

**Análisis del uso potencial del producto Satelital IMERG y del modelo CREST de EF5 en la predicción de eventos de escorrentía en las cuencas Mpologoma, Manafwa y Namatala de Uganda**

**María Claudia Rincón Remolina**

**Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil**

**Director:**

**Daniela Cristina Rey Romero**

**Ingeniera Ambiental, Msc**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Bucaramanga**

**2020**

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	10
1. Objetivos .....	13
1.1 Objetivo General .....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Marco de Referencia .....	14
2.1 Sistemas de alerta temprana para inundaciones .....	14
2.2 Producto satelital IMERG .....	14
2.3 Modelo hidrológico CREST de EF5 .....	16
3. Metodología .....	17
3.1 Descripción de las cuencas de estudio. ....	17
3.2 Preparación de datos. ....	19
3.3 Calibración del modelo hidrológico.....	22
3.4 Análisis del uso potencial de IMERG en las cuencas de estudio.....	29
4. Análisis de Resultados .....	30
4.1 Calibración para el periodo de seis meses seleccionado.....	30
4.1.1 Primera aproximación a la calibración de Mpologoma. ....	31
4.1.2 Primera aproximación a la calibración de Manafwa.....	32
4.1.3 Primera aproximación a la calibración de Namatala.....	33

4.2 Calibración para el periodo de cuatro años (con archivos ráster) .....	34
4.2.1 Calibración de Mpologoma.....	35
4.2.2 Calibración de Manafwa. ....	36
4.2.3 Calibración de Namatala.....	38
4.3 Calibración para el periodo de cuatro años (sin archivos ráster) .....	39
4.4 Análisis de las áreas de drenaje en cada cuenca .....	40
4.4.1 Alrededores de Mpologoma.....	40
4.4.2 Alrededores de Manafwa. ....	41
4.4.3 Alrededores de Namatala. ....	44
4.5 Análisis gráfico de la relación entre la precipitación estimada con IMERG y la respuesta hidrológica del caudal medido en sitio .....	45
5. Conclusiones .....	47
Referencias Bibliográficas .....	49
Apéndices.....	54

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Cuencas de Mpologoma, Manafwa y Namatala .....	18
Figura 2. Imagen satelital de la posición de las estaciones hidrométricas de Mpologoma, Manafwa y Uganda.....	19
Figura 3. Imagen satelital del lago y el puente cercano a la estación hidrométrica de Mpologoma.....	41
Figura 4. Imagen satelital de la ubicación de la estación hidrométrica de Manafwa.....	42
Figura 5. Imagen satelital de la posición de la estación hidrométrica de Manafwa con respecto al río (marcado en azul) .....	43
Figura 6. Imagen satelital de la estación hidrométrica de Namatala con respecto a la población de Mbale.....	44
Figura 7. Imagen satelital de la posición de Namatala con respecto al río .....	45

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Resumen de los datos disponibles para la calibración .....	21
Tabla 2. Comportamiento de los parámetros uniformes de balance hídrico .....	23
Tabla 3. Comportamiento de los parámetros distribuidos de balance hídrico .....	25
Tabla 4. Comportamiento de los parámetros uniformes de onda cinemática .....	26
Tabla 5. Comportamiento de los parámetros distribuidos de onda cinemática.....	26
Tabla 6. Parámetros calibrados para el periodo de seis meses en Mpologoma .....	31
Tabla 7. Parámetros calibrados para el periodo de seis meses en Manafwa.....	32
Tabla 8. Parámetros calibrados para el periodo de seis meses en Namatala.....	33
Tabla 9. Parámetros calibrados en Mpologoma (con archivos ráster) .....	35
Tabla 10. Parámetros calibrados en Manafwa (con archivos ráster) .....	37
Tabla 11. Parámetros calibrados en Namatala (con archivos ráster) .....	38

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Cuencas de Mpologoma, Manafwa y Namatala en el mapa de Uganda.....	54
Apéndice B Escorrentía medida en sitio de Mpologoma del año 2000 al 2018 .....	55
Apéndice C. Escorrentía medida en sitio de Namatala del año 2000 al 2018 .....	56
Apéndice D. Escorrentía medida en sitio de Manafwa del año 2000 al 2018 .....	57
Apéndice E. Curva de Duración de Caudales para Mpologoma.....	58
Apéndice F. Curva de Duración de Caudales para Manafwa .....	59
Apéndice G. Curva de Duración de Caudales para Namatala .....	60
Apéndice H. Configuración del Archivo de Control .....	61
Apéndice I. Iteraciones con EF5 más importantes durante el periodo de seis meses .....	62
Apéndice J. Respuesta hidrológica para el periodo de seis meses en Mpologoma.....	63
Apéndice K. Respuesta hidrológica para el periodo de seis meses en Manafwa.....	64
Apéndice L Respuesta hidrológica para el periodo de seis meses en Namatala .....	65
Apéndice M Iteraciones con EF5 más importantes durante el periodo de calibración .....	66
Apéndice N. Respuesta hidrológica de la calibración de Mpologoma (con archivos ráster) .....	67
Apéndice Ñ. Respuesta hidrológica de la calibración de Manafwa (con archivos ráster) .....	68
Apéndice O. Respuesta hidrológica de la calibración de Namatala (con archivos ráster).....	69
Apéndice P. Iteraciones con EF5 más importantes para el periodo de calibración, sin archivos ráster para los parámetros. ....	70

---

Apéndice Q. Resumen de la calibración para las tres cuencas sin archivos ráster .....	71
Apéndice R. Respuesta hidrológica de la calibración de Mpologoma (sin archivos ráster).....	72
Apéndice S. Respuesta hidrológica de la calibración de Manafwa (sin archivos ráster).....	73
Apéndice T. Respuesta hidrológica de la calibración de Namatala (sin archivos ráster) .....	74
Apéndice U. Hietograma e hidrograma de Mpologoma .....	75
Apéndice V. Hietograma e hidrograma de Manafwa.....	76
Apéndice W. Hietograma e hidrograma de Namatala .....	77

## Resumen

**Título:** Análisis del uso potencial del producto Satelital IMERG y del modelo CREST de EF5 en la predicción de eventos de escorrentía en las cuencas Mpologoma, Manafwa y Namatala de Uganda \*.

**Autor:** María Claudia Rincón Remolín\*\*

**Palabras Clave:** CREST, EF5, IMERG, Uganda.

### Descripción:

En este proyecto se analizó el uso potencial del producto satelital IMERG y del modelo hidrológico CREST, para la predicción de eventos de escorrentía, que puedan servir de insumo para sistemas de alerta temprana, en las cuencas Mpologoma, Manafwa y Namatala ubicadas en Uganda. Para ello, se realizaron diferentes simulaciones utilizando el marco de modelamiento hidrológico “Ensemble Framework For Flash Flood Forecasting” (EF5). Los datos de IMERG fueron suministrados por Universidad de Oklahoma y contenían la información de la precipitación en las cuencas en estudio cada 30 minutos. La calibración del modelo se realizó comparando su respuesta hidrológica con la respuesta hidrológica obtenida a partir de los datos de escorrentía medidos en sitio, para el periodo de tiempo del 15 de octubre de 2010 al 15 de octubre de 2014. La comparación se realizó por medio del sesgo, el coeficiente de determinación y el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe. Se concluyó que, con la información disponible, en ninguna de las cuencas se puede utilizar el modelo hidrológico CREST para la predicción de eventos de escorrentía, con la exactitud necesaria para su aplicación en un sistema de alerta temprana, debido a sus limitaciones para representar embalsamiento de agua y escorrentía subsuperficial. Con respecto al producto satelital IMERG, se encontró que sus datos de precipitación podrían estar relacionados con la respuesta hidrológica en las tres cuencas, sin embargo, esto debe corroborarse con la evaluación de otros modelos hidrológicos.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Civil. Director Msc, Daniela Cristina Rey.

## Abstract

**Title:** Analysis of the potential use of the IMERG Satellite product and the EF5 CREST model in predicting runoff events in the Mpologoma, Manafwa and Namatala basins of Uganda\*.

**Authors:** María Claudia Rincón Remolina\*\*

**Keywords:** EF5, IMERG, CREST, Uganda.

### Description:

This project evaluates the potential use of the satellite product IMERG and the hydrological model CREST, for the prediction of runoff events in the Mpologoma, Manafwa and Namatala basins located in Uganda. For this purpose, different simulations were carried out using the “Ensemble Framework For Flash Flood Forecasting” (EF5) hydrological modeling framework. The model was calibrated by comparing its hydrological response with the hydrological response obtained from runoff data measured on site, for the time period from October 15, 2010 to October 15, 2014. The comparison was made using the Pbias, correlation coefficient and efficiency coefficient of the Nash-Sutcliffe model. It was concluded that, with the information available, the CREST hydrological model cannot be used in any of the basins for the prediction of runoff events, due to its limitations to represent water storage and subsurface runoff. Regarding the satellite product IMERG, it was found that its precipitation data could be related to the hydrological response in the three basins.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Civil. Director Msc, Daniela Cristina Rey.

## Introducción

De acuerdo con las Naciones Unidas, un tercio de la población mundial se encuentra en riesgo de ser afectada por un desastre natural, tales como inundaciones, terremotos, ciclones, entre otros (Naciones Unidas. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, 2018). Con respecto a las inundaciones, las regiones con mayor riesgo son Oceanía, el sureste de Asia, Centroamérica y África (BBC News Mundo, 2018). Por tal motivo la prevención y alerta temprana resultan importantes para evitar tragedias.

En diferentes países se ven los impactos lamentables de las inundaciones. Un claro ejemplo es Uganda, donde las frecuentes inundaciones causan pérdidas de cultivos, viviendas y vidas humanas (Global Network of Civil Society Organisations for Disaster Reduction (GNDR), 2015). Entre las principales cuencas de Uganda se encuentran Mpologoma, Namatala y Manafwa, las cuales presentan un riesgo moderado de inundación y un riesgo severo de pérdida de cultivos a las orillas de los ríos (Cheptoris, 2018). Es tan grave el problema que presentan las comunidades de estas cuencas, que sus inundaciones han sido catalogadas entre los diez desastres más mortales en todo el mundo, como ocurrió en 2009 en el distrito de Butaleja, donde una inundación causó 385 muertes y el desplazamiento de más de 3000 personas (Center for Epidemiology in Disasters (CRED), 2009).

Entre los Objetivos de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible, se encuentra el objetivo 13 “Acción por el clima”, que cuenta entre sus metas “Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos

los países” (Naciones Unidas. Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo sostenible, 2018). Es aquí donde la alerta temprana juega un papel fundamental para poder avanzar hacia el cumplimiento de esta meta y así poder ayudar a proteger a las comunidades en situación de riesgo.

El Centro Nacional del Clima (NWC, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Oklahoma ha utilizado diferentes productos satelitales, como lo es el “Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM” (IMERG), para la predicción de lluvias en todo el mundo. Para las regiones de países en vía de desarrollo que no cuentan con una red meteorológica suficientemente densa, estos productos satelitales de la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (NASA, por sus siglas en inglés), podrían suministrar información necesaria y oportuna para los sistemas de alerta temprana. Para utilizar estos archivos de precipitación producidos por los diferentes productos satelitales, la Universidad de Oklahoma en convenio con la NASA desarrolló el modelo hidrológico CREST, el cual simula espacial y temporalmente la variación de la escorrentía en la superficie terrestre y el flujo de agua subterránea (Wang, y otros, 2011).

En este contexto, este trabajo de investigación tiene como finalidad determinar si la información proveniente del producto IMERG, junto con el modelo hidrológico CREST, dan una respuesta apropiada a los eventos de escorrentía en las cuencas Mpologoma, Namatala y Manafwa ubicadas en Uganda. Para este propósito, se estimaron los parámetros necesarios para la aplicación del modelo CREST y se comparó la respuesta hidrológica de los datos observados en tierra con los datos simulados. Esto permitió concluir sobre el potencial de utilizar los datos del producto satelital como insumo para desarrollar un sistema de alerta temprana que permita ayudar a las comunidades de forma eficaz, evitando los riesgos de pérdidas humanas y económicas, a los cuales se encuentra sometida la población de estas cuencas.

Para lograr esto se utilizó el marco de modelamiento hidrológico EF5, el cual utiliza el modelo hidrológico CREST, junto con el modelo de onda cinemática y los archivos ráster de precipitación de IMERG, para simular eventos de escorrentía para las tres cuencas seleccionadas. Estos eventos se compararon con los datos de escorrentía medidos en sitio. De esta forma se determinó si el uso del producto satelital IMERG junto con el modelo hidrológico CREST, sirven para la predicción de eventos de escorrentía. De ser así, estos podrían utilizarse como insumo para los sistemas de alerta temprana de las tres cuencas seleccionadas.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Analizar el uso potencial del producto satelital IMERG y el modelo CREST de EF5 en la predicción de eventos de escorrentía, como insumo para sistemas de alerta temprana en las cuencas Mpologoma, Manafwa y Namatala de Uganda.

### 1.2 Objetivos Específicos

- Estimar los parámetros necesarios para la aplicación del modelo hidrológico CREST y el modelo de onda cinemática a través de EF5 para las cuencas de estudio.
- Comparar los datos de escorrentía observada con la respuesta del modelo hidrológico CREST de EF5 generada a partir de datos satelitales en las cuencas Mpologoma, Manafwa y Namatala de Uganda.

## 2. Marco de Referencia

### 2.1 Sistemas de alerta temprana para inundaciones

Actualmente existen distintos sistemas de alerta temprana para inundaciones, como el sistema Europeo de Concientización sobre Inundaciones (EFAS, por sus siglas en inglés), el Sistema Global de Monitoreo de Inundaciones (GFMS, por sus siglas en inglés) y el Observatorio de Inundaciones de Dartmouth (DFO, por sus siglas en inglés). Estos sistemas se encuentran disponibles de forma gratuita y operan a gran escala con ciclos de actualización de horas y días (Mazzoglio, Laio, Balbo, Boccardo, & Disabato, 2019).

El uso de IMERG es utilizado como insumo para el sistema de alerta temprana GFMS. El GFMS es un sistema experimental para la detección de inundaciones patrocinado por la NASA. Este tiene un alcance casi global (50°N - 50°S) que funciona en una cuadrícula de 1/8 de grado de latitud/longitud (Wu, 2020). La viabilidad de GFMS fue estudiada en el sureste de los Estados Unidos y se encontró que este es capaz de detectar el 38% de las inundaciones estudiadas (Yilmaz, Adler, Tian, Hong, & Pierce, 2010).

### 2.2 Producto satelital IMERG

Durante las últimas dos décadas se han venido desarrollando una variedad de productos satelitales para medición de precipitación con una resolución espacial y temporal alta, que cubren

casi toda la superficie terrestre. Los datos de precipitación son obtenidos a partir de información satelital y suplen la falta de datos de lluvia donde los radares o pluviómetros no son usuales o son muy costosos de instalar (Dinku, Ruiz, Connor, & Ceccato, 2009).

El más reciente de estos productos satelitales es IMERG. IMERG es un producto unificado de precipitación satelital desarrollado por la NASA para estimar la precipitación superficial en la mayor parte del mundo, con 4 horas de latencia (Huffman, 2019). La predicción de lluvias de IMERG se obtiene como producto de intercalibrar, unir e interpolar todas las estimaciones de precipitación de microondas de satélite, junto con las estimaciones por satélite de infrarrojo (IR) calibrados por microondas. Este cuenta con una resolución temporal de 30 minutos y una resolución espacial  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  lat/lon. Como resultado, IMERG entrega archivos ráster (Huffman, Bolvin, & Nelkin, 2017).

