

## Análisis de la estimación del caudal del río Cabuz utilizando lluvia del modelo WRF y lluvia registrada

*Analysis of the Cabuz river flow estimate using rainfall from the WRF model and recorded rainfall*

Wilder Eduardo González Raxjal<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos,  
Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

Dirección para recibir correspondencia: wildergonzalezr@gmail.com

Recibido: 17/05/2022 Aceptado: 31/12/2022

### Resumen

El uso de modelos numéricos del tiempo es una herramienta vital para todo Servicio Meteorológico Nacional. El modelo de Investigación y Pronóstico del Tiempo (WRF, por sus siglas en inglés) es un modelo numérico meteorológico que en este estudio se utiliza como herramienta para estimación de caudales utilizando su lluvia pronosticada. En este estudio se hace énfasis en la importancia que tiene el uso de los modelos numéricos meteorológicos como herramientas en la hidrología, principalmente aplicado a cuencas que presentan registros de inundaciones que causan severos daños a la población que se ubica en ellas, tal es el caso del río Cabuz de Guatemala, donde se aplica este estudio. Se espera que esta primera aproximación del modelo permita implementar en un futuro sistemas de alerta temprana que colaboren con la reducción de desastres en la cuenca del río Cabuz. En este estudio se utilizó un modelo meteorológico y uno hidrológico para realizar un análisis de lluvia-escorrentía. Se seleccionaron ocho eventos de lluvias intensas del 2010 para calibrar la cuenca utilizando la metodología del hidrograma unitario sintético del SCS. Se modelaron los eventos de lluvia seleccionada del 2014 utilizando como base las condiciones de calibración de la cuenca. Los resultados muestran que los hidrogramas de lluvia pronosticada por el modelo WRF y la lluvia registrada tuvieron variaciones significativas, las cuales se atribuyen a la resolución utilizada en el modelo o a la influencia que puede generar la retención potencial inicial en la cuenca, por lo que se recomienda profundizar estudios en estos dos aspectos para reducir estas diferencias encontradas.

**Palabras claves:** Río Cabuz, resolución modelo WRF, hidrograma unitario sintético, retención potencial inicial, inundación, escorrentía.

### Abstract

The use of numerical weather models is important for any National Weather Service. The Weather Research and Forecasting (WRF) model is a numerical meteorological model used in this study as a tool for estimating flows using their forecast rainfall. This study shows the importance of the use of numerical meteorological models as tools in hydrology applied to basins that present records of floods that cause severe damage to the population that is in them, such is the case of the Cabuz river from Guatemala, where this study is applied. It is expected that this first approximation of the model will allow early warning systems to be implemented in the future to help reduce disasters in the Cabuz river basin. In this study, a meteorological model and a hydrological model were used to carry out a rainfall-runoff analysis. Eight heavy rainfall events from 2010 were selected to calibrate the basin using the SCS synthetic unit hydrograph methodology. The 2014 selected rainfall events were modeled using the calibration conditions of the basin as a base. The results show that the rainfall hydrographs predicted by the WRF model, and the recorded rainfall had significant variations, which are attributed to the resolution used in the model or to the influence that the initial potential retention in the basin can generate, for which reason recommends further studies on these two aspects to reduce these differences found.

**Key words:** Cabuz River, WRF model resolution, synthetic unit hydrograph, initial potential retention, flood, runoff.



## Introducción

Los ríos son una parte fundamental de la vida diaria, sin embargo, estos pueden ser causa de una serie de daños que impactan directamente al ser humano cuando estos no se gestionan de forma correcta. Uno de estos daños es el provocado por las crecidas de estos ríos, situación que es bastante frecuente en la época lluviosa en Guatemala, en específico en la vertiente del Pacífico, por lo que es de mucho interés conocer más a profundidad este fenómeno de las crecidas en un río que es de importancia en esta región como lo es el río Cabuz de Guatemala.

De acuerdo con Bates et al. (2008) es muy probable que, en la mayoría de las áreas en el siglo XXI, la frecuencia de precipitaciones intensas aumente, lo que provocaría riesgos de inundaciones causadas por la lluvia. Monsalve (1999) enfatiza que las lluvias muy intensas en cuencas pequeñas provocan crecidas. También remarca que lluvias de menor intensidad, pero de larga duración y con gran cobertura provocan crecidas en cuencas grandes; por lo cual es importante contar con un panorama de cómo podrían presentarse los caudales en el río Cabuz, principalmente ante un escenario que provoque una gran crecida que pueda poner en peligro a las comunidades de la cuenca con riesgos de inundaciones. Este problema es posible reducirlo, si expertos en el tema y autoridades en conceso, monitorean los caudales del río, para ello es importante contar con una herramienta que apoye la toma de decisiones, principalmente en época lluviosa.

Una de las razones importantes para realizar este estudio es la posición geográfica de la cuenca. El presente estudio se lleva a cabo en el departamento de San Marcos ubicado al suroccidente de Guatemala, específicamente en la cuenca del río Cabuz, tomando como punto de control la estación Hidrométrica Malacatán, que pertenece al Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología [INSIVUMEH]. La cuenca abarca a diez municipios, siendo ellos: Tajumulco, San Pablo, Malacatán, San José El Rodeo, El Tumbador, San Rafael Pie de la Cuesta, Nuevo Progreso, Esquipulas Palo Gordo, San Marcos e Ixigüán. Por medio de imágenes satelitales se pudo notar que en la parte baja de la cuenca hay poblaciones que viven muy cercanas al río.

La cuenca del Cabuz aporta a la cuenca mayor que es la del río Suchiate la cual a su vez pertenece a la vertiente del pacífico de Guatemala. La cuenca

estudiada está muy cerca al vecino país de México siendo muy importante por el comercio y economía que se genera en la misma.

El pacífico guatemalteco cada año está expuesto a grandes fenómenos meteorológicos como los huracanes. De acuerdo con Beven (2010) existen registros de dos tormentas tropicales que han tocado Guatemala en el pacífico siendo estas Simone en 1968 y Agatha 2010, esta última en su trayectoria pasó muy cerca de la cuenca en estudio.

Hoy en día una herramienta de gran ayuda en estudios hidrológicos son los modelos de predicción numérica del tiempo, los cuales permiten tener un panorama con antelación de tiempo sobre posibles escenarios de precipitación en la cuenca, estos son utilizados hoy en día por muchas instituciones responsables del manejo científico de datos climáticos como lo es el INSIVUMEH en Guatemala quien utiliza el modelo Weather Research and Forecasting [WRF].

En este estudio se analiza la lluvia pronosticada del modelo del INSIVUMEH correspondiente al año 2014 para conocer su potencial aporte a la estimación de caudales como lo indica Givati et al. (2011) quienes hacen la observación que realizar un análisis preciso de la precipitación, su distribución espacial y predecir su cantidad, es muy importante para trabajar en la aplicación de la hidrología de una cuenca.

Younis et al. (2008) comparten que contar con una buena red de observación de lluvia y caudal en una cuenca pequeña, es raro, lo cual hace que los modelos hidrológicos sean difíciles de calibrar y no siempre los caudales observados y modelados pueden compararse, asimismo indican que, es beneficioso utilizar modelos de pronóstico de lluvia de alta resolución para cuencas debido a que tanto a nivel espacial y cuantitativo un modelo de lluvia pronosticado acertadamente ayuda a un estudio hidrológico.

La alta resolución de los modelos se refiere a los que se utilizan para pronósticos de tiempo a corto plazo, es decir no mayor de tres días, y tienen la ventaja de trabajar con precipitaciones que se dan en la mesoescala (Roebber et al., 2004). El pronóstico de lluvia de alta resolución podría aplicarse en Guatemala, en donde la información hidrometeorológica no sea abundante, como la cuenca objeto de este estudio.

Un estudio realizado utilizando un modelo de alta resolución llevado a cabo por Pontoppidan et al. (2017) demostró que, reduciendo la resolución horizontal de un modelo numérico se puede obtener una hidrología más realista. Ellos hicieron la prueba de reducir la resolución horizontal del modelo WRF de 9 a 3 kilómetros, dando como resultado una mejora en la representación de la precipitación en sus valores.

