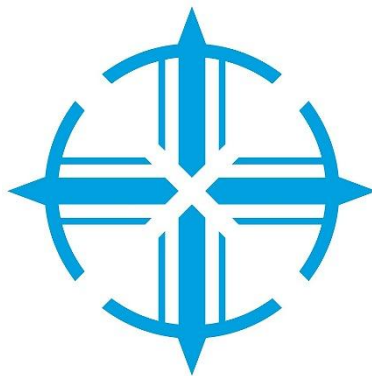


**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR FACULTAD DE
HÁBITAT, INFRAESTRUCTURA Y CREATIVIDAD**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Evaluación Hidrológica de la cuenca del río Monjas en Quito - Ecuador, enfocada en el análisis de datos hidrometeorológicos y modelación de escorrentía mediante herramientas SIG y modelos hidrológicos.

AUTORES:

Jhordan Jeovanny Caiza Montalván

Micaela Alejandra Morillo Allan

DIRECTOR:

ING. EDDY SÁNCHEZ

QUITO DM, ENERO DE 2026

A mis padres Nestor Jeovanny Caiza† y Lorena Montalván por el apoyo incondicional y emocional en todo momento, en especial a mi padre que me enseñó a ser la persona que soy hoy en día, y sé que desde el cielo está orgulloso de todo lo que he logrado.

Jhordan Jeovanny Caiza Montalván

A mis padres Javier y Gemma quienes con su amor y ejemplo me han acompañado durante todo este camino, para mis abuelitos, Romelia y Simón†, quienes siempre han creído en mi incluso más que yo y me han dado su apoyo incondicional siempre, para mi ángel Simón, que desde el cielo se que me cuida y acompaña, aunque ya no esté aquí este también es su logro.

Micaela Alejandra Morillo Allan

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, en especial a mis padres Nestor Jeovanny Caiza† y Lorena Montalván quienes supieron guiarme por el camino correcto para saber tomar buenas decisiones, y a mis hermanos Johnny y Kerly que me acompañaron y motivaron en todo el proceso de mi carrera.

A mis abuelitas, en especial a mi abuelita Aída que desde muy pequeño me vio alcanzar cada una de mis metas y siempre estuvo para apoyarme en todo.

A la Pontificia Universidad Católica del Ecuador por brindarme la oportunidad de crecer académica y profesionalmente, de igual manera extendiendo mis agradecimientos a todos los docentes que me compartieron su sabiduría para lograr alcanzar todos mis conocimientos adquiridos.

Al tutor del presente trabajo de integración curricular, el ingeniero Eddy Sánchez por saber guiarnos a lo largo de toda la investigación con su conocimiento para poder culminar con esta etapa de aprendizaje.

A mis compañeros de la carrera quienes estuvieron conmigo durante todo este largo camino y con quienes vivimos muchas experiencias juntos, tanto dentro como fuera de las aulas, que al final nos ayudaron para crecer como profesionales y como personas.

Finalmente, deseo expresar mi profunda gratitud a todas las personas que me brindaron su apoyo a lo largo de la carrera. Agradezco especialmente esa compañía incondicional que estuvo presente en los momentos decisivos y supo extenderme la mano cuando más lo necesitaba. Asimismo, extendiendo un reconocimiento a mi compañera de estudios, con quien compartí la realización de cada proyecto académico y junto a quien superé, nivel tras nivel, cada desafío de esta etapa universitaria.

Jhordan Jeovanny Caiza Montalván

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Javier y Gemma, por todo el esfuerzo que hacen para darme las mejores oportunidades. Por enseñarme a no rendirme y siempre tener una palabra de aliento cuando más lo necesito, su amor incondicional y sus enseñanzas. Ellos hacen de mí una mujer fuerte y confiada, y me ayudan a cumplir mis sueños en todo, nunca me dejan caer y son mi guía en cada logro adquirido gracias de todo corazón por ser los mejores padres.

A mis tíos Byron, Alexandra y Zoila por ser y estar conmigo, gracias porque han sido un gran ejemplo de superación para mí, ya que me han acompañado durante cada etapa de mi vida y tengo el gusto de poder seguir compartiendo con ustedes, por su amor incondicional, porque siempre han creído en mí.

A mis primos Zahrai e Isaac, que somos más que primos, mis hermanos incondicionales y quienes nunca me han dejado sola, por ser esa voz de aliento cuando ya no puedo más. Isaac con quien crecí y ahora es testigo de mi superación, gracias por todos los recuerdos y por ser mi primo. Zahrai, por todas las peleas de pequeña que ahora extraño tanto, por no dejarme cuando lo necesito y ayudarme sin importar la distancia.

A mi tutor de tesis el Ing. Eddy Sánchez quien con su sabiduría y conocimiento ha sabido guiar el desarrollo de esta investigación.

A mis amigos, con quienes el paso por la universidad se hizo un poco menos pesado. Por cada risa y anécdota que vivimos, y a mi compañero de tesis Jhordan, no pude pedir mejor equipo para la carrera, gracias por todos los trabajos y momentos juntos.

Micaela Alejandra Morillo Allan

RESUMEN

La presente investigación evalúa la respuesta hidrológica de la cuenca del Río Monjas, ubicada al noroccidente de Quito, una zona caracterizada por una rápida expansión urbana y alta vulnerabilidad ante eventos extremos. Ante la escasez de información in-situ, el estudio desarrolló una metodología híbrida que integró datos satelitales (CHIRPS) con monitoreo de campo y modelación hidrológica directa mediante el software HEC-HMS 4.13.

Se caracterizó la morfometría de la cuenca y se determinó un Número de Curva ponderado, evidenciando un alto potencial de escorrentía. La fase de validación histórica, sustentada en campañas de aforo y topografía de precisión, permitió calibrar el caudal base del sistema, identificando una fuerte influencia de descargas antrópicas en el régimen de estiaje.

Para la fase predictiva, se generaron escenarios de riesgo mediante tormentas de diseño con periodos de retorno de 2 a 500 años, aplicando una desagregación temporal basada en patrones locales de alta resolución. Los resultados proyectan caudales pico críticos. Estos hallazgos proporcionan una herramienta técnica calibrada y escenarios hidrológicos confiables, indispensables para el diseño de obras de protección y la gestión del riesgo de inundaciones en el Distrito Metropolitano de Quito.

Palabras clave: Hidrología urbana, HEC-HMS, Río Monjas, CHIRPS, Riesgo de inundación, Caudal base.

ABSTRACT

1. ABSTRACT

This research evaluates the hydrological response of the Monjas River basin, located in northwestern Quito, an area characterized by rapid urban expansion and high vulnerability to extreme events. Facing a scarcity of in-situ data, the study developed a hybrid methodology integrating satellite data (CHIRPS) with field monitoring and direct hydrological modeling using HEC-HMS 4.13 software.

Basin morphometry was characterized, and a weighted Curve Number was determined, evidencing high runoff potential. The historical validation phase, supported by streamflow gauging campaigns and precision topography, allowed for the calibration of the system's baseflow, identifying a strong influence of anthropogenic discharges on the low-flow regime.

For the predictive phase, risk scenarios were generated using design storms with return periods ranging from 2 to 500 years, applying temporal disaggregation based on high-resolution local patterns. The results project critical peak flows. These findings provide a calibrated technical tool and reliable hydrological scenarios, indispensable for the design of protection works and flood risk management in the Metropolitan District of Quito.

Keywords: Urban hydrology, HEC-HMS, Monjas River, CHIRPS, Flood risk, Baseflow.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
RESUMEN.....	6
ABSTRACT.....	7
ÍNDICE	8
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1. Justificación e Importancia	17
1.2. Planteamiento del Problema.....	17
1.3. Objetivos.....	18
1.3.1. Objetivo General.....	18
1.3.2. Objetivos Específicos.....	18
1.4. Alcance y Limitaciones.....	19
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL	20
2.1. Cuenca Hidrográfica y Clasificación	20
2.1.1 Clasificación Según el Destino del Flujo	20
2.1.2 Otras Clasificaciones Relevantes	21
2.2 Hidrología Urbana y Respuesta Hidrológica	22
2.2.1 Componentes del Hidrograma: Escorrentía Directa y Caudal Base	22
2.2.2 Tiempo de Concentración y Tiempo de Retardo	23
2.2.3 Hidrograma Unitario del SCS y Enfoque por Evento.....	24
2.2.4 Método SCS Curve Number para Pérdidas	24
2.3 Información Hidrometeorológica y su Representación Espacial.....	25
2.3.1 Precipitación Satelital CHIRPS	25
2.3.2 Google Earth Engine y Climate Engine para Extracción de Series	25
2.3.3 Open Buildings	26
2.3.3.1 Urbanización, Impermeabilización y Generación de Escorrentía.....	26

2.3.3.2	Uso de Huellas de Edificaciones Para Aproximar Presión Urbana	26
2.3.4	Hydrognomon	27
2.3.4.1	Tratamiento Estadístico y Procesamiento de Series de Tiempo	27
2.3.4.2	Pruebas de Bondad de Ajuste Mediante Hydrognomon	28
2.3.4.3	Intervalos Mediante la Regla de Sturges.....	28
2.4	Aforos y Cálculo de Caudales en Cauces Naturales.....	29
2.4.1	Método área-velocidad con Subdivisión de la Sección	29
2.4.2	Estimación de Velocidad Mediante Flotadores	29
2.4.3	Caudal Base en Cuencas Urbanas y Representación en HEC-HMS	29
2.4.3.1	Dotación y Consumo de Agua Potable	30
2.4.3.2	Caudal Medio Diario.....	30
2.4.3.3	Población Servida a Partir de Estructuras	31
2.5	Delimitación de Cuencas y Análisis Morfométrico Mediante SIG	31
2.5.1	Modelo Digital de Elevación y Preprocesamiento Hidrológico	32
2.5.2	Extracción de red de Drenaje.....	32
2.5.3	Método de Strahler.....	32
2.5.4	Parámetros Morfométricos Relevantes Para la Respuesta Hidrológica.....	34
2.5.5	Herramientas SIG empleadas, QGIS, GRASS GIS y ArcGeek Calculator	34
2.6	Dinámica del Escurrimiento y Estado de la Cuenca durante el Monitoreo	35
2.6.1	Fase de Ascenso y Pico de la Avenida	35
2.6.2	Fase de Recesión y Almacenamiento Superficial.....	35
2.6.3	Fase de Agotamiento y Flujo Base Permanente	36
2.7	Modelación Hidrológica por Evento con HEC-HMS	36
2.7.1	Variables de Resultado	36
2.7.2	Estructura del Modelo y Parametrización.....	37
2.7.3	Número de Curva (CN) y Fuentes de Información Suelo - Cobertura	37
CAPÍTULO III. ÁREA DE ESTUDIO.....		37
3.1.	Caracterización del Área de Estudio.....	37
3.1.1.	Localización y Delimitación Geográfica de la Cuenca del Río Monjas.....	38

3.1.2.	Uso y Cobertura del Suelo y Grado de Impermeabilización	39
3.2.1.1	Impacto en el Número de Curva (CN).....	40
3.2.	Análisis de la Curva Hipsométrica y Ciclo Erosivo	41
3.3.	Red Hídrica y Sistema de Drenaje Existente	42
3.3.1.	Puntos de Aforo y Subcuencas de Aporte Definidas	42
3.4.	Recopilación de Información Base Disponible.....	44
3.4.1.	Datos Cartográficos y Topográficos	44
3.4.2.	Datos Hidrometeorológicos: Series Históricas de Precipitación y Caudal.	44
CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA		45
4.1.	Enfoque Metodológico General	45
4.2.	Herramientas, Software y Sistema de Referencia.....	46
4.3.	Construcción y Consolidación de la Base de Datos.....	46
4.3.1.	Información topográfica: Modelo Digital de Elevación (DEM).....	46
4.3.2.	Información Hidrometeorológica y de Referencia Institucional	46
4.3.2.1.	Selección de Datos Históricos	49
4.4.	Información de Campo: Campañas de Aforo	49
4.4.1.	Obtención de caudales de aforo	50
4.4.1.1.	Levantamiento de la Sección Transversal y Profundidades.....	50
4.4.1.2.	Cálculo del Área Mojada por Discretización.....	51
4.4.1.3.	Medición de Velocidad con Flotador y Corrección a Velocidad media	52
4.4.1.4.	Integración Área–Velocidad y Caudal Total	52
4.5.	Procesamiento SIG en QGIS: Delimitación de Cuenca y Subcuencas	53
4.5.1.	Acondicionamiento Hidrológico del DEM (GRASS)	53
4.5.2.	Dirección de Flujo, Acumulación y red de Drenaje	53
4.5.3.	Delimitación de la Cuenca Total y Subcuencas por Puntos de Aforo	54
4.6.	Morfometría	54
4.6.1.	Longitud del cauce principal.....	54
4.6.2.	Determinación del Número de Curva (CN) con GCN250 (Condición II).....	54
4.7.	Cuantificación de Infraestructura con Open Buildings y uso Metodológico.....	55

4.7.1.	Inventario de Estructuras Mediante Open Buildings	56
4.8.	Caudal Base Sanitario - Caudal Medio Diario.....	57
4.8.1.	Determinación de la Población Proyectada	57
4.9.	Modelación Predictiva en HEC-HMS.....	58
4.9.1.	Enfoque General	58
4.9.2.	Precipitación de Diseño Mediante Análisis de Frecuencia de Hydrognomon.....	58
4.9.3.	Construcción del Hietograma de Diseño.	59
4.9.4.	Implementación de la Precipitación en HEC-HMS	61
4.9.5.	Modelo de Cuenca y Parametrización Hidrológica	61
4.9.6.	Control de Simulación y Ejecución de Corridas.....	61
4.9.7.	Variables de Salida Consideradas.....	62
4.10.	Modelación Histórica, Eventos Observados en Fechas de Aforo.	62
4.10.1.	Delimitación del Área Modelada por Evento	62
4.10.2.	Precipitación Utilizada y Construcción del Hietograma Histórico.....	62
4.10.3.	Configuración del Modelo en HEC-HMS	63
4.10.4.	Control de Simulación y Variables de Salida	63
CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		64
5.1.	Análisis y Discusión de la Morfometría de la Cuenca.....	64
5.1.1.	Geometría y Forma de la Cuenca.....	64
5.1.2.	Relieve y Pendientes.....	64
5.1.3.	Red de Drenaje y Dinámica de Transporte.....	65
5.1.4.	Tiempo de Concentración (Tc).....	65
5.2.	Impacto de la Urbanización	66
5.3.	Análisis de los Hidrogramas de Crecida por Periodos de Retorno.....	66
5.3.1.	Síntesis de Datos Modelo Predictivo	66
5.3.2.	Discusión de la Respuesta Hidrológica Extrema	67
5.3.3.	Influencia de la Urbanización y el Número de Curva (CN)	67
5.3.3.1.	Impacto de la Impermeabilización en el Volumen de Escurrimiento	68
5.4.	Análisis de la Modelación Hidrológica Histórica.....	68

5.4.1.	Síntesis de Resultados de la Modelación Histórica	68
5.4.2.	Interpretación Diferencia Entre Caudales Pico y Aforos.....	69
5.4.3.	Validación mediante Caudal Base Antrópico	70
5.5.	Análisis Dinámica del Crecimiento Poblacional y su Impacto en el Río Monjas	70
5.5.1.	Comparativa Intercensal y Expansión Urbana.....	71
5.6.	Comparación en el Instante del Aforo: Coherencia con el Estado Observado del Río	71
5.6.1.	Implicaciones Hidrológicas y de Diseño	72
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		72
6.1.	Conclusiones.....	72
6.2.	Recomendaciones.....	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		75
ANEXOS.....		79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Curvas Hipsométricas Ciclo Erosivo	22
Figura 2 Red de drenaje según Strahler	34
Figura 3 Delimitación Cuenca del Río Monjas	39
Figura 4 Mapa del Plan de Uso y Ocupación del Suelo (PUOS) de la Cuenca del Río Monjas .	40
Figura 5 Curva Hipsométrica Cuenca Río Monjas	41
Figura 6 Área Primer Punto Aforado La Pampa.....	43
Figura 7 Área Segundo Punto Aforado San Antonio	44
Figura 8 Precipitación máxima anual CHIRPS	47
Figura 9 Precipitación máxima anual PARAMH2O	48
Figura 10 Precipitación máxima anual en 24 horas ATMOS 41	48
Figura 11 Perfiles transversales de los puntos de aforo.....	51
Figura 12 Infraestructura Obtenida OpenBuildings.....	56
Figura 13 Curva de Frecuencia de Precipitación máx. diaria	59
Figura 14 Hietograma “Patron Temporal”.....	60
Figura 15 Hidrogramas de la modelación en HEC-HMS	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Estadísticos del Número de Curva (CN) en la cuenca y subcuencas.....	41
Tabla 2 Coordenadas UTM y fechas de campañas de aforo.....	43
Tabla 3 Resumen de las campañas de aforos.	53
Tabla 4 Resumen morfométrico y CN por unidad de análisis	55
Tabla 5 Resumen de estimación del caudal base sanitario	58
Tabla 6 Descarga en el punto de cierre	67
Tabla 7 Resultados Obtenidos Modelación Histórica.....	68
Tabla 8 Comparación del caudal aforado vs caudal simulado en la hora del aforo.....	71

ÍNDICE DE ECUACIONES

(1).....	23
(2).....	23
(3).....	28
(4).....	30
(5).....	31
(6).....	31
(7).....	50
(8).....	50
(9).....	50
(10).....	50
(11).....	51
(12).....	51
(13).....	51
(14).....	52
(15).....	52
(16).....	52
(17).....	54
(18).....	54
(19).....	57
(20).....	60

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A Número de Curva para la Cuenca.....	79
ANEXO B Campaña de Aforos Realizada en el Río Monjas	79
ANEXO C Datos Utilizados para el Cálculo del Caudal	80
ANEXO D Datos Perfiles Transversales.....	81
ANEXO E Dotación Básica 1 NTE INEN 1680.....	82
ANEXO F Porcentajes de incremento de la dotación básica de acuerdo con servicios comunales.	83
ANEXO G Resumen de Resultados e hidrogramas de la modelación histórica en HEC-HMS. ..	83
ANEXO H Resumen de Resultados e hidrogramas de la modelación predictiva en HEC-HMS.	86

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación e Importancia

La hidrología, como disciplina fundamental de la Ingeniería Civil, se enfrenta continuamente al reto de comprender y mitigar las alteraciones que la expansión urbana produce en el ciclo natural del agua (Tucci, 2007). En entornos andinos de alta pluviosidad como el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), los eventos de precipitación intensa pueden desencadenar incrementos abruptos de escorrentía y caudales, con consecuencias directas sobre la seguridad, la economía y la sostenibilidad urbana.

La cuenca del río Monjas, ubicada al noroccidente de Quito, constituye un caso representativo de esta problemática. En este territorio ha existido un crecimiento acelerado de la población, provocando una sustitución de la cobertura vegetal por superficies impermeables. Las consecuencias de este crecimiento acelerado son degradar el ambiente (Barragán y Murillo, 2023), y también se modifica la dinámica hidrológica al reducir la infiltración y el almacenamiento del suelo, y al incrementar la rapidez y magnitud de la escorrentía superficial (Chow, Maidment y Mays, 1994). Estudios como el Proyecto SISmLAD (Perrin, 1998) advertían sobre la vulnerabilidad hidrológica del área; sin embargo, la expansión urbana reciente y la disponibilidad limitada de datos continuos hacen necesario un diagnóstico actualizado bajo las condiciones actuales.

En este contexto, la presente investigación se justifica por la necesidad de consolidar información hidrológica cuantitativa como caudales pico, volúmenes escurridos y tiempos característicos a partir del análisis de datos hidrometeorológicos y la modelación hidrológica, con apoyo de herramientas SIG. Esta aproximación permite transformar información dispersa en resultados comparables y verificables, útiles como línea base para la gestión técnica de cuencas urbanas (Duque-Sarango, Patiño & López, 2019).

1.2. Planteamiento del Problema

El principal desafío que enfrenta la cuenca del Río Monjas es el crecimiento urbano y la poca capacidad que tiene el territorio para transportar los caudales generados durante eventos de precipitaciones intensas. Este crecimiento ha provocado un fenómeno característico de la hidrología urbana: la reducción del tiempo de concentración T_c y el incremento de los caudales

pico (Q_p), asociados al aumento de superficies impermeables y a la aceleración del flujo superficial (Tucci, 2007). Como consecuencia, zonas densamente pobladas a lo largo del cauce pueden experimentar incrementos súbitos de escorrentía y sobrecargas en el drenaje, lo que incrementa la probabilidad de el desbordamiento del río.

El presente Trabajo de Integración Curricular aborda tal problemática a partir de la integración de análisis hidrometeorológico, caracterización fisiográfica con herramientas SIG, y simulación precipitación-escorrentía con el HEC-HMS (Hydrologic Modeling System), software del US Army Corps of Engineers (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos, 2025). La finalidad del trabajo es cuantificar la respuesta hidrológica de la cuenca como: hidrogramas, volúmenes de escorrentías y caudales máximos en distintos escenarios de precipitaciones y ocupaciones del suelo, de forma que los resultados sean la base técnica para análisis posteriores para gestión de drenaje (U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center [USACE-HEC], 2025).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca del río Monjas en Quito ante eventos de precipitación intensa, mediante el análisis de datos hidrometeorológicos y la modelación de la escorrentía con herramientas SIG y el modelo HEC-HMS, para generar insumos técnicos que contribuyan a la gestión del riesgo de inundaciones y a la planificación urbana sostenible.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las condiciones físicas y urbanas de la cuenca del río Monjas, incluyendo topografía, uso y cobertura del suelo, impermeabilización, red de drenaje y áreas críticas.
- Analizar los registros históricos de precipitación, caudal y eventos extremos para establecer patrones hidrológicos relevantes en la cuenca.
- Cuantificar el impacto del crecimiento urbano y la impermeabilización sobre la generación de escorrentía y el tiempo de concentración.
- Simular la respuesta hidrológica de la cuenca bajo distintos escenarios de lluvia y ocupación del suelo, utilizando modelos hidrológicos adecuados como HEC-HMS.

1.4. Alcance y Limitaciones

El presente estudio se enfoca en la evaluación hidrológica de la cuenca urbana del río Monjas, localizada en la ciudad de Quito, Ecuador. El objetivo es cuantificar la respuesta de la cuenca ante eventos de lluvia, analizando cómo las condiciones actuales de urbanización influyen en la generación y concentración de la escorrentía superficial y en los tiempos característicos de respuesta.

Para lograrlo, la investigación incluirá:

- La caracterización física y urbana de la cuenca, incluyendo topografía, uso y cobertura del suelo, grado de impermeabilización, red de drenaje existentes.
- El análisis de datos hidrometeorológicos históricos (precipitación y caudales disponibles) y de eventos intensos, para establecer patrones de comportamiento hidrológico relevantes en la cuenca.
- El procesamiento de información geoespacial mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), con el software QGIS, para delimitar la cuenca, discretizar subcuencas y obtener parámetros necesarios para la modelación.
- La simulación de la respuesta hidrológica mediante HEC-HMS, evaluando escenarios de lluvia y condiciones de ocupación del suelo para comparar caudales pico, volúmenes escurridos y tiempos de respuesta, e identificar subáreas con mayor potencial de generación de escorrentía.
- La formulación de conclusiones y recomendaciones técnicas a nivel conceptual que sirvan como insumo para la gestión del riesgo y la planificación urbana sostenible, en coherencia con el enfoque hidrológico del estudio.

Para mantener el enfoque del estudio y garantizar su viabilidad, se delimitan las siguientes exclusiones:

- No se abordará la modelación hidráulica bidimensional (2D) del cauce principal ni de las zonas de inundación. El estudio se centra en el modelo hidrológico (lluvia-escorrentía)

para determinar cuánta agua fluye (caudales), pero no en el análisis detallado de cómo fluye esa agua (calados, velocidades y extensión de la mancha de inundación).

- No se realizará un análisis de la calidad del agua del río Monjas ni se estudiarán los procesos de transporte de sedimentos o contaminantes.
- No se incluirá un análisis socioeconómico detallado de los daños generados por las inundaciones ni se evaluará la percepción del riesgo por parte de la comunidad.
- Aunque se propondrán medidas de mitigación a nivel general, el estudio no llegará al nivel de diseño de ingeniería de detalle de dichas obras, ni evaluará su factibilidad constructiva o económica.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL

La respuesta hidrológica de una cuenca se expresa mediante la transformación de la precipitación en escorrentía superficial, infiltración y almacenamiento temporal, lo cual se refleja finalmente en un hidrograma de caudal en la salida de interés. En cuencas urbanas, la impermeabilización del suelo, la modificación de la red de drenaje y las alteraciones humanas pueden alterar significativamente tanto el volumen como el pico y la forma del hidrograma.

2.1. Cuenca Hidrográfica y Clasificación

Una cuenca hidrográfica se define como la unidad territorial y dinámica en la que el ciclo hidrológico se manifiesta de forma sistémica. Geográficamente, es un área delimitada por una línea divisoria de aguas, donde toda la precipitación pluvial que no es infiltrada o evaporada converge hacia un único punto de salida o cauce principal (Aparicio, 1999). Desde una perspectiva sistémica, no solo representa un espacio físico, sino una unidad de gestión donde interactúan variables geológicas, climáticas y antrópicas.

2.1.1 Clasificación Según el Destino del Flujo

Cuencas Exorreicas (Sistemas Abiertos): Son aquellas cuya red de drenaje es continua y desemboca finalmente en el océano o mares abiertos. El Río Monjas pertenece a esta categoría, pues entrega sus caudales al Río Guayllabamba, el cual se integra al sistema del Río Esmeraldas para descargar en el Océano Pacífico (Resabala & Tipán, 2025).

Cuencas Endorreicas (Sistemas Cerrados): Son áreas donde el agua no tiene salida hacia el mar. El flujo se acumula en cuerpos de agua internos como lagos o lagunas, o se consume íntegramente por evaporación e infiltración en el suelo (Ordoñez, 2011).