El uso de IMERG ha sido estudiado en distintas zonas alrededor del mundo, con el propósito de evaluar si las predicciones de precipitación de IMERG se ajustan a la realidad. Se han reportado estudios en Austria (Foelsche, Kirchengast, Fuchsberger, Tan, & Petersen, 2017) China (Li, y otros, 2017) (Wang, Zhong, Lai, & Chen, 2017), Malasia (Tan & Santo, 2018), Pakistán (Anjum, y otros, 2018), Irán (Sharifi, Steinacker, & Saghafian, 2016), los cuales concluyeron que los datos de precipitación de IMERG tienen un comportamiento satisfactorio en su evaluación estadística, con respecto a los datos reales de precipitación. Sin embargo, los resultados variaron según las condiciones atmosféricas, topográficas y la ubicación de la zona de estudio. Se presentaron los resultados más imprecisos en latitudes y longitudes altas y en zonas montañosas, y los mejores resultados en las temporadas de lluvias (Foelsche, Kirchengast, Fuchsberger, Tan, & Petersen, 2017). La zona de estudio se caracteriza por terrenos planos, por lo que se espera que los datos de precipitación de IMERG se ajusten de forma aceptable a la realidad.

### 2.3 Modelo hidrológico CREST de EF5

Para el modelamiento hidrológico se utilizó EF5 (Ensemble Framework for Flash Flood Forecasting), el cual es un marco de modelamiento hidrológico que combina parámetros de onda cinemática con parámetros de balance hídrico (Flamig, Vergara, Clark, Gourley, & Hong, 2015). EF5 utiliza el modelo hidrológico Coupled Routing and Excess Storage (CREST) desarrollado por la NASA y la Universidad de Oklahoma, el cual simula espacial y temporalmente la variación de la escorrentía en la superficie terrestre y el flujo de agua subterránea (Wang, y otros, 2011).

CREST es una forma de balance hídrico, el cual se basa en el principio de la conservación de todos los recursos hídricos en una cuenca determinada por condiciones de contorno. Este se realiza por un determinado periodo de tiempo (para este proyecto desde el 15 de octubre de 2010 al 15 de octubre de 2014) donde se dice que el total de entradas y el total de las salidas debe ser igual a la variación en el almacenamiento. Se realiza con el fin de obtener una evaluación cuantitativa de los recursos de agua en la cuenca (Sokolov & Chapman, 1974).

EF5 utiliza, a su vez, el modelo de onda cinemática como enrutamiento de la escorrentía. Este modelo simula los efectos de atenuación únicamente sobre la escorrentía superficial, e identifica la infiltración como pérdida del sistema, ignorando su aporte posterior en el tiempo en forma de caudal de base. El modelo de onda cinemática transforma la lluvia a escorrentía a través de las ecuaciones de Saint Venant (Zimmermann, 2000).

### 3. Metodología

El proyecto se dividió en tres etapas: preparación de datos, configuración del archivo de control, y evaluación del uso de EF5 e IMERG para la predicción de los eventos de escorrentía

#### 3.1 Descripción de las cuencas de estudio.

El estudio se enmarca en Uganda, país localizado en el oriente de África con 42.9 millones de habitantes (Banco Mundial, 2019), donde la mayor parte del país se encuentra ubicada sobre una meseta que desciende hacia el norte. El 38% de la población de Uganda se encuentra por debajo del umbral de pobreza internacional (UNICEF, 2011) y el país cuenta con un PIB de 25.89 miles de millones USD (Banco Mundial, 2017).

Con respecto a las cuencas de estudio, Mpologoma cuenta con una población total de 3.6 millones de personas, un crecimiento anual del 4.7%, una densidad poblacional de 284 personas por km<sup>2</sup> y un área de 3614 km<sup>2</sup> (Musiime, Tenywa, Majaliwa, & et al, 2005). Esta cuenca ha sido catalogada con un nivel de riesgo alto por inundaciones, con más de seis eventos de este tipo registrados desde 1997 en Mbale, uno de sus distritos (EM-DAT, 2011)

El río Manafwa, por su parte, confluye con el río Mpologoma y el área de su cuenca es de 494 km<sup>2</sup>. Su riesgo de inundación se da debido a que sus humedales actúan como filtros de limo, sin embargo, parte de sus sedimentos se depositan en el piedemonte, donde la pendiente se vuelve menos empinada, creando zonas propensas a inundaciones (Cheptoris, 2018).



**Figura 2.**

*Imagen satelital de la posición de las estaciones hidrométricas de Mpologoma, Manafwa y Uganda*

**3.2 Preparación de datos.**

Tanto los datos de escorrentía medidos en sitio, como los datos de precipitación de IMERG fueron suministrados por el NWC de la Universidad de Oklahoma. Los datos observados del caudal de cada río son puntuales diarios y se encuentran disponibles desde febrero de 1950 hasta diciembre de 2018. Los datos de precipitación de IMERG se encuentran disponibles desde junio del 2000 hasta octubre de 2018 cada 30 minutos.

Los datos de escorrentía medidos en sitio de Mpologoma y Namatala se presentan en los Anexo B y C desde junio del 2000 hasta octubre de 2018, respectivamente. Los de Manafwa se presentan en el Anexo D y van desde junio del 2000 hasta agosto de 2018.

A pesar de que se contaba con 19 años de datos de precipitación satelital y datos de caudales, fue necesario recortar el periodo de simulación a 8 años, debido al tiempo que demora EF5 en ejecutarse (67 minutos de ejecución para simulación de 4 años). Se decidió trabajar con dicho período debido a que, según la revisión de literatura, se determinó que un tiempo de 4 años tanto para la calibración como para la validación, es lo suficientemente amplio para evaluar el desempeño del modelo de simulación hidrológica. Esto fue basado en el estudio realizado en Austria, por Foelsche et al., 2017 (Foelsche, Kirchengast, Fuchsberger, Tan, & Petersen, 2017), y en Malasia por Tan et al., 2018 (Tan & Santo, 2018), donde fueron seleccionados periodos de 2 años para el estudio.

Se seleccionaron dos periodos de tiempo que tuviesen frecuencias de ocurrencia de caudales similares, uno para la calibración y otro para la validación. Esto con el fin de que el modelo se desempeñara de forma aceptable durante la validación. Para comparar las frecuencias de ocurrencia de los caudales se utilizaron Curvas de Duración de Caudales (CDC), las cuales muestran el porcentaje del tiempo que un caudal es igual o excede un valor dado. Estas se obtienen ordenando las series de tiempo de caudal de forma ascendente y graficándolas en función de su duración correspondiente (Burgan & Aksoy, 2018).

Para poder comparar los caudales de ambos periodos de tiempo, estos se normalizaron mediante la puntuación estándar.

Los periodos seleccionados para Mpologoma y Namatala van del 15 de octubre de 2010 al 15 de octubre de 2014 para la calibración y del 16 de octubre de 2014 al 16 de octubre de 2018 para la validación. Para Manafwa se utilizaron los mismos periodos, a diferencia del periodo de validación que va hasta el 31 de agosto de 2018. Para llegar a estos periodos se realizaron distintas pruebas, y se seleccionaron las CDC que tuvieron la pendiente más parecida. Las CDC se presentan

en los anexos E, F y G, y a partir de estos se puede decir que los dos periodos de tiempo seleccionados tienen frecuencias de ocurrencia similares.

Para el periodo de tiempo de 4 años seleccionado tanto para la calibración como para la validación de Mpologoma y Namatala, hay un total de 1462 datos de esorrentía. En Mpologoma, de los 1462 datos de esorrentía seleccionados para la calibración, se encuentran 208 datos faltantes, lo que representa el 14.23% del total de los datos. Y para la validación, faltan 3 datos, lo que corresponde al 0.21% de los datos. Para Namatala, para el periodo de calibración, no hace falta ningún dato de caudal. Por otra parte, para el periodo de validación se encuentran 214 datos faltantes, lo que corresponde al 14.64% de los datos.

Para el caso de Manafwa, para el periodo de calibración se cuenta con 1462 datos, de los cuales 47 son datos faltantes, lo que representa el 3.21% de los datos. Para el periodo de validación se cuenta con 1416 datos, de los cuales faltan 664 datos. Esto representa un porcentaje de datos faltantes muy alto (46.89%). La tabla 1 muestra el resumen de la información de los datos disponibles.

**Tabla 1.**

*Resumen de los datos disponibles para la calibración*

<b>Cuenca</b>	<b>Calibración</b>	<b>Total datos calibración</b>	<b>Datos faltantes calibración</b>
Mpologoma	15 octubre 2010 - 15 octubre 2014	1462	208
Manafwa	15 octubre 2010 - 15 octubre 2014	1462	47
Namatala	15 octubre 2010 - 15 octubre 2014	1462	0

Tanto para la evaluación del desempeño de la respuesta del modelo, como para las CDC, no se tuvieron en cuenta los datos faltantes. Es decir, para calcular los estadísticos establecidos y

para graficar las curvas de duración de caudal, sólo se tuvo en cuenta los datos de escorrentía que contenían información.

### **3.3 Calibración del modelo hidrológico.**

Para comenzar la calibración del modelo hidrológico, lo primero que se debe realizar es configurar el archivo control. Este es un archivo tipo TXT y es leído por EF5 para ejecutar la respuesta del modelo. El archivo control consta de ocho bloques que alimentan el modelo con información de las cuencas y le especifican a EF5 que tareas debe ejecutar. El primer bloque es llamado Basic, y este contiene la información topográfica (DEM, DDM y FAM). Modelo digital de elevaciones (DEM), es un modelo digital de la superficie terrestre creado a partir de los datos de elevación del terreno. La superficie terrestre es escaneada desde el espacio por medio de un satélite de radar para crear el DEM. A partir de este se determina la dirección del flujo (DDM) y a partir de esta la acumulación del flujo (FAM) (University of Oklahoma/Hydros Module 1.4, 2020). En este proyecto se utilizó una resolución espacial de 10 km para el DEM, y todos los archivos fueron suministrados por el NWC de la Universidad de Oklahoma.

Los siguientes dos bloques se denominan PrecipForcing y PetForcing. Estos contienen la información de la precipitación y la evapotranspiración potencial, respectivamente. Para este proyecto la precipitación se obtuvo del producto satelital IMERG, y está dada en unidades de milímetros cada 30 minutos. La evapotranspiración potencial usada correspondió al valor total a nivel mensual, se utiliza con unidades de mm/día y se obtuvo a través del Estudio Geológico de los Estados Unidos y de la Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos.

Los bloques llamados Gauge contienen la ubicación de las estaciones hidrométricas en grados decimales y el área de drenaje en km<sup>2</sup>, de cada una de las cuencas. El bloque Basin se utiliza cuando se tienen múltiples cuencas para seleccionar las que se van a tener en cuenta.

El bloque CRESTParamSet está compuesto por 6 parámetros para el balance hídrico: la capacidad de campo del suelo (WM), el exponente de la curva de infiltración (B), la relación de área impermeable (IM), el factor de conversión de la evapotranspiración potencial a real (KE), la conductividad hidráulica saturada del suelo (FC), y el valor inicial de humedad del suelo (IWU) (University of Oklahoma/Hydros Module 1.3, 2020). Los parámetros WM, B, IM y FC pueden aplicarse de forma distribuida en EF5. Los parámetros distribuidos podrían mejorar los resultados, comparados con los parámetros uniformes. Cuando se trabaja con parámetros uniformes, el valor del parámetro es el mismo para toda la cuenca, mientras que los parámetros distribuidos dan propiedades específicas a cada espacio de la cuenca (Ensemble Framework For Flash Flood Forecasting (Productor), 2019).

Para este proyecto se cuenta con parámetros distribuidos, los cuales fueron suministrados por el NWC y cuentan con una resolución espacial de 500 metros. En el Anexo H se presenta la configuración base del archivo de control.

Los rangos de los valores para estos parámetros varían si se trata de parámetros distribuidos. La tabla 2 muestra el comportamiento de los parámetros uniformes, y la tabla 3 el comportamiento para los parámetros distribuidos del balance hídrico.

**Tabla 2.**

*Comportamiento de los parámetros uniformes de balance hídrico*

<b>Parámetro</b>	<b>Rango Usual</b>	<b>Comportamiento de la escorrentía al aumentar su valor</b>
WM	5 - 250 mm	Disminuye
B	0.1 - 20	Aumenta
IM	0 – 0.5	Aumenta
KE	0.001 - 1	Disminuye
FC	0 - 150 mm/h	Disminuye
IWU	25	Aumenta (no es importante con un periodo de calentamiento)

Nota. Tomado de: University of Oklahoma/Hydros Module 1.3, (2020). *EF5 Overview, Module*

1.3. Recuperado de: [http://ef5.ou.edu/downloads/presentations/1\\_3\\_EF5\\_Overview.pdf](http://ef5.ou.edu/downloads/presentations/1_3_EF5_Overview.pdf)

**Tabla 3.**

*Comportamiento de los parámetros distribuidos de balance hídrico*

<b>Parámetro</b>	<b>Rango Usual</b>	<b>Comportamiento de la escorrentía al aumentar su valor</b>
WM	0.01 – 2.00	Disminuye
B	0.01 – 2.00	Aumenta
IM	0.01 – 2.00	Aumenta
FC	0.01 – 2.00	Disminuye

Nota. Tomado de: Ensemble Framework For Flash Flood Forecasting (Productor). (2019). *EF5*

*Advanced Training: Distributed Parameters* [DVD]. De <http://ef5.ou.edu/videos/>

El modelo de onda cinemática se encuentra en el bloque llamado kwparamset. En este se analizan otros 7 parámetros: la cantidad de celdas necesarias para fluir a otra celda para que sea parte de un canal (TH), el multiplicador de la velocidad de escorrentía subsuperficial (UNDER), la cantidad de agua filtrada de la reserva de escorrentía subsuperficial en cada intervalo de tiempo (LEAKI), el valor inicial de la reserva de escorrentía subsuperficial (ISU), el multiplicador (ALPHA) y el exponente (BETA) de la ecuación de escorrentía = ALPHA(área de sección transversal del canal)<sup>BETA</sup>, y el valor de Alpha usado en tierra (ALPHA0) (University of Oklahoma/Hydros Module 1.3, 2020). Los parámetros ALPHA, BETA y ALPHA0 se encuentran disponibles de forma distribuida en archivos tipo ráster para este proyecto, los cuales fueron suministrados por el NWC. Los archivos ráster cuentan con una resolución espacial de 500 metros.

Los rangos de los valores para estos parámetros varían si se trata de parámetros distribuidos. La tabla 4 muestra el comportamiento de los parámetros uniformes, y la tabla 5 el comportamiento para los parámetros distribuidos de onda cinemática.

**Tabla 4.***Comportamiento de los parámetros uniformes de onda cinemática*

<b>Parámetro</b>	<b>Rango Usual</b>	<b>Comportamiento al aumentar su valor</b>
TH	30 - 300 Km <sup>2</sup>	Picos más rápidos
UNDER	0.0001 - 3	Picos más rápidos
LEAKI	0.01 - 1	Picos más rápidos
ISU	0	No influye con periodo de calentamiento
ALPHA	0.01 - 3	Picos más lentos
BETA	0.01 - 1	Picos más lentos
ALPHA0	0.01 - 5	Picos más lentos

Nota. Tomado de: University of Oklahoma/Hydros Module 1.3, (2020). *EF5 Overview, Module*

1.3. Recuperado de: [http://ef5.ou.edu/downloads/presentations/1\\_3\\_EF5\\_Overview.pdf](http://ef5.ou.edu/downloads/presentations/1_3_EF5_Overview.pdf)

**Tabla 5.***Comportamiento de los parámetros distribuidos de onda cinemática*

<b>Parámetro</b>	<b>Rango Usual</b>	<b>Comportamiento de la escorrentía al aumentar su valor</b>
ALPHA	0.01 – 2.00	Picos más lentos
BETA	0.01 – 2.00	Picos más lentos
ALPHA0	0.01 – 2.00	Picos más lentos

Nota. Tomado de: Ensemble Framework For Flash Flood Forecasting (Productor). (2019). *EF5*

*Advanced Training: Distributed Parameters* [DVD]. De <http://ef5.ou.edu/videos/>

El último bloque del archivo de control es llamado Task. En este se especifica el tipo de simulación que se va a ejecutar, los modelos hidrológicos, las cuencas sobre las cuales se va a trabajar, y el nombre de los bloques anteriormente establecidos. También se especifica dónde se guardarán los resultados, los intervalos de tiempo para la simulación, la fecha de inicio y fin de la simulación, y la fecha del periodo de calentamiento.