Otro estudio interesante sobre la importancia de los modelos numéricos es el desarrollado por Schwartz et al. (2009) el cual trata sobre una comparación del modelo WRF con resoluciones de 2 y 4 kilómetros aplicando el Modelo Norteamericano de Mesoescala [NAM] a 12 kilómetros. Los resultados son interesantes ya que los rangos propuestos por el WRF mostraron mejores resultados que los propuestos por NAM. Otro dato interesante fue conocer que no hay tanta diferencia en resultados del WRF para 2 y 4 kilómetros. Los autores Schwartz et al. (2009) proponen un modelo de predicción del tiempo de 4 kilómetros de resolución horizontal y no más pequeño debido a que los costos computacionales operativos de los modelos de predicción del tiempo de alta resolución son caros.

Otro estudio que propone a los modelos numéricos como apoyo a la hidrología es el desarrollado por Weisman et al. (2008) en este los autores comparan las parametrizaciones del modelo WRF de 4 kilómetros con el modelo Eta (Betts-Miller-Janjic de tipo convectivo) de 12 kilómetros, obteniendo el mejor resultado con el modelo WRF de 4 kilómetros ya que representa mejor un fenómeno convectivo. Por ello se ve la importancia de contar con un modelo numérico de resolución horizontal corta.

Moya y Ortega (2015) utilizaron el modelo WRF para pronosticar lluvia en el archipiélago de Cuba. Este estudio evaluó dos rangos de resolución horizontal del modelo WRF siendo de 8 y 24 kilómetros para pronóstico de lluvia, observándose que la resolución horizontal más pequeña brinda más detalle en nivel de precisión de la lluvia. Los autores encontraron que el modelo WRF subestimó la lluvia en el período lluvioso del 2014, pero es muy útil, debido a que un logro del modelo WRF fue alcanzar buenos resultados en la detección de lluvia.

Luego de ver la importancia que desempeñan la resolución de los modelos de predicción numérica para

la hidrología, es importante mencionar algunos estudios hidrológicos que han utilizado el modelo WRF como pronóstico de lluvia de entrada como el realizado por Barranza et al. (2017) quienes estudiaron la cuenca del río Sucio en El Salvador, aplicando la lluvia pronosticada del modelo WRF para dos eventos, uno fue evaluar 11 días la Depresión Tropical E-12, y otro fue una tormenta convectiva del 2015. Los resultados muestran que el WRF subestimó la precipitación en ambos casos, es decir, la lluvia observada por las estaciones meteorológicas superó la lluvia pronosticada por el modelo WRF, de igual manera los hidrogramas generados por el modelo WRF se vieron superados por los hidrogramas registrados. La parte de la hidrología fue realizada con el software HEC-HMS.

Otro estudio realizado por Rogelis y Werner (2018) llevado a cabo en Colombia en el río Tunjuelo investigó una zona de topografía montañosa en donde los autores remarcan la importancia de los modelos de predicción numérica del tiempo ya que pueden ser útiles en ampliar un tiempo de predicción que sea mayor al tiempo de concentración de la cuenca. También enfatizan que las cuencas hidrográficas montañosas son propensas a sufrir de inundaciones repentinas y tiempos de concentración cortos.

El estudio de Rogelis y Werner (2018) evaluó el desempeño del modelo WRF utilizado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), es decir, el Instituto Hidrometeorológico Nacional de Colombia, que proporcionó la lluvia pronosticada del WRF para su evaluación. Los datos de tormentas evaluados fueron seleccionados de un período comprendido entre diciembre 2002 a julio 2009, las resoluciones utilizadas fueron de 15, 5 y 1.67 kilómetros de resolución espacial, el área de estudio estaba cubierta por el dominio de malla de resolución 1.67 km. El estudio hidrológico se realizó con el software TOPMODEL. Los resultados encontrados señalan que no hay diferencias significativas en los tres dominios evaluados, también que el modelo WRF sobrestimó la precipitación para tiempos cortos, posiblemente por deficiencias en parametrización, errores en condiciones de contorno o mala representación de la topografía.

Givati et al. (2011) llevaron a cabo un estudio en el río Jordán de Israel evaluando el potencial del modelo WRF con varios dominios de resolución horizontal para períodos del 2008/09 y 2009/10, los cuales

corresponden al invierno en Israel. Para el estudio hidrológico utilizaron el modelo Hydrological for Karst Environmental [HYMKE]. Los resultados mostraron que las resoluciones de 1.3 y 4 km del WRF, brindan resultados muy similares a la lluvia registrada, incluso con sesgos de solo un 3% entre la lluvia pronosticada por el modelo WRF y la lluvia real registrada en el área de estudio.

En cuanto a los hidrogramas los resultados son interesantes ya que probaron tres entradas de lluvia para el modelo HYMKE, siendo la primera la lluvia pronosticada del modelo WRF, la segunda la lluvia observada y finalmente la tercera la lluvia de un modelo de regresión lineal. El resultado fue que los hidrogramas generados por el modelo WRF son muy similares con los hidrogramas de lluvia observada, en cuanto al modelo de regresión lineal este subestimó los caudales. Los autores enfatizan la importancia del uso de modelos meso escalares de alta resolución, especialmente en lugares con topografía compleja, ya que los resultados obtenidos del estudio muestran que el modelo WRF puede ser una herramienta importante para los hidrólogos.

Finalmente, un estudio muy interesante es el realizado en Guatemala por Orozco (2004) quien trabajó en el río Salamá el cual está ubicado al suroeste de Guatemala tomando como punto de control el río Salamá, a la altura del puente CA2. Se aplicaron dos metodologías diferentes para estimar la magnitud de caudales, el primero fue el análisis de frecuencia regional, el segundo fue utilizando el hidrograma unitario sintético del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos de América. El estudio muestra la variación temporal de la lluvia en la cuenca, y se elaboraron curvas DIF para la lluvia. Los resultados fueron similares para ambos métodos en la estimación de caudales en la cuenca del río Salamá, pero a criterio del autor el que brinda resultados más razonables es el hidrograma unitario sintético del SCS debido a que tiene una mayor base en las variables que intervienen para la generación de escorrentía primordialmente la lluvia.

Los estudios citados anteriormente evidencian la importancia de los modelos de predicción numérica del tiempo en el pronóstico de lluvia así mismo como estos pueden apoyar el trabajo de la hidrología en la estimación de caudales.

Por lo expuesto, el presente estudio busca determinar los caudales que se pueden presentar en el río Cabuz aplicando el modelo WRF y con ello aportar conocimiento para que se realice la planificación necesaria que evite los problemas de inundaciones y daños a la infraestructura que ocurre de forma permanente en esta región de Guatemala por las crecidas de este río.

### **Materiales y método**

El presente trabajo conlleva una sucesión de pasos que son necesarios describir con detalle por su importancia en el desarrollo del estudio. Como investigación cuantitativa de tipo descriptiva se notará que el siguiente orden debe de llevarse a cabo para lograr comprender la idea que se presenta, debido a la forma en que se aborda la investigación es necesario hacerlo con todo detalle y de manera objetiva.

### **Descripción del área de estudio**

La cuenca del río Cabuz está ubicada en el departamento de San Marcos, es decir en el occidente de Guatemala. Involucra a los 10 municipios previamente mencionados desde sus coordenadas de aforo en la longitud -92.04305 y latitud 14.90694, hasta la parte alta de la cuenca tiene un área de 450 km<sup>2</sup> y un perímetro de 153 km. La cuenca es de tipo endorreica y con una forma alargada. Este tipo de forma según Villón (2004) favorece a que una tormenta no abarque toda la cuenca.

La densidad de drenaje es de 0.63 km/km<sup>2</sup>, indicando un drenado medio, el río más largo de la cuenca proviene de la unión entre el río Cutzulchimá y Cabuz, siendo de 48 km, este dato se utiliza en el estudio para estimar el tiempo de concentración de la cuenca.

La pendiente del río más largo se estimó en 0.6 m/m y un tiempo promedio de retardo de 233 minutos, valores calculados con base a las ecuaciones del tiempo de concentración de la cuenca de Kerby-Hathway, Kirpich, SCS, Giadotti, Témez, Ventura-Heras y Hathaway según se detalla en la tabla 1.

Con estos datos se realizó un promedio obteniendo 388 minutos como tiempo promedio de concentración de la cuenca, luego se estimó el tiempo de retardo promedio en base al 60% del tiempo de concentración promedio de la cuenca, según se detalla en la tabla 1 mostrada a continuación.

