EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE PRONÓSTICO DEL SISTEMA DE GUÍA DE CRECIDAS REPENTINAS DEL NORESTE DE SUDAMÉRICA (NWSAFFGS) PARA UNA SUBZONA HIDROGRÁFICA PRIORIZADA EN COLOMBIA

ANA MARÍA SASTOQUE BARRETO

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C., COLOMBIA
2024

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE PRONÓSTICO DEL SISTEMA DE GUÍA DE CRECIDAS REPENTINAS DEL NORESTE DE SUDAMÉRICA (NWSAFFGS) PARA UNA SUBZONA HIDROGRÁFICA PRIORIZADA EN COLOMBIA

Ana María Sastoque Barreto
Cod. 20191180040

Trabajo de grado presentado en la modalidad de pasantía como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniera Ambiental

Director Interno
M.Sc. Néstor Ricardo Bernal Suárez
Docente Ingeniería Ambiental
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Director Externo
M.Sc. Gabriel de Jesús Saldarriaga Orozco
Grupo de Modelación y Pronósticos Hidrológicos
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C., COLOMBIA
2024

A mis padres, mi hermano y mis abuelos, cuyo amor y apoyo incondicional me han permitido alcanzar este logro.

Agradecimientos

Este trabajo de grado se realizó con la valiosa colaboración del docente Néstor Ricardo Bernal (UDFJC) y el profesional Gabriel de Jesús Saldarriaga (IDEAM), a quienes deseo expresar mi profundo agradecimiento por su paciencia, asesoría y apoyo durante el desarrollo de esta investigación.

Agradezco a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (UDFJC) y al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) por darme la oportunidad de realizar este trabajo de grado en modalidad de pasantía.

Finalmente, pero no menos importante, agradezco a todos mis compañeros del IDEAM, especialmente a Albeiro Figueroa, Julián Urrego y Franklin Ruíz, quienes me proporcionaron recursos, sugerencias y comentarios esenciales para la culminación exitosa de este trabajo de grado.

RESUMEN

Las inundaciones y las crecidas repentinas son fenómenos naturales recurrentes y devastadores que causan significativas pérdidas económicas y ponen en riesgo la vida y el bienestar de las comunidades afectadas, así como la integridad de los ecosistemas fluviales. La capacidad de prever con precisión estos eventos es crucial para la gestión del riesgo y la planificación del desarrollo urbano y rural. Esta tesis se enfoca en la verificación del sistema NWSAFFGS para la predicción de crecidas repentinas en una subzona hidrográfica, esto mediante la verificación de tres productos: la precipitación areal media pronosticada (FMAP), la humedad promedio del suelo (ASM) y los valores de referencia de crecida repentina (FFG). La verificación se realiza utilizando análisis estadísticos como la correlación de Spearman, la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y el sesgo (BIAS), además del uso de tablas de contingencia. En relación con el desempeño del sistema, aunque este detecta los patrones temporales de precipitación, sobreestima los eventos extremos; frente al desempeño temporal presenta un mejor desempeño general en las épocas secas y de transición. Con relación con el ordenamiento territorial, la emisión de alertas por crecidas repentinas se encuentra vinculada con la gestión del riesgo durante la etapa de formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), incorporando el enfoque de la amenaza vinculada al elemento expuesto. Finalmente, la verificación del sistema NWSAFFGS muestra que, aunque tiene potencial, se requiere mejorar su precisión en la predicción de eventos extremos; esto contribuirá significativamente a la reducción del riesgo asociado a crecidas repentinas, mejorando la planificación y la toma de decisiones en la gestión del riesgo en las comunidades vulnerables.

ABSTRACT

Floods and flash floods are recurrent and devastating natural phenomena that cause significant economic losses and threaten the lives and well-being of affected communities, as well as the integrity of river ecosystems. The ability to accurately predict these events is crucial for risk management and urban and rural development planning. This thesis focuses on the verification of the NWSAFFGS system for the prediction of flash floods and floods in a hydrographic subzone, this by verifying three products: the predicted average areal precipitation (FMAP), the average soil moisture (ASM) and flash flood reference values (FFG). Verification is performed using statistical analysis such as Spearman correlation, Root Mean Square Error (RMSE) and bias (BIAS), in addition to the use of contingency tables. In relation to the performance of the system, although it detects the temporary patterns of precipitation, it overestimates the extreme events; compared to the temporal performance it presents a better overall performance in the dry and transition periods. With relation to land management, the issuance of alerts for flash floods is linked with the management of risk during the formulation of Watershed Management and Management Plans (POMCA), incorporating the threat approach linked to the exposed element. Finally, verification of the NWSAFFGS system shows that, although it has potential, its accuracy in predicting extreme events needs to be improved; this will contribute significantly to reducing the risk associated with floods and flash floods, improving planning and decision-making in risk management in vulnerable communities

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 1

2. ANTECEDENTES 1

3. JUSTIFICACIÓN 2

4. OBJETIVOS 4

4.1. Objetivo General 4

4.2. Objetivos Específicos 4

5. MARCO TEÓRICO 4

5.1. Inundaciones 4

5.1.1. Clasificación de Inundaciones 5

5.1.2. Procesos que influyen en la ocurrencia de inundaciones 6

5.2. Sistema Guía de Crecidas Repentinas (FFGS) 6

5.2.1. Países implementados 7

5.2.2. Sistema Guía de Crecidas Repentinas del Noreste de Suramérica 8

5.2.3. Productos FFGS 9

5.3. Sistemas de Alerta Temprana (SAT) 9

5.4. Verificación del Pronóstico 10

5.4.1. Método Visual 10

5.4.2. Método para Variables Continuas 10

5.4.3. Método para Eventos Categóricos 11

5.5. Gestión del Riesgo 13

6. METODOLOGÍA 16

6.1. Área de Estudio 16

6.1.1. Régimen de Precipitación 19

6.2. FASE 1: Priorización de Subzona Hidrográfica (SZH) 21

6.2.1. Registros de eventos de atención a emergencias (UNGRD) 21

6.2.2. Priorización de municipios y Subzona Hidrográfica (SZH) 21

6.3. FASE 2: Recopilación información hidroclimática 22

6.3.1. Centro de Investigaciones Hidrológicas (HRC) 22

6.3.2. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) 24

6.3.3. Definición de cuencas de FFGS a evaluar 28

6.4. FASE 3: Metodología de verificación 29

6.4.1. Precipitación media areal pronosticada (FMAP) 29

6.4.2. Humedad Promedio del Suelo (ASM) 31

6.4.3. Guía de Crecida Repentina (FFG) 33
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 34
7.1. Homogeneización de series de tiempo de precipitación y estimación de datos faltantes..... 34
7.2. Verificación de la Precipitación media areal pronosticada (FMAP) 36
7.2.1. Método Visual 36
7.2.2 Verificación por Variables Continuas..... 39
7.2.3 Verificación por Tablas de Contingencia 42
7.3. Verificación del producto Humedad Promedio del Suelo (ASM) 45
7.3.1. Método Visual 45
7.3.2. Correlación de Spearman 46
7.4. Verificación del producto de Guía de Crecida Repentina (FFG) 48
7.4.1. Método visual..... 48
7.4.2. Tablas de Contingencia..... 49
7.5. Resultados con relación al ordenamiento del territorio..... 50
8. CONCLUSIONES 52
9. RECOMENDACIONES..... 54
10. BIBLIOGRAFÍA 54

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Correlación de Spearman
Ecuación 2. Mean Error (BIAS)
Ecuación 3. Error cuadrático medio (MSE)
Ecuación 4. Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

Abreviatura	Término
ASM	Humedad promedio del suelo
BIAS	Sesgo de Pronóstico
CAWCR	Colaboración para la investigación meteorológica y climática de Australia
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres - México
CORMACARENA	Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial La Macarena
CSI / TS	Índice crítico de aciertos
FAR	Tasa de falsas alarmas
FFG	Guía de crecida repentina
FFGS	Sistema guía de crecidas repentinas
FMAP	Precipitación media areal pronosticada
HRC	Centro de Investigaciones Hidrológicas
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IDIGER	Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
GHE	Hidro estimador Global
MWGHE	Precipitación satelital GHE ajustada por microondas
NOAA	Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica

NOAA - CPC	Centro de predicción del clima
NOAA - CMORPH	Técnica de transformación MORPH
NOAA - NESDIS	Servicio Nacional de Satélites Ambientales, Datos, e Información
NWSAFFGS	Sistema guía de crecidas repentinas para el noreste de Sudamérica.
OMM	Organización Meteorológica Mundial
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PoD	Probabilidad de detección
RMSE	Raíz del error cuadrático medio
SMHN	Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales
SZH	Subzona Hidrográfica
UNGRD	Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres

GLOSARIO

En este trabajo, se toman como referencia los términos de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo tal como los define la Ley 1523 de 2012 (Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres) y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) en colaboración con la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) para el año 2018.

- **Amenaza:**
  De acuerdo con la Ley 1523 de 2012: Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales

  De acuerdo con la CAR, *et al.* (2018): Condición en la que un territorio, sistema socioeconómico o comunidad es susceptible de ser afectado por un fenómeno externo extremo (meteorológico, hidrológico, hidroclimático) con potencialidad de causar desastre; generalmente se mide en términos de probabilidad en las categorías cualitativas: baja, media, alta.

- **Vulnerabilidad:**
  De acuerdo con la Ley 1523 de 2012: Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir

efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligroso.

De acuerdo con la CAR, *et al.* (2018): Característica de un sistema o elemento del sistema que demuestra su capacidad para sobrellevar y recuperarse del impacto de una acción externa. Para la acción de fenómenos extremos (meteorológicos o hidroclimáticos extremos), la vulnerabilidad es el balance de las características intrínsecas del sistema como su sensibilidad y su resiliencia.

- **Riesgo de desastres:**
  De acuerdo con la Ley 1523 de 2012: Corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad.

  De acuerdo con la CAR, *et al.* (2018): Posible impacto negativo causado por un evento extremo que ocurre en la cuenca/ territorio

- **Gestión del riesgo:** Hace referencia al proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones para el conocimiento del riesgo y la promoción de una mayor conciencia del riesgo, con el fin de prevenir o evitar que se genere, de mitigarlo y controlarlo cuando ya existe, y para la posterior recuperación. (Velásquez W.I, *et al*, 2021)

- **Avenida Torrencial:** Crecidas repentinas producto de fuertes precipitaciones que causan aumentos rápidos del nivel de agua de los ríos y quebradas de alta pendiente. Estas crecientes pueden ser acompañadas por flujo de sedimentos de acuerdo con las condiciones de la cuenca (IDIGER, 2023)

- **Crecida repentina:** Crecida de corta duración y poco tiempo de respuesta, con un caudal máximo relativamente elevado (Ministerio del Medio Ambiente de Ecuador, s.f.).

- **Inundaciones**: Fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente (IDEAM, s.f.).

- **Estimador Hidrológico Mundial (Global Hydro-Estimator)**: Este es un producto del Servicio Nacional de Satélites, Datos e Información sobre el Medio Ambiente (NESDIS) de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) que ofrece acumulados horarios de precipitación (en mm) con una resolución de 4 × 4 km en el ecuador. Los productos de salida proporcionan acumulaciones en la resolución referida de 1 hora, 3 horas, 6 horas y 24 horas de estimaciones de lluvia

basadas en satélites (mm) que terminan en la hora actual de NOAA-NESDIS Hidroestimador (OMM,2022).

- **Precipitación satelital GHE ajustada por microondas (MWGHE):** Los productos de salida proporcionan acumulaciones cuadriculadas de 1 hora, 3 horas, 6 horas y 24 horas de estimaciones de lluvia basadas en satélites (mm) que terminan en la hora actual de NOAA-NESDIS Global Hydro-Estimator (basado en infrarrojos) y ajustado por NOAA-CPC CMORPH; es decir, es el producto de precipitación generado por hidroestimador y ajustado por microondas. Las estimaciones de lluvia basadas en satélites se proporcionan en una cuadrícula que se muestra sobre un fondo de los límites de la subcuenca del sistema (OMM, 2022).

- **Precipitación de área media manométrica (GMAP):** Este producto resulta de la interpolación de las observaciones de pluviométros de estaciones activas, a las estaciones que no informaron alguna observación se les asigna un valor de cero, este producto es derivado para todas las subcuencas a partir de las observaciones interpoladas de la estación (OMM, 2022).

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones y las crecidas repentinas constituyen fenómenos naturales devastadores y recurrentes en muchas regiones del mundo. Estos eventos catastróficos no solo provocan pérdidas económicas significativas, sino que también ponen en riesgo la vida y el bienestar de las comunidades afectadas, así como la integridad de los ecosistemas fluviales. En este contexto, la capacidad de prever con precisión la ocurrencia y la magnitud de las inundaciones y crecidas repentinas se ha convertido en un aspecto crucial de la gestión del riesgo y la planificación del desarrollo urbano y rural.

La utilización de sistemas de pronóstico hidrológico ha demostrado ser una herramienta valiosa para anticipar y mitigar los impactos de estos eventos extremos. Sin embargo, la eficacia de estos sistemas depende en gran medida de su precisión y fiabilidad en la predicción de eventos extremos. Por lo tanto, la verificación de estos sistemas, como el propuesto por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) con cobertura regional en Colombia, Ecuador y Perú, resulta fundamental para garantizar su utilidad en la toma de decisiones.

En este contexto, la presente tesis se centra en la verificación de un sistema de predicción de crecidas repentinas e inundaciones, específicamente el sistema NWSAFFGS, en una subzona hidrográfica priorizada en Colombia. El objetivo principal del documento es evaluar la capacidad de pronóstico del sistema mediante la verificación de tres productos generados por el mismo: Precipitación areal media pronosticada (FMAP, por sus siglas en inglés), humedad promedio del suelo (ASM, por sus siglas en inglés) y valores de referencia de crecida repentina (FFG, por sus siglas en inglés).

Para llevar a cabo esta tesis, se realizará una descripción de los elementos clave en el marco de las inundaciones y crecidas repentinas, así como de los métodos de verificación utilizados en el pronóstico y su relación con el ordenamiento del territorio. Luego se presentará el área de estudio y la metodología de verificación de cada producto y posteriormente, los resultados y análisis correspondientes. Durante la verificación, una de las limitaciones encontradas fue la disponibilidad de información hidrometeorológica en la subzona hidrográfica de estudio.

Se emplearán análisis estadísticos que incluirán la creación de gráficos, el cálculo de la correlación de Spearman, medidas estadísticas como la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE, por sus siglas en inglés), y el sesgo (BIAS, por su nombre en inglés), adicional al cálculo de las tablas de contingencia. Se espera que estos resultados contribuyan a mejorar la precisión en la predicción de estos eventos hidrometeorológicos extremos y, por ende, a reducir el riesgo asociado a los mismos.

2. ANTECEDENTES

La validación y verificación de pronósticos meteorológicos surgieron de los primeros esfuerzos por predecir el clima de forma sistemática y científica y la necesidad de los pronosticadores de mejorar la precisión de sus predicciones. Asimismo, los pronósticos hidrológicos tomaron relevancia al ser necesarios para anticipar el comportamiento de eventos extremos, como las inundaciones y las sequías. Hoy en día, la verificación de

pronósticos hidrológicos es una parte integral de la gestión del agua y la prevención de desastres naturales; ayuda a los hidrólogos y gestores del agua a evaluar la confiabilidad de los pronósticos y a tomar decisiones informadas sobre la gestión de los recursos hídricos y la preparación para eventos extremos.

Con relación a la preparación ante la ocurrencia de eventos extremos, Colombia cuenta con FEWS; un sistema de pronósticos hidrológicos y alertas tempranas. El sistema está basado en el software Delf-FEWS desarrollado por Deltares (Instituto de Investigación Holandés) y donado al IDEAM como parte de una Cooperación Internacional entre Los Países Bajos y Colombia. Mediante esta plataforma, el IDEAM gestiona los procesos de pronóstico hidrológico (modelación hidrológica, hidráulica y estadística) e integra los datos de series de tiempo de diferentes fuentes y formatos provenientes del IDEAM y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y de Cundinamarca (CAR). Desde el 2014 a la fecha se han acoplado alrededor de 20 sistemas, entre hidráulicos, hidrológicos y estadísticos. Estos sistemas proveen el pronóstico hidrológico en más de 90 puntos de monitoreo del IDEAM, CAR y CVC con un horizonte de pronóstico de 3 días (IDEAM, s.f.).

Además del sistema FEWS, el IDEAM trabaja en la implementación de sistemas que no requieran de la presencia de estaciones hidrometeorológicas para la generación de alertas hidrológicas, especialmente en zonas como la Amazonía. Para ello, uno de los sistemas estudiados corresponde a GEO GLOWS[1]; un sistema de pronóstico de caudal y niveles; el pronóstico de 15 días del sistema apoya a la oficina pronósticos y alertas del IDEAM (OSPA) para la generación del Boletín Hidrológico diario, brindando orientación sobre si se deben mantener o reducir algunos niveles de alerta para los próximos días.

Esta tesis aborda la validación del Sistema de Guía de Crecidas Repentinas (FFGS, por su sigla en inglés); en este contexto, los diferentes centros regionales han realizado procesos de validación de diversos productos, uno de los más recientes es el proceso de validación de los avisos de deslizamientos de tierra para el CAFFGS (Sistema FFGS para América Central) en el año 2023 (OMM, 2023).

La validación del sistema FFGS permite avanzar hacia una futura implementación del sistema como apoyo en la toma de decisiones en la oficina de pronósticos y alertas del IDEAM, mejorando la calidad y exactitud de las alertas.

3. JUSTIFICACIÓN

Las crecidas repentinas se encuentran entre los desastres de origen natural con mayor importancia en el mundo, con más de 5.000 vidas perdidas anualmente, sus impactos sociales, económicos y ambientales son significativos; presentan la tasa de mortalidad más alta entre las diferentes clases de inundaciones, incluidas las fluviales y costeras (OMM, 2019). A nivel mundial es posible destacar una grave inundación ocurrida en el 2021, que afectó varios países europeos como Bélgica, Alemania, Luxemburgo y los Países Bajos y en la que más de cien personas murieron (Noticias ONU, 2021), asimismo, en Colombia, por

[1] GEOGLOWS es la iniciativa del Grupo de Observaciones de la Tierra (GEO) dedicada a la sostenibilidad hídrica global que encabeza los avances en la ciencia hidrológica, con un equipo dedicado al desarrollo e implementación de sistemas abiertos de predicción del agua.

ejemplo, en la primera temporada de lluvias del 2022, se registraron 5.177 familias damnificadas y 28 víctimas por eventos de inundación (Periódico El Tiempo, 2022).

Para abordar los problemas asociados con las crecidas repentinas, especialmente la falta de capacidad para desarrollar alertas efectivas de crecidas repentinas, el Sistema de Guía de Crecidas Repentinas (FFGS) fue diseñado y desarrollado para uso interactivo por pronosticadores de meteorología e hidrología en todo el mundo. Este sistema es necesario para proporcionar a los pronosticadores productos de orientación informativos en tiempo real relacionados con la amenaza de inundaciones repentinas a pequeña escala (OMM, 2019).

Asimismo, el Sistema Guía de Crecidas Repentinas ha sido estudiado ampliamente a nivel mundial, sin embargo, para Colombia, es necesario profundizar en la verificación de sus productos, lo que permite brindar medidas de exactitud y detección de deficiencias, mejorando así la calidad de los pronósticos hidrológicos para alertas tempranas a nivel nacional. Lo anterior teniendo en cuenta que las crecidas repentinas se caracterizan por un tiempo de respuesta muy corto, por lo que mejoras en el pronóstico contribuyen a la mitigación del riesgo de desastres.

En relación con la verificación, estas actividades son útiles solo si llevan a tomar decisiones con respecto al producto que está siendo verificado. En otras palabras, es importante analizar los resultados de la verificación y tomar una decisión con base en estos resultados. Los propósitos de la verificación pueden ser clasificados en dos tipos generales (Ruiz *et al.*, 2014)

- Verificación administrativa: para apoyar las decisiones sobre la administración de los servicios de previsión del tiempo, por ejemplo, para justificar un nuevo equipo, esta verificación, usualmente, significa calcular estadísticas de verificación con muestras de datos de gran tamaño.
- Verificación científica: para dirigir investigación en nuevos o productos mejorados, esto puede implicar muestras de datos grandes o pequeños dependiendo de la finalidad, y por lo general implica el análisis estadístico más exploratorio que el de la verificación administrativa.

El objetivo de este estudio es la verificación científica ya que pretende con los resultados logrados de validación del producto FFGS, aportar elementos para mejorar el sistema y sus productos.

En el contexto de la Ingeniería Ambiental, el pronóstico de crecidas repentinas se encuentra estrechamente relacionado con el ordenamiento del territorio, el cual proporciona un marco para la planificación y gestión del uso del suelo, y puede ayudar a mitigar los riesgos de desastres naturales a la población y actividades económicas, al considerar factores geográficos, hidrológicos y ambientales. El conocimiento de las crecidas repentinas en una región es importante para la construcción de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) y se constituye como una medida no estructurante en la reducción del riesgo (UNGRD, 2020).

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Evaluar la capacidad de pronóstico del Sistema de Guía de Crecidas Repentinas para una subzona hidrográfica del país.

4.2. Objetivos Específicos

- Realizar la priorización de la subzona hidrográfica incluyendo criterios relacionados con eventos de inundación.

- Realizar una verificación de 3 productos generados por el Sistema de Guía de Crecidas Repentinas.

- Analizar los eventos de crecidas repentinas a escala municipal teniendo en cuenta los datos de la Unidad Nacional para la Gestión de Riesgo de Desastres (UNGRD) en el marco del ordenamiento territorial.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Inundaciones

Alrededor de las inundaciones se han acuñado varias definiciones, entre ellas se encuentra la definición brindada en el glosario internacional de hidrología de la Organización Meteorológica Mundial -OMM (2012) que la define como el aumento del agua por arriba del nivel normal del cauce; en este caso, “nivel normal” se debe entender como aquella elevación de la superficie del agua que no causa daños, es decir, es una elevación mayor a la habitual en el cauce, por lo que puede generar pérdidas (CENAPRED, 2004). Similar a la definición anterior, el IDEAM (s.f.) define a las inundaciones como fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente. Se producen por lluvias persistentes y generalizadas que generan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas.