Cuencas Arreicas: Son regiones donde las corrientes de agua desaparecen por evaporación o infiltración total antes de formar una red de drenaje definida o llegar a un cuerpo receptor. Son comunes en zonas desérticas o de alta permeabilidad (Aparicio, 1999).

2.1.2 Otras Clasificaciones Relevantes

Además del destino del flujo, las cuencas se categorizan por criterios que influyen directamente en la modelación con herramientas como HEC-HMS:

Por su Tamaño: Se dividen en microcuencas (menores a 10 km^2), subcuencas y cuencas. El Río Monjas, con sus 174 km^2 se clasifica como una cuenca de mediana extensión, lo que invalida métodos simplificados como el Racional y exige modelos de hidrograma unitario (USACE-HEC, 2025).

Por su Orden de Corriente (Método de Strahler): Clasifica la complejidad de la red hídrica. Una cuenca de orden superior indica un sistema de drenaje más desarrollado y eficiente en el transporte de agua y sedimentos (Strahler, 1957).

La curva hipsométrica es una herramienta gráfica que permite analizar la distribución de las superficies de una cuenca en relación con su altitud. Según el Consorcio Pomca Quindío (2016), esta curva se obtiene al representar en un sistema de coordenadas cartesianas el área acumulada que se encuentra por encima de una cota determinada. Su importancia radica en que funciona como un indicador del ajuste continuo de las formas del terreno.

Estado Evolutivo o edad de la cuenca: la morfometría utiliza geometría de esta curva para determinar en qué fase del ciclo erosivo se encuentra el sistema (Figura 1). Las cuencas se clasifican en:

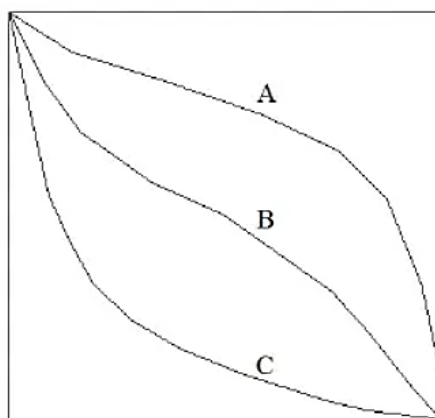
Cuenca Joven (Fase de Juventud) Curva A: Presenta una curva convexa. Esta forma revela que el relieve es accidentado y que la erosión apenas comienza a desgastar las partes altas. Son sistemas con un gran potencial de transporte de sedimentos y pendientes pronunciadas (Strahler, 1952; Aparicio, 1999).

Cuenca Madura (Fase de Equilibrio) Curva B: Se identifica por una en forma de "S". Indica que la cuenca ha alcanzado un balance donde la erosión ha suavizado las cimas y el río ha estabilizado su cauce, distribuyendo la masa de forma más uniforme.

Cuenca Vieja (Fase de Vejez) Curva C: Muestra una curva cóncava. En este estadio, la mayor parte de la masa del relieve ha sido nivelada, predominando las zonas de llanura donde la energía del agua es mínima y los procesos de sedimentación son los protagonistas (Consortio Pomca Quindío, 2016).

Figura 1

Curvas Hipsométricas Ciclo Erosivo



Nota. Tomado de Hidrología Básica. Capítulo 6. Características de las curvas hipsométricas en ciclo erosivo. (Strahler, 1952; Aparicio, 1999).

2.2 Hidrología Urbana y Respuesta Hidrológica

2.2.1 Componentes del Hidrograma: Escorrentía Directa y Caudal Base

El caudal que vemos en un río será el resultado de combinar dos fuentes: la escorrentía inmediata causada por la lluvia reciente y el caudal base, que es el agua que el suelo y los acuíferos van soltando poco a poco de forma constante. El caudal base tiende a dominar en periodos sin lluvia, mientras que la escorrentía directa controla la magnitud del caudal pico durante tormentas (Chow et al., 1994). En entornos urbanos, el caudal base puede incrementarse o alterarse por recargas artificiales y pérdidas en redes de agua potable o alcantarillado, además de infiltraciones/exfiltraciones asociadas a infraestructura subterránea.

Para la comprensión del río Monjas es importante el desglose de los componentes de la escorrentía. Según Espín y Ortega (2023), el flujo que se observa en el cauce es la suma de tres procesos físicos distintos los cuales son:

Escorrentía Superficial: es el agua que cuando se supera la capacidad de infiltración del suelo, fluirá sobre la superficie. En cuencas urbanas, es componente es predominante debido a la impermeabilización.

Escorrentía Hipodérmica: es el flujo que se mueve horizontalmente a través de los estratos superiores al suelo.

Escorrentía subterránea: es el flujo base que alimenta el cauce de forma permanente a través del nivel freático.

2.2.2 *Tiempo de Concentración y Tiempo de Retardo*

El tiempo de concentración T_c es uno de los parámetros más críticos en la hidrología de superficie, ya que define el tiempo que tarda una gota de agua en viajar desde el punto hidráulicamente más alejado de la cuenca hasta su sección de salida. En el contexto de la modelación de lluvia-escorrimento, el T_c es indispensable para estimar la respuesta del hidrograma, específicamente para determinar el tiempo de retardo T_{lag} (Espín y Ortega, 2023). Según los estándares internacionales y la metodología del Servicio de Conservación de Suelos SCS (1986), esta relación se puede aproximar a la siguiente expresión. (Ecuación 1).

$$T_{lag} = 0.6 * T_c \quad (1)$$

Lo que permite caracterizar la velocidad con la que la cuenca transforma la precipitación en un pico de caudal (Espín y Ortega, 2023; USDA Soil Conservation Service, 1986).

La determinación del T_c es una función directa de las características físicas del territorio, tales como la longitud hidráulica y la pendiente media del cauce principal. Para su cálculo se empleó la (Ecuación 2), cuya aplicación es ampliamente reconocida en cuencas de tamaño pequeño y moderado debido a su enfoque en la respuesta rápida del terreno. (Kirprich, 1940).

$$T_c = 0.000323 * \left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right) \quad (2)$$

Donde:

L: Longitud del Cauce más largo del río

S: Pendiente media del cauce

Tc: Tiempo de concentración expresado en horas

2.2.3 Hidrograma Unitario del SCS y Enfoque por Evento

El hidrograma unitario representa el flujo de salida provocado por un evento de lluvia distribuida uniformemente. Es una herramienta de suma importancia, ya que nos ayuda a predecir el comportamiento del caudal asumiendo que la precipitación afecta a toda la superficie de la cuenca con la misma intensidad durante un periodo fijo. El SCS desarrolló un hidrograma unitario adimensional que facilita la construcción de hidrogramas sintéticos a partir de parámetros geomorfológicos y de tiempos característicos (USDA SCS, 1986). En estudios de respuesta hidrológica por evento, este enfoque se combina con un método de pérdidas (infiltración/abstracciones) para estimar el exceso de lluvia y luego transformarlo en caudal (USDA SCS, 1986).

2.2.4 Método SCS Curve Number para Pérdidas

El método del Número de Curva (Curve Number, CN) del SCS estima el escurrimiento directo a partir de la precipitación total del evento, considerando la capacidad de retención potencial del suelo-cobertura y un término de abstracción inicial (I_a), el cual representa la cantidad de lluvia que debe caer antes de que comience a producirse la escorrentía superficial. En la metodología del SCS, se asume convencionalmente que $I_a=0.2S$, donde S es la retención potencial máxima del suelo (USDA SCS, 1986).

La relación estándar que asocia la retención potencial S al CN define el escurrimiento directo Q como una función no lineal de la precipitación “P” y fluye más allá de la constante inicial I_a . Aunque es un método simplificado, su uso se extiende al interior de cuencas pequeñas y medianas y constituye un referente operador para HEC-HMS modelación por evento en los casos donde no se cuentan con series largas de datos para realizar calibraciones complejas.

2.3 Información Hidrometeorológica y su Representación Espacial

Se requieren series temporales de precipitación representativas del área de estudio para estimar la respuesta hidrológica. Si se necesita una calibración o contraste de un proceso, se requieren mediciones de caudal. En cuencas con pocos puntos de control el uso de productos satelitales o combinados satélite-estación es recomendable (Funk, 2015).

2.3.1 *Precipitación Satelital CHIRPS*

El producto CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations) fue desarrollado para el monitoreo de sequías, eventos extremos y análisis climático. CHIRPS integra estimaciones infrarrojas con observaciones de estaciones y procedimientos de calibración, generando precipitación con resolución espacial de 0.05° (≈ 5 km) y disponibilidad diaria (Funk et al., 2015). En esta investigación, CHIRPS se empleó como fuente principal para construir la serie histórica de precipitación y caracterizar la variabilidad hidrometeorológica de largo plazo en la cuenca del río Monjas.

No obstante, su aplicación en cuencas andinas requiere considerar limitaciones asociadas a la topografía. Evaluaciones globales reportan que CHIRPS reproduce adecuadamente patrones generales y promedios agregados, pero puede presentar sesgos en terrenos de relieve complejo, con tendencia a subestimar extremos diarios debido a la naturaleza del sensor infrarrojo y a la representación espacial del producto (Beck et al., 2017). Debido a lo anterior, su uso se complementa con criterios de verificación y control con información disponible a mayor resolución temporal cuando corresponde al análisis de eventos de crecida.

2.3.2 *Google Earth Engine y Climate Engine para Extracción de Series*

La extracción y procesamiento de series hidrometeorológicas se realizó con apoyo de Google Earth Engine (GEE), una plataforma de computación en la nube orientada a datos de Ciencias de la Tierra. GEE integra catálogos climáticos y productos de teledetección, permitiendo ejecutar análisis reproducibles mediante guiones (scripts) y obtener resultados sin depender de la capacidad de cómputo local. En este estudio, GEE se empleó para generar resúmenes espaciales y series temporales a partir de polígonos de interés (cuenca y subcuencas), facilitando la depuración, consulta y descarga de información en formatos utilizables en las etapas posteriores del análisis.

De manera complementaria, se utilizó Climate Engine como interfaz para explorar y visualizar productos climáticos disponibles en GEE, así como para obtener series temporales y estadísticas agregadas de forma rápida. Esta combinación permitió optimizar el flujo de trabajo: GEE brindó el entorno de procesamiento y automatización, mientras que Climate Engine aportó una vía práctica de verificación, inspección gráfica y extracción de resultados, reduciendo las limitaciones asociadas al manejo local de grandes volúmenes de datos (Diack, 2024).

2.3.3 *Open Buildings*

Para caracterizar el componente antrópico del área de estudio se utilizó Open Buildings, un conjunto de datos de huellas de edificaciones que permite identificar y cuantificar estructuras construidas a partir de productos de observación de la Tierra. En el marco de esta investigación, Open Buildings se empleó como insumo para elaborar un inventario espacial de edificaciones dentro de la cuenca, mediante el recorte por el polígono de estudio y la contabilización de estructuras dentro de los límites definidos.

2.3.3.1 *Urbanización, Impermeabilización y Generación de Escorrentía*

El crecimiento de la urbanización tiende a aumentar el porcentaje de superficies que son impermeables, disminuye la infiltración efectiva y acorta los tiempos de respuesta. Como consecuencia, se han experimentado picos de escorrentía más altos y volúmenes para eventos comparables (Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda, 2021). Otro efecto de la urbanización es el cambio de conectividad hidrológica. Los sistemas de drenaje y las canalizaciones pueden acelerar la concentración de flujos.

2.3.3.2 *Uso de Huellas de Edificaciones Para Aproximar Presión Urbana*

Los inventarios de edificaciones y huellas construidas son una fuente útil y valiosa para la cuantificación del impacto potencial de la urbanización e impermeabilización. Por tanto, el Open Buildings ya ha sido utilizado como insumo para análisis urbanos y de exposición. Se espera que la posibilidad de crear huellas de edificios a gran escala gracias a la detección automatizada en imágenes satelitales de altísima resolución continúe desarrollada asegurando la disponibilidad a la comunidad. Mediante estos datos podemos aproximar la densidad constructiva, así como apoyar estimaciones de áreas impermeables.

2.3.4 Hydrognomon

Hydrognomon es un software independiente diseñado para el procesamiento y análisis estadístico de series temporales en hidrología (Pérez Pedreros, 2023). Esta herramienta es muy importante para poder realizar controles de consistencia y calidad en los datos, lo que permite identificar valores erróneos y corregir algunos vacíos que puedan existir en las series históricas (Kozanis y Markonis 2009). También permite realizar análisis de precipitaciones extremas.

2.3.4.1 Tratamiento Estadístico y Procesamiento de Series de Tiempo

Para modelar la variabilidad hídrica de la cuenca, se seleccionaron las distribuciones más importantes utilizadas en la hidrología moderna (Chow et al., 1994):

Distribución Normal: Es el modelo base de la estadística, se utiliza principalmente para variables que se agrupan simétricamente alrededor de un promedio, aunque en hidrología su uso es limitado debido a que los caudales suelen presentar una asimetría (Villón, 2002).

Distribución Log-Normal: Al aplicar logaritmos a los datos originales, esta distribución corrige la asimetría positiva que existe en los causales, de esta manera se evitan valores negativos y se ajusta mejor a fenómenos naturales (Aparicio, 1999).

Distribución Gumbel Máxima: Fue diseñada específicamente para los valores extremos. Es la distribución estándar para calcular caudales de crecidas, ya que se enfoca en los valores máximos anuales registrados en la serie histórica (Gumbel, 1958).

Distribución Pearson Tipo III: introduce un coeficiente de asimetría que permite una mayor flexibilidad en el ajuste de la curva. Es muy utilizada para modelar caudales máximos en cuencas de montaña (Chow, Maidment y Mays, 1994).

Distribución Log-Pearson Tipo III: es una variante de la distribución mencionada anteriormente, donde se trabaja con los logaritmos de los datos, en la actualidad es el modelo recomendado por organismos internacionales para el análisis de inundaciones debido a su alta capacidad de ajuste (Kozanis y Markonis 2009).

2.3.4.2 Pruebas de Bondad de Ajuste Mediante Hydrognomon

Una vez aplicadas las distribuciones, el software ejecutó dos pruebas estadísticas, para validar, presenta un menor error respecto a los datos reales observados en el río Monjas.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov: Esta prueba evalúa la distancia máxima vertical, entre la probabilidad acumulada de los datos del río y la curva teórica elegida. Esta metodología por su alta sensibilidad en muestras pequeñas no requiere agrupar los datos en rangos, manteniendo la integridad de cada valor registrado (Villón, 2002). Si la distancia máxima vertical es inferior al valor crítico establecido, el modelo se considera estadísticamente válido.

Prueba de Chi-Cuadrado: a diferencia de la anterior esta prueba compara las frecuencias observadas y las esperadas dividiendo los datos en diversos intervalos. Es una herramienta complementaria la cual permite verificar si la estructura general de la muestra sigue la distribución teórica. Según Aparicio (1999), la prueba chi cuadrado es ideal para confirmar la validez global de ajuste en serie de datos extensos.

2.3.4.3 Intervalos Mediante la Regla de Sturges

La regla de Sturges sirve para poder definir en cuántos grupos se debe dividir la muestra, a este parámetro se lo denomina número de intervalos de clase este es la cantidad de grupos en los que está dividida la información de las descargas de datos de la lluvia o caudales para poder construir un histograma de frecuencias. Este número permite pasar de datos individuales a una distribución de probabilidad y se la determina mediante la (Ecuación 3) (Koutsoyiannis, 2021):

$$k = 1 + 3.322 \log_{10}(N) \quad (3)$$

Donde:

k: número de intervalos de clase recomendados

N: número total de observaciones en la serie de tiempo (precipitaciones diarias o en intervalos de 15 minutos)

Esta regla asegura que el histograma resultante tenga el número de clases adecuado para que Hydrognomon identifique correctamente la forma del patrón de la tormenta para la zona de estudio.

2.4 Aforos y Cálculo de Caudales en Cauces Naturales

Los aforos constituyen el vínculo directo entre la respuesta hidrológica modelada y la realidad observada. En cauces naturales, el método de área-velocidad es uno de los procedimientos más difundidos: consiste en dividir la sección transversal del río en varios subsegmentos, estimar el área mojada de cada uno y multiplicarla por una velocidad media representativa, para finalmente sumar los aportes parciales.

2.4.1 Método área-velocidad con Subdivisión de la Sección

En el método de área-velocidad, la sección transversal se discretiza en N verticales o franjas; para cada franja “ i ” se estima el área mojada “ A_i ” (a partir de la profundidad y el ancho representativo) y la velocidad media “ V_i ”. En la práctica, la discretización busca capturar cambios relevantes de geometría y velocidad; un mayor número de verticales tiende a reducir la incertidumbre, aunque incrementa el esfuerzo de campo.

2.4.2 Estimación de Velocidad Mediante Flotadores

La estimación de la velocidad superficial se puede realizar con flotadores, por ejemplo, una botella midiendo el tiempo de un tramo de longitud conocida. Cuando no hay molinetes o sensores acústicos. Por lo regular, la velocidad superficial es mayor que la velocidad media de un canal o cauce en una vertical. Por esta razón, se tiene que aplicar cierto coeficiente de reducción y con lo cual se obtiene la aproximación de la velocidad media. Los manuales técnicos sugieren que se use un factor de corrección que pasa de velocidad superficial a media, en general entre 0.8 y 0.9 según tipo de rugosidad y distribución de velocidades. En la lectura de resultados, el instrumento de medición con calibrador ofrece mejor precisión que el sistema de flotadores. Por lo tanto, es aconsejable registrar según lo que hiciera la persona y cómo lo hiciera (OMM, 2010).

2.4.3 Caudal Base en Cuencas Urbanas y Representación en HEC-HMS

La correcta representación del caudal base es relevante en el caso de reproducir los hidrogramas de ríos urbanos con aportes persistentes. En contextos urbanos, el caudal base puede verse afectado por una descarga natural subterránea e, inclusive, por aportes antrópicos permanentes. Como resultado el volumen del caudal base puede ser muy alto en un entorno urbano en comparación al caudal observado en cuencas no urbanizadas (Tucci, 2007).

2.4.3.1 Dotación y Consumo de Agua Potable

El diseño y análisis de un sistema hídrico con influencia urbana, como el caso de la cuenca del río Monjas, requiere comprender la relación entre el agua suministrada a la población y el volumen que finalmente retorna al sistema de drenaje. En este marco, la dotación se define como la cantidad de agua asignada por habitante para cubrir sus necesidades diarias y constituye un parámetro de planificación y diseño. De acuerdo con la normativa nacional, este valor depende de condiciones climáticas y del tamaño de la población, e incorpora además consumos asociados a servicios comunales indispensables como: instituciones educativas, centros de salud y actividades comerciales (INEN, 2014).

Por su parte, el consumo representa el volumen efectivamente utilizado por los habitantes, por lo que se comporta como una variable dinámica. Aunque dotación y consumo no son idénticos, su evaluación conjunta permite estimar de forma consistente los aportes residuales que, mediante el sistema de alcantarillado, descargan al cauce y pueden sostener un caudal base antrópico (INEN, 2014). En consecuencia, el análisis de dotación y consumo se utiliza en esta investigación como soporte para cuantificar el caudal medio diario asociado a aguas servidas e incorporar su efecto en la modelación hidrológica.

2.4.3.2 Caudal Medio Diario

Este es de suma importancia para poder dimensionar la carga hidráulica que recibe el río. Este valor se obtiene de la relación entre el consumo y la población proyectada, distribuida en el tiempo. (Ecuación 4). (INEN,2014).

$$Q_{\text{mediodiario}} = \frac{P[\text{hab}] * C\left[\frac{L}{\text{hab}} * \text{dia}\right]}{86400[\text{s}]} \quad (4)$$

Donde:

P: Población

C: Consumo

Este caudal representa el flujo constante de aguas servidas que, en ausencia de sistemas de tratamiento, representa el componente principal del flujo base de un río durante las épocas de estiaje o períodos sin precipitación.

2.4.3.3 Población Servida a Partir de Estructuras

La determinación exacta de la población que existe en una subcuenca es el parámetro con mayor incertidumbre en el modelado hidrológico urbano. En áreas de expansión, la metodología de población servida a partir de estructuras se presenta como una alternativa válida para estimar los aportes de aguas residuales.

Para transformar el número de casas en número de habitantes, es fundamental el uso de datos oficiales de densidad poblacional. En este estudio, los parámetros de densidad poblacional es decir el promedio de personas por vivienda se fundamentan en los resultados oficiales del Censo De Población y Vivienda (INEC, 2022). Este documento proporciona la base estadística más reciente y verificada para el Ecuador, permitiendo correlacionar el inventario de estructuras observado con el número real de usuarios que generan las descargas que alimentan al río Monjas. Open Buildings arroja como resultado a toda estructura que se encuentra en el área de estudio, aunque esta no sea una vivienda, debido a esto se necesita una estimación de hogares ocupados (Ecuación 5).

$$H = N_{edif} * f_{res} * f_{occ} \quad (5)$$

Donde:

N_{edif} : edificaciones detectadas

f_{res} : fracción que realmente es vivienda

f_{occ} : fracción ocupada/habitada

Para la obtención de la población servida se usa la Ecuación 6.

$$P_s = H * \text{promedio habitantes por hogar} \quad (6)$$

Donde:

H: hogares ocupados.

2.5 Delimitación de Cuencas y Análisis Morfométrico Mediante SIG

El análisis espacial constituye un componente esencial para describir la cuenca y alimentar la modelación hidrológica. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten

derivar, a partir de Modelos Digitales de Elevación (MDE), variables como dirección de flujo, acumulación, red de drenaje y divisorias de aguas. Herramientas de código abierto como QGIS y GRASS GIS son ampliamente utilizadas en hidrología aplicada por su capacidad de procesamiento ráster y vectorial.

2.5.1 Modelo Digital de Elevación y Preprocesamiento Hidrológico

Los DEM derivados de la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) han sido utilizados extensamente en estudios hidrológicos regionales y de cuenca debido a su cobertura y accesibilidad. El producto SRTM ha sido descrito como un avance relevante en la cartografía altimétrica global y en aplicaciones geomorfológicas e hidrológicas. Para la delimitación hidrológica, es usual aplicar rutinas de corrección de depresiones (fill sinks) y cálculo de dirección de flujo previo a la extracción de redes, con el fin de evitar discontinuidades artificiales en el drenaje.

2.5.2 Extracción de red de Drenaje

Desde el DEM es posible realizar la extracción de redes de drenaje automáticamente. Este proceso se realiza usando algoritmos de flujo de dirección y acumulación como el enfoque D8 el cual es un modelo de dirección de flujo unidireccional que formaliza la trayectoria del escurrimiento (O'Callaghan & Mark, 1984; Jenson & Domingue, 1988). Este método opera asignando a cada píxel del MDE una dirección de flujo hacia uno de sus ocho vecinos adyacentes, seleccionando así el que represente la pendiente descendente más pronunciada; este enfoque permite estructurar la forma lógica de acumulación de flujo, es decir contabilizar cuantas celdas drenan hacia una sola permitiendo así identificar los cauces naturales y las redes de drenaje de la cuenca del río (Espín y Ortega, 2023).

2.5.3 Método de Strahler

El sistema de jerarquización de la red hídrica propuesto por Strahler es uno de los métodos más empleados en la hidrología para determinar la estructura y complejidad de una cuenca. Esta metodología se basa en asignar un orden numérico a cada segmento del río, lo que permite cuantificar el nivel de ramificación de la red de drenaje (Esri, 2024). De acuerdo con Ordoñez Gálvez (2011), el análisis de la red de drenaje es vital para comprender el

comportamiento del sistema hídrico, ya que el orden de corriente refleja la capacidad de respuesta de la cuenca ante la escorrentía superficial.

Mecanismo de funcionamiento:

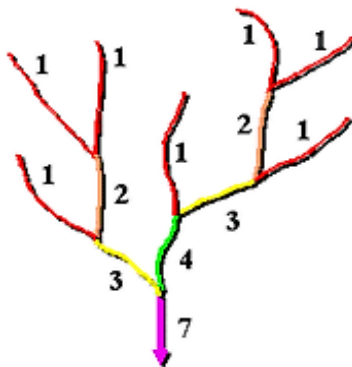
El procedimiento operativo del método sigue una lógica jerárquica acumulativa fundamentada en las siguientes reglas de confluencia:

Segmentos iniciales: Los canales más pequeños, que no poseen tributarios y nacen en las partes altas de la cuenca, se clasifican invariablemente como corrientes de primer orden (Esri, 2024).

Criterio de incremento: El orden de un cauce solo aumenta cuando convergen dos segmentos que poseen el mismo nivel jerárquico. De esta manera, la unión de dos cauces de orden 1 da origen a un tramo de orden 2, mientras que la unión de dos tramos de orden 2 genera uno de orden 3 (Ordoñez Gálvez, 2011).

Confluencias de órdenes distintos: Si se produce la intersección de dos cauces con órdenes diferentes, el segmento resultante aguas abajo conserva el número del cauce de mayor jerarquía; por ejemplo, si un cauce de orden 1 desemboca en uno de orden 2, el tramo resultante seguirá siendo de orden 2 (Esri, 2024).

Finalmente, el grado de complejidad total de la cuenca queda definido por el número de orden alcanzado en el cauce principal (Figura 2) en su punto de salida (Ordoñez Gálvez, 2011). Este valor es un indicador clave para estudios posteriores sobre la densidad de drenaje y la estimación de caudales en proyectos de gestión de recursos hídricos.

Figura 2*Red de drenaje según Strahler*

Nota. Tomado de *How Stream Order works* por Environmental Systems Research Institute (ESRI), 2024. (<https://goo.su/tMrYsf>)

2.5.4 Parámetros Morfométricos Relevantes Para la Respuesta Hidrológica

Los parámetros morfométricos de la cuenca son herramientas que describen cuantitativamente la forma de la cuenca y la forma del drenaje de ésta, y se relacionan con el proceso de producción y concentración de escorrentía. Algunos de los parámetros más frecuentemente usados son: área de cuenca, perímetro de cuenca, longitud del cauce principal, pendiente media, densidad de drenaje, factor de forma, coeficiente de compacidad y razón de bifurcación. En resumen, con el uso de estos parámetros se busca obtener: tendencia de respuesta rápida o retardada y ayuda en estimación.