Una vez configurado el archivo de control, el modelo queda listo para comenzar la calibración. Se comenzó calibrando para un periodo de solo 6 meses desde el 19 de marzo de 2014 hasta el 19 de septiembre de 2014. En estas primeras calibraciones, solo se ajustaron los parámetros WM, B, ALPHA, ALPHA0 y BETA, ya que son los parámetros que tienen mayor influencia en el desempeño del modelo. Esto con el fin de tener una primera aproximación y poder determinar el periodo de tiempo necesario para el calentamiento.

Debido a que los valores de escorrentía simulados por EF5 están dados cada 30 minutos, fue necesario cambiar su frecuencia a diaria. Esto con el fin de poder compararlo con los datos de escorrentía medidos en sitio, los cuales son diarios. Para obtener la escorrentía simulada por EF5 con una frecuencia diaria, se evaluaron todos los valores de escorrentía que pertenecían al mismo día, y se calculó el promedio de los caudales.

La fecha de inicio fue seleccionada debido a que el NWC contaba con los estados para la misma. Los estados representan las condiciones iniciales de las cuencas. Estos se obtuvieron como producto de un experimento anterior con estas cuencas, realizado por el NWC. Con el fin de obtener una respuesta más apropiada, la calibración se hizo de forma individual para cada cuenca, es decir, se establecieron parámetros específicos para cada una.

Una vez obtenidas las primeras aproximaciones de los 13 parámetros a calibrar y el periodo de tiempo que se requería para el calentamiento, se procedió a calibrar el modelo para los 4 años

seleccionados. Para cada calibración ejecutada, se evaluó la respuesta del modelo por medio de los tres estadísticos establecidos anteriormente.

Para cada calibración ejecutada, se evaluó la respuesta del modelo por medio del sesgo porcentual, el coeficiente de determinación y el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe. Estos estadísticos fueron seleccionados debido a que suelen utilizarse para la evaluación de los modelos hidrológicos (ASCE, 1993).

El sesgo porcentual ( $P_{bias}$ ) es un estadístico que mide la tendencia promedio de los datos de las simulaciones a estar por encima o por debajo de los datos observados. Los valores positivos indican subestimación del modelo, los valores negativos indican sobrestimación, y el valor óptimo es el cero (Gupta, Sorooshian, & Yapo, 1999). Este parámetro, recomendado por la ASCE (1993) (ASCE, 1993), se utiliza comúnmente para cuantificar los errores del balance hídrico e indica claramente si hay un mal desempeño del modelo (Gupta, Sorooshian, & Yapo, 1999). Los valores menores al 15% son comúnmente aceptados (Golmohammadi, Prasher, Madani, & Rudra, 2014).

$$P_{bias} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n R_{sim,i} - \sum_{i=1}^n R_{obs,i}}{\sum_{i=1}^n R_{obs,i}} \right] * 100$$

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) describe el grado de colinealidad entre los datos medidos y simulados. Este coeficiente varía entre 0 y 1, donde los valores mayores a 0.5 se consideran aceptables (Santhi, y otros, 2001) (Van Liew, Arnold, & Garbrecht, 2003).

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{obs,i} - \overline{R_{obs}})(R_{sim,i} - \overline{R_{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_{obs,i} - \overline{R_{obs}})^2 \sum_{i=1}^n (R_{sim,i} - \overline{R_{sim}})^2}}$$

El coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) determina la magnitud relativa de la varianza residual comparada con la varianza de los datos medidos (Wilks, 2006). Este varía desde  $-\infty$  hasta 1.0, donde los valores mayores a 0.7 son generalmente aceptados. El uso de este parámetro es recomendado por la ASCE (1993) y por Legates y McCabe (1999).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (R_{obs,i} - R_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (R_{obs,i} - \bar{R}_{obs})^2}$$

### 3.4 Análisis del uso potencial de IMERG en las cuencas de estudio.

Una vez obtenida la respuesta hidrológica del proceso de calibración, se analizó el potencial uso de EF5 para la predicción de eventos de escorrentía mediante los estadísticos establecidos anteriormente. Además, se analizaron los distintos factores que influyeron en el desempeño de EF5. Los factores analizados fueron los parámetros que afectan cada cuenca, los procesos físicos que ocurren en las zonas de estudio, y la relación entre la precipitación estimada por IMERG con la escorrentía medida en sitio.

Para el análisis de los procesos físicos que ocurren en cada cuenta, se comenzó localizando las estaciones hidrométricas de cada cuenca en el mapa. Para esto se utilizó la herramienta Google Earth. Una vez localizadas, se buscaron los factores que pudiesen afectar el comportamiento del modelo, tales como represas, lagos, o construcciones importantes cerca de la zona de estudio.

Debido a que no se cuenta con datos de precipitación medidos en sitio, no es posible realizar una evaluación profunda de la precipitación estimada por IMERG, y se recurre a evaluar de forma gráfica la relación entre la precipitación estimada por IMERG con la escorrentía medida en sitio. Para ello se graficaron los hietogramas e hidrogramas para cada cuenca en el periodo de tiempo seleccionado para la calibración (del 15 de octubre de 2010 al 15 de octubre de 2014), y se comparó visualmente si existe una relación entre los periodos de mayor precipitación, con la escorrentía dada. Aunque este análisis es superficial, sirve para visualizar si existe una relación evidente entre la precipitación estimada por IMERG y la escorrentía medida en sitio. Para este análisis se utilizaron datos de precipitación diaria, los cuales fueron facilitados por la Universidad

de Oklahoma. La precipitación estimada por IMERG viene dada en archivos ráster tipo TIFF con resolución espacial de 500 m, es decir, se cuenta con un dato de precipitación cada 500 m. Para poder analizar la precipitación junto con los datos de escorrentía medidos en sitio, fue necesario simplificar la información disponible de precipitación, a un único valor de precipitación diaria para el área de cada cuenca. Para ello, se promediaron los datos almacenados en los píxeles correspondientes a cada cuenca. Para calcular el promedio de la precipitación diaria de cada cuenca, se sumaron los valores de escorrentía almacenados en cada píxel, y se dividieron en el número total de píxeles correspondientes a cada cuenca. Este mismo procedimiento se realizó para cada día del periodo de calibración, para cada cuenca.

## **4. Análisis de Resultados**

### **4.1 Calibración para el periodo de seis meses seleccionado**

Esta calibración inicial se realizó con el fin de obtener una primera aproximación del comportamiento del modelo, y de esta manera poder definir qué tiempo será necesario implementar para el periodo de calentamiento. Resulta de gran importancia definir un tiempo de calentamiento lo suficientemente amplio para que las condiciones iniciales se asemejen a la realidad. Las iteraciones más importantes realizadas para las tres cuencas en el periodo de seis meses seleccionado se presentan en el Anexo I

#### 4.1.1 Primera aproximación a la calibración de Mpologoma.

El período de seis meses seleccionado para Mpologoma es del 19 de marzo de 2014 al 19 de septiembre de 2014. La mejor respuesta de los parámetros de balance hídrico y de onda cinemática para la cuenca de Mpologoma, se presentan en la Tabla 6.

**Tabla 6.**

*Parámetros calibrados para el periodo de seis meses en Mpologoma*

<b>Balance hídrico</b>		<b>Onda cinemática</b>	
WM	5	TH	1.5
B	1	UNDER	1.1
IM	0.005	LEAKI	2.5
KE	1	ISU	0.0001
FC	1	ALPHA	0.003
IWU	25	BETA	40
		ALPHA0	0

El Anexo J muestra la mejor respuesta del modelo para Mpologoma, sin embargo, se observa un mal desempeño. Se obtuvo un sesgo de -15.37%, lo que indica que la simulación del modelo es precisa, ya que su valor es cercano al 15% (Golmohammadi, Prasher, Madani, & Rudra, 2014). El coeficiente de determinación fue de 0.49, lo que representa que no existe relación lineal entre los dos conjuntos de datos. El NSE obtenido fue de -0.11, lo que indica que el desempeño del modelo es pobre y no se ajusta a los datos observados (Molnar, 2011). Por lo anterior, se concluye que no fue posible calibrar el modelo para el periodo de seis meses en Mpologoma.

A pesar del mal desempeño del modelo, al observar las distintas gráficas de las iteraciones realizadas para los seis meses, se pudo concluir que basta con tres meses de calentamiento para comenzar a correr el programa. Esto se ilustra en el Anexo J, donde se observa como el caudal al inicio de la simulación, durante los dos primeros meses, tiene un valor muy bajo con respecto a los observados, y es hasta finales del mes de mayo que el flujo base llega a un nivel más cercano al de los datos observados.

#### ***4.1.2 Primera aproximación a la calibración de Manafwa.***

Con respecto a Namatala, los resultados de la respuesta hidrológica de EF5 serán menos exactos que para las dos cuencas anteriores. Esto debido a que el área de la cuenca es de 124 km<sup>2</sup> y la resolución espacial de IMERG de tan solo 10 km. Es decir, la resolución de IMERG no es lo suficientemente precisa para esta cuenca.

El período de seis meses seleccionado para Manafwa es del 19 de marzo de 2014 al 19 de septiembre de 2014. Los parámetros calibrados para el modelo de balance hídrico y de onda cinemática se presentan en la Tabla 7, y la respuesta hidrológica en el Anexo K.

**Tabla 7.**

*Parámetros calibrados para el periodo de seis meses en Manafwa*

<b>Balance hídrico</b>		<b>Onda cinemática</b>	
WM	10	TH	1,5
B	0,5	UNDER	0,5
IM	0,1	LEAKI	2
KE	0,5	ISU	0,0001

FC	1	ALPHA	0,003
IWU	25	BETA	40
		ALPHA0	0

El Anexo K muestra la mejor respuesta del modelo para Manafwa, el cual presentó un desempeño aceptable. Se obtuvo un sesgo alto de 5.83%, el cual indica que la simulación del modelo es precisa (Golmohammadi, Prasher, Madani, & Rudra, 2014). El coeficiente de determinación fue de 0.73, lo que representa que existe relación lineal entre los dos conjuntos de datos. El NSE obtenido fue de 0.46, el cual representa un buen ajuste del modelo. Los parámetros obtenidos sirvieron como una primera aproximación para comenzar a calibrar los 4 años seleccionados. La gráfica no muestra claramente el periodo necesario para el calentamiento, sin embargo, para obtener mejores condiciones iniciales, se utilizaron tres meses de calentamiento al igual que en Mpologoma.

La línea recta que se observa en el Anexo K de agosto a septiembre se debe a que no existen registros de datos observados para Manafwa para ese periodo.

#### ***4.1.3 Primera aproximación a la calibración de Namatala.***

El período de seis meses seleccionado para Manafwa es del 19 de marzo de 2014 al 19 de septiembre de 2014. Los parámetros calibrados para el modelo de balance hídrico y de onda cinemática se presentan en la Tabla 8, y la respuesta hidrológica en Anexo L.

#### **Tabla 8.**

*Parámetros calibrados para el periodo de seis meses en Namatala*

Balance hídrico		Onda cinemática	
WM	0,5	TH	2
B	30	UNDER	1,1
IM	0,8	LEAKI	2,7
KE	0,001	ISU	0,0001
FC	0	ALPHA	0,003
IWU	25	BETA	40
		ALPHA0	0

El Anexo L muestra la mejor respuesta del modelo para Namatala, sin embargo, muestra un muy mal desempeño. Se obtuvo un sesgo de -49.37%, lo que indica que la simulación del modelo no es precisa (Golmohammadi, Prasher, Madani, & Rudra, 2014). El coeficiente de determinación fue de 0.17, lo que representa que no existe relación lineal entre los dos conjuntos de datos. y el NSE obtenido fue de -0.76, lo que indica que el modelo es pobre y no se ajusta a los datos observados. Namatala fue la cuenca con peor desempeño, de la gráfica presentada en el Anexo L, se puede observar que un importante problema a corregir es el flujo base simulado, debido a que éste se encuentra muy por debajo del flujo base de la escorrentía medida en sitio. Esto demuestra que el problema al calibrar no se debe a las condiciones iniciales, sino a que el modelo no está representando correctamente los procesos físicos de la cuenca. Se requiere evaluar para un mayor periodo de tiempo para obtener conclusiones. Aunque la gráfica no muestra el periodo de calentamiento que podría ser necesario, se utilizó un periodo de tres meses para darle mejores condiciones iniciales al modelo, al igual que en las demás cuencas.

#### 4.2 Calibración para el periodo de cuatro años (con archivos ráster)

Una vez determinado un periodo de calentamiento de 3 meses, se procedió a calibrar cada una de las cuencas de forma individual. El valor promedio de la escorrentía medida en sitio, para el periodo seleccionado de los cuatro años fue de 36.44 m<sup>3</sup>/s, 7.23 m<sup>3</sup>/s, y de 2.07 m<sup>3</sup>/s para Mpologoma, Manafwa y Namatala, respectivamente. Las iteraciones más importantes para las tres cuencas se presentan en el Anexo M.

#### 4.2.1 Calibración de Mpologoma.

Los parámetros calibrados para Mpologoma se muestran en la Tabla 9, y su respuesta hidrológica en el Anexo N.

**Tabla 9.**

*Parámetros calibrados en Mpologoma (con archivos ráster)*

<b>Balance hídrico</b>		<b>Onda cinemática</b>	
WM	250	TH	2
B	0,1	UNDER	1
IM	0,1	LEAKI	2
KE	1	ISU	0,01
FC	25	ALPHA	0,003
IWU	25	BETA	40
		ALPHA0	0

Cuando se cuenta con archivos ráster, se espera que los valores de los parámetros sean cercanos a la unidad, ya que estos actúan como multiplicadores para la información contenida en los archivos ráster (Ensemble Framework For Flash Flood Forecasting (Productor), 2019). Con

respecto a los parámetros para el balance hídrico en Mpologoma, al calibrar el modelo, fue necesario utilizar valores muy extremos para los parámetros WM, B y BETA. Esto podría deberse a dos posibles causas, una de ellas sería que el modelo CREST y de onda cinemática, no representan correctamente el comportamiento de la cuenca. Otro motivo podría ser que los datos de precipitación de IMERG no representan correctamente la precipitación real, como ha ocurrido en China, al tratarse de un terreno complejo (Alsumaiti, Hussein, Ghebreyesus, & Sharif, 2020).

La respuesta en Mpologoma presentó un sesgo del 38.2%, lo cual indica que la simulación no es precisa. El coeficiente de determinación fue de 0.60, lo que indica que no existe relación lineal entre los datos simulados y observados. El NSE fue de -0.07, lo que demuestra que el ajuste de los datos es insuficiente. De la gráfica presentada en el Anexo N, se puede observar que el modelo tiene una respuesta más lenta, lo cual se puede observar en los picos de junio de 2011, diciembre 2011, julio de 2012, abril, octubre y diciembre de 2013, y julio de 2014. Sin embargo, al modificar los parámetros de onda cinemática para acelerar su respuesta, el modelo presentó un peor desempeño. Esto podría deberse a que los archivos ráster relacionados con el modelo de onda cinemática limitan la respuesta del modelo. Por lo tanto, se concluye que no fue posible calibrar el modelo para Mpologoma y resulta necesario volver a realizar la calibración sin los archivos ráster.

#### ***4.2.2 Calibración de Manafwa.***

Los parámetros calibrados para Manafwa se presentan en la Tabla 10, y su respuesta hidrológica en Anexo Ñ.