Figura 1

Crecida Repentina en el municipio de Quetamé (2023)

Fuente: Infobae, 2023

5.1.1. Clasificación de Inundaciones

Las inundaciones pueden clasificarse según su origen, o bien, al tiempo en que tardan en presentarse sus efectos. A continuación, se presenta la clasificación de las inundaciones con relación al origen (CENAPRED, 2004).

En primer lugar, se encuentran las inundaciones fluviales, las cuales ocurren cuando el volumen de agua superficial excede la capacidad de los canales naturales o artificiales para transportar el flujo. El exceso de agua desborda las orillas del curso de agua y se desborda en áreas adyacentes. A diferencia de la inundación fluvial, la inundación pluvial es causada por la lluvia que no se infiltra en el suelo y fluye sobre la superficie o a través de áreas urbanas antes de que llegue a los sistemas de drenaje o cursos de agua.

Asimismo, la inundación costera surge de la incursión del agua de mar; esta se diferencia de las mareas altas cíclicas en que resultan de un aumento relativo inesperado en el nivel del mar, causado por tormentas o un tsunami. Por último, las fallas en los sistemas de drenaje en los entornos artificiales pueden causar inundaciones, algunos ejemplos incluyen fallas en el sistema de bombeo, en tuberías, presas o diques.

Por otra parte, en relación con el tiempo de respuesta en la cuenca se encuentran dos clasificaciones: Inundaciones lentas e inundaciones súbitas. Es importante mencionar que el enfoque principal de este trabajo recae en las inundaciones súbitas (crecidas repentinas), debido a que el sistema evalúa la amenaza para esta condición.

De acuerdo con el Centro Nacional de Prevención de Desastres - CENAPRED (2004) las inundaciones lentas ocurren cuando una precipitación previa es capaz de saturar el terreno y el volumen remanente escurre por los ríos o sobre el terreno. Conforme el escurrimiento avanza hacia la salida de la cuenca, se incrementa proporcionalmente con el área drenada; si el volumen que fluye por el cauce excede la capacidad de éste, se presentan desbordamientos sobre sus márgenes y el agua desalojada puede permanecer horas o días sobre el terreno inundado.

Por el contrario, las inundaciones repentinas ocurren cuando lluvias repentinas e intensas ocurren en un área específica (escalas espaciales cortas). Estas pueden ocasionar que pequeñas corrientes se transformen, en cuestión de minutos, en violentos torrentes capaces de causar grandes daños, lo que implica poco tiempo de anticipación y suele estar asociado con una alta tasa de mortalidad.

Adicionalmente, existen eventos relacionados con la ocurrencia de las crecidas repentinas, entre ellos, se encuentran las avenidas torrenciales, las cuales son eventos de estudio en la presente tesis, estas son definidas como crecidas repentinas producto de fuertes precipitaciones que causan aumentos rápidos del nivel de agua de los ríos y quebradas de alta pendiente; estas crecientes pueden ser acompañadas por flujo de sedimentos de acuerdo con las condiciones de la cuenca (IDIGER, 2023).

5.1.2. Procesos que influyen en la ocurrencia de inundaciones

La ocurrencia de inundaciones puede verse influenciada por una serie de factores inherentes a cada región. En el caso de Colombia, esta se caracteriza por sus tres cordilleras y áreas de planicie inundable; al estar ubicada en el trópico presenta un ciclo hidrológico dinámico, relacionado con su ubicación en la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) y los procesos que ocurren en los océanos Pacifico, Atlántico y el mar Caribe, que ocasionan variaciones en la distribución espacio-temporal de la precipitación, temperatura y de otras variables climatológicas, que a su vez tienen influencia en el ciclo hidrológico. (Sedano, *et al*., 2013).

Además del factor geomorfológico e hidrológico de las cuencas, las actividades antrópicas pueden influir en la frecuencia y magnitud en los eventos de inundación; un ejemplo de ello es el deterioro de la cobertura vegetal en las zonas altas y medias de las cuencas, pues las propiedades del suelo y las condiciones de saturación previas a una precipitación son factores determinantes en la producción de la escorrentía posterior a una lluvia. Por lo tanto, la deforestación, la impermeabilización, la desecación de humedales y la expansión de la agricultura son factores que aumentan el riesgo de inundaciones, porque contribuyen al aumento de la escorrentía en los ríos, al depósito de sedimentos en los cauces y a la desestabilización de suelos saturados, que pueden generar represamientos y posteriores avenidas torrenciales que afectan poblaciones e infraestructura vial (Sedano, *et al.,* 2013).

De igual manera, las deficiencias en la gestión del suelo, de los recursos hídricos y el inadecuado ordenamiento territorial, también hacen que las inundaciones se transformen en catastróficas; la urbanización sobre el lecho mayor de los ríos, la modificación de la forma de los cauces y la alteración de los ciclos vitales de los ecosistemas, derivan en inundaciones más frecuentes y de mayor magnitud.

5.2. Sistema Guía de Crecidas Repentinas (FFGS)

El sistema de guía de inundaciones repentinas, de ahora en adelante FFGS (por sus siglas en inglés) es una herramienta diseñada para proporcionar a los hidrólogos y meteorólogos datos observados y pronosticados de fácil acceso y otra información para producir advertencias de inundaciones repentinas oportunas y precisas. Para evaluar la amenaza de una inundación repentina local, FFGS permite ajustes del producto basados en la experiencia del pronosticador con las condiciones locales; incorporación de información, como resultados de predicción numérica del tiempo; y cualquier observación local de último momento, incluidos

datos de pluviómetros no tradicionales o informes de observadores locales (Georgakakos, 2018).

El FFGS se implementa a escala regional y nacional y utiliza orientación sobre inundaciones repentinas como base para que los pronosticadores capacitados de los servicios meteorológicos e hidrológicos nacionales (SMHN) la utilicen operativamente para desarrollar avisos de inundaciones repentinas (OMM, 2019)

Entre los objetivos de la implementación del FFGS se encuentran: mejorar la capacidad de los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN) para emitir avisos y alertas eficaces sobre inundaciones repentinas, utilizar sistemas y tecnología de pronóstico hidrometeorológico de última generación, fomentar desarrollos y colaboraciones nacionales y regionales, como también fomentar la verificación de los pronósticos y avisos de inundaciones repentinas, entre otros (OMM, 2019).

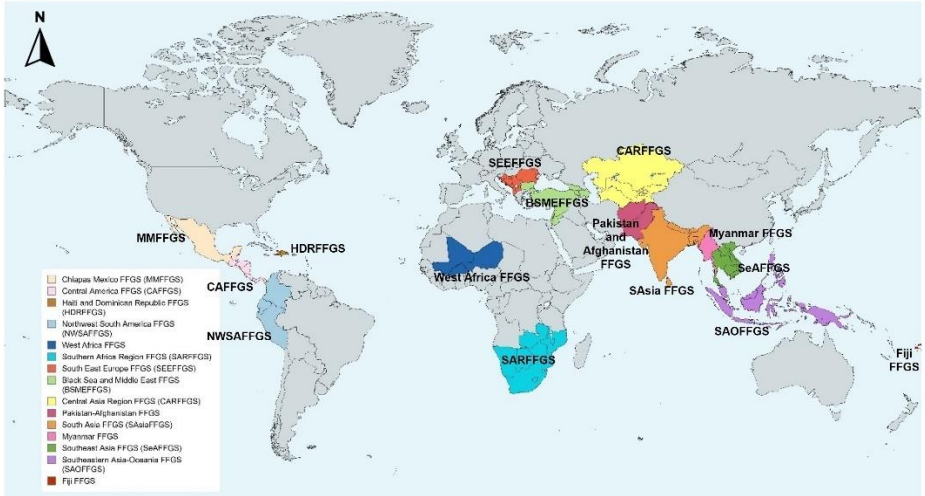
5.2.1. Países implementados

En el ámbito de la implementación del FFGS, en total se han implementado quince proyectos a nivel regional y nacional (Figura 2).

- FFGS del Mar Negro y Oriente Medio: Armenia, Azerbaiyán, Bulgaria, Georgia, Jordania, Líbano, Israel y Türkiye (RC)
- Región de Asia Central FFGS: Kazajstán (RC), Kirguistán, Tayikistán, Turkmenistán y Uzbekistán
- FFGS de Centroamérica: Costa Rica (CR), Belice, El Salvador (CR de respaldo), Guatemala, Honduras, Nicaragua y Panamá
- FFGS de Fiji
- FFGS de Haití y República Dominicana: República Dominicana (RC) y Haití
- FFGS de la Comisión del Río Mekong: Camboya (RC es Comisión del Río Mekong (MRC), República Democrática Popular Lao, Tailandia y Vietnam
- FFGS de Myanmar
- FFGS Noroeste de Sudamérica: Colombia, Ecuador, Perú (RC)
- Región de África Meridional FFGS: Botswana, Lesotho, Malawi, Mozambique, Namibia, Sudáfrica (RC), Eswatini, Zambia y Zimbabwe
- FFGS regionales de Pakistán y Afganistán: Pakistán (RC) y Afganistán
- FFGS de Asia meridional: Bangladesh, Bután, India (RC), Nepal y Sri Lanka
- FFGS del Sudeste Asiático: Camboya, República Democrática Popular Lao, Tailandia y Vietnam (RC)
- FFGS de Asia sudoriental y Oceanía: Brunei Darussalam, Indonesia (RC), Malasia, Papua Nueva Guinea, Filipinas y Timor-Leste
- FFGS de Europa Sudoriental: Albania, Bosnia y Herzegovina, Croacia, Moldavia, Montenegro, Rumania, Serbia, Eslovenia, Macedonia del Norte y Türkiye (RC)
- FFGS de África occidental: Burkina Faso, Malí y Níger (los CR están ubicados en Senegal y Níger).

Figura 2

Proyectos Nacionales y Regionales con cobertura del FFGS



Fuente: Tomado y adaptado de OMM (s.f.)

5.2.2. Sistema Guía de Crecidas Repentinas del Noreste de Suramérica

El Sistema de Guía de Crecidas Repentinas del Noroeste de Sudamérica (NWSAFFGS, por sus siglas en inglés) es una adaptación del Centro de Investigaciones Hidrológicas (HRC, por sus siglas en inglés) Flash Flood Guidance System (FFGS) utilizado en varias regiones del mundo es para capacitar a los pronosticadores en la eficacia frente a eventos de inundaciones repentinas y sus impactos; en este caso el NWSAFFGS tiene cobertura en los países de Colombia, Perú y Ecuador. Su implementación se dio a partir del año 2018 aproximadamente.

Figura 3

Plataforma NWSAFFGS

Fuente: HRC Map Server (2024)

5.2.3. Productos FFGS

Los productos a verificar son tres (3) descritos a continuación.

5.2.3.3. Precipitación de área media pronosticada (Forecasted MAP)

En el marco del FFGS, el producto Merged MAP proporciona las mejores estimaciones con sesgos corregidos de los acumulados de precipitación en 1, 3, 6 y 24 horas para cada una de las cuencas del FFGS. Este se obtiene seleccionando el mejor producto de entrada de precipitación en 1 hora que el MWGHE, el GHE o las interpolaciones de pluviómetros (GMAP) pueden facilitar para cada cuenca, dando preferencia a la selección en ese orden; es decir, se escoge el mejor producto de precipitación de los mencionados anteriormente. Este producto es utilizado como insumo para el producto de humedad promedio del suelo (OMM, 2022).

5.2.3.4. Humedad promedio del suelo (ASM)

La humedad promedio del suelo, de ahora en adelante ASM, corresponde a la fracción de saturación del suelo con agua (relación adimensional entre contenido y capacidad) para la tensión de la zona superior y el contenido de agua libre (20-30 cm de profundidad) del Sistema de Contabilidad de la Humedad del Suelo de Sacramento (SAC-SMA) para cada una de las subcuencas. Los productos de ASM se actualizan cada 6 horas, a las 00.00, 06.00, 12.00 y 18.00 UTC (OMM, 2022).

5.2.3.5. Valores de referencia de crecida repentina (FFG)

El producto FFG permite determinar la cantidad de lluvia que tiene que caer durante un período determinado (1, 3 o 6 horas, por ejemplo) para generar un caudal de desbordamiento en la desembocadura de una cuenca. Los valores de referencia de FFG se calculan y actualizan cada seis horas, esto es, a las horas de procesamiento del sistema (00.00, 06.00, 12.00 y 18.00 UTC). Es importante mencionar que cuantos menores sean los valores de referencia del FFG, mayor será la posibilidad de que se produzcan crecidas repentinas (OMM, 2022).

5.3. Sistemas de Alerta Temprana (SAT)

Un Sistema de Alerta Temprana (SAT) abarca las capacidades necesarias para detectar y comunicar alertas antes de la ocurrencia de eventos amenazantes, permitiendo así una respuesta adecuada para reducir el riesgo. De acuerdo con la UNGRD (2020) estos sistemas se clasifican en dos tipos:

Centralizados: Operados por autoridades centrales o grupos gubernamentales, apoyados en sistemas automatizados y organizaciones técnicas como Centros Especializados en Hidrometeorología, Universidades y Gobiernos Locales.

Descentralizados: La comunidad participa directamente en la recopilación de información y toma de decisiones para proteger vidas y bienes, siendo común en situaciones con tiempo de respuesta limitado.

El NWSAFFGS, como sistema guía de crecidas repentinas, complementa los sistemas de alerta del país al integrarse con la red hidrometeorológica y el sistema FEWS del IDEAM. Esta integración constituye una estrategia para prevenir y atender eventos como inundaciones, crecidas repentinas y avenidas torrenciales.

5.4. Verificación del Pronóstico

En su libro "Métodos estadísticos en las ciencias atmosféricas" Daniel Wilks (2005) define la validación del pronóstico como el proceso de evaluar la precisión y la calidad de los pronósticos meteorológicos mediante el uso de métodos estadísticos. La validación tiene como objetivo determinar la correspondencia entre los pronósticos y las observaciones reales para entender mejor la eficacia de los modelos predictivos.

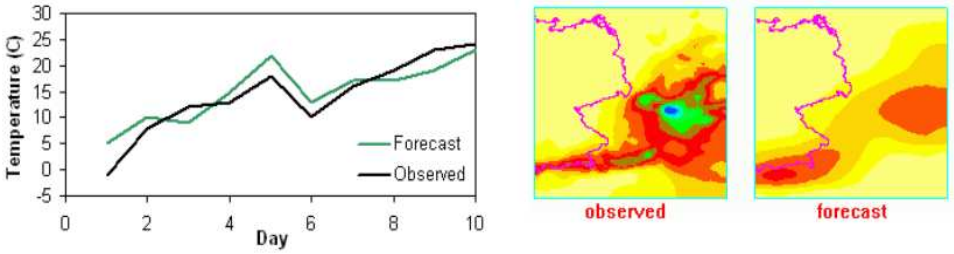
Las actividades de verificación son útiles si conducen a la toma de decisiones con relación al producto verificado. Esta decisión debe generar cambios en la forma como se elaboran los pronósticos o conducir a una decisión de “no hacer nada” y considerar que el producto es satisfactorio (Ruíz *et al*, 2015).

5.4.1. Método Visual

El método visual, llamado también “*eyeball method*”, corresponde al proceso de examinar el pronóstico y las observaciones uno al lado del otro y utilizar el juicio humano para discernir los errores del pronóstico. Las formas más comunes de presentar datos son series de tiempo y mapas. Es importante mencionar que corresponde a un método no cuantitativo y es muy propenso a sesgos de interpretación subjetivos; por lo tanto, debe utilizarse con precaución en cualquier procedimiento de verificación formal. (CAWCR, s.f.)

Figura 4

Ejemplos de aplicación del método visual



Fuente: Collaboration for Australian Weather and Climate Research (CAWCR)

5.4.2. Método para Variables Continuas

La verificación de variables continuas típicamente suministra estadísticas sobre cuánto difieren los valores del pronóstico de las observaciones.

Correlación de Spearman (COR)

Es una prueba no paramétrica que se utiliza para medir el grado de asociación entre dos variables. La prueba de correlación de rango de Spearman no tiene ninguna suposición sobre

la distribución de los datos ni es sensible a valores extremos (Ortega, *et al.*, 2009). Permite establecer la relación lineal entre los sistemas utilizados y la observación y está acotada entre -1 y 1 (Ruiz *et al.*, 2015)

$$r_s = \frac{6\sum D^2}{n(n^2-1)} \qquad [1]$$

Donde
r_s: Correlación de rango de Spearman
D: Diferencia entre los rangos de las variables correspondientes
n: Número de observaciones

Sesgo (BIAS):
El error medio o sistemático (sesgo), se calcula mediante la diferencia media entre el pronóstico y las observaciones, donde n es el número total de pronósticos comparados. El rango del ME va desde menos infinito hasta infinito, y una puntuación perfecta es, ME = 0. Adicionalmente, esta no es una medida de precisión, ya que no proporciona información sobre la magnitud de los errores de pronóstico (Jiménez, 2014).

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(yi - \widehat{y}\,i)}{n} \qquad [2]$$

Donde
yi : Valor observado (mm)
$\widehat{y}\,i$: Valor estimado (mm)
n: Número total de la muestra

Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)
El error cuadrático medio (MSE), se calcula elevando al cuadrado la diferencia media del pronóstico y las observaciones, donde n es el número total de comparaciones pronosticadas, el RMSE (ecuación 2) es la raíz cuadrada del MSE (ecuación 3). La medida de error total, El RMSE incluye los componentes sistemáticos y al azar, los cuales se pueden separar usando medidas para el error sistemático y el error al azar, tales como error de sesgo y desviación estándar (Jiménez, 2014).

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(yi - \widehat{y}\,i)^2}{n} \qquad [3]$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \qquad [4]$$

Tanto para el MSE como para el RMSE, su rango es entre cero e infinito y una puntuación perfecta ocurre cuando ambas métricas tienden al valor cero.

5.4.3. Método para Eventos Categóricos

Categórico, significa que el pronóstico de un enunciado consiste en afirmar que uno y solo uno de un posible conjunto de eventos va a ocurrir (ejemplo; se presentarán lluvias por encima

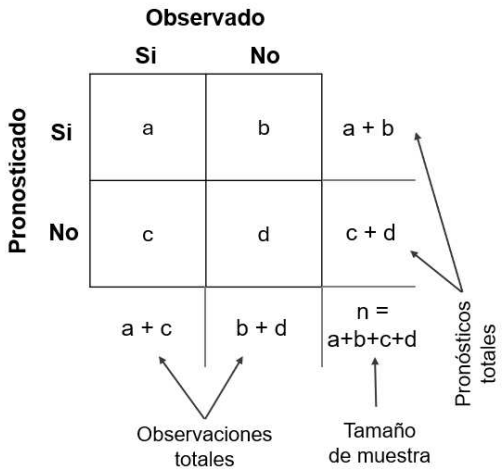
de 60mm diarios). El pronóstico categórico no contiene expresión para la incertidumbre, lo que lo diferencia del pronóstico probabilístico. (Jiménez, 2014)

5.4.3.1. Tablas de Contingencia 2x2

El término de tabla de contingencia fue utilizado por primera vez por el estadístico Karl Pearson en 1904 y es esencialmente un sistema de visualización utilizado para analizar y registrar la relación entre dos o más variables categóricas. En esta verificación existe una correspondencia uno a uno, entre los valores permitidos del pronóstico y los valores observados del predictando (Jiménez, 2014).

Figura 5

Tablas de contingencia 2x2



Fuente: Tomado y adaptado de Wilks (2006)

Las cuatro combinaciones de pronósticos (sí o no) y observaciones (sí o no), denominadas *distribución conjunta*, son:

a = *Hits* – Número de veces (frecuencia) que se pronosticó el evento y éste ocurrió.
b = *False Alarms* – Número de veces que se pronosticó el evento, pero éste no ocurrió.
c = *Misses* – Número de veces que no se pronosticó el evento y éste sí ocurrió.
d = *Correct non-events* – Número de veces que no se pronosticó el evento y éste tampoco ocurrió

La tabla también incluye el cálculo de los valores totales marginales (marginal totals, por su nombre en inglés) tanto para las observaciones como para el pronóstico. El valor en la esquina inferior derecha es el tamaño total de la muestra de verificación y debe ser igual a la suma de las cuatro celdas en la tabla (Jiménez, 2014). A partir de la tabla de contingencia es posible encontrar varios estadísticos para el análisis del pronóstico. Para este trabajo se calcularon los estadísticos descritos a continuación (Nurmi, 2003)

Probabilidad de detección (PoD):
La probabilidad de detección mide la proporción de eventos observados que se pronosticaron correctamente, este es igual al número de eventos pronosticados correctamente sobre número total de eventos observados. Oscila entre 1 y 0, siendo 1 un pronóstico perfecto.

$$PoD = \frac{a}{a+c} = \frac{hits}{hits+misses} \quad [5]$$

Razón de falsas alarmas (FAR): El coeficiente de falsas alarmas corresponde a la fracción de eventos pronosticados y que no ocurrieron, este es igual a las falsas alarmas sobre el número de pronósticos del evento. Oscila entre 1 y 0, siendo 0 un pronóstico perfecto.

$$FAR = \frac{b}{a+b} = \frac{false\ alarms}{hits+false\ alarms} \quad [6]$$

Índice critico de aciertos (CSI)
El Índice Crítico de Aciertos mide la fracción de eventos observados y/o pronosticados que se predijo correctamente; este agrupa propiedades de POD y de FAR en un solo estadístico para eventos que tienen poca frecuencia. Oscila igualmente entre 0 y 1, donde 1 es una puntuación perfecta.

$$CSI = \frac{a}{a+b+c} = \frac{hits}{hits+false\ alarms+misses} \quad [7]$$

5.5. Gestión del Riesgo

El marco conceptual del riesgo en este trabajo se basa en la Ley 1523 de 2012 y en la "*Guía Ilustrativa Sobre Análisis de la Vulnerabilidad Territorial Ante el Cambio Climático*" formulada por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) y la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) en 2018. Este documento establece un vínculo entre la definición de amenaza proporcionada por la ley y la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos, como crecidas repentinas e inundaciones, en el contexto del cambio climático. Es importante señalar que este trabajo no aborda el cambio climático en la incidencia de crecidas repentinas, sino que realiza un análisis en el contexto de la variabilidad climática (identificando épocas estacionalmente de lluvia y sequía) y su posible relación con la ocurrencia de eventos de inundación durante el período 2021-2022. No obstante, se adoptan los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, los cuales han evolucionado con el tiempo.