2.5.5 Herramientas SIG empleadas, QGIS, GRASS GIS y ArcGeek Calculator

En el desarrollo de la presente investigación, el software QGIS desempeñó un papel fundamental al actuar como el entorno matriz donde se integraron y gestionaron las diversas capas de información. El mismo que permitió un manejo riguroso de los sistemas de referencia y facilitó el procesamiento de datos tanto ráster como vectoriales, asegurando que toda la información geográfica estuviera perfectamente alineada. Dentro de este ecosistema, se aprovechó la potencia de GRASS GIS, el cual cuenta con algoritmos altamente confiables para el análisis del terreno y la hidrología. Específicamente, sus herramientas fueron usadas para derivar la dirección y la acumulación de flujo, pasos que son esenciales para entender cómo se mueve el agua dentro de la cuenca (Espín y Ortega, 2023).

Por otro lado, con el propósito de optimizar y dar mayor fluidez a la fase de obtención de parámetros, la implementación del complemento ArcGeek Calculator permite automatizar el cálculo de propiedades geométricas y morfométricas, clave a partir de la delimitación de la cuenca y su red de drenaje, incluyendo la jerarquización de los ríos mediante el orden de Strahler cuando la información lo permite. En este trabajo de integración curricular la integración de todas estas tecnologías no solo ayudó a estandarizar los procesos, sino que aceleró significativamente la captura de datos críticos. Esto garantiza que la base de datos sea confiable y, sobre todo, que pueda ser reproducida en futuros estudios sobre el río Monjas, manteniendo siempre una relación técnica estrecha con la realidad del territorio (Resabala y Tipán, 2025).

2.6 Dinámica del Escurrimiento y Estado de la Cuenca durante el Monitoreo

El hidrograma de una avenida en la cuenca del Río Monjas representa la respuesta integral de la unidad hidrológica ante un evento de precipitación. Esta respuesta no es instantánea ni uniforme; se divide en fases cinemáticas que dependen de la interacción entre la intensidad de la lluvia y las propiedades físicas del terreno (Aparicio, 1999).

2.6.1 Fase de Ascenso y Pico de la Avenida

Esta etapa inicial, conocida como curva de concentración, refleja la rapidez con la que el agua de lluvia neta llega al punto de control. En zonas con alta impermeabilización esta fase es extremadamente corta. El tiempo de retardo se reduce por la baja rugosidad de las superficies urbanas, lo que provoca que el Caudal Pico se alcance de manera explosiva. Como señala el manual de HEC-HMS (2021), la magnitud de este pico está directamente vinculada al Número de Curva (CN) asignado.

2.6.2 Fase de Recesión y Almacenamiento Superficial

La curva de recesión inicia inmediatamente después del pico y representa la evacuación del agua que aún se encuentra transitando por los cauces y laderas tras el cese de la lluvia. En cuencas con pendientes pronunciadas indica un drenaje rápido del escurrimiento superficial (Resabala & Tipán, 2025). Sin embargo, a medida que el tiempo transcurre, la tasa de descenso disminuye. Según Aparicio (1999), la forma de esta curva es una "firma" de la cuenca, pues revela la capacidad de almacenamiento del sistema. En la modelación realizada, la calibración de

esta fase es vital para que el software HEC-HMS replique fielmente la transición entre el flujo rápido y el flujo retardado, evitando subestimar el volumen total del evento.

2.6.3 Fase de Agotamiento y Flujo Base Permanente

La fase de agotamiento es el segmento final del hidrograma, donde el escurrimiento superficial ha desaparecido por completo y el caudal es mantenido exclusivamente por el aporte de aguas subterráneas o fuentes constantes. La curva de agotamiento tiende a una línea definida por este caudal residual urbano, lo que significa que el río nunca recupera un estado de flujo cero. Realizar aforos durante esta etapa permite calibrar los coeficientes de almacenamiento de los acuíferos en el modelo, asegurando que la persistencia del flujo en el tiempo sea coherente con la realidad (HEC-HMS Manual, 2021).

2.7 Modelación Hidrológica por Evento con HEC-HMS

El HEC-HMS fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica de EE.UU. Cuerpo de Ingenieros del Ejército para simular procesos de precipitación-escorrentía en cuencas ramificadas y evaluar eventos y alternativas. El software incorpora métodos de pérdidas, transformación, caudal base y ruteo para construir modelos semi distribuidos mediante la discretización en subcuencas y elementos hidráulicos.

2.7.1 Variables de Resultado

Precipitación Efectiva: representa el volumen de agua que queda disponible para el escurrimiento superficial una vez que se han descontado todas las pérdidas por abstracción e infiltración. Es la lluvia que llega directamente al punto de salida de la cuenca.

Pérdidas: se refiere al volumen de precipitación que es retenido por la cuenca a través de procesos como la infiltración en el suelo, la intercepción de la vegetación y el almacenamiento en depresiones del terreno.

Caudal Pico: es el valor máximo de descarga que alcanza el hidrograma en un punto de control específico durante un evento de lluvia.

Tiempo al pico: es el intervalo de tiempo que transcurre desde el inicio del evento de precipitación hasta el momento en que se registra el caudal máximo.

Volumen de Escorrentía Directa: es el volumen total de agua que fluye sobre la superficie del terreno hacia el cauce como respuesta inmediata a una tormenta.

2.7.2 Estructura del Modelo y Parametrización

En un enfoque semi distribuido, la cuenca hidrográfica se divide en subcuencas: un conjunto de parámetros de pérdida, por ejemplo, SCS-CN, transformación, por ejemplo, hidrograma unitario SCS y un método de flujo base, por ejemplo, constante o decadencia que se asigna a cada subcuenca en función de la disponibilidad de información. Los parámetros geométricos como: áreas, longitudes, pendientes, se obtuvieron del análisis SIG, los parámetros hidrológicos preliminares fueron estimaciones iniciales a partir de la revisión de notas técnicas y orientaciones de la literatura que luego fueron ajustadas por calibración. Las herramientas de optimización y ajuste de bondad de HEC-HMS permiten el ajuste sistemático de parámetros dada una observación de flujo.

2.7.3 Número de Curva (CN) y Fuentes de Información Suelo - Cobertura

La estimación del *CN* requiere información de cobertura/uso del suelo y, preferentemente, de los grupos de hidrología de los suelos (HSG). Cuando no hay un levantamiento local, se pueden usar productos globales de *CN* como insumo inicial siempre que se grabe la resolución y limitaciones. En el marco de las datas GCN250 (Anexo A), Jaafar (2019) propone mapas globales de *CN* a ~250 m de resolución a partir de bases de cobertura de suelo y parámetros hidrológicos para facilitar aplicaciones de modelación y diseño hidrológico.

CAPÍTULO III. ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Caracterización del Área de Estudio

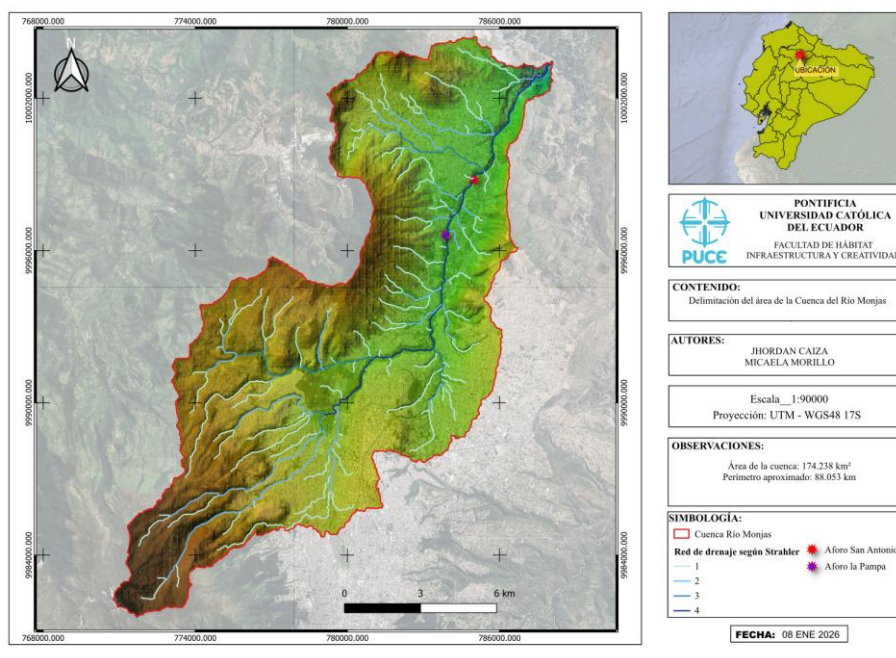
La caracterización del área de estudio constituye el punto de partida para comprender la respuesta hidrológica de la cuenca, ya que variables como el relieve, la pendiente, la forma, la red de drenaje y el grado de intervención antrópica condicionan la transformación de la lluvia en escorrentía superficial. En esta cuenca, además, la presencia de infraestructura urbana y obras de canalización modifica el funcionamiento natural del sistema de drenaje y puede intensificar las respuestas ante tormentas de corta duración. (Barragán y Murillo, 2023; Resabala y Tipán, 2025).

3.1.1. Localización y Delimitación Geográfica de la Cuenca del Río Monjas

La cuenca del río Monjas se localiza en el noroccidente del Distrito Metropolitano de Quito y forma parte del sistema hidrográfico que drena hacia el río Guayllabamba. Su delimitación hídrica va desde las zonas altas de los volcanes Ruco Pichincha, Casitagua y Pululahua, fluyendo en sentido sur-norte hasta su desembocadura en el río Guayllabamba (Rivera, 2016).

La delimitación espacial de la cuenca (Figura 3) se realizó con base en análisis SIG (detallado en el Capítulo IV) y define un área total de 174.238 km², con un perímetro aproximado de 88.053 km. Desde el punto de vista fisiográfico, la cuenca presenta un relieve marcado: la altitud varía entre 1691 m.s.n.m. y 4650 m.s.n.m., con una elevación media de 2880.513 m.s.n.m. La pendiente media de la cuenca es 25.968%, lo cual es consistente con un entorno de topografía pronunciada, donde las trayectorias de escorrentía tienden a concentrarse con rapidez durante eventos intensos.

El curso principal del río Monjas nace de la unión de varias quebradas que descienden de la zona alta del occidente de Quito. Su trayectoria longitudinal es sinuosa y se ve influenciada por la fuerte pendiente del terreno, causando que velocidad del flujo incremente y acelere los procesos de incisión del cauce (Espín y Ortega, 2023). Como referencia del desarrollo longitudinal del drenaje principal, el cauce principal presenta una longitud aproximada de 20.549 km, con una pendiente (por extremos) de 4.772%.

Figura 3*Delimitación Cuenca del Río Monjas***3.1.2. Uso y Cobertura del Suelo y Grado de Impermeabilización**

La transformación de la Cuenca del Río Monjas refleja la transición de un entorno natural hacia un lugar en el que se encuentra profundamente marcado por la actividad humana. El uso del suelo en la zona alta aun cuenta con áreas de vegetación arbustiva y herbácea, los cuales han actuado durante los años como reguladores hídricos (Resabala y Tipán, 2025). Sin embargo, en las zona media y baja, como en los sectores de Pomasqui y San Antonio la situación es drásticamente diferente debido a que ya existen asentamientos urbanos, industriales y comerciales que han desplazado la cobertura vegetal original (Secretaría del Ambiente, 2021). Esta transición no solo implica la pérdida de materia orgánica, sino la modificación estructural de las propiedades de infiltración, reduciendo la capacidad del terreno para gestionar excedentes hídricos de forma natural.

El análisis detallado del Plan de Uso y Ocupación del Suelo (PUOS) revela una predominancia de zonas categorizadas como Residencial 1, Residencial 2 e Industrial (Figura 4). Esta configuración es el factor crítico detrás de la vulnerabilidad de la cuenca. El reemplazo de suelos porosos por superficies impermeables como: concreto, asfalto y cubiertas produce el denominado sellado del suelo.

Como sostienen Carretero y Kruse (2014), el sellado anula la infiltración profunda y transforma la precipitación en escurrimiento superficial de manera casi instantánea. En términos de ingeniería, esto acorta el tiempo de retardo, convirtiendo al Río Monjas en un sistema de respuesta rápida, donde la fuerza del flujo de las avenidas crece exponencialmente al no encontrar obstáculos rugosos ni zonas de absorción en su trayectoria.

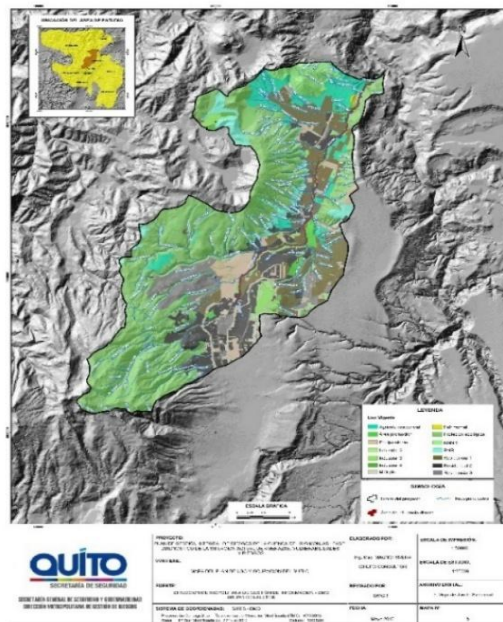
3.2.1.1 Impacto en el Número de Curva (CN)

La elección del método del Número de Curva (SCS-CN) para esta investigación se fundamenta en su capacidad para integrar la complejidad de la leyenda del mapa de uso de suelo: agrícola, residencial, equipamiento, industrial (Figura 4), en un solo indicador adimensional de potencial de escorrentía.

La asignación de un *CN* promedio de ≈ 81.38 (Tabla 1) para la cuenca total no es arbitraria; es el resultado de ponderar las áreas industriales y residenciales densas, las cuales presentan una baja capacidad de infiltración Grupo Hidrológico de Suelo tipo C o D. Como indica el USDA SCS (1986), valores de *CN* superiores a 80 son característicos de cuencas con alto grado de impermeabilización y suelos con potencial de escurrimiento muy alto.

Figura 4

Mapa del Plan de Uso y Ocupación del Suelo (PUOS) de la Cuenca del Río Monjas



Nota. Secretaría General de Seguridad y Gobernabilidad Dirección Metropolitana de Gestión de Riesgos. Mapa uso del Suelo (2022).

Tabla 1

Estadísticos del Número de Curva (CN) en la cuenca y subcuencas

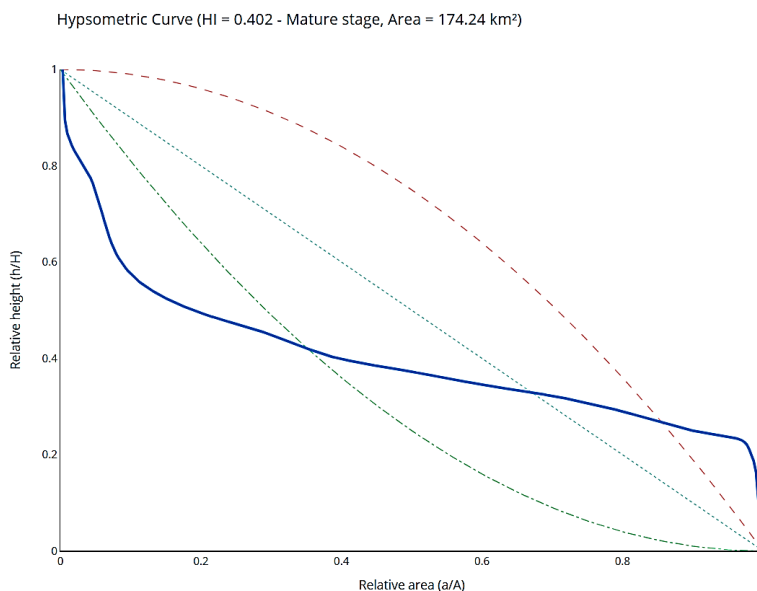
Unidad de análisis	CN medio	CN mediana	CN mínimo	CN máximo
Cuenca total (río Monjas)	81.376	81	56	92
Subcuenca hacia La Pampa	81.492	81	56	91
Subcuenca hacia San Antonio	81.456	81	56	91

3.2. Análisis de la Curva Hipsométrica y Ciclo Erosivo

La geometría cóncava de la curva hipsométrica (Figura 5) confirma que el sistema se encuentra en una fase de juventud geológica. Este estadio se traduce en un desequilibrio dinámico persistente, indica que la cuenca aún conserva un gran volumen de masa terrestre a elevadas altitudes respecto a su nivel de base. Como se menciona en el documento de Morfometría (2016), las cuencas en esta fase presentan un desequilibrio geodinámico donde las fuerzas de erosión hídrica son superiores a la resistencia del lecho.

Figura 5

Curva Hipsométrica Cuenca Río Monjas



Nota. Curva obtenida con la herramienta ArcGeek Calculator.

3.3. Red Hídrica y Sistema de Drenaje Existente

La red hidrográfica de la cuenca está conformada por el cauce principal del río Monjas y un conjunto de quebradas y canales tributarios. La configuración del drenaje, junto con la topografía, condiciona rutas de flujo superficial con capacidad de concentrarse rápidamente durante tormentas, en especial en zonas con canalización o encauzamientos rígidos.

La naturaleza exorreica de la cuenca es un factor crítico en la modelación de escorrentía, ya que implica que la unidad territorial no presenta zonas de almacenamiento o embalse natural que amorticen los volúmenes hídricos. Al ser un sistema abierto y con una marcada pendiente media del 25.97%, la precipitación neta que no es infiltrada por el suelo impermeabilizado se transforma en flujo que se desplaza aguas abajo.

En sectores intervenidos, el drenaje natural ha sido modificado por infraestructura urbana como cunetas, colectores, tramos entubados y obras de encauzamiento, lo que puede generar discontinuidades hidráulicas, puntos de estrangulamiento y acumulación de sedimentos o residuos. Estas condiciones son relevantes para interpretar variaciones locales del caudal observado, así como posibles incrementos de riesgo por desbordamientos o erosión en puntos específicos del cauce.

3.3.1. Puntos de Aforo y Subcuencas de Aporte Definidas

Con el objetivo de analizar el comportamiento hidrológico en secciones representativas del río, se definieron puntos de control asociados a campañas de aforo (Anexo B) y se delimitaron sus áreas de aporte (subcuencas) mediante SIG. En este estudio se trabajó con dos ubicaciones principales de aforo identificadas con los nombres: “La pampa” y “San Antonio”. En donde, se realizaron tres salidas de campo de aforo: la primera en “La Pampa”, la segunda en el Punto 2 “San Antonio” y una tercera nuevamente en “La Pampa”. La repetición en el mismo punto permitió comparar observaciones bajo condiciones temporales distintas, manteniendo constante la sección de control (Tabla 2).

Tabla 2

Coordenadas UTM y fechas de campañas de aforo.

Salida	Punto de aforo	Fecha	Este (m)	Norte (m)	Sistema de coordenadas
1	La Pampa	19-ago-2025	783869.060	9996619.188	WGS 84 / UTM 17S (EPSG:32717)
2	San Antonio	25-sep-2025	784991.143	9998793.249	WGS 84 / UTM 17S (EPSG:32717)
3	La Pampa (repetición)	24-oct-2025	783869.060	9996619.188	WGS 84 / UTM 17S (EPSG:32717)

Para vincular cada control con su contribución territorial, se delimitaron subcuencas de aporte a cada punto: La Pampa (Figura 6) y San Antonio (Figura 7). Estas subcuencas constituyen el marco espacial para el análisis hidrológico posterior, ya que permiten asociar los resultados de precipitación, parámetros físicos y observaciones de caudal con áreas de aporte definidas.

Figura 6

Área Primer Punto Aforado La Pampa

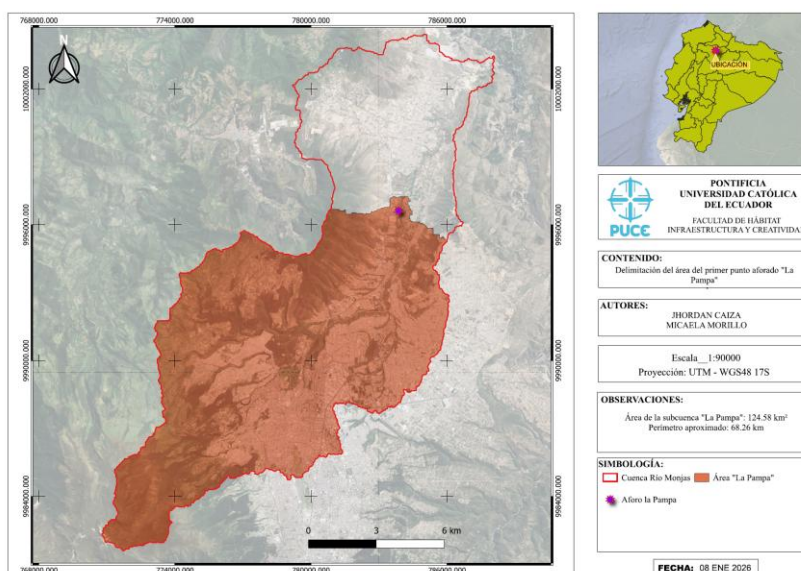
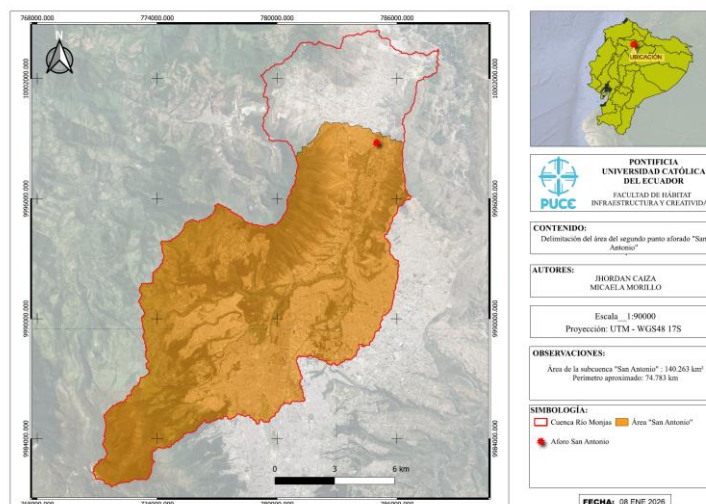


Figura 7*Área Segundo Punto Aforado San Antonio*

3.4. Recopilación de Información Base Disponible

3.4.1. Datos Cartográficos y Topográficos

Para caracterizar el área de estudio y obtener parámetros físicos se utilizaron insumos cartográficos y topográficos integrados en un entorno SIG. El insumo principal para representar el relieve fue un Modelo Digital de Elevación SRTM (NASA) de resolución aproximada 30 m, a partir del cual se derivaron productos como pendientes, direcciones de flujo, acumulación y limitaciones de cuenca/subcuencas.

Con el fin de garantizar consistencia en mediciones de área, longitud y distancia, la información espacial se trabajó en un sistema de coordenadas proyectadas UTM WGS84 zona 17S. Este criterio permite obtener resultados en unidades métricas y reduce errores asociados al cálculo en coordenadas geográficas.

3.4.2. Datos Hidrometeorológicos: Series Históricas de Precipitación y Caudal.

La caracterización hidrometeorológica se apoyó en series históricas de precipitación y registros de caudal disponibles para el río Monjas. Para precipitación se consideró una serie diaria de CHIRPS comprendida entre 1981-01-01 y 2025-10-31, que aporta continuidad temporal para análisis de máximos y comportamientos históricos. Adicionalmente, se dispuso de información pluviométrica de mayor resolución temporal proveniente de una estación

meteorológica privada, útil para representar intensidades de tormenta en periodos recientes (el periodo exacto de uso y su tratamiento se especifica en el Capítulo IV).

Por otro lado, para el caudal, se consideraron registros de estaciones de la red disponible para el río Monjas (EPMAPS), así como mediciones de campo (aforos) ejecutadas en puntos de control definidos. Esta combinación de fuentes permite contrastar condiciones observadas del sistema y disponer de referencia para la interpretación hidrológica posterior.

CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe, de forma ordenada y verificable, la metodología aplicada para evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca del río Monjas.

4.1. Enfoque Metodológico General

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, ya que se fundamenta en el análisis de variables numéricas como lo son: precipitación, parámetros morfométricos, número de curva (*CN*) y caudales observados para describir y explicar el comportamiento hidrológico de la cuenca. El trabajo integró procedimientos no necesariamente lineales, combinando: análisis geoespacial (*SIG*), utilización de series históricas, consulta de información institucional, verificación empírica mediante campañas de aforo y resultados de simulación hidrológica.

En términos operativos, el flujo metodológico se organizó en cuatro bloques:

- (i) Gestión y depuración de información espacial e hidrometeorológica (DEM, CHIRPS, estación local, EPMAPS).
- (ii) Procesamiento SIG: acondicionamiento del DEM, generación de red de drenaje, delimitación de cuenca y subcuencas por puntos de control.
- (iii) Cálculo de variables físicas: parámetros morfométricos y estimación del *CN* mediante análisis ráster y estadística zonal.
- (iv) Procesamiento de precipitación: estructuración de series diarias, obtención de máximos anuales y preparación para análisis estadístico.
- (v) Modelación hidrológica en HEC-HMS: extracción sistemática de resultados de la construcción y ejecución de modelos lluvia – escorrentía.

4.2. Herramientas, Software y Sistema de Referencia

QGIS: plataforma principal para análisis SIG y procesamiento hidrológico.

GRASS GIS (integrado en QGIS): utilizado para algoritmos hidrológicos (relleno de sumideros, dirección/acumulación de flujo, red de drenaje y delimitación).

ArcGeek Calculator (QGIS): empleado para obtención rápida y consistente de parámetros morfométricos y variables geométricas.