**Tabla 1. Formulas utilizadas para estimar el tiempo de concentración de la cuenca**

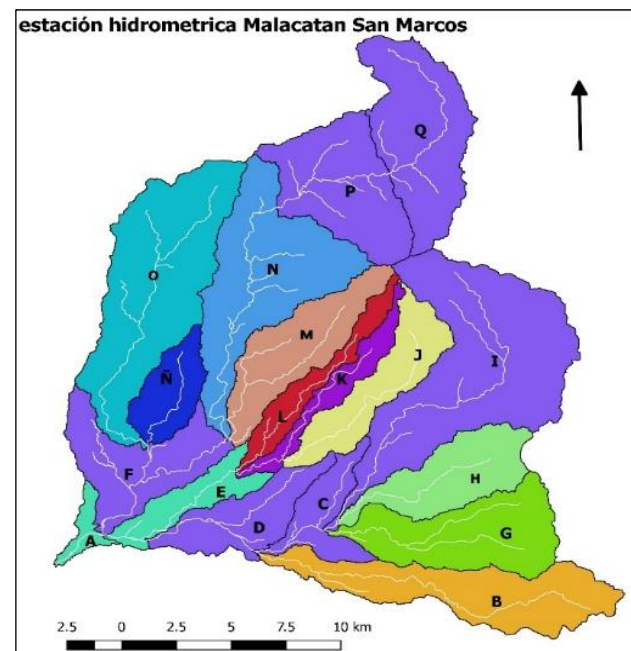
Autor (Ec.)	Formula	Tc (min)	Observación	Fuente
Kirpich (1)	$tc = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$	235	tc: tiempo de concentración (horas) L: longitud del cauce principal (m) S: pendiente del cauce (m/m)	(Villón,2004, p.243)
Hathaway (2)	$tc = \frac{36.36(Ln)^{0.77}}{S^{0.234}}$	355	tc: tiempo de concentración (min) L: longitud del cauce principal (km) n: factor de rugosidad (adimensional)	(Monsalve,1999, p.256)
SCS (3)	$tc = \frac{100L^{0.77} \left[ \left( \frac{1000}{CN} \right) - 9 \right]^{0.7}}{1900S^{0.5}}$	450	tc: tiempo de concentración (min) L: longitud hidráulica de la cuenca (mayor trayectoria de flujo (pies) CN: número de curva del SCS S: pendiente promedio de la cuenca (%)	(Monsalve,1999, p.258)
Kerby-Hathaway (4)	$tc = \frac{1.444L^{0.705}n^{0.47}}{H^{0.235}}$	367	n: rugosidad de Manning H: desnivel de L (m) L: longitud del cauce más largo (m)	(Orozco, 2014)
Ventura-Heras (5)	$tc = a \frac{S^{0.5}}{i}$ Siendo $0.05 \leq a \leq 0.5$	500	tc: tiempo de concentración (horas) i: pendiente media del cauce (%) S: área de la cuenca (km <sup>2</sup> ) L: longitud del cauce principal (km) a: alejamiento medio $a = \frac{L}{\sqrt{S}}$	(Ibáñez, Moreno y Gisbert, 2011)
Giadotti (6)	$tc = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$ Siendo $\frac{L}{3600} \geq tc \geq \left( \frac{L}{3600} + 1.5 \right)$	224	tc: tiempo de concentración (horas) S: área de la cuenca (km <sup>2</sup> ) L: longitud del cauce principal (km) H: elevación media de la cuenca o diferencia del nivel principal (m)	(Ibáñez, Moreno y Gisbert, 2011)
Témez (7)	$tc = 0.3 \left( \frac{L}{i^{0.25}} \right)^{0.76}$	587	L: longitud del cauce más largo (km) i: pendiente media de la cuenca. tc: tiempo de concentración (horas)	(Vélez & Botero, 2011, p.62)
Promedio del tiempo de concentración (minutos):		388	Tiempo de retardo en la cuenca (minutos):	233

Para realizar el estudio y mejorar la fase de modelación hidrológica se dividió la cuenca en 18 subcuencas, obteniendo para cada una de ellas su área, longitud del río más largo y pendiente media del cauce. La pendiente media de la cuenca es de 51%, y su elevación media es de 1841 msnm, la altura de la cuenca varia de los 360 msnm a 4220 msnm. En la parte noreste de la cuenca se encuentra el río Sala, en el centro el río Cutzulchimá, en el noreste el río Cabuz. La unión de estos tres ríos alimenta el caudal del río Cabuz con otros aportes de otros ríos que se suman en este recorrido.

En la figura 1 se muestra la cuenca en estudio y la división de las 18 subcuencas utilizadas para la modelación. Cada una de las subcuencas se identifican con las letras del alfabeto de la A a la Q.

Para la elaboración del mapa y cálculos de parámetros morfométricos de la cuenca se utilizó el software del sistema de información geográfica QGIS (2018), considerando que este software es de acceso libre.

**Figura 1. Mapa de la cuenca del río Cabuz**

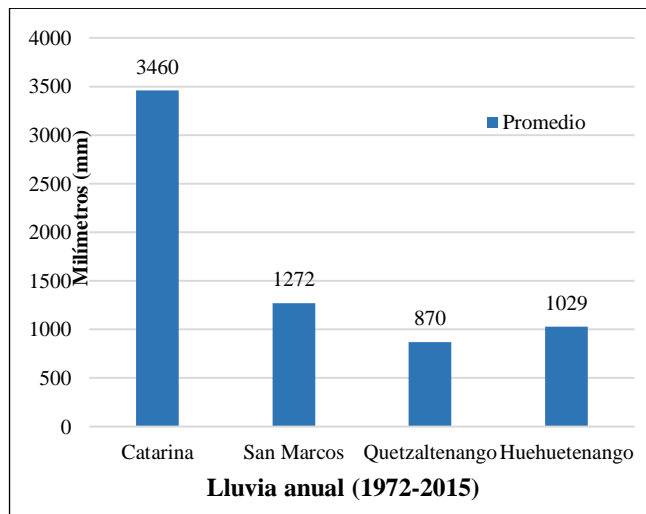


El número de curva en la cuenca se determinó utilizando la guía del Servicio de Conservación de los Recursos Naturales de EUA, así como los mapas de suelo y uso de suelos en la cuenca, definiendo esto la utilización para este estudio del número de curva en condición II para cada una de las 18 subcuencas a estudiar.

Tomando como referencia los capítulos 7 y 9 del Natural Resources Conservation Service [NRCS] (2004) se realizó un promedio de las 18 subcuencas para obtener el número de curva promedio para la cuenca, dando esto un valor de 59.

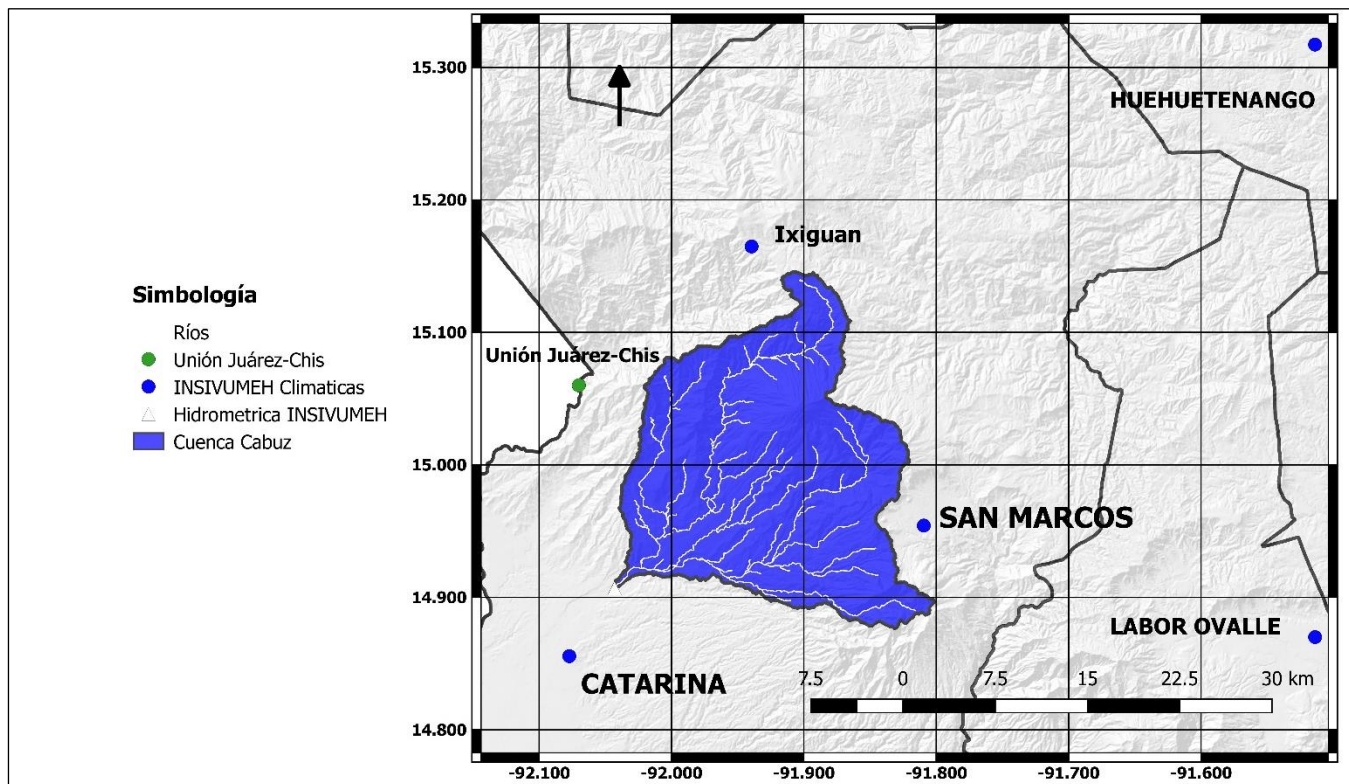
En cuanto a la precipitación promedio anual, se puede apreciar que en la parte media es de unos 1300 mm, en la parte baja de la cuenca la precipitación ronda los 3500 mm anuales. Este comportamiento se puede apreciar en la figura 2 la cual muestra la precipitación promedio anual histórica de las estaciones meteorológicas utilizadas.