**Tabla 10.***Parámetros calibrados en Manafwa (con archivos ráster)*

<b>Balance hídrico</b>		<b>Onda cinemática</b>	
WM	100	TH	2,5
B	0,5	UNDER	1
IM	0,1	LEAKI	2,3
KE	1	ISU	0,01
FC	10	ALPHA	0,003
IWU	25	BETA	40
		ALPHA0	0

Los valores obtenidos de la calibración de Manafwa, presentan valores elevados para WM y BETA. Al igual que en Mpologoma, esto podría deberse a que los modelos utilizados no representan correctamente el comportamiento de la cuenca, o que la precipitación estimada por IMERG no es acertada.

Manafwa tuvo peor desempeño para los cuatro años que para el periodo de seis meses. Con un sesgo del 32.08%, se considera que el desempeño del modelo no es preciso. El coeficiente de determinación de 0.35 muestra que los datos simulados no se relacionan con los datos observados, y el NSE de -0.14 indica que el modelo es pobre y no se ajusta a los datos observados. Para Manafwa se esperaba un mejor desempeño del modelo ya que con la calibración inicial de los seis meses, se obtuvo un mejor resultado. La velocidad de respuesta del modelo no está en sincronía con los datos observados, lo que podría significar que los archivos ráster relacionados con ALPHA, ALPHA0 y BETA están limitando la respuesta del modelo. Por lo tanto, se requiere calibrar nuevamente sin tener en cuenta los archivos ráster.

### 4.2.3 Calibración de Namatala.

Los parámetros calibrados para Namatala se muestran en la Tabla 11, y su respuesta hidrológica en el Anexo O.

**Tabla 11.**

*Parámetros calibrados en Namatala (con archivos ráster)*

Balance hídrico		Onda cinemática	
WM	5	TH	4
B	20	UNDER	1,5
IM	0,5	LEAKI	3
KE	0,001	ISU	0,1
FC	1	ALPHA	0,003
IWU	25	BETA	40
		ALPHA0	0

Para Namatala fue necesario utilizar un valor extremo para B, KE, ALPHA y BETA. Al igual que en las dos cuencas anteriores, los valores extremos muestran que el modelo no representa adecuadamente el comportamiento de la escorrentía en esta cuenca, o que la precipitación estimada por IMERG no es acertada.

Namatala presentó el peor desempeño de las tres cuencas. Su respuesta obtuvo un sesgo del -69.47%, un coeficiente de determinación de 0.24 y un NSE de -0.24. En Namatala se observa nuevamente que el flujo base de la escorrentía simulada, tiene una magnitud inferior a la de la escorrentía medida en sitio. En las distintas iteraciones realizadas se modificaron los parámetros UNDER y LEAKI que se relacionan con la escorrentía subsuperficial, con el fin de aumentar la

magnitud del flujo base, sin embargo, el desempeño del modelo no mejoró al modificarlos. Esto podría deberse a un almacenamiento de agua subterránea, proceso físico que no es posible simular con el modelo CREST (Wang, y otros, 2011). El mal desempeño también podría deberse a que los archivos ráster estén limitando la respuesta del modelo. Por lo tanto, se concluye que no fue posible calibrar el modelo para Namatala y resulta necesario volverlo a realizar la calibración sin los archivos ráster, para determinar si estos son los causantes de que el modelo hidrológico no se haya ajustado.

#### **4.3 Calibración para el periodo de cuatro años (sin archivos ráster)**

Debido al mal desempeño de la respuesta hidrológica de las tres cuencas, se realizó nuevamente la calibración sin tener en cuenta los archivos ráster. Con esto se pretende determinar si el problema presentado está relacionado con este tipo de archivos. Las iteraciones más importantes para las tres cuencas se presentan en el Anexo P.

El resultado de los parámetros calibrados se encuentra en el Anexo Q, y la respuesta hidrológica de Mpologoma, Manafwa y Namatala en los Anexos R, S, y T, respectivamente.

El Anexo R muestra que Mpologoma presentó un sesgo del 34.64%, un coeficiente de determinación de 0.62, y un NSE de -1.32, lo que representa que la respuesta hidrológica tuvo un peor desempeño que cuando se utilizaron los archivos ráster. Los Anexos S y T muestran que el mismo comportamiento sucede en Manafwa y Namatala. Estas presentaron un sesgo del 14.4% y -71.97%, un coeficiente de determinación de 0.36 y 0.25, y un NSE de -1.33 y -0.3, respectivamente. Al igual que en Mpologoma, se puede concluir que el desempeño de las respuestas hidrológicas fue peor que cuando se usaron los archivos ráster, por lo que estos no son

los responsables de que no se pueda calibrar el modelo. Debido a que no se pudo calibrar EF5, no fue posible realizar la validación del modelo hidrológico.

Finalmente, del Anexo Q se puede observar que las magnitudes de los parámetros calibrados, sin los archivos ráster, presentaron valores más extremos para las tres cuencas. Con esto se descarta que la causa de las pobres respuestas hidrológicas, sean los archivos ráster.

#### **4.4 Análisis de las áreas de drenaje en cada cuenca**

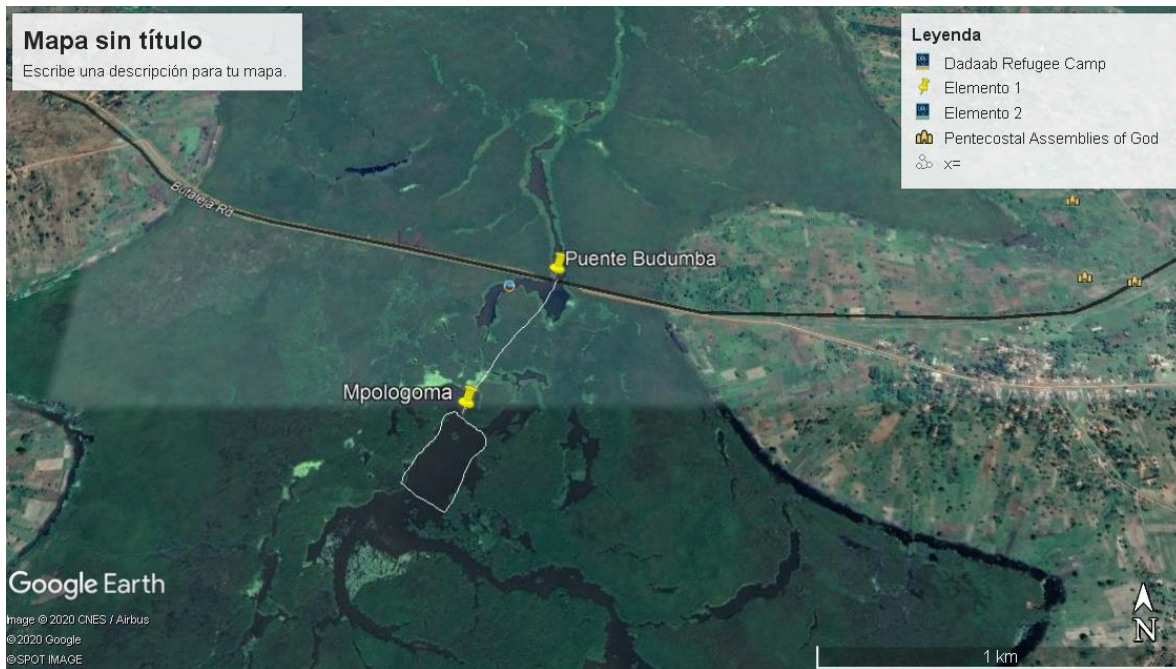
El siguiente aspecto por analizar para poder comprender por qué el modelo no da una respuesta apropiada, es identificar características del área de estudio que podrían influir en el comportamiento de la esorrentía. A continuación, se presentan los hallazgos encontrados para cada cuenca.

##### ***4.4.1 Alrededores de Mpologoma.***

Al estudiar los alrededores del medidor de Mpologoma, se encontró que aguas arriba de este se encuentra un lago con dimensiones de 150 m de ancho por 400 m de largo, aproximadamente. Y aguas abajo se encuentra el puente Budumba, aproximadamente a 600 m. Además, el medidor se encuentra ubicado a 5 km de la población de Mawungwe. La Figura 3 muestra la imagen satelital tomada por Google Earth el 9 de febrero de 2020, donde se muestra el medidor de Mpologoma, y sus alrededores.

**Figura 3.**

*Imagen satelital del lago y el puente cercano a la estación hidrométrica de Mpologoma*



La presencia del lago aguas arriba del medidor de Mpologoma, representa un embalsamiento del agua. Este podría ser la causa del mal desempeño del modelo para esta cuenca, ya que dentro de una de las limitaciones del modelo CREST, está el no considerar este tipo de procesos físicos (Wang, y otros, 2011).

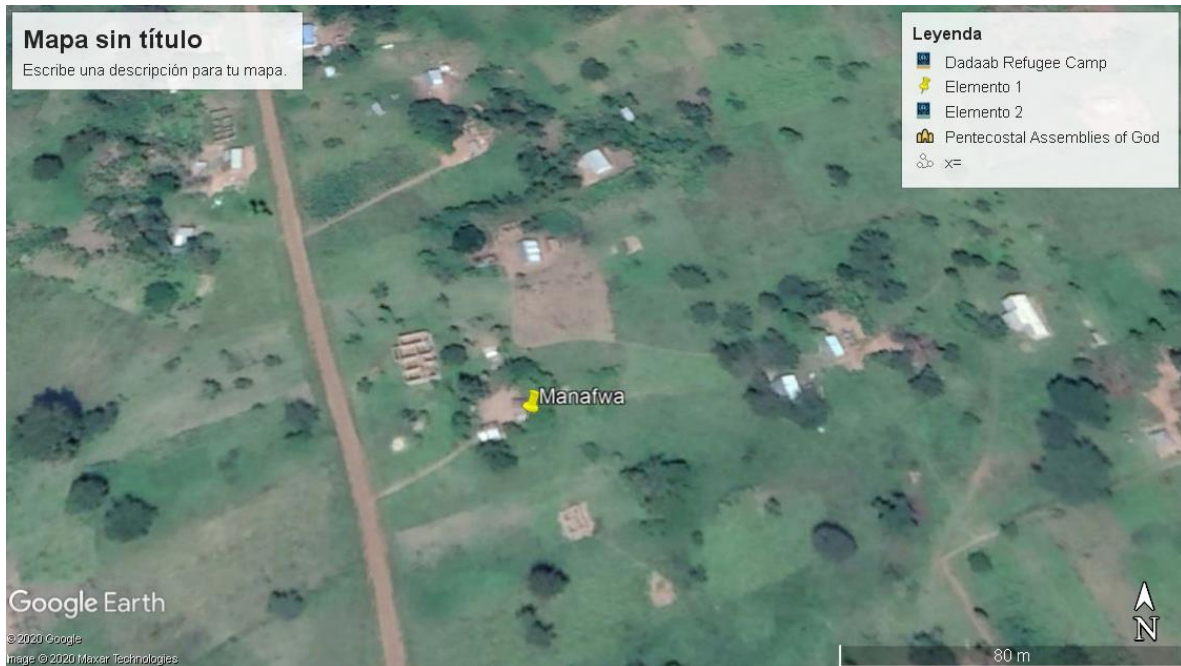
#### ***4.4.2 Alrededores de Manafwa.***

El medidor de Manafwa se encuentra ubicado sobre una vivienda a aproximadamente a 2.5 km de la población de Busui y a aproximadamente a 1 km del río, lo que representa un error en las coordenadas de la estación hidrométrica de Manafwa. Las Figuras 4 y 5 muestran las imágenes

satelitales tomadas el 30 diciembre de 2019 por Google Earth, de los alrededores del medidor de Manafwa.

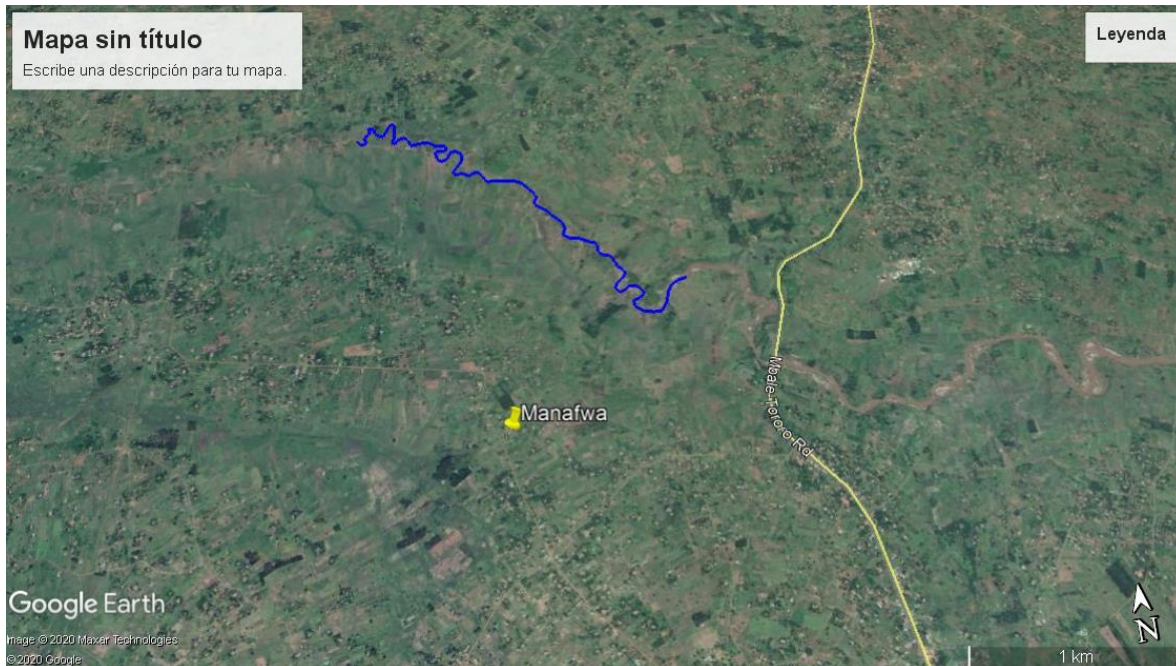
#### Figura 4.

*Imagen satelital de la ubicación de la estación hidrométrica de Manafwa*



**Figura 5.**

*Imagen satelital de la posición de la estación hidrométrica de Manafwa con respecto al río (marcado en azul)*



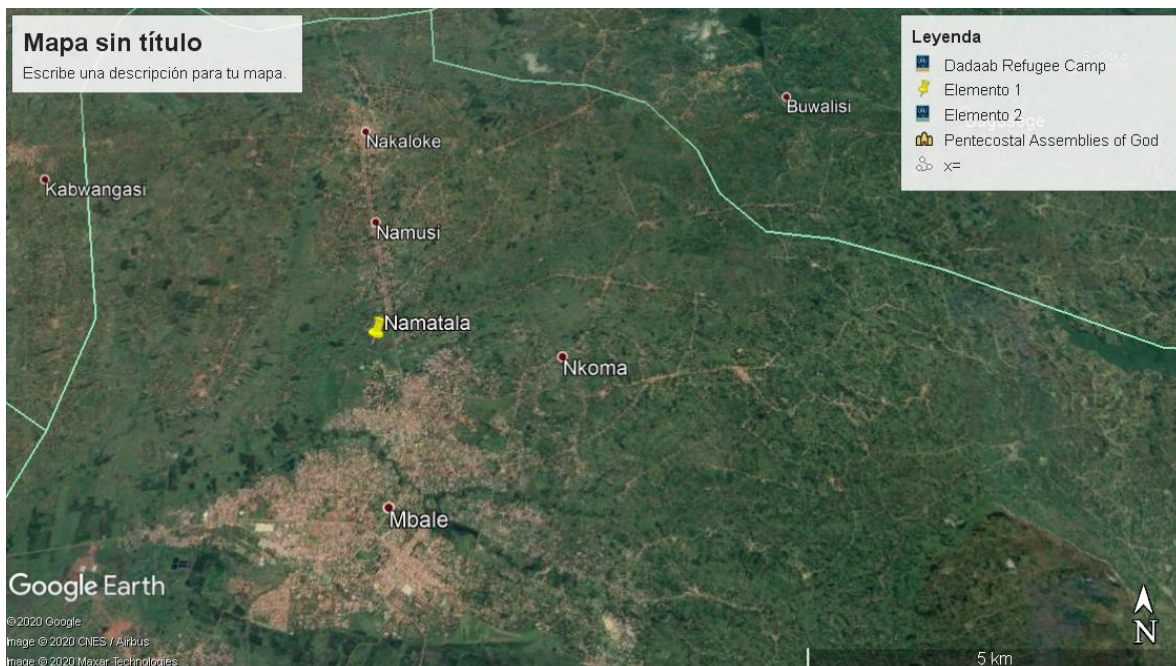
Con la ayuda de la imagen satelital se pudo verificar que existe un error en las coordenadas geográficas de la estación hidrométrica de Manafwa, la cual afecta el comportamiento del modelo ya que el punto donde se dice que finaliza la cuenca, no coincide con el dato real donde esta cierra y donde se está midiendo realmente el caudal, lo que podría influir en el mal desempeño del modelo en la simulación hidrológica. Este error se debe a que la información suministrada por el gobierno de Uganda al NWC sobre la ubicación de la estación hidrométrica de Manafwa, aparentemente es errónea, y se requiere validar en campo.

