

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

**RECONSTRUCCIÓN DE LA MAGNITUD DE LA CRECIDA DEL 4
DE JUNIO DE 2023 EN ESMERALDAS**

**RECONSTRUCCIÓN DE LA MAGNITUD DE LA CRECIDA DEL 4
DE JUNIO DE 2023 OCURRIDA EN ESMERALDAS.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

MESIAS GAEL ALMAGRO PACHECO

mesias.almagro@hotmail.com

DIRECTOR: MARCOS JOSHUA VILLACÍS ERAZO

marcos.villacis@epn.edu.ec

DMQ, julio de 2024

CERTIFICACIONES

Yo, Mesias Gael Almagro Pacheco, declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

MESIAS GAEL ALMAGRO PACHECO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Mesias Gael Almagro Pacheco, bajo mi supervisión.

MARCOS JOSHUA VILLACÍS ERAZO
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

MESIAS GAEL ALMAGRO PACHECO

MARCOS JOSHUA VILLACÍS ERAZO

DEDICATORIA

Se la dedico a todo aquel que mira al cielo preguntándose: ¿Por qué es azul?

AGRADECIMIENTO

A mis padres Manuel y Mercedes, quienes son mi apoyo y guía en todas las facetas de mi vida tanto profesional como personal.

A mis hermanas Niko y Daya, quienes han estado a mi lado desde mi infancia y hasta la actualidad y con quienes guardo gratos recuerdos en mi vida.

A mi papito Vi, que nos hemos de juntar donde quiera que esté, no será hoy, pero de seguro algún día.

A mis cuñados, Juan Carlos y Carlos, quienes han sido como mis hermanos mayores.

A Elizabeth, quien siempre estuvo allí para mí dándome ánimos, celebrando nuestros logros y llorando nuestros fracasos.

A mis profesores, quienes me formaron para convertirme en el profesional que soy hoy.

A grandes personas como son: la Dra. Carla y Ing. Luis, que me ayudaron con consejos profesionales, personales y siempre me escucharon cuando los necesite.

A los Ing. Fernando Mite e Ing. Wilmer Guachamin del INAMHI, que me ayudaron con los datos de esta investigación.

A los ingenieros del MAATE quienes me dieron grandes consejos profesionales en su momento.

A mis amigos y compañeros de ciencias Mauricio y Christopher, con quienes pase los mejores momentos en esta universidad.

A Thamy mi amiga que siempre acolito con todo.

A mis amigos de civil Alexis, Pablo T., Pablo O., Christian, Adrián e Iván con quienes compartí grandes momentos en la carrera y el grupo de construcciones siempre ayudándonos mutuamente.

Y Finalmente a mi mentor, el Dr. Marcos, por su paciencia, su guía, por encaminarme en el camino de la hidrología, por mostrarme de lo que soy capaz y no saber conformarme con el “no puedo”, también por ser el mentor de necesité.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	1
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	2
DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTO.....	4
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	5
TABLAS	7
FIGURAS	8
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	11
1.1 Objetivo general	14
1.2 Objetivos específicos	14
1.3 Alcance	14
2 MARCO TEÓRICO	15
2.1 Cuenca Hidrográfica.....	15
2.2 Modelo hidrológico	15
2.3 Modelo Semi-distribuido.....	16
2.4 HEC-HMS	17
3 ÁREA DE ESTUDIO	19
3.1 Cuenca del Río Esmeraldas.....	19
3.2 Estaciones dentro de la Cuenca	20
4 METODOLOGÍA	22
4.1 Flujograma de la metodología aplicada.....	22
4.2 Información	23
4.3 Manejo de información	25
4.4 Modelo	29
4.5 Modelación con HEC-HMS	29
5 RESULTADOS.....	36
5.1 Resultados	36
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77

6.1	Conclusiones.....	77
6.2	Recomendaciones.....	80
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
8	ANEXOS.....	87
8.1	Primer Anexo Script de manejo de datos satelitales.	87
8.2	Segundo Anexo Script de descarga y transformación en video de las imágenes satelitales.....	89
8.3	Tercer Anexo Script de relleno estadístico de datos.	92

TABLAS

Tabla 1: Principales características morfométricas de la cuenca del Río Esmeraldas.	19
Tabla 2: Estaciones dentro de la cuenca Esmeraldas.	20
Tabla 3: Estaciones meteorológicas escogidas dentro de la cuenca.	25
Tabla 4: Estaciones hidrológicas escogidas dentro de la cuenca.....	26
Tabla 5: Estaciones meteorológicas escogidas dentro de la cuenca.	26
Tabla 6: Correlación entre estaciones sin criterio Kendall.	42
Tabla 7: Correlación entre estaciones con criterio Kendall.	42
Tabla 8: Precipitación máxima horario vs Precipitación de ese día.....	44
Tabla 9: Caudales máximos.....	47
Tabla 10: Parámetros de la cuenca.....	48
Tabla 11: CN de cada subcuenca.	50
Tabla 12: Coeficientes SCS.	50
Tabla 13: Tiempo de concentración y Coeficiente de almacenamiento.	51
Tabla 14: Caudales mensuales base.....	53
Tabla 15: Datos Muskingum.	53
Tabla 16: Distribución de estación según la subcuenca.	54
Tabla 17: CN equivalente calibrado.	58
Tabla 18: Valores de Hidrograma unitario de Clark Calibrado.	59
Tabla 19: Valores finales de Muskingum.	59
Tabla 20: Valores Base mensuales Calibrados.....	59
Tabla 21: Valores de caudales base Segunda Tormenta.....	65
Tabla 22: Valores de caudales base Tercera Tormenta.....	69
Tabla 23: Valores de caudales base Cuarta Tormenta.....	73
Tabla 24: Diferencias relativas de las tormentas.....	76

FIGURAS

Figura 1: Cuenca Hidrográfica.....	15
Figura 2: Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a la naturaleza de los algoritmos.....	16
Figura 3: Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a su representación espacial.	17
Figura 4: Cuenca del Río Esmeraldas.	20
Figura 5: Estaciones dentro de la cuenca.....	21
Figura 6: Flujograma de la Metodológica	22
Figura 7: Datos Meteorológicos.....	27
Figura 8: Estaciones seleccionas.	27
Figura 9: Niveles máximos de agua.....	28
Figura 10: Distribución de estaciones.	36
Figura 11: Comparación de caudales.	37
Figura 12: Comparación Datos satélites vs Datos Observados.....	37
Figura 13: Precipitación Primer intervalo.	38
Figura 14: Precipitación Segundo intervalo.	39
Figura 15: Precipitación Tercer intervalo.....	40
Figura 16: Precipitación Cuarto intervalo.	41
Figura 17: Regresiones lineales.....	43
Figura 18: Precipitación.	44
Figura 19: Precipitación estación M1262.	45
Figura 20: Curva de descarga.	46
Figura 21: Ciclo anual H0168.	46
Figura 22: Delimitación de sub-cuencas en HEC-HMS.....	47
Figura 23: Delimitación nivel 4.....	48
Figura 24: Valores CNII de la cuenca.....	49
Figura 25: Mapa de alturas de la cuenca del Río Esmeraldas.....	51
Figura 26: Estaciones Hidrológicas históricas en la cuenca del Río Esmeraldas.....	52
Figura 27: Polígonos de Thierssen.	54
Figura 28: Resultado subcuencas.....	56
Figura 29: Asignación de caudales Observados.	57
Figura 30: Hidrograma de la cuenca del Río Esmeraldas.....	57
Figura 31: Textura del Suelo en la Cuenca del Río Esmeraldas.....	58
Figura 32: Modelo Calibrado.....	61
Figura 33: Hidrograma de salida.	62
Figura 34: Centrales Hidroeléctricas.	63
Figura 35: Resumen de valores obtenidos en el primer modelo.	64
Figura 36: Resultados Segunda Tormenta.	66
Figura 37: Hidrograma de salida.	67
Figura 38: Resumen de valores del segundo modelo.	68
Figura 39: Resultados Tercera Tormenta.....	70
Figura 40: Resultados Tercera Tormenta.....	71
Figura 41: Resumen de valores de la tercera tormenta.	72
Figura 42: Resultados Cuarta Tormenta.	74
Figura 43: Resultados Cuarta Tormenta.	75
Figura 44: Valores resumen de la cuarta tormenta.	75

RESUMEN

La presente investigación se centra en la reconstrucción de la crecida hidrológica en la cuenca del Río Esmeraldas del 4 de junio de 2023, utilizando la plataforma de modelación hidrológica HEC-HMS, para realizar esta reconstrucción, se emplearon tres crecidas anteriores: una para calibración y dos para evaluación, debido a que no se dispone de datos de caudales observados, en la fecha anteriormente indicada, se analizaron los datos meteorológicos mediante códigos escritos en el lenguaje de programación R, estos códigos permitieron apreciar los valores de precipitación ocurridos en la mañana del 4 de junio de 2023, captados por el producto IMERG V7.

Posteriormente, se aplicaron herramientas estadísticas como la correlación entre estaciones observadas, y la aplicación de la regresión lineal entre los datos observados y los satelitales para el relleno de la serie de tiempo desde el 24 de abril hasta el 31 de diciembre de 2023.

Para el modelo, se utilizaron series temporales de precipitación y caudales, se aplicó el método SCS, para calcular la infiltración, y la ecuación de Giandotti que permitió obtener el tiempo de concentración en la cuenca, con el fin de utilizar la herramienta del hidrograma unitario de Clark, el tránsito de la crecida se calculó a partir de los parámetros de Muskingum. Finalmente, se tomó el caudal base mensual de los anuarios del INAMHI.

Todos estos procesos se destinaron a la generación de los diferentes hidrogramas y en el análisis de los caudales pico, que se produjo a las 6:00 horas con una magnitud de 4926,1 m³/s.

PALABRAS CLAVE: Hidrograma, Tormenta, Caudal Pico, Series temporales, Cuenca.

ABSTRACT

The present research, it focuses on the reconstruction of the hydrological flood in the Esmeraldas River basin on June 4-2023, using. The HEC-HMS hydrological modelling platform. To carry out the reconstruction of said flood, three previous floods were used: the first one for calibration and the remaining two for validation. Since there are no observed flows for the day 4 of June 2023.

For the storm analysis and filling of meteorological data, codes were written in the programming language R. The precipitation values occurred during the morning of June 4, 2023, were captured by the IMERG V7 product. Subsequently, the use of statistical tools such as correlation between precipitation time series at the stations and linear regression between observed *in situ* and satellite data was employed. To perform data filling in the time interval from April 24, 2023 to December 31, 2023.

For the model, time series of precipitation and observed flows were used. The S.C.S. method was applied to calculate infiltration, the Giandotti equation to obtain the concentration time in the basin, in order to use the Clark unit hydrograph tool. The routing was calculated using Muskingum method. Finally, the base flow was taken from previous year using the INAMHI yearbooks. All these processes were used in the generation of different hydrograph and in the analysis of peak the flows that probably occurred at 6:00 with a simulated magnitude of $4926.1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$.

KEYWORDS: Hydrograph, Storm, Peak Flow, Time series, Basin.

INTRODUCCIÓN

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En los últimos cincuenta años, a nivel mundial, la mitad de daños humanos y económicos fueron causados por catástrofes relacionadas con el clima y el agua, como resultado de estos, se llegó a un aproximado de 1,3 millones de personas fallecidas. Además, las lluvias intensas han causado inundaciones masivas a nivel mundial, provocando que millones de personas sean desplazadas y, en algunos casos inclusive la pérdida de animales (Onu-Habitat, S.F.).

El clima en Latinoamérica, las precipitaciones y la temperatura están variando, existen áreas donde se experimentan cambios en la frecuencia y severidad de los fenómenos meteorológicos, como lo son las lluvias intensas, algunos impactos incluyen devastadoras inundaciones y sequías en la región (WWF, S.F.).

En Ecuador, aunque las investigaciones sobre temas climáticos son cada vez más frecuentes y de alto nivel, todavía existe una brecha en el conocimiento climático que necesita ser abordada. Además, se observa una falta de conciencia sobre la importancia de la adaptación, mitigación y preparación profesional frente a los desastres causados por el cambio climático, lo que puede aumentar la vulnerabilidad del país ante fenómenos como inundaciones y sequías más intensas (Toulkeridis et al., 2020).

En términos de precipitaciones, la cuenca del Río Esmeraldas, que abarca un área extensa de 22.000 km² (Pineda et al, 2023), enfrenta una falta de información de la causa, debido a factores sociales y económicos que indiquen que provocan las lluvias intensas. La variabilidad de la precipitación observada en esta región es muy heterogénea, especialmente en las zonas montañosas (Vuille et al, 2017), donde la cordillera de los Andes domina gran parte de la cuenca (Orozco, 2018). Esta complejidad geográfica agrega un desafío adicional, para comprender y predecir los patrones de precipitación en la región.

La cuenca del Río Esmeraldas no es la excepción a los fenómenos de lluvias intensas, los días 3 y 4 de junio del 2023, se registraron precipitaciones intensas que ocasionaron crecidas en los caudales de varios ríos dentro de la cuenca.

El evento se describe de la siguiente manera según la SGR ecuatoriana: “*En la noche del sábado 3 de julio hasta la mañana del domingo 4 de julio del 2023, se registraron lluvias intensas que ocasionaron el desbordamiento de siete ríos (Río Súa, Río Tonchigüe, Río Teaone; Río Cube, Río Viche, Río Blanco y Río Matambal)*”, en los cantones de Atacames, Esmeraldas, Quininde y Muisne, afectando 15.077 habitantes, de los que 249 personas

resultaron damnificadas, se registraron 3.741 viviendas afectadas por las inundaciones y 61 destruidas (SGRE, 2023), todos ellos pertenecientes a la cuenca del Río Esmeraldas (C.I.S.P,2016).

Por lo tanto, el trabajo de integración curricular se centrará en la reconstrucción de la magnitud de la crecida y la simulación para analizar las variables hidrológicas y meteorológicas asociadas con el fenómeno. Esto permitirá una comprensión más profunda de las causas y efectos de la crecida, así como la evaluación de las condiciones hidrológicas y meteorológicas que la originan.

No obstante, debido a la disponibilidad de datos tanto meteorológicos como hidrológicos, el presente trabajo se centrará alrededor de la cuenca de Quinindé, la cuenca de Río Blanco y la cuenca de Río Guayllabamba.

“Los eventos de inundación afectan de forma recurrente a la población del Río Esmeraldas, y existe una relación sociocultural vinculada a los desastres, ya que los hogares que no disponga de ciertos recursos van a presentar singulares características para considerarlos vulnerables a los riesgos de inundación (Estrada, 2021)”. La reconstrucción nos permitirá reconocer con mayor detalle los impactos climáticos y ayudará a la formulación de políticas y estrategias para la asignación de recursos a las poblaciones afectadas, la prevención de desastres naturales en el sector hídrico y otros sectores de la población como el comercio, salud, transporte entre otros.

La reconstrucción de crecidas es una herramienta valiosa para abordar los desafíos asociados con la gestión de los recursos hídricos de un río. Además de permitir la deducción y complementación de datos faltantes, esta herramienta nos permite ampliar la información disponible para la asignación de recursos (Campos et al., 2013). Es importante destacar que, a través de la reconstrucción de crecidas, se puede estimar, simular y reconstruir caudales en diversas escalas temporales, lo que constituye una solución efectiva para abordar la falta de datos hidrológicos y meteorológicos (Vilchis-Mata et al., 2015).

Hoy en día, los modelos hidrológicos son una representación del sistema de una cuenca hidrográfica y su respuesta a las variaciones climáticas, la precisión de las predicciones depende directamente de la comprensión del sistema y la calidad del modelo que lo representa. Un estudio hidrológico puede ser visto como un sistema compuesto por varios elementos interconectados, como la precipitación, la escorrentía, el tipo y uso del suelo, que interactúan para generar caudales. El objetivo final es utilizar estos modelos para

prevenir posibles inundaciones y gestionar de manera efectiva los recursos hídricos (Cabrera, 2012).

Varios autores han realizado estudios relacionados al tema, por ejemplo:

(Mozo et al., 2020) modela en HEC-HMS 3.2 en combinación con la plataforma QGIS. Para realizar una modelación de precipitación escurrentía, para ello se utilizó el método del S.C.S con curva CN, calculando valores de CN para el año 2012 mediante dos metodologías; el primero el método SCS-CN original y el método de Hawkins. Como no lograron un ajuste adecuado entre los valores simulados y observados, utilizaron un CN para calibrar el modelo mediante registros históricos de precipitación, finalmente se obtuvieron correlaciones y eficiencias de Nash Sutcliffe superiores a 0,7 en todas las crecidas, y con ello se pudo realizar un análisis de sensibilidad.

En (Tapia, 2012) Se identificó la producción de caudales líquidos y sólidos, los mismos que se construyen por medio de la morfología e hidrometeorológica presentes en la región de estudio, de la modelación hidrológica de la microcuenca del Río Toachi, con la estación, Toachi Aj Baba, ubicada en Long: 79° 21'09" W y Lat: 0° 40' 44" S., perteneciente a la zona hidrología del Río Guayas, se emplearon modelos hidrológicos, empíricos integrados, en base a los datos de Información Geográfica (SIG), en el sistema de información espacial, estableciendo una nueva base de datos georreferenciados de la cuenca de estudio más grande y completo, logrando identificar los parámetros morfológicos del relieve de la forma y relativos a la red hidrográfica a nivel de la cuenca de estudio y sus unidades hidrológicas (subcuencas), enfatizando la forma prolongada de la cuenca tomando en cuenta las pendientes fuertes en la zona media y blandas en la desembocadura, con esto se determinó que el río presenta, crecientes de baja capacidad, probabilidad de eventos torrenciales con menor poder erosivo.

Al emplear modelos de precipitación, se obtendrá valores más precisos y cercanos al fenómeno de crecida que ocurrió el 4 de junio del 2023. Al contar con los datos de precipitaciones, se realizará el proceso de relleno, lo que garantiza que los mismos sean más exactos. Se selecciona el método SCS debido a su amplia aplicación en diferentes tipos de suelos y usos en Ecuador. A través de los procesos mencionados anteriormente, se logrará una simulación más realista y precisa en HEC-HMS, que fue elegido por su amplia versatilidad y facilidad de uso en la calibración.

1.1 Objetivo general

Determinar los factores hidrológicos y meteorológicos que generaron la crecida del 4 de junio del 2023, mediante la modelación hidrológica de cuenca del Río Esmeraldas, utilizando la plataforma HEC-HMS.

1.2 Objetivos específicos

1. Identificar que subcuencas resultaron afectadas por la crecida de la cuenca del Río Esmeraldas.
2. Analizar las variables hidrológicas y meteorológicas que contribuyeron en la crecida del 4 de junio del 2023.
3. Simular y calibrar los resultados en HEC-HMS utilizando datos de precipitación obtenidos de las estaciones meteorológicas dentro de la cuenca.

1.3 Alcance

El propósito del presente trabajo es la reconstrucción y simulación de la crecida del fenómeno ocurrido el 4 de junio del 2023 en Esmeraldas, a partir del modelamiento hidrológico con la plataforma computacional HEC-HMS, para ello, se recopila información de precipitaciones en estaciones meteorológicas, imágenes satelitales, caudales base, tipos y usos de suelos en la cuenca.

Posteriormente, se identifican las subcuencas donde se simulan los caudales. Debido a la falta de datos, durante el día de la crecida, se realiza el modelamiento de tres tormentas previas en la zona de estudio. La primera tormenta se utiliza para la calibración del modelo, mientras que la segunda y tercera se emplean para la evaluación. Una vez calibrado y evaluado el modelo, se procede a simular la crecida principal utilizando los datos de precipitaciones horarias registradas por las estaciones automáticas del INAMHI.

Realizado el modelamiento en la cuenca, se planea analizar los resultados obtenidos para identificar los factores hidrológicos y meteorológicos del fenómeno, con ello, se espera contribuir a la respuesta de: *“¿Qué ocasiono el fenómeno desde el punto de vista hidrológico?”*.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Cuenca Hidrográfica

Se define como cuenca hidrográfica al área topográficamente definida, drenada por un cauce o un sistema conectado de cauces, que dispone de una salida simple para que el caudal efluente sea descargado.

La cuenca hidrográfica se usa como unidad de planificación de los recursos hídricos, es importante tomar en cuenta que las cuencas hidrográficas suelen estar conformadas por subcuencas y microcuencas de menor tamaño, las cuales están conectadas a través de ríos tributarios que abastecen a los ríos principales (Álvarez et al., 2020).

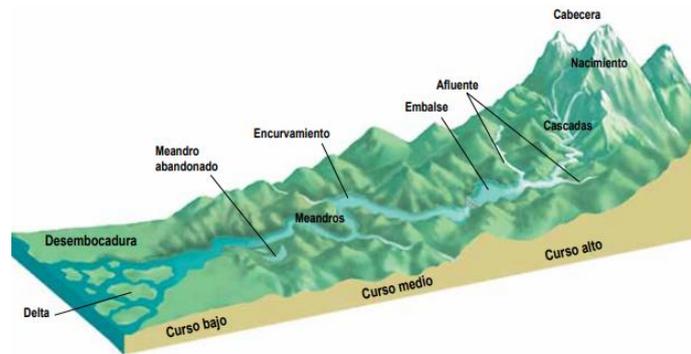


Figura 1: Cuenca Hidrográfica.

Fuente: Moya et al., 2015.

2.2 Modelo hidrológico

El modelo hidrológico busca representar los procesos implicados en la distribución de precipitación para la generación de caudales dentro de una determinada cuenca hidrográfica, actualmente, la existencia de sensores remotos y sistemas de información geográfica han desarrollado modelos hidrológicos parecidos a la realidad (Jorquera et al., 2012).

Asimismo, los sistemas hidrológicos son naturalmente continuos; en otros términos, los flujos de agua entre la atmósfera, la superficie y el suelo de manera continua, sin embargo, las diferentes escalas temporales del flujo de agua en estos dominios permiten descomponer el ciclo hidrológico, en tres componentes individuales, esta técnica facilita la comprensión de los procesos y se aporta una simplificación computacional y matemática.

Sin embargo, si no se ejecuta de manera correcta, puede conducir a modelos deficientes o incompletos (Furman, 2008).

De Refsgaard y Abbott (1996) los modelos hidrológicos se clasifican de la siguiente manera:

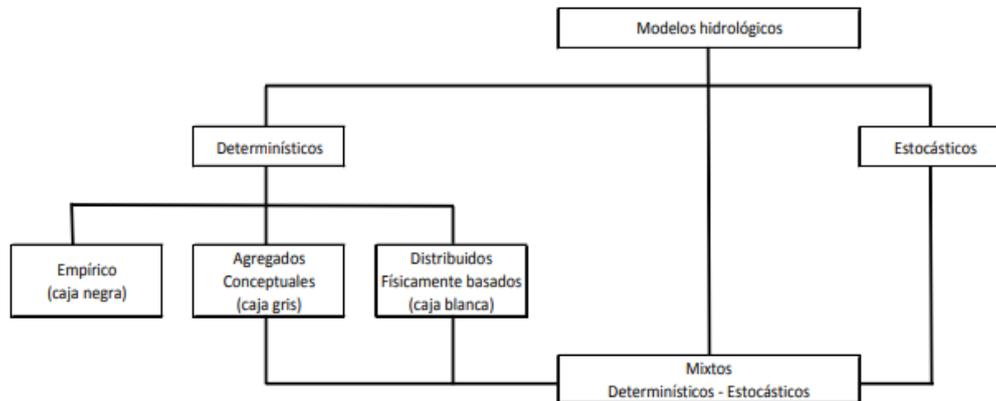


Figura 2: Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a la naturaleza de los algoritmos.

Fuente: Refsgaard y Abbott, 1996.

En el presente trabajo se usará el modelo Agregado Conceptual o Semi-distribuido.

2.3 Modelo Semi-distribuido

La principal limitación en la modelación hidrológica en cuencas es el desconocimiento de las propiedades del suelo y los procesos involucrados a los flujos sub superficiales y subterráneos, esta limitación se puede superar, asumiendo una cuenca homogénea, en todos sus procesos tanto subterráneos como sub superficiales y superficiales, esto es válido para cuencas muy pequeñas, dando origen a los modelos “agregados” o “agrupados”.

Sin embargo, cuando aumenta el tamaño de la cuenca es probable que las características como el tipo de suelo aumente y el modelo pierda representatividad, así como, con mayores áreas, se puede discriminar las zonas de similar comportamiento hidrológico, para analizar de manera independiente, y posteriormente combinar sus efectos dando origen al modelo semi-distribuido.

Aunque los modelos semi-distribuidos ofrecen una representación más detallada, las variaciones y las características del suelo, representa una simplificación, con el fin de alcanzar una mayor representatividad, la cuenca se divide en elementos grilla, que se los

denomina, modelos distribuidos, estos realizan un balance hídrico en cada una, transmitiendo sus efectos a las grillas adyacentes (Cabrera, 2012).

A continuación, un esquema de los tipos de modelos.



Figura 3: Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a su representación espacial.

Fuente: Chong-yu Xu, 2002.

En la imagen se observa el modelo agrupado (a), el modelo semi-distribuido (b) y el modelo distribuido (c).

Los elementos de un modelo comúnmente, presentan tres tipos de elementos:

- **Variable de entrada:** Series de tiempo y espacio como precipitación o temperatura.
- **Parámetros:** Parámetros asumidos constantes dentro del modelo como conductividad hidráulica.
- **Variables de estado:** Series de tiempo y espacio como humedad del suelo estas permiten establecer las condiciones iniciales.

Todos estos parámetros dan origen a las variables de salida que usualmente son descargas (Cabrera, 2012).

2.4 HEC-HMS

El programa computacional de acceso libre HEC-HMS fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros Civiles de la Armada de Estados Unidos, que enfoca principalmente en simulación de eventos continuos, también en procesos de transformación de lluvia en una cuenca hidrográfica y la estimación de hidrogramas de salida, con el método de cálculo de hidrogramas de diseño a partir de series temporales como la precipitación, también enfoca métodos de pérdida como la infiltración, métodos de transformación con herramientas como el hidrograma unitario de Clark, el caudal base por evento o de manera mensual (Méndez et al., 2009). El programa cuenta con los siguientes componentes:

- **Subbasin.** - Es un elemento que es utilizado para obtener la representación física de una cuenca, que debe ser representada.
- **Reach.** - Es el elemento empleado que nos permite trasladar el flujo de aguas abajo en este modelo.
- **Junction.** - Permite unir el caudal derivado de uno o más elementos hidrológicos.
- **Reservoir.** - Admite simular la retención y mitigación de un hidrograma que se ha producido por un embalse.
- **Source.** - Esta herramienta se la utiliza para incluir agua dentro de una cuenca
- **Sink.** - Este término representa un punto que marca la salida de una cuenca.
- **Derivación.** - Esta herramienta modela el flujo de agua que fluye de un cauce.

Los anteriores componentes permiten la representación física de la cuenca (Inga, 2023).

3 ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Cuenca del Río Esmeraldas

La cuenca de estudio, es la del Río Esmeraldas, con un área de aproximadamente 22.000 km² (Pineda et al., 2023), en la vertiente del Océano Pacífico, ubicada en las regiones Costa y Sierra, de las provincias de Pichincha, Esmeraldas, Imbabura, Cotopaxi, Manabí y Santo Domingo de los Tsáchilas.

Las principales corrientes fluviales de la cuenca son: Río Guayllabamba, Río Quinindé y Río Blanco.

Se presentan las características más importantes de la zona de estudio según (Cuasapaz, 2018).

Tabla 1: Principales características morfométricas de la cuenca del Río Esmeraldas.

Característica Morfométrica	Valor
Área (km ²)	21668.39
Perímetro (km)	1104.18
Longitud axial (km)	244.1
Ancho promedio (km)	88.77
Cota máxima (msnm)	4720
Cota mínima (msnm)	0
Coefficiente de compacidad (Kc)	2.11
Índice de alargamiento	1.24
Factor de forma	0.36

Fuente: Cuasapaz, 2018

Ahora, la delimitación de la cuenca de estudio.

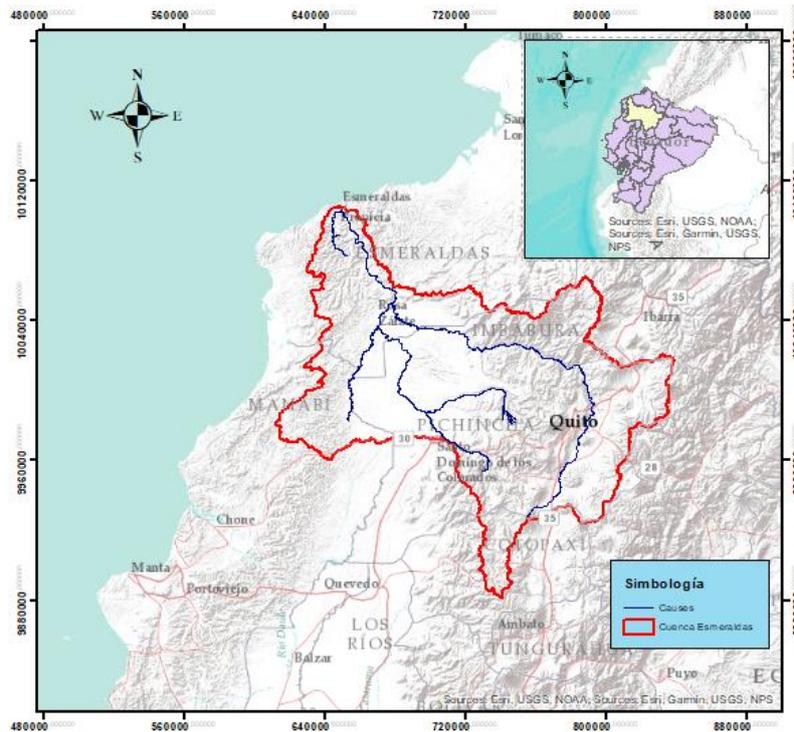


Figura 4: Cuenca del Río Esmeraldas.