Figura 2. Lluvia promedio historica en la cuenca



En la figura 3 se muestra la ubicación de las estaciones climáticas e hidrométrica utilizadas en la investigación (incluyendo las estaciones utilizadas para la interpolación de datos). El mapa fue elaborado con el software QGIS (2020).

Figura 3. Mapa de ubicación de las estaciones utilizadas en el estudio



Las distancias de cada una de las estaciones utilizadas respecto a la estación Ixiguan son las siguientes: 1) Estación San Marcos, 27 km.; 2) Estación Catarina, 37 km.; 3) Estación Unión Juárez, 18 km.; 4) Estación Huehuetenango; 49 km.; y 5) Estación Labor Ovalle, 56 km.

La tabla 2 muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio. Cabe destacar que la estación de Ixiguan cuenta con datos de 2011-2019, la estación Unión Juárez de México con datos de 1951-2016, las estaciones Labor Ovalle y Huehuetenango tienen información de precipitación del período 1972-2015.

**Tabla 2. Ubicación de las estación hidrométricas utilizadas**

Nombre	Elevación (msnm)	Latitud	Longitud	Instrumento
San Marcos	2418	14.9541	-91.8094	Pluviógrafo
Catarina	224	14.8555	-92.0772	Pluviógrafo
Ixiguan	3323	15.1648	-91.9395	Pluviómetro
Unión Juárez Chis	1300	15.0600	-92.0690	Pluviómetro
Huehuetenango	1870	15.3172	-91.5030	Pluviómetro
Quetzaltenango	2387	14.8700	-91.4800	Pluviómetro

La información de caudal se obtuvo de la estación del INSIVUMEH ubicada en Malacatán a una elevación de 360 msnm, latitud 14.9069, longitud -92.0430, la cual posee información de tipo diario durante el período 1975-2016.

**Información Hidrometeorológica de la cuenca**

El estudio se realizó con la información disponible en las estaciones meteorológicas e hidrológica identificadas anteriormente, así como utilizando los datos del año más lluvioso histórico de cada estación y sus tormentas más intensas registradas en dicho año.

Los datos analizados comprenden el registro del período 1972-2015 de donde se escogió el año más lluvioso de la estación meteorológica San Marcos, siendo este el año 2010, luego se escogieron las ocho tormentas más intensas y de corta duración registradas por pluviógrafos en dicho año.

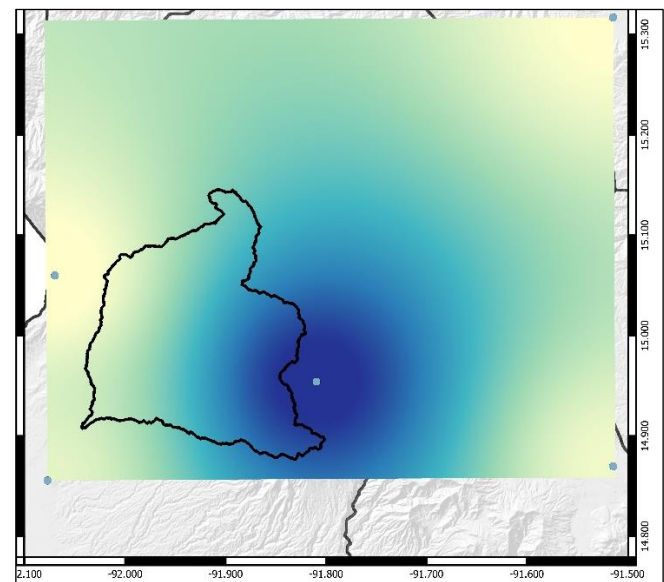
Seguidamente aplicando la metodología de Aparicio (1989) se halló que el número mínimo de estaciones en la cuenca debe ser tres, esto con el fin de determinar la lluvia media en la cuenca para el estudio.

Con base en esto se revisó que solo las estaciones de San Marcos y Catarina cumplían los requisitos para ser utilizadas en el estudio dado que la estación Ixiguan solo tiene información de lluvia diaria y no posee registros del año 2010, por lo que fue necesario ubicar otra estación que tuviera información y que pudiera utilizarse por su cercanía a la cuenca, identificando una estación en México llamada Unión Juárez Chis de la cual se obtuvieron datos publicados en la plataforma web del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California [CICESE] (2020).

Utilizando los datos de las estaciones Unión Juárez de México y las estaciones de Guatemala de San Marcos, Catarina, Quetzaltenango y Huehuetenango, se realizó la Interpolación de la Distancia Inversa Ponderada (IDW) por medio del software QGIS (2020) para determinar la lluvia en Ixiguan de los años 2010 y 2011.

Al realizar las interpolaciones sin incluir la estación Ixiguan, se obtuvo una superficie como se muestra en la figura 4, la que según indica el manual de QGIS (2020) se le denomina como “estadística de superficie”.

**Figura 4. Mapa de interpolación**



Al comparar la lluvia observada por la estación Ixiguán con el dato de lluvia interpolada para la misma estación, se pudo notar que ambos datos son muy similares para el evento seleccionado del año 2011. Con lo anterior se puede notar que el método de Interpolación de la Distancia Ponderada es de gran utilidad en el estudio debido a que se puede usar como una herramienta para hallar datos de lluvia con la superficie que se genera de la información de otras estaciones climáticas. De esta forma se utilizó el método IDW para hallar el valor de la lluvia de la estación Ixiguán en 8 eventos seleccionados del año 2010.

La lluvia media mensual de la estación San Marcos en el año 2010 fue de 216 mm con un error estándar de  $\pm 60$  mm, para la estación Catarina la media fue 387 mm  $\pm 107$  mm, para Labor Ovalle fue de 123 mm  $\pm 39$  mm, para Huehuetenango la media fue 126 mm  $\pm 41$  mm, y para Unión Juárez la lluvia media fue de 412 mm  $\pm 104$  mm.

Otro análisis que se realizó fue determinar coeficientes de Pearson entre la estación de Ixiguán y las demás estaciones, para ello se tomó el año 2014 como muestra del estudio brindando los resultados siguientes: estaciones San Marcos e Ixiguán con  $r = 0.44$ , estaciones Catarina e Ixiguán  $r = 0.17$ , estaciones Ixiguán y Labor Ovalle con  $r = 0.47$ , estaciones Ixiguán y Huehuetenango con  $r = 0.35$ , estaciones Unión Juárez e Ixiguán con  $r = 0.24$ .

Asimismo, para el estudio se utilizó el Patrón de Tormenta de la estación meteorológica de San Marcos, esto con el fin de hallar los valores de lluvia distribuida de Ixiguán conservando su dato registrado original y solo tomando la forma de la tormenta de San Marcos que está registrada por un pluviógrafo.

### Elección de datos del estudio

Como se explicó anteriormente, se eligió las ocho tormentas más intensas del año 2010 en la estación San Marcos. Otro criterio importante para hacer esta elección fue que, dentro de estas tormentas se encontraron los registros de la tormenta tropical Agatha.