#### 4.4.3 Alrededores de Namatala.

El medidor de Namatala se encuentra a 3 km de la población de Mbale. Se observa que el río tiene un ancho aproximado de 10 m, con meandros muy pronunciados y radios de giro de aproximadamente 15 m. Los meandros son característicos de los ríos ubicados en llanuras aluviales con pendientes muy suaves, lo que hace que este tipo zonas sean propensas a las inundaciones. A continuación, se presentan las imágenes satelitales tomadas el 7 de julio de 2019 por Google Earth, de los alrededores del medidor de Namatala.

#### Figura 6.

*Imagen satelital de la estación hidrométrica de Namatala con respecto a la población de Mbale*



**Figura 7.**

*Imagen satelital de la posición de Namatala con respecto al río*



Al observar las imágenes satelitales de la cuenca de Namatala, no se encuentran represas, lagos, o construcciones importantes que pudieran afectar el desempeño del modelo hidrológico CREST. Se requiere de un estudio en campo para identificar si existe almacenamiento de agua en el suelo, lo que explicaría que el modelo hidrológico CREST no representa correctamente los procesos físicos de esta cuenca.

#### **4.5 Análisis gráfico de la relación entre la precipitación estimada con IMERG y la respuesta hidrológica del caudal medido en sitio**

Aunque no fue posible calibrar los modelos para ninguna de las tres cuencas en estudio, es posible que la precipitación estimada por IMERG si se relacione con las respuestas hidrológicas.

Para ello, se realizó un análisis exploratorio de la relación existente entre la precipitación y la escorrentía medida en sitio de cada cuenca por medio del hietograma y del hidrograma, para el periodo de tiempo seleccionado para la calibración (1462 días).

De acuerdo con el hietograma de precipitación y el hidrograma de escorrentía para la cuenca de Mpologoma, se observa que podría existir una relación entre la precipitación estimada por el satélite y la escorrentía medida sitio ya que los periodos donde se presentan los picos de escorrentía están asociados con precipitaciones de gran magnitud o de precipitaciones consecutivas. El hietograma e hidrograma de Mpologoma se presenta en el Anexo U.

Para esta cuenca también se observa relación entre la precipitación estimada con IMERG y los datos de escorrentía medidos en sitio. Esta relación se refleja en que cuando las precipitaciones son consecutivas, aumenta la magnitud de la escorrentía. Sin embargo, se observa que en algunos puntos el valor del caudal se dispara en magnitud sin que la precipitación haya tenido un incremento significativo en magnitud ni frecuencia. El hietograma e hidrograma de Manafwa se presenta en el Anexo V.

Para Namatala, también se observa que podría existir una relación entre la precipitación estimada por IMERG y la respuesta hidrológica de la escorrentía tomada en sitio, ya que el caudal aumenta cuando se presentan lluvias consecutivas, y disminuye cuando la frecuencia de precipitación disminuye. El hietograma e hidrograma de Namatala se presenta en el Anexo W.

## 5. Conclusiones

El modelo hidrológico CREST aplicado en las cuencas de estudio, no fue adecuado para analizar el fenómeno de escorrentía. En el caso de EF5, no fue posible calibrarlo para ninguna de las cuencas en estudio. Esto significa que, con la información disponible, EF5 no es capaz de predecir eventos de escorrentía para Mpologoma, Manafwa ni Namatala. Sin embargo, los parámetros encontrados servirán como una primera aproximación para futuros estudios de las zonas.

Con respecto a Mpologoma, la respuesta de EF5 fue pobre y no se ajustó a los datos de escorrentía medidos en sitio. Esto podría deberse a que aguas arriba del medidor, se encuentra un lago que genera embalsamiento de agua. El modelo de balance hídrico CREST presenta limitaciones para este tipo de situaciones, por lo que no es capaz de representar correctamente el embalsamiento de agua (Alsumaiti, Hussein, Ghebreyesus, & Sharif, 2020). Se recomienda utilizar otro modelo hidrológico que sea capaz de representar el proceso físico del embalsamiento del agua.

En Manafwa se presentan un error con las coordenadas de sus medidores. Por medio de imágenes satelitales provenientes de Google Earth, se pudo evidenciar que las coordenadas de la estación hidrométrica proporcionadas por Uganda están mal localizadas, ya que según estas la estación hidrométrica no se encuentra ubicada sobre el río. Debido a este error, los datos de escorrentía simulados con EF5, no corresponden al mismo punto de los datos medidos en sitio para las cuencas. Para poder corregir este error, se requiere verificar la posición exacta de la ubicación de la estación hidrométrica de Manafwa. Aunque no fue posible calibrar el modelo para Manafwa,

las aproximaciones obtenidas de los parámetros podrán servir como valores iniciales para calibrar el modelo una vez se obtengan las coordenadas exactas de la ubicación del medidor.

Con respecto a Namatala, no es posible identificar la causa exacta de por qué EF5 no representa correctamente los procesos físicos de la cuenca, pero el hecho que el flujo base simulado por CREST sea inferior al medido en sitio, puede relacionarse con que CREST no es capaz de representar correctamente el comportamiento del agua subterránea, por lo que se recomienda utilizar otro modelo hidrológico.

Por otra parte, con respecto a la estimación de la precipitación por parte del producto satelital IMERG, se espera que esta pueda predecir eventos de escorrentía si se utiliza un modelo hidrológico capaz de representar los procesos físicos para Mpologoma, Manafwa y Namatala. Es decir, se comprobó que la precipitación de IMERG y la escorrentía medida en sitio para las tres cuencas, podrían estar relacionadas.

Finalmente se concluye que para Mpologoma debido al embalsamiento de agua, para Manafwa debido al error en la ubicación de las coordenadas geográficas de la estación hidrométrica y para Namatala debido a la escorrentía subsuperficial, la respuesta hidrológica de EF5 no se ajusta con los datos de escorrentía medidos en sitio. Por lo tanto, la predicción de eventos de escorrentía a través de CREST y IMERG no sirven como insumo para sistemas de alerta temprana en ninguna de las cuencas.

### Referencias Bibliográficas

- Alsumaiti, T. S., Hussein, K., Ghebreyesus, D. T., & Sharif, H. O. (2020). Performance of the CMORPH and GPM IMERG Products over the United Arab Emirates. . *Remote Sensing*, 12(9), 1426.
- Anjum, M. N., Ding, Y., Shangguan, D., Ahmad, I., Ijaz, M. W., Farid, H. U., & Adnan, M. (2018). Performance evaluation of latest integrated multi-satellite retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG) over the northern highlands of Pakistan. *Atmospheric Research*, 205, 134–146. doi:10.1016/j.atmosres.2018.02.010 .
- ASCE. (1993). Criteria for evaluation of watershed models. *J. Irrigation Drainage Eng.* 119(3), 429-442.
- Banco Mundial . (2017). *PIB (US\$ a precios actuales)*. Obtenido de <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.CD>
- Banco Mundial. (2019). *World Development Indicators*. Obtenido de <https://datacatalog.worldbank.org/dataset/world-development-indicators>
- BBC News Mundo. (2018). *Los países del mundo (y de América Latina) con mayor riesgo en caso de sufrir una catástrofe natural*. Obtenido de [www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-46357919](http://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-46357919)
- Burgan, H. I., & Aksoy, H. (2018). Annual flow duration curve model for ungauged basins. *Hydrology Research*, 49(5), 1684-1695.
- Center for Epidemiology in Disasters (CRED). (2009). *EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database, Universite' Catholique de Louvain, Brussels*. Obtenido de [www.emdat.be](http://www.emdat.be)

- Cheptoris, H. (2018). *Mpologoma Catchment Management Plan*. Obtenido de [www.mwe.go.ug/sites/default/files/library/Mpologoma%20CMP.pdf](http://www.mwe.go.ug/sites/default/files/library/Mpologoma%20CMP.pdf)
- Dinku, T., Ruiz, F., Connor, S., & Ceccato, P. (2009). Validation and Intercomparison of Satellite Rainfall Estimates over Colombia. *Journal of applied meteorology and climatology*, Vol. 49.
- EM-DAT. (2011). *The international Disaster Database*. Obtenido de [www.emdat.be/](http://www.emdat.be/)
- Ensemble Framework For Flash Flood Forecasting (Productor). (2019). *EF5 Advanced Training: Distributed Parameters [DVD]*. Obtenido de <http://ef5.ou.edu/videos/>
- Flamig, Z., Vergara, H., Clark, R., Gourley, J., & Hong, Y. (2015). *American Geophysical Union, Fall Meeting*.
- Foelsche, U., Kirchengast, G., Fuchsberger, J., Tan, J., & Petersen, W. A. (2017). Evaluation of GPM IMERG Early, Late, and Final rainfall estimates using WegenerNet gauge data in southeastern Austria. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6559-6572 doi:10.5194/hess-21-6559-2017 .
- Global Network of Civil Society Organisations for Disaster Reduction (GNDR). (2015). *Desastres Cotidianos - Evaluación de la Realidad de Uganda*. Obtenido de [www.gndr.org/es/programas/incidencia/campana-evaluacion-realidad/evaluacion-realidad-desde-primera-linea/item/1314-desastres-cotidianos-evaluacion-de-la-realidad-de-uganda.html](http://www.gndr.org/es/programas/incidencia/campana-evaluacion-realidad/evaluacion-realidad-desde-primera-linea/item/1314-desastres-cotidianos-evaluacion-de-la-realidad-de-uganda.html)
- Golmohammadi, G., Prasher, S., Madani, A., & Rudra, R. (2014). Evaluating three hydrological distributed watershed models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. *Hydrology*, 1(1), 20-39.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. . *J. Hydrologic Eng.* 4(2), 135-143.
- Huffman, G. J. (2019). NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG). *National Aeronautics and Space Administration*.

- Huffman, G., Bolvin, D., & Nelkin, E. (2017). *Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) Technical Documentation, IMERG Tech Document*.
- Legates, D. R., & McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Res.* 35(1), 233-241.
- Li, N., Tang, G., Zhao, P., Hong, Y., Gou, Y., & Yang, K. (2017). Statistical assessment and hydrological utility of the latest multi-satellite precipitation analysis IMERG in Ganjiang River basin. *Atmospheric Research*, 183, 212–223. doi:10.1016/j.atmosres.2016.07.020 .
- Mazzoglio, P., Laio, F., Balbo, S., Boccardo, P., & Disabato, F. (2019). Improving an extreme rainfall detection system with GPM IMERG data. . *Remote Sensing*, 11(6), 677.
- Molnar, P. (2011). "Calibration". *Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland*.
- Musiime, O., Tenywa, M. M., Majaliwa, M. J., & et al. (2005). Constraints to rice production in Bugiri district. . *Afr. Crop Sci. Conf. Proc.* 7, 1495–9.
- Naciones Unidas. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. (31 de octubre de 2018). *Tres de cada cinco ciudades corren un alto riesgo de sufrir un desastre natural*. Obtenido de [www.un.org/development/desa/es/news/population/world-cities-day-2018.html](http://www.un.org/development/desa/es/news/population/world-cities-day-2018.html)
- Naciones Unidas. Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo sostenible. (2018). *Objetivo 13: Acción por el clima*. Obtenido de <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-13-climate-action.html>
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., & Hauck, L. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. American Water Resources Assoc.* 37(5), 1169-1188.
- Sharifi, E., Steinacker, R., & Saghafian, B. (2016). Assessment of GPM-IMERG and Other Precipitation Products against Gauge Data under Different Topographic and Climatic

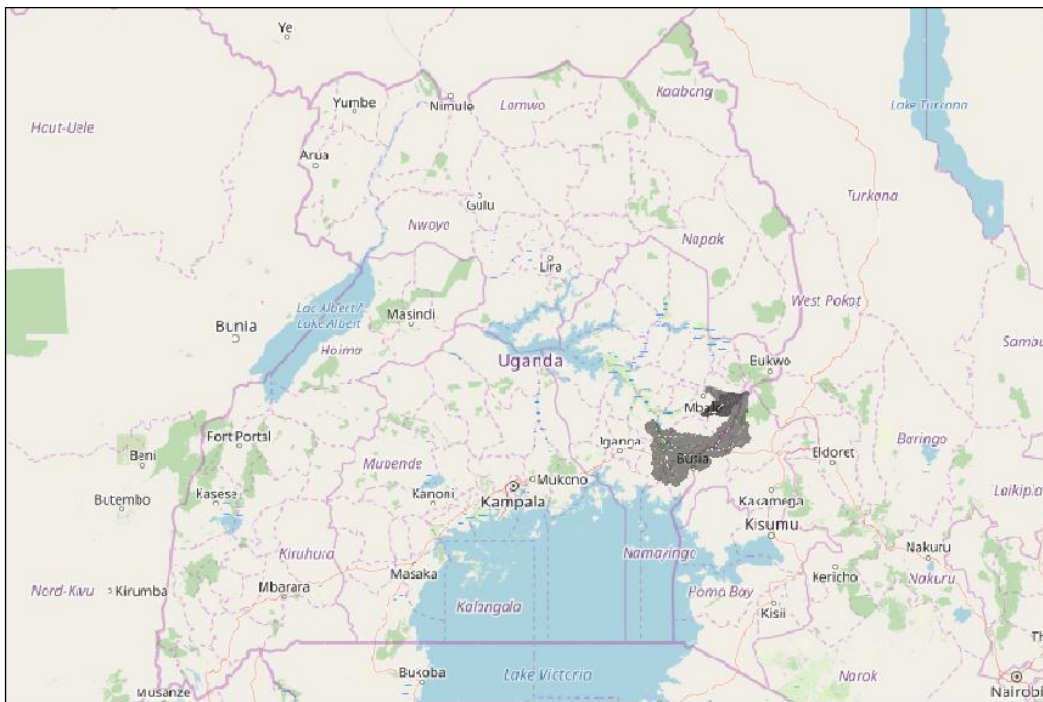
- Conditions in Iran: Preliminary Results. *Remote Sensing*, 8(2), 135. doi:10.3390/rs8020135.
- Sokolov, A., & Chapman, T. (1974). *Methods for Water Balance Computation*. . España: Instituto de Hidrología de España. Unesco.
- Tan, M. L., & Santo, H. (2018). Comparison of GPM IMERG, TMPA 3B42 and PERSIANN-CDR satellite precipitation products over Malaysia. *Atmospheric Research*, 202, 63–76. doi:10.1016/j.atmosres.2017.11.006 .
- UNICEF. (2011). *Estadísticas*. Obtenido de [www.unicef.org/spanish/infobycountry/uganda\\_statistics.html](http://www.unicef.org/spanish/infobycountry/uganda_statistics.html)
- University of Oklahoma/Hydros Module 1.3. (2020). *EF5 Overview, Module 1.3*. Obtenido de [http://ef5.ou.edu/downloads/presentations/1\\_3\\_EF5\\_Overview.pdf](http://ef5.ou.edu/downloads/presentations/1_3_EF5_Overview.pdf)
- University of Oklahoma/Hydros Module 1.4. (2020). *DEM Derivatives, Module 1.4*. Obtenido de [http://ef5.ou.edu/downloads/presentations/1\\_4\\_DEM\\_Derivatives.pdf](http://ef5.ou.edu/downloads/presentations/1_4_DEM_Derivatives.pdf)
- Van Liew, M. W., Arnold, J. G., & Garbrecht, J. D. (2003). Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. . *Trans. ASAE* 46(6), 1539-1551.
- Wang, J., Yang, H., Li, L., Gourley, J. J., Sadiq, I. K., Yilmaz, K. K., . . . Okello, L. (2011). The coupled routing and excess storage (CREST) distributed hydrological model. . *Hydrol Sci. J.* 56(1), 84-98.
- Wang, Z., Zhong, R., Lai, C., & Chen, J. (2017). Evaluation of the GPM IMERG satellite-based precipitation products and the hydrological utility. *Atmospheric Research*, 196, 151–163. doi:10.1016/j.atmosres.2017.06.020.
- Wilks, D. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. 2nd Edition*. London: Academic Press.
- Wu, H. (2020). *Global Flood Monitoring*. Obtenido de <http://flood.umd.edu/>

Yilmaz, K. K., Adler, R. F., Tian, Y., Hong, Y., & Pierce, H. F. (2010). Evaluation of a satellite-based global flood monitoring system. *International Journal of Remote Sensing*, 31(14), 3763-3782.