Fuente: Autoría Propia.

3.2 Estaciones dentro de la Cuenca

Dentro de la cuenca existen las siguientes estaciones meteorológicas e hidrológicas.

Tabla 2: Estaciones dentro de la cuenca Esmeraldas.

Estación	long	lat	tipo
M0002	-78,37	-0,23	Meteorológica Automática
M0003	-78,56	-0,37	Meteorológica Automática
M0025	-79,38	-0,02	Meteorológica Automática
M0156	-79,47	0,32	Meteorológica Automática
M0160	-79,43	-0,26	Meteorológica Automática
M0444	-79,70	0,82	Meteorológica Automática
M1094	-78,26	0,01	Meteorológica Automática
M1190	-79,09	-0,01	Meteorológica Automática
M1262	-78,93	-0,31	Meteorológica Automática
M1266	-79,06	0,16	Meteorológica Automática
M5192	-78,77	0,24	Meteorológica Automática
H0168	-79,42	0,53	Hidrológica Automática
H0138	-79,28	-0,08	Hidrológica Histórica
H0139	-78,87	0,01	Hidrológica Histórica
H0146	-78,74	0,24	Hidrológica Histórica
H0149	-78,64	0,18	Hidrológica Histórica
H0159	-78,55	-0,46	Hidrológica Histórica
H0170	-79,40	0,44	Hidrológica Histórica
H0177	-79,48	0,33	Hidrológica Histórica

Fuente: Autoría Propia.

Se presentan las estaciones en un mapa.

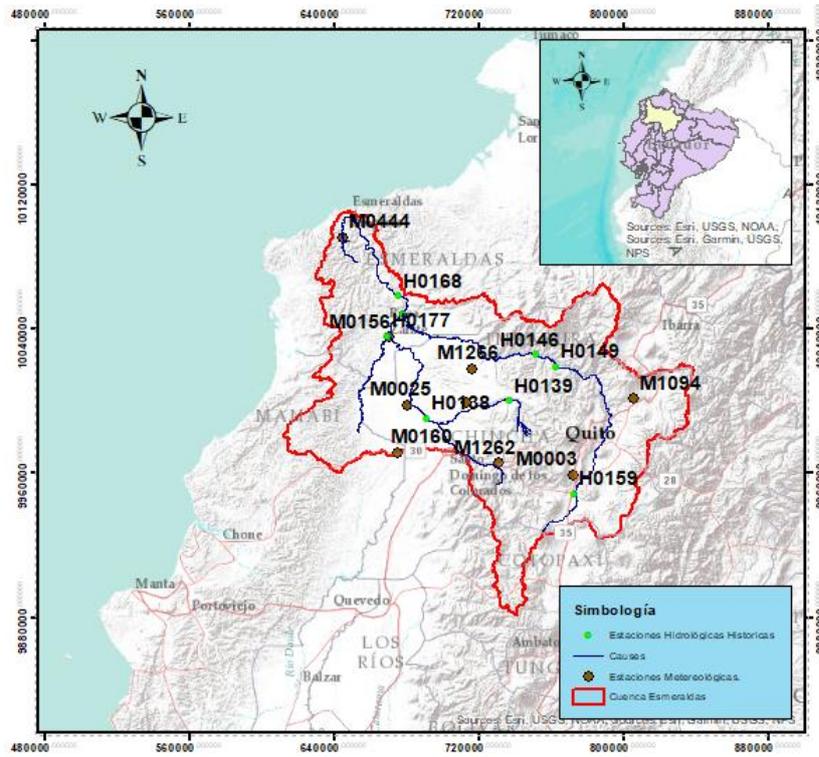


Figura 5: Estaciones dentro de la cuenca.

Fuente: Autoría Propia.

4 METODOLOGÍA

4.1 Flujograma de la metodología aplicada

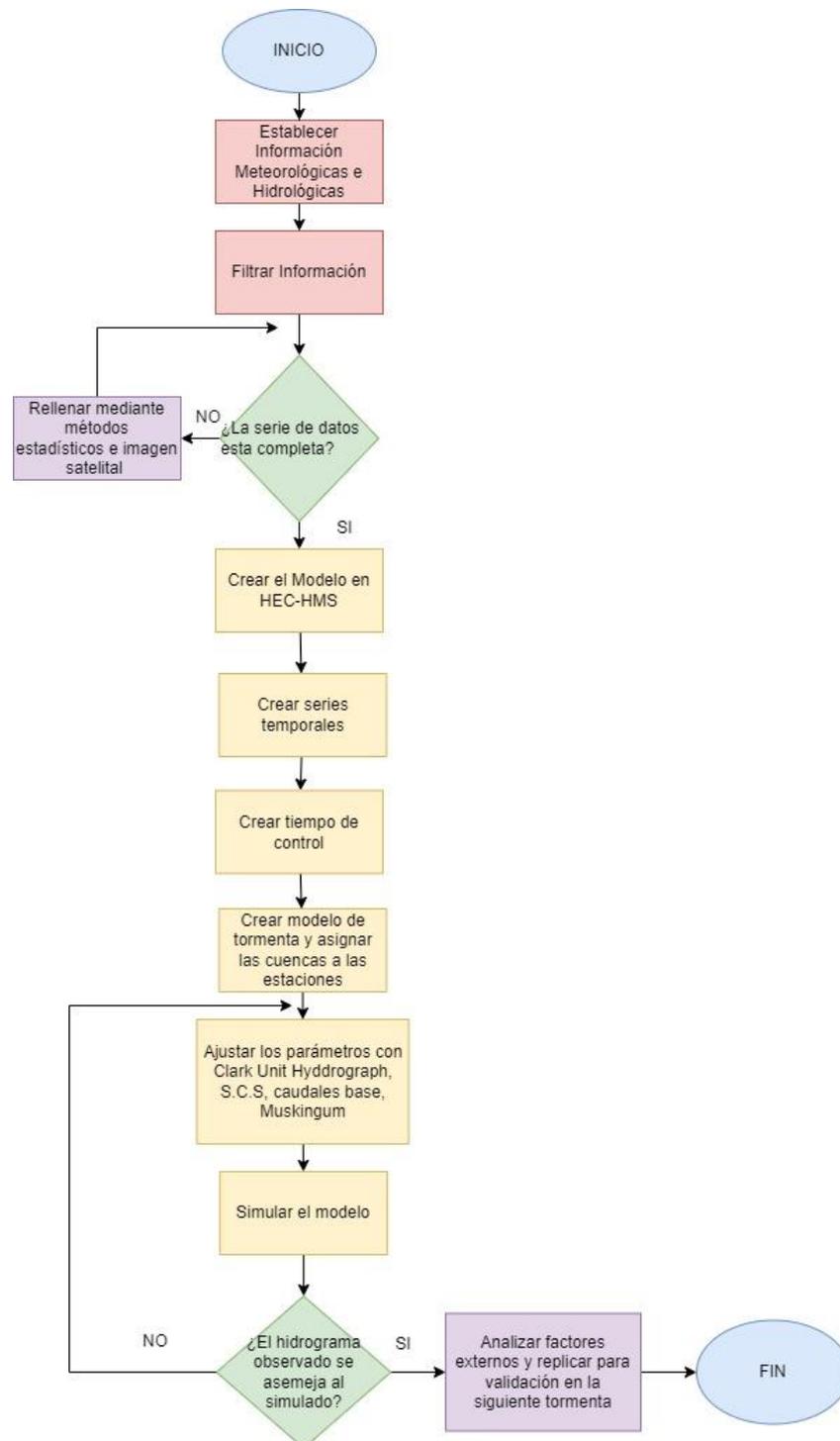


Figura 6: Flujograma de la Metodológica

Fuente: Autoría Propia.

El flujograma establece los procesos a seguir, en la primera sección, se realiza un inventario de las estaciones meteorológicas e hidrológicas, permitiendo llevar a cabo una revisión para el control de los datos, en caso de detectar datos faltantes, se procede a completar con métodos estadísticos e imágenes satelitales; si los datos están completos, se inicia el modelamiento en HEC-HMS.

En el siguiente proceso, se crean los componentes de series temporales, tiempo de control y modelo de tormenta, asignando las estaciones meteorológicas e hidrológicas correspondientes, posteriormente, se ajustan los parámetros como el método SCS, hidrograma unitario de Clark, los caudales base y Muskingum, después, se simula el modelo en HEC-HMS.

Si el hidrograma observado se asemeja al hidrograma simulado, se analizan posibles factores externos que influyan en la cuenca y se repliquen en otras tormentas para la validación o evaluación del modelo, en caso contrario, si no se asemejan, se ajustan los parámetros del método SCS, hidrograma unitario de Clark, los caudales base y Muskingum, hasta que los hidrogramas se asemejen entre ellos.

4.2 Información

4.2.1 Fuentes de información

Considerando la disponibilidad de información dentro de la cuenca de estudio, se utilizaron dos productos para la recopilación de datos.

El primer producto utilizado fue la plataforma GES DISC de EARTH DATA, que proporciona datos satelitales.

El segundo producto se basó en la recopilación de información observada por la red de estaciones meteorológicas e hidrológicas de la entidad pública INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología).

4.2.2 Análisis de nivel de escala

Para el análisis del nivel de la escala, se compararon los caudales máximos instantáneos con los caudales diarios máximos promedios, considerando solo los datos que se produjeron el mismo día, se seleccionó la estación H0168 (Esmeraldas Dj Sada), ubicada en Esmeraldas-Quinindé, con coordenadas geográficas Lat: 0.5341 y Long: -79.4193, a

una altura de 51.00 msnm (INAMHI, 2015), se escogió este período de datos, del 2007 al 2014, por la cercanía de la estación al punto de salida de la cuenca y la disponibilidad de datos.

4.2.3 Datos satelitales

Para el estudio se utilizó la versión GPM IMERG V7, por ser la más actual y por proporcionar mayor número de datos disponibles, se compararon dos intervalos el primero cada 30 minutos, y el segundo a diario, dentro de la cuenca del Río Esmeraldas, con una resolución de 0,10°.

Los productos de descarga del satélite GPM IMERG V7 son los siguientes:

- Lat_bnds.
- Lon_bnds.
- Precipitation.
- PrecipitationQualityIndex.
- probabilityLiquidPrecipitation.
- RandomError.
- Time_bnds.

Pero dentro de la investigación nos centraremos en los datos de precipitación.

El formato de salida de los datos es NetCDF, posteriormente se implementó un código en el lenguaje R, para el manejo y lectura de los mismos, el cual está disponible en el primer anexo, para el procesamiento de descarga de los datos, se debe considerar que los archivos están en el horario UTC 00:00 y se debe convertir a UTC-05:00 Quito-Bogotá. Finalmente, las unidades en las que se descargan los datos de precipitación son mm/h, para lo cual se aplica la siguiente fórmula (Vargas, 2023).

$$i = \frac{hp}{t} \quad (1)$$

Dónde: i: intensidad de precipitación (mm/h), hp: Altura de precipitación (mm), t: Tiempo(h).

4.2.4 Datos Observados

Los datos observados se refieren a estaciones meteorológicas e hidrológicas, que permiten determinar el comportamiento de la atmósfera y el medio ambiente, los parámetros observados incluyen: temperatura del aire y del suelo, la humedad, el viento, niveles de

agua, caudales y precipitación, entre otros (Vargas, 2023). Para el presente trabajo, se emplearon específicamente datos de precipitaciones y niveles de agua horarias de la red de estaciones automáticas del INAMHI.

Se compararon los registros observados y los satelitales de dos productos, el primero proporciona datos en intervalos de 30 minutos y el segundo en intervalos a nivel diario, esta comparación se realizó en la estación M0025 (La Concordia), ubicada en Esmeraldas - La Concordia, con coordenadas geográficas Lat: -0.0245 y Long: -79.3803, a una altura de 379.00 msnm (INAMHI, 2017), se seleccionó esta estación por presentar un mayor intervalo de registros observados y una mejor correlación de datos, para el análisis, se empleó una valoración visual, mediante un gráfico (Jiménez, 2023).

Adicionalmente, se descargó una serie de imágenes satelitales que representan la tormenta del día 4 de junio del 2023, siendo vista desde el producto IMERG v7, con un rango de cobertura que abarca todo el Ecuador y las regiones fronterizas de Perú y Colombia, los fotogramas se crearon desde el 2 de junio a las 00:00 hasta el 5 de junio a las 23:30.

4.3 Manejo de información

4.3.1 Estaciones Meteorológicas Disponibles

Para el análisis de la crecida, y debido a la limitada información de registros observados en estaciones automáticas a escala horaria en la base de datos del INAMHI, se construyó una base adicional.

Tabla 3: Estaciones meteorológicas escogidas dentro de la cuenca.

Estación	Datos Disponibles desde	Datos Disponibles hasta
M0002	1 de enero del 2020	Actualidad
M0003	1 de enero del 2020	Actualidad
M0025	1 de enero del 2020	Actualidad
M0156	1 de enero del 2020	Actualidad
M0160	21 de abril del 2022	Actualidad
M0444	25 de abril del 2022	Actualidad
M1094	1 de enero del 2020	Actualidad
M1190	10 de mayo del 2023	Actualidad
M1262	21 de abril del 2022	Actualidad
M1266	18 de abril del 2022	Actualidad
M5192	5 de noviembre del 2023	Actualidad

Fuente: Autoría Propia.

Se disponen de las siguientes estaciones, las cuales proporcionan datos de nivel de agua a escala horaria en la base de registros del INAMHI:

Tabla 4: Estaciones hidrológicas escogidas dentro de la cuenca.

Estación	Datos Disponibles desde	Datos Disponibles hasta
H0148	20 de noviembre del 2020	Actualidad
H0168	1 de enero del 2020	17 de abril del 2023
H0173	25 de abril del 2022	Actualidad

Fuente: Autoría Propia.

Posteriormente se realizó una depuración de la información, tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- Nivel de información sobre la cuenca.
- Nivel de información sobre la crecida.
- Nivel de datos disponibles.
- Calidad de datos observados.

Por lo que se presentan las tablas finales de las estaciones que se planean utilizar dentro del nuevo rango de fechas.

Tabla 5: Estaciones meteorológicas escogidas dentro de la cuenca.

Estación	Datos Disponibles desde	Datos Disponibles hasta
M0003	24 de abril del 2022	31 de diciembre del 2023
M0025	24 de abril del 2022	31 de diciembre del 2023
M0156	24 de abril del 2022	31 de diciembre del 2023
M0160	24 de abril del 2022	31 de diciembre del 2023
M0444	24 de abril del 2022	31 de diciembre del 2023
M1094	24 de abril del 2022	31 de diciembre del 2023
M1190	10 de mayo del 2023	31 de diciembre del 2023
M1262	24 de abril del 2022	31 de diciembre del 2023
M1266	24 de abril del 2022	31 de diciembre del 2023

Fuente: Autoría Propia.

4.3.2 Relleno de datos

Para el relleno, se utilizó la técnica estadística de correlación lineal, la cual consiste en cuantificar la variación en el nivel medio de las ordenadas "Y" con respecto a los cambios de las abscisas "X" (Laguna, 2014), entre las estaciones disponibles, posteriormente, se aplicó el criterio de Kendall para la aceptación de valores de correlación, considerando el análisis realizado por Nimon et al. (2013), quien comparó varios escenarios con el criterio Kendall para valores superiores a 0,2 en correlación, tras estos parámetros, se empleó el método propuesto por Campozano et al. (2014), múltiple regresión lineal considerando el peso con el coeficiente de correlación, específicamente el coeficiente de Kendall, se aplica la siguiente ecuación para el relleno de los datos:

$$V_{est} = \frac{\sum w_i^k * (b_i * V_i + a_i)}{\sum w_i^k} \quad (2)$$

Dónde: w_i^k es la correlación, a y b son coeficientes lineales, V es el valor de precipitación.

Ahora, para los casos en que todas las estaciones no tienen datos, se aplicó el relleno con imágenes satelitales mediante una regresión lineal simple, para todas las estaciones (Altamirano et al., 2023).

4.3.3 Manejo de datos hidrológicos

Los datos de nivel de agua disponibles de la estación H0168 son los siguientes.

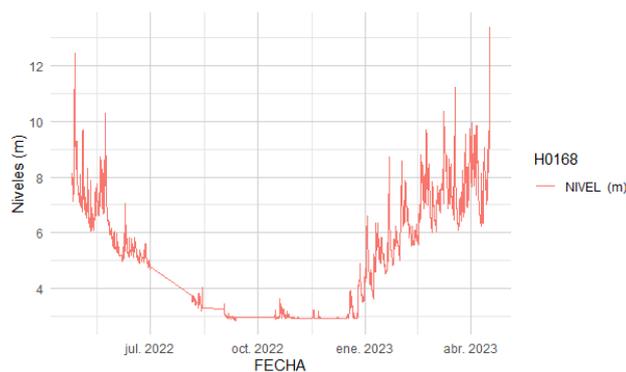


Figura 9: Niveles máximos de agua.

Fuente: Autoría Propia.

Dado que los datos de la estación hidrológica H0168 son solo del nivel de agua, se aplicó la curva de descarga del INAMHI disponibles en Becerra (2024) la misma que se presenta a continuación.

$$Q_{obs} = 37,9 * (0,7 + H_{obs})^{2,1} \quad (3)$$

Dónde: Q es el caudal y H es la altura del agua.

Es importante destacar que la curva de descarga utilizada en este estudio se desarrolló con base en caudales registrados entre el 22 de octubre del 2013 y el 31 de diciembre del 2015. Debido a la falta de información reciente proporcionada por el INAMHI y considerando que el cálculo de una nueva curva de descarga excede el alcance de esta investigación, se ha decidido utilizar la curva de descarga anteriormente indicada.

4.4 Modelo

4.4.1 Semi-distribuido

Para la reconstrucción de la crecida, se utilizará el modelo semi-distribuido, el cual es aplicable debido a su representación espacial, dado que la cuenca es extensa, es probable que los tipos de suelo y sus características varíen a lo largo y ancho de la cuenca, lo que hace que los modelos pierdan representatividad. Por lo tanto, se analiza la cuenca mediante subcuencas de forma independiente y luego se combinan o superponen los resultados de manera semi-distribuida (Cabrera, 2012).

Sin embargo, la agregación espacial de este tipo de modelos limita una evaluación espacial detallada. Por ejemplo, cuando se requiere evaluar el impacto sobre una infraestructura natural para el control de inundaciones, se debe utilizar un modelo distribuido para estimar la reducción de las áreas afectadas de una tormenta dada, no siempre es posible o necesario desvincular espacialmente la modelación distribuida, debido a limitaciones en los datos disponibles, recursos computacionales o porque los resultados esperados no requieren considerar su distribución espacial (Ochoa et al., 2022).

Por lo tanto, se optó por el uso de un modelo semi-distribuido en la plataforma de modelación hidrológica HEC-HMS.

4.5 Modelación con HEC-HMS

Se introdujeron las series temporales de precipitación y caudales, utilizando los datos observados de la red de estaciones del INAMHI.

Se establecieron tres crecidas anteriores a la del 4 de junio del 2023, las cuales fueron seleccionadas mediante un análisis del ciclo anual de la estación H0168, se utilizó este método debido a la falta de datos observados el día de la crecida.

4.5.1 Herramienta GIS

Debido al tamaño de la cuenca del Río Esmeraldas, fue necesario dividirla en nueve sub-cuencas, cada una con un área de al menos 1100 km². Para esto, se utilizó la sección de GIS y el modelo de elevación (DEM) de la cuenca, el programa identificó automáticamente las sub-cuencas, los puntos de intersección de los cauces y los ríos principales de cada una, lo que contribuyó positivamente al análisis y permitió obtener una mejor estimación de los parámetros físicos y espaciales presentes en cada sub-cuenca.

Adicionalmente, para un mejor análisis, se establecieron las condiciones fisiográficas en ArcGis y posteriormente se exportó la información para su uso en HEC-HMS.

4.5.2 Parámetros S.C.S.

El método SCS es utilizado para determinar las abstracciones iniciales de la precipitación en una tormenta, el escurrimiento superficial y el coeficiente de escurrimiento (Cordova et al., 2027).

Para la obtención del número de curva se utilizó la base de datos disponible en Jaafar, et al (2019), en el que detalla el número de curva de cada región a nivel [mundial](#).

Dado los parámetros de tormenta, como las precipitaciones observadas, que se indican que las tormentas se produjeron en los meses de marzo, abril, mayo y junio, se consideró que la cuenca se encuentra en las regiones de la Sierra y Costa, las cuales presentan un nivel de abstracción medio, se optó por la utilización de la curva CNII para cada subcuenca de la zona de estudio.

Adicionalmente, se obtuvo el índice CN ponderado para cada área, lo que permitió un mejor manejo de los datos obtenidos.

Posteriormente, se calcularon la abstracción inicial y el coeficiente de retención potencial, mediante las siguientes ecuaciones:

$$Ia = 0,2 S \quad (4)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (5)$$

Dónde: la es el coeficiente de abstracción inicial, S es el coeficiente de retención potencial y CN es el número de curva ponderado (Córdova et al., 2017).

Para clasificar el tipo de suelo se usó una interpretación al criterio de Vélez (2000), en su libro HIDROLOGÍA PARA INGENIEROS, el mismo es:

A: Gruesa y moderadamente gruesa.

B: Media o moderadamente media.

C: Fina.

D: No aplicable.

4.5.3 Hidrograma unitario de Clark

El hidrograma unitario de Clark es un método conceptual que estima el almacenamiento de agua en una cuenca, abarcando dos momentos claves: el traslado de flujo o caudal desde su origen a través de toda la cuenca hidrográfica hasta el punto de cierre o salida de la cuenca, y la atenuación o regulación de la magnitud del caudal (Feldman, 2000).

Se calculó, el tiempo de concentración mediante la ecuación de Giandotti, que es útil para cuencas de 170 km² a 70.000 km², se calcula con la siguiente ecuación.

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8\sqrt{H}} \quad (6)$$

Dónde: T_c es el tiempo de concentración, A es el área de la cuenca, L la longitud del cauce, H es el desnivel total de la cuenca (Giandotti, 1934).

Ahora para el cálculo del valor del coeficiente de almacenamiento se aplica una fracción del tiempo de concentración, por lo general se utiliza una fracción equivalente al 75% (Clark, 1945), para lo mismo se aplicará la siguiente ecuación (Arteaga, 2017).

$$Cal = \beta T_c \text{ con } \beta \in (0,1; 0,75) \quad (7)$$

Dónde: Cal coeficiente de almacenamiento, T_c tiempo de concentración y β fracción equivalente.

4.5.4 Caudal base

Se utilizaron los caudales constantes mensuales de los datos observados disponibles en los anuarios del INAMHI, en la sección de resultados, se explicará la distribución que se adoptó para cada subcuenca.

4.5.5 Muskingum

El método del hidrograma unitario de Clark, es una técnica empleada para el tránsito hidrológico, que analiza la relación entre el flujo y el almacenamiento de agua en una cuenca (Arteaga, 2017). En este método, los parámetros K y x , se determinan mediante la calibración, utilizando registros de caudales, sin embargo, se debe considerar que las mediciones simultáneas del caudal de entrada y de salida para un tramo de un canal, determinadas por un procedimiento de ensayo y error, requieren mucho tiempo y carecen de capacidad predictiva (Ponce, s.f.), por lo tanto, se utilizarán las siguientes ecuaciones para el cálculo de K y x , las cuales pertenecen al manual de uso del HEC-HMS de la Universidad Politécnica de Cataluña (2012).

$$K = 0,18 * \left(\frac{\Delta x}{i^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (8)$$

$$x \in [0,1 ; 0,5] \quad (9)$$

Dónde: Δx es la distancia máxima en Km y i es la pendiente máxima de la cuenca.

El valor de x depende de la pendiente medias del tramo. Por lo general se usa 0,2 en pendiente bajas y 0,35 en pendientes altas (U.P.C., 2012).

Además, los parámetros antes mencionados deben cumplir la siguiente condición.

$$n > \frac{2 * k * x}{\Delta t} \quad (10)$$

Dónde: Δt es el incremento de tiempo que utiliza para interpretar los resultados y n es el número de sub-ramales.

4.5.6 Series Temporales

En este componente, se ingresan los datos meteorológicos para procesar el modelo, posterior, se ingresan datos de los caudales observados de la estación H0168,

correspondientes a las tormentas que se describen en la sección de calibración y evaluación.

4.5.7 Especificaciones de control

Para la simulación se establecieron especificaciones de control, las mismas disponen información sobre la fecha de inicio y final del evento, en el procesamiento de datos de la simulación (Arteaga, 2017).

4.5.8 Modelo meteorológico

Dentro de la simulación de los datos de precipitación ingresados para cada subcuenca, dentro del modelo, los métodos que se analizaron con los datos de precipitación, son las tormentas registradas por los pluviómetros.

4.5.9 Asignación de estación de cada subcuenca

Para la asignación de los pluviómetros en cada subcuenca, se determinó el nivel de influencia de cada estación, con el método de los polígonos de Thiessen, el mismo se basa en trazar rectas, para posteriormente trazar la mediatriz, definiendo una serie de polígonos que permiten definir el área de influencia de cada estación (Otavaro, 2000).

4.5.10 Calibración

Se utilizó la primera crecida para la calibración, ocurrida el 27 de abril de 2022, se tomaron los datos obtenidos de la precipitación y caudal desde las 00:00 del 24 de abril hasta las 23:00 del 28 de abril, en cuanto a los datos de caudal, se registró un caudal base de 2.852,56 m³/s y un caudal máximo de 8.466,21 m³/s. Se establecieron los parámetros de S.C.S, tiempo de concentración, coeficiente de almacenamiento, Muskingum, caudal base, en cada subcuenca, se analizó el caudal resultante y se ajustaron los parámetros mencionados hasta que los picos de los mismos fueran similares entre sí.

4.5.11 Evaluación

Con los parámetros establecidos en la sección de calibración, se replicaron las tormentas, se comparó el porcentaje de diferencia entre los caudales pico, mediante la diferencia relativa, y se analizó la similitud y discrepancia entre los hidrogramas resultantes, los cuales se presentan a continuación.

- Segunda crecida.

La segunda crecida, ocurrida el 23 de mayo de 2022, se registraron datos de precipitación y caudales desde las 00:00 del 20 de mayo hasta las 23:00 del 24 de mayo, en cuanto a los datos de caudal, se registró un caudal base de 2.528,08 m³/s y un caudal máximo de 5.828,59 m³/s.

- Tercera crecida.

La tercera crecida, ocurrida el 16 de marzo de 2023, se tomaron datos de precipitación y caudales desde las 00:00 del 15 de marzo hasta las 23:00 del 19 de marzo, en cuanto a los datos de caudal, se registró un caudal base de 2.373,63 m³/s y un caudal máximo de 6.911,69 m³/s.

4.5.12 Modelo Final

La cuarta crecida, o crecida esencial, ocurrida el 4 de junio de 2023, se tomaron datos de precipitación desde las 00:00 del 31 de mayo hasta las 23:00 del 5 de junio, dado que no se tuvo datos, se estableció la siguiente metodología:

La primera crecida se utilizó para la calibración del modelo, la segunda y tercera crecidas se utilizaron para la evaluación y la cuarta crecida representa la aplicación del modelo en la crecida de interés.

4.5.13 Evaluación de desempeño

Para evaluar el desempeño de todas las simulaciones se empleó el método de sesgo porcentual, el mismo mide la tendencia promedio de entre los datos simulados y los datos observados, posteriormente se obtiene la suma de las diferencias entre los datos simulados y los observados, después se divide por la suma de los mismos.

Como se presenta en la siguiente ecuación.

$$PBIAS = \left(\frac{\sum Y_{ob} - Y_{sim}}{\sum Y_{ob}} \right) * 100\% \quad (11)$$

Dónde: *Y_{ob}* son los datos observados, *Y_{sim}* son los datos simulados

El valor óptimo es 0 y los peores valores es cuando PBIAS tiende al infinito, en un modelo hidrológico se busca un valor $PBIAS \leq 25\%$ (Ochoa et al., 2022).

Como método alternativo para evaluar el desempeño, se utilizó el método de Nash–Sutcliffe, este compara la serie de tiempo de los datos observados con los simulados, que consiste

en la suma de las diferencias al cuadrado entre los datos observados y cada dato simulado, el denominador es la suma de las diferencias al cuadrado entre cada dato observado menos el promedio de los observados.

Como se presenta en la siguiente ecuación.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum(Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum(Y_{obs} - U_{obs})^2} \right] \quad (11)$$

Dónde: Y_{obs} son datos observados, Y_{sim} son datos simulados, U_{obs} es el promedio de datos observados.

El valor óptimo es 1 y el peor valor es cuando NSE tienen al infinito, en un modelo hidrológico se considera como satisfactorio cuando $NSE > 0,50$ (Ochoa et al., 2022).

5 RESULTADOS

5.1 Resultados

5.1.1 Distribución de estaciones

Se escogió las siguientes estaciones meteorológicas e hidrológica, por su disponibilidad de datos y presencia en la cuenca.