La actual política pública para la gestión del riesgo en Colombia establecida en la Ley 1523 del 2012, define conceptos, alcances y responsables, mediante la conformación del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD) como una organización jerárquica, descentralizada territorial y operativamente, pero subsidiaria verticalmente, que coordina su actuar y ejecuta actividades mediante instrumentos de planificación denominados planes nacionales, departamentales y municipales de gestión del riesgo (PNGRD, PDGRD, PMGRD) y mediante las estrategias nacionales, departamentales y locales para la respuesta y atención ante las emergencias y los desastres (Céspedes, 2022).

Adicionalmente, la Ley da lineamientos para que el riesgo también sea incorporado como determinante dentro de la planificación territorial, a través de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT, PBOT, EOT), Planes de ordenamiento y Manejo de Cuencas (POMCA), y los Planes de Desarrollo Municipal (PDM). De igual manera, establece la creación de un sistema nacional de información en el cual se integran datos de entidades nacionales y territoriales como un apoyo para todos los procesos de gestión del riesgo (Céspedes, 2022).

En cuanto a los POT, de acuerdo con Zúñiga (2012) las áreas expuestas a amenazas y riesgos, hace parte de los elementos estructurantes para el ordenamiento, allí se consideran zonas inundables de acuerdo con mapas temáticos diseñados para tal fin e información obtenida proveniente de entidades gubernamentales y no gubernamentales relacionadas al tema y afines. El registro de eventos de inundación y el registro de alertas de inundación y crecidas repentinas son elementos que fortalecen los mapas de amenazas y permiten una toma de decisiones más informada frente al sistema de ocupación del territorio en el marco de la gestión del riesgo.

Por otra parte, con el objetivo de llevar los esfuerzos de la planificación ambiental a las comunidades y diferentes ámbitos de actuación , además de los POT existen los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCAS); como instrumento, permiten realizar la planeación del uso coordinado del suelo, de las aguas, de la flora y la fauna y el manejo de la cuenca, proceso en el que participa la población que habita en el territorio, conducente al buen uso y el manejo de tales recursos (MADS, 2019).

Como principales objetivos de los POMCAS se encuentran: a) evitar nuevas condiciones de riesgo en la cuenca, b) garantizar una ocupación del territorio en forma segura y c) fomentar la protección, la conservación, y el uso y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales renovables.

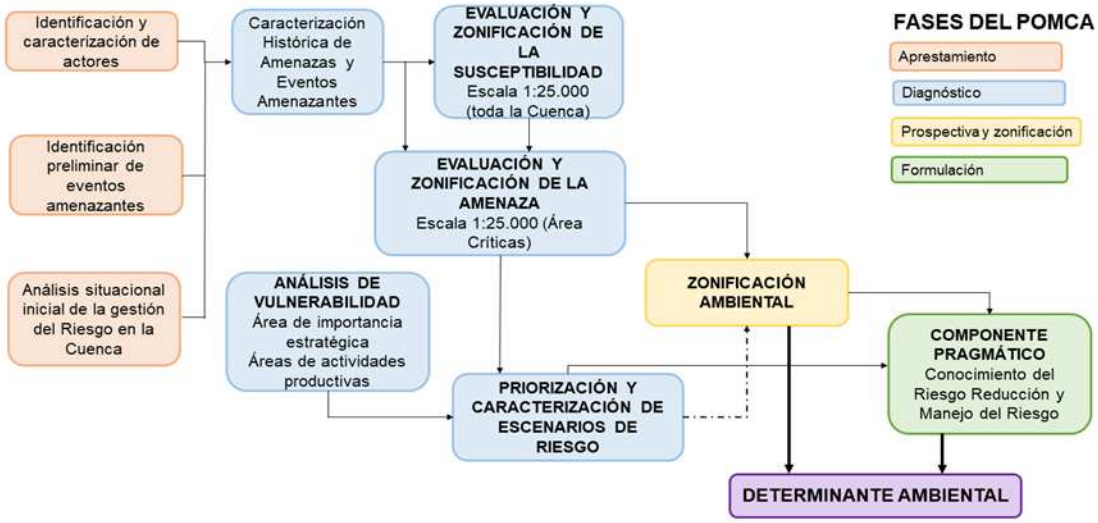
De acuerdo con el MADS (2012), un Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) consta de seis fases. La primera de estas fases corresponde al aprestamiento, en la cual se organiza el trabajo para la elaboración del POMCA mediante el diseño del programa de trabajo y la conformación del equipo técnico pertinente. Luego, en la fase de diagnóstico, se identifica y caracteriza el estado actual de la cuenca en los aspectos biofísicos, económicos, sociales y culturales. Tras esta etapa, en la fase de prospectiva y zonificación, se desarrollan los escenarios futuros del uso coordinado y sostenible del suelo, el agua, la flora y la fauna presentes en la cuenca.

Finalmente, una vez definidos el escenario deseado y la zonificación ambiental, se inicia la siguiente fase de formulación, en la cual se establecen el componente programático, las medidas para la administración de los recursos naturales renovables y el componente de gestión del riesgo. Luego de la formulación del POMCA, las etapas restantes corresponden a la ejecución y seguimiento.

Para cada una de las fases mencionadas, se da la incorporación de la gestión del riesgo como se muestra a continuación (Figura 6).

Figura 6

Integración del Riesgo en las fases de aprestamiento, diagnostico, prospectiva y formulación del POMCA



Fuente: Tomado y adaptado del MADS (2014)

Como es posible identificar en la figura 6, el conocimiento, reducción y manejo del riesgo se relaciona con la etapa de formulación (recuadro verde); siendo el NWSAFFGS una herramienta para el seguimiento y monitoreo constante de la amenaza por crecidas repentinas, resulta en un recurso muy útil en la etapa de conocimiento y reducción del riesgo en concordancia con lo que establecen los POMCA.

Por otra parte, Barrios *et al*. (2021) identifica la relación entre la meteorología, la estadística y la planificación ambiental regional como elementos para la toma de decisiones, donde el componente meteorológico define los procesos que determinan el clima en la región, mientras que el componente estadístico contribuye al análisis, el procesamiento y el control de la calidad de las series de tiempo en las cuales se registran las observaciones y mediciones de las variables climáticas. En el caso de estudio de validación del FFGS, el componente hidrometeorológico determina la susceptibilidad a la ocurrencia de inundaciones; y en ambos casos la estadística, acompañada de la planificación ambiental son cruciales en la toma de decisiones a diferentes escalas espaciales. (Figura 7)

Figura 7

Aporte al proceso de toma de decisiones

Fuente: Tomado y adaptado de Barrios, *et al*., (2021)

En este contexto, el descrito esquema de interacción entre componentes aporta a la mejora del proceso de toma de decisiones, ya que a los actores involucrados en la planificación se les ofrecen productos actualizables y de interpretación sencilla para la adopción de criterios técnicos (Barrios J, *et al.,* 2021).

Igualmente, Velásquez*, et al*. (2021), resaltan la importancia de un modelo para la estimación de caudales cuando no se tiene una estación que mida el caudal y no se cuente con mucha información sobre la fuente que se pretende analizar; para este caso de estudio particular se hace referencia de un sistema de alerta de crecidas repentinas. De igual forma, mencionan que es importante tener datos confiables que estén homogenizados y completos para estimar la tendencia del caudal cuando se presenten anomalías en las series, con el fin de ayudar a la predicción de inundaciones.

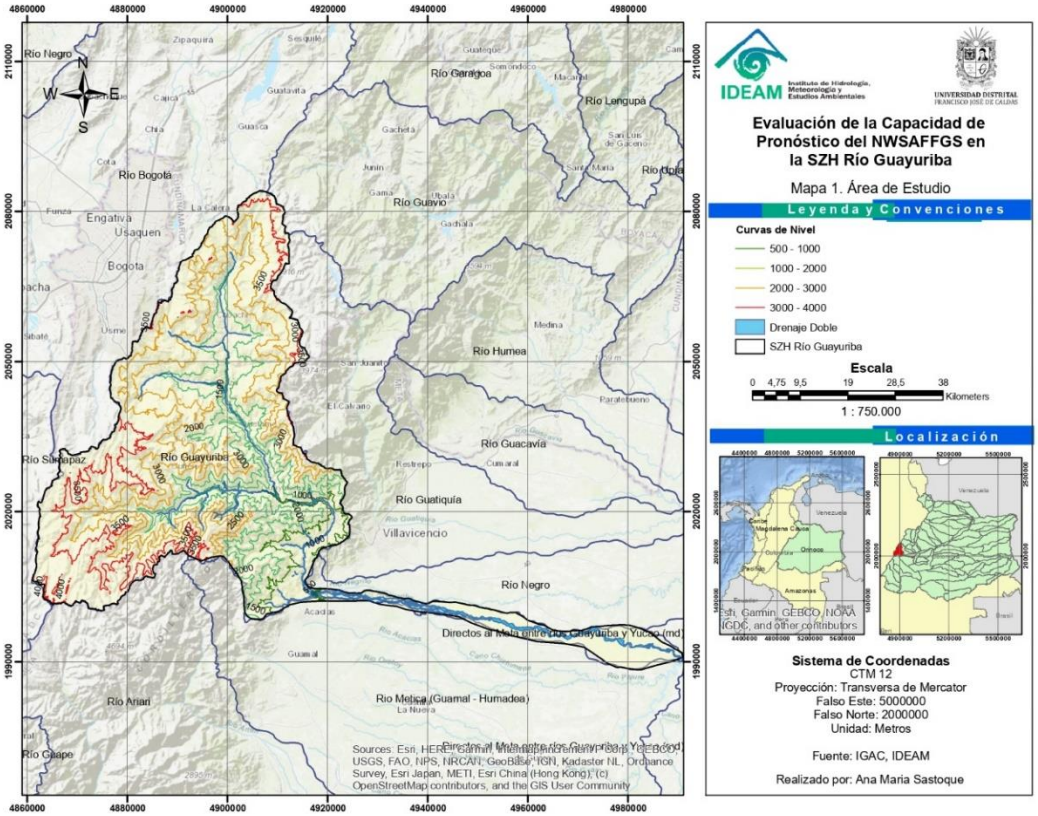
6. METODOLOGÍA

6.1. Área de Estudio

La Subzona Hidrográfica del Río Guayuriba presenta una extensión de 320.749 hectáreas, su jurisdicción se encuentra en doce (12) municipios del departamento de Cundinamarca, cuatro (4) municipios del departamento del Meta y sobre la Localidad 20 de Bogotá Distrito Capital. Geográficamente está ubicada en el centro de Colombia, al sur de Cundinamarca y al nor-occidente del departamento del Meta (Figura 8). La cuenca del río Guayuriba presenta alturas que van desde los 200 m.s.n.m en los llanos orientales hasta los 4.000 m.s.n.m en las zonas de páramo en Bogotá y Cundinamarca. (Cormacarena, 2019)

Figura 8

Localización SZH Río Guayuriba



Fuente: Autor (2024)

Las coordenadas límites de la cuenca son:

Coordenadas Proyectadas (CTM 12)

Este mínima: 4.860.491 m Norte mínima: 2.084.074 m

Este máxima: 4.990.958 m Norte máxima: 1.988.749 m

En cuanto a la jurisdicción de las corporaciones autónomas regionales, la cuenca del Río Guayuriba está regulada por:

- Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial La Macarena – CORMACARENA
- Corporación Autónoma Regional Del Guavio – CORPOGUAVIO
- Corporación Autónoma Regional de la Orinoquía - CORPORINOQUIA
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR

Tabla 1

Jurisdicción municipal de la subzona hidrográfica por departamentos y corporaciones autónomas regionales (CAR)

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO
Bogotá D.C	Localidad 20 - Sumapaz
Cundinamarca	Guaca, La Calera, Cáqueza, Chipaque, Choachí, Fómeque, Fosca, Guayabetal, Gutiérrez, Quetame, Ubaque, Une

Meta	Villavicencio, Acacias, Puerto López, San Carlos de Guaroa

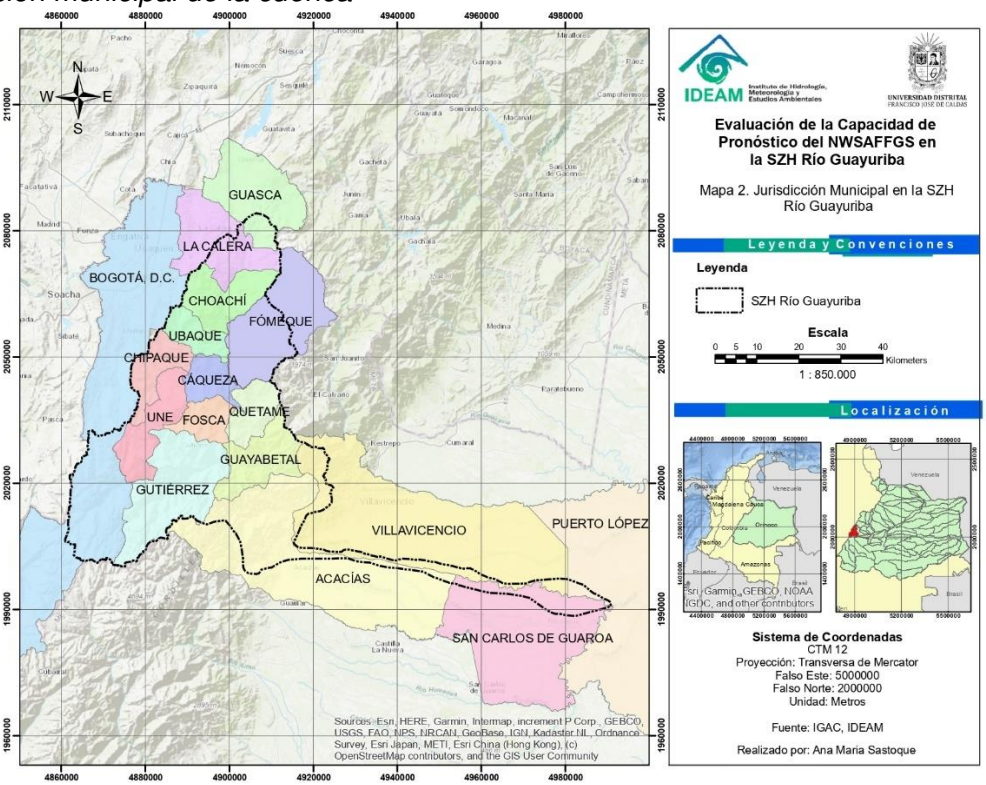
CAR	MUNICIPIO
CAR	La Calera, Sumapaz
CORPOGUAVIO	Guasca, Fómeque
CORPORINOQUIA	Cáqueza, Chipaque, Choachí, Fosca, Guayabetal, Gutiérrez, Quetame, Ubaque, Une
CORMACARENA	Acacías, Villavicencio, Puerto López, San Carlos de Guaroa

Fuente: Tomado de Cormacarena (2019)

En cuanto a la distribución político - administrativa, de las 320.749 ha que conforman la cuenca del río Guayuriba, 247.891 ha equivalente al 77% del área de la cuenca, se encuentran en el departamento de Cundinamarca, siendo el 10% del área del departamento. Mientras el 23% restante se encuentra en el departamento del Meta con 72.857 ha, estando así el 1 % del área del departamento dentro de la cuenca, según la información de la cartografía base del IGAC. Adicionalmente, la cuenca del Río Guayuriba tiene jurisdicción en la localidad de Sumapaz del Distrito Capital y en 16 municipios distribuidos en los departamentos de Cundinamarca y Meta.

Figura 9

Jurisdicción municipal de la cuenca



Fuente: Autor, 2024

6.1.1. Régimen de Precipitación

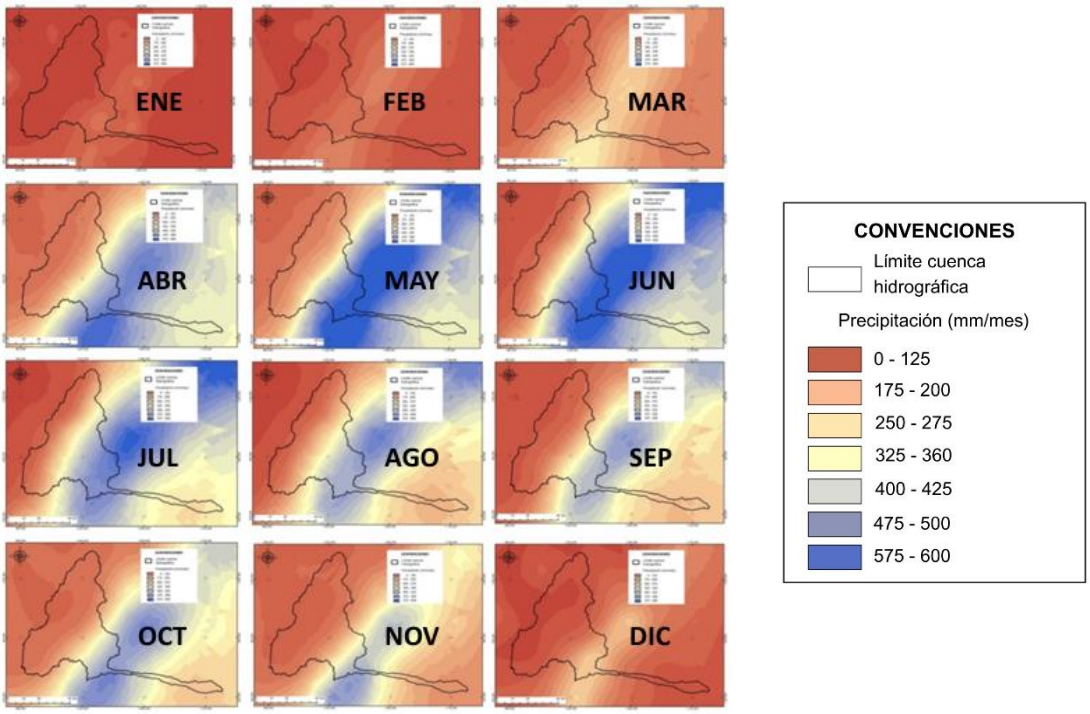
La variación espacial de la precipitación en la cuenca del río Guayuriba posee un patrón muy definido: De acuerdo con Cormacarena (2019), las menores acumulaciones de lluvia se presentan en la parte alta, tanto hacia el páramo de Sumapaz como hacia la zona nororiental de la cuenca; un máximo de precipitaciones en el piedemonte, con acumulados anuales de hasta 4500 mm/año; y en la parte más baja de la cuenca, cerca de la desembocadura, valores de precipitación de hasta 2500 mm/año oriental. En general, el piedemonte de la Cordillera Oriental colombiana se caracteriza por sus altos acumulados de precipitación; allí, la formación de masas nubosas provocadas por el ascenso de las corrientes húmedas procedentes especialmente de la selva amazónica, generan altos acumulados de precipitación (IDEAM, 1998).

En relación a la variabilidad espacial, Cormacarena (2019) menciona que en las estaciones de la parte media-baja de la cuenca (piedemonte), el régimen de precipitaciones es marcadamente unimodal, con el máximo de precipitación a mitad de año (mayores acumulados en mayo, junio y julio) con promedios de 475 a 600 mm/mes, y con el mínimo de precipitación a principios de año (menores acumulados en diciembre, enero y febrero) con promedios de 0 a 200 mm/mes; en la parte alta de la cuenca, el régimen de precipitaciones es cuasi-unimodal, con un leve aumento de la precipitación en los meses de octubre y noviembre. En relación con la variabilidad temporal, entre diciembre y marzo se registra los valores más bajos de precipitación y entre mayo y octubre los más altos. Adicionalmente, el comportamiento del número de días con lluvia es monomodal, en el periodo de mayo-octubre llueve alrededor de 20/días mes y el periodo de diciembre a marzo llueve un promedio de 1 a 4 días (IDEAM, 2002).

A continuación, se presenta el mapa del ciclo anual para la SZH (Figura 10), en donde se evidencia el marcado aumento de precipitaciones hacia el mes de abril – mayo.

Figura 10

Ciclo anual de precipitación para la SZH Río Guayuriba



Fuente: Cormacarena, 2019.

6.1.2. Régimen hidrológico

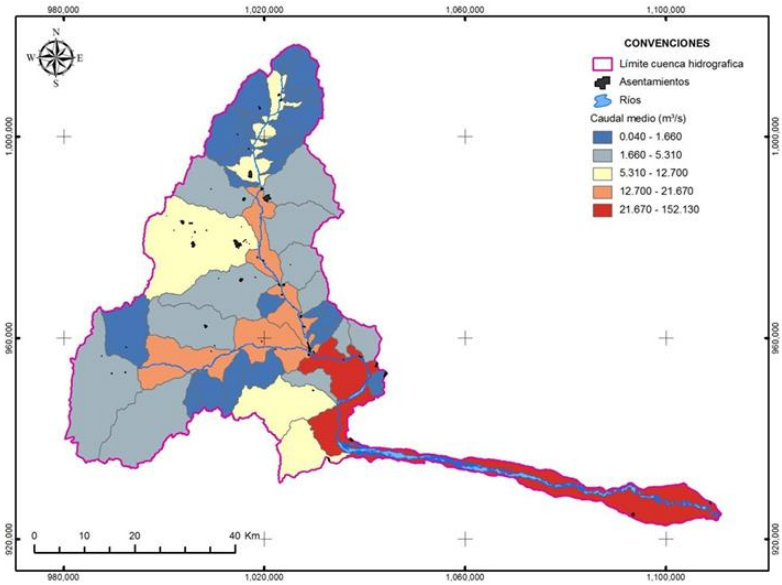
Con relación a la variabilidad temporal, la SZH Río Guayuriba, al ubicarse en una zona de transición entre la cordillera de los Andes y la región de la Orinoquía, es de esperar que se manifiesten características propias de ambas regiones: El comportamiento bimodal de las zonas andinas del país, y el comportamiento unimodal de la Orinoquía. En la parte alta de la cuenca, se manifiesta una tendencia a la bimodalidad muy marcada en las condiciones húmedas y un tanto menos en las condiciones medias. En la parte media de la cuenca, el río Negro, que drena la zona oriental de la cuenca, sigue conservando cierta bimodalidad en los caudales para condición húmeda, aunque en los caudales para condiciones medias se presenta una tendencia al régimen unimodal; en cuanto al río Blanco (occidente de la cuenca), el régimen de caudales para todas condiciones es unimodal. En la parte baja de la cuenca, el comportamiento del río Guayuriba es marcadamente unimodal, con máximos de caudal en la mitad del año y caudales más bajos en los primeros meses del año. Respecto a los caudales en condición hidrológica seca, tanto en la parte alta de la cuenca como en la parte media y baja el comportamiento es en su mayoría unimodal. (Cormacarena, 2019)

En términos generales, se presentan los mayores caudales en los meses de mayo, junio y julio, tanto en condiciones medias como en condiciones secas (Cormacarena, 2019)

Frente a la oferta hídrica para la SZH Río Guayuriba varía dependiendo en qué zona de la cuenca nos encontremos, a continuación, se presenta el mapa de oferta hídrica promedio anual (Figura 11) dada por el caudal medio (m^3/s), contando con un caudal medio entre 12,7 y 21,6 sobre el Río negro y Río Blanco, mientras que para el Río Guayuriba (unión de los 2 anteriores) el caudal medio se encuentra entre 21,7 y 152,1 m^3/s (Cormacarena, 2019).