Los eventos que se eligieron fueron los correspondientes a las fechas siguientes: 18/5/2010, 28/5/2010, 29/5/2010, 27/6/2010, 28/6/2010, 3/9/2010, 26/9/2010 y 27/9/2010.

Se leyeron las bandas de pluviógrafo de las estaciones San Marcos y Catarina para obtener los valores registrados de las tormentas en las fechas seleccionadas. En el caso de Ixiguán, se utilizó el Patrón de Tormenta de la estación climática de San Marcos considerando que la distancia entre ambas es de 27 km, y que ambas cuentan con una correlación moderada.

Con los datos de lluvia registrada por el pluviógrafo de las estaciones San Marcos y Catarina, y con la información interpolada de las 8 tormentas previamente seleccionadas, se trabajaron los polígonos de Thiessen utilizando únicamente las estaciones de Guatemala, obteniendo con ello la lluvia media en la cuenca para las tormentas evaluadas.

Para los caudales horarios se utilizaron los registros de la estación hidrométrica de Malacatán, la cual posee datos para las 7:00 y 17:00 horas.

### Información del modelo WRF para la investigación

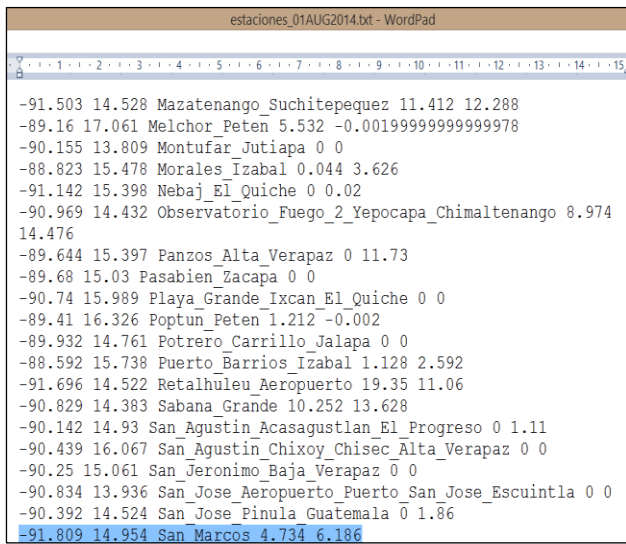
Esta investigación no tiene como fin profundizar en el uso del modelo WRF, únicamente evaluar los datos de lluvia pronosticada por el modelo en un período entre julio a octubre del 2014, ello respaldado por lo expresado por Skamarock et al. (2008) quien indica que el modelo WRF es un sistema numérico de predicción meteorológica

En la figura 5 se muestra el tipo de reporte de salida del modelo. Las primeras dos columnas mostradas en la figura son longitud y latitud, luego nombre de la estación meteorológica y las últimas dos columnas corresponden a la lluvia pronosticada, en este caso la penúltima del 1 de agosto 2014, y la última es de la fecha 2 de agosto 2014. Esto evidencia que los pronósticos presentados corresponden a un período de 48 horas.

En la figura 5 y sobre la línea remarcada en azul, se puede observar que la lluvia pronosticada para la estación San Marcos a través del modelo WRF sería que el 1 de agosto del 2014 se prevé una lluvia de 4.734 mm y para el dos de agosto del 2014 una lluvia de 6.186 mm.



**Figura 5. Vista del reporte de salida del modelo WRF**



**Modelación en Hec-Hms**

De acuerdo con Feldman (2000) el software Hec-Hms es un sistema de modelación hidrológica diseñado por el Centro de Ingenieros Hidrológicos (HEC).

En esta investigación se utilizó el modelo HEC para conocer la respuesta que la precipitación ejerce sobre el río Cabuz para lo cual se utilizó ocho eventos de lluvia intensa en la cuenca, así como registros de caudales observados que se produjeron en dos horarios.

Al contar con toda la información hidrometereológica pertinente se procedió a calibrar la cuenca al estimar la variabilidad que existe entre la serie de caudales registrados y simulados. En esta investigación se utilizó la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), porcentaje de sesgo (%) y error cuadrático medio de la desviación estándar (RMSEDesvStd) recomendados por Sharffenberg et al. (2018).

Los datos modelados en el software HEC-HMS (2018) son: lluvia media registrada, caudales horarios, y las variables morfológicas de cada subcuenca. Este software realiza la simulación de los procesos de lluvia-escorrentía con el método del hidrograma unitario (SCS) propuesto.

**Resultados**

En la tabla 3 se muestran el resumen de los datos físicos utilizados para la modelación de la cuenca como el área y el número de curva para condiciones de humedad antecedente según suelo tipo II.

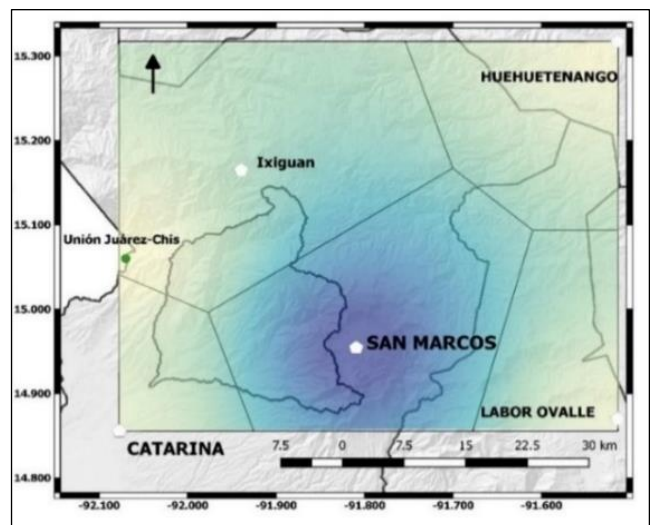
El caudal base fue estimado con respecto al caudal más bajo del mes en el que sucedió la tormenta evaluada. El tiempo de retardo mostrado en esta tabla no incluyó el tiempo de concentración de la fórmula de Ventura-Heras (ver fórmula en tabla 1).

**Tabla 3. Datos físicos utilizados para la modelación de la cuenca**

Subcuenca	Área	Número de curva	Tiempo de retardo (min)	Caudal base (m3/s)
A	5	74	117	1.21
B	33	48	207	0.60
C	12	27	124	0.40
D	17	50	159	1.00
E	11	51	159	1.00
F	24	62	215	2.00
G	30	47	83	1.20
H	21	61	120	0.40
I	62	72	208	0.20
J	20	69	136	1.00
K	10	67	139	0.50
L	11	61	116	1.50
M	24	62	113	1.00
N	43	77	207	2.00
Ñ	12	43	48	0.40
O	51	46	201	0.40
P	30	75	125	1.00
Q	34	76	142	1.00

En la figura 6 se muestran los polígonos de Thiessen elaborados para determinar la lluvia media en la cuenca.

**Figura 6. Polígonos de Thiessen del área modelada**

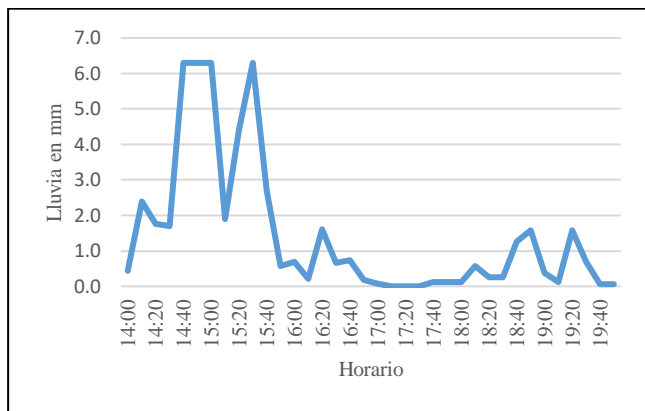


En la figura anterior se aprecian tres áreas de influencia principales, teniendo el área de la estación San Marcos 227 km<sup>2</sup>, el área de la estación Catarina 77 km<sup>2</sup> y el área de la estación Ixiguán 146 km<sup>2</sup>.