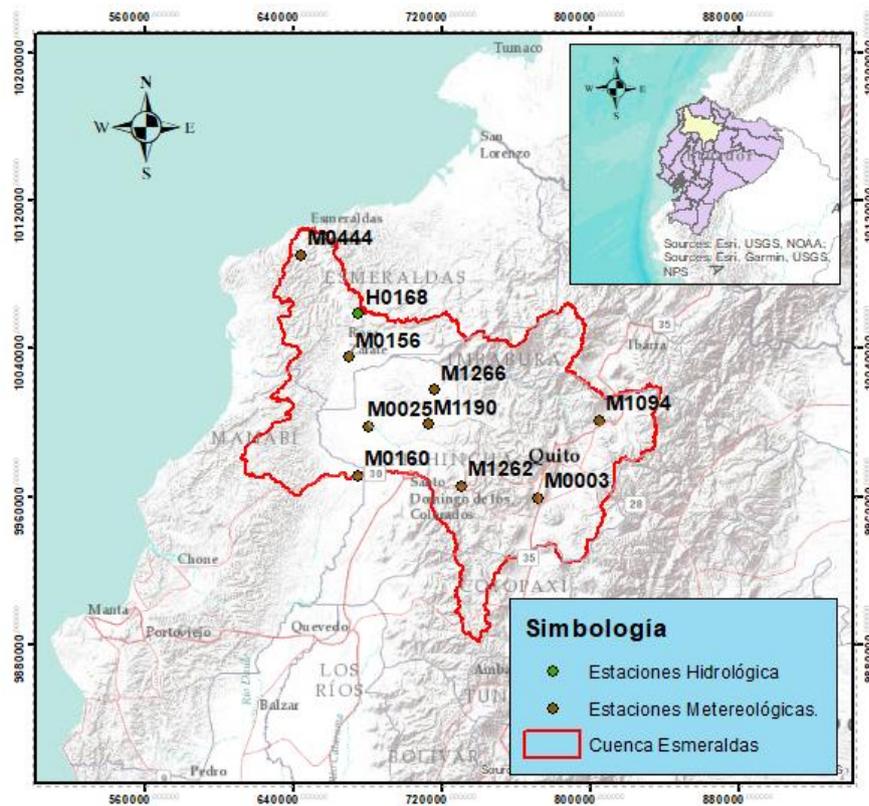


Figura 10: Distribución de estaciones.

Fuente: Autoría Propia.

5.1.2 Análisis de nivel de escala

Se graficaron los datos de caudales máximos instantáneos y máximos promedios diarios de la estación H0168, en el periodo del 2007 al 2014.

Se obtuvo los siguientes resultados.

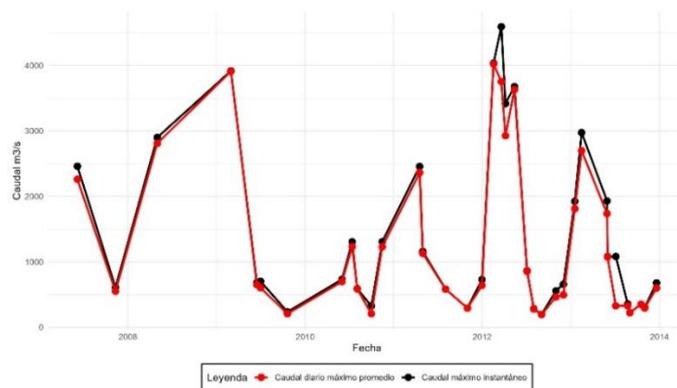


Figura 11: Comparación de caudales.

Fuente: Autoría Propia.

En el gráfico presenta una alta homogeneidad entre los datos comparados. Según Beck et al. (2016), la similitud hidrológica es útil para la predicción en cuencas no controladas, especialmente para variables como caudales medios diarios y caudal medio anual, entre otros, por lo tanto, al tener una alta similitud, se justifica el uso de datos en escala diaria dentro de la cuenca, sin embargo, debido a la falta de información entre los años 2018 y 2020, se optó por utilizar una escala horaria, que ofrece un mayor nivel de detalle.

5.1.3 Análisis de datos satelitales

Se realizó una superposición entre los datos observados y satelitales para determinar que producto tiene mayor similitud y utilizarlos posteriormente para el relleno de datos.

A continuación, la gráfica obtenida.

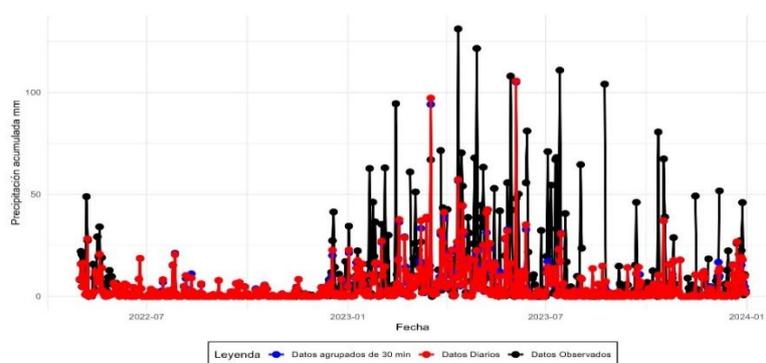


Figura 12: Comparación Datos satélites vs Datos Observados.

Fuente: Autoría Propia.

Los datos satelitales de 30 minutos, agrupados a escala diaria con los datos en escala diaria muestran una alta similitud entre ellos y presentando una similitud razonable con los datos observados, por lo tanto, se seleccionan los datos satelitales a escala de 30 minutos para realizar el relleno de datos, posteriormente, se presenta la tormenta captada por el producto satelital, dado que en el intervalo inicial del 2 de junio a las 00:00 al 5 de junio a las 23:30 es demasiado extenso, se opta por seleccionar un período más corto, del 4 de junio en el horario de 00:30 a 8:00, el código se presenta en el segundo anexo.

Los datos obtenidos se dividieron en tres intervalos para tener un mejor análisis.

Las siguientes imágenes se presenta las secuencias.

Primera imagen desde las 00:30 hasta las 2:00.

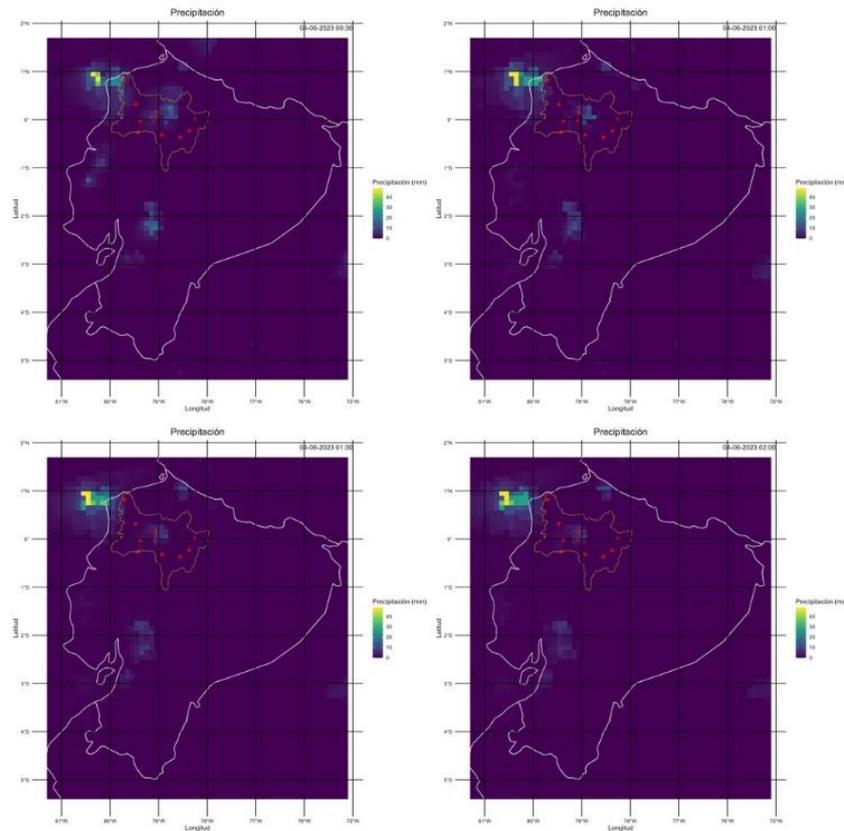


Figura 13: Precipitación Primer intervalo.

Fuente: Autoría Propia.

Al analizar la primera secuencia de imágenes, se observa que la silueta naranja delimita la cuenca del Río Esmeraldas, mientras que los puntos rojos indican la ubicación de las

estaciones meteorológicas dentro de la cuenca, se aprecia un alto nivel de precipitación en el punto de salida de la cuenca, con valores cercanos a 40 mm sobre el Océano Pacífico.

El segundo intervalo que es desde las 2:30 a las 4:00

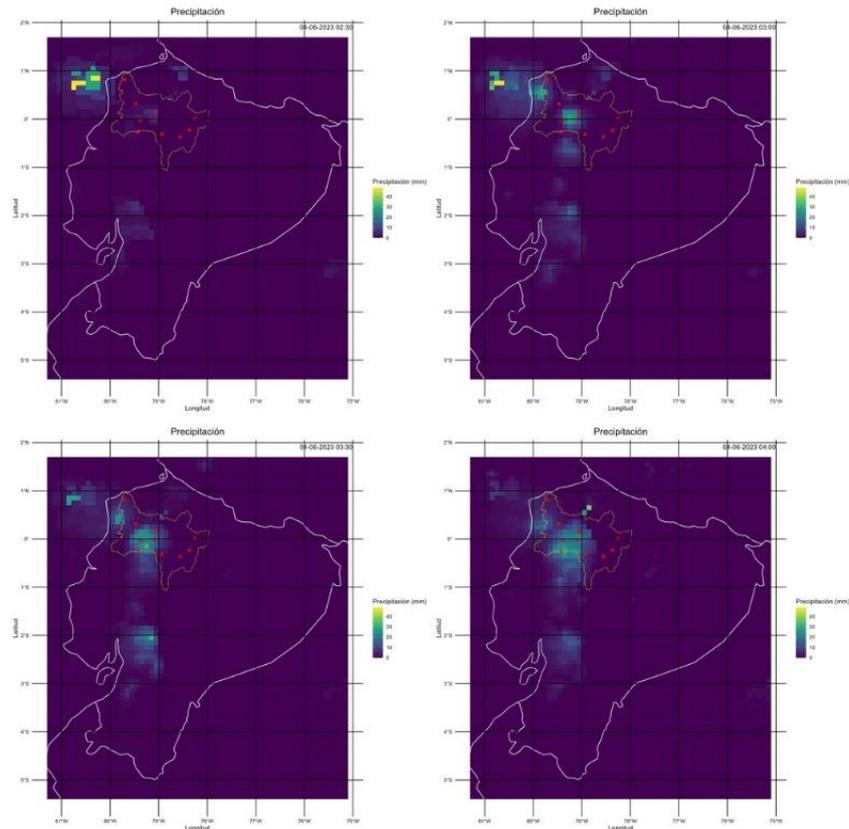


Figura 14: Precipitación Segundo intervalo.

Fuente: Autoría Propia.

Dentro de la primera hora del intervalo, se observa que altos niveles de precipitación persisten en la zona de salida, sin embargo, se inicia la formación de una tormenta en la parte media y alta de la cuenca, esta tormenta alcanza su punto máximo de precipitación a las 4:00, con valores cercanos a 30 mm.

El tercer intervalo que es desde las 4:30 a las 6:00.

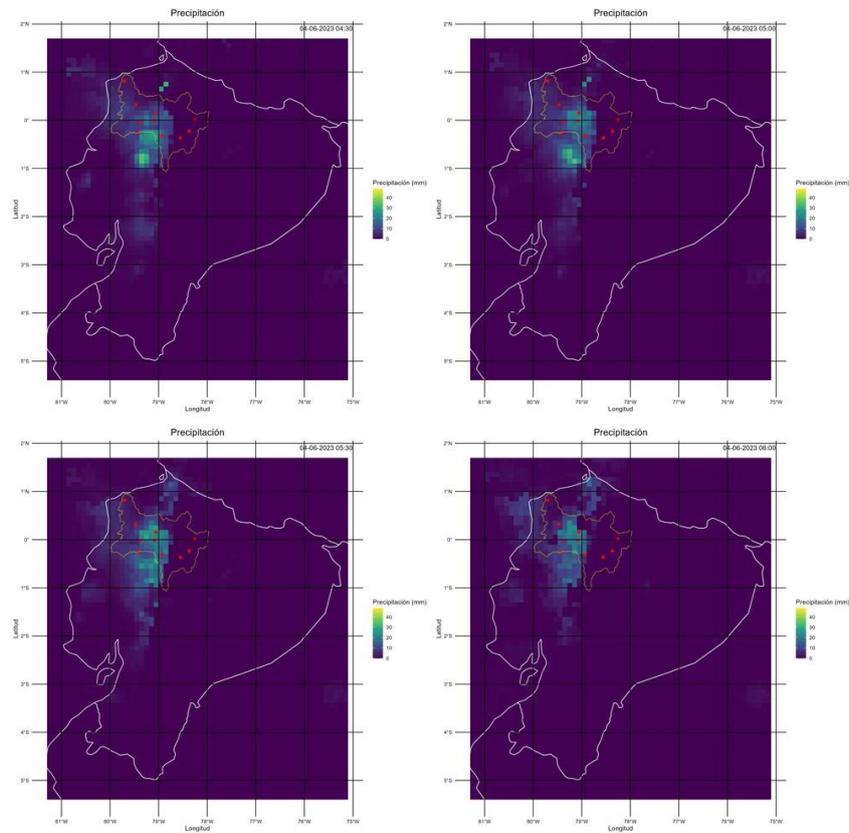


Figura 15: Precipitación Tercer intervalo.

Fuente: Autoría Propia.

Al analizar la tormenta, se observa que los valores de precipitación han aumentado significativamente, alcanzando sus valores máximos en los fotogramas de las 5:00 y 5:30, con valores superiores a 30 mm y cercanos a 40 mm de precipitación.

Finalmente, el último intervalo que es desde las 6:30 a las 8:00

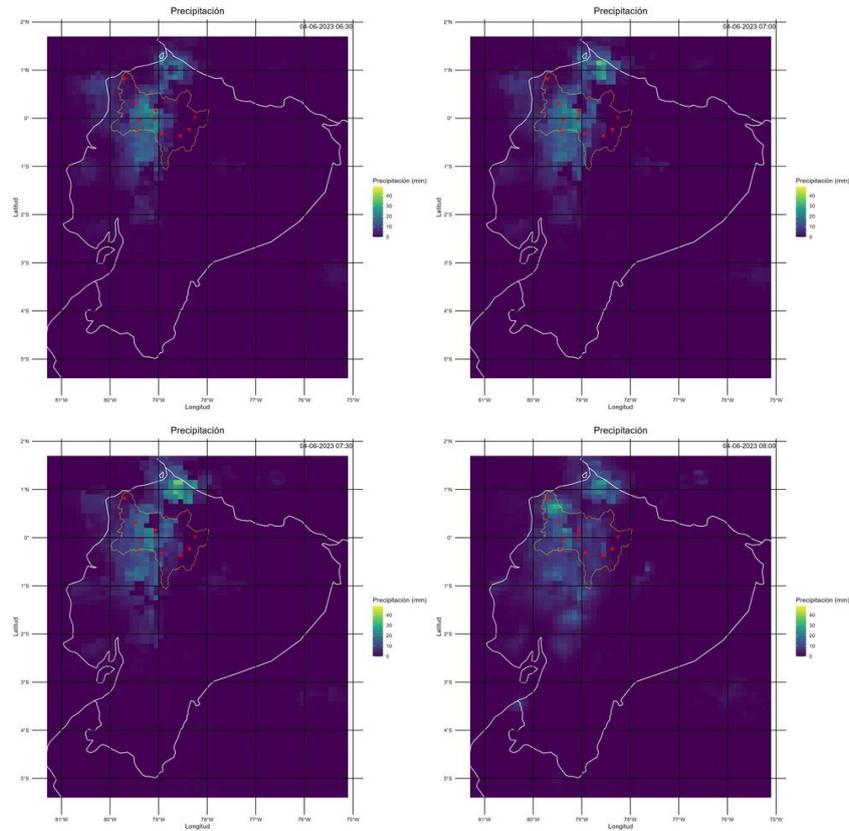


Figura 16: Precipitación Cuarto intervalo.

Fuente: Autoría Propia.

En el último intervalo, se observa que la tormenta se expande por toda la cuenca y gran parte de la Sierra y Costa ecuatoriana, con valores de precipitación superiores a 30 mm, al analizar todos los intervalos, se observa que la precipitación sobre la cuenca alcanzó sus valores más altos durante el tercer intervalo, por lo tanto, se interpreta que la tormenta que ocasionó la crecida se produjo en la madrugada del 4 de junio, aproximadamente a las 5:00.

5.1.4 Relleno de datos

Mediante el código de relleno de datos utilizando correlación lineal, disponible en el tercer anexo; se obtuvo la siguiente matriz: Antes de la aplicación del criterio de Kendall, es importante tener en cuenta que el período de análisis comprende desde el 24 de abril de 2022 a las 00:00 hasta el 31 de diciembre de 2023.

Tabla 6: Correlación entre estaciones sin criterio Kendall.

	M0003	M0025	M0156	M0160	M0444	M1094	M1190	M1262	M1266
M0003	0.00000000	0.074901061	0.04422771	0.09261695	0.028632102	0.326202071	0.09875787	0.08908851	0.11174647
M0025	0.07490106	0.000000000	0.28179937	0.28903517	0.161598466	0.005407748	0.34250956	0.07082090	0.22287164
M0156	0.04422771	0.281799371	0.00000000	0.23155192	0.201993365	0.019649926	0.23238093	0.08595431	0.23727184
M0160	0.09261695	0.289035172	0.23155192	0.00000000	0.166781882	0.038909972	0.21779244	0.15275910	0.24906965
M0444	0.02863210	0.161598466	0.20199336	0.16678188	0.000000000	-0.008245774	0.08495837	0.01128209	0.17233272
M1094	0.32620207	0.005407748	0.01964993	0.03890997	-0.008245774	0.000000000	0.04897786	0.05650351	0.03810875
M1190	0.09875787	0.342509557	0.23238093	0.21779244	0.084958374	0.048977863	0.00000000	0.06518748	0.28287703
M1262	0.08908851	0.070820900	0.08595431	0.15275910	0.011282089	0.056503512	0.06518748	0.00000000	0.14417252
M1266	0.11174647	0.222871644	0.23727184	0.24906965	0.172332716	0.038108753	0.28287703	0.14417252	0.00000000

Fuente: Autoría Propia.

Se observan correlaciones aceptables entre las estaciones cercanas, mientras que en las estaciones más lejanas se observan correlaciones significativamente menores.

Por lo que se presenta la matriz después de la aplicación del criterio de Kendall, que muestra solo las correlaciones superiores a 0,2.

Tabla 7: Correlación entre estaciones con criterio Kendall

	M0003	M0025	M0156	M0160	M0444	M1094	M1190	M1262	M1266
M0003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.326	0.000	0.000	0.000
M0025	0.000	0.000	0.282	0.289	0.000	0.000	0.343	0.000	0.223
M0156	0.000	0.282	0.000	0.232	0.202	0.000	0.232	0.000	0.237
M0160	0.000	0.289	0.232	0.000	0.000	0.000	0.218	0.000	0.249
M0444	0.000	0.000	0.202	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
M1094	0.326	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
M1190	0.000	0.343	0.232	0.218	0.000	0.000	0.000	0.000	0.283
M1262	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
M1266	0.000	0.223	0.237	0.249	0.000	0.000	0.283	0.000	0.000

Fuente: Autoría Propia.

El criterio de Kendall, al ser estricto, limita las correlaciones entre estaciones (Nimon et al., 2013). En el caso de la estación M1262, este criterio limita la correlación a cero con respecto a las otras estaciones, sin embargo, este inconveniente se resolvió considerando solo las filas cuya suma es diferente a cero para el relleno de datos.

Se utilizó la ecuación (2) para el relleno de datos faltantes en el código desarrollado en el lenguaje de programación R.

Posteriormente, se utilizaron las imágenes satelitales para llenar los intervalos donde no existían datos en ninguna estación, al emplear la regresión lineal entre los datos observados y satelitales, se obtuvieron los siguientes resultados entre las estaciones.

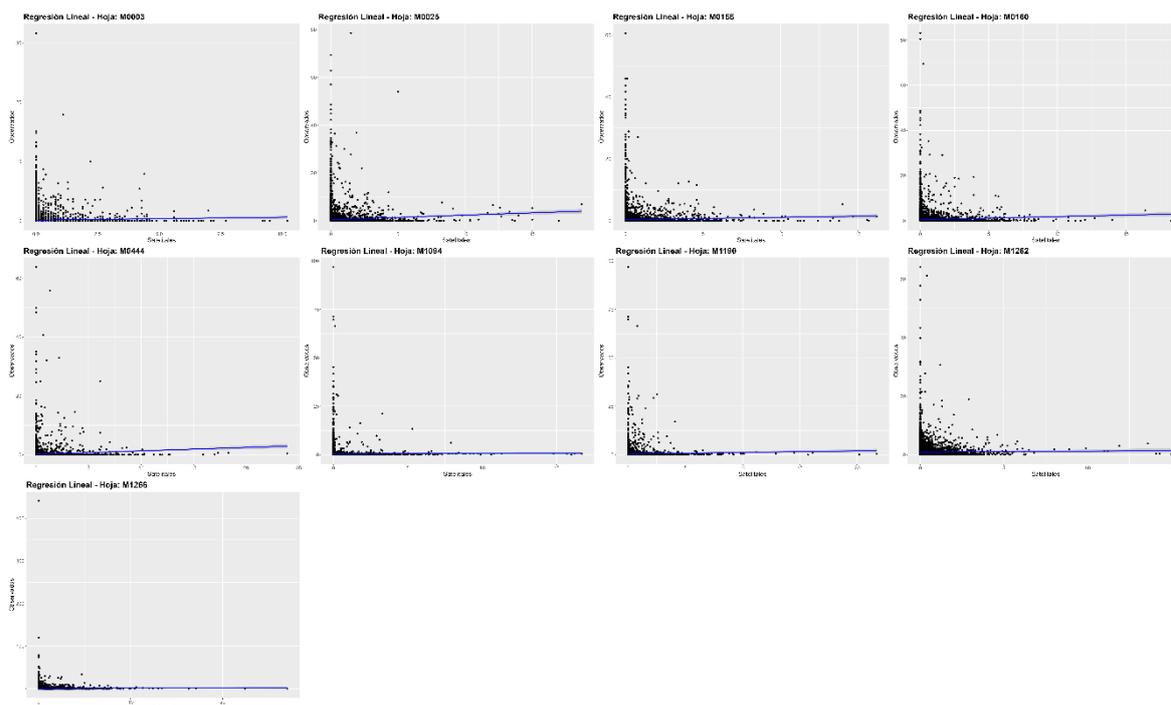


Figura 17: Regresiones lineales.

Fuente: Autoría Propia.

Se observa que en todas las estaciones se presenta una regresión lineal baja. Esto puede deberse a que varias estaciones se encuentran en cotas elevadas con respecto al nivel del mar.

Después, se desarrolló un código, disponible en el tercer anexo, para rellenar los datos faltantes mediante las ecuaciones obtenidas en la regresión lineal.

Obteniendo las siguientes graficas de precipitación en cada estación.

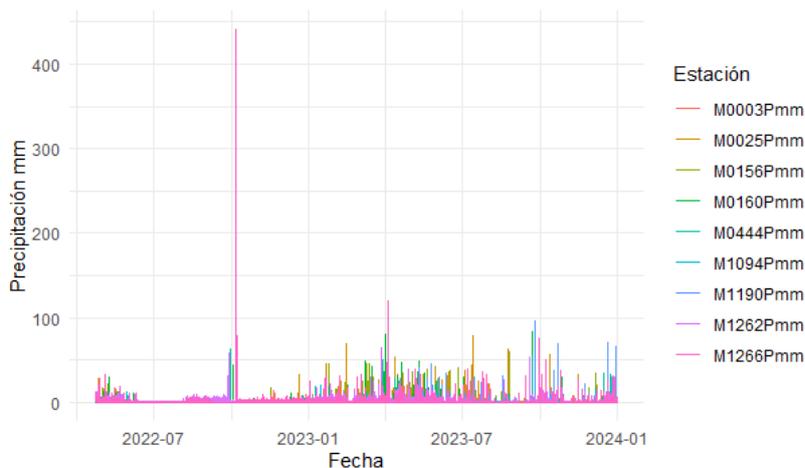


Figura 18: Precipitación.

Fuente: Autoría Propia

Se observa un valor anómalo en la estación M1266, seguido de una serie de valores muy homogéneos, donde se detecta una sequía alrededor del mes de julio de 2022. Como esta no se presenta en los intervalos de análisis, no se realizará una evaluación a fondo, siendo importante mencionar que la anomalía podría deberse a varios factores, como periodos de sequía normales en los meses de verano, precipitaciones bajas u otros factores relacionados con el cambio climático (Pineda et al., 2023).

Finalmente, se efectuó un control de los datos de rellenos; el mismo que permitió comparar los datos máximos en escala horaria con el valor de la precipitación diaria ocurrida el día del suceso.

Se obtuvo el siguiente resultado.

Tabla 8: Precipitación máxima horario vs Precipitación de ese día.

Estación	M0003	M0025	M0156	M0160	M0444	M1094	M1190	M1262	M1266
Fecha	2023-09-14 11:00:00	2023-07-13 20:00:00	2023-08-26 12:00:00	2023-09-21 11:00:00	2022-09-30 12:00:00	2023-01-14 15:00:00	2023-09-24 12:00:00	2023-03-27 13:00:00	2022-10-06 08:00:00
Precipitación Máxima horaria mm	31,7	78,6	60,7	83,1	63,8	21,1	96,9	64,2	440,9
Precipitación diaria mm	63,8	146,1	96,3	98,5	97,9	29,00	101,3	178,1	574,9
% sobre el día	49,69%	53,80%	63,03%	84,37%	65,17%	72,76%	95,66%	36,05%	76,69%

Fuente: Autoría Propia.

Al analizar el porcentaje de la precipitación máxima horaria sobre la precipitación diaria, se observa que en siete de las nueve estaciones superan el 50%, mientras que la estación M0003 no se aleja notablemente de este valor, mientras que, la estación M1262 presenta

un porcentaje de 36,05%, lo que destaca su diferencia con respecto a las demás estaciones, al analizar todos los datos de precipitación de ese día en la estación M1262.

Se obtuvo el siguiente resultado.

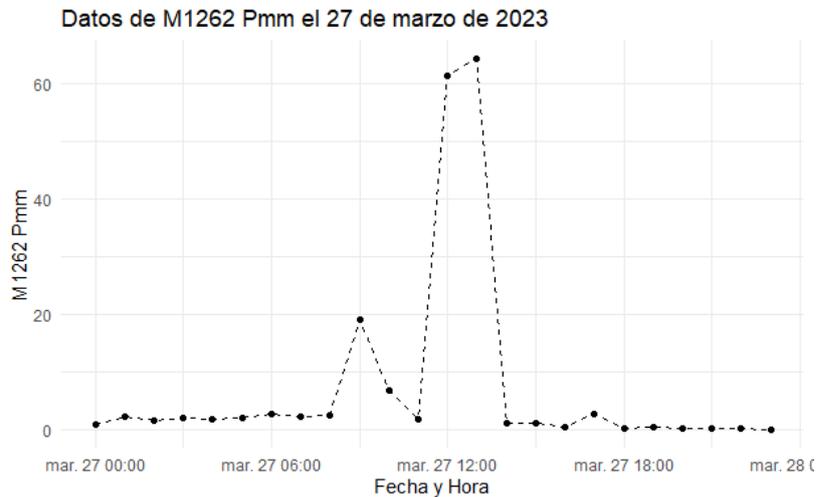


Figura 19: Precipitación estación M1262.

Fuente: Autoría Propia.

Durante todo el día se presentó lluvia sobre la zona, con picos de intensidad a las 8:00, 12:00 y 13:00, esto explica la diferencia entre el valor de precipitación diaria y el valor máximo de precipitación horaria.

Dado que los datos máximos horarios no discrepan de manera significativa con los datos diarios, se estima que los datos rellenados son confiables y pueden ser utilizados.

5.1.5 Manejo de datos de caudal

Dado que solo existe información de niveles de agua disponible, se tomaron los valores máximos de cada hora, y mediante la ecuación (3), se calcularon los caudales horarios con la curva de descarga de la estación H0168 (Becerra, 2024).

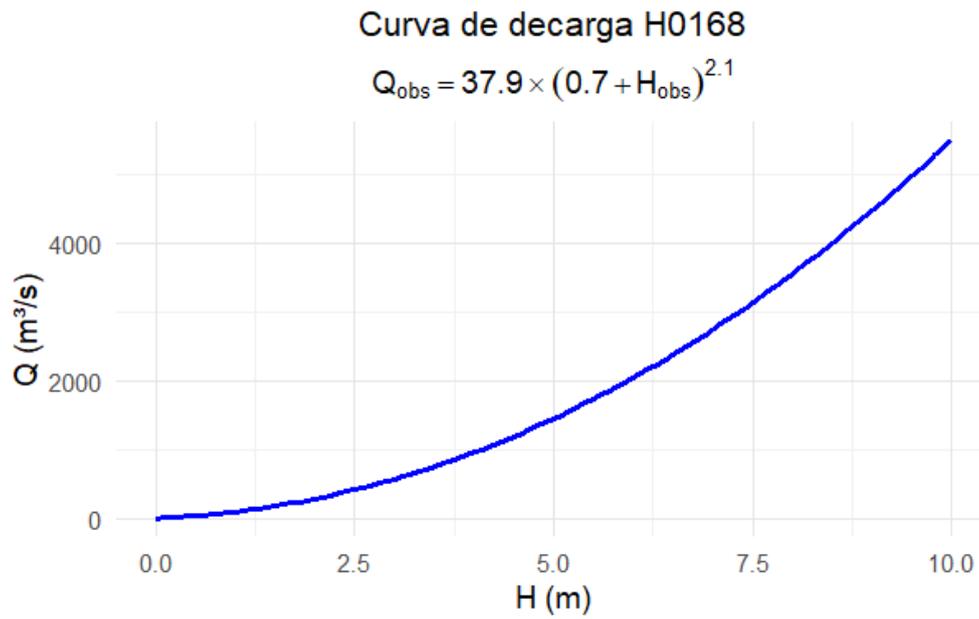


Figura 20: Curva de descarga.