Figura 11

Oferta hídrica promedio anual (m^3/s) para cada UHN1, para cada año hidrológico medio



Fuente: Cormacarena, 2019.

6.2. FASE 1: Priorización de Subzona Hidrográfica (SZH)

Debido a la amplia y compleja diversidad hidrológica en Colombia, en el año 2013, el IDEAM publicó el documento "Zonificación y Codificación de Unidades Hidrográficas e Hidrogeológicas de Colombia", el cual tuvo como objetivo principal conocer la delimitación, distribución y jerarquización de las cuencas del territorio colombiano con fines de gestión del recurso hídrico. Para lograr priorizar e identificar el área de estudio, se consideró la codificación de las Subzonas Hidrográficas (SZH) a nivel nacional.

6.2.1. Registros de eventos de atención a emergencias (UNGRD)

A través del portal web de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo (UNGRD), se procedió a descargar los archivos en formato Excel que contenían los consolidados anuales de atención a emergencias, abarcando el período de 1998 a 2022. Estos datos fueron integrados en una nueva base de datos, donde se incluyen exclusivamente eventos relacionados con inundaciones, avenidas torrenciales y crecidas súbitas. Cabe resaltar que los eventos categorizados como avenida torrencial y crecida súbita aparecen en los registros de la UNGRD a partir del año 2012, antes de esta fecha, únicamente se registraban eventos de inundación.

6.2.2. Priorización de municipios y Subzona Hidrográfica (SZH)

Luego de consolidar la nueva base de datos, se procedió a realizar el conteo total de eventos por municipio, teniendo como resultado que los municipios de Bogotá y Villavicencio son aquellos que presentaron mayor atención a emergencias de inundaciones, avenidas torrenciales y crecidas repentinas, con 125 y 118 eventos respectivamente

Figura 12

Conteo de eventos de inundación por municipio (1998 - 2023)

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	NO. EVENTOS
CUNDINAMARCA	BOGOTÁ	125
META	VILLAVICENCIO	118
RISARALDA	PEREIRA	95
ATLANTICO	BARRANQUILLA	93
MAGDALENA	SANTAMARTA	81
CHOCÓ	QUIBDÓ	69
TOLIMA	IBAGUÉ	69
CORDOBA	MONTERÍA	65
ARAUCA	ARAUQUITA	61
GUAJIRA	RIOHACHA	61
MAGDALENA	GUAMAL	59
ARAUCA	ARAUCA	56

Fuente: Tomado y adaptado de UNGRD

Según el informe del IDIGER (2016), las principales causas vinculadas a los eventos de inundación en Bogotá se atribuyen principalmente a disfunciones en el sistema de drenaje (ocasionadas principalmente por la gestión inapropiada de residuos sólidos por una separación insuficiente desde la fuente) y a fenómenos climáticos de intensas precipitaciones. Es importante señalar que estos fenómenos, relacionados con hidrología urbana, están fuera del alcance del objeto de estudio que se centra en las crecidas repentinas. Por lo tanto, se excluye a Bogotá como municipio priorizado para el estudio.

Seleccionando a Villavicencio como el municipio priorizado, se llevó a cabo un análisis para identificar las corrientes de agua vinculadas a los eventos reportados. Se utilizó el consolidado de emergencias generado durante el periodo 2014-2023 por los ingenieros Albeiro Figueroa y Camilo Camacho (2023) de la Subdirección de Hidrología del IDEAM. En este análisis se determinó que el Río Guayuriba es la corriente de agua que más se relaciona con los eventos de inundación en el municipio de Villavicencio, por lo que se toma la SZH Río Guayuriba como área de estudio.

6.3. FASE 2: Recopilación información hidroclimática

6.3.1. Centro de Investigaciones Hidrológicas (HRC)

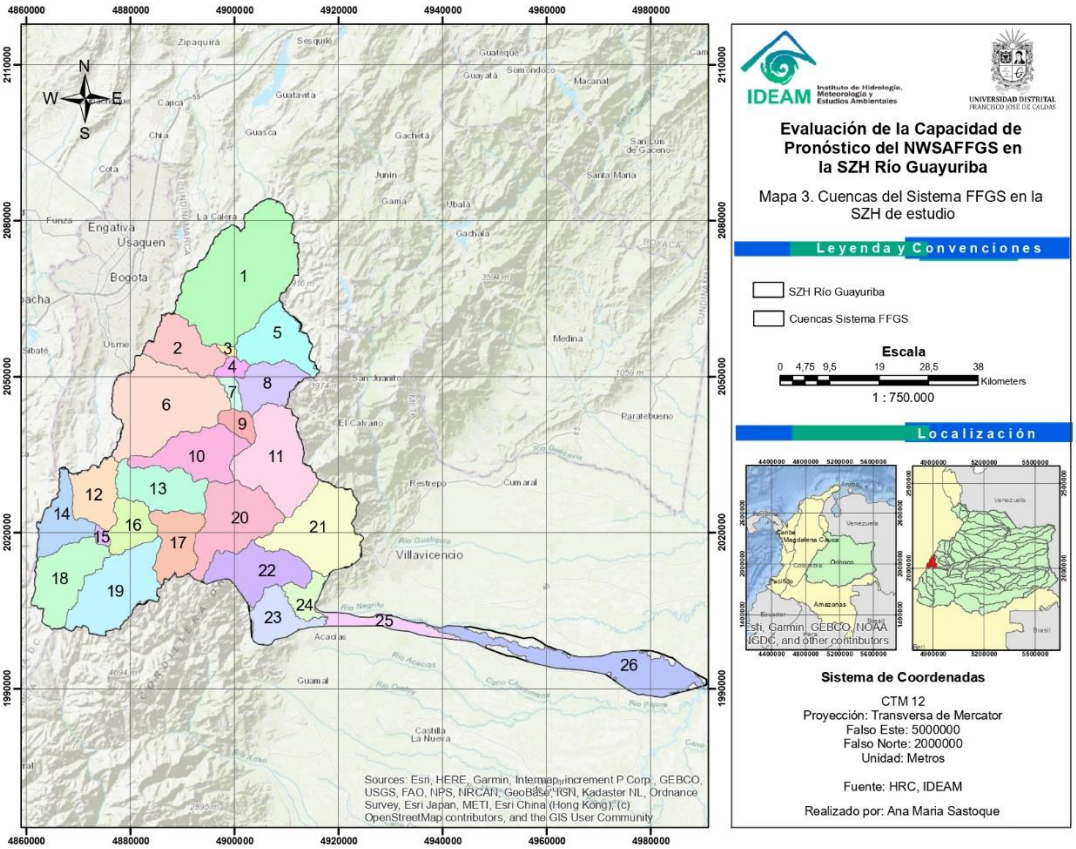
Para la generación de sus pronósticos, el sistema FFGS ha delimitado sus propias cuencas hidrográficas a partir de un sistema digital de elevación (DEM), con el objetivo de conocer cuáles de estas cuencas se encuentran en la SZH Río Guayuriba, se descargó el Shapefile correspondiente a estas cuencas y se recortó con el contorno de la SZH, esto por medio de la herramienta Clip del Software ArcGIS versión 10.8.2.

Como es posible identificar en la figura 13, para la SZH Río Guayuriba, el NWSAFFGS cuenta con 26 cuencas hidrográficas (Basins), cada una de ellas cuenta con un ID que permite su identificación

Para facilitar su compresión, las cuencas del sistema fueron nombradas con el nombre de la fuente hídrica más cercana, esto con ayuda de la cartografía básica del IGAC escala 1:25.000 y las unidades hidrográficas Nivel I del POMCA del Río Guayuriba, en las que, algunas unidades concuerdan con la delimitación de las cuencas del FFGS.

Figura 13

Cuencas hidrográficas provenientes del NWSAFFGS con relación a la SZH Río Guayuriba



Fuente: Autor (2024)

Tabla 2

Codificación de las cuencas del sistema.

Número	Código	Nombre
1	1007703715	Quebrada Rincón
2	1007703717	Quebrada Idaza
3	1007703714	Río Negro - Ubaque
4	1007703713	Quebrada del Soche
5	1007703716	Río Negro Parte Alta
6	1007703719	Río Cáqueza
7	1007703712	Quebrada de Ponta
8	1007703718	Quebrada Horqueta
9	1007703711	Río Negro y Directos

10	1007703720	Río Sáname
11	1007703710	Quebrada Naranjal
12	1007703725	Río Pontezuela
13	1007703722	Río Taguate
14	1007703727	Río Los Medios
15	1007703726	Quebrada El Guayabo
16	1007703724	Río Blanco y Directos
17	1007703723	Quebrada Santa Rosa
18	1007703728	Río El Chochal
19	1007703729	Río Gallo
20	1007703721	Río Chiquito
21	1007703709	Susumuco
22	1007703730	Río Manzanares
23	1007703731	Río Sardinata
24	1007703708	Caño Sagu
25	1007703707	Río Guayuriba - Acacias
26	1007703703	Río Guayuriba y Directos

Fuente: Autor (2024)

Luego de obtener el listado de códigos de las cuencas, se procedió a solicitar esta información a HRC. Esto debido a que la interfaz del sistema solo permite la descarga de datos con un retroceso de 210 días; para consultas que abarquen fechas anteriores, es necesario realizar una solicitud específica de información.

Los productos empleados para la verificación corresponden a:

- FMAP: Este producto genera pronósticos de precipitación para un lapso de 06 y 24 horas, en este caso se tomó el dato generado a las 00:00 UTC, para el pronóstico de 24 horas.
- ASM: Este producto genera pronósticos de humedad del suelo para las 00, 06, 12 y 18 UTC, para la verificación se tomó el valor diario máximo.
- FFG: Este producto genera pronósticos de guía de crecida repentina para las 00, 06, 12 y 18 UTC, para la verificación se tomó el valor diario máximo.

6.3.2. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

Para la evaluación del desempeño de los productos del sistema se utilizaron datos de precipitación y nivel suministrados por la red de estaciones del IDEAM. Para identificar las estaciones hidrometeorológicas ubicadas dentro de la Subzona Hidrográfica (SZH) de estudio, se utilizó el shapefile del Catálogo Nacional de Estaciones (CNE), identificando así un total de 36 estaciones dentro del área de estudio; 20 de ellas miden precipitación y 16 miden niveles.

6.3.2.1. Ubicación de estaciones meteorológicas

En el anexo 1 se encuentra una tabla con información de las 20 estaciones que miden la variable de precipitación dentro de la SZH; es importante mencionar que no todas serán utilizadas en el proceso de verificación del sistema, algunas fueron descartadas en función a criterios mencionados en el siguiente apartado.

6.3.2.1.2. Homogenización de series y estimación de datos faltantes

Luego de identificar las estaciones hidrometeorológicas en la zona de estudio, se identificó cuáles de las cuencas del NWSAFFGS contaban con una estación con datos de precipitación. Esto debido a que, para realizar la validación del producto FMAP se requiere de al menos una medición en campo de precipitación dentro de cada cuenca.

Seguido de esto, se identificó el porcentaje de datos completos para el periodo 2021-2022 para cada una de las 20 estaciones. Las estaciones que contarán con un 0.00 % de datos completos, es decir, que no registraran ningún dato para el periodo de estudio fueron descartadas, igualmente el segundo requisito fue que contaran con datos a partir del año 1990. Las estaciones escogidas, fueron llevadas a un proceso de homogenización (series completas) y estimación de datos faltantes (series incompletas), por medio del paquete Climatol de R.

El paquete Climatol de R contiene funciones para el control de calidad, homogeneización y relleno de los datos faltantes en un conjunto de series de cualquier variable climática (Guijarro, 2018). Para la entrada de los datos al programa, en primer lugar, se crearon archivos tipo .DATA donde se encontrará la información de las estaciones en el siguiente formato: *Año, Mes, Dia, Valor*. Además de esto, los archivos fueron nombrados así: *PP_@CódigoEstación*. Estos archivos .DATA fueron almacenados en un fichero de Excel CSV (separado por comas) el cual contenía la información de cada estación y su respectivo archivo .DATA. Las columnas del CSV corresponden a: *Fichero (archivo .DATA), Longitud, Latitud, Altitud, Código, Nombre estación, Departamento*

Luego de haber organizado los datos de precipitación en el formato mencionado, se utilizó la función *daily2climatol*, la cual convierte los datos diarios de entrada al formato que utiliza climatol, para posteriormente, con la función *homogen*, homogeneizar las series de tiempo; se detectaron y eliminaron anomalías en las series y se generaron gráficos de salida con información de las estaciones. Por último, por medio de la función *dahstat* se completaron los datos faltantes en cada una de las series de tiempo. Tras haber realizado el proceso de homogeneización y relleno de datos faltantes se presentan las estaciones a utilizar en la validación del sistema y sus respectivas cuencas (Tabla 3).

Frente al proceso de selección de estaciones vecinas para el proceso de homogenización y estimación de datos faltantes, Lombana *et al.* (2018) publicaron un documento denominado "Guía para el procesamiento de series de tiempo de precipitación y temperatura: estimación de datos faltantes, detección de cambios y homogenización", este documento contó con el apoyo técnico de la Subdirección de Meteorología del IDEAM; y detalla los criterios necesarios para la identificación de estaciones vecinas, los cuales también son mencionados

por Bernal et al. (2021). Según estos criterios, una estación “A” es vecina de la estación “B” si cumple con los siguientes requisitos:

- Que la estación “A” esté en la misma subzona hidrográfica de la estación “B”.
- Que la estación “A” esté en el mismo rango de precipitación anual de la estación “B”.
- Que la estación “A” esté en el mismo rango de elevación de la estación “B”.
- Que el radio de acción de correlación espacial de precipitación sea significativo, es decir, que la distancia entre las estaciones A y B no superen un radio de acción específico identificado para cada región climatológica.

El punto de encuentro entre lo formulado en la guía mencionada y el procesamiento de Climatol, se refiere a que Climatol toma la ubicación geográfica y altitud de las estaciones con el fin de identificar la distancia y el rango de elevación entre ellas, así como la similitud entre las series de tiempo para identificar rangos de precipitación, similar a lo planteado por Lombana *et al,* en el año 2018.

Asimismo, en el año 2023, la Subdirección de Meteorología publicó una nota técnica donde se hace uso de la librería de Climatol para la detección de tendencias de cambio climático para la temperatura del aire y la precipitación en Colombia durante el periodo 1981 – 2020 (IDEAM, 2023).

Tabla 3

Estaciones de precipitación a utilizar en la validación del sistema.

CÓDIGO	NOMBRE	CUENCA ASOCIADA
35020010	MONTERREDONDO	11. Quebrada Naranjal
35020020	SUSUMUCO	21. Susumuco
35020280	CHOACHÍ	1. Quebrada Calostros*
35020290	FOMEQUE	5. Río Negro Parte Alta
35020300	GUTIERREZ	13. Río Táguate
35020310	NAZARETH	18. Río El Chochal
35020340	PRIMAVERA LA	19. Río Gallo
35020350	BETANIA	12. Río Pontezuela
35025050	LLANO LARGO	2. Río Palmar
35025060	BOLSA LA	1. Quebrada Calostros
35025070	TAQUES LOS	14. Río Los Medios
35030080	LAS CASAS	6. Río Cáqueza
3502500006	MORICHAL	26. Río Guayuriba y Directos

Fuente: Autor (2024)

* En la cuenca 1. Quebrada Calostros, se utilizaron dos estaciones para el proceso de homogeneización, sin embargo, para la verificación del sistema se hará uso únicamente de la estación 35020280 (Choachí).

Es relevante destacar la diferencia entre el método de pronóstico de precipitación del FFGS y el proceso de medición de datos observados por parte del IDEAM; el FFGS genera varios productos de precipitación, uno de los más destacados es la Precipitación Satelital (GHE), la cual es generada por el hidro estimador global y luego ajustada por microondas para producir un nuevo producto de precipitación denominado MWGHE. Utilizando estos insumos, se genera la precipitación areal media pronosticada (FMAP) para cada cuenca del sistema (OMM, 2022). Mientras que, la medición de datos observados en la red de estaciones del IDEAM se lleva a cabo mediante instrumentos de medición, como pluviómetros o pluviógrafos. Estos datos se expresan en milímetros de agua, representando la cantidad acumulada en una superficie horizontal e impermeable durante la duración de la precipitación (IDEAM, 2005).

Para verificar el producto de precipitación, se considera que esta medición puntual refleja las condiciones de precipitación que, en principio, deberían corresponder con la precipitación estimada para el área o cuenca de estudio, y por ende esta precipitación puntual es usada en la verificación del producto FMAP.

La medición de la precipitación en la SZH se realiza por medio de estaciones pluviométricas; las cuales utilizan un pluviómetro y estaciones pluviográficas; que registran la precipitación de forma gráfica (Saldarriaga, 2019); igualmente se encuentran estaciones convencionales como automáticas con telemetría. Respecto a las estaciones automáticas los datos de las estaciones automáticas se reciben en el sistema de visualización de información medioambiental, que además permite la creación y parametrización de alarmas visibles de acuerdo con los estándares definidos por el Instituto, ejemplo de ello es el establecimiento de alarmas en la red hidrológica cuando se superan los umbrales definidos para las cotas de inundación (IDEAM, 2022)

6.3.2.2. Ubicación de estaciones hidrológicas

Ahora, para la verificación del producto ASM es necesario contar con al menos una estación que mida el nivel (cm), en el Anexo 2 se enlistan las estaciones que miden esta variable dentro de la SZH.

Las estaciones a utilizar en la validación de los productos del sistema serán aquellas que tengan datos completos para el periodo 2021-2022, esto dado que el proceso de estimación de datos faltantes para series hidrológicas se encuentra fuera del alcance de este trabajo. En la siguiente tabla se presentan las estaciones a utilizar en la verificación.

Tabla 4

Estaciones de nivel a utilizar en la validación del sistema

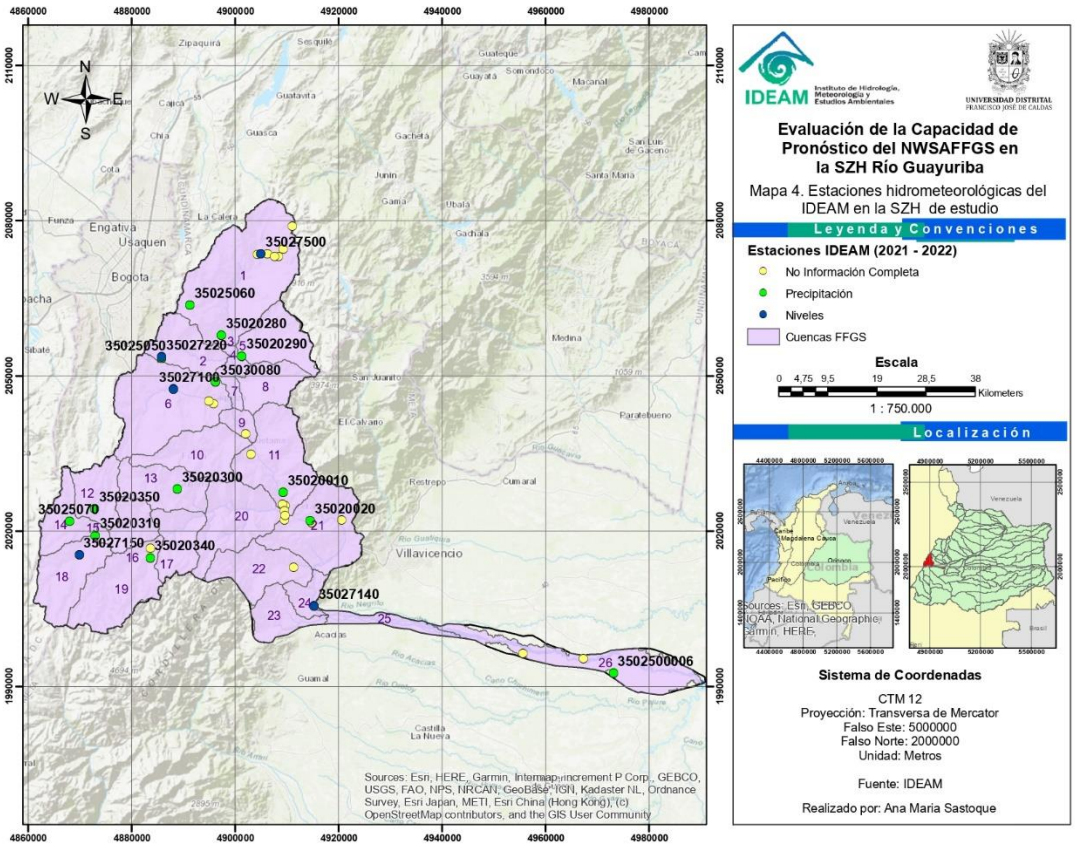
CÓDIGO	NOMBRE	CUENCA ASOCIADA
35027140	PUENTE CARRETERA	24. Caño Sagu
35027500	QUEBRADA RINCÓN	1. Quebrada Rincón
35027220	LLANO LARGO	2. Río Palmar
35027100	CARAZA	6. Río Cáqueza
35027150	ANIMAS LAS	18. Río El Chochal

Fuente: Autor (2024)

Por último, en la figura 14 se muestra el mapa con la ubicación de las estaciones hidrometeorológicas en la Subzona Hidrográfica -SZH, donde las estaciones descartadas son representadas en tono amarillo, las utilizadas para el proceso de verificación del FMAP en tono verde y finalmente para el proceso de verificación de ASM en tono azul.

Figura 14

Ubicación de estaciones hidrometeorológicas del IDEAM en la SZH de estudio



Fuente: Autor (2024)

6.3.3. Definición de cuencas de FFGS a evaluar

Debido a que no todas las cuencas del sistema cuentan con estaciones hidroclimáticas o las que se encontraban allí no cumplían con los parámetros de calidad, se definen las cuencas a evaluar para la verificación de los productos FMAP, ASM y FFG (Tabla 5).