Microsoft Excel: depuración de bases de datos, organización de series, cálculo auxiliar y verificación.

Python: empleado para obtener gráficos de alta resolución de la depuración de bases de datos, organización de series en Microsoft Excel.

Google Earth Engine (GEE): administración de activos (polígonos de cuenca/subcuencas) y apoyo a la extracción.

Climate Engine: descarga y validación exploratoria de series temporales CHIRPS.

Hydrognomon v4: análisis estadístico de máximos con fines comparativos.

HEC – HMS: Software empleado para la modelación hidrológica para simular y entender el ciclo del agua en una cuenca.

Todos los cálculos espaciales se desarrollaron en WGS 84 / UTM zona 17S (EPSG:32717) para garantizar resultados métricos coherentes.

4.3. Construcción y Consolidación de la Base de Datos

4.3.1. Información topográfica: Modelo Digital de Elevación (DEM)

Se empleó un DEM SRTM con resolución aproximada de 30 m como insumo base para representar el relieve, obtener pendientes y derivar variables hidrológicas. Este insumo permitió la delimitación de la cuenca y subcuencas utilizadas en el análisis.

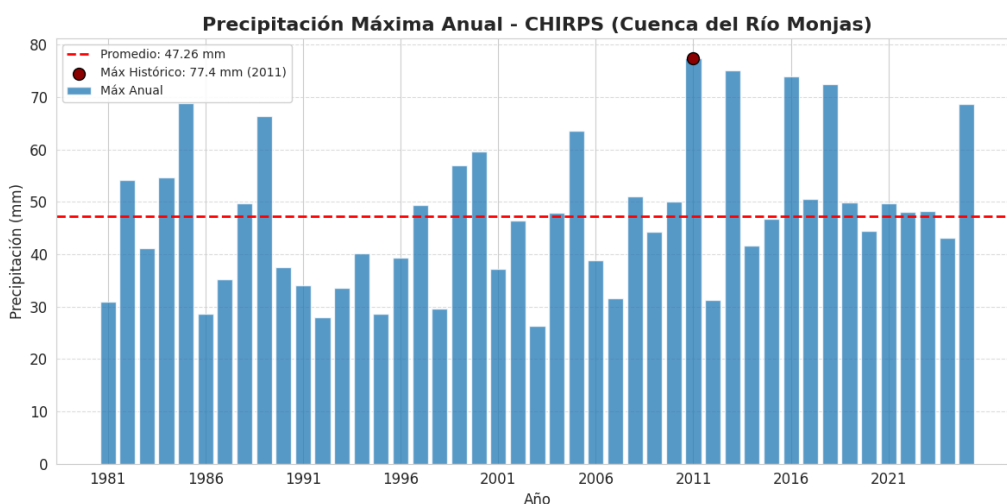
4.3.2. Información Hidrometeorológica y de Referencia Institucional

La base hidrometeorológica del estudio se consolidó a partir de dos fuentes principales de precipitación y un soporte institucional de referencia, con el fin de contar con una serie extensa para análisis de extremos y un registro de alta resolución temporal para representar la forma de las tormentas.

En primer lugar, se utilizó la serie CHIRPS diaria, correspondiente al periodo 1981-01-01 a 2025-10-31, descargada específicamente para tres unidades de análisis: cuenca total del río Monjas, subcuenca La Pampa y subcuenca San Antonio (definidas para este estudio). Esta fuente permitió estructurar una base continua y homogénea para el procesamiento de máximos y el posterior análisis estadístico. (Figura 8).

Figura 8

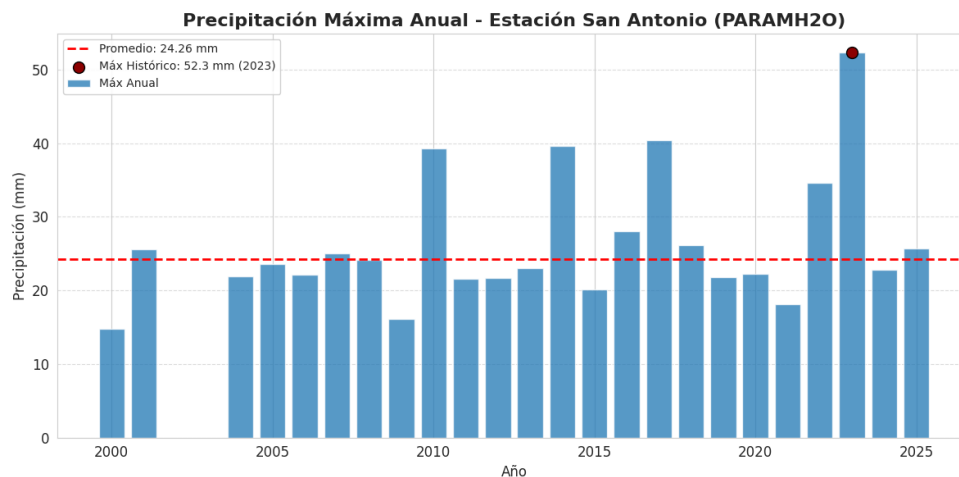
Precipitación máxima anual CHIRPS



Nota. Datos CHIRPS v2.0 (Funk et al., 2015), consultados mediante el catálogo de Google Earth Engine.

Como insumo complementario, se revisó la información disponible en CLIMATICA – EPMAPS, obtenida desde la plataforma PARAMH2O (sistema de información climática de EPMAPS). A partir de dicha consulta, se recuperó una serie no continua para el periodo 2000-01-01 a 2025-06-30 (Figura 9), correspondiente a la estación climatológica denominada “San Antonio”, código C07, localizada en las coordenadas Latitud: -0.01842376303110497 y Longitud: -78.45541172409912.

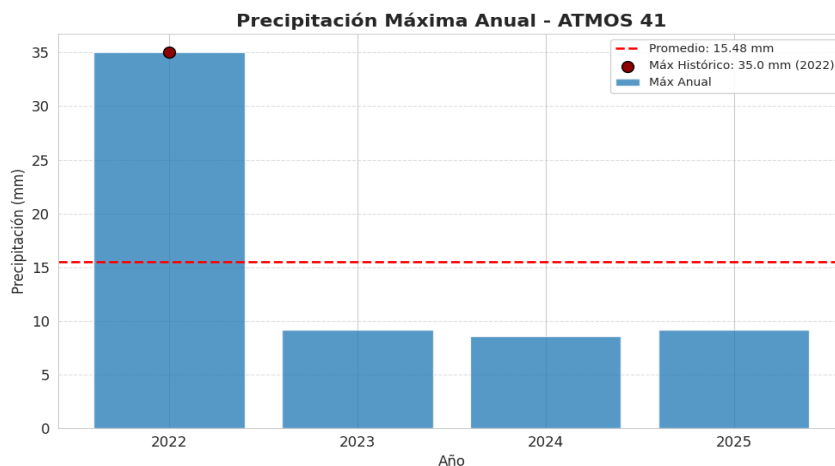
Figura 9
Precipitación máxima anual PARAMH2O



Nota. Datos hidrometeorológicos obtenidos de la plataforma CLIMÁTICA “PARAMH2O” de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS, s. f.).

Finalmente, se incorporó una fuente local de alta resolución: la estación pluviométrica (ATMOS 41), localizada en las coordenadas Latitud: -0.148567° y Longitud: -78.491887° , propiedad del Ingeniero Eddy Sánchez, tutor del presente Trabajo de Integración Curricular. Esta estación registra precipitación con intervalo de 15 minutos, con datos disponibles desde enero de 2022 hasta noviembre de 2025 (Figura 10). Su uso dentro del estudio se orientó a caracterizar la distribución temporal de las tormentas (forma del hietograma) (Sánchez, 2025)., especialmente en el análisis por eventos, complementando así la información diaria de CHIRPS.

Figura 10
Precipitación máxima anual en 24 horas ATMOS 41



Nota. Datos obtenidos de registros pluviométricos proporcionados por E. Sánchez (conjunto de datos no publicado, 2025).

4.3.2.1. Selección de Datos Históricos

La fiabilidad de los caudales simulados en HEC-HMS (USACE-HEC, 2025) depende de la representatividad espacial y la resolución temporal de la precipitación utilizada como entrada. Dado que la cuenca del río Monjas presenta una respuesta rápida, fue necesario disponer tanto de un registro continuo para el análisis histórico como de información sub diaria para representar intensidades y construir hietogramas compatibles con el paso de cálculo del modelo.

En primer lugar, se revisó la información disponible en de la plataforma PARAMH2O; sin embargo, su registro presenta discontinuidades y no contiene datos para las fechas asociadas a las campañas de aforo, por lo que no se empleó como fuente principal en la modelación. En consecuencia, se adoptó CHIRPS como serie base, debido a su continuidad y extensión temporal (1981–2025), necesaria para estructurar máximos y respaldar el análisis de extremos (Funk, 2015).

De manera complementaria, se incorporó la estación local ATMOS 41, la cual registra precipitación a 15 minutos, permitiendo representar la distribución temporal de las tormentas, factor determinante para la estimación de picos en cuencas urbanas o de montaña (Chow, 1994). No obstante, esta estación presenta vacíos puntuales y no cubre de forma completa todas las fechas requeridas para la modelación, por lo que su uso se limitó a caracterizar la forma temporal del hietograma cuando existió información disponible.

En términos operativos, CHIRPS se utilizó para definir los totales de precipitación, mientras que ATMOS 41 se empleó para distribuir la lluvia en el tiempo a 15 minutos. Este procedimiento de construcción del hietograma y ajuste del acumulado se detalla más adelante.

4.4. Información de Campo: Campañas de Aforo

Se realizaron tres campañas de aforo (Tabla 2) con el objetivo de obtener caudales observados puntuales que permitan caracterizar el orden de magnitud del flujo y disponer de un insumo de contraste para la interpretación posterior de la modelación hidrológica. La repetición del aforo en La Pampa respondió a un criterio de control y representatividad: al tratarse de un punto de referencia relevante dentro del sistema (por accesibilidad, condiciones del tramo y continuidad del flujo), se realizó un segundo levantamiento para capturar variaciones de régimen

entre fechas (condiciones antecedentes distintas) y verificar la consistencia del procedimiento de medición (geometría del perfil, discretización y estimación de velocidades).

4.4.1. *Obtención de caudales de aforo*

La estimación de caudal se realizó mediante el enfoque área-velocidad con discretización de la sección transversal (método por franjas / mid-section), integrando mediciones de profundidad y velocidad superficial.

4.4.1.1. *Levantamiento de la Sección Transversal y Profundidades*

Para cada punto i se registró la profundidad del flujo en centímetros y se convirtió a metros (Ecuación 7):

$$d_i = \frac{\text{profundidad}_i \text{ [cm]}}{100} \quad (7)$$

La separación horizontal entre puntos consecutivos Δx_i se determinó con los procedimientos de campo disponibles en cada salida de campo, según el instrumento utilizado y fue procesada en hojas de cálculo:

- La Pampa (Ago y Oct de 2025): se emplearon lecturas de hilo superior (HS) e hilo inferior (HI) para obtener el intercepto estadimétrico (Ecuación 8).

$$S = HS - HI \quad (8)$$

y, con una constante estadimétrica k_s , estimar la distancia radial (Ecuación 9).

$$D_{\text{opt}} = K_s * S \quad (9)$$

La separación entre puntos se obtuvo como Ecuación 10.

$$\Delta x_i = | D_{\text{opt},i} - D_{\text{opt},i-1} | \quad (10)$$

- San Antonio (Sep): se utilizaron coordenadas X, Y (UTM) levantadas en campo, calculando la distancia real entre puntos como Ecuación 11.

Para el cálculo de la distancia estadimétrica (horizontal) o también llamada distancia óptica radial (D_{opt}) se adoptó una constante estadimétrica que es el factor que es

el factor que transforma “intercepto en la mira” en “distancia” ($k_s = 100$) y $C \approx 0$, conforme al uso estándar del método estadimétrico en lecturas con mira.

$$\Delta x_i = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2} \quad (11)$$

Con las profundidades y separaciones horizontales se caracterizó la geometría húmeda de la sección (ancho mojado, profundidad máxima y forma del perfil), información utilizada posteriormente para el cálculo del área mojada.

4.4.1.2. Cálculo del Área Mojada por Discretización

La sección transversal se discretizó en tramos consecutivos ($i, i + 1$). El área parcial del tramo se calculó mediante la aproximación trapezoidal (Ecuación 12).

$$A_i = \frac{(d_i + d_{i+1})}{2} \Delta x_i \quad (12)$$

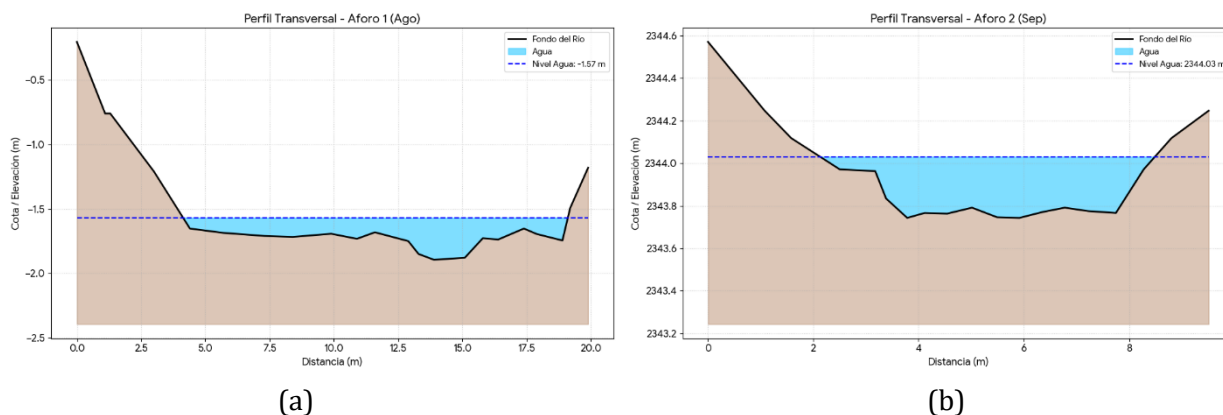
El área total mojada se obtuvo como suma de áreas parciales, considerando únicamente los tramos con profundidad efectiva (Ecuación 13).

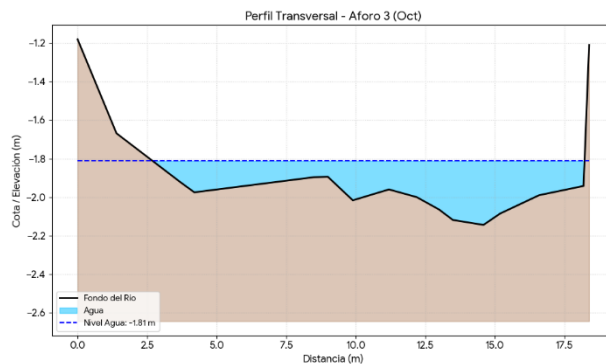
$$A = \sum A_i \quad (13)$$

Este esquema garantiza que el cálculo sea consistente con la geometría real del perfil levantado (Figura 11) y permite auditoría directa desde las hojas de Excel (Anexo D).

Figura 11

Perfiles transversales de los puntos de aforo





(c)

Nota. (a) Perfil del aforo 1, (b) Perfil del aforo 2, (c) Perfil del aforo 3.

4.4.1.3. Medición de Velocidad con Flotador y Corrección a Velocidad media

La velocidad se estimó mediante flotador, midiendo el tiempo de recorrido sobre una longitud conocida L (definida en campo según las condiciones del tramo). Para cada punto con medición de velocidad se realizaron varias repeticiones y se trabajó con el tiempo promedio t_{prom} . La velocidad superficial se calculó como (Ecuación 14).

$$V_{sup} = \frac{L}{t} \quad (14)$$

Dado que el flotador mide una velocidad cercana a la superficie, esta se corrigió a velocidad media mediante un coeficiente $k = 0.85$ (Ecuación 15).

$$V_{media} = k * V_{sup} \quad (15)$$

4.4.1.4. Integración Área-Velocidad y Caudal Total

El caudal se determinó sumando caudales parciales por franja. Para cada tramo de sección se asoció una velocidad representativa $V_{med,i}$, según el punto de medición correspondiente y el criterio de asignación adoptado en la hoja de cálculo, obteniéndose Ecuación 16.

$$Q = \sum (A_i \times V_{med,i}) \quad (16)$$

Tabla 3

Resumen de las campañas de aforos.

Campaña de Aforo	Ancho Mojado (m)	Profundidad Máx (m)	Área Mojada (m²)	V. Media (m/s)	Caudal aforado (Q) (m³/s)
Aforo 1	16.2	0.38	2.37	0.88	2.083
Aforo 2	8.44	0.35	1.35	0.87	1.176
Aforo 3	17	0.4	2.51	0.96	2.421

Cuando no se contó con medición de velocidad en todos los puntos de la sección, la velocidad se completó mediante interpolación lineal entre puntos adyacentes, asignando a cada estación intermedia una velocidad estimada coherente con el gradiente observado. En los extremos de la sección (los márgenes del cauce del río), la velocidad se fijó igual a la del punto medido más cercano o se consideró nula, cuando no existió lámina de agua. Así, cada franja A_i quedó asociada a una velocidad V_i trazable y verificable directamente en las hojas de cálculo (Anexo C-D).

4.5. Procesamiento SIG en QGIS: Delimitación de Cuenca y Subcuencas

4.5.1. Acondicionamiento Hidrológico del DEM (GRASS)

El DEM fue preparado para análisis hidrológico corrigiendo sumideros, que pueden interrumpir el flujo superficial simulado y distorsionar la delimitación. Para ello se emplearon algoritmos de GRASS disponibles en la caja de herramientas de QGIS procedimientos equivalentes a *fill sinks* (corrección de depresiones o áreas donde el agua no puede fluir) y acondicionamiento hidrológico.

4.5.2. Dirección de Flujo, Acumulación y red de Drenaje

Con el DEM acondicionado se realizó:

Dirección de flujo: define la trayectoria preferente de escorrentía en cada celda.

Acumulación de flujo: identifica zonas de concentración y permite extraer una red de drenaje consistente.

La red de drenaje se obtuvo a partir de un umbral de acumulación, seleccionado de manera que la red resultante mantenga coherencia geomorfológica con el drenaje observado y

sea adecuada para la escala de trabajo. Con fines descriptivos, se aplicó el ordenamiento de corrientes por el método de Strahler, usado en la cartografía.

4.5.3. Delimitación de la Cuenca Total y Subcuencas por Puntos de Aforo

La cuenca total se delimitó a partir de las superficies de flujo derivadas del DEM. Posteriormente, se delimitaron subcuencas contributivas asociadas a los puntos de control (La Pampa y San Antonio). Para asegurar consistencia hidráulica, los puntos de aforo fueron verificados sobre la red de drenaje generada y, cuando correspondió, ajustados mediante procedimientos de *snapping* para ubicarlos sobre el cauce modelado (Tabla 3).

4.6. Morfometría

Una vez delimitadas la cuenca y subcuencas, se cuantificaron parámetros geométricos y de relieve que describen el comportamiento potencial de concentración de escorrentía. Para este fin se empleó el complemento ArcGeek Calculator en QGIS, el cual permite obtener de manera sistemática parámetros morfométricos a partir del polígono de cuenca y la red de drenaje.

Adicionalmente, variables básicas como área (Ecuación 17) y perímetro (Ecuación 18) fueron verificadas con la calculadora de campos de QGIS, asegurando el uso del sistema proyectado UTM (Tabla 4):

$$\text{Área} = \frac{\$area}{1000000} [Km^2] \quad (17)$$

$$\text{Perímetro} = \frac{\$perimeter}{1000} [Km] \quad (18)$$

4.6.1. Longitud del cauce principal

La longitud del cauce principal se determinó sobre la red de drenaje generada, identificando el tramo principal y cuantificando su longitud total. Este parámetro se utilizará posteriormente en la estimación del tiempo de concentración y parámetros de transformación en modelación (Tabla 4).

4.6.2. Determinación del Número de Curva (CN) con GCN250 (Condición II)

El Número de Curva (CN) se emplea como parámetro hidrológico para representar la tendencia de generación de escorrentía según condiciones de suelo y cobertura. Para estimarlo se utilizó el ráster global GCN250 en Condición II (humedad media / AMC II) (Jaafar, 2019).

El procedimiento consistió con la descarga del ráster GCN250 (Condición II), el cual fue cargado en el entorno QGIS para la verificación de su sistema de referencia. Posteriormente, se realizó el recorte de esta capa tanto por el polígono de la cuenca total como los correspondientes a las subcuencas. Finalmente, se calcularon las estadísticas zonales (media, mediana, mínimo y máximo) para la cuenca total y para las subcuencas de La Pampa y San Antonio (Tabla 4).

Este proceso permitió obtener valores representativos del Número de Curva para cada unidad de análisis, garantizando la consistencia espacial y la trazabilidad de los resultados.

Tabla 4

Resumen morfométrico y CN por unidad de análisis

Unidad de análisis	Área (km ²)	Perímetro (km)	Longitud de cuenca Lb (km)	Longitud cauce principal (km)	Kc (Gravelius)	CN medio (GCN250, AMC II)
Cuenca total	174.238	88.053	27.449	20.549	1.882	81.38
Subcuenca La Pampa	124.58	68.26	20.145	12.197	1.725	81.5
Subcuenca San Antonio	140.263	74.783	22.457	14.827	1.781	81.46

Nota. Datos obtenidos de ArcGeek Calculator, QGIS y GCN250 (Condición II).

4.7. Cuantificación de Infraestructura con Open Buildings y uso Metodológico

Se utilizó Open Buildings (Diack, 2024). Para mapear y cuantificar huellas de edificaciones dentro de la cuenca como indicador de ocupación y presión urbana. En esta investigación, dicho insumo se emplea con dos propósitos:

Descriptivo: identificar sectores de mayor densidad construida y su relación con potencial incremento de escorrentía.

Preparación de etapa final: soporte para una estimación posterior del componente antrópico (aguas servidas/caudal base) y análisis complementarios.

Se enfatiza que el conteo obtenido representa edificaciones y no necesariamente “número de viviendas”, por lo que cualquier conversión a hogares o población requiere supuestos explícitos y será tratada en la sección reservada al caudal base.

4.7.1. *Inventario de Estructuras Mediante Open Buildings*

Debido a la dinámica de crecimiento de la zona, se utilizó el conjunto de datos de Open Buildings de Google (Figura 12). Este proceso consistió en:

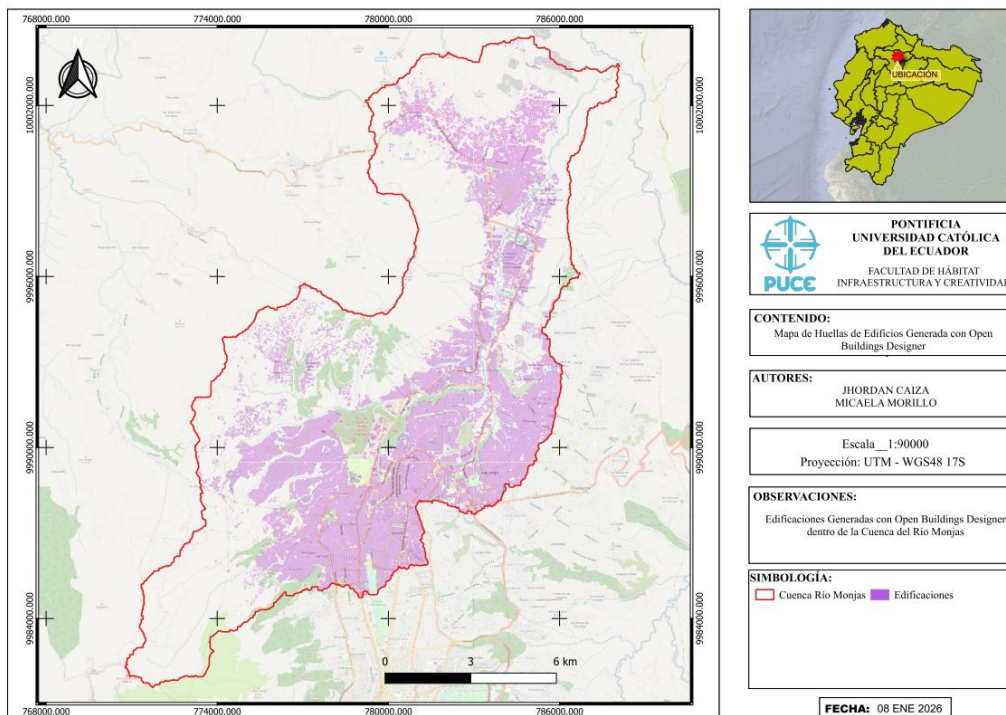
La extracción de polígonos mediante herramientas de SIG, se filtraron las estructuras ubicadas exclusivamente dentro de los límites de las subcuencas del área de estudio.

Validación visual: se realizó una limpieza de datos para diferenciar entre viviendas y estructuras auxiliares, asegurando que cada polígono representa una unidad habitacional potencial.

Cuantificación: se obtuvo el número total de casas existente en el área de estudio, proporcionado con una base física real para el modelo.

Figura 12

Infraestructura Obtenida OpenBuildings



Nota: Total de edificaciones contabilizadas 208899.

4.8. Caudal Base Sanitario - Caudal Medio Diario

Con el fin de incorporar la influencia antrópica permanente sobre el caudal del río Monjas, se estimó el caudal medio diario de aguas servidas asociado a la población asentada dentro del área de estudio. Este caudal se empleó posteriormente como caudal base en la modelación hidrológica (HEC-HMS), con el propósito de representar un aporte constante que, en cuencas urbanas, puede condicionar el comportamiento del sistema aun en ausencia de lluvia.

El procedimiento se estructuró en tres etapas: cuantificación de infraestructura a partir de Open Buildings, estimación de población servida mediante información demográfica censal y supuestos residenciales, y asignación de dotación conforme a normativa técnica de saneamiento, para finalmente calcular el caudal medio diario.