Fuente: Autoría Propia.

Al comparar los caudales máximos obtenidos en las tres crecidas, con el caudal máximo instantáneo disponible en el anuario hidrológico del INAMHI año 2016.

Se obtuvo los siguientes resultados.

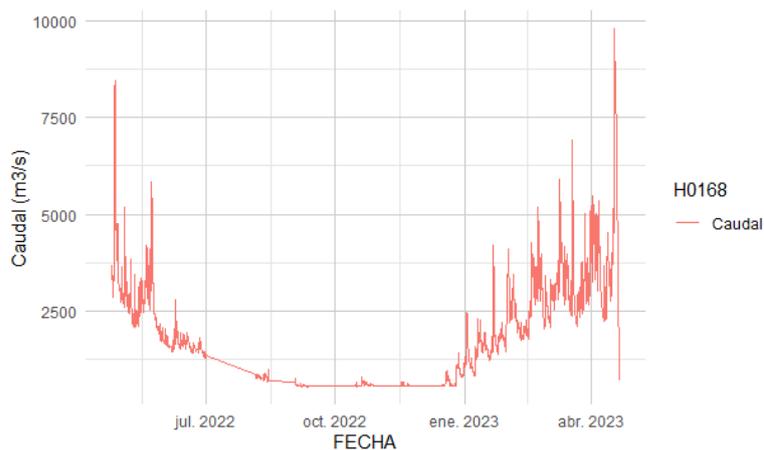


Figura 21: Ciclo anual H0168.

Fuente: Autoría Propia.

Mediante al análisis del ciclo anual, con datos disponibles hasta el 17 de abril del 2023, se escogieron las tres tormentas que se van a usar en el modelo, donde se presentan los caudales máximos de las tormentas escogidas.

Tabla 9: Caudales máximos.

H0168	Primera Tormenta	Segunda Tormenta	Tercera Tormenta	Caudal Máximo Instantáneo INAMHI
Caudal (m3/s)	8466,21	5828,59	6911,68	9083
Fecha	27/4/2022 9:00	23/5/2022 11:00	18/3/13:00	25/1/2026 17:00

Fuente: Autoría Propia.

Se verifica que los caudales máximos obtenidos en cada tormenta no superan el caudal máximo instantáneo que ha registrado la estación, por lo que se aceptan los caudales obtenidos mediante la curva de descarga del INAMHI.

5.1.6 Modelo

Mediante la herramienta GIS de HEC-HMS, se delimitaron las nueve subcuencas, tomando como referencia los siguientes parámetros: un área mínima de 1.100 km² y el punto de salida de la cuenca, ubicado en la provincia de Esmeraldas.

Se utilizó la herramienta "*Delineate Elements*" para asignar los elementos del río (R), subcuenca (SB), puntos de unión (J) y el punto de salida como "*sink-1*".

Dando como resultado la siguiente distribución.

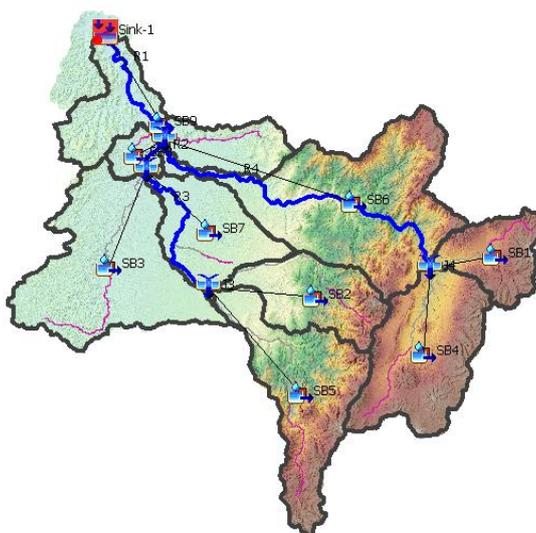


Figura 22: Delimitación de sub-cuencas en HEC-HMS.

Fuente: Autoría Propia.

Se utilizó la distribución anterior, por su semejanza a la distribución de nivel 4 de cuencas del INAMHI.

La misma que se presenta a continuación.

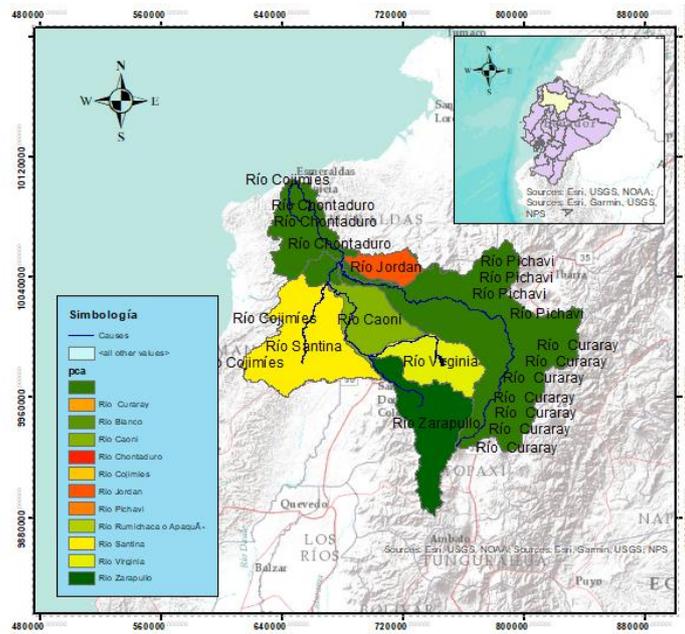


Figura 23: Delimitación nivel 4.

Fuente: Autoría Propia.

Ahora se muestran los parámetros de caracterización de cuenca obtenidos del HEC-HMS.

Tabla 10: Parámetros de la cuenca.

Cuenca	Área (km ²)	Longitud del cauce principal (Km)	Pendiente del cauce principal (M/M)
SB1	1167,9	82,97411	0,04623
SB2	1658,1	130,6847	0,03311
SB3	3778,6	166,07092	0,00206
SB4	2736,9	114,1532	0,02773
SB5	2771,6	171,86467	0,02412
SB6	4454,1	212,89252	0,02142
SB7	1736,5	108,62398	0,00612
SB8	396,76	54,2788	0,00673
SB9	2313,3	148,89315	0,01168

Fuente: Autoría Propia.

5.1.7 Parámetros S.C.S.

Se utilizaron las imágenes satelitales disponibles en Jaafar et al. (2019), las cuales pueden ser accedidas a través del siguiente enlace: [GCN250](#). Para el cálculo de la curva CN ponderada de la cuenca.

El mapa de CNII de la cuenca, queda de la siguiente manera:

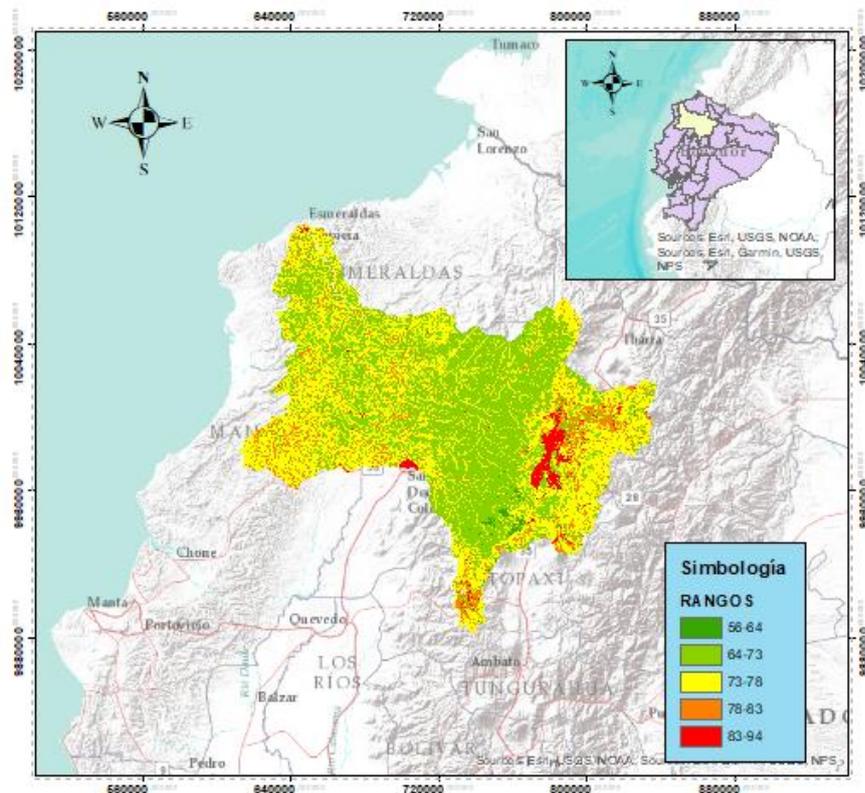


Figura 24: Valores CNII de la cuenca.

Fuente: Autoría Propia.

Se observan varios valores de CN, siendo los más altos, los correspondientes a asentamientos poblacionales, pero, sin embargo, se nota una predominancia de valores en el rango de 64-73.

Se calculó el valor de la curva CN ponderada para cada subcuenca y se presentan como resultados los valores enteros.

Tabla 11: CN de cada subcuenca.

Cuenca	CN Equivalente
sb1	76
sb2	71
sb3	75
sb4	76
sb5	73
sb6	73
sb7	73
sb8	73
sb9	73

Fuente: Autoría Propia.

Después se aplicaron las ecuaciones (4) y (5) para obtener el coeficiente de retención potencial y el coeficiente de abstracción inicial respectivamente.

Dando como resultado la siguiente tabla.

Tabla 12: Coeficientes SCS.

Coeficiente de retención potencial	Coeficiente de abstracción inicial	CN Equivalente
78,71770595	15,74	76
101,6420601	20,33	71
83,22519002	16,65	75
79,24879637	15,85	76
95,64226015	19,13	73
95,69385086	19,14	73
93,62766419	18,73	73
93,91389776	18,78	73
91,80713935	18,36	73

Fuente: Autoría Propia.

5.1.8 Hidrograma unitario de Clark

Con la ecuación del tiempo de concentración de Giandotti, ecuación (6), (Giandotti, 1934), las características de la cuenca y la ecuación del coeficiente de almacenamiento en fracción del 75% del tiempo de concentración (Clark, 1945), se obtuvieron los siguientes resultados.

A continuación, el mapa de alturas de la cuenca del Río Esmeraldas.

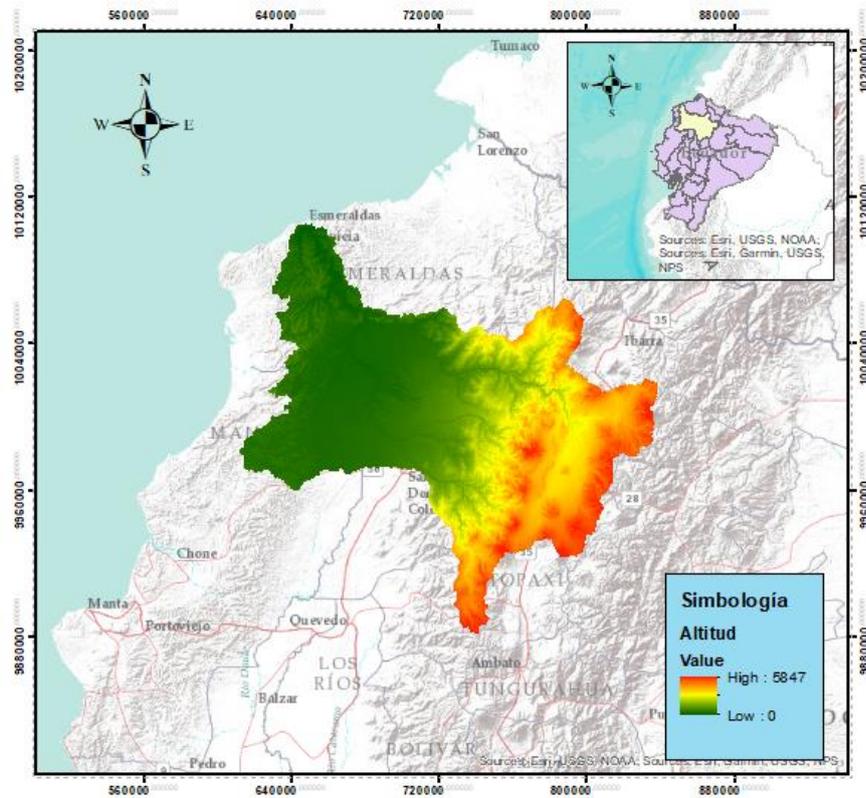


Figura 25: Mapa de alturas de la cuenca del Río Esmeraldas.

Fuente: Autoría Propia.

Se evidencia que se tienen alturas bajas en la zona costera de la cuenca, mientras que en la zona de la Sierra se tienen valores altos.

Tabla 13: Tiempo de concentración y Coeficiente de almacenamiento.

Cuenca	Área	Longitud del cauce principal (Km)	Hmin	Hmax	H	TC Giandotti	Cal	Factor
SB1	1167,9	82,97	1854	5732	3878	5,24	3,932	0,75
SB2	1658,1	130,68	321	4740	4419	6,75	5,062	0,75
SB3	3778,6	166,07	61	967	906	20,56	15,417	0,75
SB4	2736,9	114,15	1515	5879	4364	7,20	5,400	0,75
SB5	2771,6	171,86	318	5203	4885	8,38	6,283	0,75
SB6	4454,1	212,89	42	4902	4860	10,51	7,884	0,75
SB7	1736,5	108,62	68	1762	1694	10,01	7,508	0,75
SB8	396,76	54,28	52	564	512	8,90	6,674	0,75
SB9	2313,3	148,89	8	1842	1834	12,13	9,101	0,75

Fuente: Autoría Propia.

En la tabla se presentan varios parámetros de las subcuencas, los mismos que son:

- **Cuenca:** Subcuenca de estudio.
- **Área:** El área de cada subcuenca en kilómetros cuadrados.

- **Longitud del cauce principal:** De cada cuenca en kilómetros.
- **Hmin:** La altura mínima dentro de cada subcuenca en msnm.
- **Hmax:** La altura máxima dentro de cada subcuenca en msnm.
- **H:** Desnivel total, diferencia entre la altura máxima y mínima en cada subcuenca en msnm.
- **TC Giandotti:** Tiempo de concentración utilizando la ecuación de Giandotti (6) en horas.
- **Cal:** Coeficiente de almacenamiento, el valor que representa la capacidad de almacenamiento de cada subcuenca.
- **Factor:** Fracción por la que se multiplica al tiempo de concentración para obtener el coeficiente de almacenamiento (Giandotti, 1934).

5.1.9 Caudal Base

Para el caudal base se usó el anuario hidrológico más actual del que existe datos de todas las estaciones, tomando el valor mínimo de cada una, en el caso que no exista la estación en la cuenca se asignará el valor de 0 como caudal base.

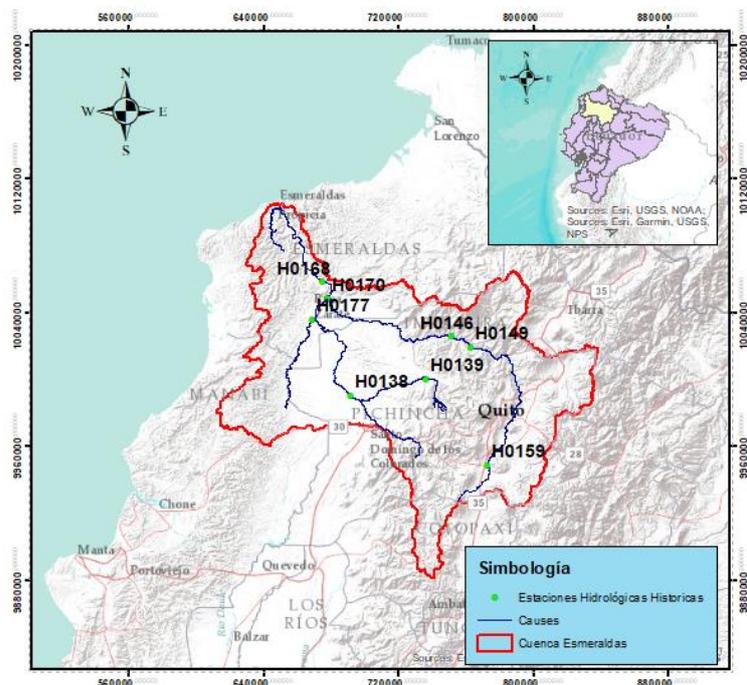


Figura 26: Estaciones Hidrológicas históricas en la cuenca del Río Esmeraldas.

Fuente: Autoría Propia.

Los datos fueron obtenidos del Anuario Hidrológico del INAMHI del 2013. Esta versión fue seleccionada por ser la última ya que se observa un registro completo de caudales de todas las estaciones previamente mencionadas.

Tabla 14: Caudales mensuales base.

Cuenca	Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
SB1	H0148	7,066	18,178	19,567	17,51	25,717	9,626	9,169	9,169	8,289	8,289	9,626	14,378
SB2	H0139	23,884	66,86	0	57,903	56,454	0	27,231	0	16,176	15,225	18,137	17,15
SB3	H0177	28,675	130,589	41,438	67,817	63,212	33,93	20,778	13,827	12,809	10,891	8,855	8,582
SB4	H0159	2,179	2,179	3,483	3,257	4,221	2,094	1,558	0,908	1,701	1,701	1,776	1,931
SB5	S.E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SB6	H0149	37,19	73,421	47,836	50,55	62,021	37,653	37,312	29,709	30,165	45,283	43,039	45,049
SB7	H0138	106,294	232,023	337,983	309,913	256,913	143,573	89,478	0	59,636	0	59,636	46,686
SB8	H0170	1,22	1,23	1,32	1,48	1,42	1,02	1,28	1,11	1,05	1,13	1,3	1,18
SB9	H0168	2854,55825	2854,55825	2854,55825	2854,55825	2854,55825	2854,55825	2854,55825	2854,55825	2854,55825	2854,55825	2854,55825	2854,55825

Fuente: INAMHI, 2013.

5.1.10 Muskingum

Mediante la aplicación de las ecuaciones (8), (9) y (10), se obtuvieron los parámetros k , x y n , respectivamente. Cabe destacar que se utilizó un intervalo de tiempo Δt de 20 minutos, según la referencia U.P.C (2012).

Se presentan los resultados.

Tabla 15: Datos Muskingum.

Río	Longitud (KM)	Pendiente (M/M)	Δt (min)	K	x	Número de Subtramos
R1	76,7884	0,0006	20	8,4322	0,20	11
R3	92,0647	0,0028	20	7,1534	0,20	9
R2	19,7237	0,0008	20	2,7980	0,20	4
R4	188,3329	0,0097	20	9,6915	0,35	21

Fuente: Autoría Propia.

Dado que R4 se encuentra en la parte alta de la cuenca, se tomó un valor de 0,35 en x , y que R1, R2, R3 presentan pendientes bajas y se asignan valores de 0,2 en x (U.P.C, 2012).

5.1.11 Especificación de control, Modelo meteorológico, Asignación de estación a cada subcuencas

Para la especificación de control, se desarrolló un modelo que abarcó desde un día antes hasta dos días después de cada tormenta, con un intervalo de tiempo de 20 minutos para cada evento (U.P.C, 2012).

El modelo se creó utilizando el hietograma específico como opción de precipitación y se seleccionó la opción por defecto para el reemplazo de valores. Se integraron estos en el modelo de la cuenca y se generó la distribución de cada estación en los polígonos de Thierssen, que se presenta a continuación.

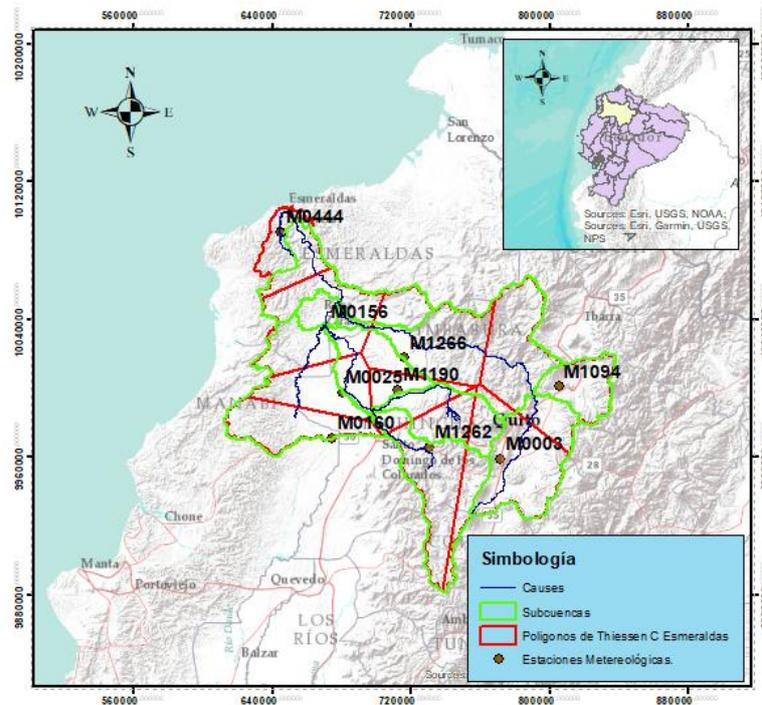


Figura 27:Polígonos de Thierssen.

Fuente: Autoría Propia.

Con base en la información anterior, se realizó la distribución de estaciones para el modelo meteorológico, lo que dio como resultado la siguiente configuración:

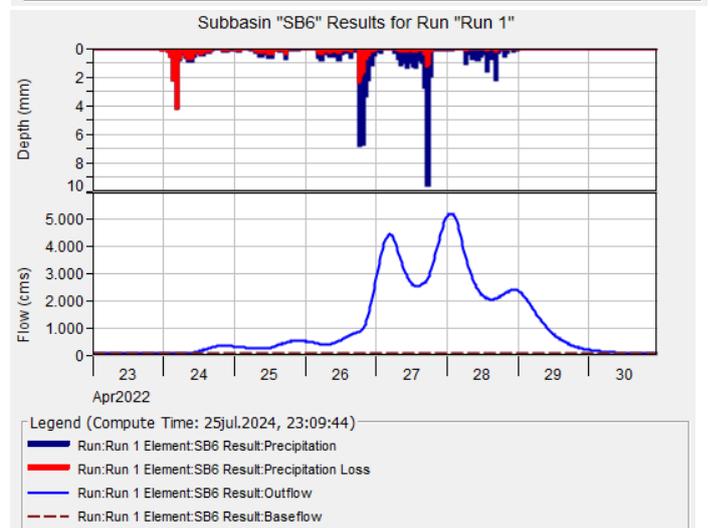
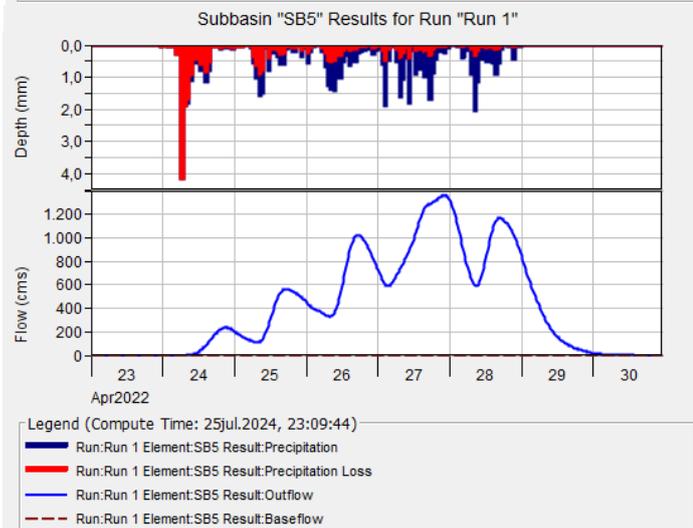
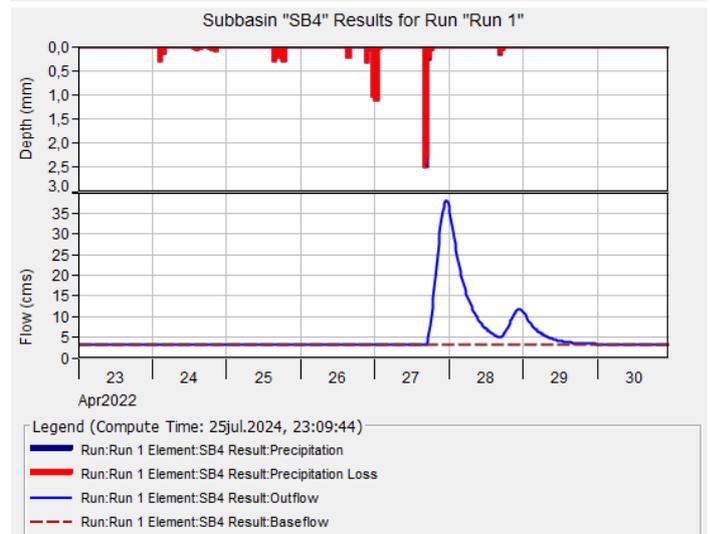
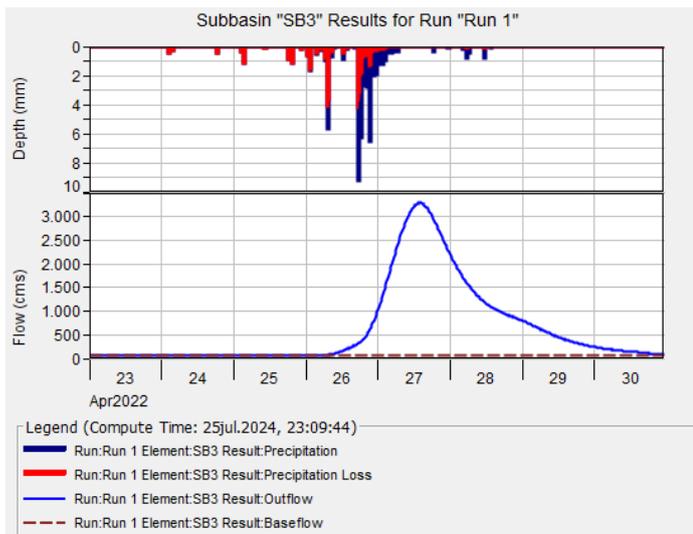
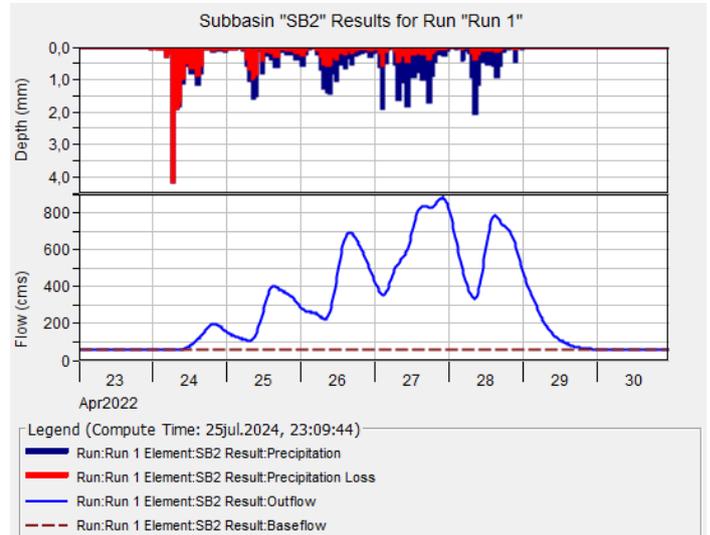
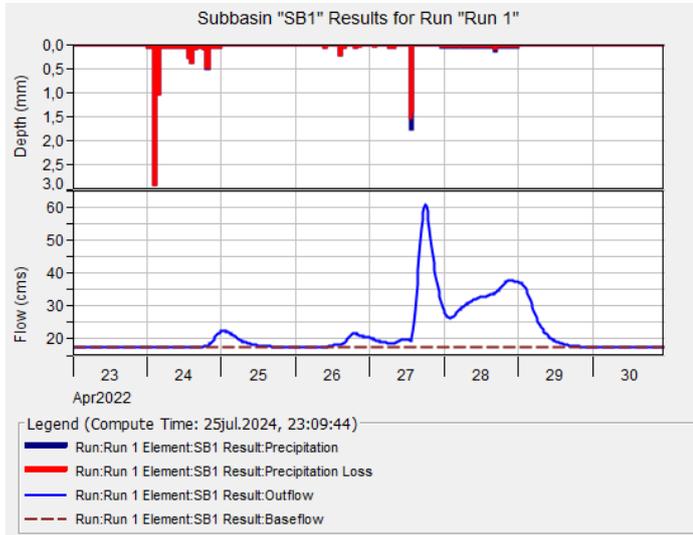
Tabla 16:Distribución de estación según la subcuenca.