Tabla 5

Cuencas del sistema a verificar

CUENCA	Producto a verificar		
	FMAP	ASM	FFG
1	x	x	X
2	x	x	
5	x		x
6	x	x	x
8			X
11	x		x
12	x		
13	x		
14	x		
18	x	X	
19	x		
21	x		
24		X	
26	x		

Fuente: Autor (2024)

En cuanto a las cuencas donde se realizó la verificación del producto FFG, es importante destacar que su selección no está vinculada a la presencia de estaciones hidrometeorológicas, sino más bien a la ocurrencia de eventos de inundación, crecidas repentinas y avenidas torrenciales en estas áreas, reportados en la UNGRD para el periodo de estudio.

6.4. FASE 3: Metodología de verificación

6.4.1. Precipitación media areal pronosticada (FMAP)

6.4.1.1. Método visual

La generación de gráficos de barras se utilizó las series de datos mensuales promedio de precipitación tanto de las estaciones meteorológicas como del sistema, para el periodo 2021 - 2022. Para obtener estos datos, se sumaron las cantidades diarias de precipitación observada y pronosticada, y luego se calcularon los promedios mensuales. Adicionalmente, se añadió el promedio climatológico desde la fecha en la que se encontraron datos disponibles para cada estación del IDEAM.

Adicionalmente, se generaron gráficos de regresión lineal para la precipitación observada y pronosticada para el periodo de estudio, esto por medio de la librería *'ggplot2'* en RStudio.

6.4.1.2. Método de variables continuas

El cálculo de la correlación de Spearman se realizó en el software RStudio por medio de la función *cor*; mientras que el cálculo del RMSE y el BIAS se realizó en hojas de cálculo de Microsoft Excel, por medio de las ecuaciones [2] y [4], respectivamente. Tanto para el cálculo

de la correlación, el RMSE y el BIAS, se utilizaron las series diarias de precipitación observada y pronosticada para el periodo de estudio (730 datos por serie).

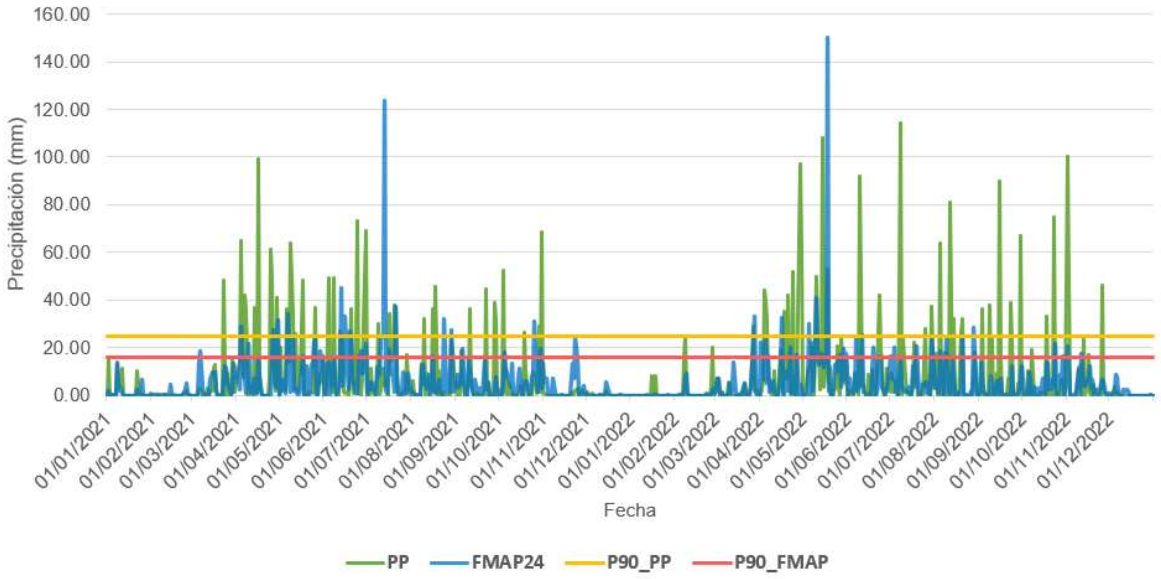
6.4.1.3. Tabla de contingencia

Las tablas de contingencia utilizadas en la verificación del producto FMAP son de 2x2, donde las posibles entradas para el evento estimado y pronosticado son Sí/No; teniendo en cuenta que el enfoque del sistema es la predicción de crecidas repentinas y eventos extremos, se toma como “Si” los eventos de precipitación superiores al percentil 90 de cada serie y como un “No” valores por debajo del percentil 90. Un ejemplo de ello es el gráfico de precipitación pronosticada y observada para la cuenca 26 (Figura 15), donde la línea verde corresponde a la precipitación observada y la azul a la pronosticada, allí los valores por encima de la línea amarilla (precipitación estimada) y la línea roja (precipitación pronosticada) serán tomados como un “Si”.

El objetivo de utilizar datos de precipitación mayores al percentil 90 es evaluar la capacidad del sistema de detectar estos eventos extremos, no solo en frecuencia sino también en el día de su ocurrencia. Sin embargo, es importante aclarar que, al utilizar un percentil general para toda la serie de tiempo, puede que se omitan eventos extremos ocurridos en época seca que igualmente pueden generar eventos de crecidas repentinas, por ello, se realiza el mismo ejercicio, pero utilizando el percentil 90 a una escala mensual para 2 cuencas del sistema (Anexo 8).

Figura 15

Precipitación pronosticada vs observada - Cuenca 26 (2021 - 2022)



Fuente: IDEAM y HRC

6.4.2. Humedad Promedio del Suelo (ASM)

6.4.2.1. Matriz de correlación

En su guía metodológica para la verificación del FFGS; HRC (2019) recomienda utilizar mediciones de humedad en campo para verificar el producto ASM. Sin embargo, esta información no se encuentra disponible en el área de estudio, por lo que se procede a realizar una matriz de correlación en el software RStudio (Figura 16) que permita identificar la variable medida en campo por las estaciones que mejor se ajuste al producto ASM y utilizarla para la verificación correspondiente.

Figura 16

Matriz de correlación para las variables medidas en campo y los productos generados por el sistema

	pp	nvmedio	nvmax	asm	map	fmap	ffg
pp	1	0.124	0.114	0.181	0.322	0.103	-0.384
nvmedio	0.124	1	0.98	0.353	0.256	0.098	-0.457
nvmax	0.114	0.98	1	0.313	0.241	0.089	-0.433
asm	0.181	0.353	0.313	1	0.313	0.023	-0.789
map	0.322	0.256	0.241	0.313	1	0.293	-0.407
fmap	0.103	0.098	0.089	0.023	0.293	1	-0.082
ffg	-0.384	-0.457	-0.433	-0.789	-0.407	-0.082	1

Fuente: Autor (2024)

Por medio de esta matriz fue posible identificar que la variable con mayor afinidad con el producto de ASM corresponde al Nivel Medio, por lo tanto, la verificación se llevará a cabo utilizando esta variable.

6.4.2.2. Método visual

Luego de identificar la variable medida en campo más apropiada para la verificación, que en este caso es el Nivel Medio, se procedió, al igual que en la verificación de la precipitación, a generar gráficos de líneas y diagramas de dispersión. Para la creación de los gráficos de líneas, se utilizó la serie de tiempo del máximo diario de ASM correspondiente al periodo 2021-2022. Es importante señalar que el valor de ASM, originalmente expresado en una proporción de 0 a 1, se transformó a porcentaje (%) para adecuarlo a la escala de los gráficos. Además, se incorporó la serie de tiempo del nivel medio diario y el registro de eventos de atención de emergencias durante el período de estudio.

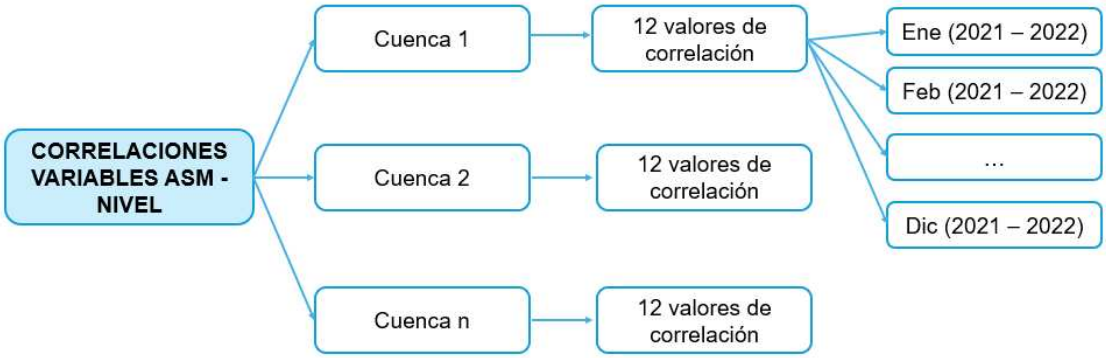
6.4.2.3. Método de variables continuas

Los valores de correlación se calcularon, para cada mes en el periodo de 2021–2022 y para cada cuenca, es decir, cada cuenca cuenta con 12 datos de correlación, esta correlación

mensual fue calculada con 60/62 valores diarios. Esto puede ser representado en el siguiente diagrama (Figura 17).

Figura 17

Estructura de datos para el cálculo de coeficientes de correlación por cuenca



Fuente: Autor (2024)

Es importante mencionar que las matrices de correlación pueden analizarse de dos maneras, en la primera se pueden identificar las cuencas en las que existen altos niveles de correlación y en la segunda se pueden identificar en qué meses del año se registra un buen desempeño.

A continuación, se muestra el método 1 de cálculo de percentiles, donde, al calcular estos por columnas (meses), es posible identificar las cuencas con mejor desempeño para cada mes (Figura 18).

Figura 18

Método 1 para el cálculo de percentiles

Cuenca	ene	feb	mar	abr	...	dic
10007703703						
10007703708						
10007703709						
...						
10007703728						
Percentiles	P 33.33					
	P 66.66					

Fuente: Autor (2024)

Mientras que, al calcular los percentiles por filas (cuencas) es posible identificar cuáles son los meses con mejor desempeño para cada cuenca (Figura 19).

Figura 19

Método 2 para el cálculo de percentiles

Cuenca	ene	feb	mar	...	dic	Percentiles	
10007703707						P 33.33	P 66.66
10007703708							
10007703709							
...							
10007703728							

Fuente: Autor (2024)

Por medio de estos dos métodos es posible identificar en cuales cuencas y en qué meses, el sistema presenta un mayor desempeño.

Para la calificación de las correlaciones, por medio del método de percentiles, se procedió a generar tres rangos de calificación, de tal forma que con el percentil 33.33 y 66.66 se generaron los siguientes rangos:

Tabla 6

Rangos de calificación para los coeficientes de correlación

Alto	Coef. correl > P. 66.66
Medio	P 33.33 < Coef. Correl ≤ P. 66.66
Bajo	Coef. Correl ≤ P. 33.3

Por último, al tener las correlaciones calificadas fue posible generar un mapa en el que se evidencian las cuencas con mejor desempeño para el producto ASM.

6.4.3. Guía de Crecida Repentina (FFG)

6.4.3.1. Método Visual

A partir de la matriz de correlación mencionada en el apartado anterior, también fue posible determinar que la variable medida por las estaciones que tiene mayor correspondencia con el producto FFG, que igualmente corresponde al Nivel Medio. Con ello fue posible realizar gráficos de líneas de las dos series de tiempo para algunas cuencas y visualizar la asociación entre las dos variables.

6.4.3.2. Tablas de Contingencia

A partir del registro de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo (UNGRD) y las series de tiempo del producto FFG para el periodo 2021 - 2022, se construyeron tablas de contingencia 2x2 que permitieron evaluar la capacidad del sistema de predecir eventos de crecida repentina.

La variable de ocurrencia de evento es dicotómica, y tomar el valor de Si o No ocurrencia, sin embargo, el producto FFG es una variable cuantitativa discreta, la cual no puede clasificarse entre valores de Si / No; con el fin de ajustarlos a la tabla de contingencia, se utilizó el método de percentiles; donde valores superiores al percentil 75 (similar a la tabla de contingencia del

producto FMAP) son clasificados como un “Si”, y valores menores a este percentil como un “No”. Con ello fue posible calcular las métricas de PoD, FAR y CSI (TS) para cada cuenca de análisis.

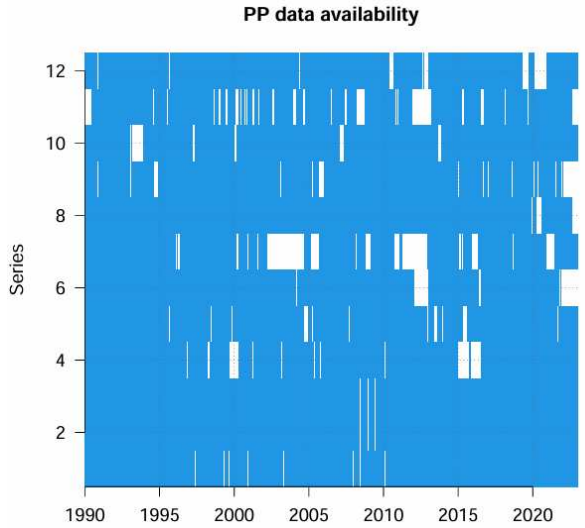
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. Homogeneización de series de tiempo de precipitación y estimación de datos faltantes

Luego de realizar el proceso de homogeneización y estimación de datos faltantes para las 12 estaciones de la SZH, el software R generó una matriz de datos con los datos homogeneizados y estimados para cada una de estas para el periodo de 1990 – 2022. Es importante mencionar que, aunque el periodo de estudio es 2021 – 2022, en el proceso de homogenización y datos faltantes se incluyeron datos desde el año 1990, esto con el fin de que Climatol cuente con un tamaño de muestra que le permita identificar el régimen de precipitación diario de las estaciones y logre estimar los datos faltantes de forma acertada.
Además, otro de los productos generados por esta librería corresponde a un documento tipo PDF donde se detallan características de las series de tiempo, como por ejemplo la presencia de datos faltantes (Figura 20) por estación en el periodo de estudio.

Figura 20

Disponibilidad de datos diarios de precipitación para cada estación (1990-2022)



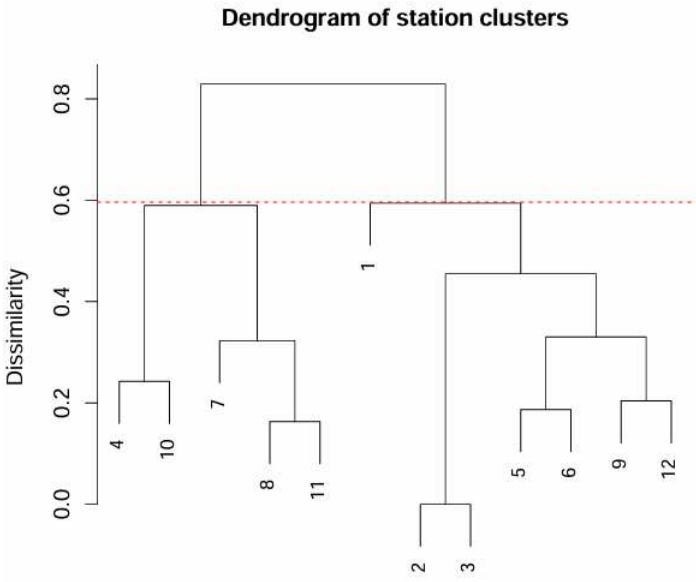
Fuente: RStudio (2024)

Por medio de la Figura 20 es posible evidenciar que la estación 7 - Primavera La [35020340] es aquella que presenta mayor cantidad de datos faltantes, no obstante, la mayoría de las estaciones disponen de una cantidad aceptable de datos.

Ahora, frente a los conglomerados de estaciones generados (Estaciones vecinas) para la estimación de datos faltantes, el programa género dos de ellos, esto teniendo en cuenta la similitud en los patrones de las series de precipitación (Figura 21).

Figura 21

Conglomerados de estaciones vecinas

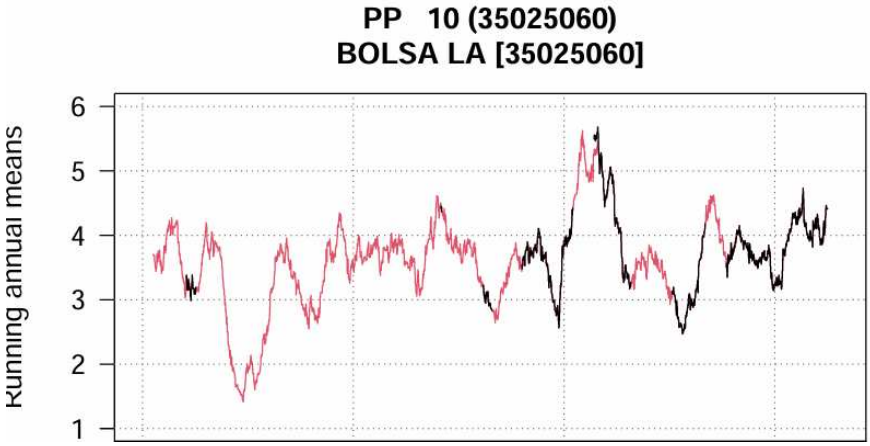


Fuente: RStudio (2024)

Igualmente, la librería genera gráficos que permiten identificar las secciones en las que la serie temporal experimentó cambios, ya sea debido a la homogeneización de datos o a la estimación de valores faltantes. Estas características se pueden observar en las figuras 22 y 23, donde la línea roja representa la serie original de datos y las secciones resaltadas en negro corresponden a las áreas que han sido homogeneizadas o en las que se han estimado datos faltantes. Los gráficos para las estaciones restantes se encuentran en el Anexo 5.

Figura 22

Serie de tiempo de precipitación diaria ajustada para la estación 35025060 (1990 - 2022)

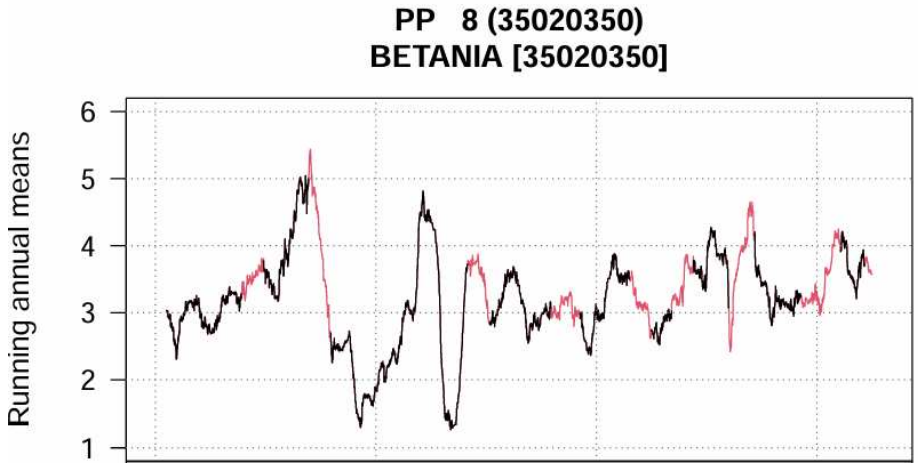


Fuente: Autor (2024)

Asimismo, algunas estaciones muestran que su serie de tiempo se vio altamente transformada, a diferencia de la estación BOLSA LA [35025060], la estación BETANIA [35020350] experimentó un mayor número de ajustes (Figura 23)

Figura 23

Serie de tiempo de precipitación diaria ajustada para la estación 35025350 (1990 - 2022)



Fuente: Autor (2024)

Asimismo, la librería proporciona un archivo de salida en formato CSV que contiene las anomalías que ha ajustado. También incluye otro archivo que indica el tratamiento aplicado a cada dato: 0 para datos observados, 1 para datos homogeneizados y 2 para datos estimados.

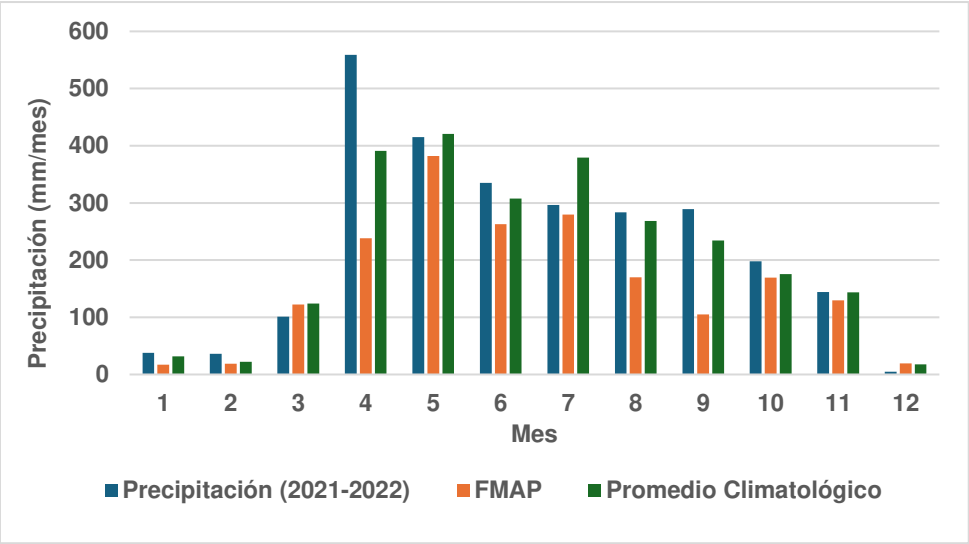
7.2. Verificación de la Precipitación media areal pronosticada (FMAP)

7.2.1. Método Visual

El diagrama de barras de precipitación para la estación del IDEAM y el sistema brinda un primer vistazo a la correspondencia entre lo observado y lo pronosticado, allí se observa en primer lugar que la estación registra un régimen unimodal con abril y mayo como los meses de mayor precipitación, a lo que responde asertivamente el sistema (Figura 24). Del mismo modo, a nivel mensual, presenta una buena afinidad con las épocas secas y de transición en la cuenca. Además, los datos mensuales promedio de las estaciones para 2021-2022 y del pronóstico del sistema presentan una correlación de 0.828, lo que confirma la afinidad mencionada anteriormente

Figura 24

Diagrama de barras para la precipitación media mensual observada y pronosticada para la cuenca 26 (2021 - 2022) - Estación Morichal [3502500006]



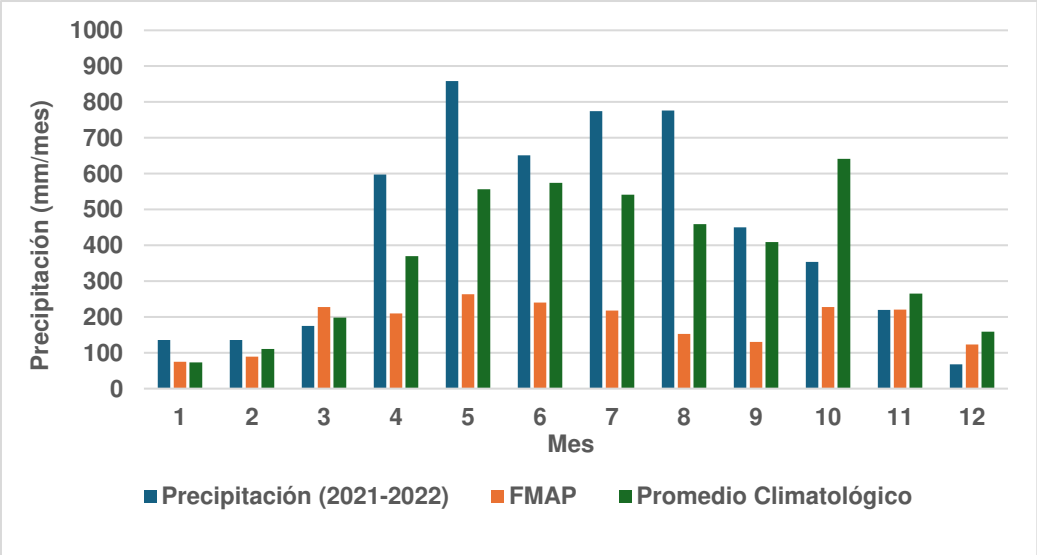
Fuente: Autor, 2024.

