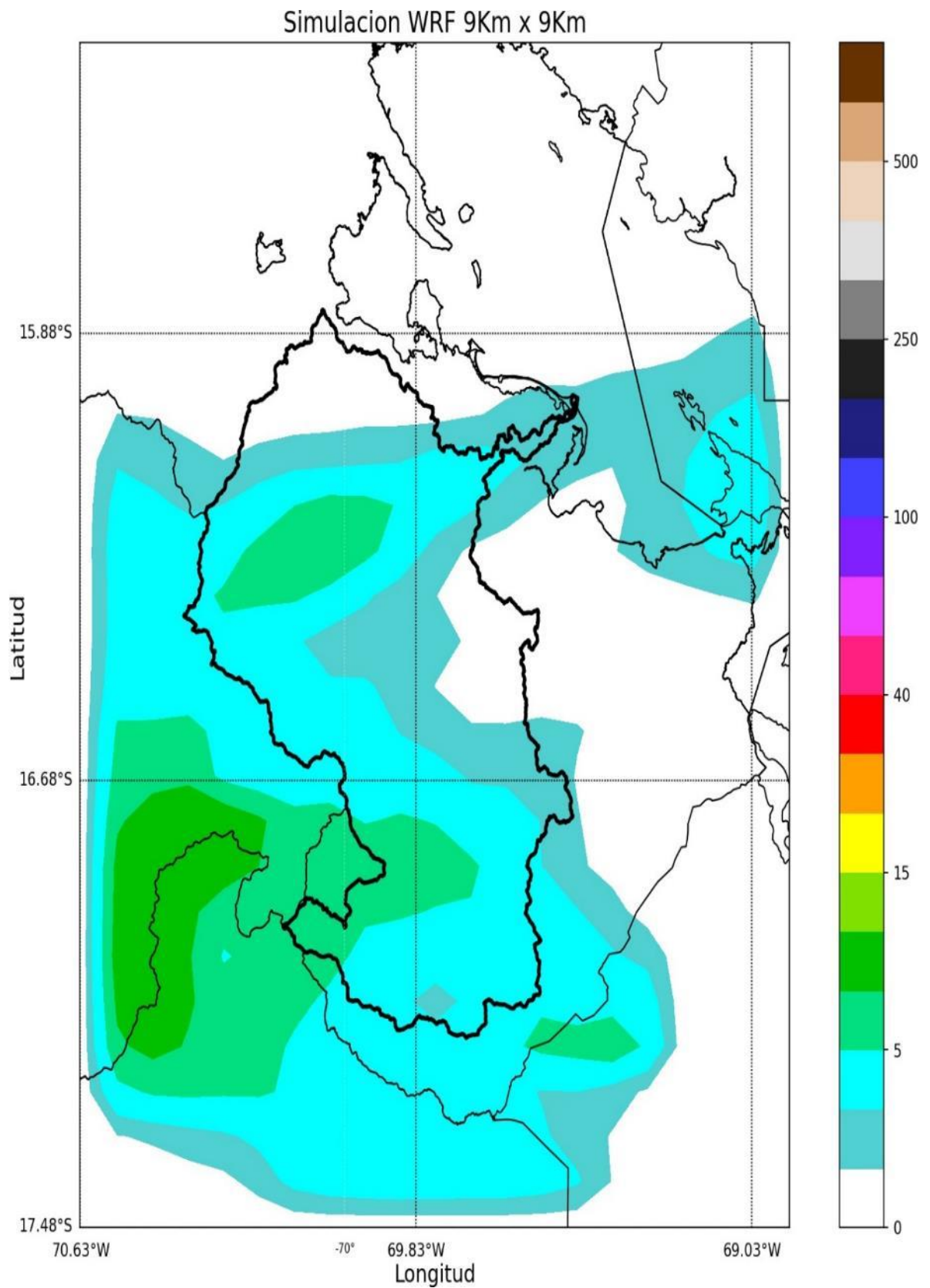


Se observa la precipitación grillada pronosticada d12z a las 07:00 am para 9 km.



Se observa la precipitación grillada pronosticada d15z a las 10:00 am para 9 km.





Se observa la precipitación grillada pronosticada d15z a las 10:00 am para 9 km.