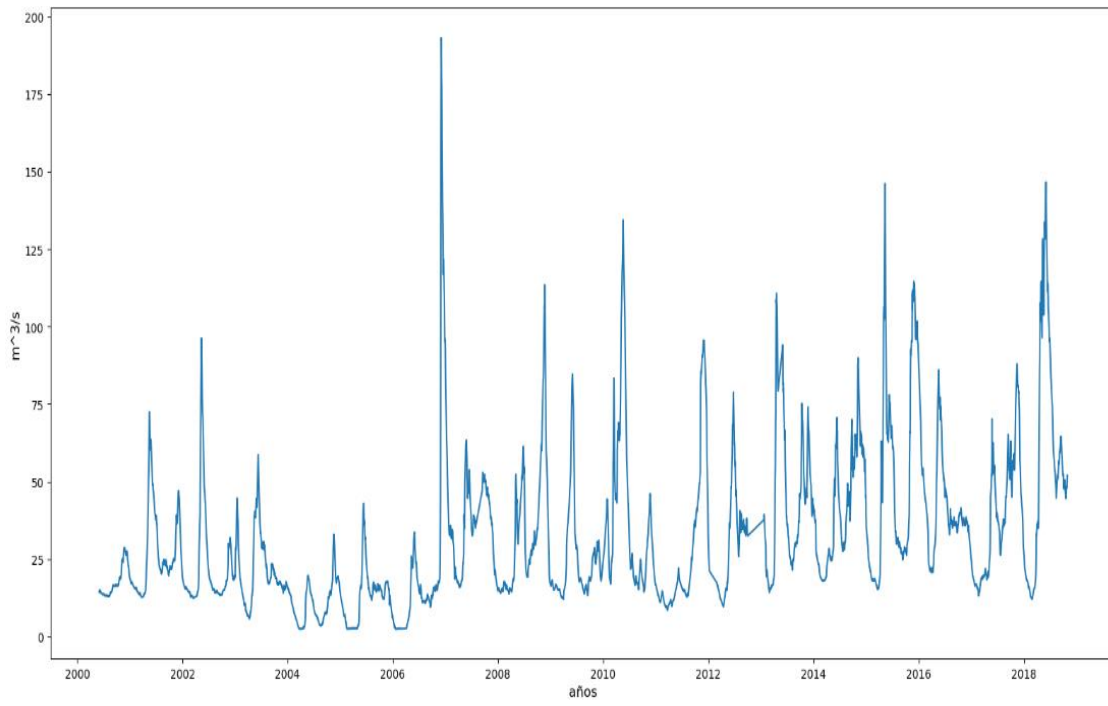
Zimmermann, E. (2000). *Investigador Asistente CONICET. Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales - Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - UNR. Riobamba 245 bis.*

## Apéndices

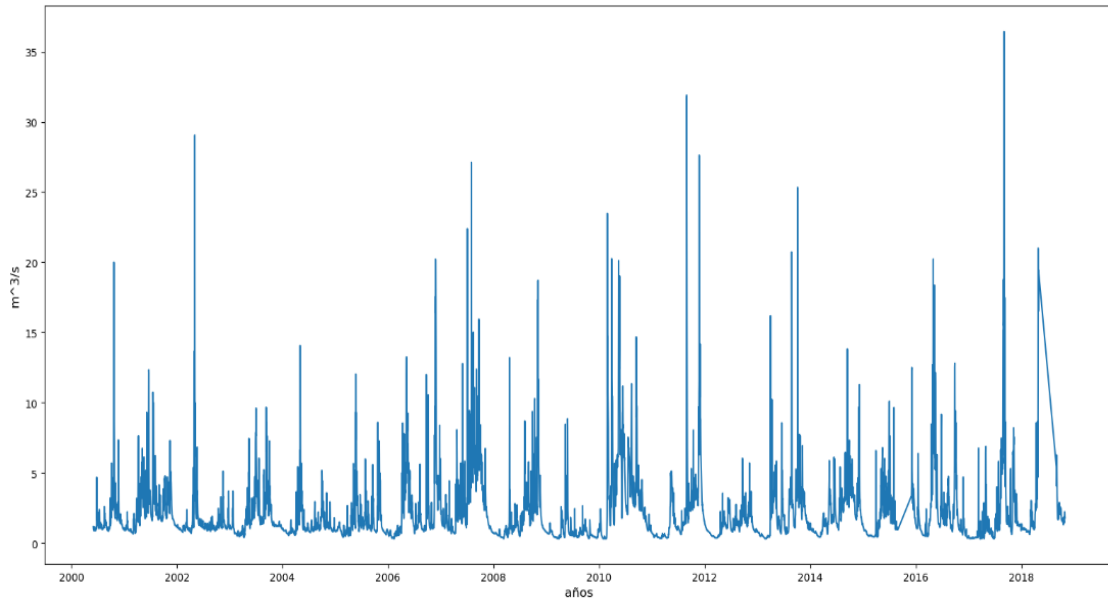
### Apéndice A. Cuencas de Mpologoma, Manafwa y Namatala en el mapa de Uganda



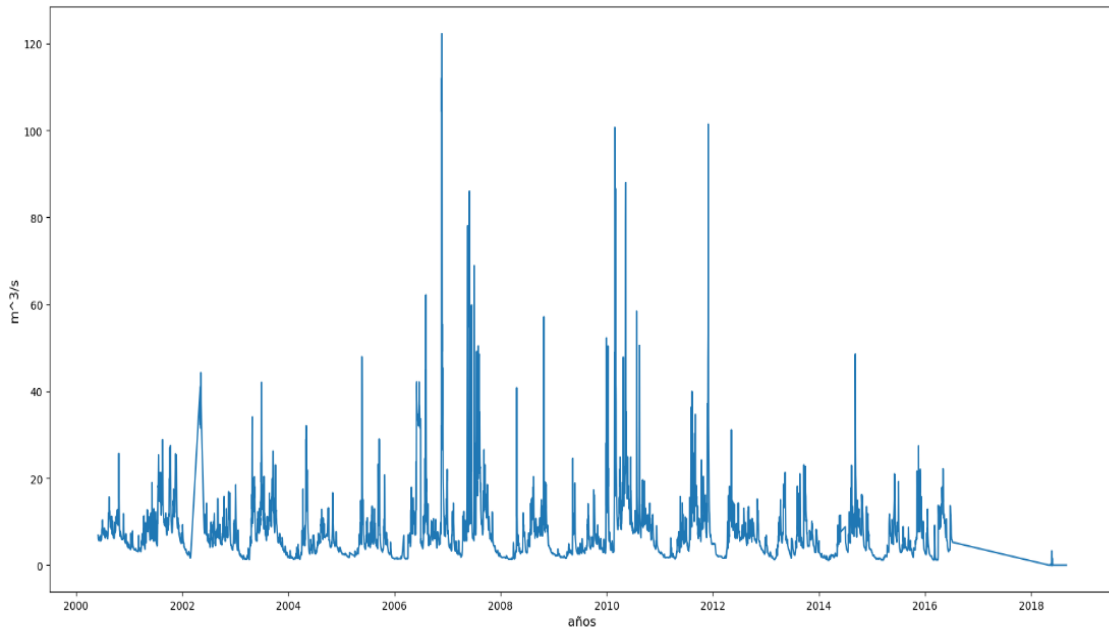
**Apéndice B Escorrentía medida en sitio de Mpologoma del año 2000 al 2018**

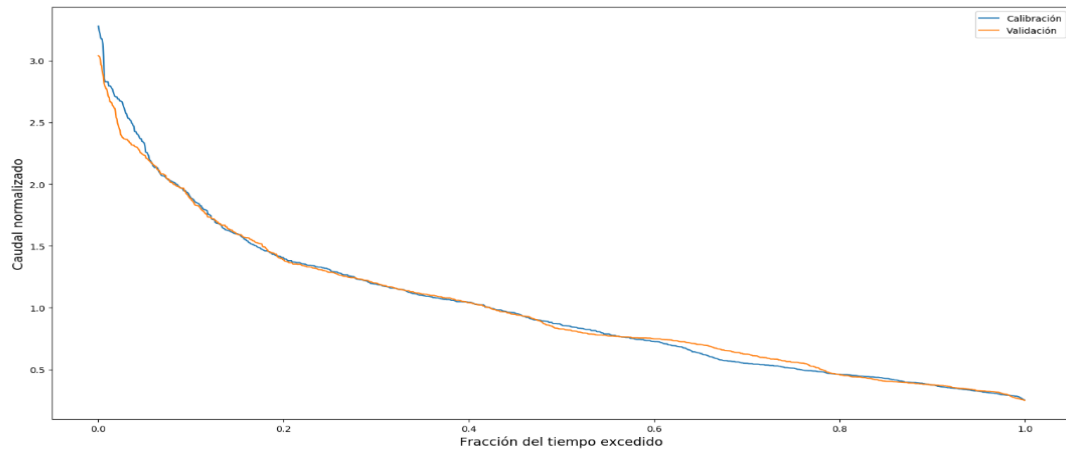


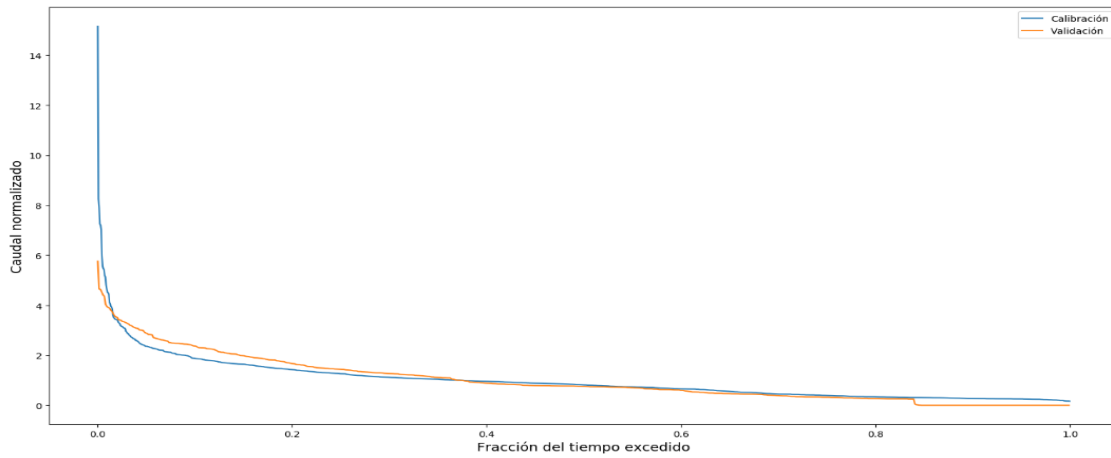
**Apéndice C. Escorrentía medida en sitio de Namatala del año 2000 al 2018**