Respecto a la climatología de la zona, es posible evidenciar que la precipitación de los años 2021 - 2022 fue mayor a la precipitación mensual histórica, que para esta estación registra datos desde el año 1975. Igualmente, la correlación de estas dos variables corresponde a 0.93, lo que nos indica que la climatología de la zona es representada y reproducida adecuadamente

Por otra parte, para la cuenca 21 (Figura 25), se identifica un patrón cuasi unimodal característico de la zona (ANLA, 2021), con los valores más altos de precipitación hacia el mes de mayo y agosto. Respecto a la correlación de las series de tiempo, esta presenta un valor de 0.54 el cual indica una leve afinidad de las dinámicas de precipitación entre lo pronosticado y observado.

Figura 25

Diagrama de barras para la precipitación media mensual observada y pronosticada para la cuenca 21 (2021 - 2022) - Estación Susumuco [35020020]



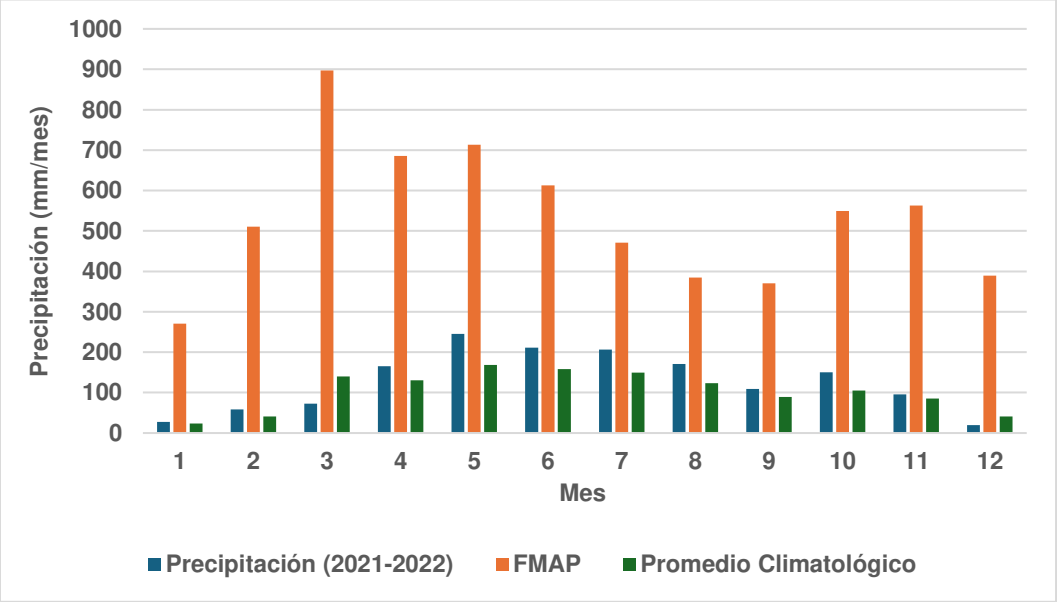
Fuente: Autor, 2024

Además, es posible evidenciar que existe una subestimación general de la cantidad de lluvia, posiblemente debido a que la estación se encuentra en la zona media de la cuenca, donde se presenta el máximo de precipitaciones, allí la Cordillera Oriental ejerce como forzante orográfico, favoreciendo el ascenso de las masas de aire húmedo provenientes de la Orinoquía y la Amazonía. (Cormacarena, 2019).

Finalmente, se presenta la cuenca 5, ubicada sobre la cordillera oriental, que muestra un régimen unimodal donde los meses predominantes son mayo y junio (Figura 26). En contraste, en el sistema, los meses de mayor precipitación se sitúan en marzo y abril. Además, es evidente que el sistema no refleja de manera consistente la secuencia de precipitación observada, lo que se traduce en una baja correlación. Adicionalmente, es posible evidenciar sobreestimación, esto puede estar relacionado con que la estación se ubica en la zona alta de la cuenca. Las gráficas de barras para las demás cuencas evaluadas se encuentran en el Anexo 3.

Figura 26

Diagrama de barras para la precipitación media mensual observada y pronosticada para la cuenca 5 (2021 - 2022) - Estación Fomeque [35020290]

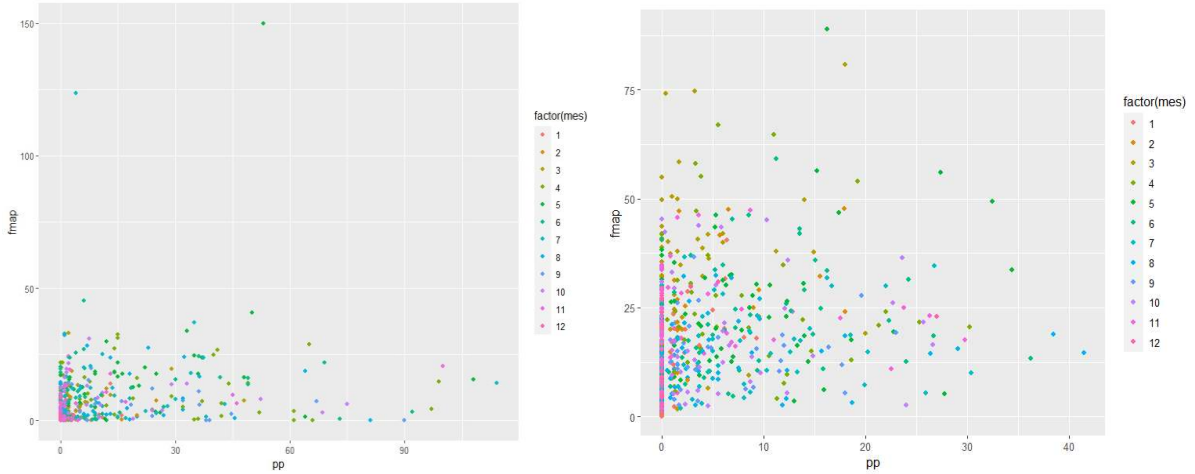


Fuente: Autor, 2024.

Otra de las formas de realizar una inspección visual de los datos es por medio del uso de gráficos de regresión lineal, el cual permite visualizar la relación entre dos variables y determinar si hay una tendencia lineal evidente, cada punto en el gráfico representa un par de valores observados y predichos, además, permite observar si existe la tendencia del sistema de subestimar o sobrestimar la precipitación. A continuación, se presenta el resultado de gráficos de regresión lineal para 2 cuencas.

Figura 27 y 28

Gráficos de dispersión lineal para la Cuenca 5 (izquierda) y la Cuenca 26 (Derecha) periodo 2021 - 2022



Fuente: Autor (2024)

Para el gráfico de la izquierda (Cuenca 5) se presenta una nube de puntos hacia la parte inferior, representando que los valores pronosticados fueron menores a los observados, allí la precipitación fue subestimada, por otra parte, el gráfico de la derecha (Cuenca 26) representa una tendencia hacia la parte inferior izquierda, esto se debe a que los valores observados son menores a los pronosticados, es decir, el sistema tiende a sobreestimar la precipitación.

7.2.2 Verificación por Variables Continuas

- **Correlación de Spearman**

Como se ha mencionado anteriormente, la correlación de Spearman mide que tan bien las variaciones de los datos se ajustan a una relación lineal; es decir que una correlación significativa indica que el sistema está capturando adecuadamente las tendencias y variaciones de los datos observados. Las cuencas con mayor correlación corresponden a las cuencas 26, 5, 21 y 13, en orden consecutivo, haciendo énfasis en la cuenca 26 con una correlación de 0,620. Mientras que, las cuencas 14, 18, 12 y 1 son aquellas que presentan el menor desempeño para esta métrica, en ellas la precisión y fiabilidad del pronóstico es baja. En la siguiente tabla se observan los valores de correlación para cada una de las cuencas (Tabla 7).

Tabla 7

Correlación de Spearman en cada cuenca (2021 - 2022)

Cuenca	1	2	5	6	11	12	13	14	18	19	21	26
Correlación de Spearman	0,131	0,151	0,357	0,225	0,249	0,118	0,273	0,045	0,086	0,141	0,345	0,620

Fuente: Autor (2024).

- **Raíz del Error Cuadrático Medio**

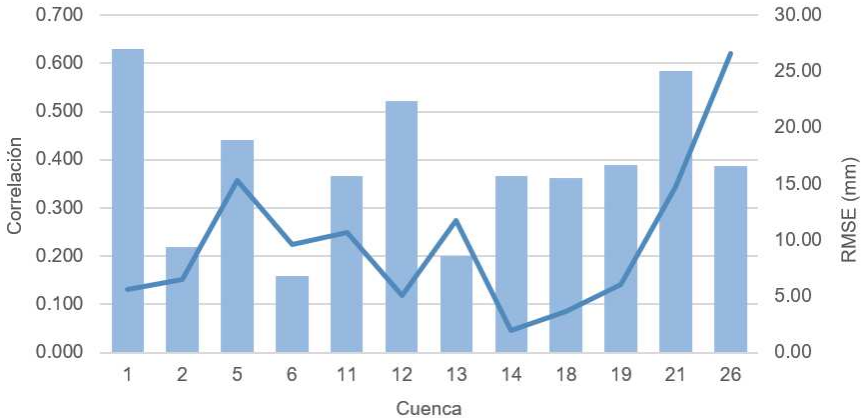
La raíz del error cuadrático medio (RMSE) promedio para el periodo de estudio (2021-2022) es de 16.50 mm, lo que indica que, en promedio, el pronóstico de precipitación difiere en 16.50 mm del valor observado. Es importante tener en cuenta que este valor puede representar tanto una subestimación como una sobreestimación, dependiendo de la cuenca en consideración.

Entre las cuencas evaluadas, se destacan algunas diferencias significativas en el pronóstico. Las cuencas 1, 12 y 21 muestran las mayores discrepancias, mientras que las cuencas 2, 6 y 13 (Parte alta de la cordillera oriental) exhiben mejor desempeño en términos de esta métrica. Es notable el rendimiento de la cuenca 6, que registra un RMSE promedio anual de 6.77 mm, indicando una mejor precisión en sus pronósticos de precipitación (Figura 29).

Ahora, al considerar la relación entre la correlación de Spearman y el RMSE, es importante mencionar que estas no siempre evidencian una correspondencia, ya que mientras la primera mide el grado de asociación entre los datos observados y pronosticados, el RMSE cuantifica la magnitud del error de pronóstico, por lo tanto, es posible encontrar cuencas con una correlación significativa y un alto error, como sucede en la cuenca 21, la cual presenta un valor de correlación de 0.345 y un RMSE de 25.04 mm (promedio anual 2021 - 2022). En un caso ideal, un pronóstico fiable es aquel que tiene una alta correlación y un bajo RMSE.

Figura 29

Raíz del Error Cuadrático Medio - RMSE (mm) para cada cuenca evaluada (2021 - 2021)



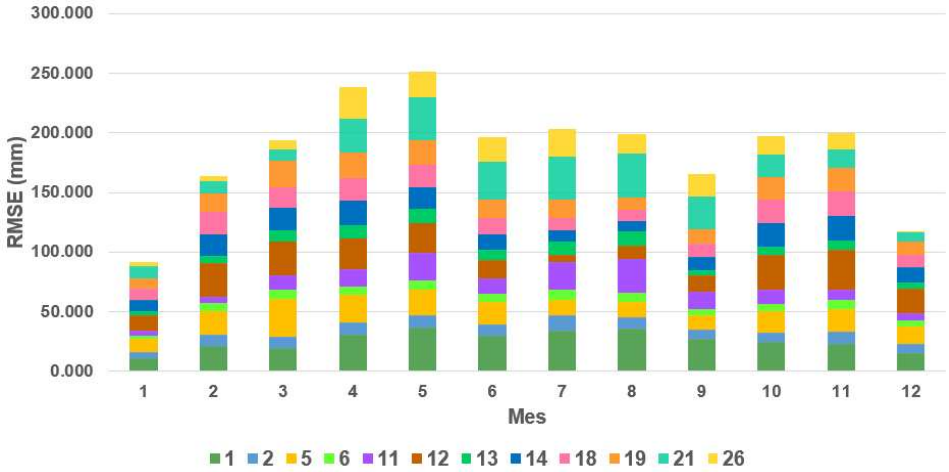
Fuente: Autor (2024)

A continuación, se muestra un gráfico de columnas apiladas (Figura 30) que representa el RMSE por mes y el aporte de error de cada cuenca. Este gráfico permite identificar claramente

los meses y cuencas que presentan un mayor error. Se observa que los niveles más altos de error se producen durante los meses de abril y mayo, mientras que el periodo de diciembre a enero muestra un error significativamente menor. Este patrón coincide con la estacionalidad de lluvias en la zona, lo que evidencia que el error tiende a aumentar durante la época lluviosa. Al igual que en la figura 29, las cuencas que más contribuyen al RMSE son la cuenca 1 y la cuenca 21.

Figura 30

RMSE por mes y por cuenca (2021-2022)



Fuente: Autor (2024)

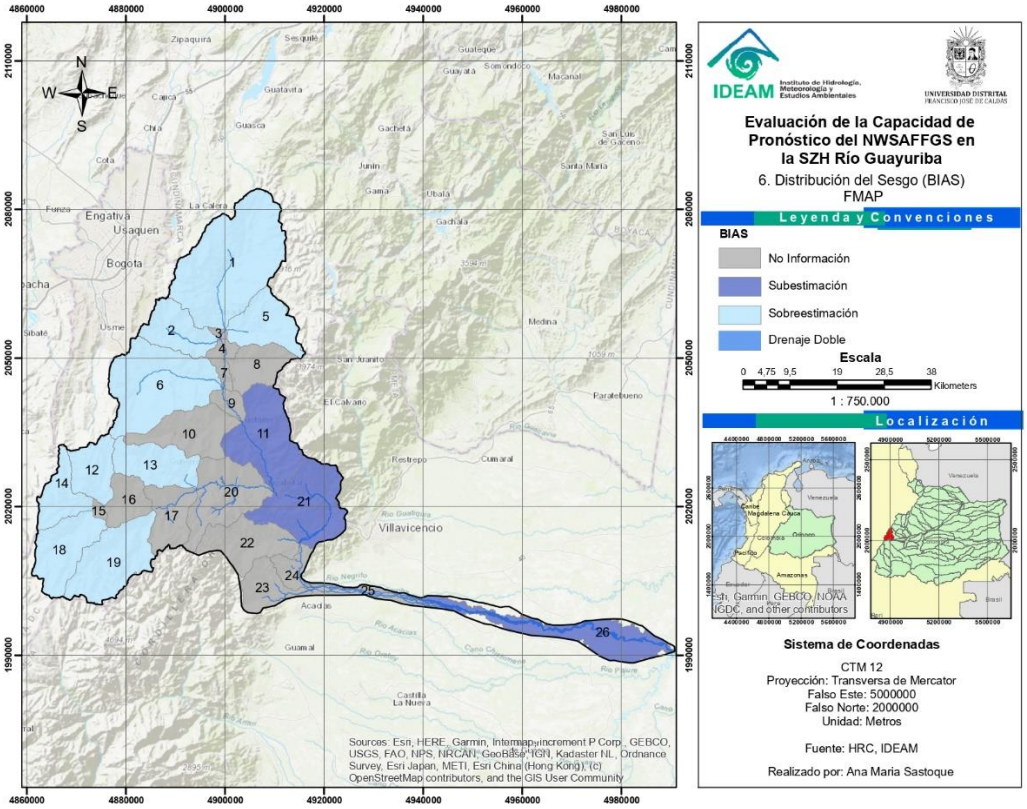
Además, es posible evidenciar que las cuencas tienen mayor o menor RMSE a lo largo de los meses, un ejemplo de ello es la cuenca 12 (tono café) la cual presenta un valor bajo en los meses Jul-Ago y un RMSE mayor en los meses octubre- noviembre. A pesar de estas particularidades, la época de abril - mayo es aquella con mayor error en el pronóstico

- **BIAS (Sesgo)**

Al calcular el BIAS, fue posible determinar que, en 9 de las 12 cuencas evaluadas, el sistema está sobreestimando la precipitación. Esto se debe a que una diferencia negativa entre los valores observados y pronosticados indica una estimación mayor a lo observado, mientras que una diferencia positiva indica una subestimación, es decir, que el valor observado es menor al pronosticado.

Figura 31

Mapa de la distribución del BIAS en la SZH Río Guayuriba (2021 - 2022)



Fuente: Autor (2024)

La figura 31 ilustra la distribución del BIAS en la SZH. En ella, se observa que las cuencas al norte y al este de la cuenca muestran una sobreestimación en el pronóstico, mientras que las cuencas ubicadas hacia el oriente de la SZH muestran una subestimación. Se puede afirmar que la sobreestimación ocurre en la zona más alta de la vertiente oriental de la cordillera oriental, a una altitud de aproximadamente 2400 - 3400 metros sobre el nivel del mar.

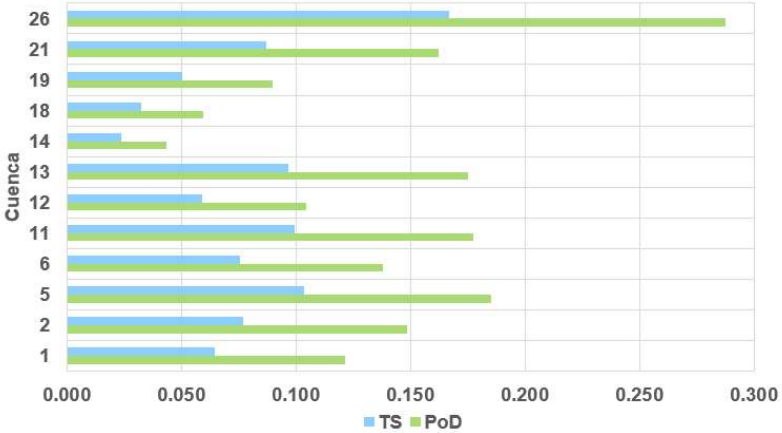
7.2.3 Verificación por Tablas de Contingencia

A partir de la creación de tablas de contingencia se identificó el puntaje por cuenca de la Probabilidad de Detección (PoD), la Tasa de Falsas Alarmas (FAR) y el Índice de Amenaza (TS), también llamado Índice Crítico de Aciertos (CSI). Allí se puede identificar que el valor promedio para el TS es de 0.070, siendo ideal un valor de 1. Las cuencas con mejor desempeño corresponden a la 26, 5 y 11.