Cuenca	Estación
SB1	M1094
SB2	M1262
SB3	M0025
SB4	M0003
SB5	M1262
SB6	M1266
SB7	M1190
SB8	M0156
SB9	M0444

Fuente: Autoría Propia.

Con todos los parámetros anteriormente expuestos se corrió el primer modelo en HEC-HMS.

Obteniendo los siguientes resultados.



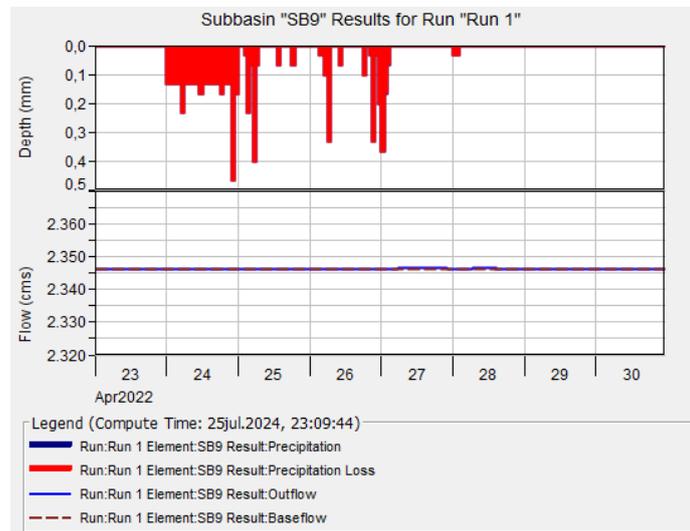
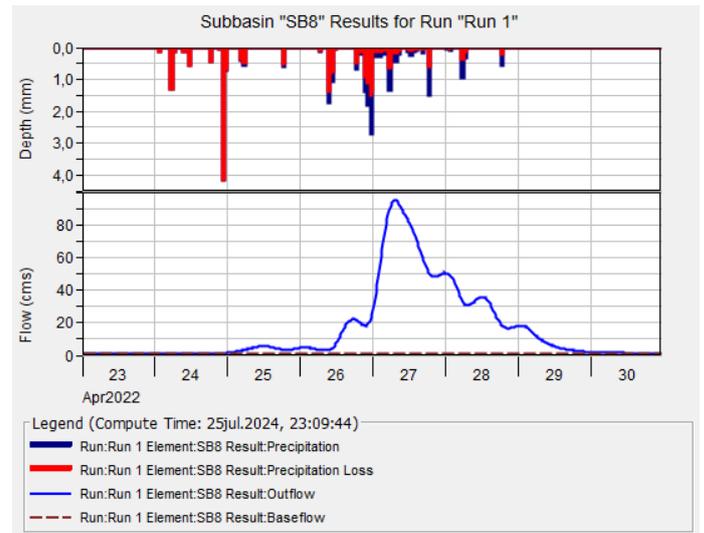
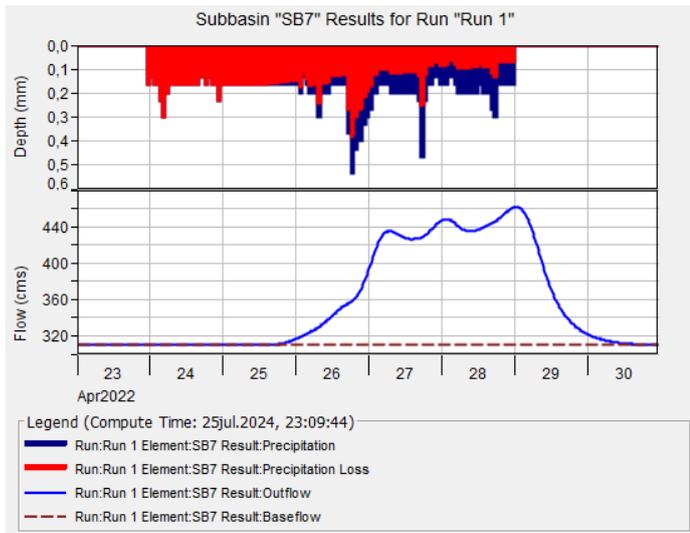


Figura 28: Resultado subcuencas.

Fuente: Autoría Propia.

Al analizar los hidrogramas de cada subcuenca, se observa que la 3, 5 y 6 presentan hidrogramas más variables y con caudales más altos, mientras que la 4 muestra el caudal más bajo. Por otro lado, la 9 presenta un caudal constante.

Se asignaron los datos de caudales observados al punto de salida de la cuenca, lo que permitió obtener el hidrograma final.

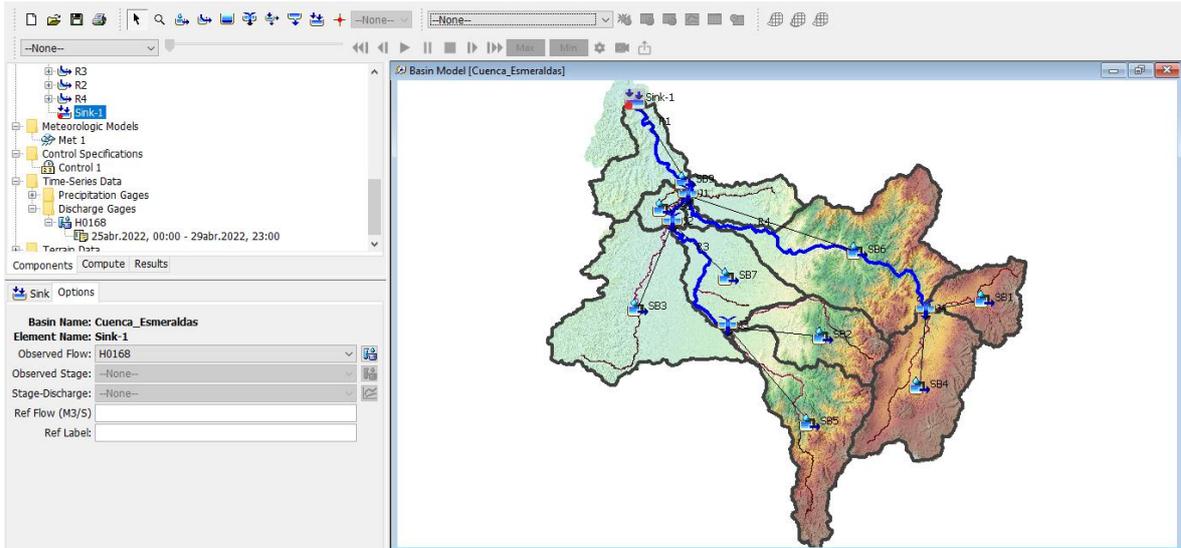


Figura 29: Asignación de caudales Observados.

Fuente: Autoría Propia.

Ahora el hidrograma final en el punto de salida de la cuenca.

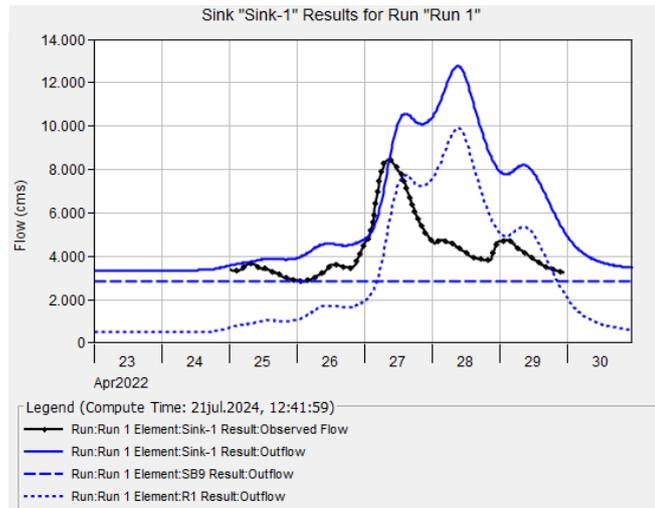


Figura 30: Hidrograma de la cuenca del Río Esmeraldas.

Fuente: Autoría Propia.

En la comparación entre el hidrograma simulado y el hidrograma observado se nota una gran diferencia en magnitud, forma y un leve desfase; por lo que se calibrarán los valores de la curva S.C.S., el Hidrograma unitario de Clark y los caudales Base.

5.1.12 Calibración

En primer lugar, se varió los valores S.C.S., tomando en cuenta la textura del suelo, que se presenta a continuación.

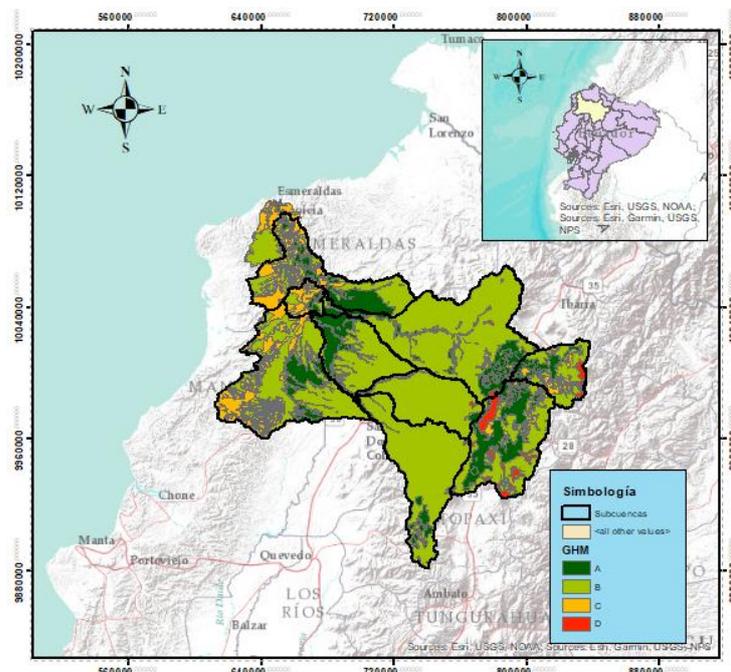


Figura 31: Textura del Suelo en la Cuenca del Río Esmeraldas.

Fuente: Autoría Propia.

Debido a que la textura se clasifica como tipo B, correspondiente a la categoría media según Vélez (2000), se procederá a ajustar los valores de CNII, a más bajos y se multiplicarán por un factor de reducción.

Obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 17: CN equivalente calibrado.

Cuenca	Factor de calibración	CN Reducido	Coefficiente de retención potencial	Coefficiente de abstracción inicial	CN Equivalente
SB1	0,9	63	193,97	38,79	56,7
SB2	0,9	58	232,59	46,52	52,2
SB3	0,9	62	201,20	40,24	55,8
SB4	0,9	63	193,97	38,79	56,7
SB5	0,9	62	201,20	40,24	56
SB6	0,9	60	216,37	43,27	54
SB7	0,9	59	224,34	44,87	53
SB8	0,9	60	216,37	43,27	54
SB9	0,9	60	216,37	43,27	54

Fuente: Autoría Propia.

En segundo lugar, se procedió a calibrar los valores del Hidrograma Unitario de Clark mediante un enfoque manual y empírico. Para ello, se multiplicó el valor del tiempo de concentración por factores menores a 1, seleccionando un valor de 0,4 para obtener un tiempo de concentración acorde a la cuenca. Luego, se calibró el coeficiente de almacenamiento multiplicando su respectivo tiempo de contracción por 0,1, con el objetivo de obtener un hidrograma simulado que se asemejara al hidrograma observado presentando los siguientes resultados.

Tabla 18: Valores de Hidrograma unitario de Clark Calibrado.

Cuenca	Área	Longitud del cauce principal (Km)	Hmin	Hmax	Hm	TC Giandotti Ajustado	Cal	Factor Cal	Factor TC
SB1	1167,9	82,97	1854	5732	3878	2,10	0,210	0,1	0,4
SB2	1658,1	130,68	321	4740	4419	2,70	0,270	0,1	0,4
SB3	3778,6	166,07	61	967	906	8,22	0,822	0,1	0,4
SB4	2736,9	114,15	1515	5879	4364	2,88	0,288	0,1	0,4
SB5	2771,6	171,86	318	5203	4885	3,35	0,335	0,1	0,4
SB6	4454,1	212,89	42	4902	4860	4,21	0,421	0,1	0,4
SB7	1736,5	108,62	68	1762	1694	4,00	0,400	0,1	0,4
SB8	396,76	54,28	52	564	512	3,56	0,356	0,1	0,4
SB9	2313,3	148,89	8	1842	1834	4,85	0,485	0,1	0,4

Fuente: Autoría Propia.

No se variaron los valores de Muskingum, puesto que al momento que fue calculado se llevó al límite la calibración del mismo según el manual de uso de HEC-HMS de la Universidad Politécnica de Cataluña (2012).

Tabla 19: Valores finales de Muskingum.

Río	Longitud (KM)	Pendiente (M/M)	Δt (min)	K	x	Número de Subtramos
R1	76,7884	0,0006	20	8,4322	0,20	11
R3	92,0647	0,0028	20	7,1534	0,20	9
R2	19,7237	0,0008	20	2,7980	0,20	4
R4	188,3329	0,0097	20	9,6915	0,35	21

Fuente: Autoría Propia.

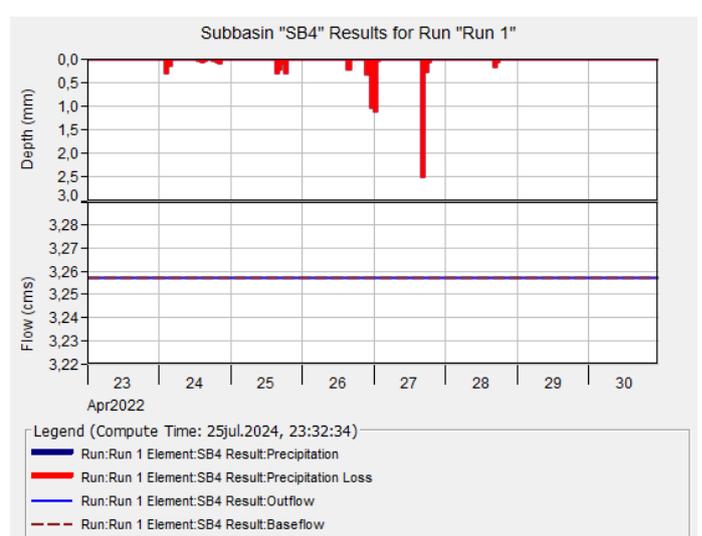
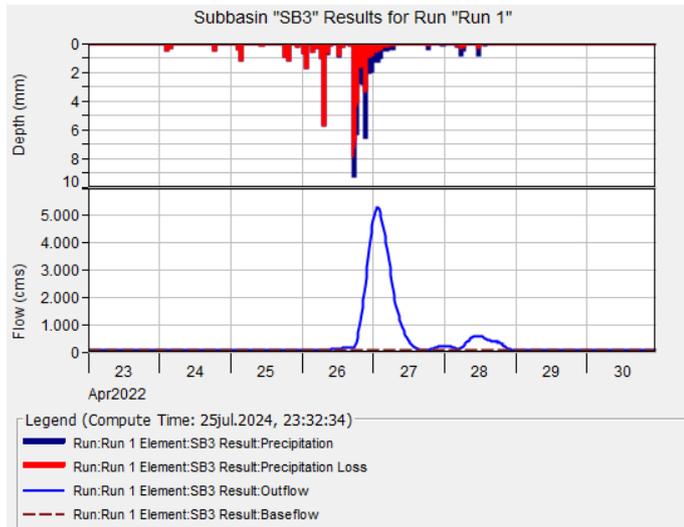
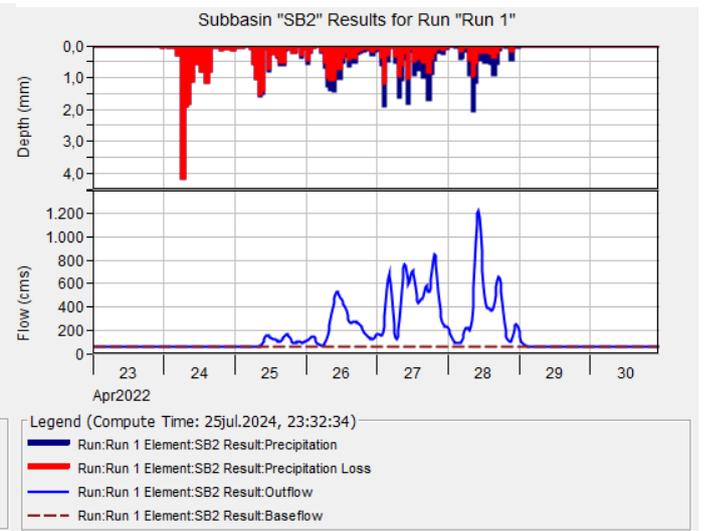
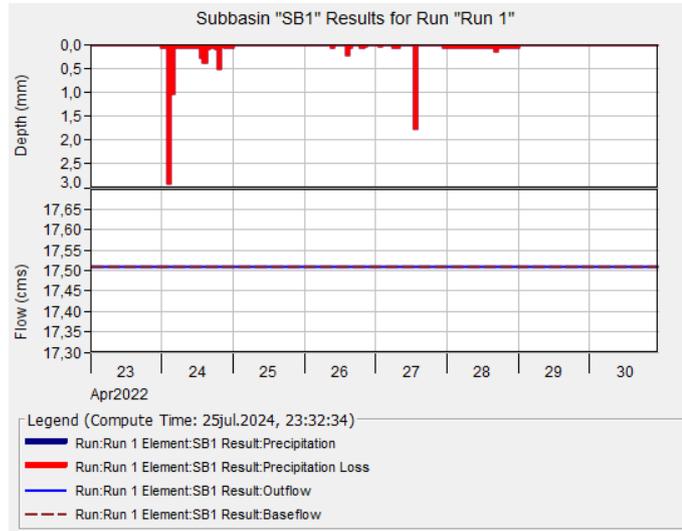
Para el Caudal Base se calibró restando los caudales de las estaciones que alimentan, a la estación H0168, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 20: Valores Base mensuales Calibrados.

Cuenca	Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
SB1	H0148	7,066	18,178	19,567	17,510	25,717	9,626	9,169	9,169	8,289	8,289	9,626	14,378
SB2	H0139	23,884	66,860	0,000	57,903	56,454	0,000	27,231	0,000	16,176	15,225	18,137	17,150
SB3	H0177	28,675	130,589	41,438	67,817	63,212	33,930	20,778	13,827	12,809	10,891	8,855	8,582
SB4	H0159	2,179	2,179	3,483	3,257	4,221	2,094	1,558	0,908	1,701	1,701	1,776	1,931
SB5	S.E	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SB6	H0149	37,190	73,421	47,836	50,550	62,021	37,653	37,312	29,709	30,165	45,283	43,039	45,049
SB7	H0138	106,294	232,023	337,983	309,913	256,913	143,573	89,478	0,000	59,636	0,000	59,636	46,686
SB8	H0170	1,220	1,230	1,320	1,480	1,420	1,020	1,280	1,110	1,050	1,130	1,300	1,180
SB9	H0168	2648,050	2330,078	2402,931	2346,128	2384,600	2626,662	2667,752	2799,835	2724,732	2772,039	2712,189	2719,602

Fuente: Autoría Propia.

Se presenta los resultados del modelo calibrado.



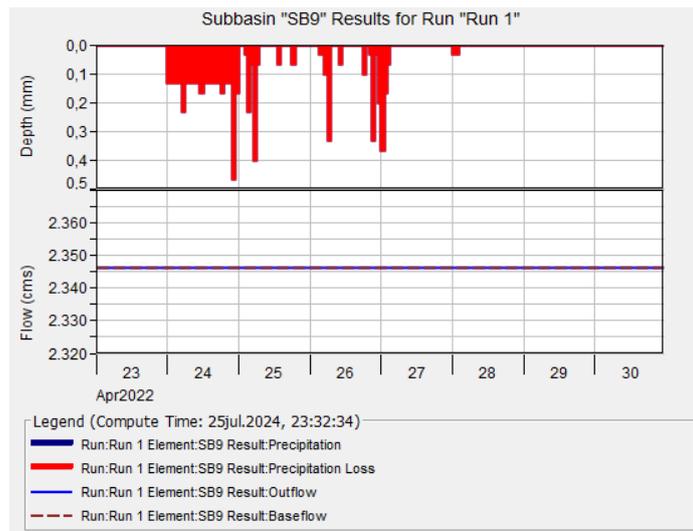
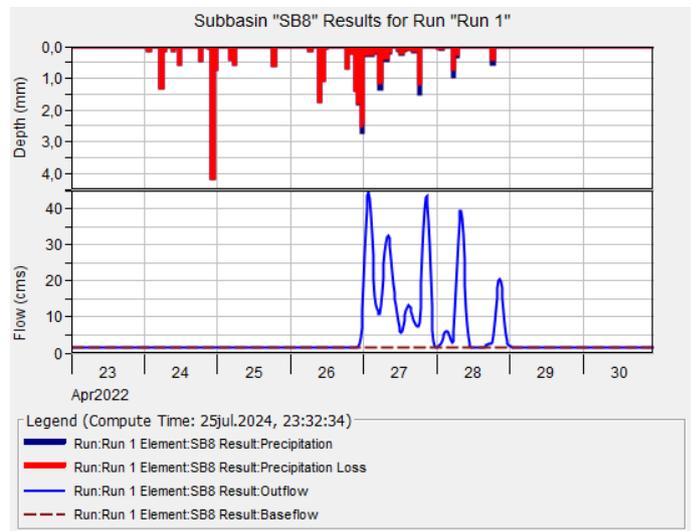
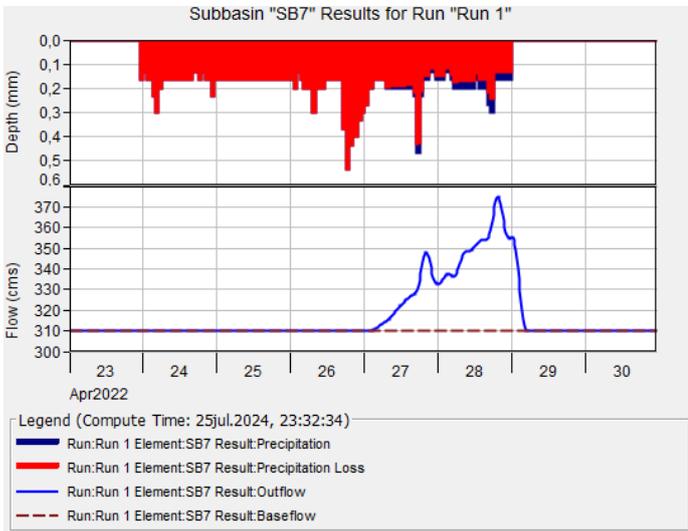
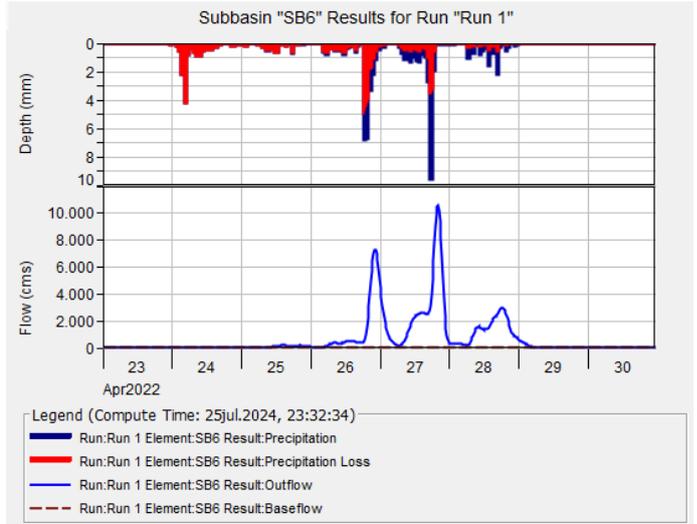
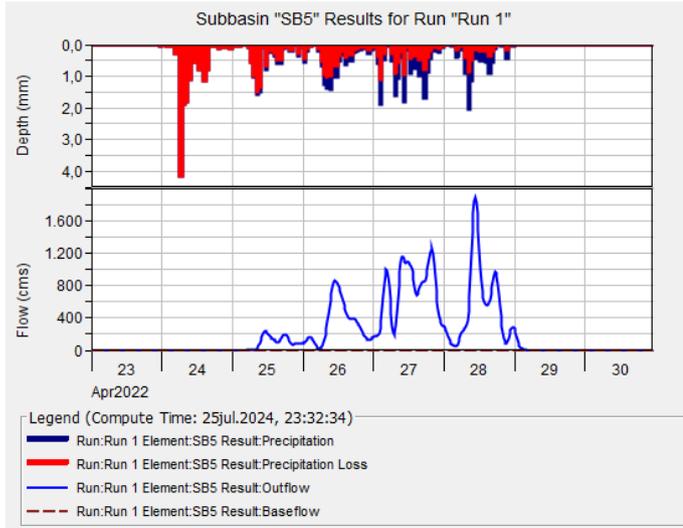


Figura 32: Modelo Calibrado.

Fuente: Autoría Propia.

Al analizar los hidrogramas, se observa que las subcuencas 3, 5 y 6 presentan los valores de caudal más altos. Por otro lado, las subcuencas 1, 4 y 9 muestran caudales constantes, mientras que la subcuenca 8 registra el valor de caudal más bajo, además, en la cuenca 7 se observa un hidrograma con precipitación constante, lo que puede explicarse por las correlaciones bajas presentes en el proceso de relleno de datos.

Los resultados en el punto de salida.

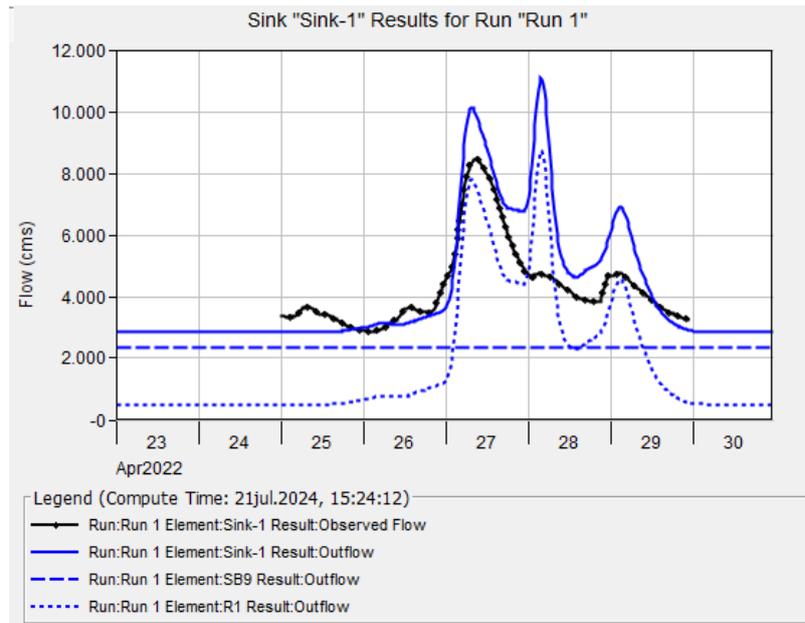


Figura 33: Hidrograma de salida.

Fuente: Autoría Propia.

Se observa una similitud en los picos de los hidrogramas, sin embargo, para explicar las diferencias entre el hidrograma simulado y el observado, se consideran factores externos que pueden influir en el modelo; en este caso, se identifican como factores externos, la central hidroeléctrica Manduriacu y la central hidroeléctrica Toachi Pilatón, las cuales pueden estar afectando los resultados del modelo.

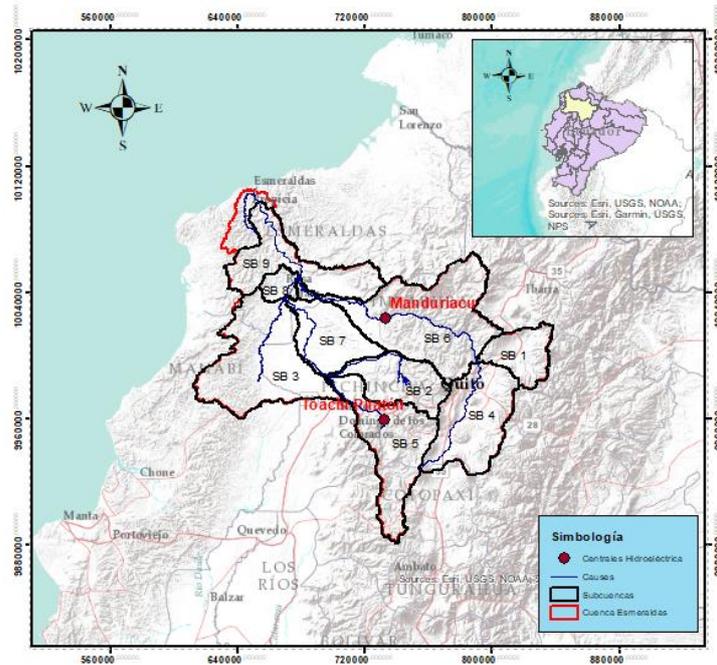


Figura 34: Centrales Hidroeléctricas.

Fuente: Autoría Propia.

Las centrales hidroeléctricas se encuentran ubicadas en las subcuencas 5 y 6, que son precisamente las que generan los caudales más altos. Sin embargo, el modelo no considera la captación de agua realizada por estas dos, lo que provoca las diferencias observadas en los picos del hidrograma simulado en comparación con el hidrograma observado.

El caudal pico simulado es $10133,9 \frac{m^3}{s}$ el 27 de abril del 2022 a las 7:40.

El caudal pico observado es $8466,2 \frac{m^3}{s}$ el 27 de abril del 2022 a las 9:00.

Se calcula la diferencia relativa entre los caudales y el tipo de llegada.