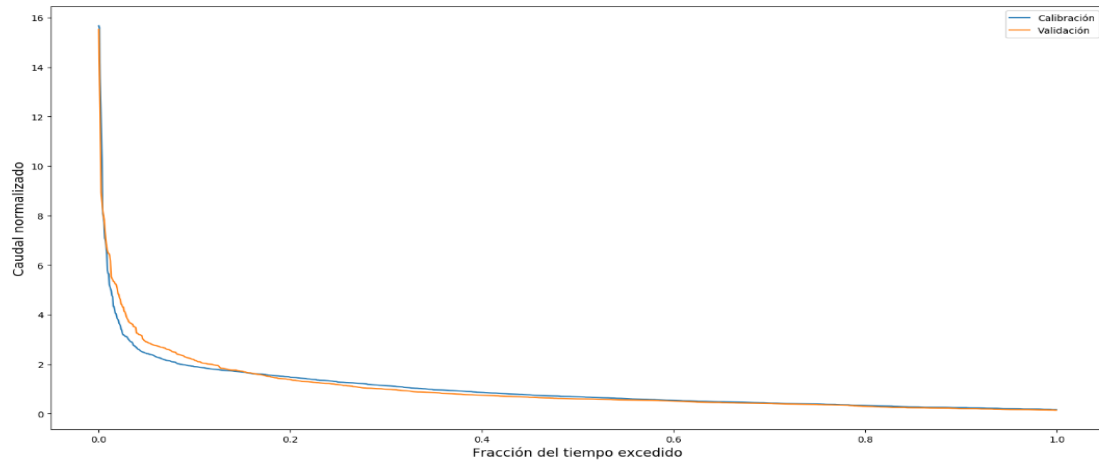


**Apéndice D. Escorrentía medida en sitio de Manafwa del año 2000 al 2018**



**Apéndice E. Curva de Duración de Caudales para Mpologoma**

**Apéndice F. Curva de Duración de Caudales para Manafwa**

**Apéndice G. Curva de Duración de Caudales para Namatala**

## Apéndice H. Configuración del Archivo de Control

```

[Basic]
DEM=basic/dem.tif
DDM=basic/ddm.tif
FAM=basic/fam.tif
PROJ=geographic
ESRIDDM=true
SelfFAM=false

[PrecipForcing IMERG]
TYPE=TIF
UNIT=mm/30u
FREQ=30u
LOC=calibration_precipitation/
NAME=precip.YYYYMMDD_HHUU.crest.tif

[PETForcing CLIMO]
LOC=pet/
FREQ=1m
UNIT=mm/d
NAME=FAO.PET.MM.tif
TYPE=TIF

[gauge Mpologoma]
LAT=0.82283
LON=33.78733
BASINAREA=3614
OBS=baseline/Mpologoma_DailyQ.csv
OUTPUTTS=TRUE

[gauge Manafwa]
LAT=0.93550
LON=34.14450
BASINAREA=494
OBS=baseline/Manafwa_DailyQ.csv
OUTPUTTS=TRUE

[gauge Namatala]
LAT=1.10517
LON=34.17017
BASINAREA=124
OBS=baseline/Namatala_DailyQ.csv
OUTPUTTS=TRUE

[Basin Uganda]
gauge=Mpologoma
gauge=Namatala
gauge=Manafwa

[CrestParamSet eastAfrica]
wm_grid=params/wm_eastaf.tif
im_grid=params/im_eastaf.tif
fc_grid=params/fc_eastaf.tif
b_grid=params/b_eastaf.tif
gauge=Mpologoma
wm=1
b=1
im=0.005
ke=1
fc=1
iwu=50
gauge=Manafwa
wm=1
b=1
im=0.005
ke=1
fc=1
iwu=50

[kwparamset eastAfrica]
under_grid=params/fc_eastaf.tif
alpha_grid=params/alpha_kw_eastaf.tif
beta_grid=params/beta_kw_eastaf.tif
alpha0_grid=params/alpha0_eastaf.tif
gauge=Mpologoma
alpha=1
alpha0=1
beta=1

under=0.003
leaki=0.0001
th=40
isu=0
gauge=Manafwa
alpha=1
alpha0=1
beta=1
under=0.003
leaki=0.0001
th=40
isu=0
gauge=Namatala
alpha=1
alpha0=1
beta=1
under=0.003
leaki=0.0001
th=40
isu=0

[Task RunUganda]
STYLE=SIMU
MODEL=CREST
ROUTING=KW
BASIN=Uganda
PRECIP=IMERG
PET=CLIMO
OUTPUT=resultados_finales/Nueva_carpetas_1/
STATES=states/
PARAM_SET=eastAfrica
ROUTING_PARAM_Set=eastAfrica
TIMESTEP=30u
TIME_BEGIN=201403190000
TIME_END=201409190000

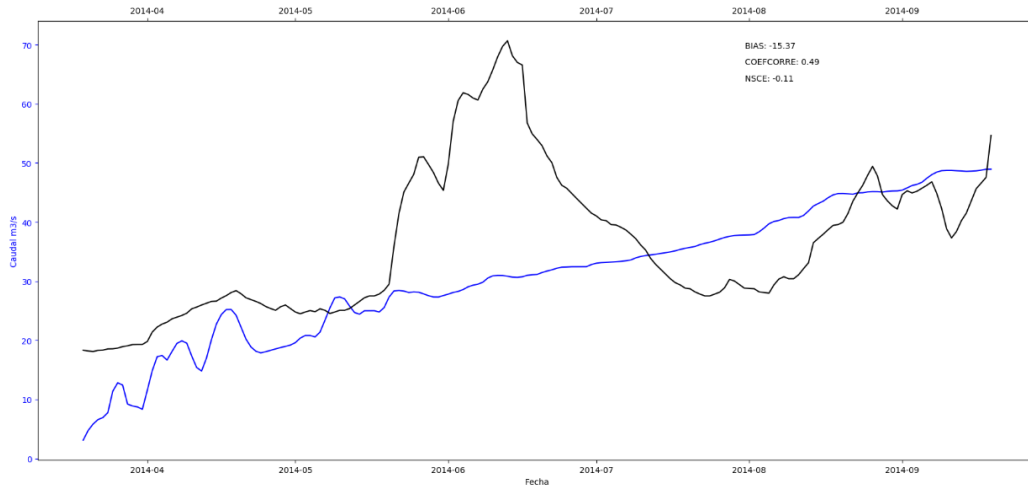
[Execute]
Task=RunUganda

```

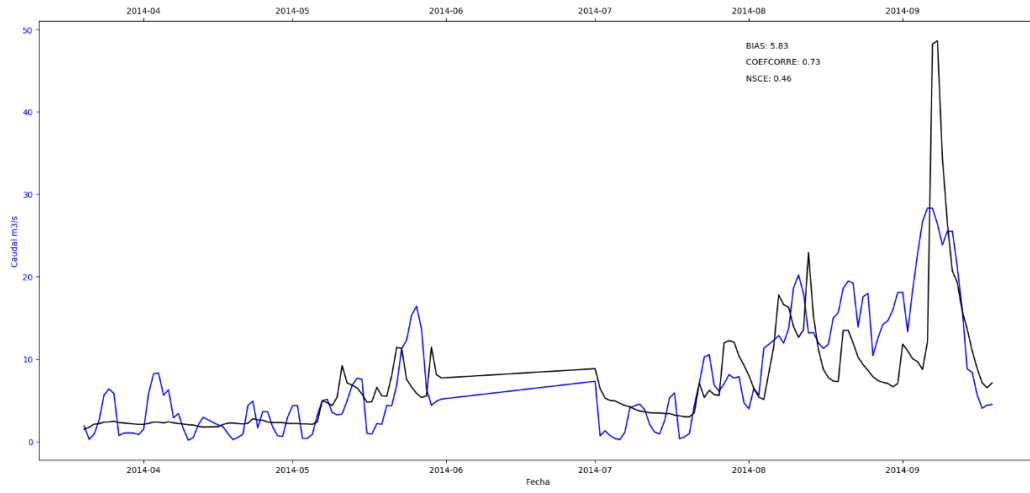
## Apéndice I. Iteraciones con EF5 más importantes durante el periodo de seis meses

ID	Cuenca	Parámetros CREST					Parámetros onda cinemática							Comparación			
		WM	B	IM	KE	FC	IWU	ALPHA	ALPHA0	BETA	LEAKI	UNDER	TH	ISU	BIAS	CC	NSCE
1	Mpologoma	5	1	0.005	1	1	25	1.5	1	2.5	0.0001	0.003	40	0	-15.37	0.49	-0.11
	Manafwa	1	1	0.005	1	1	25	1.5	1	2	0.0001	0.003	40	0	218.00	0.62	-10.00
	Namatala	1	20	0.8	0.001	0	25	1.5	0.5	2.3	0.0001	0.003	40	0	-47.77	0.23	-0.84
2	Mpologoma	10	0.5	0.1	1	1	25	1.5	0.5	2	0.0001	0.003	40	0	36.15	0.67	-1.07
	Manafwa	5	1	0.005	1	1	25	1.5	1	2.5	0.0001	0.003	40	0	23.12	0.65	0.12
	Namatala	1	20	0.8	0.001	0	25	1.5	0.5	2.5	0.0001	0.003	40	0	-49.17	0.23	-0.81
3	Mpologoma	10	0.5	0.1	1	1	25	1.5	0.5	2.1	0.0001	0.003	40	0	20.03	0.53	-0.39
	Manafwa	5	1	0.1	1	1	25	2	0.5	2.3	0.0001	0.003	40	0	42.00	0.63	-0.19
	Namatala	1	20	0.8	0.001	0	25	1.5	0.5	2.7	0.0001	0.003	40	0	-50.90	0.23	-0.78
4	Mpologoma	10	0.5	0.1		1	25	1.6	0.5	2.1	0.0001	0.003	40	0	18.43	0.50	-0.37
	Manafwa	5	1	0.1	1	1	25	2	0.5	2.5	0.0001	0.003	40	0	23.00	0.64	0.20
	Namatala	0.5	20	0.8	0.001	0	25	2	1.5	2.7	0.0001	0.003	40	0	-53.27	0.16	-0.83
5	Mpologoma	10	0.5	0.1		1	25	1	1.5	2.3	0.0001	0.003	40	0	19.56	0.44	-0.46
	Manafwa	10	0.5	0.1	1	1	25	1.5	0.5	2	0.0001	0.003	40	0	5.80	0.73	0.46
	Namatala	0.5	20	0.8	0.001	0	25	0.8	0.5	2.25	0.0001	0.003	40	0	-34.00	0.17	-1.16
6	Mpologoma	10	0.5	0.1		1	25	2	0.01	2	0.0001	0.003	40	0	20.46	0.59	-0.38
	Manafwa	10	0.5	0.1	0.5	1	25	1.5	0.5	2	0.0001	0.003	40	0	5.80	0.73	0.46
	Namatala	0.5	30	0.8	0.001	0	25	2	1.1	2.7	0.0001	0.003	40	0	-49.37	0.17	-0.76

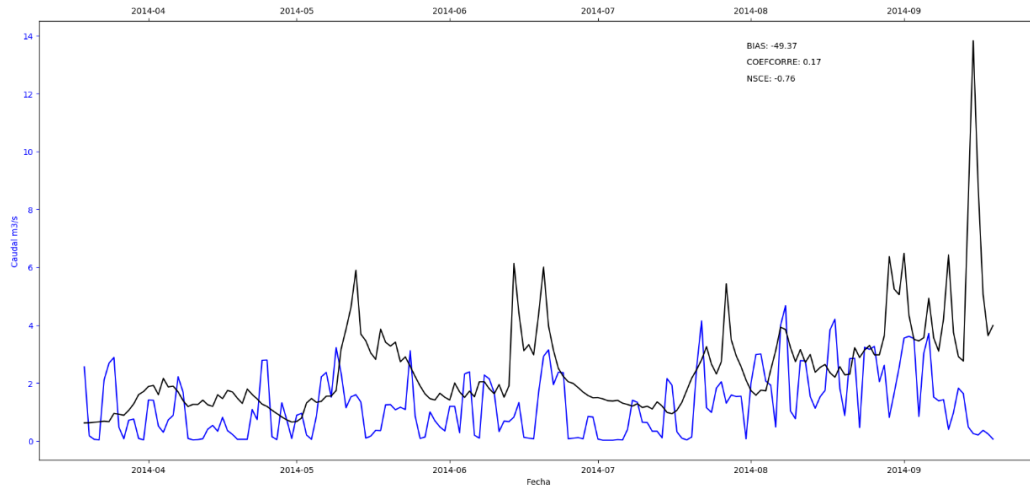
Apéndice J. Respuesta hidrológica para el periodo de seis meses en Mpologoma



Apéndice K. Respuesta hidrológica para el periodo de seis meses en Manafwa

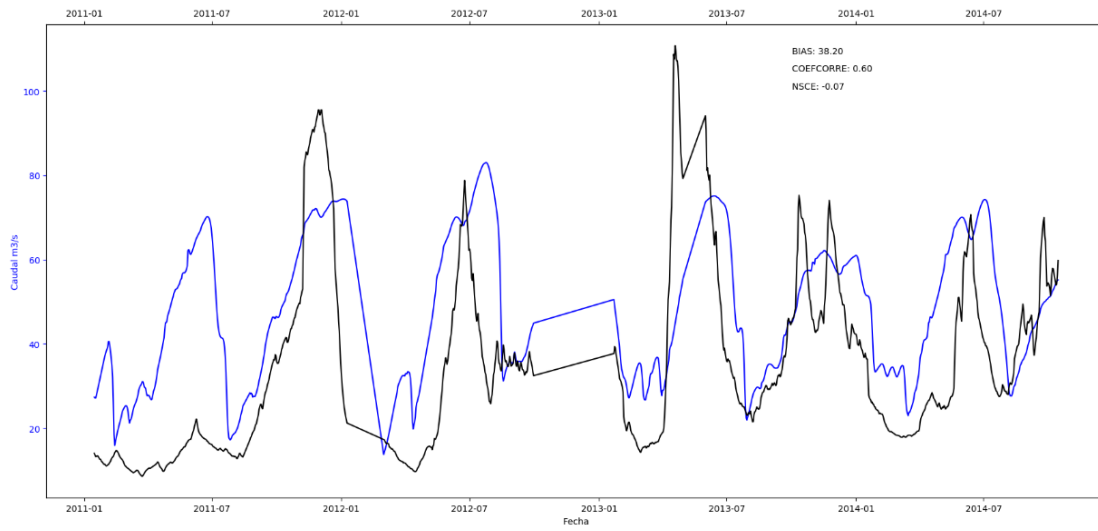


Apéndice L Respuesta hidrológica para el periodo de seis meses en Namatala

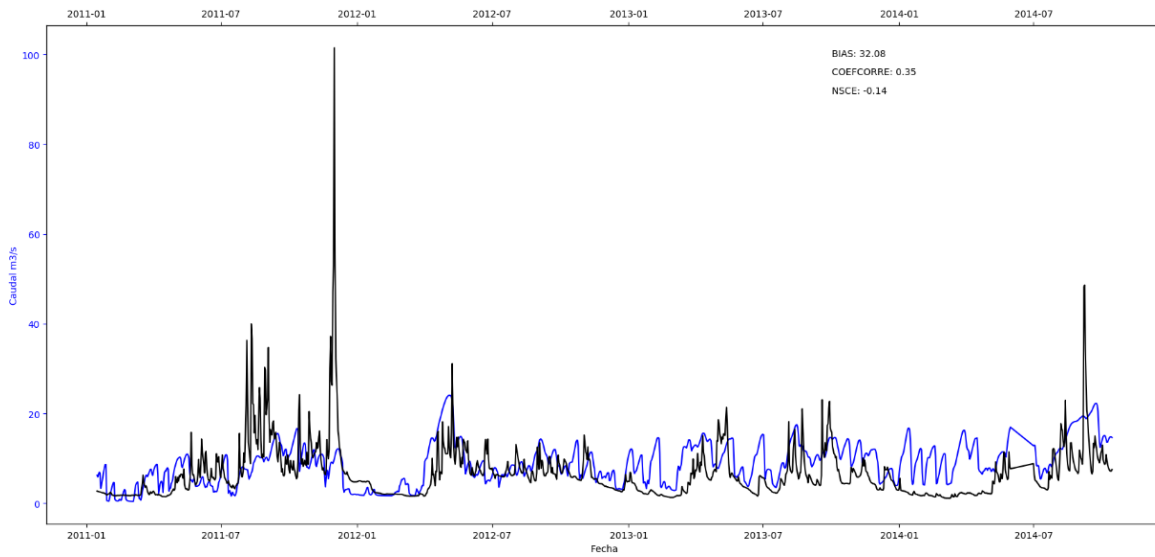


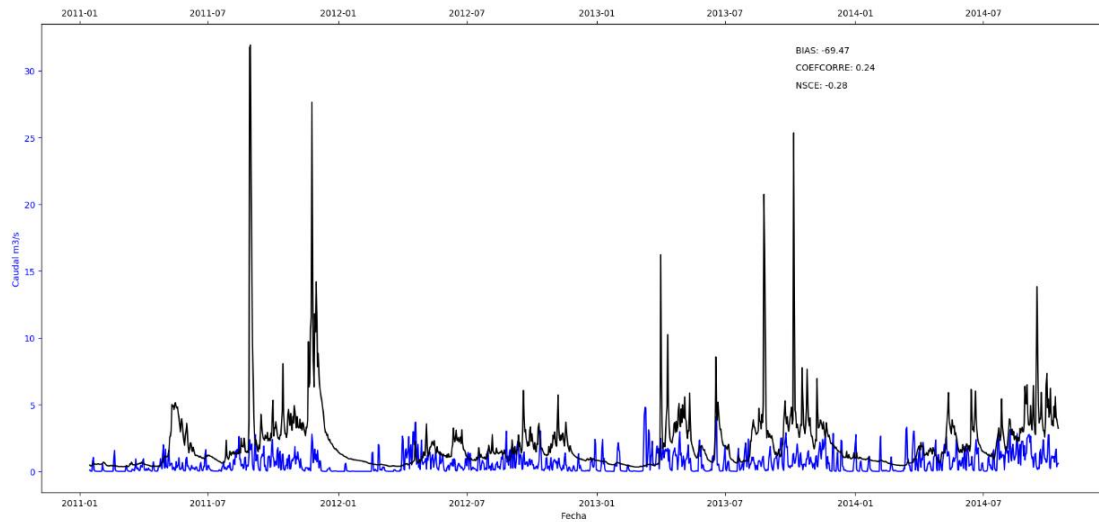
## Apéndice M Iteraciones con EF5 más importantes durante el periodo de calibración