4.8.1. *Determinación de la Población Proyectada*

Una vez cuantificadas las estructuras dentro del área de análisis, se procedió a estimar la población servida, utilizando como referencia la información del Censo de Población y Vivienda (INEC, 2022). En primera instancia se calculó la densidad poblacional en función del área urbanizada considerada (en hectáreas), según la (Ecuación 19).

$$Densidad\ poblacional = \frac{(hab)}{Área(ha)} \quad (19)$$

Para convertir el inventario de estructuras a un estimador residencial, se asumió que el 90% de las estructuras corresponden a viviendas, excluyendo edificaciones asociadas a bodegas y cobertizos. Con la población servida estimada, se asignó la dotación correspondiente de acuerdo con los requisitos del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN, 2014) (Anexo E); adicionalmente, con el objetivo de representar de forma más realista el entorno urbano (servicios complementarios y consumos asociados), se aplicó un incremento del 85% a la dotación base, obteniendo así una dotación efectiva (Anexo F).

Finalmente, el caudal medio diario de aguas servidas se calculó convirtiendo el volumen diario a unidades de caudal, incorporando el factor de retorno al alcantarillado. El caudal obtenido se utilizó como aporte permanente (caudal base) dentro de HEC-HMS (Tabla 5).

Tabla 5
Resumen de estimación del caudal base sanitario

Parámetro	Valor
Área urbanizada/servida considerada (km ²)	18.067
Estructuras detectadas (inventario)	208,899
Porcentaje residencial asumido	90%
Viviendas ocupadas estimadas	159,807.74
Población servida estimada (hab)	511,384.75
Dotación efectiva (L/hab·día)	296
Factor de retorno al alcantarillado	0.8
Caudal medio diario – caudal base sanitario (m³/s)	1.401573

4.9. Modelación Predictiva en HEC-HMS

4.9.1. *Enfoque General*

La modelación predictiva se desarrolló mediante simulaciones hidrológicas de eventos de diseño en HEC-HMS (v4.13), con el propósito de estimar los hidrogramas y caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno. El procedimiento integró:

- (i) Estimación de precipitaciones de diseño por análisis de frecuencia en Hydrognomon,
- (ii) Construcción de un hietograma representativo con resolución sub diaria, y
- (iii) Simulación lluvia-escorrentía a escala de cuenca con un modelo agregado (lumped) de una sola subcuenca.

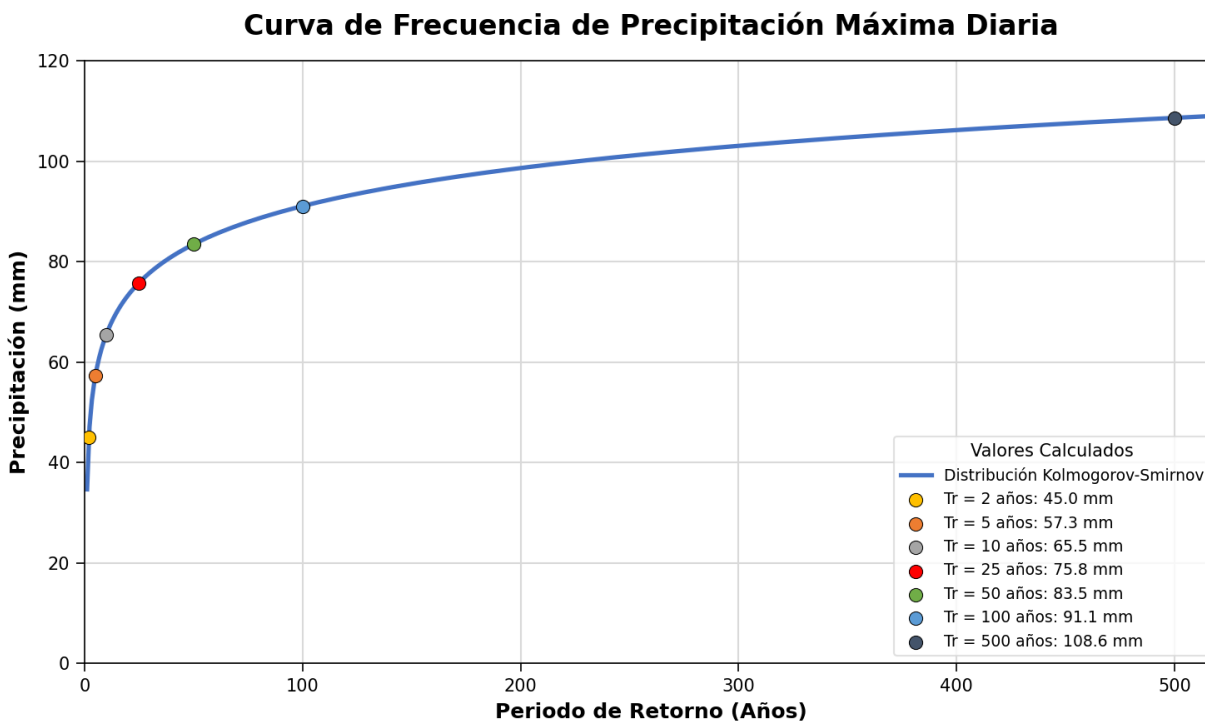
4.9.2. *Precipitación de Diseño Mediante Análisis de Frecuencia de Hydrognomon*

A partir de la serie histórica CHIRPS se derivó una serie de máximos diarios anuales, la cual se empleó en Hydrognomon v4 para ajustar funciones de distribución y estimar precipitaciones asociadas a periodos de retorno. Se evaluaron las distribuciones: Normal, Log-Normal, Pearson tipo III, Log-Pearson tipo III y Gumbel (máximos), seleccionando la distribución final con base en los indicadores de bondad de ajuste disponibles en el software y la coherencia hidrológica de los cuantiles obtenidos.

Como resultado de este proceso se obtuvieron las profundidades totales de precipitaciones de diseño (P_T) para los periodos de retorno analizados. En la modelación predictiva se implementaron los siguientes valores de tiempo de retorno Tr : 2, 5, 10, 50, 100, 500 (Figura 13):

Figura 13

Curva de Frecuencia de Precipitación máx. diaria



Nota. Selección de distribución estadística *Log Pearson III*, de Kolmogorov-Smirnov.

4.9.3. Construcción del Hietograma de Diseño.

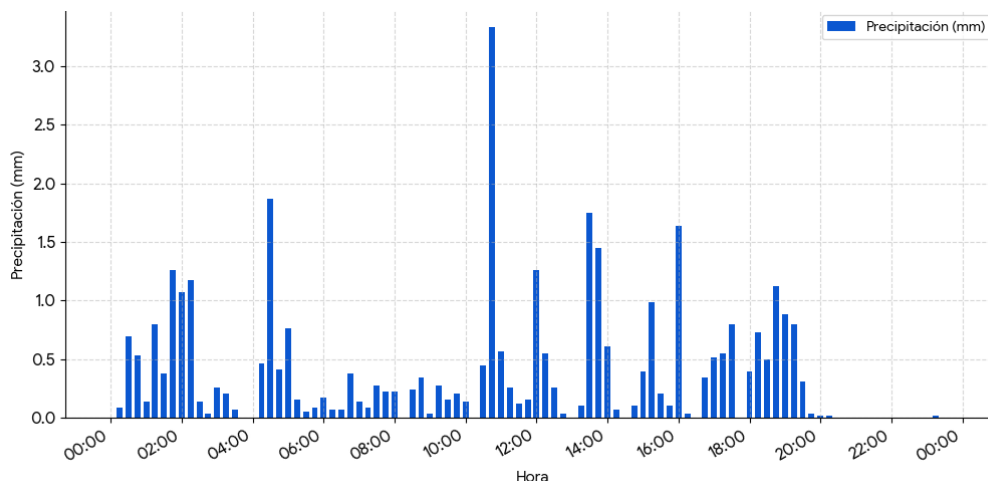
Dado que las precipitaciones obtenidas con Hydrognomon corresponden a la profundidad total del evento, fue necesario definir una distribución temporal que represente cómo se concentra la lluvia dentro de la tormenta. Para ello, se utilizó el registro sub diario (15 minutos) de la estación pluviométrica ATMOS 41, identificando un evento representativo de alta intensidad y depurando valores anómalos.

El evento seleccionado corresponde al máximo registrado en la serie disponible de la estación ATMOS 41 y, además, coincide con el aluvión ocurrido el 31 de enero de 2022. Por esta razón, se adoptó como patrón temporal base, al considerarse un evento suficientemente

representativo de una tormenta crítica en términos de concentración de intensidades para una cuenca urbana de respuesta rápida. Con dicho evento se construyó un hietograma incremental con intervalo de 15 minutos, el cual se empleó como modelo temporal (Figura 14).

Figura 14

Hietograma “Patron Temporal”



Nota. Hietograma elaborado a partir de registros pluviométricos proporcionados por E. Sánchez (conjunto de datos no publicado, 2025),

Posteriormente, el patrón se escaló a la profundidad total de cada periodo de retorno mediante la opción de “Total Depth” en HEC-HMS (Ecuación 20), que es un factor de mayoración K_T . (HEC,2023)

$$k_T = \frac{P_T}{\sum P_{\Delta t}} \quad (20)$$

donde:

P_T precipitación total objetivo (Hydrognomon)

$\sum P_{\Delta t}$ es la suma de los incrementos de precipitaciones del hietograma base.

De esta forma, se mantuvo la forma temporal del evento representativo y se garantizó que el total aplicado coincidiera con el valor de diseño de cada Tr. (USACE-HEC, 2025).

4.9.4. Implementación de la Precipitación en HEC-HMS

La precipitación de diseño se incorporó en HEC-HMS mediante un Precipitation Gage con una serie incremental a intervalo de 15 minutos. La serie del hietograma se ingresó manualmente en el módulo Time-Series Data Manager y quedó almacenada en un archivo Data Storage System (*DSS*), que corresponde al formato estándar de HEC para gestionar series de tiempo hidrológicas (p. ej., precipitación y caudal). En este esquema, el gage actúa como un vínculo entre el modelo meteorológico y la serie registrada: durante la simulación, HEC-HMS lee la precipitación directamente desde el DSS asociado al proyecto.

La aplicación espacial de la lluvia se realizó mediante un Meteorologic Model configurado con el método Specified Average, lo que implica que el hietograma se aplica de forma uniforme sobre la subcuenca. Para cada periodo de retorno se definió un Meteorologic Model independiente (TR_2, TR_5, TR_10, TR_50, TR_100 y TR_500) y se activó la opción Allow Depth Override, de modo que la profundidad total del evento se controla con el parámetro Total Storm Precipitation correspondiente a cada Tr. Con ello se mantiene la forma temporal del patrón a 15 minutos y, simultáneamente, se garantiza que el acumulado total aplicado coincida con el valor de diseño definido para cada escenario.

4.9.5. Modelo de Cuenca y Parametrización Hidrológica

La cuenca se representó como una única subcuenca agregada con área total, en donde la transformación lluvia-escorrentía se resolvió mediante el método de pérdidas SCS – CN y la transformación mediante el método SCS (hidrograma unitario SCS) (USDA SCS, 1986). Adicionalmente, se incluyó un componente de caudal base para representar el aporte sanitario medio del sistema (descarga de aguas servidas), mencionado antes.

4.9.6. Control de Simulación y Ejecución de Corridas

Las simulaciones se ejecutaron con un Intervalo de cálculo cada 15 minutos y una ventana de simulación: del 30/ene/2000 24:00 al 01/feb/2000 04:00, ventana artificial utilizada únicamente para alojar el hietograma de diseño, sin afectar la validez de la respuesta hidrológica

por tratarse de un modelo de evento. Para cada periodo de retorno se definió un “Run” independiente, manteniendo fijo el modelo de cuenca y variando exclusivamente el *Meteorologic Model* (profundidad total del evento).

4.9.7. Variables de Salida Consideradas

HEC-HMS generó los hidrogramas de caudal a la salida de la subcuenca y los resúmenes hidrológicos del evento. Para el análisis posterior (Capítulo 5) se consideraron como variables principales: caudal pico, tiempo al pico, volumen de escorrentía directa, pérdidas totales y precipitación efectiva (exceso), derivados de las tablas de resumen y series temporales de resultados del modelo.

4.10. Modelación Histórica, Eventos Observados en Fechas de Aforo.

La modelación histórica se planteó como una verificación de coherencia del modelo a escala de evento, enfocada en dos aspectos: que el modelo reproduzca razonablemente el “piso” hidrológico (caudal base) del sistema, asociado al aporte sanitario del río; y que el modelo responda de forma lógica a la lluvia registrada en los días cercanos a los aforos. Dado que los aforos disponibles son mediciones puntuales y no existen hidrogramas observados continuos en los puntos de control, no se buscó ajustar el modelo para que los picos simulados coincidan con los valores aforados, sino interpretar el aforo como referencia directa para el orden de magnitud del caudal base en cada fecha (Tabla 8).

4.10.1. Delimitación del Área Modelada por Evento

Para cada aforo se modeló únicamente el área aportante aguas arriba del punto de interés, representada como una sola subcuenca en HEC-HMS. Con esto se evita extrapolar resultados de la cuenca completa a puntos de control con área distinta y se mantiene consistencia entre precipitación del CHIRPS y respuesta hidrológica del sector evaluado.

4.10.2. Precipitación Utilizada y Construcción del Hietograma Histórico

La precipitación histórica se basó en dos fuentes complementarias al igual que la modelación predictiva, es decir la información de CHIRPS se utilizó para definir la precipitación total acumulada con el patrón de tormenta, calculado específicamente para el área drenante de cada punto, en consecuencia, el total puede variar entre Punto 1 (La Pampa) y el Punto 2 (San

Antonio). Por otro lado, la información de la Estación incremental cada 15 min. se utilizó para definir la forma temporal sub diaria del evento.

El procedimiento consistió en definir una ventana de simulación centrada en cada aforo, abarcando varios días a cada lado del evento y con un paso temporal de 15 minutos. Para ello, se construyó un hietograma incremental de 15 minutos basado en el registro pluviométrico disponible, al cual se le aplicó un factor de mayoración para escalarlo, haciendo coincidir su precipitación acumulada con el valor total proporcionado por los datos CHIRPS correspondientes a la misma ventana temporal, todo ello conservando la forma temporal original del hietograma.

4.10.3. Configuración del Modelo en HEC-HMS

Para cada evento histórico se creó una corrida independiente en HEC-HMS, manteniendo el mismo esquema metodológico.

Pérdidas por infiltración: SCS-CN con CN compuesto de la subcuenca.

Transformación lluvia-escorrentía: SCS-UH, definiendo el tiempo de retardo (Tlag) para representar el retardo hidrológico de la respuesta a la precipitación del área modelada.

Caudal base: se incluyó el aporte sanitario mediante el método Monthly Constant, adoptando un valor constante durante el año dentro de cada proyecto histórico, que fue definido proporcionalmente al área urbana con la que se determinó el caudal base para toda la cuenca.

4.10.4. Control de Simulación y Variables de Salida

Las simulaciones se ejecutaron con intervalo de 15 minutos, de acuerdo con la resolución del hietograma. Para el análisis posterior se guardaron:

- Caudal a la salida de la subcuenca (serie temporal).
- Caudal pico y tiempo al pico del evento.
- Precipitación total aplicada, pérdidas, exceso (precipitación efectiva) y volúmenes asociados.

Adicionalmente, como indicador de consistencia del “piso” hidrológico, se extrajo un caudal simulado (*Qsim*) exactamente en el instante de cada aforo, verificando que el valor represente el componente de caudal base esperado para la fecha, sin interpretar ese punto como validación del pico de crecida.

CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Análisis y Discusión de la Morfometría de la Cuenca

El análisis morfométrico es la base fundamental para poder comprender el comportamiento hidrológico de la cuenca. Mediante la cuantificación de sus características físicas, se puede predecir cómo responderá el sistema ante eventos de precipitación extrema y como la actividad humana ha alterado su dinámica natural.

5.1.1. Geometría y Forma de la Cuenca

Los resultados obtenidos para la cuenca total muestran un área de 174.24 km² con un perímetro de 88.05 km. Al analizar la forma, el Índice de Gravelius (*Kc*) arrojó un valor de 1.88, mientras que para las subcuencas de La Pampa 1.73 y San Antonio 1.78. También se lo conoce como coeficiente de compacidad, el cual es un valor numérico que se usa en hidrología para determinar qué tan parecida es la forma de una cuenca a un círculo perfecto.

Según la teoría de Aparicio (1999), un índice de Gravelius cercano a 1.0 sugiere una cuenca circular con una respuesta aluvional simultánea y violenta. En este caso, existen valores cercanos a 1.88 lo que indica una forma de la cuenca de alargada a rectangular. No obstante, esta característica no debe interpretarse como una reducción del riesgo. En cuencas andinas con fuertes desniveles, como la del río Monjas, la forma alargada se ve compensada por una red de drenaje extremadamente eficiente. Como señalan Resabala y Tipan (2025) en su caracterización de los ríos de Quito, la configuración geométrica de la cuenca del Monjas facilita que los flujos de la zona alta (Pichincha) se concentren rápidamente en el eje principal, incrementando el poder erosivo en los tramos medios y bajos.

5.1.2. Relieve y Pendientes

El relieve de la cuenca es uno de los parámetros más determinantes, presentando un desnivel altitudinal que va desde los 4,650 msnm hasta los 1,691 msnm, lo que genera una

diferencia de relieve total de 2,959 metros. La pendiente media de la cuenca se calculó en 25.97%, clasificado técnicamente como un relieve "Escarpado" o *Steep*, por tanto, el terreno tiene una inclinación muy pronunciada, abrupta y de difícil acceso o transitable.

Al respecto, Chow (1964) establece que en terrenos con pendientes superiores al 20%, la fase de infiltración se reduce drásticamente en favor del escurrimiento directo. Esta condición física se ve agravada en el Río Monjas debido a la litología de la zona, compuesta por depósitos piroclásticos no consolidados. Según el estudio morfodinámico de Barragán y Murillo (2023), estas pendientes no solo aceleran el agua, sino que provocan una inestabilidad constante en los taludes, lo que explica los procesos de socavación observada en los puntos de aforo de La Pampa y San Antonio.

5.1.3. Red de Drenaje y Dinámica de Transporte

La cuenca presenta un Orden de Corriente 4 (Strahler) y una Densidad de Drenaje de 1.23 km/km². La sinuosidad del cauce principal es de 0.75, lo que indica un canal "casi recto".

Una densidad de drenaje de 1.23 refleja una eficiencia de evacuación moderada-alta. Sin embargo, la baja sinuosidad del río (0.75) es un hallazgo crítico. Un río recto, sumado a una pendiente de canal del 4.77%. Ordoñez Gálvez (2011) menciona que la rectitud de los cauces en cuencas urbanizadas suele ser el resultado de la presión antrópica y el encajonamiento del río, lo cual elimina la capacidad natural del cauce para disipar energía a través de las curvas.

5.1.4. Tiempo de Concentración (T_c)

Utilizando el método de Kirpich, se determinó un tiempo de concentración de 2.19 horas para la cuenca total y apenas 1.89 horas para la zona de La Pampa.

Un T_c inferior a 2 horas en una cuenca de 174 km² es un indicador de una respuesta hidrológica rápida. Esto significa que desde que cae la gota de lluvia más alejada hasta que llega al punto de cierre, transcurre muy poco tiempo. Esta rapidez es consistente con los hallazgos de la Secretaría de Seguridad (2022), cuyos informes de avance mencionan que el Río Monjas reacciona de forma casi inmediata a las tormentas intensas del norte de Quito. La validación de este parámetro con las curvas IDF del INAMHI (2015) confirma que las tormentas de corta

duración (menores a 30 min) son las que generan mayor peligro de desbordamiento en la zona de estudio.

5.2. Impacto de la Urbanización

La morfometría natural de la cuenca ha sido superada por la realidad antrópica. La detección de más de 208,000 estructuras (Open Buildings) ha alterado el Número de Curva (CN), factor que el USDA (1986) considera vital para el cálculo de escorrentía.

Como plantean Carretero y Kruse (2014), la urbanización no solo aumenta los picos de caudal, sino que elimina el "tiempo de retardo" (*lag time*) de la cuenca. En el Río Monjas, el Plan de Uso y Gestión del Suelo (2021) muestra que la expansión urbana hacia Pomasqui y San Antonio ha sellado áreas que antes funcionaban como zonas de infiltración. Esto explica por qué el caudal base de 1.40 m³/s (calculado con el Censo INEC 2022) se ve tan rápidamente superado durante eventos pluviales: el suelo ya no puede absorber agua y el sistema de alcantarillado entrega los aportes de consumo humano y lluvia de forma simultánea al cauce, saturando su capacidad hidráulica (Espín y Ortega, 2023).

5.3. Análisis de los Hidrogramas de Crecida por Periodos de Retorno

Tras la ejecución de las simulaciones en HEC-HMS para los distintos escenarios de retorno (Tr: 2, 5, 10, 50,100 y 500 años), se observa una respuesta hidrológica consistente con la geomorfología y el nivel de urbanización de la cuenca del Río Monjas. Los resultados muestran que a medida que aumenta la severidad del evento pluvial, la cuenca pierde su capacidad de amortiguamiento, generando picos de caudal significativamente altos (Tabla 6).

5.3.1. Síntesis de Datos Modelo Predictivo

La modelación predictiva permite anticipar la respuesta hidráulica de la cuenca del Río Monjas ante eventos de precipitación con diferentes probabilidades de ocurrencia. A diferencia de los eventos históricos, estos resultados proyectan escenarios de riesgo que son fundamentales para la planificación territorial y el diseño de obras de mitigación.

Tras ejecutar las simulaciones en HEC-HMS para la cuenca total 174.2328 km², se obtuvieron los siguientes resultados de descarga en el punto de cierre:

Tabla 6*Descarga en el punto de cierre*

Tr (años)	P total (mm)	Pérdidas (mm)	Exceso (mm)	Q pico (m³/s)
2	45.301	32.945	12.356	88.71
5	58.047	37.431	20.616	132.48
10	66.079	39.736	26.342	160.88
50	82.957	43.648	39.308	221.55
100	89.893	44.975	44.918	246.67
500	105.760	47.556	58.204	304.26

5.3.2. *Discusión de la Respuesta Hidrológica Extrema*

Los resultados revelan una cuenca con una sensibilidad extrema a la variabilidad climática. Se observa que incluso para un periodo de retorno bajo como lo son 2 años, el caudal pico alcanza 88.71 m³/s, una cifra que supera considerablemente la capacidad de transporte natural de muchos tramos del río. El salto cuantitativo entre el escenario de 2 años y el de 100 años representa un incremento del 178% en el caudal pico. Esta progresión no es lineal, lo que indica que, al saturarse la capacidad de infiltración del suelo, la cuenca entra en un estado de escurrimiento pleno. Este fenómeno es típico en cuencas donde el tiempo de concentración es corto y el relieve escarpado (Chow et al., 1994).

5.3.3. *Influencia de la Urbanización y el Número de Curva (CN)*

El volumen de agua movilizado para un evento de 100 años 246.67 m³/s es alarmante. Este comportamiento se valida por el alto grado de impermeabilización del suelo discutido previamente.

Al haber identificado más de 200,000 estructuras mediante teledetección, el modelo refleja un Número de Curva (CN) elevado. Como sostienen Carretero y Kruse (2014), la urbanización descontrolada elimina las áreas de recarga y transforma la lluvia neta en escorrentía directa casi de forma instantánea. En el Río Monjas, esto se traduce en hidrogramas de "pico agudo", donde la energía cinética del agua aumenta el potencial erosivo y la inestabilidad de los taludes en sectores como La Pampa (Aguirre Paladines, 2023; Barragán & Murillo, 2023).

5.3.3.1. Impacto de la Impermeabilización en el Volumen de Escurrimiento

Los resultados indican que incluso tormentas con profundidades de lluvia moderadas generan volúmenes de entrada, es decir, el área bajo la curva, superiores a los 600,000 m³ (Tabla 7). Existe una alta eficiencia en la conversión de lluvia en escorrentía, la cual es consecuencia directa de la urbanización. Mediante herramientas satelitales se detectó más de 200,000 estructuras lo cual evidencia un suelo sellado que impide la infiltración natural. El incremento de superficies impermeables elimina la capacidad de retención del suelo, forzando a que la cuenca responda con caudales pico elevados de forma casi inmediata. Esto explica porque el modelo arroja un pico de 26.18 m³/s para el segundo aforo en “San Antonio” (Anexo G), lo que refleja una cuenca que ya no tiene amortiguación natural (Carretero y Kruse, 2014).

5.4. Análisis de la Modelación Hidrológica Histórica

El análisis de los eventos históricos permite validar la capacidad del modelo para representar la realidad física de la cuenca en momentos específicos de observación directa. La diferencia que existe con el modelo predictivo es que en este se evalúa la coherencia que existe entre la precipitación días antes del aforo y el caudal observado, de esta manera se puede entender la dinámica de almacenamiento y respuesta del Río Monjas.