**Eventos evaluados en el río Cabuz**

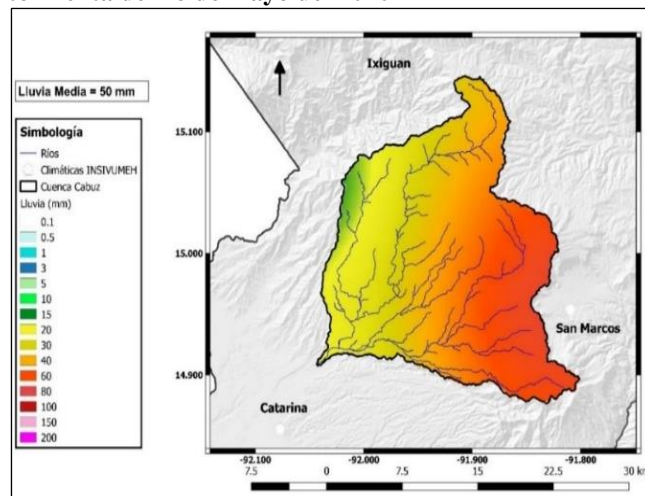
Para la modelación de la cuenca se determinó la lluvia media para cada una de las ocho tormentas evaluadas, generándose para cada una de ellas un gráfico de lluvia-horas según se muestra en la figura 7 donde se muestra esta gráfica para el evento del 18 de mayo del 2010.

**Figura 7. Comportamiento de la lluvia para la tormenta del 18 de mayo del 2010**



La información mostrada en la figura 7, permitió elaborar con el programa QGIS (2020) un mapa de magnitud de la lluvia en la cuenca, observándose este resultado en la figura 8 con datos para la tormenta del 18/5/2010.

**Figura 8. Mapa de magnitud de lluvia media para la tormenta del 18 de mayo del 2010**



Siguiendo el procedimiento descrito anteriormente, se obtuvieron los resultados de lluvia media en la cuenca para los eventos que se muestran en la tabla 4.

**Tabla 4. Valores de lluvia media en la cuenca**

Fecha del evento	Lluvia media (mm)
18/05/2010	50
28-29/05/2010	203
27-28/06/2010	183
26-27/09/2010	124

**Calibración de la cuenca**

En la tabla 5 se muestran los datos físicos calibrados para la cuenca con condiciones de humedad antecedente de suelo tipo II.

**Tabla 5. Datos físicos calibrados para la cuenca**

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Número de curva	Tiempo de retardo (min)	Caudal base (m <sup>3</sup> /s)
A	5	65	86	0.18
B	33	39	54	1.20
C	12	34	49	0.50
D	17	41	63	0.60
E	11	42	66	0.40
F	24	53	98	1.00
G	30	38	38	1.00
H	21	52	40	0.75
I	62	63	60	2.20
J	20	60	41	0.70
K	10	58	37	0.40
L	11	52	34	0.40
M	24	53	36	0.90
N	43	68	71	1.50
Ñ	12	34	32	0.40
O	51	37	64	1.80
P	30	66	66	1.00
Q	34	67	60	1.20

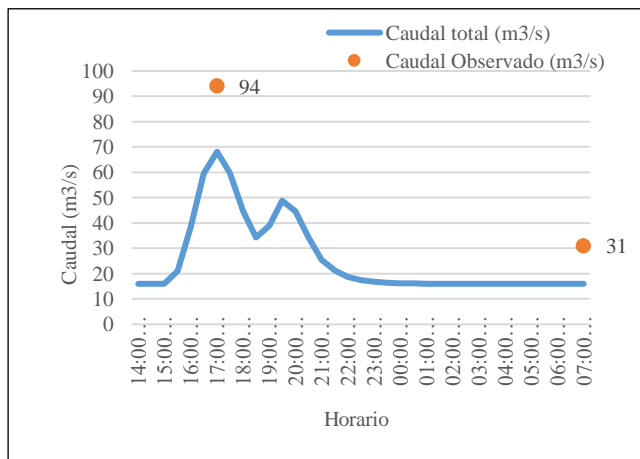
En la tabla 6 se muestran los resultados del caudal máximo en metros cúbicos por segundo calibrado en el modelo con sus valores de NSE, RMSE y porcentaje de sesgo obtenido.

En las figuras 9 y 10 se muestran los hidrogramas calibrados para los eventos analizados del día 18/5/2010 y 28-29/5/2010.

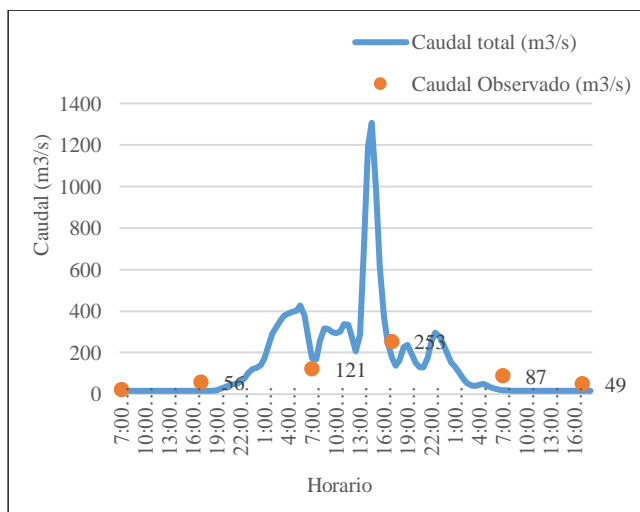
**Tabla 6. Resultados de la calibración del modelo**

Fecha	NSE	RMSE Desv Std	Porcentaje de sesgo %	Caudal máximo (m3/s)
18/05/2010	0.55	0.70	-33.00	68
28-29/05/2010	0.53	0.70	-29.00	1307
27-28/06/2010	-0.30	1.10	-26.00	690
26-27/09/2010	-0.72	1.30	1.00	443

**Figura 9. Hidrograma para el 18 de mayo de 2010**



**Figura 10. Hidrograma para el 28-29 de mayo de 2010**



**Estimación de caudales en el río Cabuz**

Con la cuenca calibrada se procedió a utilizar los datos del modelo WRF de lluvia pronosticada del año 2014, ya que son los únicos con los que se cuenta.

El período de datos evaluado fue de eventos de lluvia entre los meses de julio a octubre 2014, pero los datos utilizados como base en el modelo hidrológico son los de la calibración de la cuenca en el año 2010.

Los datos proporcionados por el modelo WRF son de tipo diario, pero en la modelación son necesarios de tipo horario, por lo que fue necesario determinar la lluvia media del WRF utilizando los polígonos de Thiessen con los datos de la estación climática de San Marcos como Patrón de Tormenta, esto con el fin de obtener la forma de la tormenta tomando como base el hietograma de San Marcos. La tabla 7 muestra los valores de la lluvia registrada el 1/7/2014.

**Tabla 7. Lluvia registrada por el modelo WRF el 1 de julio de 2014.**

Estación	Registrada (mm)	Pronosticada WRF (mm)
San Marcos	44	78
Catarina	1	29
Ixiguán	23	45
Lluvia media	30	59

En la tabla 8 se muestran los valores de la modelación hidrológica utilizando como base el Patrón de Tormenta de la estación San Marcos para la forma de la lluvia media en la cuenca para el 1/7/2014.

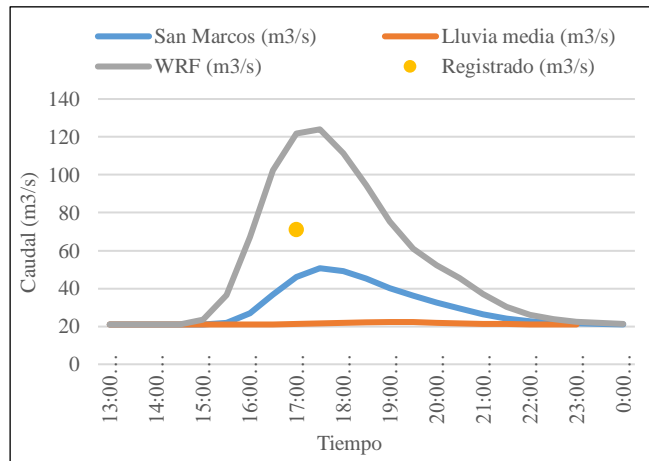
**Tabla 8. Datos de modelación hidrológica del 1 de julio de 2014**

Hora	Registrado	Lluvia media de la cuenca (30 mm)	Pronóstico (59mm)
	San Marcos (mm)	Patrón de tormenta (mm)	Patrón de tormenta WRF (mm)
13:00	0	0	0
14:00	25	17	33
15:00	11	7	14
16:00	5	3	7
17:00	2	1	3
18:00	1	1	1
19:00	1	0	1
20:00	0	0	0
Total	44	30	59

En la figura 11 se muestra el hidrograma generado para el 1/7/2014 resultado de la modelación hidrológica realizada.

En la tabla 9 se muestran los valores de lluvia registrada y pronosticada con fecha 31/8/2014 resultado de la aplicación del modelo WRF.