ID	Cuenca	Parámetros CREST						Parámetros onda cinemática							Comparación		
		WM	B	IM	KE	FC	IWU	ALPHA	ALPHA0	BETA	LEAKI	UNDER	TH	ISU	BIAS	CC	NSCE
1	Mpologoma	50	0.5	0.1	1	1	25	1	0.5	1.8	0.01	0.003	40	0	303.42	0.53	-30.98
	Manafwa	10	0.5	0.1	1	1	25	1.5	0.5	2.5	0.0001	0.003	40	0	104.76	0.37	-2.04
	Namatata	5	20	0.5	0.001	0	25	2	0.5	2.5	0.01	0.003	40	0	-51.91	0.20	-0.24
2	Mpologoma	150	0.2	0.1	1	1	25	1.2	0.5	2	0.01	0.003	40	0	181.16	0.60	-9.61
	Manafwa	50	0.5	0.1	1	1	25	1	0.5	2	0.0001	0.003	40	0	92.84	0.34	-2.76
	Namatata	5	20	0.5	0.001	0	25	2.5	1	2.5	0.01	0.003	40	0	-58.43	0.21	-0.24
3	Mpologoma	250	0.1	0.1	1	1	25	1	1	2	0.01	0.003	40	0	122.77	0.61	-4.53
	Manafwa	100	0.5	0.1	1	1	25	2	1	2.3	0.01	0.003	40	0	76.82	0.39	-1.13
	Namatata	5	20	0.5	0.001	0	25	2.7	2	3	0.0001	0.0001	40	0	-70.99	0.22	-0.31
4	Mpologoma	250	0.1	0.1	1	50	25	2	1	2.1	0.01	0.003	40	0	30.49	0.48	-0.04
	Manafwa	100	0.5	0.1	1	1	25	3	1	2.3	0.01	0.003	40	0	73.38	0.38	-0.96
	Namatata	5	20	0.5	0.001	1	25	4	1.5	3	0.0001	0.0001	40	0	-69.47	0.24	-0.28
5	Mpologoma	250	0.1	0.1	1	50	25	2	0.7	2	0.1	0.003	40	0	83.61	0.56	-1.61
	Manafwa	100	0.5	0.1	1	1	25	3	1	2.3	0.1	0.003	40	0	103.42	0.39	-1.56
	Namatata	5	20	0.5	0.001	1	25	4	2	2.7	0.0001	0.0001	40	0	-71.81	0.23	-0.28
6	Mpologoma	250	0.1	0.1	1	25	25	2	1	2	0.01	0.003	40	0	38.20	0.60	-0.07
	Manafwa	100	0.5	0.1	1	10	25	2.5	1	2.3	0.01	0.003	40	0	32.08	0.35	-0.14
	Namatata	5	20	0.5	0.001	1	25	4	1.5	3	0.1	0.003	40	0	-69.47	0.24	-0.28
7	Mpologoma	250	0.1	0.1	1	20	25	1.8	0.7	2	0.01	0.003	40	0	41.25	0.61	-0.15
	Manafwa	100	0.5	0.1	1	10	25	2	1	2.3	0.01	0.003	40	0	33.23	0.35	-0.17
	Namatata	5	20	0.5	0.001	5	25	4	1.5	3	0.2	0.003	40	0	-81.61	0.14	-0.45
8	Mpologoma	250	0.1	0.1	1	15	25	2	0.7	2	0.01	0.0001	40	0	45.09	0.58	-0.27
	Manafwa	100	1.1	0.1	1	10	25	2	1	2.3	0.01	0.003	40	0	45.80	0.35	-0.34
	Namatata	5	30	0.8	0.001	1	25	3	2	2.5	0.4	1	40	0	-70.78	0.21	-0.32

**Apéndice N. Respuesta hidrológica de la calibración de Mpologoma (con archivos ráster)**

## Apéndice Ñ. Respuesta hidrológica de la calibración de Manafwa (con archivos ráster)



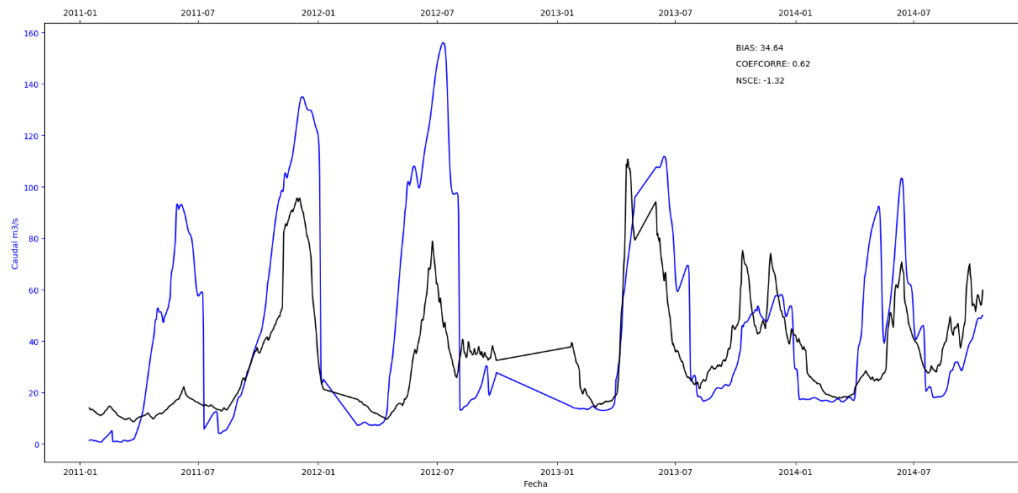
**Apéndice O. Respuesta hidrológica de la calibración de Namatala (con archivos ráster)**

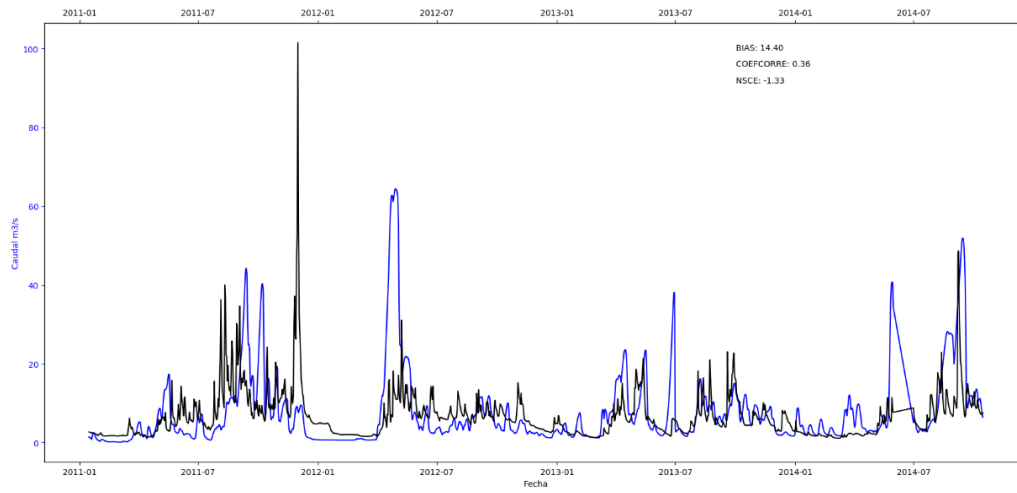
**Apéndice P. Iteraciones con EF5 más importantes para el periodo de calibración, sin archivos ráster para los parámetros.**

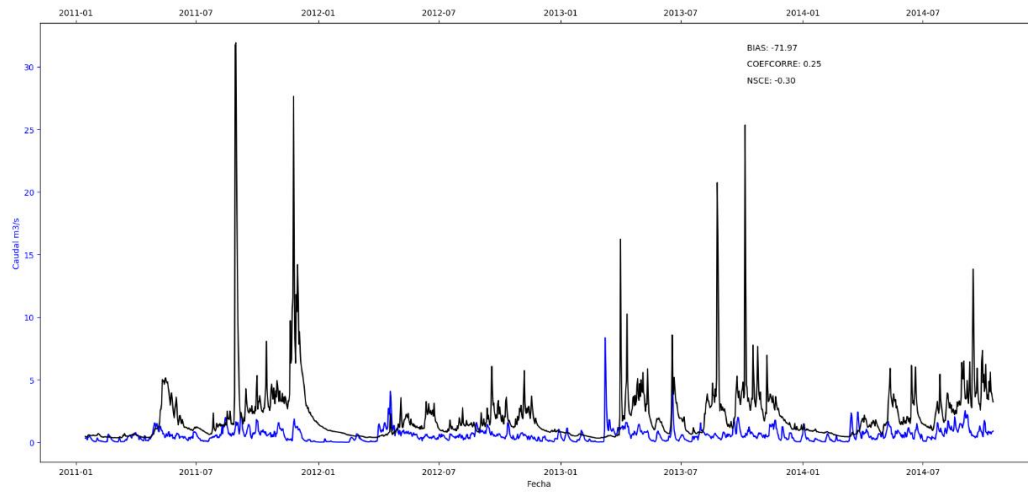
ID	Cuenca	Parámetros CREST						Parámetros onda cinemática							Comparación		
		WM	B	IM	KE	FC	IWU	ALPHA	ALPHA0	BETA	LEAKI	UNDER	TH	ISU	BIAS	CC	NSCE
1	Mpologoma	250	0.1	0.1	1	75	25	1.8	1.5	1.8	0.01	0.003	40	0	77.20	0.58	-2.64
	Manafwa	100	0.5	0.1	1	10	25	1.8	1.5	1.8	0.01	0.003	40	0	75.08	0.37	-1.96
	Namatala	5	20	0.5	0	1	25	1.8	1.5	1.8	0.01	0.003	40	0	-79.85	0.21	-0.40
2	Mpologoma	250	0.1	0.1	1	150	25	1.8	2	1.5	0.01	0.003	40	0	88.70	0.36	-7.13
	Manafwa	100	0.5	0.1	1	10	25	1.8	2.5	1.5	0.01	0.003	40	0	82.07	0.36	-2.99
	Namatala	5	20	0.5	0	1	25	3	5	1	0.01	0.0001	40	0	-83.90	0.19	-0.46
3	Mpologoma	250	0.1	0.1	1	150	25	2	2	1.5	0.01	0.0001	40	0	46.64	0.32	-5.89
	Manafwa	100	0.5	0.1	1	10	25	1.8	2.5	1.5	0.01	0.0001	40	0	33.93	0.37	-2.25
	Namatala	5	20	0.5	0	1	25	2	4	1	0.01	0.0001	40	0	-83.34	0.19	-0.45
4	Mpologoma	250	0.1	0.1	1	150	25	2	4	1.5	0.01	0.001	40	0	63.49	0.36	-6.03
	Manafwa	150	0.5	0.1	1	10	25	2	3.5	1.5	0.01	0.001	40	0	38.56	0.40	-1.49
	Namatala	5	20	0.5	0	1	25	2	3	1	0.01	0.001	40	0	-82.54	0.19	-0.44
5	Mpologoma	250	0.1	0.1	1	150	25	2.2	4	1.5	0.01	0.001	40	0	62.32	0.39	-5.60
	Manafwa	150	0.2	0.1	1	10	25	2	3.5	1.5	0.01	0.001	40	0	16.39	0.37	-1.60
	Namatala	5	20	0.5	0	1	25	2	3	1	1	0.001	40	0	-77.41	0.20	-0.38
6	Mpologoma	250	0.1	0.1	1	150	25	2.2	4	1.6	0.01	0.001	40	0	57.13	0.56	-3.47
	Manafwa	150	0.2	0.1	1	10	25	2.2	4	1.6	0.01	0.001	40	0	14.40	0.36	-1.33
	Namatala	5	20	0.5	0	1	25	2	3	1	1	1	40	0	-72.23	0.25	-0.30
7	Mpologoma	350	0.01	0.1	1	200	25	2.2	4	1.6	0.01	0.001	40	0	17.85	0.54	-2.36
	Manafwa	150	0.2	0.1	1	10	25	2	4	1.5	0.01	0.001	40	0	16.09	0.37	-1.55
	Namatala	2	25	0.8	0	1	25	2	3	1	1	3	40	0	-71.97	0.25	-0.30
8	Mpologoma	350	0.01	0	1	200	25	2.4	4	1.7	0.01	0.003	40	0	34.64	0.62	-1.32
	Manafwa	150	0.2	0.1	1	10	25	2	4	1.4	0.01	0.003	40	0	40.79	0.35	-2.06
	Namatala	2	25	0.8	0	1	25	2	3	1.4	1	3	40	0	-71.92	0.25	-0.30

## Apéndice Q. Resumen de la calibración para las tres cuencas sin archivos ráster

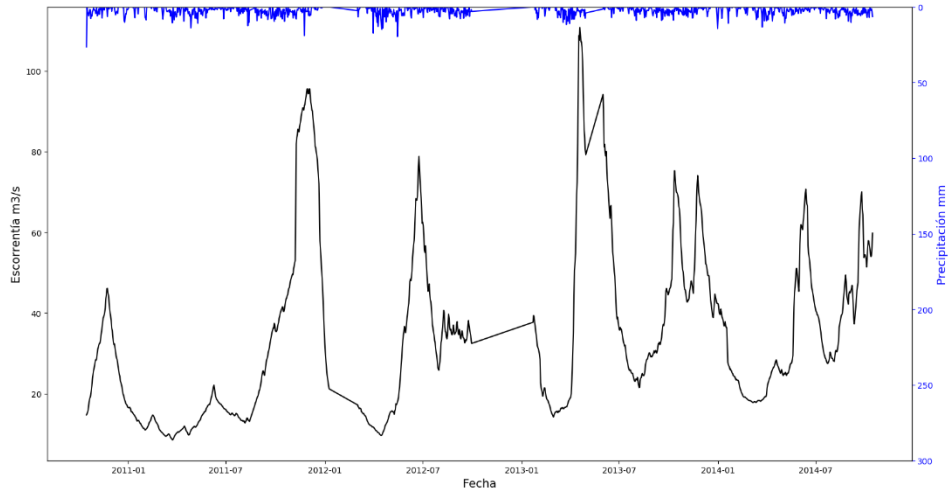
Mpologoma				Manafwa				Namatala			
Balance hídrico		Onda Cinemática		Balance hídrico		Onda Cinemática		Balance hídrico		Onda Cinemática	
WM	350	ALPHA	2.4	WM	150	ALPHA	2.2	WM	2	ALPHA	2
B	0.01	ALPHA0	4	B	0.2	ALPHA0	4	B	25	ALPHA0	3
IM	0	BETA	1.7	IM	0.1	BETA	1.6	IM	0.8	BETA	1
KE	1	LEAKI	0.01	KE	1	LEAKI	0.01	KE	0.001	LEAKI	1
FC	200	UNDER	0.003	FC	10	UNDER	0.001	FC	1	UNDER	3
IWU	25	TH	40	IWU	25	TH	40	IWU	25	TH	40
		ISU	0			ISU	0			ISU	0

**Apéndice R. Respuesta hidrológica de la calibración de Mpologoma (sin archivos ráster)**

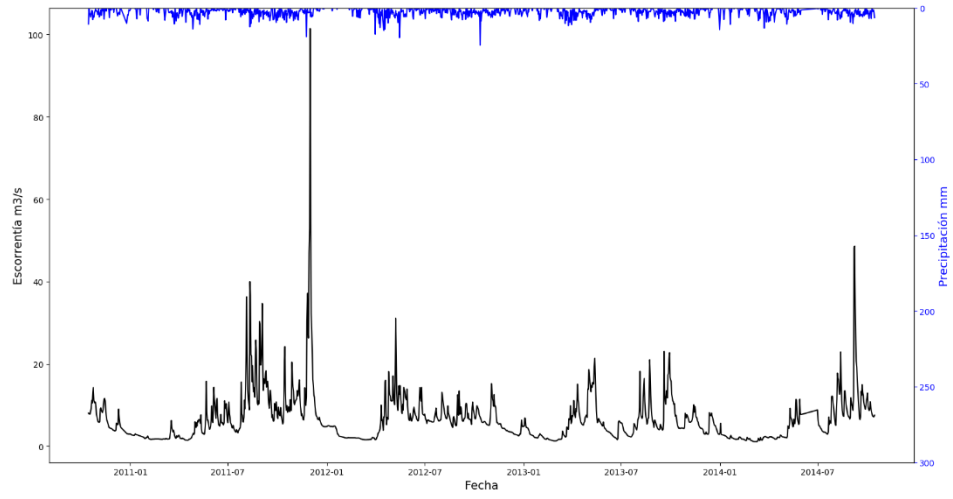
**Apéndice S. Respuesta hidrológica de la calibración de Manafwa (sin archivos ráster)**

**Apéndice T. Respuesta hidrológica de la calibración de Namatala (sin archivos ráster)**

Apéndice U. Hietograma e hidrograma de Mpologoma



Apéndice V. Hietograma e hidrograma de Manafwa



**Apéndice W. Hietograma e hidrograma de Namatala**