5.4.1. Síntesis de Resultados de la Modelación Histórica

A partir de los archivos de salida del modelo, se extrajeron los siguientes parámetros clave que definen la respuesta del sistema ante las tormentas registradas:

Tabla 7

Resultados Obtenidos Modelación Histórica

Evento de control	Punto de aforo	Caudal aforado, Qobs (m ³ /s)	Caudal pico simulado, Qp (m ³ /s)	Volumen total simulado, V (m ³)
Aforo 1	La Pampa (P1)	2.08	16.47	625,275.40
Aforo 2	San Antonio (P2)	1.18	26.18	1,888,347.90
Aforo 3	La Pampa (P3)	2.42	48.24	753,965.10

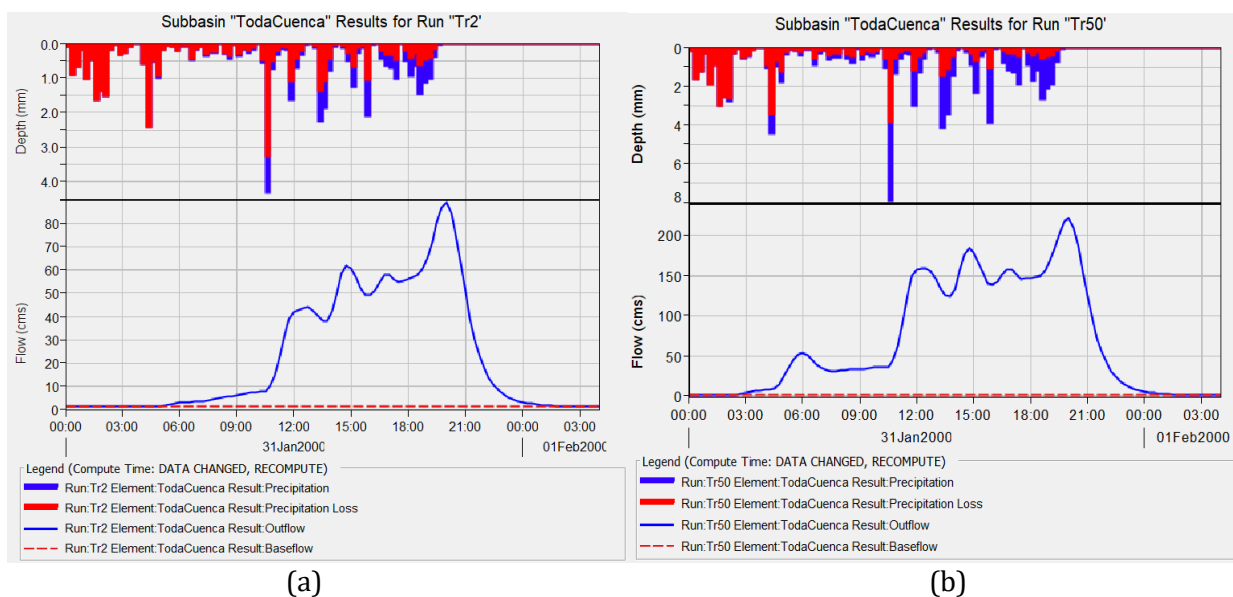
5.4.2. Interpretación Diferencia Entre Caudales Pico y Aforos

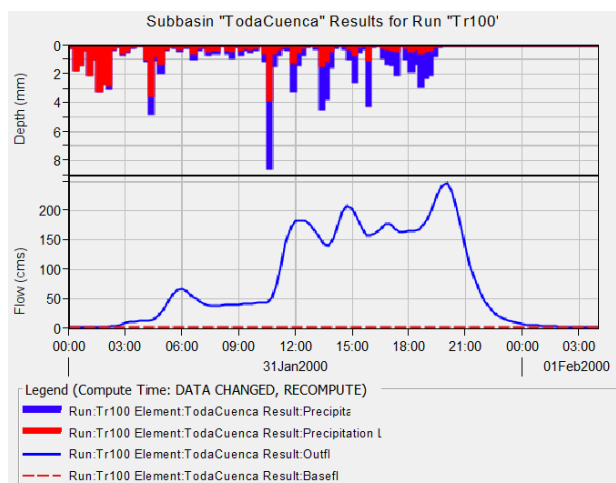
Se puede observar que los caudales aforados indicados en la tabla 7 son significativamente menores a los caudales pico que fueron modelados con los datos históricos de tormenta. Esta diferencia valida la respuesta hidrológica de la cuenca. Los aforos se realizaron en momentos de caudal base y recesión, mientras que el modelo captura el pico máximo provocado por la tormenta. En cuencas con tiempos de concentración menores a 2 horas como la del Río Monjas, el pico de crecida es bastante corto, así, las mediciones manuales en campo capturan la fase de agotamiento del caudal de la cuenca (Espín y Ortega, 2023). El hecho de que el modelo estabilice sus niveles mínimos cerca de los valores aforados, valida la configuración del flujo base residual (USACE-HEC, 2025).

El comportamiento de los hidrogramas obtenidos refleja una cuenca con una respuesta rápida y volúmenes de escorrentía elevados (Anexo H). Para eventos de baja recurrencia (Tr: 2 años), el caudal se mantiene controlado principalmente por la capacidad de infiltración del suelo. Sin embargo, para eventos extremos (Tr: 50 y 100 años), el incremento del caudal es exponencial (Figura 15).

Figura 15

Hidrogramas de la modelación en HEC-HMS





(c)

Nota. (a) Hidrograma para un Tr 2 años, (b) Hidrograma para un Tr 50 años, (c) Hidrograma para un Tr 100 años. Resultados de HEC-HMS.

Esta tendencia se valida mediante los principios de hidrología urbana, donde se establece que, en cuencas con alta densidad de infraestructuras y suelos impermeabilizados, el tiempo de concentración se reduce drásticamente, forzando a que la mayor parte de la lluvia se convierte en escurrimiento directo casi instantáneo (USDA, 1986).

5.4.3. Validación mediante Caudal Base Antrópico

Es relevante destacar que, en todas las modelaciones, el caudal de "piso" o mínimo nunca desciende de los 1.21 m³/s. Este valor es coherente con el caudal base de 1.40 m³/s calculado previamente a partir de la densidad poblacional del Censo INEC (2022) y los requisitos de dotación de la NTE INEN 1680 (2014). La proximidad entre el caudal mínimo simulado y el valor aforado en San Antonio (1.18 m³/s) valida que el flujo base del Río Monjas es predominantemente antrópico, alimentado por las descargas de alcantarillado que mantienen el cauce permanentemente ocupado. Esta carga base reduce la capacidad hidráulica remanente, facilitando que el flujo alcance niveles críticos de erosión durante las tormentas (Secretaría de Ambiente, 2021).

5.5. Análisis Dinámica del Crecimiento Poblacional y su Impacto en el Río Monjas

Es importante entender la alteración del ciclo hidrológico en la cuenca, para poder evaluar la transición demográfica de la provincia de Pichincha, específicamente en el Distrito

Metropolitano de Quito. Este crecimiento no solo implica una mayor demanda de recursos, sino una transformación radical del suelo y de los aportes líquidos permanentes al cauce.

5.5.1. Comparativa Intercensal y Expansión Urbana

De acuerdo con los datos del censo de 2010 (INEC 2010), la provincia de Pichincha registraba una población de aproximadamente 2.5 millones de habitantes, con una densidad que empezaba a presionar las parroquias del norte de Quito. Sin embargo, los resultados del Censo 2022 (INEC,2022) revelan que la población provincial superó los 3.1 millones, reflejando un crecimiento sostenido que ha desplazado la frontera urbana hacia las riberas del río monjas.

Este incremento poblacional tiene una correlación directa con la impermeabilización. Mientras que en 2010 muchas áreas de la cuenca aún conservaban coberturas vegetales o suelos permeables, el análisis satélite actual identificó más de 208000 estructuras, lo que confirma que la cuenca se comporta ahora como un receptor de escorrentía rápida.

5.6. Comparación en el Instante del Aforo: Coherencia con el Estado Observado del Río

Dado que el aforo es una medición puntual y no necesariamente coincide con el pico de crecida, el contraste más representativo con campo consiste en evaluar el caudal simulado en la hora exacta de medición. Bajo esta lógica, el modelo reproduce el orden de magnitud del flujo observado durante el levantamiento, particularmente en el Aforo 3, donde la coincidencia es cercana. En Aforo 1 la discrepancia es mayor, lo cual puede asociarse a la variabilidad local del método de aforo, al comportamiento transversal del flujo o a diferencias en la condición hidráulica del tramo durante la medición (Tabla 8).

Tabla 8

Comparación del caudal aforado vs caudal simulado en la hora del aforo

Evento	Punto	Fecha y hora de aforo	Q aforado (m ³ /s)	Q simulado @ hora aforo (m ³ /s)	Diferencia (m ³ /s)	Diferencia (%)
Aforo 1	La Pampa	19/08/2025 09:00	2.08	1.2	-0.88	-42.4
Aforo 2	San Antonio	25/09/2025 11:45	1.18	1.3	0.12	10.5
Aforo 3	La Pampa	24/10/2025 09:00	2.42	2.5	0.08	3.3

Esta comparación fortalece la interpretación del caudal base antrópico: durante las horas de aforo, la escorrentía directa puede ser nula o reducida, por lo que el caudal observado se aproxima al piso controlado por aportes urbanos permanentes. En cuencas urbanizadas, este componente reduce la “capacidad remanente” del cauce antes de la lluvia y condiciona los niveles de partida sobre los que se monta la crecida.

5.6.1. Implicaciones Hidrológicas y de Diseño

En conjunto, los resultados muestran que los eventos históricos analizados no alcanzan la severidad de los escenarios de diseño, pero son útiles para confirmar dos aspectos clave: el sistema mantiene un caudal mínimo asociado a influencia antrópica, coherente con la configuración de caudal base implementada, y la cuenca presenta una respuesta rápida, donde los picos de crecida ocurren en tiempos cortos, dificultando que un aforo manual capture el máximo instantáneo. Por su parte, los caudales proyectados por Tr constituyen el insumo principal para análisis hidráulico posterior como puede ser: capacidad de cauce, evaluación de estructuras y obras de mitigación, al representar condiciones de tormenta extrema que pueden exceder ampliamente el comportamiento observado en campañas puntuales.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- La cuenca del Río Monjas presenta una respuesta hidrológica rápida y potencialmente crítica, asociada a su condición morfométrica. La pendiente media (~25.97%) y un Índice de Gravelius de 1.88 evidencian una cuenca alargada, donde el relieve escarpado domina la generación de escorrentía. En consecuencia, el tiempo de concentración es del orden de 2 horas para la cuenca total ($T_c \approx 2.19$ h) y menor a 2 horas en subcuencas de control como La Pampa ($T_c \approx 1.89$ h), lo que favorece crecidas de rápida formación, particularmente relevantes en los sectores de San Antonio y La Pampa.
- La integración de campañas de aforo, análisis demográfico y modelación permitió identificar un comportamiento hidrológico con componente natural y componente antrópico. Se estimó un caudal base sanitario de 1.40 m³/s, consistente con el orden de magnitud de los caudales medidos en campo (2.08 m³/s, 1.18 m³/s y 2.42 m³/s). Esto confirma que el río no responde únicamente a la precipitación, sino que mantiene un

aporte permanente asociado al contexto urbano, el cual condiciona el “piso” de caudal incluso en periodos sin lluvia.

- La evidencia territorial confirma que la expansión urbana ha incrementado la propensión a generar escorrentía directa. La cuantificación de más de 200,000 estructuras y el uso de un *CN* compuesto ≈ 81 , son coherentes con un sistema con alta capacidad de producir precipitación efectiva, esto contribuye a hidrogramas con picos marcados y con respuesta concentrada en intervalos cortos, particularmente bajo tormentas intensas.
- La modelación hidrológica por evento en HEC-HMS permitió estimar escenarios de crecida para diferentes periodos de retorno. Para la cuenca total, los caudales pico alcanzan aproximadamente 246.67 m³/s en un $Tr=100$ años y 304.26 m³/s en un $Tr=500$ años. Estos resultados evidencian una amenaza hidrológica significativa bajo eventos extremos y, refuerzan la necesidad de gestión del riesgo basada en reducción de escorrentía y control de aportes urbanos.
- La modelación histórica en ventanas centradas en fechas de aforo demostró la coherencia hidrológica del modelo a escala de evento, el sistema responde en magnitud y temporalidad a la lluvia aplicada y, mantiene un caudal base congruente con la estimación técnica de descarga urbana continua. No obstante, debido a que los aforos son mediciones puntuales y no existe hidrograma observado continuo, el contraste se interpreta como verificación de consistencia (especialmente del “piso” de caudal), más que como una calibración formal de picos de crecida.

6.2. Recomendaciones

- Dada la respuesta hidrológica rápida observada y un tiempo de concentración del orden de 2 horas (menor a 2 horas en subcuencas de control), se recomienda priorizar en zonas críticas la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) y control en fuente (pavimentos permeables, jardines de lluvia, zanjas de infiltración, micro reservorios y desconexión de áreas impermeables). Estas medidas son estratégicas para reducir la precipitación efectiva y atenuar los caudales pico asociados a escenarios de diseño.

- Se recomienda a la EPMAPS evaluar y priorizar la implementación de infraestructura de interceptación o plantas de tratamiento de aguas residuales que reduzcan el aporte permanente asociado al caudal base sanitario estimado ($1.40 \text{ m}^3/\text{s}$). La reducción de este flujo continuo no solo mejora la calidad del agua, sino que reduce ocupación permanente del cauce, favoreciendo una mejor gestión de crecidas y reduciendo procesos erosivos persistentes en taludes.
- Se recomienda implementar una red de monitoreo telemétrico en tiempo real (nivel/precipitación, con resolución sub horaria) en puntos estratégicos para habilitar alerta temprana. La instrumentación debe permitir la construcción de series continuas y curvas nivel-caudal, lo cual es indispensable para calibración y validación futura del modelo hidrológico, para activar protocolos de seguridad con anticipación.
- Para el diseño de obras de estabilización o protección ribereña en tramos críticos, se recomienda adoptar como mínimo el escenario $TR=50$ años (o superior según el nivel de exposición), evitando el uso de caudales puntuales de aforo como criterio de dimensionamiento. Los aforos deben utilizarse como referencia del régimen en el instante medido, mientras que el dimensionamiento debe responder a caudales de diseño.
- Como complemento técnico del presente trabajo, se recomienda realizar una verificación hidráulica (p. ej. HEC-RAS) empleando secciones transversales y geometría del cauce, con el fin de evaluar capacidad hidráulica, calados, velocidades y zonas potenciales de desbordamiento para los caudales de diseño estimados en HEC-HMS.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre Paladines, M. A. (2023). *Evaluación temporal de movimientos en masa asociados a la actividad fluvial del río Monjas* [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Institucional EPN.
- Aparicio, F. J. (1999). *Fundamentos de hidrología superficial*. Editorial Limusa.
- Barragán, R., & Murillo, A. (2023). *Estudio morfodinámico de la cuenca del río Monjas* [Proyecto de investigación]. Universidad Central del Ecuador.
- Beck, H. E., Pan, M., Roy, T., Weedon, G. P., Pappenberger, F., van Dijk, A. I., Enyutina, A. F., Huffman, G. J., Adler, R. F., & Wood, E. F. (2017). Daily evaluation of 26 precipitation datasets using ground-based gauge observations from 5663 stations worldwide. *Water Resources Research*, 53(9), 7624–7656. <https://doi.org/10.1002/2017WR021507>
- Carretero, S., & Kruse, E. (2014). Impacto de la urbanización en la infiltración en un área costera, Argentina. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(6), 5–20.
- Castillo García, C. L., Abreu Franco, D. E., & Álvarez González, M. (2018). Modelación hidrológica de la cuenca del Río Grande mediante el uso del programa HEC-HMS. *Revista Cubana de Ingeniería*, 9(2), 53–59.
- Climate Hazards Center, University of California, Santa Barbara. (s. f.). *CHIRPS: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations*. Recuperado el 4 de febrero de 2026, de <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>
- Chow, V. T. (Ed.). (1964). *Handbook of applied hydrology: A compendium of water-resources technology*. McGraw-Hill.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.
- Condom, T., Rau, P., Espinoza, J. C., & Suarez, W. (2020). Future changes in precipitation and temperature patterns and extremes over the tropical Andes from CMIP5 and CMIP6 models. *Climatic Change*, 160(4), 659–681.
- Diack, A. (2024, 19 de septiembre). *Estación total y teodolito: Cuáles son las diferencias y para qué se usa cada uno*. Topcon Positioning Systems. <https://www.topconpositioning.com/es/education/estacion-total-y-teodolito/>
- Dirección Metropolitana de Gestión de Riesgos. (2022). *Procedimiento de deslizamientos y derrumbes*. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.
- EcuRed. (s. f.). *ArcGIS*. Recuperado el 9 de diciembre de 2025, de <https://www.ecured.cu/ArcGIS>

- Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS). (s. f.). *CLIMÁTICA: Plataforma de monitoreo y visualización de datos hidrometeorológicos históricos y en tiempo real*. <https://paramh2o.aguaquito.gob.ec/>
- Espín, L., & Ortega, P. (2023). *Estimación del caudal máximo del río del Oro mediante el uso de la herramienta geoespacial ArcHydro*. 9.ª Jornada de Ciencias Técnicas y de la Tierra. Universidad Politécnica Salesiana.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelson, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Google Earth Engine. (2025). *Google Earth Engine: a planetary-scale platform for Earth science data & analysis*. <https://earthengine.google.com/>
- Google Earth Engine Data Catalog. (s. f.). *CHIRPS Precipitation Daily: Climate Hazards Center InfraRed Precipitation With Station Data (Version 2.0 Final)* [Conjunto de datos]. <https://code.earthengine.google.com/?asset=projects/ppt-cuenca-monjas/assets/Chirps>
- Hengl, T. (2009). *A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables*. Office for Official Publications of the European Communities.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275–370.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2014). *Urbanización. Sistema de abastecimiento de agua potable. Requisitos* (NTE INEN 1680). INEN. <https://colegioarquitectosecuador.org/wp-content/uploads/2022/05/pnte-inen-1680.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2010). *Población y Demografía*. INEC.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2022). *Población y Demografía*. INEC.
- Jenson, S. K., & Domingue, J. O. (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information-system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11), 1593–1600.
- Kirpich, Z. P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10(6), 362.
- Koutsoyiannis, D. (2021). Simple kinematic wave models with variable parameters. *Hydrological Sciences Journal*, 66(1), 1–15.

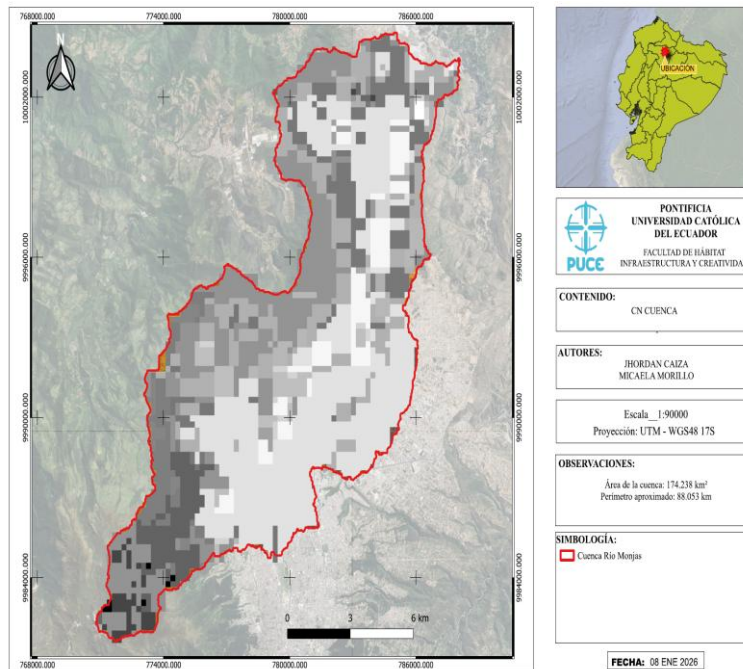
- Kozanis, S., & Markonis, Y. (2009). *Hydrognomon: open source software for hydrological data processing*. European Geosciences Union General Assembly.
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. H. (1982). *Hydrology for engineers* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Llorens-Cifuentes, J., & Sánchez-Ruiz, A. (2020). Urbanización y cambio hidrológico: evaluación de impactos en cuencas pequeñas. *Revista de Ingeniería*, 50, 45–56.
- NASA. (2025). *Earthdata Search*. <https://search.earthdata.nasa.gov/>
- O’Callaghan, J. F., & Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28, 328–344. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0)
- OTT Hydromet. (s. f.). *Ott discharge measurement*. Recuperado el 10 de octubre de 2025, de <https://www.ott.com/>
- Ordóñez Gálvez, J. J. (2011). *¿Qué es cuenca hidrológica?* Sociedad Geográfica de Lima. <https://aguaygestion.com/wp-content/uploads/2017/02/Que-es-cuenca-hidrologica.pdf>
- Quispe Mamani, V. (2018). *Análisis y comparación de hidrogramas en cuencas hidrográficas con el uso de HEC-HMS y Civil 3D* [Tesis de grado]. Universidad Nacional del Altiplano.
- Resabala Loor, C. R., & Tipán Guano, K. E. (2025). *Análisis espacio-temporal de índices morfométricos en la cuenca del río Machángara y San Pedro para la identificación de zonas con riesgo potencial de inundación y susceptibilidad a movimientos en masa* [Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio Digital UCE.
- Sánchez, E. (2025). *Registros pluviométricos de estación privada (Quito, Ecuador; -0.148567° , -78.491887°), período 2022–2025* [Conjunto de datos no publicado]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Secretaría del Ambiente. (2021). *Inventario de movimientos en masa del Distrito Metropolitano de Quito*. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.
- Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda. (2021). *Datos topográficos (Geoportal)*. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.
- Secretaría General de Seguridad y Gobernabilidad. (2021). *Plan metropolitano de reducción de riesgos*. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.
- SCS National Engineering Handbook. (1985). *Section 4: Hydrology*. U.S. Department of Agriculture.

- Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias. (2025). *Geoportal*.
<https://www.gestionderiesgos.gob.ec/>
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117–1142. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union*, 38(6), 913–920.
<https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- United States Geological Survey. (2025). *EarthExplorer*. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- U.S. Army Corps of Engineers. (2025). *HEC-HMS hydrologic modeling system (Version 4.13)* [Software de computación]. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (2025). *HEC-HMS hydrologic modeling system: User's manual (Version 4.13)*.
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.13/>
- U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. (1986). *Urban hydrology for small watersheds* (TR-55). USDA.
- Villela, S. M., & Mattos, A. (1975). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.
- World Meteorological Organization. (2010). *Manual on stream gauging: Volume I—Fieldwork* (WMO-No. 1044). WMO.
https://old.wmo.int/extranet/pages/prog/hwrp/publications/stream_gauging/1044_Vol_I_e_n.pdf
- Zambrano, J., Sánchez, R., & Gómez, M. (2010). *Manual de hidrología básica*. Universidad Nacional.

ANEXOS

ANEXO A

Número de Curva para la Cuenca



ANEXO B

Campaña de Aforos Realizada en el Río Monjas

Primer Aforo Realizado “La Pampa”



Segundo Punto Aforado “San Antonio”



Tercer Punto Aforado “La Pampa”



ANEXO C

Datos Utilizados para el Cálculo del Caudal

Datos Utilizados para el Cálculo del Caudal del Primer Punto Aforado

PRIMER AFORO, 1ER PUNTO LA PAMPA		19/8/2025	9:00	coordenada X UTM: 783869.06	coordenada Y UTM: 9996619															
Punto	Δx (m)	x estación (m)	RÍO (cm)	Profundidad (m)	t1 (s)	t2 (s)	t3 (s)	t4 (s)	t5 (s)	t6 (s)	L tramo (m)	t_prom (s)	V_superf (m/s)	k	V_media (m/s)	V_Interp (m/s)	ancho_sub (m)	area_sub (m²)	Q_sub (m³/s)	
1	0.00	0	0	0										0.85		0	0.55	0	0	
2	1.10	1.1	0	0										0.85		0	0.65	0	0	
3	0.20	1.3	0	0										0.85		0	0.95	0	0	
4	1.70	3	0	0										0.85		0	1.55	0	0	
5	1.40	4.4	3.8	0.038	2.32	2.83	2.24	2.83	2.57	2.44	3	2.5383333	1.181877873	0.85	1.004596192	1.004596192	1.35	0.0513	0.051535785	
6	1.30	5.7	4.9	0.049										0.85		1.018413795	1.45	0.07105	0.0723583	
7	1.60	7.3	11.5	0.115										0.85		1.035420077	1.35	0.15525	0.160748967	
8	1.10	8.4	11.8	0.118										0.85		1.047111896	1.3	0.1534	0.160626965	
9	1.50	9.9	10	0.1										0.85		1.063055285	1.25	0.125	0.132881911	
10	1.00	10.9	15.5	0.155	2.41	2.31	2.77	2.12	2.3	2.34	3	2.375	1.263157895	0.85	1.073684211	1.073684211	0.85	0.13175	0.141457895	
11	0.70	11.6	14.3	0.143										0.85		1.010936432	1	0.143	0.14456391	
12	1.30	12.9	19.5	0.195										0.85		0.894404843	0.85	0.16575	0.148247603	
13	0.40	13.3	31.2	0.312										0.85		0.85854897	0.5	0.156	0.133933639	
14	0.60	13.9	37.3	0.373										0.85		0.80476516	0.9	0.3357	0.270159664	
15	1.20	15.1	37.5	0.375	5.11	4.92	4.59	4.79	4.8	5.05	4	4.8766667	0.820232399	0.85	0.697197539	0.697197539	0.95	0.35625	0.248376623	
16	0.70	15.8	14.2	0.142										0.85		0.620253041	0.65	0.0923	0.057249356	
17	0.60	16.4	20	0.2										0.85		0.554300613	0.8	0.16	0.088680098	
18	1.00	17.4	7.2	0.072	5.89	6.04	5.15	5.67	5.94	5.74	3	5.7383333	0.522799884	0.85	0.444379901	1.004596192	0.75	0.054	0.054248194	
19	0.50	17.9	12.5	0.125										0.85		1.004596192	0.75	0.09375	0.094180893	
20	1.00	18.9	19	0.19										0.85		1.004596192	0.65	0.1235	0.12406763	
21	0.30	19.2	0	0										0.85		0	0	0.5	0	0
22	0.70	19.9	0	0										0.85		0	0	0.35	0	0