Figura 32 y 33

Probabilidad de detección (PoD), Tasa de Falsas Alarmas (FAR) e Índice de Amenaza (TS) por cuenca de análisis (2021 - 2022)

CUENCA	PoD	FAR	TS
1	0.122	0.878	0.065
2	0.149	0.863	0.077
5	0.185	0.810	0.103
6	0.138	0.857	0.075
11	0.177	0.816	0.099
12	0.105	0.882	0.059
13	0.175	0.823	0.097
14	0.043	0.949	0.024
18	0.060	0.934	0.032
19	0.090	0.897	0.050
21	0.162	0.842	0.087
26	0.288	0.716	0.167
Promedio	0.128	0.868	0.070



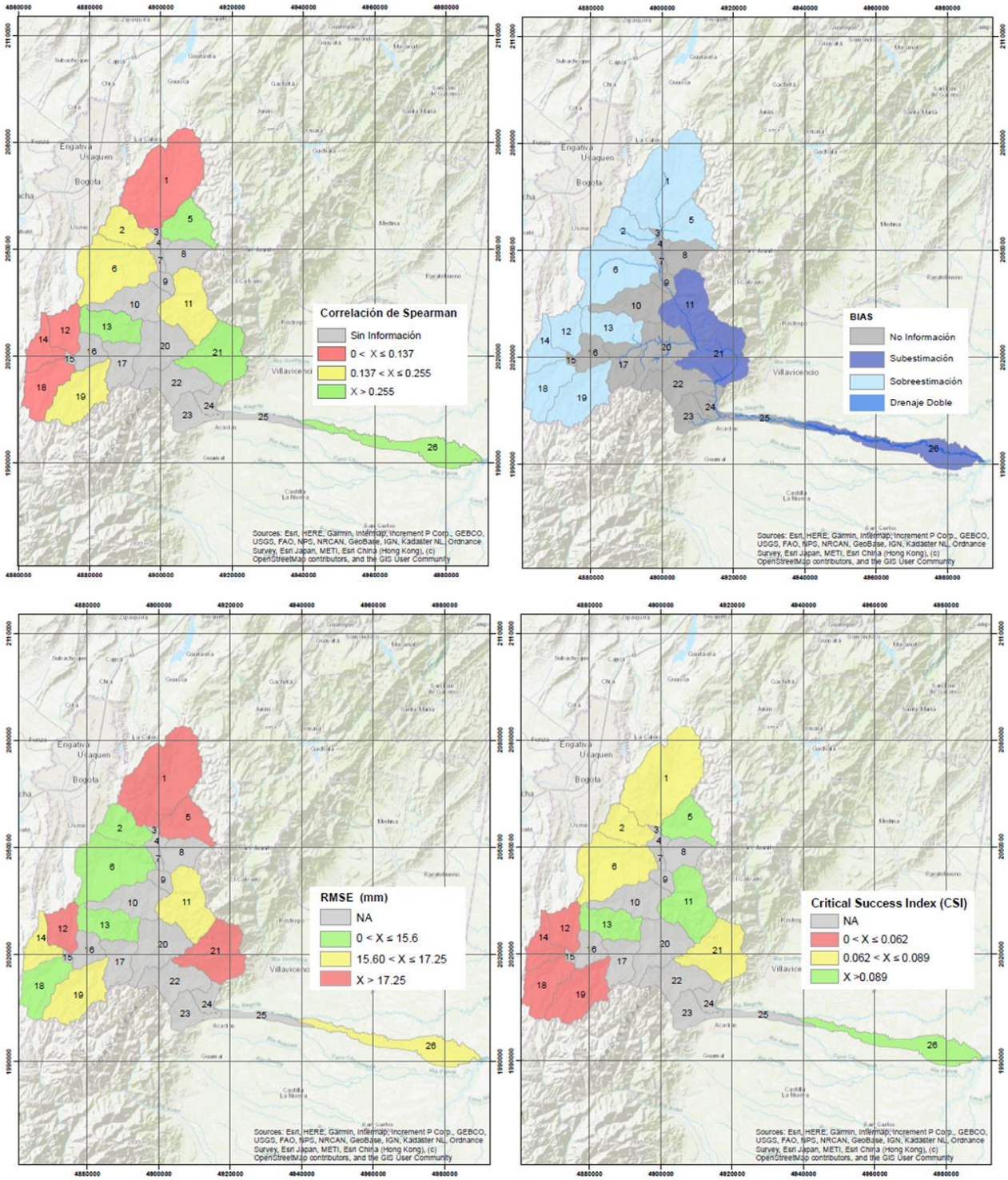
Fuente: Autor (2024)

Los valores bajos de la Probabilidad de Detección (PoD) y el Índice de Amenaza (TS), pueden estar relacionados, como se mencionó en la metodología, las tablas de contingencia categóricas utilizadas en este trabajo, toman en cuenta únicamente los eventos de lluvia extremos, los cuales se encuentran por encima del percentil 90. Para que se dé un acierto (Hit), el valor pronosticado no solo debe corresponder con el día del evento observado, sino que también debe corresponder en magnitud a un evento categorizado como extremo. Además, el bajo valor de TS puede atribuirse a la alta tasa de falsas alarmas considerada por el sistema; esto se debe a la tendencia del sistema a sobreestimar no solo la frecuencia, sino también la intensidad de la precipitación.

Como resultado de los procesos de verificación cuantitativa, se generaron mapas de distribución de diversas métricas para el área de estudio (Figura 24), entre ellas la Distribución de la Correlación de Spearman (COR), Sesgo (BIAS), Raíz del error cuadrático medio (RMSE) e Índice crítico de aciertos (CSI). Allí, se observa que la cuenca 26, situada en el municipio de Villavicencio, presenta el mejor desempeño general. Por otro lado, las cuencas ubicadas en la parte más alta de la vertiente oriental de la cordillera presentan una calidad de pronóstico inferior. A su vez se resalta la marcada tendencia del BIAS de mostrar sobreestimación en la parte más alta de la cuenca y subestimación en la zona de la cuenca media y baja del Río Guayuriba. Por último, es importante destacar que el desempeño de una cuenca puede variar dependiendo del método de verificación utilizado; en consecuencia, una cuenca puede mostrar un buen desempeño en un método y un rendimiento inferior en otro.

Figura 34

Distribución de la Correlación de Spearman (COR), Sesgo (BIAS), Raíz del error cuadrático medio (RMSE) e Índice crítico de aciertos (CSI) para la SZH Río Guayuriba



Fuente: Autor (2024)

En resumen, el producto FMAP logra detectar las tendencias en el régimen de precipitaciones de la zona. Sin embargo, en su mayor parte, tiende a sobrepronosticar, lo que conlleva a una elevada tasa de falsas alarmas respecto a eventos meteorológicos extremos. Por consiguiente, se requieren mejoras significativas para su aplicación efectiva en procesos de planificación y toma de decisiones relacionadas con la gestión del riesgo.

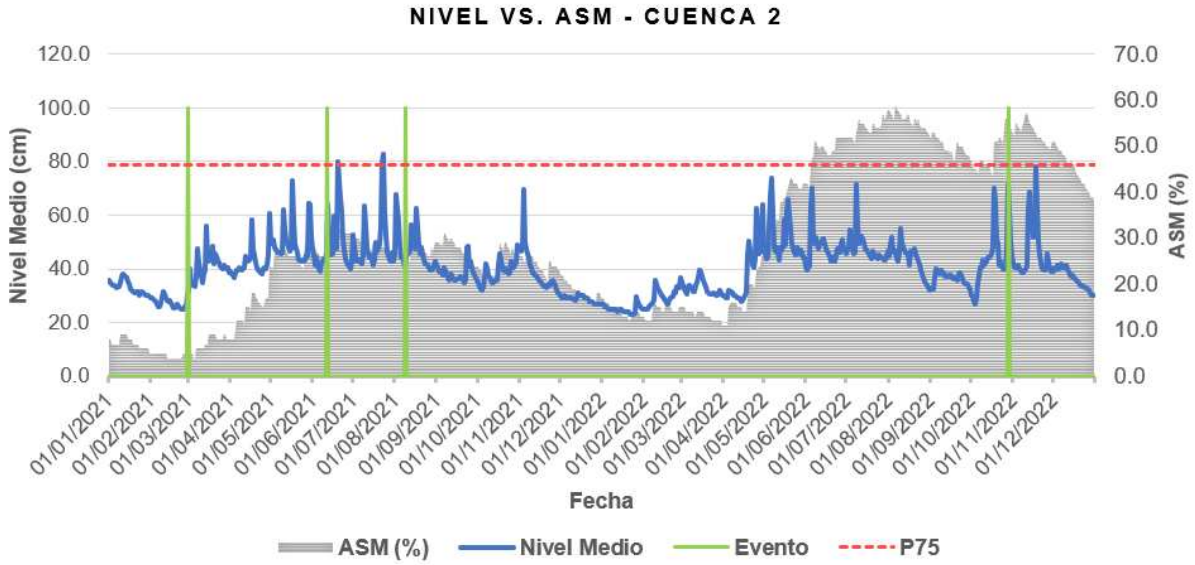
7.3. Verificación del producto Humedad Promedio del Suelo (ASM)

7.3.1. Método Visual

Al realizar gráficos de líneas para las series de nivel, junto al ASM pronosticado y los eventos reportados de atención a emergencias de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo (UNGRD), es posible evidenciar la distribución temporal de los eventos y su relación con un aumento de nivel y humedad del suelo. A continuación, se presentan los diagramas para ASM - Nivel para dos cuencas.

Figura 35

ASM vs. Nivel Medio para la Cuenca 2 (2021 - 2022) - Estación Llano Largo [35027220] sobre la Quebrada Idaza

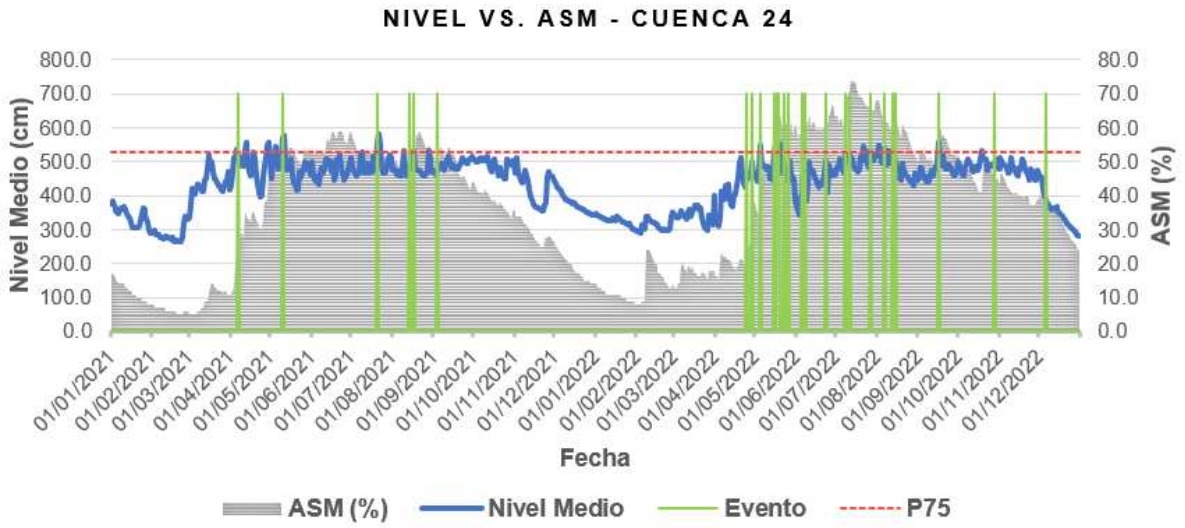


Fuente: Autor (2024)

En el primer evento de inundación registrado en marzo de 2021, el porcentaje de saturación del ASM estaba por debajo del 20%, ya que correspondía a la época seca. Este evento marcó el inicio del aumento de los niveles. Respecto a los otros dos eventos ocurridos en 2021, el nivel de ASM era relativamente alto, aunque no superaba el límite del percentil 75, lo que indica que las condiciones del suelo no estaban completamente saturadas. En cuanto a 2022, se observó una mejora en el pronóstico, ya que los porcentajes de saturación del ASM eran mayores; esto permitió detectar el evento registrado en noviembre de ese año, ya que el valor del ASM supera el umbral del percentil 75, lo que permite predecir un posible evento de crecida repentina.

Figura 36

ASM vs. Nivel Medio para la Cuenca 24 (2021 - 2022) - Estación Puente Carretera [35027140] sobre el Río Guayuriba.



Fuente: Autor (2024)

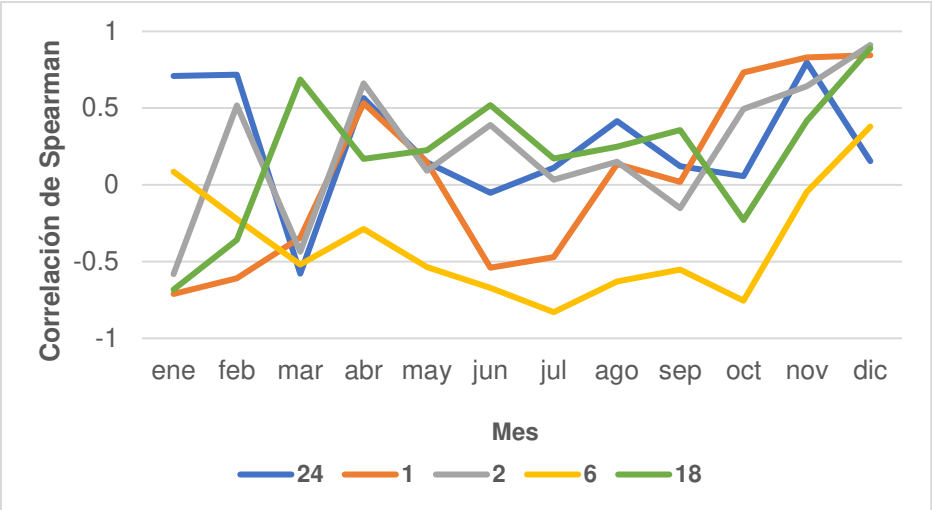
Ahora, con relación a la cuenca 24 (Figura 36), se observa que la humedad del suelo (ASM) responde de manera notable al aumento de los niveles hacia los meses de marzo y abril. Sin embargo, hacia mayo, los niveles de agua tienden a disminuir, mientras que la humedad del suelo se mantiene constante. Este fenómeno se debe a la capacidad de infiltración del suelo, que permite el paso y retención del agua a través de sus poros durante un tiempo (FAO, 2005). Resulta interesante notar que hacía mayo de 2022 se inició una serie de eventos de inundación, muy cercanos entre sí, y que el ASM respondió de manera acertada a estos eventos, esto se evidencia en que superó el límite del percentil 75 (línea roja) y se mantiene por encima de este desde junio hasta finales de septiembre, indicando condiciones húmedas en la cuenca. Del mismo modo, se observa una superación del percentil 75 hacia septiembre de 2021, días posteriores a dos eventos de inundación.

7.3.2. Correlación de Spearman

Adicionalmente, se realizó el análisis de la variabilidad de la correlación de Spearman entre la humedad del suelo y los niveles diarios medios, por mes para cada cuenca (Figura 37). En este no se identifica ningún patrón de comportamiento a nivel espacial o temporal de las variables de precipitación o niveles dentro de la cuenca. Es posible identificar que en algunos meses la correlación puede ser positiva y en otros negativa.

Figura 37

Correlación de Spearman mensual. Periodo 2021 - 2022



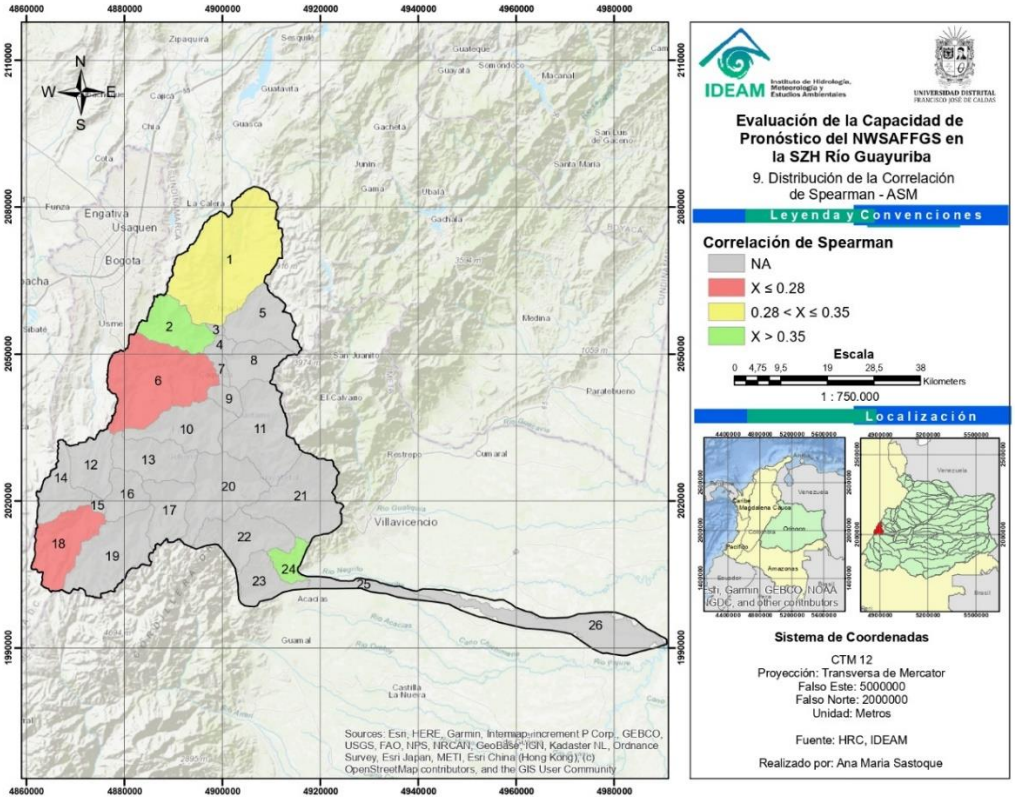
Fuente: Autor (2024)

7.3.2.1. Método de Percentiles

Luego de clasificar la correlación de Spearman por medio del método de percentiles (Bajo, Medio, Alto) - Anexo 9, se determinó que a nivel temporal la época con mejor desempeño corresponde a la época seca (nov – dic), mientras que la época de lluvia que es la de menor desempeño, esto causado por la saturación del suelo como se mencionó anteriormente. En cuanto a la distribución espacial de la correlación (Figura 38), se observa que las mejores cuencas son la 2 y la 24. No se evidencia un patrón espacial significativo que diferencie entre un alto o bajo desempeño dentro de la SZH.

Figura 38

Mapa de la distribución de la correlación de Spearman para Nivel Medio Diario - ASM (2021 - 2022)



Fuente: Autor (2024)

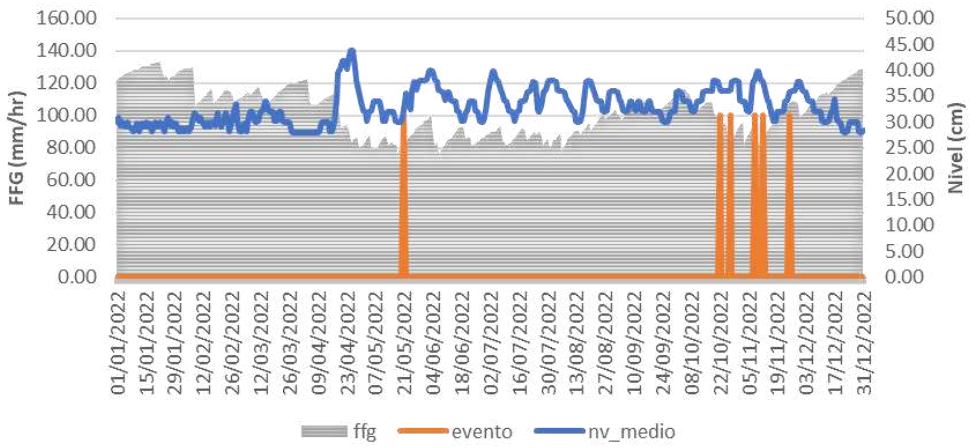
7.4. Verificación del producto de Guía de Crecida Repentina (FFG)

7.4.1. Método visual

A través de los gráficos de nivel y FFG, se puede observar la relación inversa entre el producto FFG y el nivel del agua. Esto se debe a que cuando los niveles son bajos, el FFG puede alcanzar valores altos, ya que existe una baja probabilidad de desbordamiento. Es importante recordar que el valor de FFG representa la precipitación necesaria para provocar un desbordamiento a la salida de la cuenca. Este fenómeno se puede apreciar con mayor detalle en la cuenca 1 (Figura 39) durante el mes de 2021, donde se observa un aumento en los caudales y ahora el valor de FFG se sitúa por debajo de estos.

Figura 39

ASM vs. Nivel Medio para la Cuenca 1 (2021) - Estación Quebrada Rincón [35027500] sobre la Quebrada Rincón.



Fuente: Autor (2024)

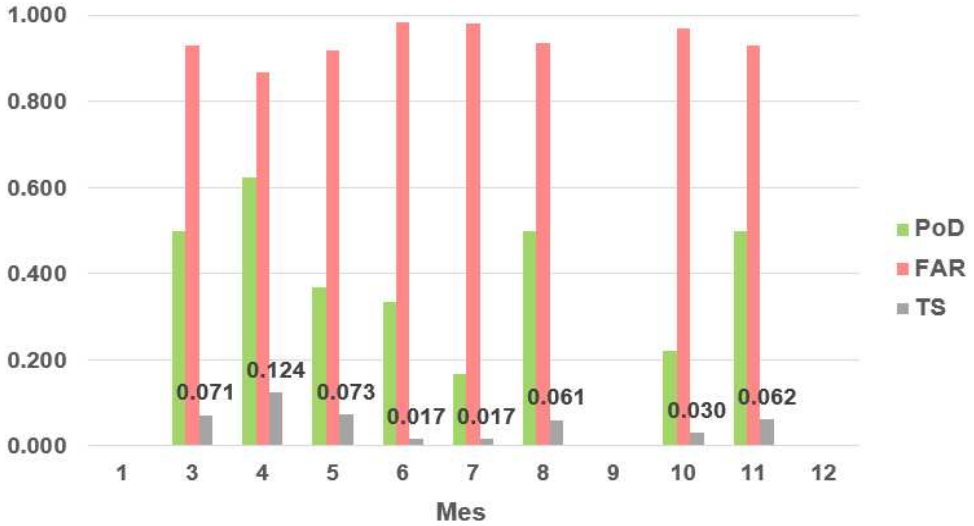
Respecto a las variables utilizadas en la figura 39, el valor de crecida repentina es nombrado *ffg* (mm/hr), los niveles medios diarios (cm) como *nv_medio y* los reportes de eventos de *inundación* como evento.

7.4.2. Tablas de Contingencia

Tras haber realizado las tablas de contingencia por mes y por cuenca (Anexo 10), se obtuvieron los resultados de las métricas Probabilidad de Detección (PoD), Tasa de Falsas Alarmas (FAR) e Índice Critico de Aciertos (CSI/TS), se identificó que el mes con el mejor desempeño es abril, con un TS de 0.124 (Figura 40). Además, se observó que los meses con mayor cantidad de eventos no son necesariamente aquellos en los que el sistema tiene un mejor desempeño, ya que mayo y octubre fueron los meses con más eventos. Por otra parte, se destaca que abril presenta la mayor probabilidad de detección, ya que el sistema pronosticó correctamente 4 de los 7 eventos que ocurrieron en este mes.