**Figura 11. Hidrograma generado para el 1 de julio de 2014**



**Tabla 9. Lluvia registrada y generada por el modelo WRF el 31 de agosto de 2014**

Estación	Registrada (mm)	Pronosticada WRF (mm)
San Marcos	41	35
Catarina	142	31
Ixiguán	6	24
Lluvia media	47	31

La tabla 10 muestra los valores de modelación de la fecha 31/8/2014.

**Tabla 10. Datos de modelación de lluvia del 31 de agosto del 2014**

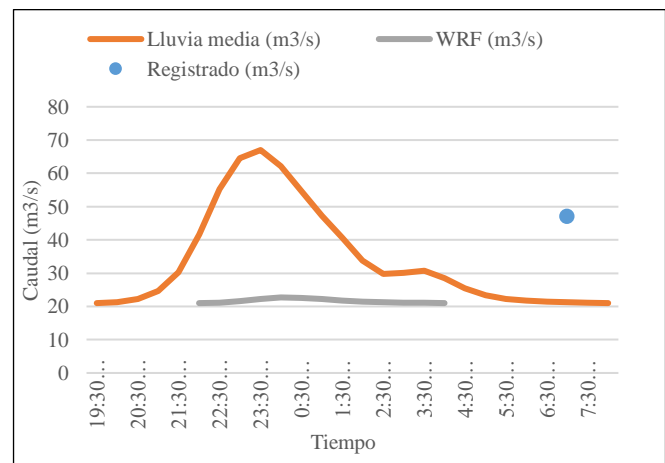
Hora	Registrado		Lluvia media (47 mm)		Pronóstico (31 mm)	
	San Marcos (mm)	Patrón de tormenta (mm)	Patrón de tormenta (mm)	WRF (mm)	WRF (mm)	WRF (mm)
12:00	0.00			0		0
13:00	1.00			1		1
14:00	3.00			4		2
15:00	5.50			6		4
16:00	2.00			2		2
17:00	0.00			0		0
18:00	3.00			4		2
19:00	5.00			6		4
20:00	3.00			4		2
21:00	4.50			5		3
22:00	6.50			8		5
23:00	4.00			5		3
0:00	1.50			2		1

1:00	0.50	1	0
2:00	0.00	0	0
3:00	0.50	1	0
Total	40.00	47	31

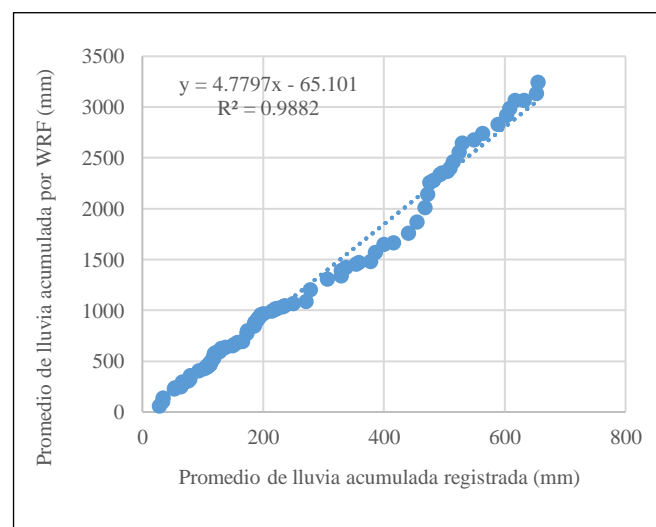
La figura 12 muestra el hidrograma generado para el 31/8/2014 resultado de la modelación hidrológica realizada.

La figura 13 muestra una gráfica de doble masa del WRF y lluvia media registrada, con el fin de observar el comportamiento de la lluvia pronosticada y registrada en la cuenca durante tres meses de la época lluviosa del año 2014.

**Figura 12. Hidrograma generado para el 31 de agosto de 2014**



**Figura 13. Análisis de doble masa del WRF para la cuenca en el período julio a septiembre 2014**



## Discusión de resultados

Según Givati et al. (2016) en las cuencas pequeñas donde el desfase de tiempo entre la lluvia y la escorrentía es de unos 90 a 120 minutos tener datos de precipitación pronosticada es sumamente importante para modelar la hidrología y así obtener algún tipo de advertencia por adelantado, por esta razón es importante utilizar los datos del modelo WRF ya que este presenta la lluvia pronosticada para la región. En el estudio realizado esto se hizo con la información de las estaciones ya establecidas de INSIVUMEH en el área con lo cual se pudo hacer una comparación entre la lluvia observada y la pronosticada.

En los hidrogramas de las figuras 9 y 10 se puede notar que, para el evento del 18 mayo 2010 el caudal máximo tuvo una diferencia entre observado y generado de 26 m<sup>3</sup>/s.

En el evento del 28-29 mayo 2010, se puede observar un caudal bastante elevado atribuido a la tormenta tropical Aghata que generó un caudal máximo de 1307 m<sup>3</sup>/s. Ambos eventos mostraron un coeficiente de Nash-Sutcliffe aceptable de 0.55 y 0.53 respectivamente según se puede observar en la tabla 6.

En cuanto a la fase de estimación de caudales con el modelo WRF, la simulación realizada para el 1/7/2014 sobreestimo al doble el valor de lluvia media registrada en la cuenca (ver tabla 7).

En la simulación de lluvia se puede observar que el modelo WRF subestimó esta con una diferencia de 16 milímetros (ver tabla 10). La lluvia media registrada fue de 47 mm y la lluvia media pronosticada de 31 mm.

Otro análisis interesante fue comparar la lluvia registrada estación por estación con la pronosticada. Por ejemplo, en la estación Catarina, lo real fueron 142 mm y lo pronosticado 31 mm, en este caso el WRF subestimó en 78% la lluvia registrada, pero en la misma fecha la estación San Marcos presento una diferencia entre registrado y pronosticado de solo 6 mm.

El hidrograma del modelo generado para los eventos del día 31 de agosto del 2014 (ver figura 12) muestra que el modelo WRF únicamente generó información para la lluvia media con un valor máximo de 66 m<sup>3</sup>/s. En cuanto a caudal medio diario la lluvia genero 34 m<sup>3</sup>/s, lo cual difiere bastante con el registrado. Cabe resaltar que la información del modelo WRF se generó

con información del período julio a octubre 2014 y en esas fechas los datos de lluvia media registrados no sobrepasan el valor del potencial de retención máxima.

Es importante recordar que si la retención potencial inicial es menor a la lluvia media en la cuenca se da escorrentía. En el caso de que la retención potencial inicial sea mayor a la lluvia media no hay escorrentía. Para esta investigación la retención potencial de la cuenca fue de 56 mm de lluvia que equivale al 20% de  $S = \left[ \left( \frac{100}{CN} \right) - 1 \right]$ , es decir la infiltración que inicia antes de la escorrentía.

Esto indica que la precipitación media en la cuenca que no sobrepase los 56 mm de lluvia no genera escorrentía. Se plantea esto como una de las posibles respuestas a lo sucedido con los caudales de lluvia media evaluados, pero es importante considerar que es un primer acercamiento del potencial del modelo WRF.

Con los resultados obtenidos en esta investigación se evidencia la necesidad de realizar más evaluaciones para tener un modelo WRF mejor ajustado, habiéndose notado que el modelo sobreestimo y subestimo la lluvia observada y caudales registrados, pero se pudo establecer que este tiene grandes potenciales en la ayuda para la hidrología.

De la figura 13 se puede notar que los acumulados de lluvia entre los meses de julio a septiembre del 2014 del modelo WRF está cercano a los 3500 mm de lluvia, en cambio los acumulados reales registrados de lluvia media en la cuenca están cercano a los 700 mm de lluvia, es decir existe una diferencia aproximada entre ambos de 2800 mm de precipitación. Al aplicar los valores de ajuste el dato de lluvia media disminuye a 1900 mm, lo cual evidencia que al mejorar la resolución del modelo WRF los resultados también podrían mejorar para obtener caudales útiles especialmente ante posibles eventos de precipitación grandes e intensos.

En la parte de la modelación hidrológica para esta investigación el modelo WRF presento el 1/7/2014 un caudal de 51 m<sup>3</sup>/s, mientras que el caudal medio diario registrado fue 71 m<sup>3</sup>/s., con una diferencia de 20 m<sup>3</sup>/s, entre ambos valores. En la simulación realizada para el 31/8/2014 el modelo WRF no generó caudal, esto podría deberse a la influencia de la retención potencial inicial en la lluvia media del WRF o muy posiblemente relacionado con la necesidad de mejorar la resolución

del modelo tal y como lo han expuesto Pontoppidan et al. (2017), Schwartz et al. (2009), Weisman et al. (2008) y Younis et al. (2008).