Datos Utilizados para el Cálculo del Caudal del Segundo Punto Aforado

SEGUNDO AFORO, SAN ANTONIO		25/9/2025	11:45	coordenada X UTM:	784991.1	coordenada Y UTM:	9998793														
Punto	X_UTM (m)	Y_UTM (m)	Z (m)	x estación (m)	RÍO (cm)	Profundidad (m)	t1 (s)	t2 (s)	t3 (s)	t4 (s)	t5 (s)	t6 (s)	L tramo (m)	t_prom (s)	V_superf (m/s)	k	V_media (m/s)	V_interp (m/s)	ancho_sub (m)	area_sub (m²)	Q_sub (m³/s)
1	784993.635	9998792.175	2344.571	0	0	0									0.85		0.85	0	0.53840621	0	0
2	784993.013	9998793.054	2344.247	1.076812425	0	0									0.85		0.85	0	0.79389037	0	0
3	784992.78	9998793.502	2344.118	1.581780741	5	0.05	2.45	2.45	2.89	2.52	2.5	2.24	3	2.50833	1.19601	0.85	1.0166113	1.0166113	0.71365658	0.03568283	0.03627557
4	784992.328	9998794.306	2343.971	2.504125579	15	0.15									0.85		0.85	1.03848452	0.79768579	0.11965287	0.12425765
5	784992.006	9998794.897	2343.963	3.177152324	19	0.19	2.44	2.63	2.43	2.71	1.92	2.38	3	2.41833	1.24052	0.85	1.05444521	1.05444521	0.43966617	0.08353657	0.08808474
6	784991.907	9998795.078	2343.834	3.383457923	28	0.28									0.85		0.85	0.94520478	0.30409122	0.08514554	0.08047997
7	784991.706	9998795.426	2343.743	3.78533477	25	0.25	3.37	3.27	3.98	3.22	3.36	3.69	3	3.48167	0.86166	0.85	0.73240785	0.36574437	0.09143609	0.06696851	
8	784991.506	9998795.688	2343.766	4.114946662	33	0.33									0.85		0.85	0.74205477	0.38019049	0.12546286	0.09310031
9	784991.305	9998796.069	2343.763	4.545715742	35	0.35									0.85		0.85	0.75466231	0.45055735	0.13769907	0.11900658
10	784990.965	9998796.394	2343.791	5.01606136	25	0.25									0.85		0.85	0.76842816	0.47320064	0.11830016	0.09090518
11	784990.71	9998796.796	2343.746	5.492117029	30	0.3									0.85		0.85	0.78236113	0.45061958	0.13518587	0.10576417
12	784990.419	9998797.106	2343.743	5.917300519	17	0.17	3.14	3.14	3.46	3.14	3.21	3.16	3	3.20833	0.93506	0.85	0.79480519	0.43625667	0.07416363	0.05894564	
13	784990.117	9998797.436	2343.771	6.364630375	17	0.17									0.85		0.85	0.86705732	0.43024724	0.07314203	0.06341833
14	784989.845	9998797.747	2343.791	6.777794991	15	0.15									0.85		0.85	0.93379112	0.42860539	0.06429081	0.06003419
15	784989.601	9998798.118	2343.775	7.22184116	15	0.15									0.85		0.85	1.00551286	0.48593311	0.07288997	0.0732918
16	784989.288	9998798.543	2343.766	7.749661205	10	0.1									0.85		0.85	1.09076566	0.52782004	0.052782	0.0575728
17	784989.601	9998798.968	2343.971	8.277488215	5	0.05	2.37	1.98	2.11	2.24	2.05	2.26	3	2.16833	1.38355	0.85	1.17601845	1.0166113	0.52782005	0.036391	0.03682939
18	784989.914	9998799.393	2344.118	8.805301296	5	0.05									0.85		0.85	1.0166113	0.61746341	0.03087317	0.03138601
19	784990.414	9998799.893	2344.247	9.512408077	0	0									0.85		0.85	0	0.3535539	0	0

Datos Utilizados para el Cálculo del Caudal del Tercer Punto Aforado

TERCER AFORO, 3ER PUNTO LA PAMPA		24/10/2025	9:00	coordenada X UTM:	783869.1	coordenada Y UTM:	9996619													
Punto	Δx (m)	x estación (m)	RÍO (cm)	Profundidad (m)	t1 (s)	t2 (s)	t3 (s)	t4 (s)	t5 (s)	L tramo (m)	t_prom (s)	V_superf (m/s)	k	V_media (m/s)	V_interp (m/s)	ancho_sub (m)	area_sub (m²)	Q_sub (m³/s)		
1	0	0		0										0.85		0	0.7	0	0	
2	1.4	1.4		0										0.85		0	1.85	0	0	
3	2.3	3.7	3.4	0.034	3.96	3.8	3.92	2.99	3.29	3	3.592	0.8351893	0.85	0.71	0.709910913	1.4	0.0476	0.033791759		
4	0.5	4.2	10	0.1										0.85		0.85	0.724114224	2.4	0.24	0.173787414
5	4.3	8.5	5	0.05										0.85		0.85	0.846262696	2.4	0.12	0.101551524
6	0.5	9	6	0.06										0.85		0.85	0.860466007	0.7	0.042	0.036139572
7	0.9	9.9	20	0.2	2.99	3.72	2.87	2.89	1.92	3	2.878	1.0423905	0.85	0.886	0.886031967	1.1	0.22	0.194927033		
8	1.3	11.2	10.55	0.1055										0.85		1.119993865	1.15	0.121325	0.135883256	
9	1	12.2	20.1	0.201										0.85		1.299964557	0.9	0.1809	0.235163588	
10	0.8	13	34	0.34	1.75	1.62	2.21	1.7	1.55	3	1.766	1.6987542	0.85	1.444	1.44394111	0.65	0.221	0.319110985		
11	0.5	13.5	38	0.38										0.85		1.286629237	0.8	0.304	0.391135288	
12	1.1	14.6	39.5	0.395										0.85		0.940543116	0.85	0.33575	0.315787351	
13	0.6	15.2	30	0.3	3.54	3.34	3.7	3.07	3.31	3	3.392	0.884434	0.85	0.752	0.709910913	1	0.3	0.212973274		
14	1.4	16.6	19.4	0.194										0.85		0.709910913	1.5	0.291	0.206584076	
15	1.6	18.2	10	0.1										0.85		0.709910913	0.9	0.09	0.063891982	
16	0.2	18.4	0	0										0.85		0	0.1	0	0	

ANEXO D

Datos Perfiles Transversales

Datos Perfil Transversal Aforo 1

Parámetros (editable)														
Cota BM / Datum (m)	0													
Vista atrás fija VA (m) (altura/lectura fija)	1.27													
Altura de colimación HI (m) = Datum + VA	1.27													
Constante estadimétrica k (m/m)	100													
Punto	HS (m) [input]	HI (m) [input]	Lectura media Lm (m)=[HS+HI]/2	Intercepto S (m)=HS-HI	Distancia óptica radial Dopt (m)=k*S	Δx entre puntos (m)= Dopt_j - Dopt_{j-1}	X acumulada desde orilla izquierda (m)=ΣΔx	Profundidad Río (cm) [input]	Profundidad (m)-cm/100	Cota fondo (m)=HI_colim - Lm	Nivel de agua puntual (m)-Cota fondo + Prof	Nivel de agua (constante) (m)-PROMEDIO zona húmeda		
1	1.575	1.370	1.473	0.205	20.50	0.00	0.00	0	0.000	-0.203	-0.203	-1.569		
2	2.126	1.932	2.029	0.194	19.40	1.10	1.10	0	0.000	-0.759	-0.759	-1.569		
3	2.127	1.931	2.029	0.196	19.60	0.20	1.30	0	0.000	-0.759	-0.759	-1.569		
4	2.569	2.390	2.480	0.179	17.90	1.70	3.00	0	0.000	-1.210	-1.210	-1.569		
5	3.005	2.840	2.923	0.165	16.50	1.40	4.40	4	0.038	-1.653	-1.615	-1.569		
6	3.032	2.880	2.956	0.152	15.20	1.30	5.70	5	0.049	-1.686	-1.637	-1.569		
7	3.048	2.912	2.980	0.136	13.60	1.60	7.30	12	0.115	-1.710	-1.595	-1.569		
8	3.050	2.925	2.988	0.125	12.50	1.10	8.40	12	0.118	-1.718	-1.600	-1.569		
9	3.018	2.908	2.963	0.110	11.00	1.50	9.90	10	0.100	-1.693	-1.593	-1.569		
10	3.052	2.952	3.002	0.100	10.00	1.00	10.90	16	0.155	-1.732	-1.577	-1.569		
11	2.998	2.905	2.952	0.093	9.30	0.70	11.60	14	0.143	-1.682	-1.539	-1.569		
12	3.060	2.980	3.020	0.080	8.00	1.30	12.90	20	0.195	-1.750	-1.555	-1.569		
13	3.158	3.082	3.120	0.076	7.60	0.40	13.30	31	0.312	-1.850	-1.538	-1.569		
14	3.200	3.130	3.165	0.070	7.00	0.60	13.90	37	0.373	-1.895	-1.522	-1.569		
15	3.176	3.120	3.149	0.058	5.80	1.20	15.10	38	0.375	-1.879	-1.504	-1.569		
16	3.023	2.972	2.998	0.051	5.10	0.70	15.80	14	0.142	-1.728	-1.586	-1.569		
17	3.030	2.985	3.008	0.045	4.50	0.60	16.40	20	0.200	-1.738	-1.538	-1.569		
18	2.940	2.905	2.923	0.035	3.50	1.00	17.40	7	0.072	-1.653	-1.581	-1.569		
19	2.980	2.950	2.965	0.030	3.00	0.50	17.90	13	0.125	-1.695	-1.570	-1.569		
20	3.025	3.005	3.015	0.020	2.00	1.00	18.90	19	0.190	-1.745	-1.555	-1.569		
21	2.772	2.755	2.764	0.017	1.70	0.30	19.20	0	0.000	-1.494	-1.494	-1.569		
22	2.455	2.445	2.450	0.010	1.00	0.70	19.90	0	0.000	-1.180	-1.180	-1.569		

Datos Perfil Transversal Aforo 2

Notas

Z (m) se usa como COTA DEL PUNTO (incluye altura de instrumento).

Punto	X (m) [input]	Y (m) [input]	Z (m) [input] (cota fondo)	Profundidad Río (cm) [input]	Profundidad (m)=cm/100	Δd XY (m)=sqrt((ΔX) ² +2*(ΔY) ²)	X acumulada real (m)=ΣΔd	Nivel de agua puntual (m)=Z+Prof (m)	Nivel de agua (constante) (m)=PROMEDIO zona húmeda
1	784993.635	9998792.175	2344.571	0	0.000	0.000	0.000	2344.571	2344.039
2	784993.013	9998793.054	2344.247	0	0.000	1.077	2344.247	2344.247	2344.031
3	784992.780	9998793.502	2344.118	5	0.050	0.505	1.582	2344.168	2344.031
4	784992.328	9998794.306	2343.971	15	0.150	0.922	2.504	2344.121	2344.031
5	784992.006	9998794.897	2343.963	19	0.190	0.673	3.177	2344.153	2344.031
6	784991.907	9998795.078	2343.834	28	0.280	0.206	3.383	2344.114	2344.031
7	784991.706	9998795.426	2343.743	25	0.250	0.402	3.785	2343.993	2344.031
8	784991.506	9998795.688	2343.766	33	0.330	0.330	4.115	2344.096	2344.031
9	784991.305	9998796.069	2343.763	35	0.350	0.431	4.546	2344.113	2344.031
10	784990.965	9998796.394	2343.791	25	0.250	0.470	5.016	2344.041	2344.031
11	784990.710	9998796.796	2343.746	30	0.300	0.476	5.492	2344.046	2344.031
12	784990.419	9998797.106	2343.743	17	0.170	0.425	5.917	2343.913	2344.031
13	784990.117	9998797.436	2343.771	17	0.170	0.447	6.365	2343.941	2344.031
14	784989.845	9998797.747	2343.791	15	0.150	0.413	6.778	2343.941	2344.031
15	784989.601	9998798.118	2343.775	15	0.150	0.444	7.222	2343.925	2344.031
16	784989.288	9998798.543	2343.766	10	0.100	0.528	7.750	2343.866	2344.031
17	784989.601	9998798.968	2343.971	5	0.050	0.528	8.277	2344.021	2344.031
18	784989.914	9998799.393	2344.118	5	0.050	0.528	8.805	2344.168	2344.031
19	784990.414	9998799.893	2344.247	0	0.000	0.707	9.512	2344.247	2344.031

Datos Perfil Transversal Aforo 3

Parámetros (editable)

Cota BM / Datum (m) 0
 Vista atrás fija VA (m) (altura/lectura fija) 1.31
 Altura de colimación HI (m) - Datum + VA 1.31
 Constante estadimétrica k (m/m) 100

Punto	HS (m) [input]	HI (m) [input]	Lectura media Lm (m)=(HS+HI)/2	Intercepto S (m)=HS-HI	Distancia óptica radial Dopt (m)=k*S	Δx entre puntos (m)= Dopt_i - Dopt_{i-1}	X acumulada desde orilla izquierda (m)=ΣΔx	Profundidad Río (cm) [input]	Profundidad (m)=cm/100	Cota fondo (m)=HI - colim - Lm	Nivel de agua puntual (m)=Cota fondo + Prof (m)	Nivel de agua (constante) (m)=PROMEDIO zona húmeda
1	2.587	2.395	2.491	0.192	19.20	0.00	0.00	0	0.000	-1.181	-1.181	-1.811
2	3.068	2.890	2.979	0.178	17.80	1.40	1.40	0	0.000	-1.669	-1.669	-1.811
3	3.310	3.155	3.233	0.155	15.50	2.30	3.70	3	0.034	-1.923	-1.889	-1.811
4	3.365	3.205	3.285	0.160	16.00	0.50	4.20	10	0.100	-1.975	-1.875	-1.811
5	3.265	3.148	3.207	0.117	11.70	4.30	8.50	5	0.050	-1.897	-1.847	-1.811
6	3.260	3.148	3.204	0.112	11.20	0.50	9.00	6	0.060	-1.894	-1.834	-1.811
7	3.378	3.275	3.327	0.103	10.30	0.90	9.90	20	0.200	-2.017	-1.817	-1.811
8	3.315	3.225	3.270	0.090	9.00	1.30	11.20	11	0.106	-1.960	-1.855	-1.811
9	3.350	3.270	3.310	0.080	8.00	1.00	12.20	20	0.201	-2.000	-1.799	-1.811
10	3.410	3.338	3.374	0.072	7.20	0.80	13.00	34	0.340	-2.064	-1.724	-1.811
11	3.462	3.395	3.429	0.067	6.70	0.50	13.50	38	0.380	-2.119	-1.739	-1.811
12	3.482	3.426	3.454	0.056	5.60	1.10	14.60	40	0.395	-2.144	-1.749	-1.811
13	3.420	3.370	3.395	0.050	5.00	0.60	15.20	30	0.300	-2.085	-1.785	-1.811
14	3.318	3.282	3.300	0.036	3.60	1.40	16.60	19	0.194	-1.990	-1.796	-1.811
15	3.262	3.242	3.252	0.020	2.00	1.60	18.20	10	0.100	-1.942	-1.842	-1.811
16	2.530	2.512	2.521	0.018	1.80	0.20	18.40	0	0.000	-1.211	-1.211	-1.811

ANEXO E

Dotación Básica 1 NTE INEN 1680

Tabla 1 NTE INEN 1680 Dotación Básica

Clima	Mayor a 500	De 500 a 201	De 200 a 101	Menor a 100
Frío	120	150	170	200
Templado	135	160	185	210
Cálido	150	170	200	220

Nota. Dotación básica de agua potable (L/hab·día) en función del clima y la densidad poblacional. Tomado de Urbanización. Sistema de abastecimiento de agua potable. Requisitos (NTE INEN 1680), Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN], 2014.

ANEXO F

Porcentajes de incremento de la dotación básica de acuerdo con servicios comunales.

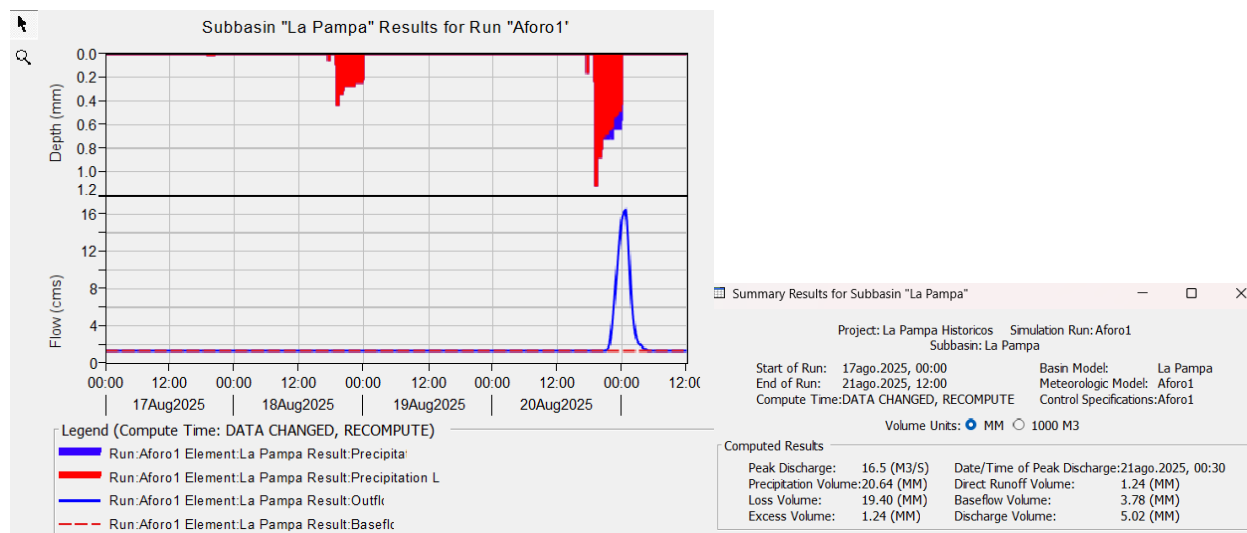
<i>Servicio o equipamiento</i>	<i>Porcentaje de incremento (%)</i>
<i>Jardín de infantes</i>	5
<i>Escuela primaria</i>	8
<i>Colegio secundario</i>	5
<i>Parque infantil</i>	5
<i>Plaza barrial</i>	7
<i>Canchas o centros deportivos</i>	10
<i>Sala o centro comunal</i>	5
<i>Guardería</i>	3
<i>Subcentro o centro de salud</i>	15
<i>Locales comerciales y mercado</i>	12
<i>Oficinas públicas, policía, bomberos, bancos</i>	10
<i>Otros</i>	10

Nota. Porcentajes de incremento de la dotación básica de agua potable según servicios comunales. Tomado de Urbanización. Sistema de abastecimiento de agua potable. Requisitos (NTE INEN 1680), Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN], 2014.

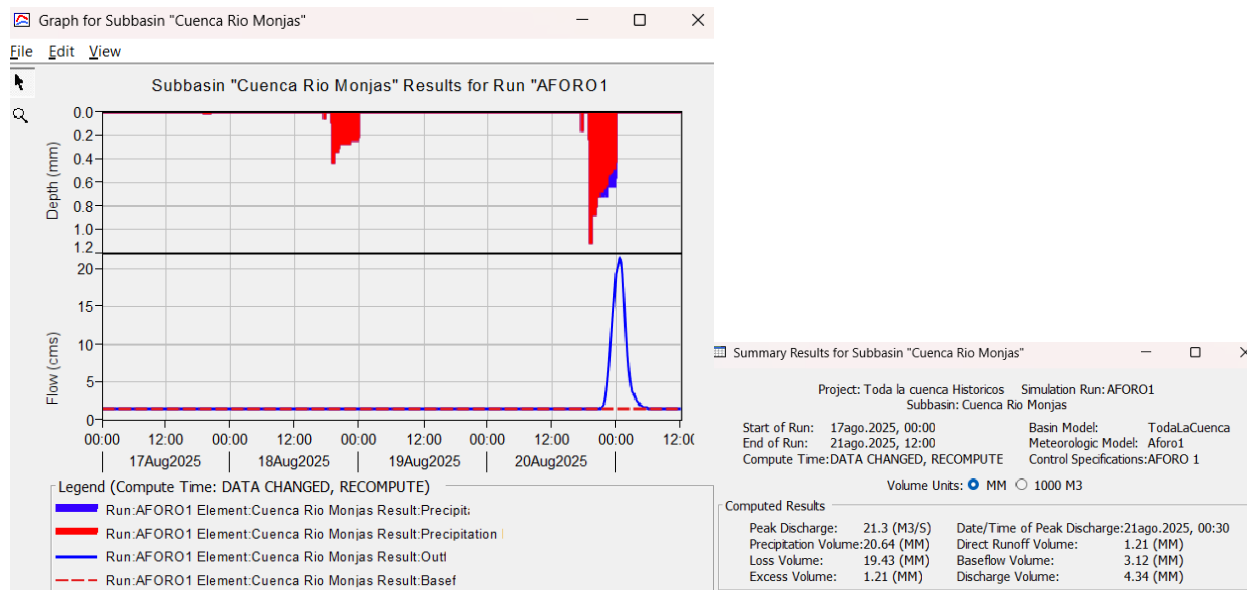
ANEXO G

Resumen de Resultados e hidrogramas de la modelación histórica en HEC-HMS.

(1) Resultados Aforo 1

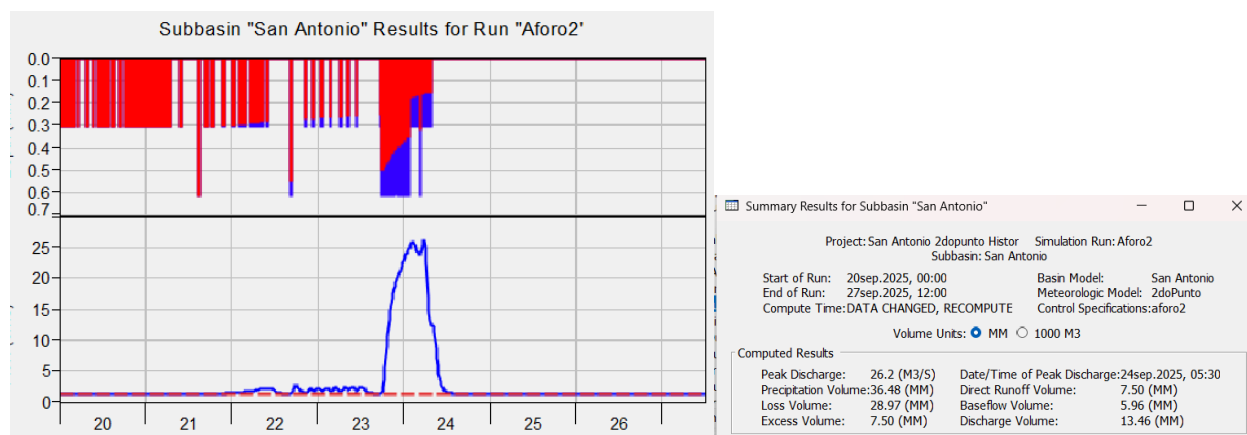


Nota. Los resultados corresponden solo a la modelación del sector La Pampa.

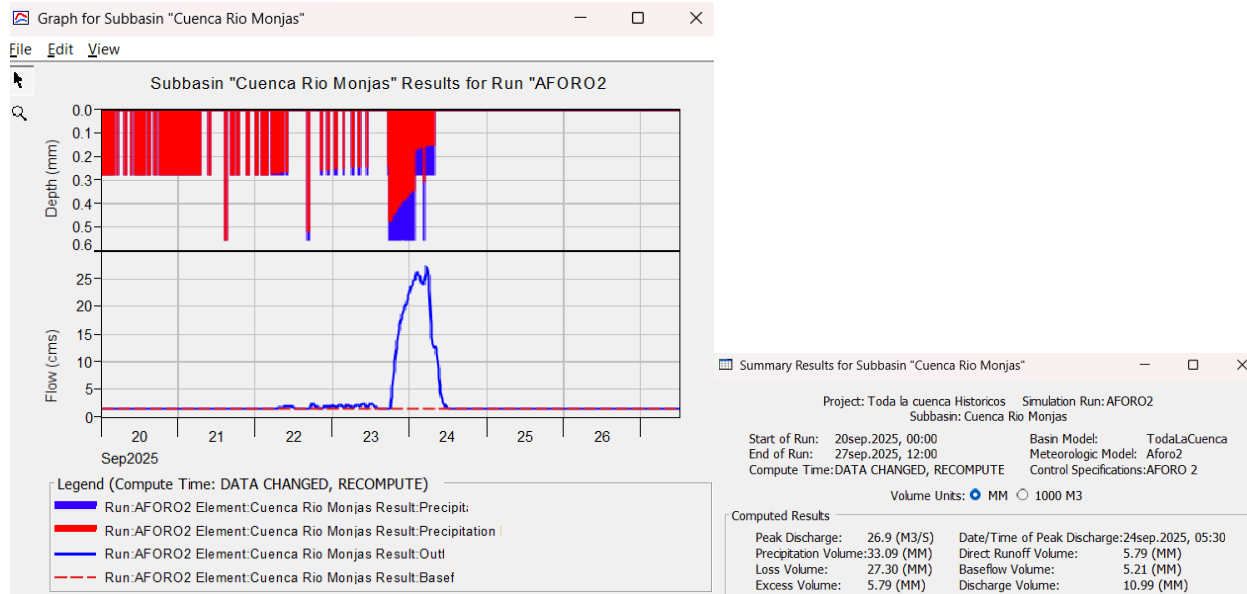


Nota. Los resultados corresponden solo a la modelación de toda la cuenca.