Obteniendo la ecuación de (Morgan et al., 2020).

$$\%DrQ = \frac{|Q_{sim} - Q_{obs}|}{Q_{obs}} * 100$$

$$\%DrQ = 19,69\%$$

$$\%Drt = \frac{|t_{obs} - t_{sim}|}{t_{obs}} * 100$$

$$\%Drt = 14,88\%$$

Se utilizó este método y no el de Nash-Sutcliffe por los picos extras en el hidrograma simulado, también en ambos cálculos se tuvieron menos del 25% de diferencia.

El segundo pico es $11072,1 \frac{m^3}{s}$ se produjo el 28 de abril a las 3:40.

Este pico, que ocurrió durante la madrugada, podría haber sido causado por los factores externos ya mencionados anteriormente.

Se presentan la evaluación de desempeño calculado por HEC-HMS.

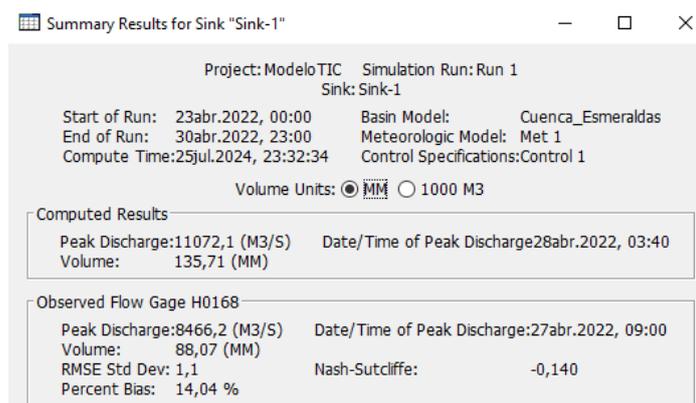


Figura 35: Resumen de valores obtenidos en el primer modelo.

Fuente: Autoría Propia.

Se obtuvo un valor de $PBIAS = 14,04\%$ lo que es menor al 25% se considera un modelo satisfactorio, con respecto a Nash-Sutcliffe el valor es menor a 0,5 por lo que no se tomara en cuenta para el criterio de modelo satisfactorio (Ochoa et al., 2022).

5.1.13 Evaluación

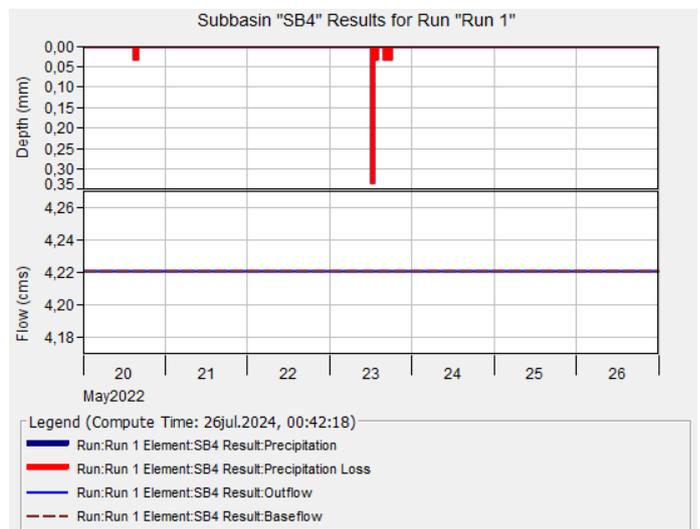
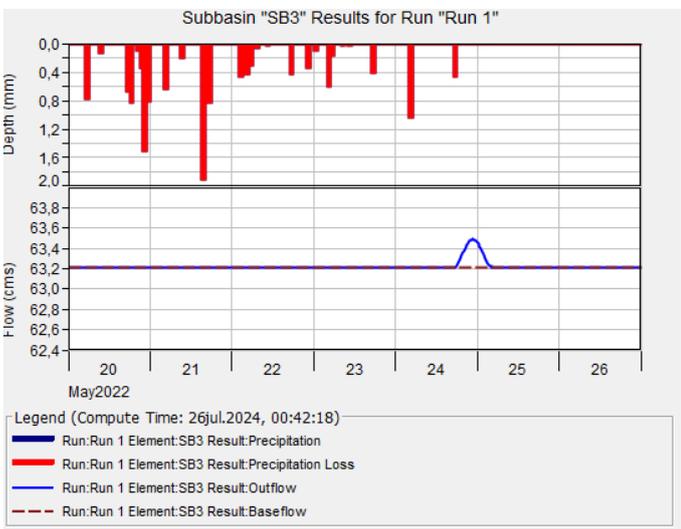
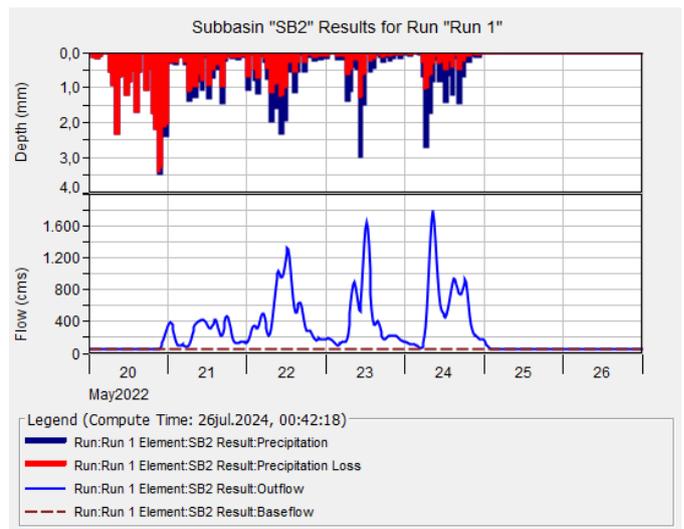
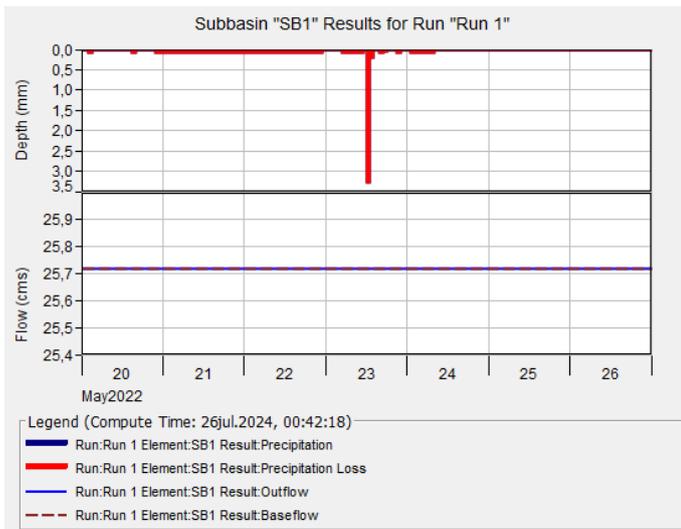
Se presentan los resultados obtenidos para la segunda tormenta, utilizando los parámetros ajustados previamente, con la única modificación en el modelo siendo la variación los caudales base, pero es importante destacar que el caudal base se ajustó utilizando el caudal mínimo registrado durante esta tormenta, y solo se modificaron los valores correspondientes a la cuenca Sb9.

Tabla 21: Valores de caudales base Segunda Tormenta.

Cuenca	Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
SB1	H0148	7,066	18,178	19,567	17,510	25,717	9,626	9,169	9,169	8,289	8,289	9,626	14,378
SB2	H0139	23,884	66,860	0,000	57,903	56,454	0,000	27,231	0,000	16,176	15,225	18,137	17,150
SB3	H0177	28,675	130,589	41,438	67,817	63,212	33,930	20,778	13,827	12,809	10,891	8,855	8,582
SB4	H0159	2,179	2,179	3,483	3,257	4,221	2,094	1,558	0,908	1,701	1,701	1,776	1,931
SB5	S.E	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SB6	H0149	37,190	73,421	47,836	50,550	62,021	37,653	37,312	29,709	30,165	45,283	43,039	45,049
SB7	H0138	106,294	232,023	337,983	309,913	256,913	143,573	89,478	0,000	59,636	0,000	59,636	46,686
SB8	H0170	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SB9	H0168	2322,802	2004,840	2077,783	2021,140	2059,552	2301,214	2342,564	2474,477	2399,314	2446,701	2387,021	2394,314

Fuente: Autoría Propia.

A continuación, los resultados.



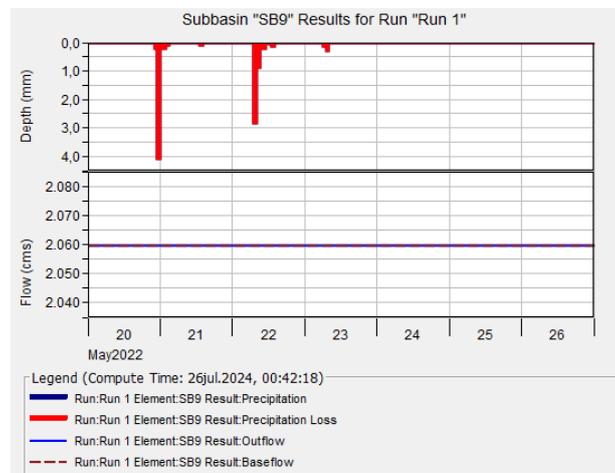
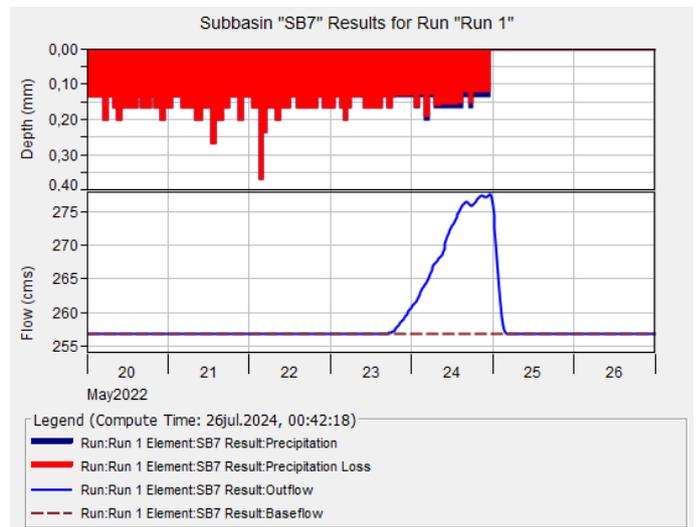
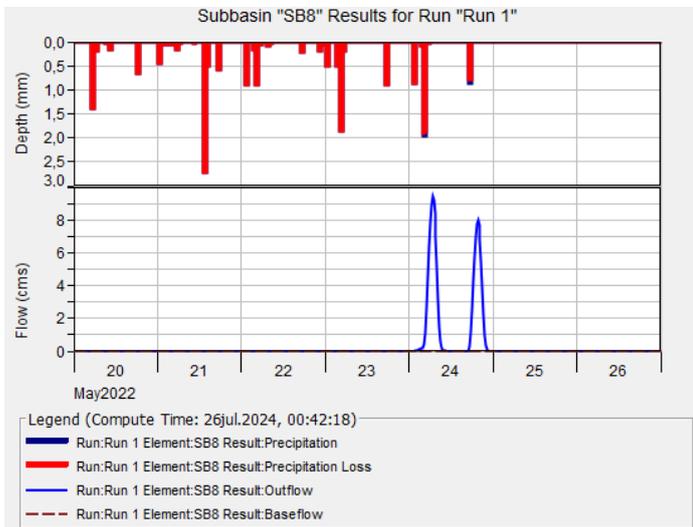
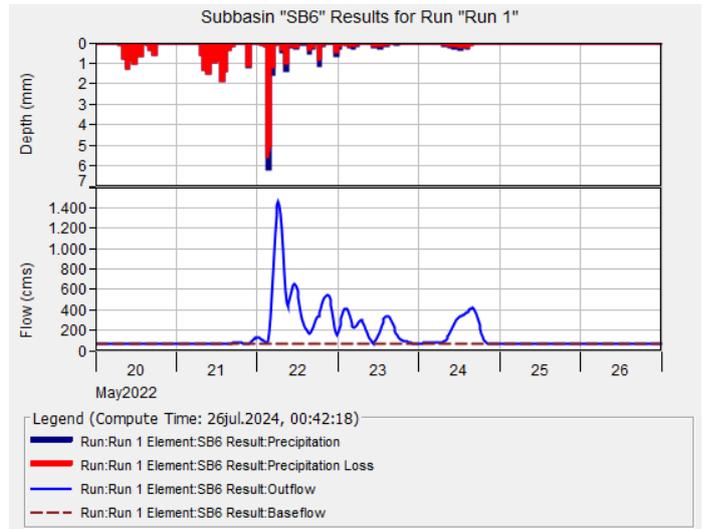
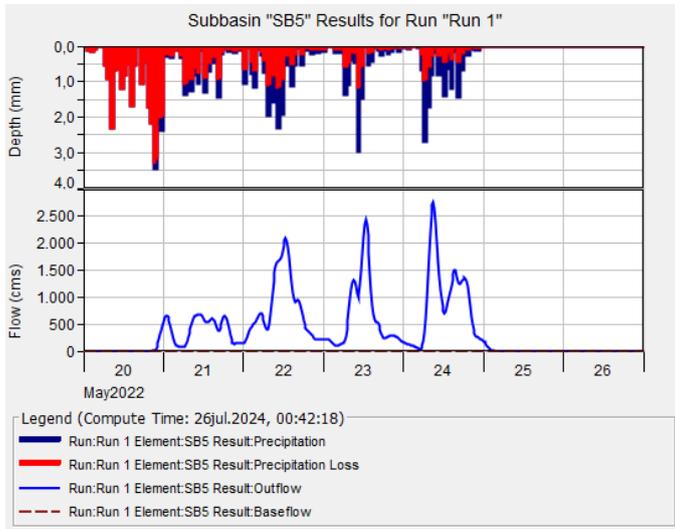


Figura 36: Resultados Segunda Tormenta.

Fuente: Autoría Propia.

Reiteradamente se observa que las subcuencas 3, 5 y 6 son las que aportan el mayor caudal, mientras que las subcuencas 1, 4 y 9 mantienen un caudal constante, por lo tanto, la subcuenca 8 presenta el menor valor de caudal.

Además, en la cuenca 7 se observa un hietograma con precipitación constante, lo que puede atribuirse a las correlaciones bajas presentes en el proceso de relleno de datos.

Ahora el hidrograma del punto de salida.

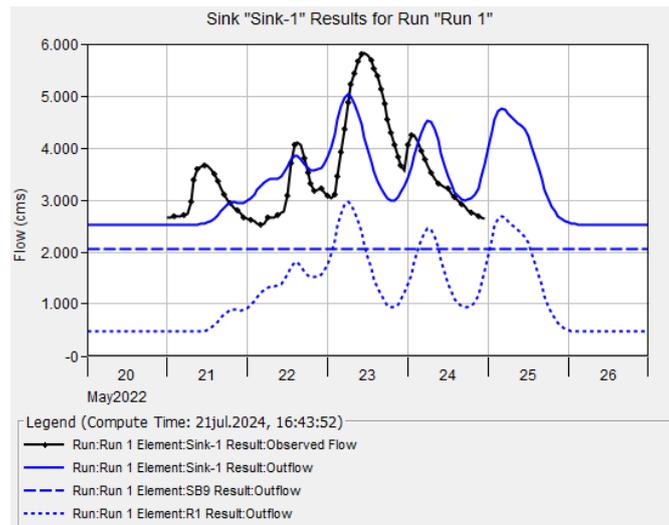


Figura 37: Hidrograma de salida.

Fuente: Autoría Propia.

Al analizar los hidrogramas, se observa un desfase que podría haber sido causado por las centrales hidroeléctricas Manduriacu y Toachi Pilatón, siendo muy probable que estas centrales hayan captado el caudal en sus etapas finales, lo que explicaría que no se hayan generado picos de caudal como en la simulación anterior.

Se tienen los siguientes datos:

El caudal pico simulado es $5041,3 \frac{m^3}{s}$ el 23 de mayo del 2022 a las 5:40.

El caudal pico observado es $5828,6 \frac{m^3}{s}$ el 23 de mayo del 2022 a las 11:00.

Se calcula la diferencia relativa entre los caudales y el tipo de llegada.

Obteniendo la ecuación de (Morgan et al., 2020).

$$\%DrQ = \frac{|Q_{sim} - Q_{obs}|}{Q_{obs}} * 100$$

$$\%DrQ = 13,50\%$$

$$\%Drt = \frac{|t_{obs} - t_{sim}|}{t_{obs}} * 100$$

$$\%Drt = 48,54\%$$

Se obtuvo una diferencia relativa entre caudales de 13,50%, donde el valor es menor al 25%, no obstante, en el tiempo el porcentaje llega a un valor de casi del 50%. Esto significa que el caudal simulado es mucho más rápido que el caudal observado.

La evaluación del desempeño del modelo quedaría así:

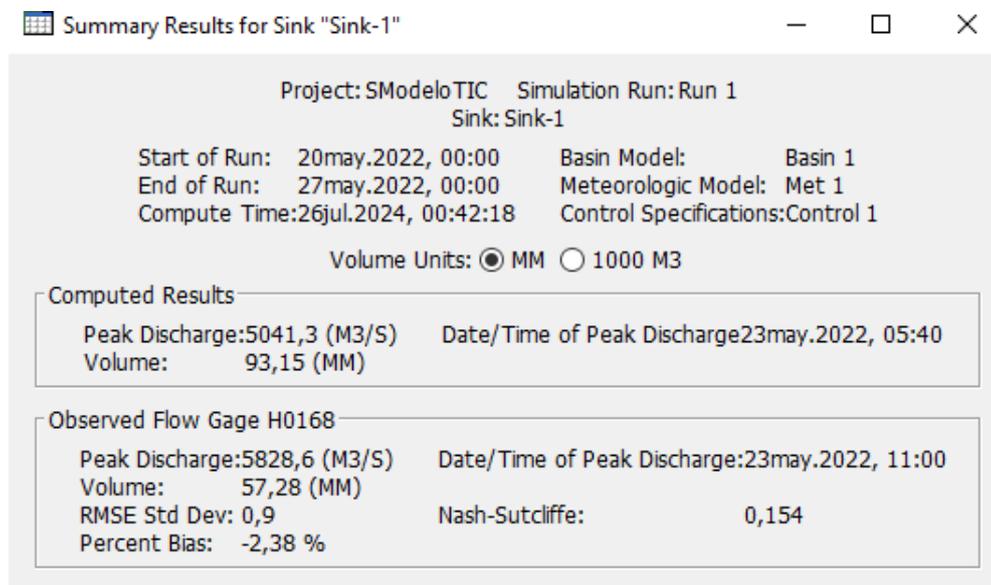


Figura 38: Resumen de valores del segundo modelo.

Fuente: Autoría Propia.

Se obtuvo un valor de $PBIAS = -2,38\%$ lo que es menor al 25% que se considera un modelo satisfactorio, con respecto al valor de Nash-Sutcliffe, el valor es menor a 0,5 que no se tomara en cuenta para el criterio de modelo satisfactorio (Ochoa et al., 2022).

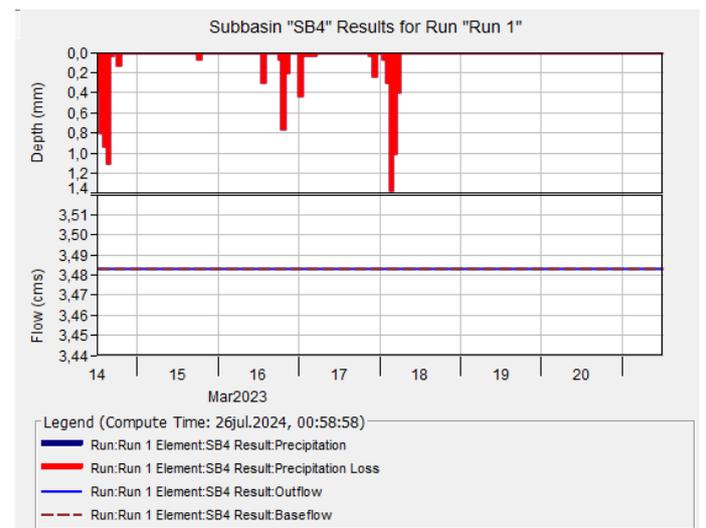
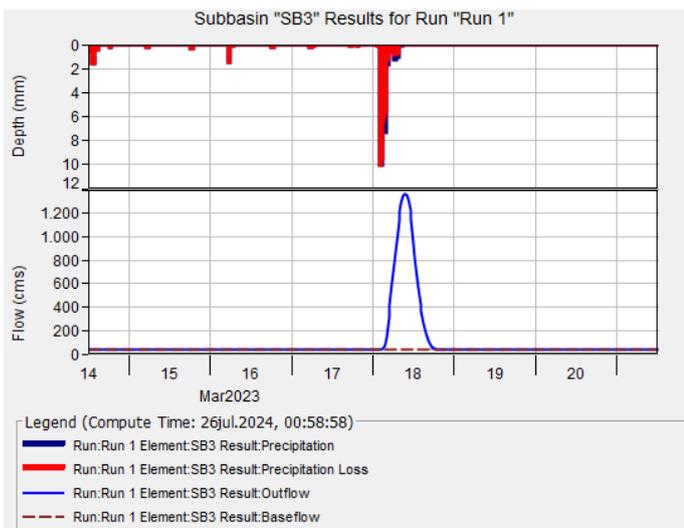
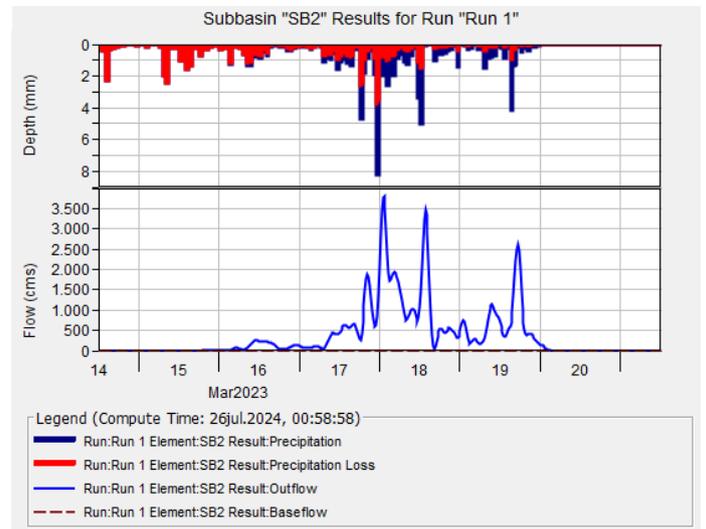
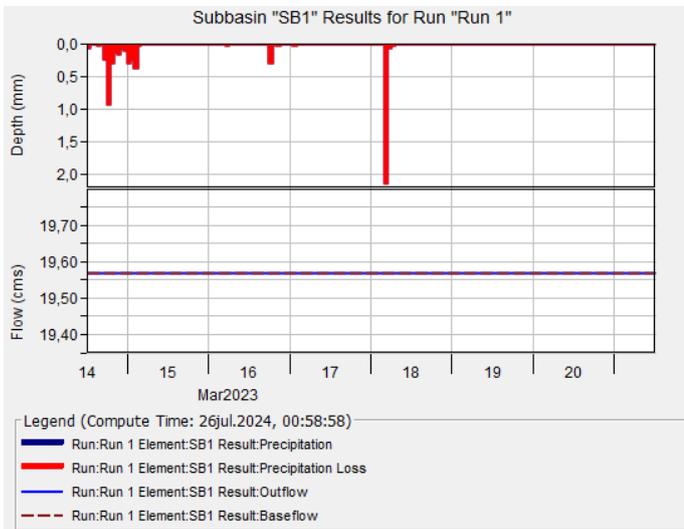
La tercera tormenta, al igual que el anterior, solo se variaron los caudales base, porque este se ajustó con el caudal mínimo producido en esta tormenta.

Tabla 22: Valores de caudales base Tercera Tormenta

Cuenca	Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
SB1	H0148	7,066	18,178	19,567	17,510	25,717	9,626	9,169	9,169	8,289	8,289	9,626	14,378
SB2	H0139	23,884	66,860	0,000	57,903	56,454	0,000	27,231	0,000	16,176	15,225	18,137	17,150
SB3	H0177	28,675	130,589	41,438	67,817	63,212	33,930	20,778	13,827	12,809	10,891	8,855	8,582
SB4	H0159	2,179	2,179	3,483	3,257	4,221	2,094	1,558	0,908	1,701	1,701	1,776	1,931
SB5	S.E	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SB6	H0149	37,190	73,421	47,836	50,550	62,021	37,653	37,312	29,709	30,165	45,283	43,039	45,049
SB7	H0138	106,294	232,023	337,983	309,913	256,913	143,573	89,478	0,000	59,636	0,000	59,636	46,686
SB8	H0170	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SB9	H0168	1931,443	1613,481	1685,424	1629,781	1668,193	1908,855	1951,205	2081,118	2007,955	2054,342	1995,662	2002,955

Fuente: Autoría Propia.

Los resultados obtenidos en el modelo con los parámetros ajustados con la primera tormenta.



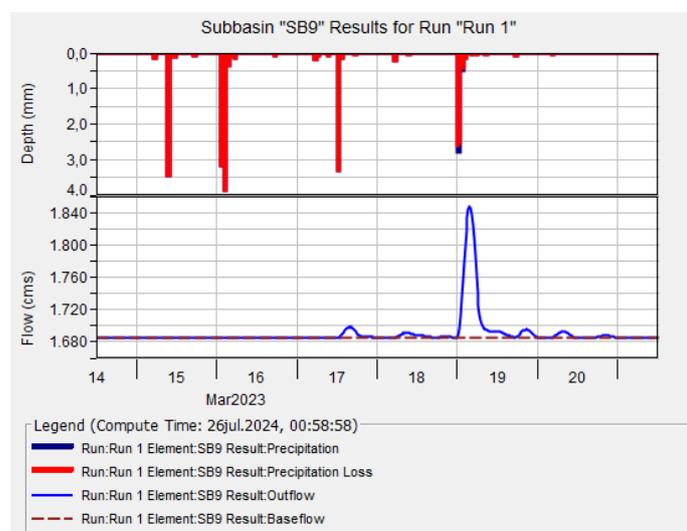
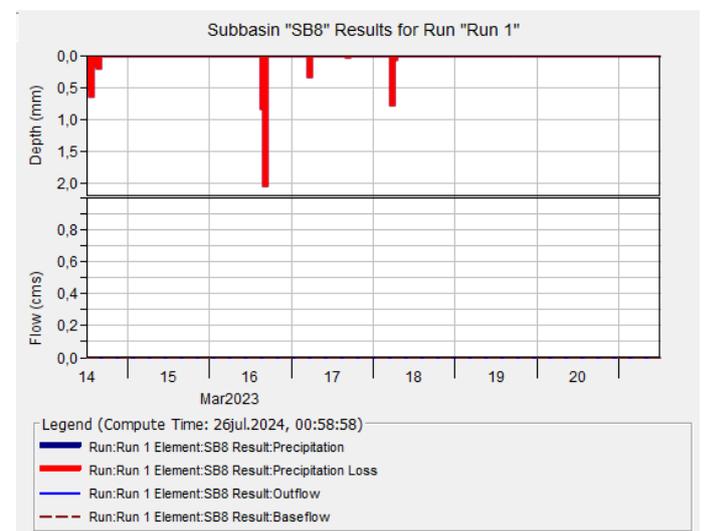
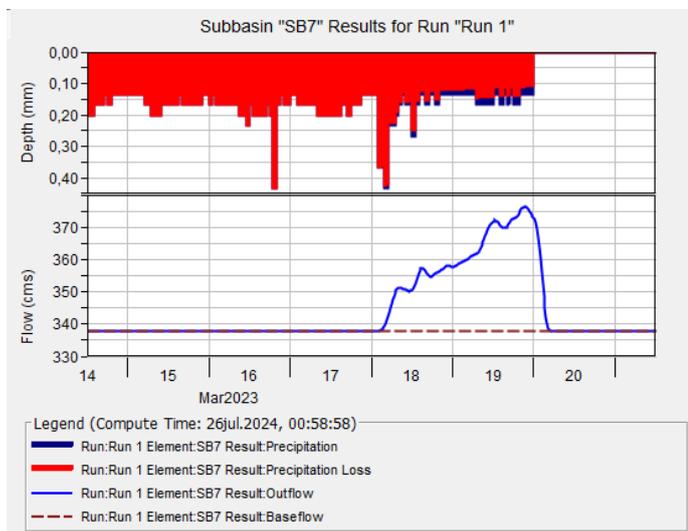
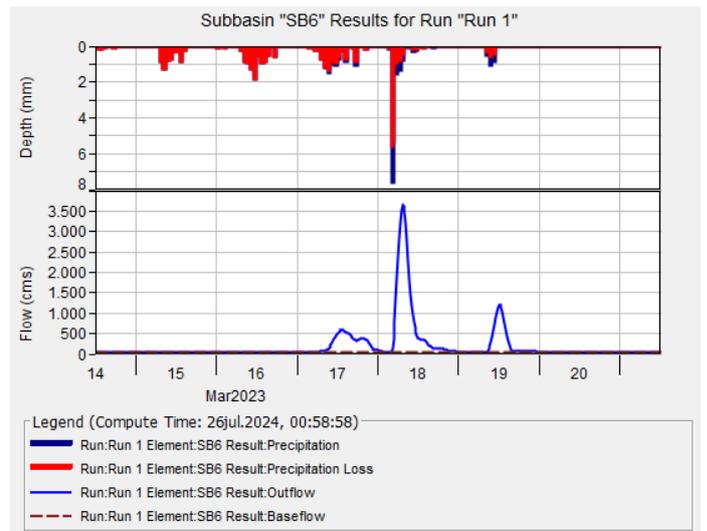
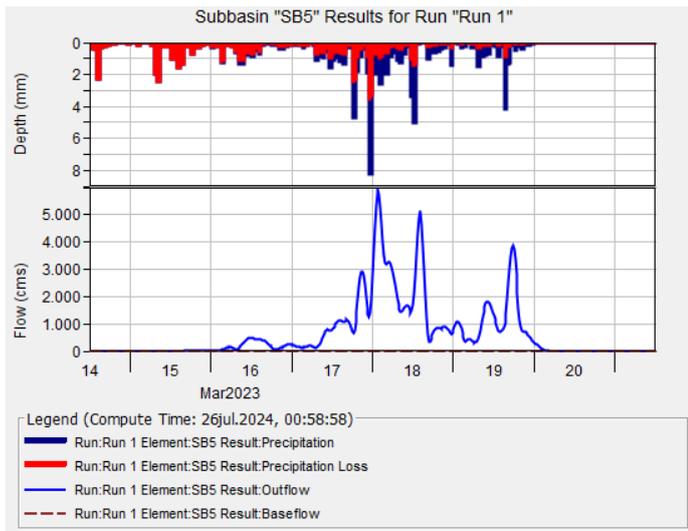


Figura 39: Resultados Tercera Tormenta.