Figura 40

Distribución del PoD, FAR y TS en cada mes (2021 - 2022) para el producto de FFG

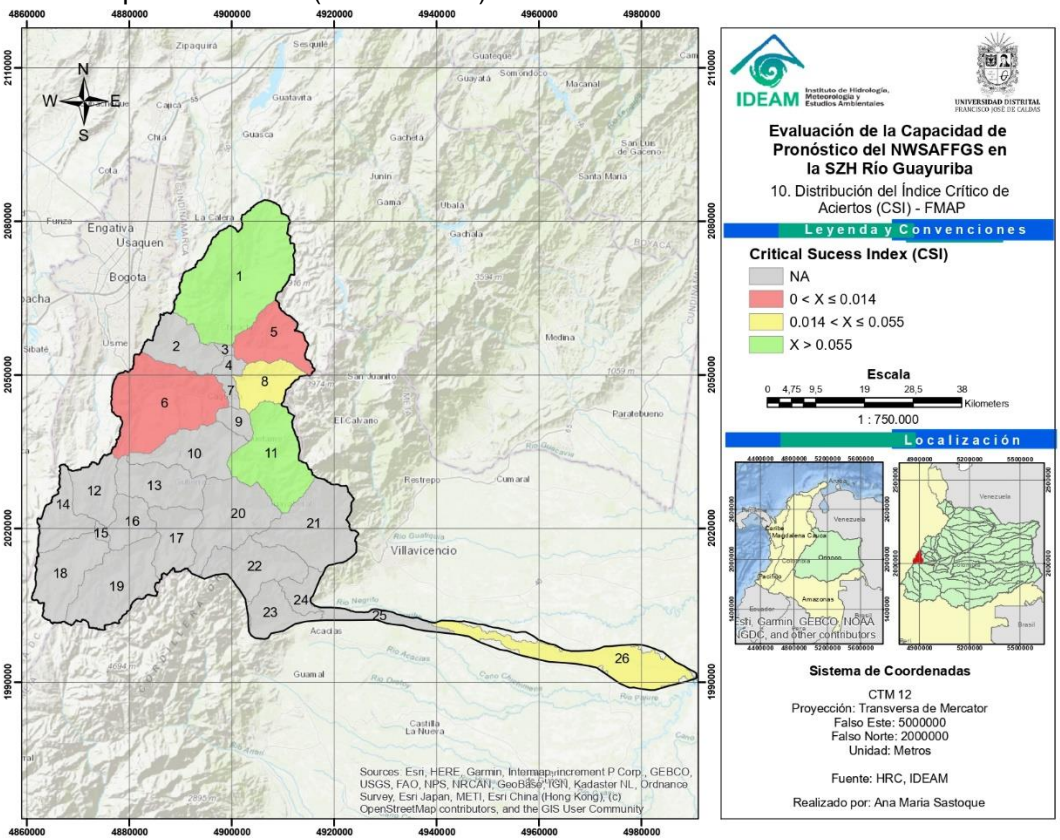


Fuente: Autor, 2024.

Por otra parte, los meses que no registran ninguna de las métricas es debido a que en esos meses la ocurrencia de eventos fue baja o nula (enero, septiembre y diciembre), y el sistema no logró pronosticar ninguno, lo que imposibilita la generación de las métricas mencionadas. Por último, en cuanto a la distribución espacial del Índice Crítico de Aciertos (CSI), se destaca que las cuencas 1 y 11 muestran el mejor desempeño, mientras que las cuencas 6 y 5 exhiben el menor desempeño (Figura 41). A su vez, al igual que en las métricas calculadas en los otros productos del sistema, no se observa un patrón espacial atribuible a los regímenes de precipitación o altitud en cada cuenca que afecten el desempeño de las mismas.

Figura 41

Distribución espacial del CSI (2021 - 2022)



Fuente: Autor (2024)

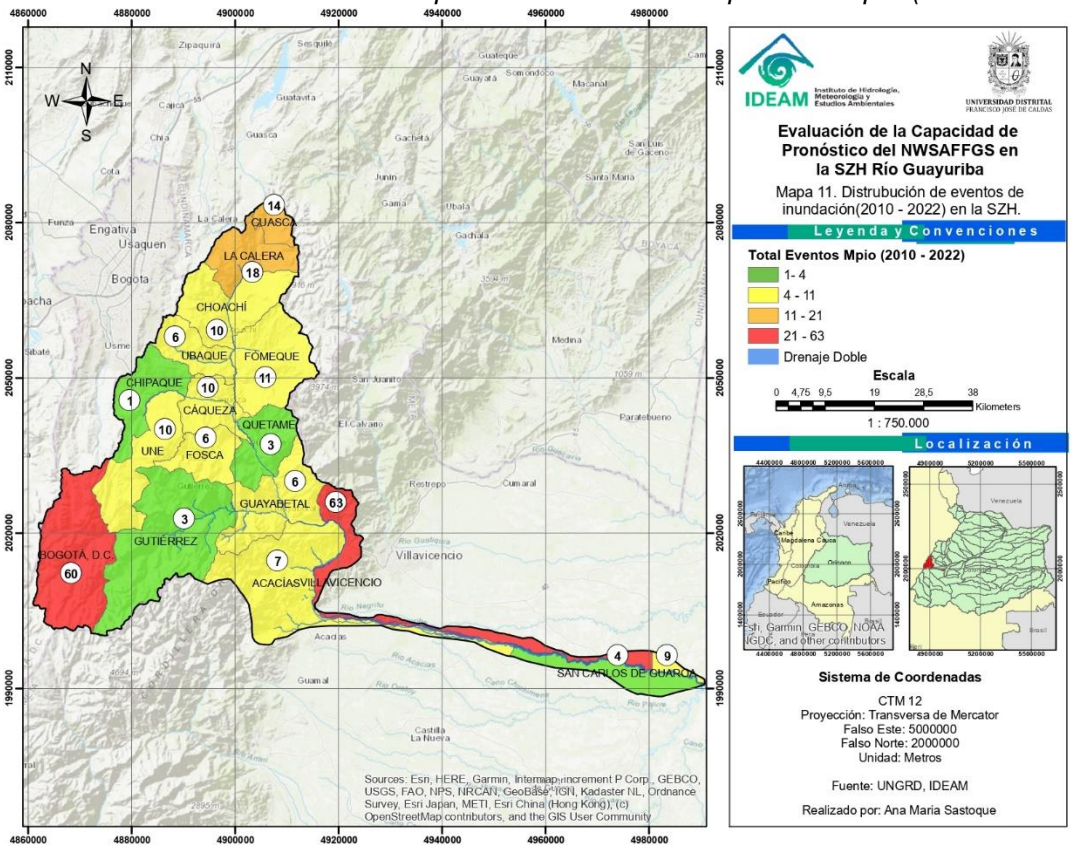
Es importante mencionar que el promedio de la probabilidad de detección (PoD) para las cuencas analizadas es de 0.34. Esto significa que, de 100 eventos ocurridos, el sistema es capaz de predecir 34 de ellos en el día exacto de su ocurrencia.

7.5. Resultados con relación al ordenamiento del territorio

Con el objetivo de relacionar el pronóstico de eventos extremos de inundación con el ordenamiento del territorio, en primer lugar, se genera un mapa que permita evidenciar la ocurrencia de eventos por municipio en la última década (Figura 42).

Figura 42

Distribución de eventos de crecidas repentinas e inundación por municipio (2010 - 2022)



Fuente: CNM, IDEAM

Los municipios de Bogotá y Villavicencio son los que registran el mayor número de eventos de inundación, con 60 y 63 eventos respectivamente. Como se destacó en el marco teórico, el conocimiento del riesgo constituye un pilar fundamental de su gestión. En este sentido, el FFGS se posiciona como un recurso clave para conocer el riesgo; pero para que ello sea posible; implica evaluar la precisión y exactitud del sistema en las áreas con mayor riesgo de inundaciones y crecidas repentinas.

La cuenca 26, que abarca parte del municipio de Villavicencio, demostró un desempeño medio-alto en la mayoría de los productos y métricas evaluadas. Esto sugiere la posibilidad de integrar los pronósticos del FFGS en estrategias de gestión del riesgo y planificación territorial adecuada, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de las poblaciones (elemento expuesto) ante este tipo de eventos hidrometeorológicos.

Con relación a la incidencia del sistema en la construcción del POMCA del Río Guayuriba, se presenta uno de los proyectos relacionados con la gestión del riesgo dentro de la etapa de formulación (Figura 43).

Figura 43

Proyecto 4.1. Seguimiento, monitoreo y generación de conocimiento de amenaza.

Medida administrativa	Proyecto	Relación SNGRD/PNGR/ MA SENDAI
Seguimiento de amenazas naturales	4.1	SNGRD – Conocimiento MA Sensai – Conocimiento y Adaptación
Instrumentación y monitoreo de niveles de agua de ríos, precipitaciones para prever inundaciones, deslizamientos detonados por lluvia y avenidas torrenciales		
Establecimiento de sistemas de alertas tempranas articulando instituciones y comunidades con puntos de seguimiento y un centro de monitoreo		

Fuente: Adaptado de POMCA Río Guayuriba, etapa de formulación por Cormacarena, 2019.

Dentro de este programa se encuentra el proyecto 4.1, titulado "Seguimiento, Monitoreo y Generación de Conocimiento de Amenazas"; como se puede observar, una de las medidas administrativas propuestas se relaciona con el establecimiento de sistemas de alerta temprana. Es importante destacar que el NWSAFFGS no constituye un sistema de alerta en sí mismo, sino que actúa como un insumo que contribuye a la toma de decisiones y a la emisión de alertas sobre el riesgo, en especial en las zonas de la cuenca con alto potencial de ocurrencia de inundaciones y avenidas torrenciales.

8. CONCLUSIONES

Conclusiones generales

- La subzona hidrográfica priorizada corresponde a la SZH Río Guayuriba, sobre la zona hidrográfica del Orinoco.

- El sistema presenta mejor desempeño general en las épocas secas y de transición.

- El sistema logra detectar los patrones temporales de precipitación en la SZH, sin embargo, al sobreestimar los eventos extremos se requieren mejoras significativas para su aplicación efectiva en procesos de planificación y toma de decisiones relacionadas con la gestión del riesgo.

- Se observa una fuerte relación entre el inicio de la temporada de lluvias en la cuenca y la ocurrencia de eventos, especialmente hacia los meses de abril y mayo. No obstante, también se registran eventos durante la época seca, aunque en menor cantidad.

Respecto a la verificación del producto FMAP se tienen las siguientes conclusiones:

- La precipitación tiende a ser sobreestimada para 8 de 12 cuencas evaluadas, esta sobreestimación se da sobre la mayor altitud de la cuenca en la parte alta de la vertiente oriental de la cordillera oriental.

- Las épocas de lluvia, en especial en el periodo de abril - mayo, se caracterizan por tener el mayor error RMSE, mientras que en la época seca presentan el menor error.

- Las tablas de contingencia muestran que la sobreestimación produce una alta probabilidad de detección, sin embargo, también se produce una alta tasa de falsas alarmas.

- En general, la cuenca con mejor desempeño corresponde a la cuenca 26 sobre el municipio de Villavicencio.

- El producto FMAP logra detectar las tendencias en el régimen de precipitaciones de la zona. Sin embargo, en su mayor parte, tiende a sobrepronosticar, lo que conlleva a una elevada tasa de falsas alarmas respecto a eventos meteorológicos extremos.

Respecto a la verificación del producto ASM

- La sobreestimación de la precipitación en la época de lluvia produce sobreestimación de la humedad del suelo durante varios meses del año

- Al igual que en el producto de FMAP, la época seca es la que representa un mejor desempeño.

- Las cuencas con mejor desempeño para este producto corresponden a la cuenca 2 y 24, sobre los municipios de Ubaque y Acacias, mientras que la cuenca con menor desempeño corresponde a la cuenca 6 sobre el Río Cáqueza.

- Respecto a la distribución a través de los meses de la correlación de Spearman, no se identifica ningún patrón de comportamiento a nivel espacial o temporal de las variables de precipitación o niveles dentro de la cuenca

Respecto a la verificación del producto FFG

- La sobreestimación de los productos FMAP y ASM se relaciona con la alta tasa de falsas alarmas.

- El promedio de la probabilidad de detección es de 0.3, es decir, solo un 30 % de los eventos observados fueron pronosticados correctamente

- La época de lluvia (Abr – May) presenta un mejor desempeño que la época seca

- La cuenca con mejor desempeño corresponde a la cuenca 1 sobre los municipios de Choachí y La Calera, mientras que el menor desempeño se da en la cuenca 5 sobre el municipio de Fómeque

Frente al ordenamiento territorial

- Los municipios de Bogotá y Villavicencio se destacan por tener una alta frecuencia de eventos. Sin embargo, Villavicencio, al encontrarse en una zona de planicie y estar expuesto a los altos caudales del Río Guayuriba en la parte baja de la cuenca, aumenta su vulnerabilidad ante este tipo de eventos.

- Conforme el sistema FFGS sea refinado y mejore su precisión en la predicción de eventos extremos, podría ser empleado como insumo para el conocimiento y la gestión del riesgo en zonas de alta susceptibilidad y amenaza por inundaciones y crecidas repentinas.

- El punto de encuentro entre la emisión de alertas por crecidas repentinas y el ordenamiento territorial se encuentra en el conocimiento y gestión del riesgo contemplado en la etapa de formulación de los POMCA, donde se incluya el enfoque de la amenaza vinculada al elemento expuesto.

9. RECOMENDACIONES

- Evaluar la capacidad de pronóstico del sistema en otras subzonas hidrográficas con el objetivo de identificar fallas y aciertos en diferentes áreas hidrográficas del país.

- Se recomienda aumentar el número de estaciones y radares meteorológicos del IDEAM registrados en el Sistema Mundial de Telecomunicación (SMT) y el Sistema de Información de la OMM (WIS). Esto, junto con el mantenimiento de la red hidrometeorológica nacional, con ayuda de los procesos de homogenización, estimación de datos faltantes y verificación de la calidad, permitirá ampliar la cobertura geográfica, reduciendo las áreas sin monitoreo y mejorando la detección de fenómenos meteorológicos locales. Además, con una mayor cantidad de datos, el sistema podrá estimar con mayor precisión la intensidad y distribución espacial de la precipitación, mejorando la emisión de alertas de crecidas repentinas.

- Al vincular el registro histórico de eventos de inundación y crecidas repentinas de la UNGRD con los límites de alertas de la escala de colores del geovisor del FFGS, se podrían identificar mejor las características de humedad y precipitación en distintas regiones del país. Esto es crucial porque las condiciones no son uniformes en todo el territorio nacional; al diferenciar entre zonas, se podrían emitir niveles de alerta más precisos y específicos para cada área, mejorando así la eficacia de las advertencias y la respuesta ante emergencias.

10. BIBLIOGRAFÍA

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), 2019. REPORTE DE ANÁLISIS REGIONAL SZH DE LOS RÍOS Metica, Guatiquía, Guayuriba y Negro (SZH-MGGN). Recuperado de: https://www.anla.gov.co/documentos/biblioteca/21-09-2021-reporte-de-analisis-regional-rio-negro-6.pdf

Barrios, J., Ramos, M. y Bernal, N. (2021). Planificación ambiental, ordenamiento territorial y su relación con la precipitación: estudio de caso región climática Bajo Magdalena. En N. Bernal et al., Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones (pp. 95-166). Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Bernal, N., Barrios, J., Ramos, M., Velásquez, W. C., Beltrán, J., Ibarra, Y. y Velásquez, W. I. (2021). Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones. Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Bernal, N., Barrios, J. y Ramos, M. (2021). Homogenización de series mensuales de precipitación. En N. Bernal et al., Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones (pp. 19-94). Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

CAR, UNAL, 2018. Guía ilustrativa sobre Análisis de la Vulnerabilidad Territorial ante el Cambio Climático. Recuperado de: https://www.car.gov.co/uploads/files/5cc8af9bc943b.pdf

Centro Nacional de Prevención de Desastres - México (CENAPRED), 2004. INUNDACIONES. Recuperado de: https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/3FASCCULOINUNDACIONES.PDF

Céspedes M, 2022. Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia por eventos hidrometeorológicos e hidroclimáticos extremos. Recuperado de: https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/84268/An%C3%A1lisis%20GRD%20en%20Colombia_M.P_C%C3%A9spedesRomero_v2.pdf?sequence=4&isAllowed=y

Collaboration for Australian Weather and Climate Research (CAWCR), 2015. Verificación. Recuperado de: https://www.cawcr.gov.au/projects/verification/

Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial La Macarena – CORMACARENA, 2019. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Guayuriba (Código 3502).

Figueroa A y Camacho C, 2023. Consolidado de emergencias por inundación de la UNGRD en relación con las corrientes hidrográficas (2014-2023). Subdirección de Hidrología - IDEAM

Georgakakos, K, 2018. Descripción general del Sistema Guía para Crecidas Repentinas con cobertura mundial y su aplicación en todo el mundo. Boletín de La OMM, 67(1), 37–42.

Guijarro J, 2018. Homogeneización de series climáticas con Climatol. Recuperado de: https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/12185/1/homog_climatol-es.pdf

Hydrologic Research Center (HRC), 2019. Verification Guidelines for the Flash Flood Guidance System Component Products and Derivate Warnings. Recuperado de: https://www.hrcwater.org/wpcontent/uploads/2019/05/HRC_TechnicalReport102_20190505.pdf

Infobae, 2023. Tragedia en Quetame: Gobernador de Cundinamarca alerta al presidente Petro por otra zona de riesgo en el municipio. Recuperado de: https://www.infobae.com/colombia/2023/07/20/tragedia-en-quetame-gobernador-de-cundinamarca-alerta-al-presidente-petro-por-otra-zona-de-riesgo-en-el-municipio/

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2005. Atlas Climatológico de Colombia.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), s.f. Fews Colombia. Recuperado de: http://www.ideam.gov.co/web/agua/fews

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), s.f. Inundaciones. Recuperado de: http://www.ideam.gov.co/web/agua/inundaciones#:

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2022. Guía Diseño de la Red Hidrometeorológica Nacional. Recuperado de: http://sgi.ideam.gov.co/documents/412030/561097/M-GDI-HG001+GU%C3%8DA+DISE%C3%91O+DE+LA+RED+HIDROMETEOROL%C3%93GICA+NACIONAL+V2.pdf/e1a0a4f2-0faf-407c-8ad4-1d12a171680f?version=1.0

Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER), 2023. Caracterización General del Escenario de Riesgo por Avenidas Torrenciales. Recuperado de: https://www.idiger.gov.co/riesgo-por-avenidas-torrenciales#

Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER), 2016. Caracterización General del Escenario de Riesgo por inundación. Recuperado de: https://www.idiger.gov.co/rinundacion

Jiménez, M., 2014. Validación de la capacidad del sistema WRF “Weather Research and Forecasting” para pronosticar lluvia intensa, usando el método orientado a objetos y tablas de contingencia. Recuperado de: https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/54576?show=full

Lombana L, Bernal N, Barrios J., 2018. Guía Para el Procesamiento de Series de Tiempo de Precipitación y Temperatura: Estimación de Cambios y Homogenización Procesamiento de Datos en Excel, SPSS, TSW y AnClim.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), 2015. Hoja de Ruta POMCA Incorporación de Cambio Climático en Planes Estratégicos de Macrocuenca y Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas. Recuperado de: https://www.minambiente.gov.co/wpcontent/uploads/2022/01/2.HOJA_DE_RUTA_POMCA_F.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), 2019. Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas –POMCA. Recuperado de: https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recursohidrico/planificacion-de-cuencas-hidrograficas/cuenca-hidrografica/planes-de-ordenacion

Noticias ONU, 2021. Las devastadoras inundaciones en Europa muestran la urgencia de actuar contra el cambio climático. Recuperado de: https://news.un.org/es/story/2021/07/1494492

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2005. Capítulo 2. Hidrología, arquitectura del suelo y movimiento del agua. Recuperado de: https://www.fao.org/4/y4690s/y4690s06.html

Organización Meteorológica Mundial (OMM), 2012. Glosario Internacional de Hidrología. Recuperado de: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000221862

Organización Meteorológica Mundial (OMM), 2019. Flash Flood Guidance System (FFGS) with Global Coverage. Recuperado de: http://community.OMM.int/en/hydrology-and-water-resources/flash-flood-guidance-system-ffgs-global-coverage

Organización Meteorológica Mundial (OMM), 2022. Descripción general de los productos del Sistema Guía para Crecidas Repentinas: Precipitación.

Organización Meteorológica Mundial (OMM), 2022. Descripción general de los productos del Sistema Guía para Crecidas Repentinas: Humedad Media del Suelo, Valores de Referencia de Crecida Repentina, Amenazas de Crecida Repentina.

Organización Meteorológica Mundial (OMM), 2023. Verificación de avisos de crecidas repentinas – CAFFGS

Ortega M, Tuya l, Martínez M, Pérez A, Cánovas A, 2009. El Coeficiente de Correlación de los rangos de Spearman Caracterización. Revista Habanera de Ciencias Médicas, vol. 8, núm. 2

Periódico El Tiempo, 2022. Temporada de lluvias deja 5.177 familias damnificadas y 28 fallecidos. Recuperado de: https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/temporada-de-lluvias-en-colombia-2022-familias-damnificadas-y-muertes-666214

Ruiz J.F, Arango C, Kilpinen J., 2014. VERIFICACIÓN DEL SISTEMA WRF QUE OPERA IDEAM. Recuperado de: http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21132/VerificacionWRF.pdf/db010231-8106 4160-a16b-a5aaed198ea8

Saldarriaga, 2019. Guía Metodológica de la Operación Estadística Variables Meteorológicas. Subdirección de Meteorología del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Recuperado de: http://www.ideam.gov.co/documents/10182/557765/Definiciones+CNE.pdf/25e1cca5-ee47-4eaf-86c0-c4f5192a9937

Sedano K, Carvajal Y, Ávila A,. 2013. ANÁLISIS DE ASPECTOS QUE INCREMENTAN EL RIESGO DE INUNDACIONES EN COLOMBIA. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742013000200014#

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), 2020. Guía para la integración de la gestión del riesgo de desastres en los planes de desarrollo territorial 2020-2023. Recuperado de: http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/28765

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), 2020. Sistemas de Alerta Temprana como elementos para la gestión del riesgo de desastres. Recuperado de: https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2020/Sistemas-de-Alerta-Temprana-como-elementos-para-la-gestion-del-riesgo-de-desastres.aspx

Velásquez, W. C. y Beltrán, J. (2021). Utilización de series de tiempo de precipitación homogenizadas para la estimación del caudal del río San Jorge. En N. Bernal et al., Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones (pp. 167-192). Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Velásquez, W, I. y Bernal, N. (2021). Perspectivas: propuesta de análisis de valores extremos de precipitación y su utilidad en el contexto de gestión del riesgo, estudio de caso: una zona del medio Magdalena. En N. Bernal et al., *Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones* (pp. 209-284). Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Wilks, D, 2005. Statistical methods in atmospheric sciences.

Zúñiga H, 2012. Hagamos el Ordenamiento Territorial del Sector Rural de Nuestro Municipio. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Recuperado de: https://comunidad.udistrital.edu.co/hzuniga/files/2012/06/ot.pdf