### Conclusiones

La estimación de caudales para el río Cabuz mediante la lluvia generada por el modelo WRF con la información disponible en las estaciones del INSIVUMEH para el período evaluado obtuvo diferencias significativas con respecto a los caudales observados en las fechas evaluadas.

Debe continuarse la evaluación del modelo WRF que en este estudio se presenta, revisando la influencia que puede estar generando la retención potencial inicial, así como mejorar la resolución de este.

El número de curva promedio hallado para la modelación en la cuenca fue 51 esto deberá de ser evaluado a futuro ya que posiblemente las condiciones del uso del suelo y procesos de urbanización en la cuenca requerirán que se vuelva a calibrar las condiciones de la cuenca.

Los valores encontrados de caudal máximo en base a las tormentas evaluadas pueden servir como referencia para futuros estudios hidráulicos del río Cabuz, considerando que los eventos evaluados en este estudio corresponden a precipitaciones intensas y fuertes.

Se recomienda el uso del modelo WRF en la cuenca del río Cabuz como una herramienta que podría simular escenarios de los caudales en el punto de control de la misma, para lo cual es necesario continuar con los estudios que permitan mejorar la resolución del modelo desarrollado en este estudio, asimismo, es importante iniciar los procesos que permitan implementar sistemas de alerta temprana utilizando la información que pueda generar este modelo para prevenir desastres causados por el incremento de caudales del río Cabuz.

### Agradecimientos

¡A mi SEÑOR Jesús! por sobre todo ya que todo esto es por su Gracia. Gracias a la sección de Clima de INSIVUMEH por los datos compartidos y muy especialmente a la sección de Hidrología. Al director de ERIS, MSc. Ing. Pedro Saravia por su exhortación a concluir con mis estudios de maestría. A mi asesor de tesis MSc. Ing. Juan José Sandoval por su aporte valioso a la presente investigación. A los revisores de la revista ASA por la orientación recibida.

### Referencias

- Aparicio, F.J. (1989). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. (1.<sup>a</sup> ed.). Limusa.
- Barranza, E., Choto, L. & Cortez, J. (2017). *Aplicación del Modelo Mesoescalar WRF (Weather Research Forecast Model) en la modelación hidrológica de la cuenca del Río Sucio*. [Tesis de licenciatura, Universidad de El Salvador, El Salvador].  
<https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/12914>
- Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S. & Palutikof, J.P. (2008). *El cambio Climático y el agua*. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, secretaría del IPCC, Ginebra, Suiza.  
<https://archive.ipcc.ch/pdf/technical-papers/ccw/climate-change-water-sp.pdf>
- Beven, J.L. (2010). *Tropical Cyclone Report, Tropical Storm Agatha (EP012010) 29-30 May 2010*.  
[https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/EP012010\\_Agatha.pdf](https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/EP012010_Agatha.pdf)
- Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California [CICESE]. (2020). *Datos climáticos diarios del CLICOM del SMN a través de la plataforma web del CICESE*. [Conjunto de datos].  
<http://clicom-mex.cicese.mx>
- Feldman, A. (2000). *Hydrological Modeling System Hec-Hms, Technical Reference Manual*. U.S. Army Corps of Engineers.  
[https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS\\_Technical%20Reference%20Manual\\_\(C\\_PD-74B\).pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_(C_PD-74B).pdf)
- Givati, A.; Lynn, B.; Liu, Y. & Rimmer, A. (2011). Using the WRF Model in an Operational Streamflow Forecast System for the Jordan River. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(2), 285-299.  
<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-082.1>
- Givati, A.; Gochis, D.; Rummeler, T. & Kunstmann, H. (2016). Comparing One-Way and Two-Way Coupled Hydrometeorological Forecasting Systems for Flood in the Mediterranean Region. *Hydrology*, 3(2), 19.  
<https://doi.org/10.3390/hydrology3020019>
- Ibáñez, S., Moreno, H. & Gisbert, J.M. (2011). *Métodos para la determinación del tiempo de concentración (tc) de una cuenca hidrográfica*.

- Documento Técnico, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural, Universidad Politécnica de Valencia.  
<https://www.udocz.com/apuntes/85669/metodos-para-la-determinacion-del-tiempo-de-concentracion-tc-de-una-cuenca-hidrografica>
- Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. (2.<sup>a</sup> ed.). Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Moya, A. & Ortega, J. (2015). Aplicación del modelo meteorológico WRF para el pronóstico de precipitación en período lluvioso de Cuba, 2014. *Revista Apuntes de Ciencia y Sociedad*, 5(1), 135-145.  
<https://doi.org/10.18259/acs.2015021>
- Natural Resources Conservation Service [NRCS]. (2004). *Part 630, Hydrology National Engineering Handbook, Chapter 7 and 9*. United States Department of Agriculture (USDA).  
<https://directives.sc.egov.usda.gov/viewerFS.aspx?hid=21422>
- Orozco, E. (2004). Análisis de crecidas en la cuenca del río Samalá, a la altura del puente en la CA2. *Revista Agua, Saneamiento y Ambiente*, 1(2) 19-27.
- Orozco, E. (2014). *Notas del curso de Flujos en Medios Porosos, Relación Precipitación-Escorrentía*. Folleto del curso, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Pontoppidan, M., Reuder, J., Mayer, S. & Kolstad, E. (2017). Downscaling an intense precipitation event in complex terrain: the importance of high grid resolution. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 69(1), Artículo 1271561.  
<https://doi.org/10.1080/16000870.2016.1271561>
- QGIS, Development Team, (2018). QGIS Geographic Information System. Open-Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
- QGIS Development Team, (2020). QGIS Geographic Information System. Open-Source Geospatial Foundation Project.  
[https://docs.qgis.org/3.10/en/docs/gentle\\_gis\\_introduction/spatial\\_analysis\\_interpolation.html?highlight=interpolation](https://docs.qgis.org/3.10/en/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html?highlight=interpolation)
- Roebber, P.J., Shultz, D.M., Colle, B.A. & Stensrud, D.J. (2004). Toward Improved Prediction: High-Resolution and Ensemble Modeling Systems in Operations. *Weather and Forecasting*, 19(5), 936–949.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2004\)019<0936:TIPHAE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2004)019<0936:TIPHAE>2.0.CO;2)
- Rogelis, M.C., & Werner, M. (2018). Streamflow forecasts from WRF precipitation for flood early warning in mountain tropical areas. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1) 853–870. <https://doi.org/10.5194/hess-22-853-2018>
- Scharffenberg, B., Bartles, M., Brauer, T., Fleming, M. & Karlovits, G. (2018). *Hydrological Modeling System Hec-Hms, User's Manual*. U.S. Army Corps of Engineers. Davis, CA., P.640.  
[https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS\\_Users\\_Manual\\_4.3.pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_4.3.pdf)
- Schwartz, C.S., Kain, J.S., Weiss, S.J., Xue, M., Bright, D.R., Kong, F., Thomas, K.W., Levit, J.J. & Coniglio, M.C. (2009). *Next-Day Convection-Allowing WRF Model Guidance: A Second Look at 2-km versus 4-km Grid Spacing*. *Monthly Weather Review*, 137(10), 3351-3372.  
<https://doi.org/10.1175/2009MWR2924.1>
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D., Duda, M.G., Huang, X.Y., Wang, W., & Powers, J.G. (2008). *A Description of the Advanced Research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR)*. University Corporation for Atmospheric Research.  
<http://dx.doi.org/10.5065/D68S4MVH>
- Vélez, J.J. & Botero, A. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de La Quebrada San Luis, Manizales. *DYNA*, 78(165), 58-71.  
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25640>
- Villón, M. (2004). *Hidrología*. (1.<sup>a</sup> ed.). Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Weisman, M.L., Davis, C., Wang, W., Manning, K.W. & Klemp, J.B. (2008). Experiences with 0-36-h Explicit Convective Forecasts with WRF-ARW Model. *Weather and Forecasting*, 23(3), 407-437.  
<https://doi.org/10.1175/2007WAF2007005.1>
- Younis, J., Anquetin, S. & Thielen, J. (2008). The benefit of high-resolution operational weather forecasts for flash flood warning. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(4), 1039-1051.  
<https://doi.org/10.5194/hess-12-1039-2008>