Fuente: Autoría Propia.

De igual manera que las anteriores tormentas, en los hidrogramas con mayor caudal están presentes las subcuencas 5 y 6, con el menor caudal la subcuenca 8, y las subcuencas 1,4 y 7 presentan valores constantes de caudal.

Se presenta el hidrograma de salida.

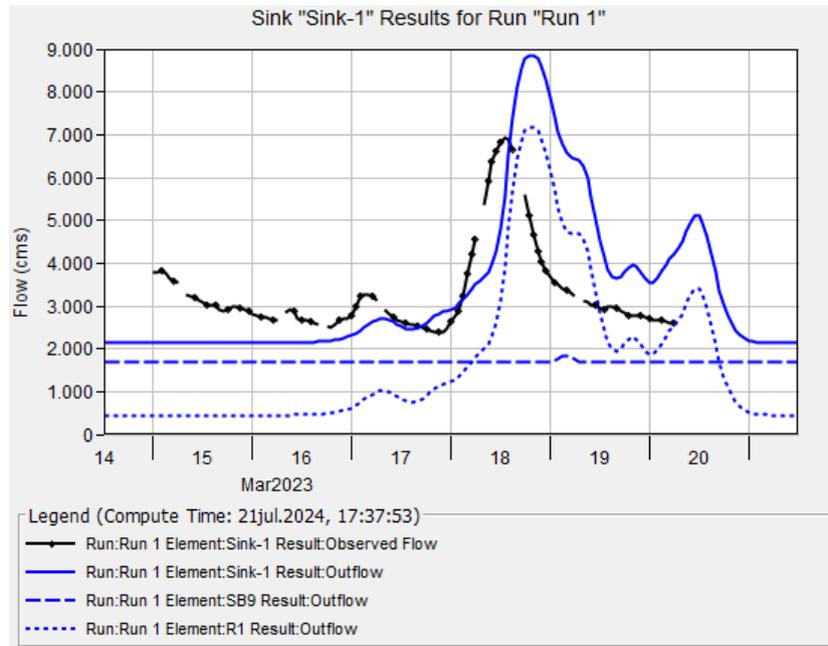


Figura 40: Resultados Tercera Tormenta.

Fuente: Autoría Propia.

Al analizar los hidrogramas, se observa una similitud en la forma general, pero se presentan varios picos adicionales en el hidrograma simulado que no se observan en el hidrograma real. Además, en el hidrograma de la cuenca 7, se registra una precipitación constante, lo cual puede explicarse por las correlaciones bajas presentes en el proceso de relleno de datos, lo que sugiere que la información utilizada para simular la precipitación en esa cuenca puede no ser del todo precisa.

Se tienen los siguientes datos:

El caudal pico simulado es $8932,2 \frac{m^3}{s}$ el 19 de marzo del 2023 a las 19:20.

El caudal pico observado es $6911,7 \frac{m^3}{s}$ el 18 de marzo del 2023 a las 13:00.

Se calcula la diferencia relativa entre los caudales y el tiempo de llegada.

Obteniendo la ecuación de (Morgan et al., 2020).

$$\%DrQ = \frac{|Q_{sim} - Q_{obs}|}{Q_{obs}} * 100$$

$$\%DrQ = 29,23\%$$

$$\%Drt = \frac{|t_{obs} - t_{sim}|}{t_{obs}} * 100$$

$$\%Drt = 48,69\%$$

Se obtuvo una diferencia relativa entre caudales de 29,23%, dando un valor mayor al 25%, De igual manera, el porcentaje del tiempo llega a un valor de casi el 50%. Esto significa que el caudal simulado es más lento que el caudal observado.

Evaluación del desempeño del modelo.

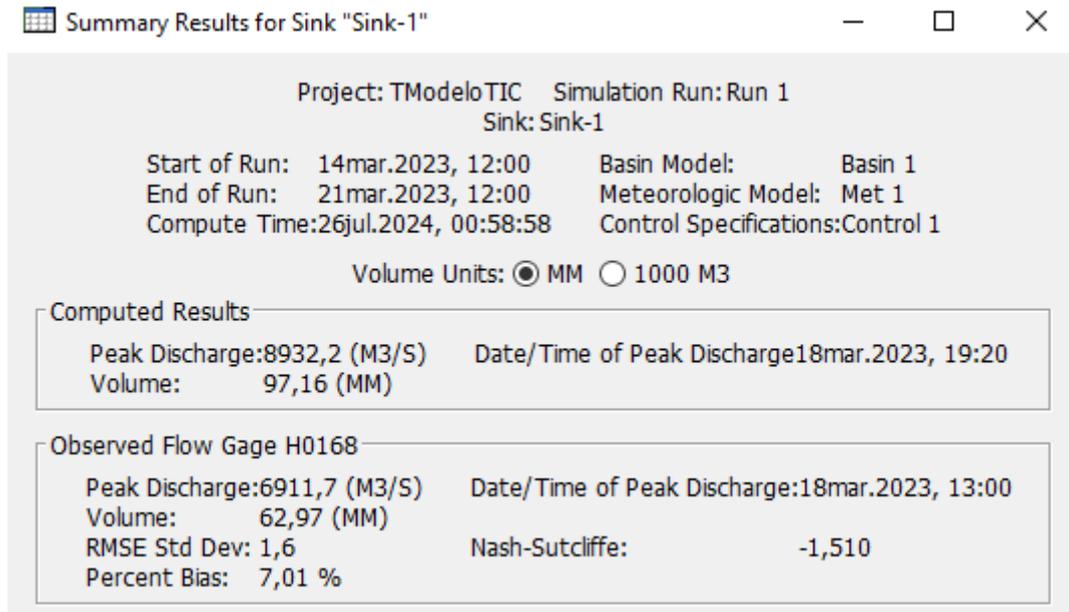


Figura 41: Resumen de valores de la tercera tormenta.

Fuente: Autoría Propia.

Se obtuvo un valor de $PBIAS = 7,01\%$ lo que es menor al 25%, donde se considera un modelo satisfactorio, con respecto al valor de Nash-Sutcliffe, siendo el valor menor a 0,5 por lo que no se tomara en cuenta para el criterio de modelo satisfactorio (Ochoa et al., 2022).

5.1.14 Modelo Final

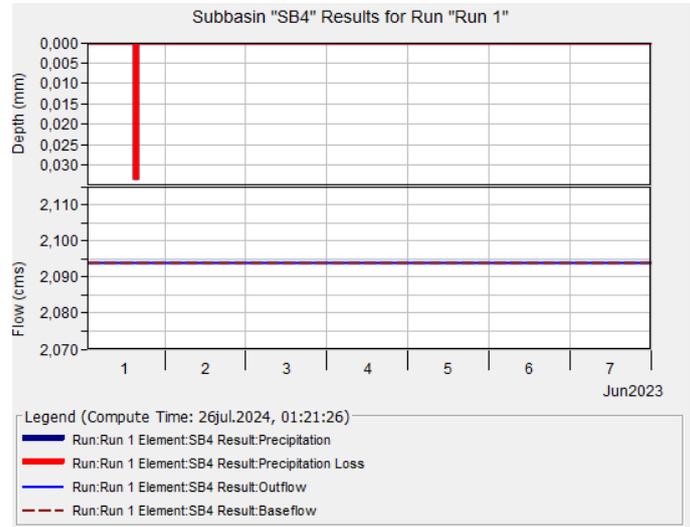
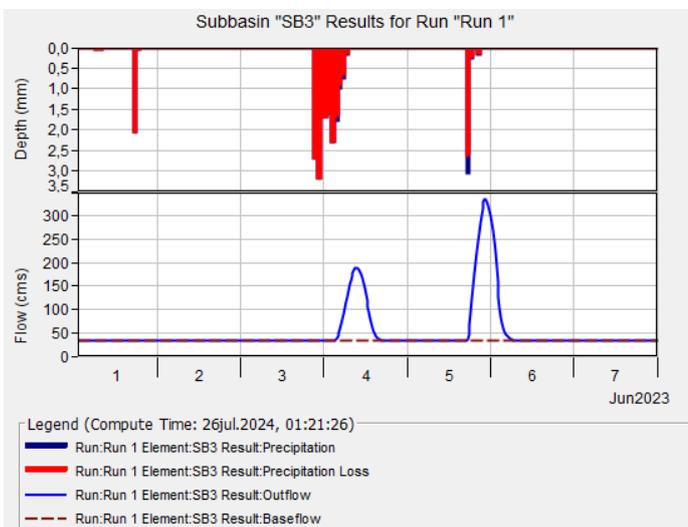
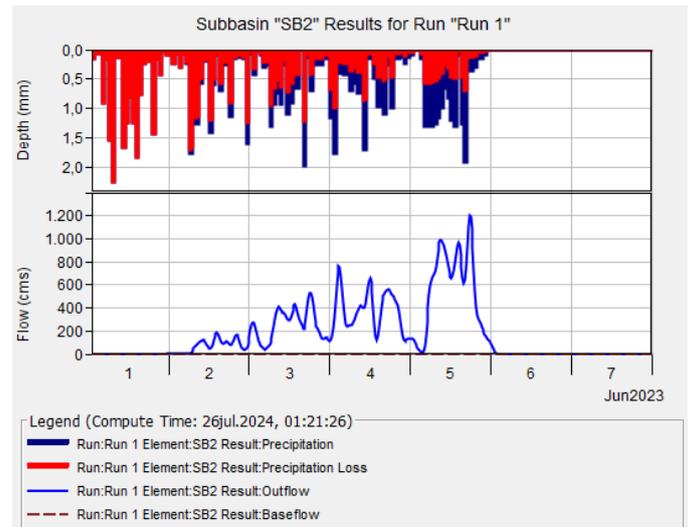
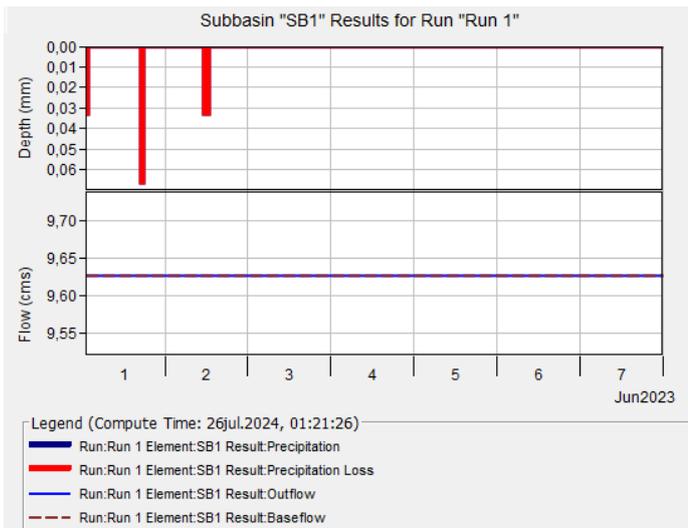
Finalmente, se presenta la cuarta tormenta, los caudales base se tomaron los mismos datos que de la tercera tormenta por su cercanía en fecha y dado que no existen registros de caudales observados en las fechas donde se ocasionó la crecida por lo que solo se presentan valores simulados.

Tabla 23: Valores de caudales base Cuarta Tormenta.

Cuenca	Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
SB1	H0148	7,066	18,178	19,567	17,510	25,717	9,626	9,169	9,169	8,289	8,289	9,626	14,378
SB2	H0139	23,884	66,860	0,000	57,903	56,454	0,000	27,231	0,000	16,176	15,225	18,137	17,150
SB3	H0177	28,675	130,589	41,438	67,817	63,212	33,930	20,778	13,827	12,809	10,891	8,855	8,582
SB4	H0159	2,179	2,179	3,483	3,257	4,221	2,094	1,558	0,908	1,701	1,701	1,776	1,931
SB5	S.E	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SB6	H0149	37,190	73,421	47,836	50,550	62,021	37,653	37,312	29,709	30,165	45,283	43,039	45,049
SB7	H0138	106,294	232,023	337,983	309,913	256,913	143,573	89,478	0,000	59,636	0,000	59,636	46,686
SB8	H0170	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SB9	H0168	1931,443	1613,481	1685,424	1629,781	1668,193	1908,855	1951,205	2081,118	2007,955	2054,342	1995,662	2002,955

Fuente: Autoría Propia.

Resultados obtenidos en HEC-HMS.



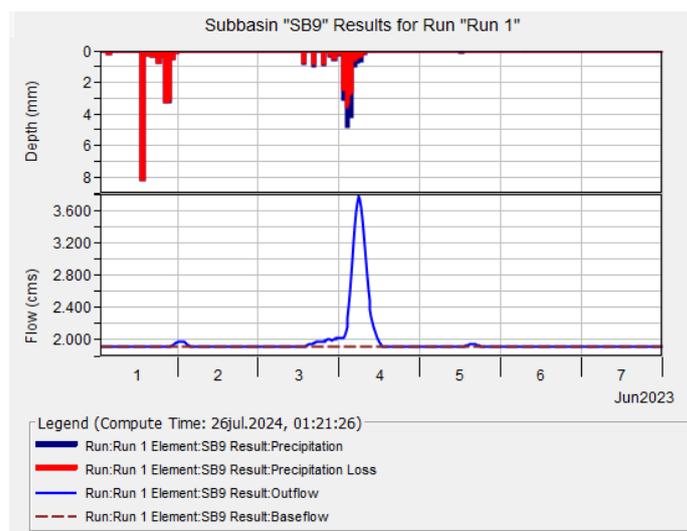
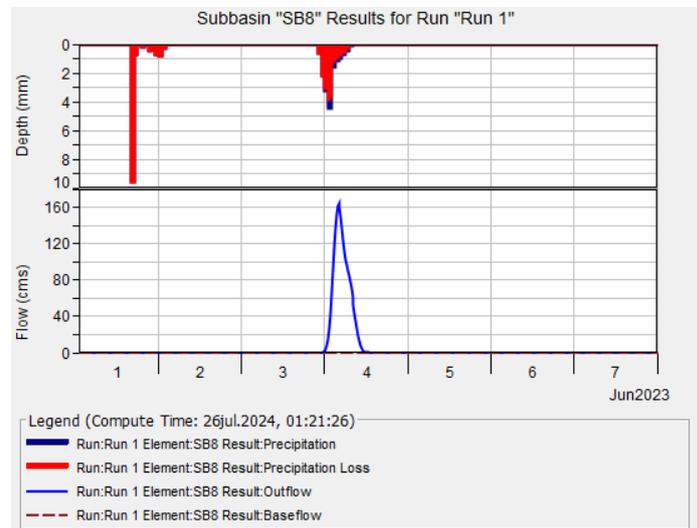
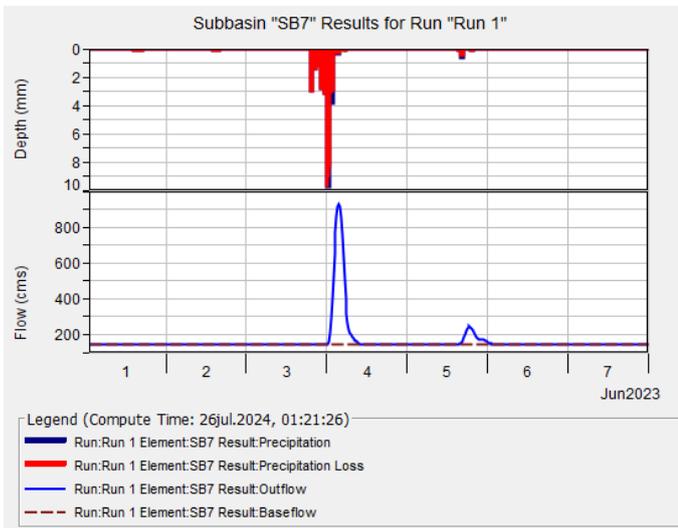
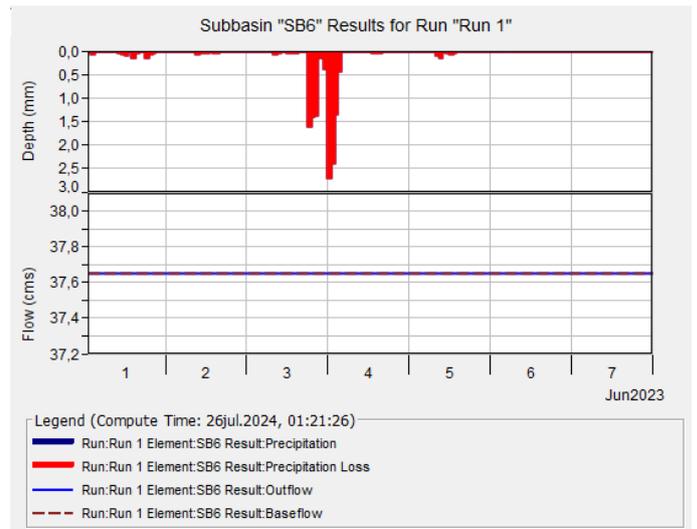
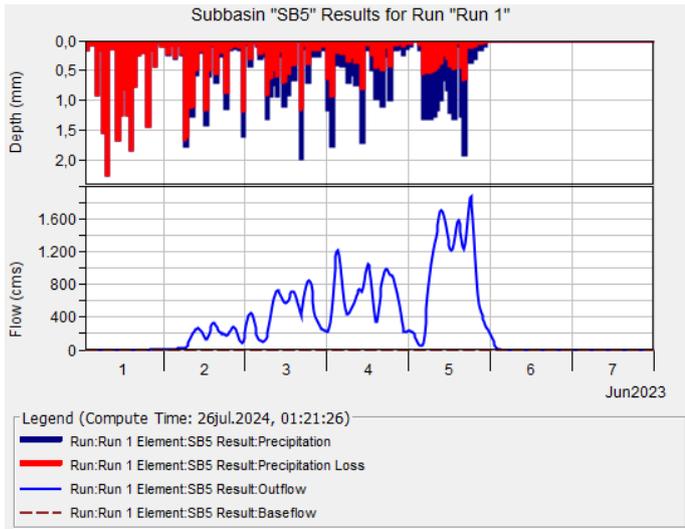


Figura 42: Resultados Cuarta Tormenta.

Fuente: Autoría Propia.

La cuenca presenta los niveles más altos de caudales en las subcuencas 2,5 y 9, mientras que las subcuencas 1,4 y 6 presentan niveles de caudales constantes, y finalmente, la subcuenca 8 es la que presenta niveles más bajos.

El hidrograma de salida.

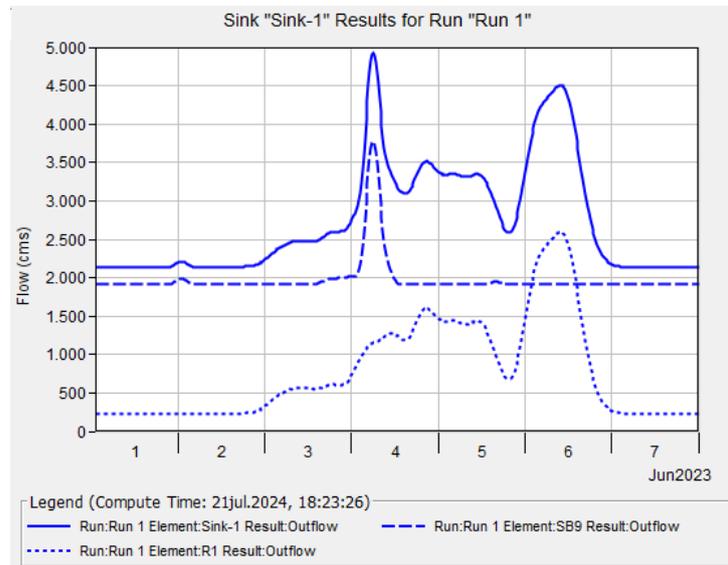


Figura 43: Resultados Cuarta Tormenta.

Fuente: Autoría Propia.

Se obtienen valores de caudales pico solo en la simulación, debido a la falta de datos observados. Sin embargo, estos valores son más bajos en comparación con las simulaciones anteriores, cabe destacar que el caudal pico se produce a las 6:00, lo que coincide de manera consistente con el análisis satelital previo y con el informe de la SNGRE (2023). Esta coincidencia refuerza la validez de los resultados obtenidos.

Valores resúmenes de la cuarta tormenta.

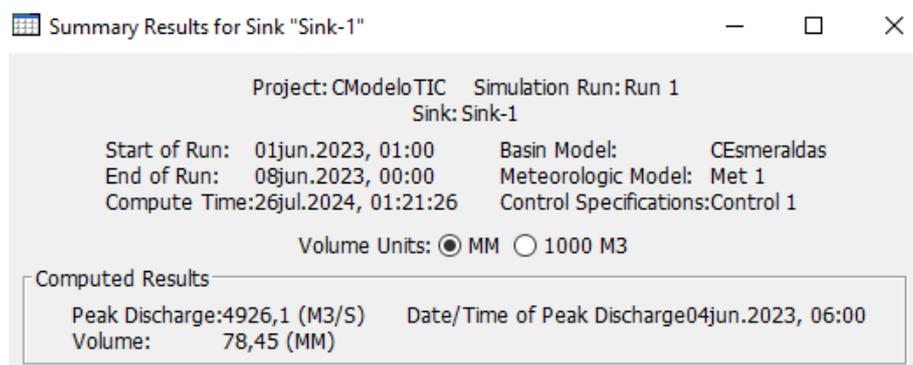


Figura 44: Valores resumen de la cuarta tormenta.

Fuente: Autoría Propia.

Al analizar el hidrograma de salida de la cuenca, se evidencia que su caudal pico fue rápido, y tuvo un valor de $4926,1 \frac{m^3}{s}$, que se produjo a las 6:00 del día 4 de junio del 2023, posteriormente se presenta otro caudal pico de $3515,8 \frac{m^3}{s}$, el 4 de junio a las 20:20. Finalmente, el último se produjo el 6 de junio del 2023 presentando una magnitud de $4506,7 \frac{m^3}{s}$.

Al comparar el caudal pico con los caudales máximos registrados en el mes de junio por la estación H0168 en el 2016 (INAMHI, 2017), que se presenta a continuación.

$$Q_{max} = 1174 \frac{m^3}{s}$$

Existe una gran diferencia entre las magnitudes, el caudal simulado es alrededor de cuatro veces más que el caudal observado.

Se tiene que tomar en cuenta, que por la falta de datos tanto pluviales como de caudales en una cuenca tan extensa, no se puede tener una simulación precisa, por lo que se enfatiza en la realización, de un análisis espacial de precipitaciones con datos satelitales, donde se debe tomar en cuenta las infraestructuras existentes como centrales hidroeléctricas.

Adicionalmente se presentan las diferencias relativas del caudal y del tiempo de llegada en la siguiente tabla.

Tabla 24: Diferencias relativas de las tormentas.

Variable	Primera tormenta	Segunda tormenta	Tercera tormenta
%DrQ	19,69	13,50	29,23
%DrT	14,88	48,54	48,69

Fuente: Autoría Propia.

En la primera y segunda tormenta, se observan valores relativamente similares entre el caudal simulado y el caudal observado. Sin embargo, en la tercera tormenta, se registra un valor cercano al 30%, lo que indica una diferencia notable entre los caudales, en cuanto al tiempo, se observa un desfase considerable en la segunda y tercera simulación.

El presente trabajo realizado contribuye a un análisis preliminar que puede ser refinado y mejorado con trabajos posteriores. Esto sugiere que, aunque se han obtenido resultados prometedores, es necesario continuar investigando y ajustando el modelo para obtener resultados más precisos.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

6.1.1 Conclusión del objetivo general determinar los factores hidrológicos y meteorológicos que generaron la crecida del 4 de junio del 2023

Al analizar la tormenta por etapas con los datos satelitales, se observó que los niveles más altos de precipitaciones ocurrieron a la madrugada del día 4 de junio, acumulándose principalmente en la cuenca del Río Blanco. Esto empata con lo reportado por la Secretaría de Gestión de Riesgos (SGRE, 2023), y al tener en esa zona textura de suelo tipo B, se estima que influyó para que se genere el caudal que ocasionó la crecida modelada en el presente trabajo. Así mismo, en el modelamiento se observó el pico de la crecida en horas de la mañana, lo que corrobora con la información anteriormente indicada.

6.1.2 Conclusión del primer objetivo específico, identificar que subcuencas resultaron afectadas por la crecida de la cuenca del Río Esmeraldas

Las subcuencas afectadas fueron principalmente la cuenca del Río Blanco (SB2 y SB5), la cuenca baja del Río Esmeraldas (SB9) y la cuenca del Río Quinindé (SB3). En las mismas se ubican el Río Blanco, el Río Víche, el Río Cube, el Río Teaone y el Río Tonchigue, que son los ríos que se desbordaron por causa de la crecida. Adicionalmente, se observó que en la cuenca del Río Blanco influyó fuertemente en el caudal pico de la crecida.

6.1.3 Conclusión del segundo objetivo específico, analizar las variables hidrológicas y meteorológicas que contribuyeron en la crecida del 4 de junio del 2023

Existen varios factores que contribuyeron a la crecida, uno de ellos son los altos niveles de precipitación que se registraron sobre la cuenca del Río Blanco, junto con un nivel de suelo moderadamente medio en toda la cuenca del Río Esmeraldas, tiempos de concentración menores a cinco horas en ocho de las nueve sub cuencas consideradas para el modelo son los factores que influyeron para la crecida del 4 de julio del 2023.

6.1.4 Conclusión del tercer objetivo específico, simular y calibrar los resultados en HEC-HMS utilizando datos de precipitación obtenidos de las estaciones meteorológicas dentro de la cuenca

En la primera crecida se obtuvo un caudal pico simulado de $10133,9 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ y al compáralo con el caudal pico observado que es $8466,21 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ se obtuvo un diferencia relativa del 19,70%. Que se puede explicar por la presencia, de las centrales hidroeléctricas Manduriacu y Toachi Pilatón, al tener un *PBIAS* menor al 25% se puede aceptar la calibración.

Con la segunda crecida se obtuvo un caudal pico simulado de $5041,30 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ y un caudal pico observado de $5828,59 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, con una diferencia relativa del 13,51% y tener un al *PBIAS* menor al 25%, validando la primera evaluación.

Con respecto a la tercera tormenta se obtuvo un caudal simulado de $8932,2 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ y un caudal observado de $6911,7 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$. En la tercera evaluación se presenta una diferencia relativa del 29,23%, menor al 30%, al igual que la primera y la segunda tormenta, esto se estima ser ocasionado por factores externos como lo son las hidrométricas antes mencionadas, pero se tuvo un *PBIAS* menor al 25%.

En promedio se produjo una diferencia relativa 20,81%, entre las tres tormentas, por lo mismo el modelo sirve de manera ideal para una primera aproximación.

En cuestiones generales se tienen diferencias numéricas relativamente aceptables, porque los valores de los caudales pico no están separados por valores muy altos, por lo que se debe tomar en cuenta más factores externo a la modelación, como lo son captaciones de agua, derivaciones clandestinas entre otras.

6.1.5 Conclusiones adicionales

La disponibilidad de datos tanto meteorológicos como hidrológicos es limitada y deficiente, por parte de los entes rectores, esto provoca que no se pueda realizar un análisis hidrológico completo y actualizado.

En fechas cercanas existió aguaje, dificultando que el agua del río desembocara en el mar (ESPOL et al., 2021), esto pudo haber ocasionado la magnitud de los daños, pero no se tiene datos detallados para confirmar la hipótesis.

Finalmente, la modelación de crecidas contribuye con un alto nivel a la gestión de recursos hídricos porque nos permite prevenir posibles inundaciones o sequías, sirviendo como alerta para evitar pérdidas humanas, de viviendas y/o ganado, contribuyendo al cambio positivo de formulación de estrategias y la asignación de recursos, por parte de las autoridades para evitar que los eventos de inundación afecten de forma recurrente a la población del Río Esmeraldas, que tiene una sociocultura vinculada a los desastres (Estrada, 2021).

6.2 Recomendaciones.

6.2.1 Recomendación del objetivo general, determinar los factores hidrológicos y meteorológicos que generaron la crecida del 4 de junio del 2023

La variabilidad espacial de la precipitación está representada por pocas estaciones y tiene gran impacto en la forma de las crecidas. Se podría mejorar la representación de las mismas usando un mayor número de datos presentes en estaciones de entidades públicas como la EPMAPS, GAD's provinciales, cantonales o parroquiales y datos satelitales para representar la variabilidad espacial y temporal de la precipitación.

6.2.2 Recomendación del primer objetivo específico, identificar que subcuencas resultaron afectadas por la crecida de la cuenca del Río Esmeraldas

Utilizar un mayor número de subcuencas dentro del modelo HEC-HMS, permitirá una mayor precisión y un mejor análisis, dentro de la cuenca, estimando valores más cercanos a las condiciones hidrológicas de la región, igualmente, en el análisis se tendrá un mayor detalle y una mejor distribución con respecto a datos de caudales simulados.

6.2.3 Recomendación del segundo objetivo específico, analizar las variables hidrológicas y meteorológicas que contribuyeron a la crecida del 4 de junio del 2023

Existe la presencia de elementos no considerados como lo son las centrales hidroeléctricas, fuentes de captación de agua, entre otros. Los mismos que influyen de alguna manera en los caudales de los ríos, por la captación de agua, por eso, se recomienda realizar un estudio previo de factores externos como los antes mencionados para determinar su nivel de influencia dentro de la generación de la crecida.

6.2.4 Recomendación del tercer objetivo específico, simular y calibrar los resultados en HEC-HMS utilizando datos de precipitación obtenidos de las estaciones meteorológicas dentro de la cuenca

Es importante considerar que, debido a la falta de información meteorológica e hidrológica, en la cuenca de estudio, se recomienda llevar a cabo un análisis con imágenes satelitales, por lo que el trabajo actual contribuye a un análisis inicial que puede ser afinado y mejorado en futuras investigaciones.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Altamirano Espinel, C. J., & Carrillo Freire, P. F. (2023). Comparación de técnicas de relleno de datos faltantes de variables meteorológicas en la provincia de Chimborazo (Trabajo de Integración Curricular). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Carrera de Estadística. Riobamba, Ecuador.

Álvarez, R., & Rivera, J. (2020). "Cuencas hidrográficas." Universidad Politécnica Salesiana. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19038/1/Cuencas%20hidrográficas.pdf>.

Arteaga Naranjo, M. O. (2017). Evaluación del modelo hidrológico HEC-HMS para la predicción hidrológica y de crecidas, en la cuenca baja del río Cañar. 170 hojas. Quito: EPN.

Becerra Cherrez, F.A. (2024). Estimación y análisis de curvas envolventes de caudales específicos máximos para el Ecuador: Estimación y análisis de curvas envolventes para las cuencas hidrológicas que desembocan hacia el Océano Pacífico. 66 páginas. Quito: EPN, 2024.

Beck HE, van Dijk AIJM, de Roo A, Miralles DG, McVicar TR, Schellekens J, Bruijnzeel LA. (2016). Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. *Water Resources Research* 52 (5): 3599–3622 <https://doi.org/10.1002/2015WR018247>

Cabrera, J. (2012). Calibración de modelos hidrológicos. Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú.

Cabrera, J. (2012). Modelos hidrológicos. Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú, 8.

Campozano, L. (2014). Evaluation of infilling methods for time series of daily precipitation and temperature: The case of the Ecuadorian Andes. *MASKANA*, Vol. 5, No. 1, 2014.

Changjiang Institute of Survey. Planning, Design and Research. (2016). PLAN HIDRÁULICO REGIONAL DE DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA ESMERALDAS [Memoria].

<https://suia.ambiente.gob.ec/files/MEMORIA%20DH%20ESMERALDAS.pdf>

CLARK, C.O. (1945). - Storage and the Unit Hydrograph. ASCE Trans., 110: 1419-1446

Cuasapaz, C. (2018). Influencia de Patrones Climáticos Globales en el Caudal Superficial de la cuenca del Río Esmeraldas.

El impacto del cambio climático en Latinoamérica. (s. f.). WWF. https://www.wwfca.org/nuestrotrabajo/clima_energia/impacto_cambio_climatico_latino_america/

ESPOL, Ministerio del Ambiente y Agua, CAF, PNUD, & Adaptation Fund. ([2021]). Conceptualización, diseño e implementación de un sistema de alerta temprana en la isla Luis Vargas Torres de la ciudad de Esmeraldas. ESPOL.

Estrada, A. M. D. (2021b, febrero 25). Evaluación del riesgo de inundación fluvial en la cuenca Baja del Río Esmeraldas. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10942>.

Feldman, A. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Referenece Manual Washington: US Army Corps of Engenners.

Forest Trends (2022). Guía de Modelación Hidrológica. Recuperado de <https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2022/08/Guia-de-Modelacion-Hidrologica-2022.pdf>

Furman, A. 2008. Modeling coupled surface–subsurface flow processes: a review. *Vadose Zone Journal* 7: 741-756.

Giandotti, M., 1934. Previsione delle piene e delle magre dei corsi d’acqua. Ministero LL.PP., Memorie e studi idrografici 8(2) Servizio Idrografico italiano, Rome (in Italian).

Huffman, G.J., E.F. Stocker, D.T. Bolvin, E.J. Nelkin, Jackson Tan (2023), GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1-degree x 0.1-degree V07, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [Data Access Date], 10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/07

Inga Erazo, R.E. (2023). Simulación de crecidas: influencia de los métodos de cálculo de hidrogramas en la incertidumbre de las crecidas simuladas: caso de estudio de la quebrada Guanga Huaycu, sector la Gasca. 78 páginas. Quito: EPN.

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2015). *Anuario Hidrológico Nº 51-2013*. Quito, Ecuador: INAMHI. Recuperado de <http://www.inamhi.gob.ec/visor/estaciones>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2015). *Anuario Hidrológico Nº 53-2015*. Quito, Ecuador: INAMHI. Recuperado de <http://www.inamhi.gob.ec/visor/estaciones>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2017). *Anuario Meteorológico Nº 53-2013*. Quito, Ecuador: INAMHI. Recuperado de <http://www.inamhi.gob.ec/visor/estaciones>

Jaafar, H. H., Ahmad, F. A., & Beyrouthy, N. E. (2019). GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design. *Scientific Data*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0155-x>

Jiménez Duque, J. (2023). Metodologías para el uso de la información de satélite como herramienta para rellenar series de datos diarios de lluvia en zonas de montaña colombianas. Universidad Nacional de Colombia.

Jorquera, E., Weber, J. F., & Reyna, S. M. (2012). Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada. Primer Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, Bs. As.

Laguna, C. (2014). Correlación y regresión lineal. *Instituto Aragonés de Ciencias de la Salud*, 4, 1-18.

Mendez, A., & Re, M (septiembre 2009). *Campus fiuba*. <https://campus.fi.uba.ar/mod/resource/view.php?id=16527>

Modelación del proceso precipitación-escurrimiento mensual por medio de regresiones, *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, Volume 15, Issue 4, 2014, Pages 625-636, ISSN 1405-7743, [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(14\)70660-2](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(14)70660-2).

Moya, A., & Alfaro, M. (2015). "Valoración de efectos e impactos de intervenciones de gestión, manejo y protección de áreas de recarga hídrica y de fuentes de agua en cuencas".

Mozo, Joaquín, Varni, Marcelo, Ares, María Guadalupe, & Chagas, Celio Ignacio. (2020). Modelado hidrológico de la precipitación-escurrimiento en una microcuenca agrícola del partido de Azul, Buenos Aires. *Ciencia del suelo*, 38(1), 121-132. Recuperado en 26 de febrero de 2024, de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672020000100011&lng=es&tlng=es

Nimon, K. F., & Oswald, F. L. (2013). Understanding the Results of Multiple Linear Regression. *Organizational Research Methods*, 16(4), 650–674. doi:10.1177/1094428113493929

Onu-Habitat. (s. f.). Sequías, tormentas e inundaciones: el agua y el cambio climático dominan la lista de desastres. <https://onuhabitat.org.mx/index.php/sequias-tormentas-e-inundaciones-el-agua-y-el-cambio-climatico-dominan-la-lista-de-desastres>.

Orozco, J. (2018). Acerca de Bioweb Ecuador. <https://bioweb.bio/geografiaClima.html>

Ortega Realpe, H. M. (2019). Evaluación de la influencia de la incorporación de datos de precipitación satelital (TMPA-3B42R) sobre la simulación hidrológica a escala diaria en la cuenca alta del río Guayllabamba. 254 hojas. Quito: EPN.

Pineda, L., Changoluisa, J. A., & Muñoz, Á. G. (2023). Early onset of heavy rainfall on the northern coast of Ecuador in the aftermath of El Niño 2015/2016. *Frontiers in Earth Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1027609>

Refsgaard, J. y Abbott, M. (1996). "Distributed hydrological modelling". Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.

Secretaria de Gestión de Riesgos del Ecuador. (2023). Informe de situación provincial – ESMERALDAS. Informe No. 8.

Tapia, E. E. L. C. (2012). Modelización hidrológica de un área experimental en la cuenca del río guayas en la producción de caudales y sedimentos (Maestría dissertation, Universidad Nacional de La Plata).

Toulkeridis, T., Tamayo, E. N., Simón-Baile, D., Mora, M. J. M., Yunga, D. F. R., Viera-Torres, M., & Heredia, M. (2020). Climate Change according to Ecuadorian academics—Perceptions versus facts. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 31(1), 21-46. <https://doi.org/10.17163/lgr.n31.2020.02>

Vargas Domínguez, L.M. (2023). Exploración del producto satelital de precipitación IMERG V06 como insumo para la hidrología: determinación de curvas intensidad-duración frecuencia (IDF) sub-diaria y diaria. 205 páginas. Quito: EPN.

Vargas, A., & Monroy, J. C. (2011). Estudio del comportamiento de modelos hidrológicos bajo un análisis de sensibilidad e incertidumbre. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (10), 65-77.

Vélez, (2000) M. V. V. HIDROLOGIA PARA INGENIEROS.

Vilchis-Mata, Iván, Bâ, Khalidou M., Franco-Plata, Roberto, & Díaz-Delgado, Carlos. (2015). Modelación hidrológica con base en estimaciones de precipitación con sensores hidrometeorológicos. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(4), 45-60. Recuperado en 01 de marzo de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000400003&lng=es&tlng=es.

Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., ... Sicart, J.-E. (2017). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>

8 ANEXOS

8.1 Primer Anexo Script de manejo de datos satelitales.

```
#Vargas-Almagro (2024)
# Librerias
library(ncdf4)
library(sp)
library(raster)
library(zoo)
library(scales)
library(ggplot2)
library(lubridate)
library(writexl)

# Eliminar todos los objetos en el entorno
rm(list=ls())

# Establecer directorio de trabajo
# setwd("F:/Datos")

# Listar archivos .nc4 en el directorio de trabajo
f_names <- list.files(pattern = ".nc4")

# Definir coordenadas de estaciones
est_xy <- data.frame(
  Estacion =
c("M0002", "M0003", "M0025", "M0156", "M0160",
  "M0444", "M1094", "M1190", "M1262",
  "M1266"),
  lon = c(-78.3704, -78.555, -79.3803, -79.4711, -79.4269, -
79.7023, -78.255, -79.0861, -78.9336, -79.05885),
  lat = c(-0.2318, -0.3658, -0.0247, 0.3194, -
0.2597, 0.8191, 0.0112, -0.0111, -0.3142, 0.156)
)

# Inicializar dataframe para almacenar los datos extraídos
pix0 <- NULL

# Procesar cada archivo .nc4
for (ncfname in f_names) {
  r1 <- raster(ncfname)
  rr1 <- flip(t(r1), direction = "y")
  rr1 <- flip(rr1, direction = "x")
  crs(rr1) <- "+init=epsg:4326 +proj=longlat +ellps=WGS84 +datum=WGS84
+no_defs +towgs84=0,0,0"
  plot(rr1)
  imerg0 <- NULL
  for (j in 1:nrow(est_xy)) {
    xy <- est_xy[j, c("lon", "lat")]
    pixell <- extract(rr1, SpatialPoints(xy, proj4string =
CRS("+init=epsg:4326 +proj=longlat +ellps=WGS84 +datum=WGS84 +no_defs
+towgs84=0,0,0")), sp = TRUE)
    imerg0 <- cbind(imerg0, pixell$layer)
```

```

    }
    pix0 <- rbind(pix0, imerg0)
  }

# Renombrar columnas del dataframe final
colnames(pix0) <- paste0(est_xy$Estacion, "Pmm")

# Crear el índice de tiempo para la serie temporal
start <- as.POSIXct("2022-04-25 00:30:00", format="%Y-%m-%d %H:%M:%S") -
5*60*60
end <- as.POSIXct("2023-12-31 23:30:00", format="%Y-%m-%d %H:%M:%S") -
5*60*60
index <- seq(start, end, by = "30 min")

# Crear objetos zoo para cada estación
imerg_zoo <- zoo(pix0, order.by = index)

# Guardar datos en archivos
save(imerg_zoo, file = "open_z77.RData")

# Cambio de unidades de Intensidad a Precipitación
dat_z <- imerg_zoo * 30 * (1/60) ####

# Guardar dat_z como data.frame en un archivo .xlsx
dat_z_df <- as.data.frame(dat_z)
save(dat_z, file = "op_z2013.RData")
#Hacer indice cada 1 Hora
ind_1hr <- strptime("1970-01-01", "%Y-%m-%d") +
ceiling(as.numeric(index(dat_z)) / (1*60*60)) * (1*60*60) - 5*60*60
zoolhr_sum <- aggregate(dat_z, ind_1hr, function(x) round(sum(x, na.rm =
F), 1))
converted_index2 <- as.POSIXlt(index(zoolhr_sum), tz = "America/Bogota") -
5*60*60
# Crear dataframe con la suma de 24 horas
df1 <- data.frame(Index = index(zoolhr_sum), zoolhr_sum)
#exportar
write_xlsx(df1, 'F:/extraer_datos_diarios/datoshor.xlsx')
# Calcular la suma cada 24 horas
ind_24hr <- strptime("1970-01-01", "%Y-%m-%d") +
ceiling(as.numeric(index(dat_z)) / (24*60*60)) * (24*60*60) - 5*60*60
zoo24hr_sum <- aggregate(dat_z, ind_24hr, function(x) round(sum(x, na.rm
= F), 3))
converted_index2 <- as.POSIXlt(index(zoo24hr_sum), tz = "America/Bogota")
- 5*60*60
# Crear dataframe con la suma de 24 horas
df24 <- data.frame(Index = index(zoo24hr_sum), zoo24hr_sum)
#exportar
write_xlsx(df24, 'F:/extraer_datos_diarios/datos.xlsx')

```

8.2 Segundo Anexo Script de descarga y transformación en video de las imágenes satelitales.

```
#Almagro (2024)
# Librerías necesarias
library(ncdf4)
library(sp)
library(raster)
library(zoo)
library(ggplot2)
library(dplyr)
library(maps)
library(magick)
library(av)
library(sf) # Librería para manejar shapefiles

# Eliminar todos los objetos en el entorno
rm(list = ls())

# Listar archivos .nc4 en el directorio de trabajo
f_names <- list.files(pattern = ".nc4")

# Definir coordenadas de estaciones
est_xy <- data.frame(
  Estacion = c("M0002", "M0003", "M0025", "M0156", "M0160", "M0444",
"M1094", "M1190", "M1262", "M1266"),
  lon = c(-78.3704, -78.555, -79.3803, -79.4711, -79.4269, -79.7023, -
78.255, -79.0861, -78.9336, -79.05885),
  lat = c(-0.2318, -0.3658, -0.0247, 0.3194, -0.2597, 0.8191, 0.0112, -
0.0111, -0.3142, 0.156)
)

# Obtener los datos del mapa de Ecuador, Perú y Colombia
ecuador_map <- map_data("world", region = "Ecuador")
peru_map <- map_data("world", region = "Peru")
colombia_map <- map_data("world", region = "Colombia")

# Cargar el shapefile adicional (cambia el path al de tu shapefile)
shapefile_path <- "C:\\Users\\Mesias Chisaguano\\OneDrive - Escuela
Politécnica Nacional\\9no\\UNION\\cuenca.shp"
shape_adicional <- st_read(shapefile_path)

# Reproyectar el shapefile si es necesario
if (st_crs(shape_adicional) != st_crs(4326)) {
  shape_adicional <- st_transform(shape_adicional, crs = 4326)
}

# Crear una lista para almacenar las rutas de las imágenes
image_paths <- character(length(f_names))

# Crear una secuencia de fechas y horas
start_time <- as.POSIXct("2023-06-02 00:00")
end_time <- as.POSIXct("2023-06-05 23:30")
time_seq <- seq(from = start_time, to = end_time, by = "30 mins")
```

```

# Calcular los valores máximos y mínimos de precipitación
precip_values <- numeric()

for (i in seq_along(f_names)) {
  ncfname <- f_names[i]
  r1 <- raster(ncfname)
  rr1 <- flip(t(r1), direction = "y")
  rr1 <- flip(rr1, direction = "x")
  crs(rr1) <- "+init=epsg:4326 +proj=longlat +ellps=WGS84 +datum=WGS84
+no_defs +towgs84=0,0,0"
  precip_values <- c(precip_values, values(rr1))
}

min_precip <- min(precip_values, na.rm = TRUE)
max_precip <- max(precip_values, na.rm = TRUE)

# Procesar cada archivo .nc4
for (i in seq_along(f_names)) {
  ncfname <- f_names[i]
  r1 <- raster(ncfname)
  rr1 <- flip(t(r1), direction = "y")
  rr1 <- flip(rr1, direction = "x")
  crs(rr1) <- "+init=epsg:4326 +proj=longlat +ellps=WGS84 +datum=WGS84
+no_defs +towgs84=0,0,0"

  # Extraer datos para todas las estaciones
  imerg0 <- NULL
  for (j in 1:nrow(est_xy)) {
    xy <- est_xy[j, c("lon", "lat")]
    pixell <- extract(rr1, SpatialPoints(xy, proj4string =
CRS("+init=epsg:4326 +proj=longlat +ellps=WGS84 +datum=WGS84 +no_defs
+towgs84=0,0,0")), sp = TRUE)
    imerg0 <- cbind(imerg0, pixell$layer)
  }

  # Convertir el raster a data frame
  raster_df <- as.data.frame(as(rr1, "SpatialPixelsDataFrame"), xy =
TRUE)

  # Obtener los límites del raster
  raster_extent <- extent(rr1)

  # Crear el mapa y superponer el raster
  p <- ggplot() +
  geom_tile(data = raster_df, aes(x = x, y = y, fill = layer)) +
  scale_fill_viridis_c(limits = c(min_precip, max_precip), name =
"Precipitación (mm)") +
  geom_path(data = ecuador_map, aes(x = long, y = lat, group = group),
color = "white") +
  geom_path(data = peru_map, aes(x = long, y = lat, group = group),
color = "white") + # Añadir límites de Perú
  geom_path(data = colombia_map, aes(x = long, y = lat, group = group),
color = "white") + # Añadir límites de Colombia
  geom_point(data = est_xy, aes(x = lon, y = lat), color = "red", size
= 2) + # Añadir puntos de estaciones

```

```

    geom_sf(data = shape_adicional, fill = NA, color = "blue") + #
Superponer el shapefile adicional
  labs(x = "Longitud", y = "Latitud", title = "Agua del cielo") +
  theme_minimal() +
  theme(
    plot.title = element_text(color = "white", size = 16, hjust = 0.5),
# Titulo
    axis.text = element_text(color = "white"), # Etiquetas de los ejes
    axis.title = element_text(color = "white"), # Títulos de los ejes
    panel.grid.major = element_line(color = "white"), # Grilla mayor
    panel.grid.minor = element_blank(), # Ocultar grilla menor
    panel.background = element_blank(), # Fondo del panel transparente
    legend.text = element_text(color = "white"), # Texto de leyenda
    legend.title = element_text(color = "white"), # Título de leyenda
    panel.ontop = TRUE # Colocar la grilla encima de la imagen
  ) +
  coord_sf(xlim = c(raster_extent@xmin, raster_extent@xmax), ylim =
c(raster_extent@ymin, raster_extent@ymax)) + # Usar coord_sf para
recortar a los límites del raster
  annotate("text", x = Inf, y = Inf, label = format(time_seq[i], "%d-
%m-%Y %H:%M"), color = "white", size = 4, hjust = 1.2, vjust = 2) #
Posicionar el texto en la esquina superior derecha

  # Guardar el gráfico como una imagen
  image_path <- paste0(tempfile(), ".png")
  ggsave(image_path, plot = p, bg = "transparent") # Guardar con fondo
transparente
  image_paths[i] <- image_path
}

# Leer las imágenes y crear el video
output_video <- "ecuador_satellite_data.mp4"
fps <- length(image_paths) / 40 # Duración de 2 minutos (120 segundos)
av::av_encode_video(image_paths, output = output_video, framerate = fps,
vfilter = "scale=trunc(iw/2)*2:trunc(ih/2)*2")

# Limpiar las imágenes temporales
file.remove(image_paths)

```

8.3 Tercer Anexo Script de relleno estadístico de datos.

8.3.1 Creación de la matriz datos completos

```
#Almagro (2024)
# Cargamos las bibliotecas necesarias
library(utils)

# Función para importar y exportar matrices
filtrar_matriz <- function(archivo_entrada, archivo_salida) {
  # Importamos la matriz original desde el archivo CSV delimitado por
  # comas
  matriz_original <- as.matrix(read.csv(archivo_entrada, header = TRUE,
  sep = ","))

  # Inicializamos una lista para almacenar las filas que no contienen -
  # 100
  filas_sin_menos_100 <- list()

  # Recorremos cada fila de la matriz original
  for (i in 1:nrow(matriz_original)) {
    # Verificamos si la fila contiene -100
    if (!-100 %in% matriz_original[i, ]) {
      # Si la fila no contiene -100, la añadimos a la lista
      filas_sin_menos_100 <- c(filas_sin_menos_100,
      list(matriz_original[i, ]))
    }
  }

  # Convertimos la lista a una matriz
  if (length(filas_sin_menos_100) > 0) {
    matriz_resultante <- do.call(rbind, filas_sin_menos_100)
  } else {
    matriz_resultante <- matrix(, nrow = 0, ncol = ncol(matriz_original))
  }

  # Exportamos la matriz resultante a un archivo CSV
  write.csv(matriz_resultante, file = archivo_salida, row.names = FALSE)

  print("La matriz resultante ha sido exportada exitosamente.")
}

archivo_entrada <- "data_ingresoR.csv"
archivo_salida <- "datos_completos_baseR.csv"
filtrar_matriz(archivo_entrada, archivo_salida)
```

8.3.2 Relleno de datos con correlaciones.

```
#Campozano- Almagro (2024)
# Cargamos los datos
datos <- read.csv2("data_ingresoR.csv", header = TRUE, sep = ",")
data <- as.data.frame(datos) # Convertir a data frame si no lo es aún

# Convertir todas las columnas a numéricas
data[] <- lapply(data, as.numeric)

# Verificar si hay valores no numéricos en el data frame
non_numeric_cols <- sapply(data, function(x) any(!is.numeric(x)))
if (any(non_numeric_cols)) {
  stop("Error: Al menos una columna no es numérica en el marco de datos
'data'.")
}

# Imprimir resumen de datos para verificación
print("Resumen de datos ingresados:")
print(summary(data))

base <- read.csv2("datos_completos_baseR.csv", header = TRUE, sep = ",")
print("Resumen de datos base:")
print(summary(base))

# Inicializamos los arreglos
arr_coef <- array(0, dim = c(9, 2, 9))
arr_corr <- array(0, dim = c(9, 9))

# Calculamos coeficientes y correlaciones
for (i in 1:9) {
  y <- as.numeric(base[, i])
  for (j in 1:9) {
    x <- as.numeric(base[, j])
    if (i != j) {
      reg <- lm(x ~ y)
      arr_coef[j, 1, i] <- reg$coefficients[1] # corte
      arr_coef[j, 2, i] <- reg$coefficients[2] # pendiente
      arr_corr[i, j] <- cor(x, y, method = "kendall") # correlación de
Kendall
    }
  }
}

# Reemplazamos valores de correlación bajos por 0
arr_corr <- round(replace(arr_corr, arr_corr < 0.2, 0), 3)
ind_corr <- rowSums(arr_corr) # índice de suma de correlación

# Procesamos la matriz de datos
for (i in 1:9) {
  for (j in 1:nrow(data)) {
    if (ind_corr[i] != 0) { # solo para estaciones con correlación
      val <- data[j, i] # selecciona dato
      if (val == -100) {
```

```

        if (sum(data[j, ] == -100) != 9) { # Asegúrate de usar la fila j
para la condición
            newval <- 0
            for (k in 1:9) {
                if (data[j, k] != -100) {
                    newval <- newval + arr_corr[i, k] * (arr_coef[k, 1, i] +
arr_coef[k, 2, i] * as.numeric(data[j, k]))
                }
            }
            newval <- newval / ind_corr[i]
            data[j, i] <- newval
            #cat("Fila:", j, "Columna:", i, "Valor reemplazado por:",
newval, "\n")
        }
    }
}
}

# Redondeamos los valores en la matriz data a dos decimales
data <- round(data, 1)

# Exportamos la matriz resultante a un archivo CSV sin modificar los
valores -100
write.csv(data, file = "datos_rellenados_R.csv", row.names = FALSE, na =
"", sep = ", " )

# Verificamos los datos exportados
print("Datos exportados correctamente.")
print(data)

```

8.3.3 Regresión lineal datos Observados y datos Satelitales.

```

#Almagro (2024)
# Cargar los paquetes
library(readxl)
library(ggplot2)
library(openxlsx)
library(magick)

procesar <- function(filename, sheet_name) {
  datos <- read_excel(filename, sheet = sheet_name)
  O <- datos$O
  S <- datos$S

  correlacion <- cor(O, S)
  print(correlacion)
  # modelo de regresión lineal
  modelo <- lm(O ~ S)
  print(summary(modelo))
  # gráfico
  p <- ggplot(datos, aes(x = S, y = O)) +
  geom_point() +

```

```

    geom_smooth(method = "lm", col = "blue") +
    ggtitle(paste("Regresión Lineal - Hoja:", sheet_name)) +
    xlab("Satelitales") +
    ylab("Observados")

    # Guardar el gráfico
    nombre_grafico <- paste("grafico_regresion_", sheet_name, ".png", sep =
    "")
    ggsave(nombre_grafico, plot = p)

    return(list(modelo = modelo, correlacion = correlacion, grafico =
    nombre_grafico))
  }

filename <- "F:\\Rellenohorario\\Linealizacion\\Datos.xlsx"
hojas <- c("M0003", "M0025", "M0156", "M0160", "M0444", "M1094", "M1190",
"M1262", "M1266")

resultados <- lapply(hojas, function(sheet) procesar(filename, sheet))

# Extraer las correlaciones y crear un data.frame
correlaciones <- sapply(resultados, function(x) x$correlacion)
tabla_correlaciones <- data.frame(Hoja = hojas, Correlacion =
correlaciones)

# Extraer interceptos y pendientes del modelo
interceptos <- sapply(resultados, function(x) coef(x$modelo)[1])
pendientes <- sapply(resultados, function(x) coef(x$modelo)[2])
tabla_resultados <- data.frame(Hoja = hojas, b = interceptos, XS =
pendientes) #las ecuaciones de tipo Dobs=b+x*Dsatel

# Mostrar la tabla de correlaciones y resultados del modelo
print(tabla_correlaciones)
print(tabla_resultados)

# Guardar la tabla de resultados en un archivo Excel
matriz <- merge(tabla_resultados, tabla_correlaciones)
write.xlsx(matriz, "Resultados.xlsx")

# Combinar las imágenes en una matriz de 4xN
imagenes <- lapply(resultados, function(x) image_read(x$grafico))
filas <- ceiling(length(imagenes) / 4)
imagen_combinada <- image_blank(1, 1) # Crear una imagen en blanco para
iniciar la combinación
for (i in seq_len(filas)) {
  fila_imagenes <- imagenes[((i-1) * 4 + 1):min(i * 4, length(imagenes))]
  fila_combinada <- image_append(image_join(fila_imagenes), stack =
FALSE)
  imagen_combinada <- image_append(c(imagen_combinada, fila_combinada),
stack = TRUE)
}
# Guardar la imagen combinada
image_write(imagen_combinada, path = "imagen_combinada.png")

cat("Proceso completado y imagen combinada guardada como
'imagen_combinada.png'")

```

8.3.4 Relleno de datos observados con satelitales

```
#Almagro (2024)
library(readr)
library(readxl)
library(openxlsx)

# Leer los datos
datos <- read.csv2("datos_rellenados_R.csv", header = TRUE, sep = ",")
#datos <- datos[, -1] # Eliminar la primera columna si no es necesaria

# Asegurar que todas las columnas sean numéricas
datos <- as.data.frame(lapply(datos, function(x)
as.numeric(as.character(x))))

datosat <- read_excel("datoshor.xlsx")
datosat <- as.data.frame(lapply(datosat[, -1], function(x)
as.numeric(as.character(x)))) # Eliminar la primera columna si no es
necesaria

lineali <- read_excel("Resultados_satelites.xlsx")

# Extraer las constantes b y m
b <- lineali[1,]
b <- as.numeric(b[,-1])
m <- lineali[2,]
m <- as.numeric(m[,-1])

# Rellenar valores y aplicar transformación
for(i in 1:ncol(datos)){
  a <- which(datos[, i] == -100)
  if(length(a) > 0) {
    datos[a, i] <- m[i] * datosat[a, i] + b[i]
  }
}

# Redondear los datos a un decimal
datos <- round(datos, 1)

# Guardar los datos en un archivo CSV
write.csv(datos, file = "datos_f.csv", row.names = FALSE)
```