(2) Resultados Aforo 2

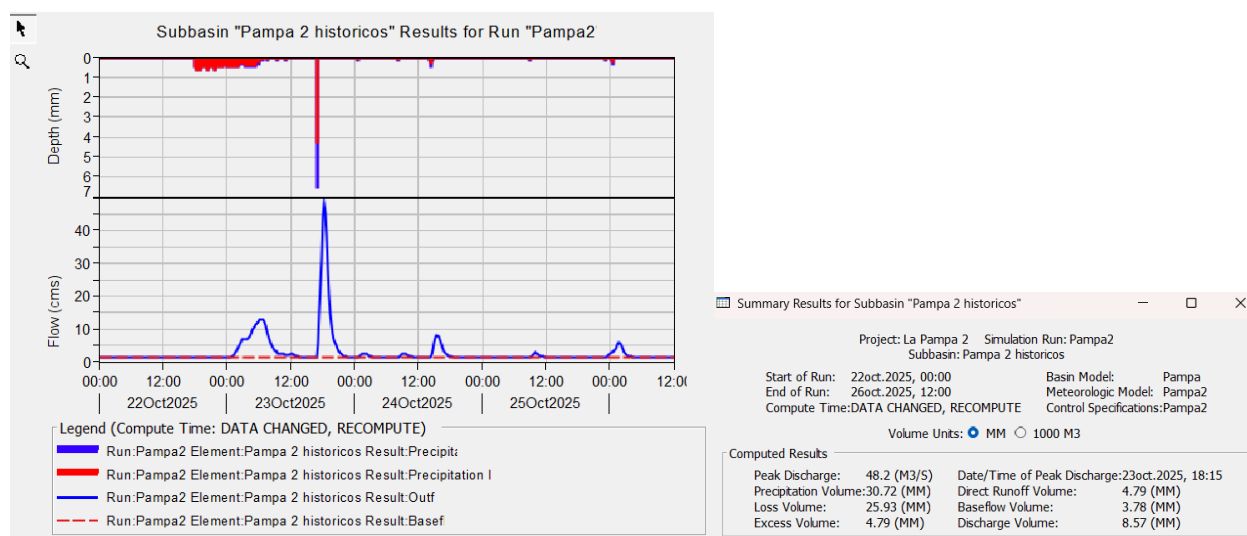


Nota. Los resultados corresponden solo a la modelación del sector San Antonio.

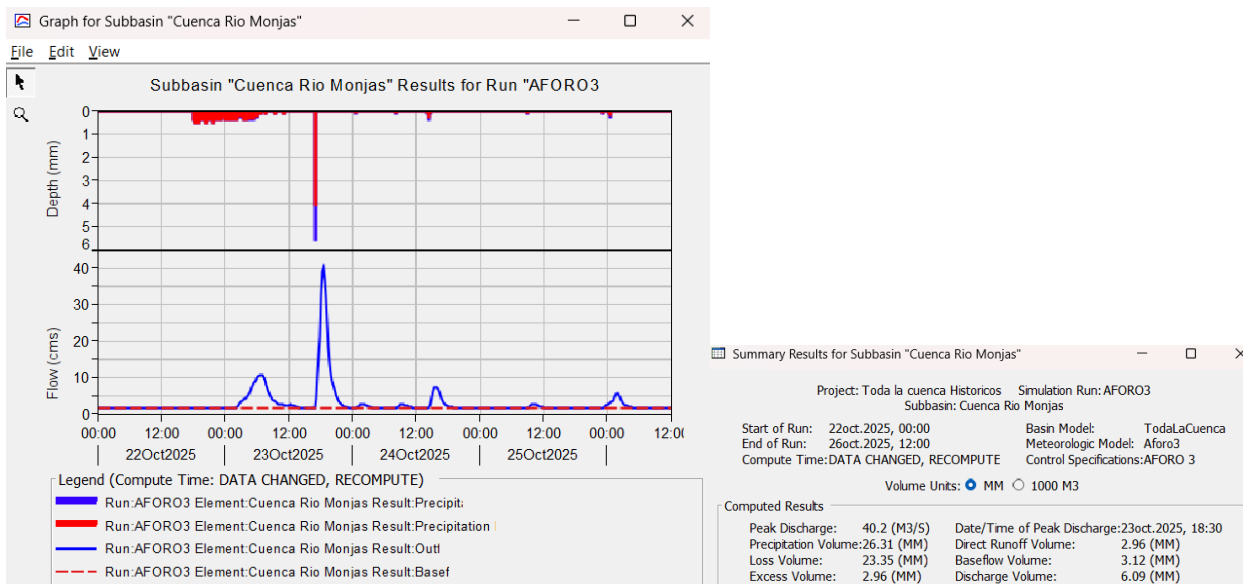


Nota. Los resultados corresponden solo a la modelación de toda la cuenca.

(3) Resultados aforo 3



Nota. Los resultados corresponden solo a la modelación del sector La Pampa.

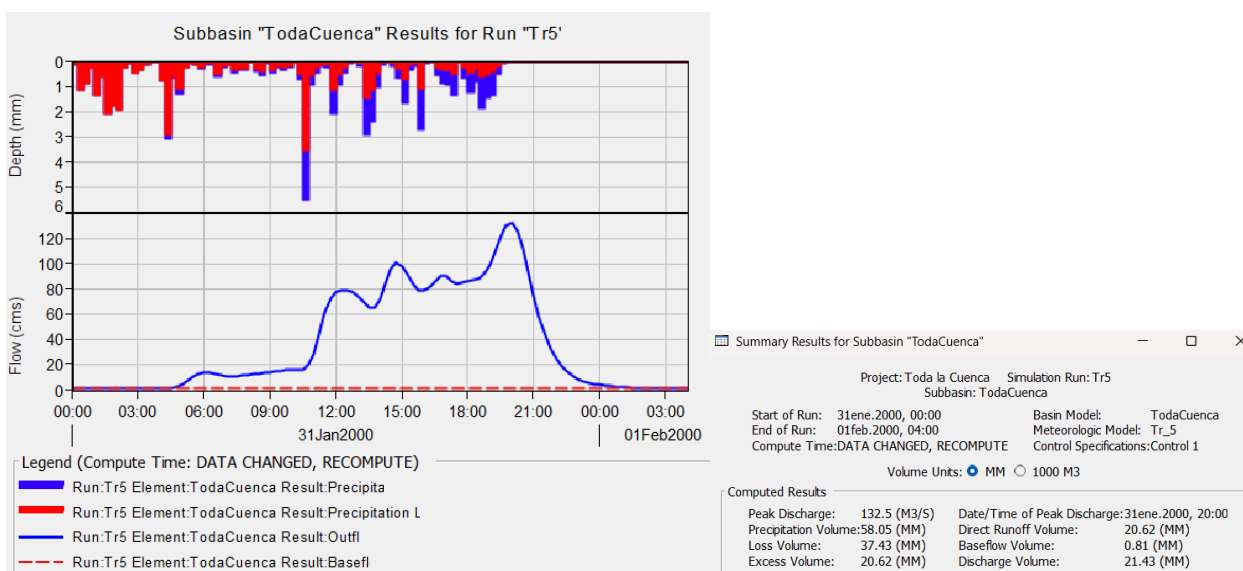


Nota. Los resultados corresponden solo a la modelación de toda la cuenca.

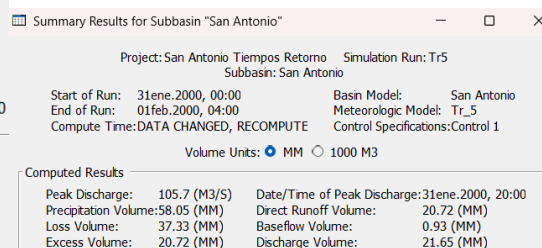
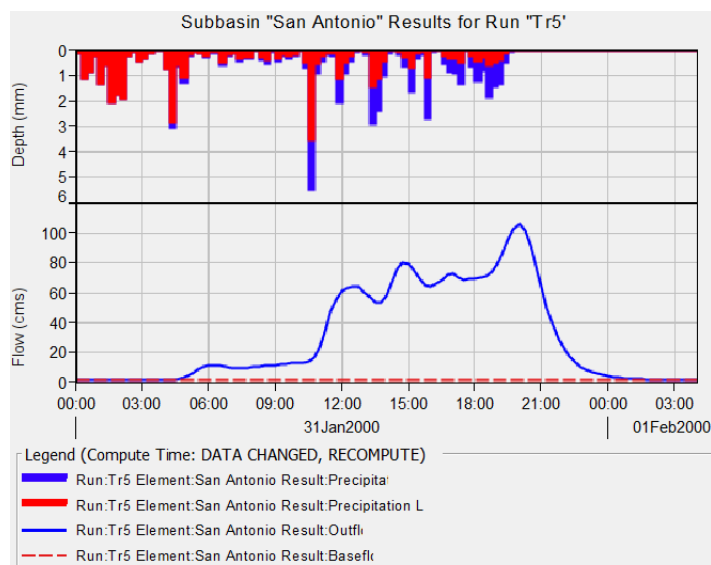
ANEXO H

Resumen de Resultados e hidrogramas de la modelación predictiva en HEC-HMS.

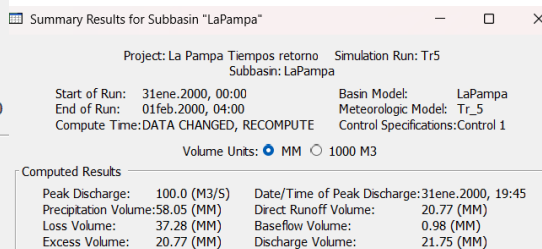
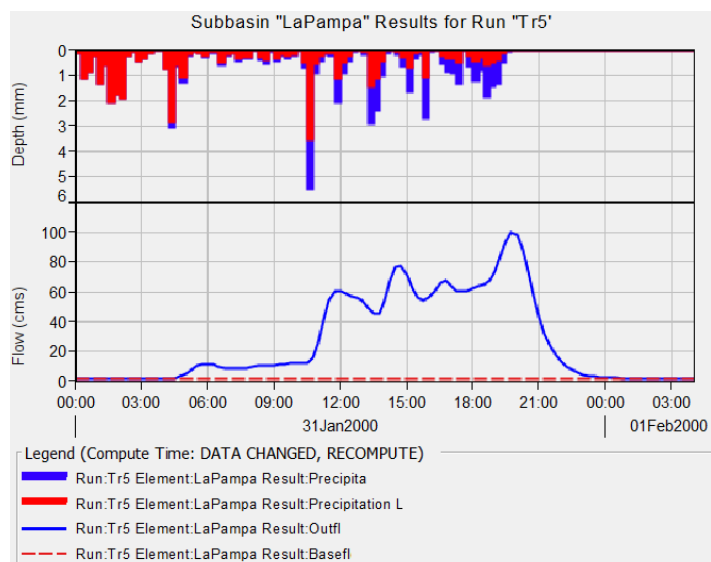
(1) Modelación predictiva Tr 5



Nota. Los resultados corresponden solo a la modelación de Toda la cuenca.

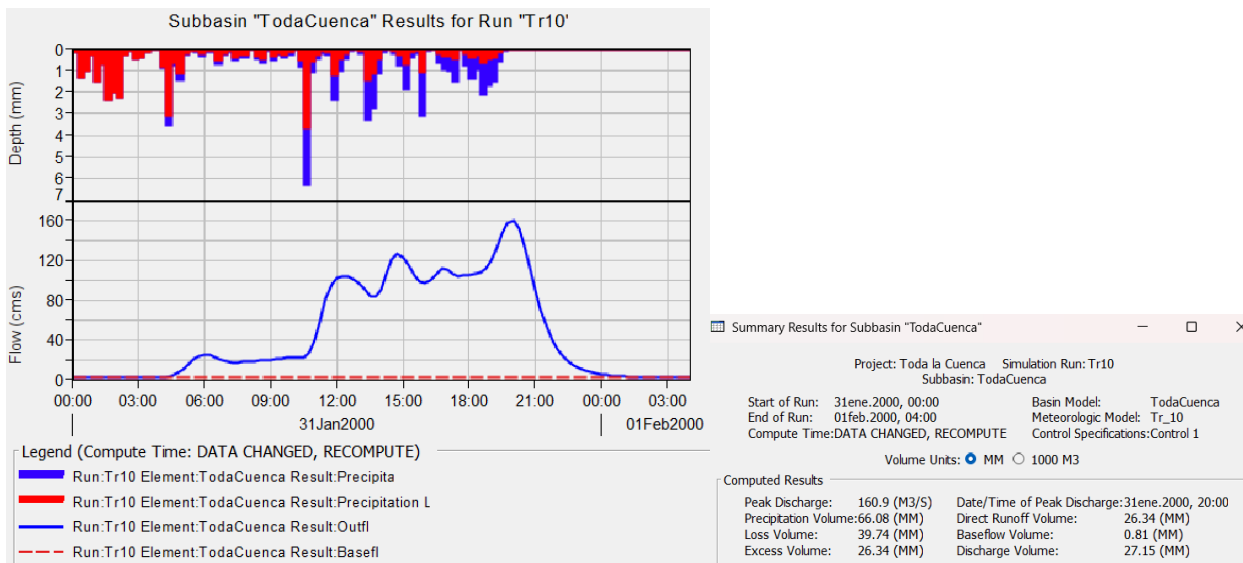


Nota. Los resultados corresponden solo a la modelación del sector San Antonio.

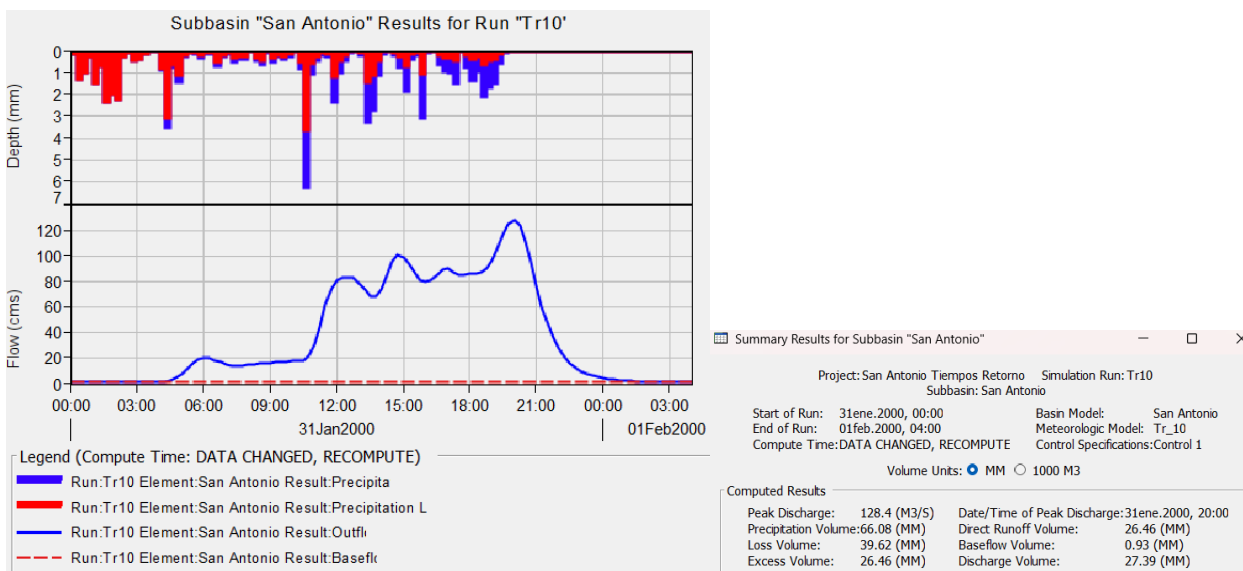


Nota. Los resultados corresponden solo a la modelación del sector La Pampa.

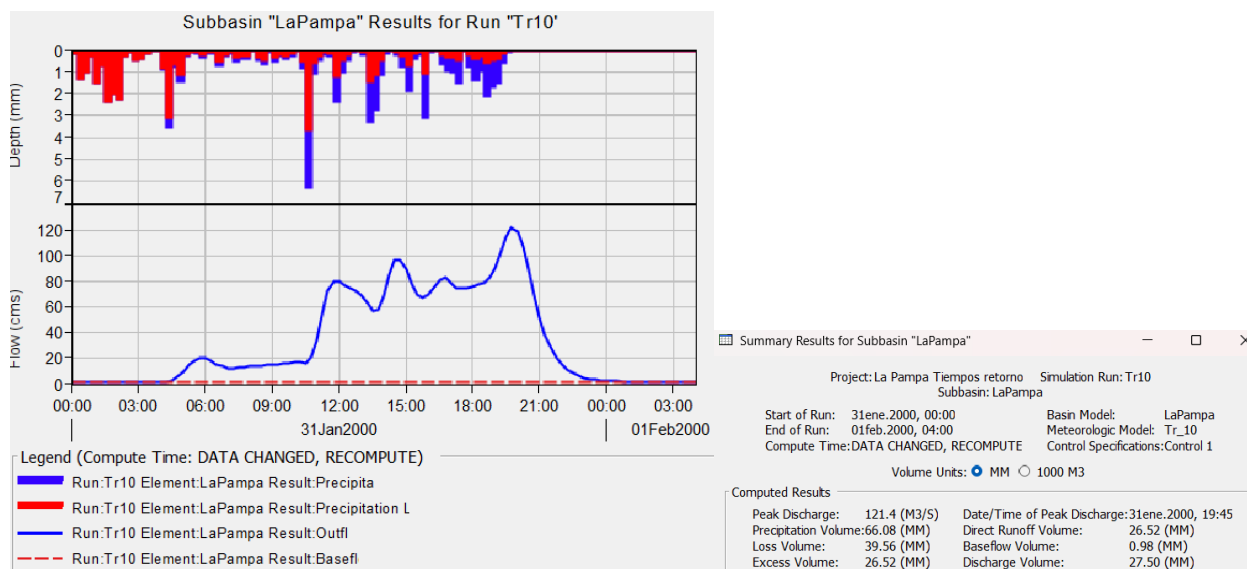
(2) Modelación predictiva Tr 10



Nota. Los resultados corresponden solo a la modelación de toda la cuenca.

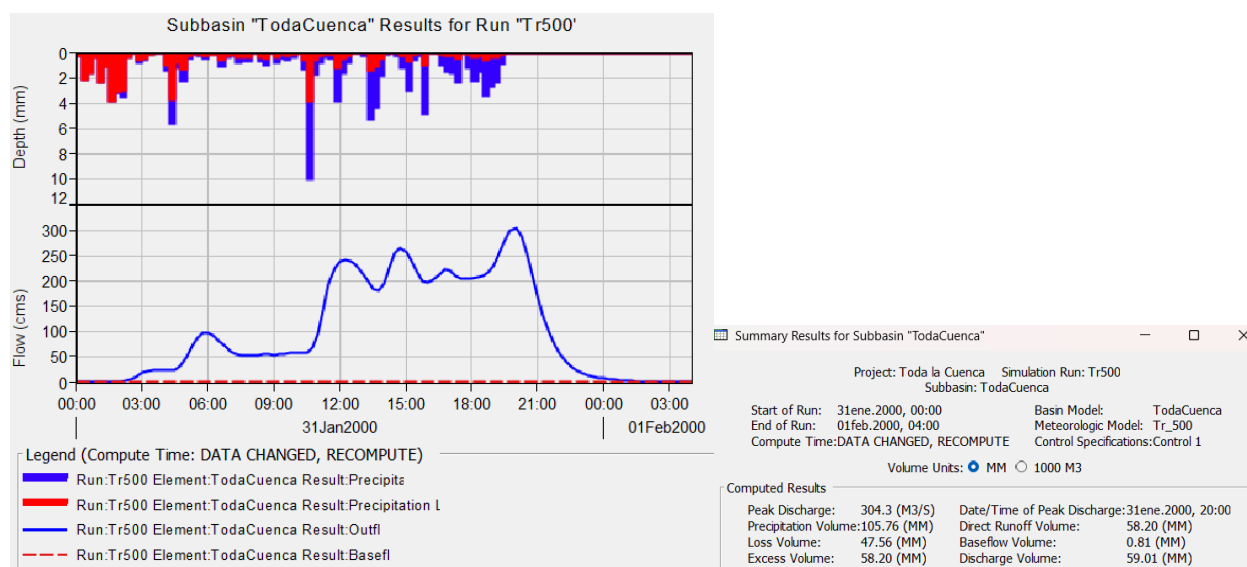


Nota. Los resultados corresponden solo a la modelación del sector San Antonio.

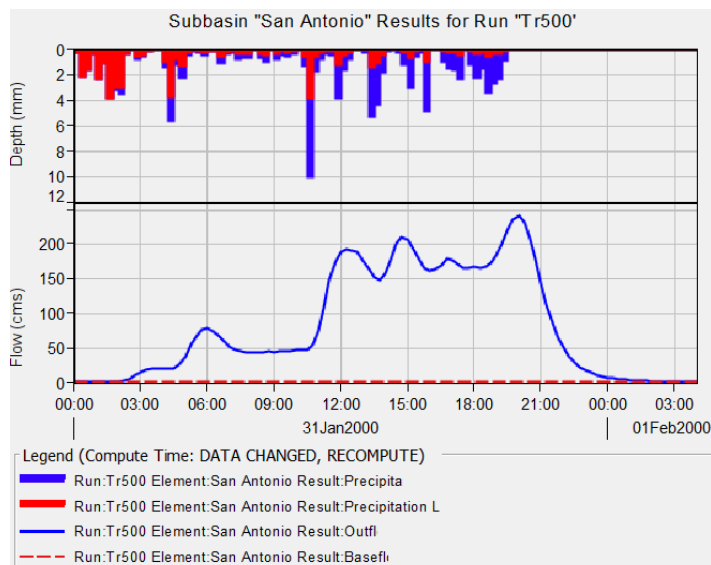


Nota. Los resultados corresponden solo a la modelación del sector La Pampa.

(3) Modelación predictiva Tr 500



Nota. Los resultados corresponden solo a la modelación de toda la cuenca.



Summary Results for Subbasin "San Antonio"

Project: San Antonio Tiempos Retorno Simulation Run: Tr500
Subbasin: San Antonio

Start of Run: 31ene.2000, 00:00 Basin Model: San Antonio
End of Run: 01feb.2000, 04:00 Meteorologic Model: Tr_500
Compute Time: DATA CHANGED, RECOMPUTE Control Specifications: Control 1

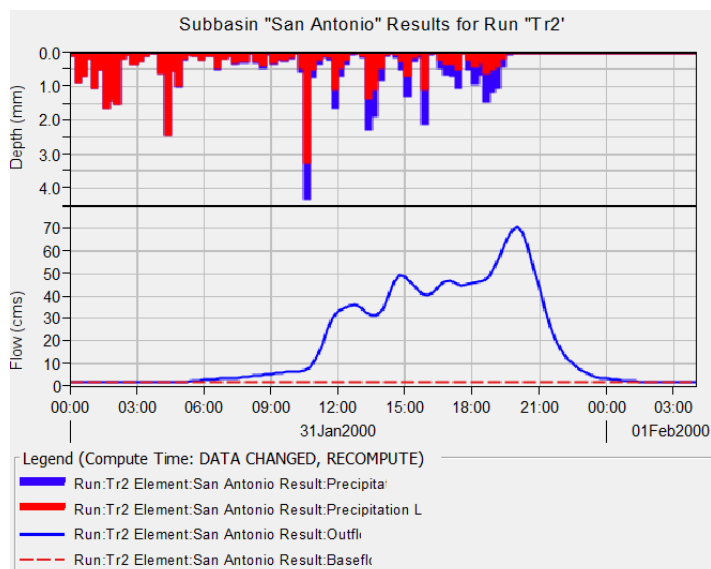
Volume Units: MM 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge:	242.5 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	31ene.2000, 20:00
Precipitation Volume:	105.76 (MM)	Direct Runoff Volume:	58.37 (MM)
Loss Volume:	47.39 (MM)	Baseflow Volume:	0.93 (MM)
Excess Volume:	58.37 (MM)	Discharge Volume:	59.30 (MM)

Nota. Los resultados corresponden solo a la modelación del sector San Antonio.

(4) Modelación Predictiva Tr 2



Summary Results for Subbasin "San Antonio"

Project: San Antonio Tiempos Retorno Simulation Run: Tr2
Subbasin: San Antonio

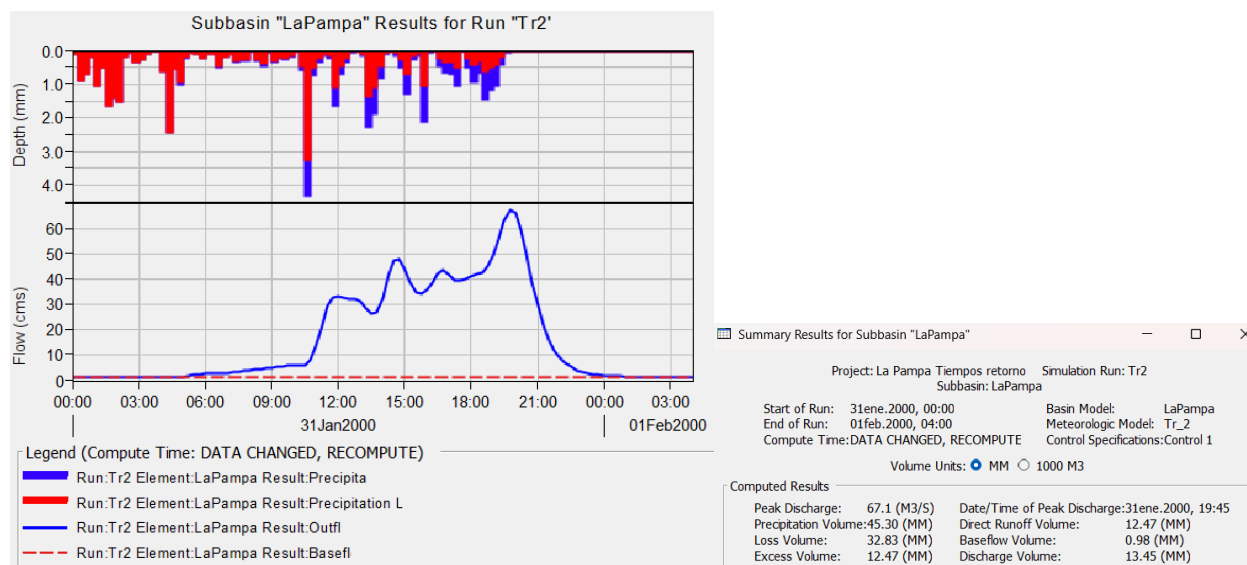
Start of Run: 31ene.2000, 00:00 Basin Model: San Antonio
End of Run: 01feb.2000, 04:00 Meteorologic Model: Tr_2
Compute Time: DATA CHANGED, RECOMPUTE Control Specifications: Control 1

Volume Units: MM 1000 M3

Computed Results

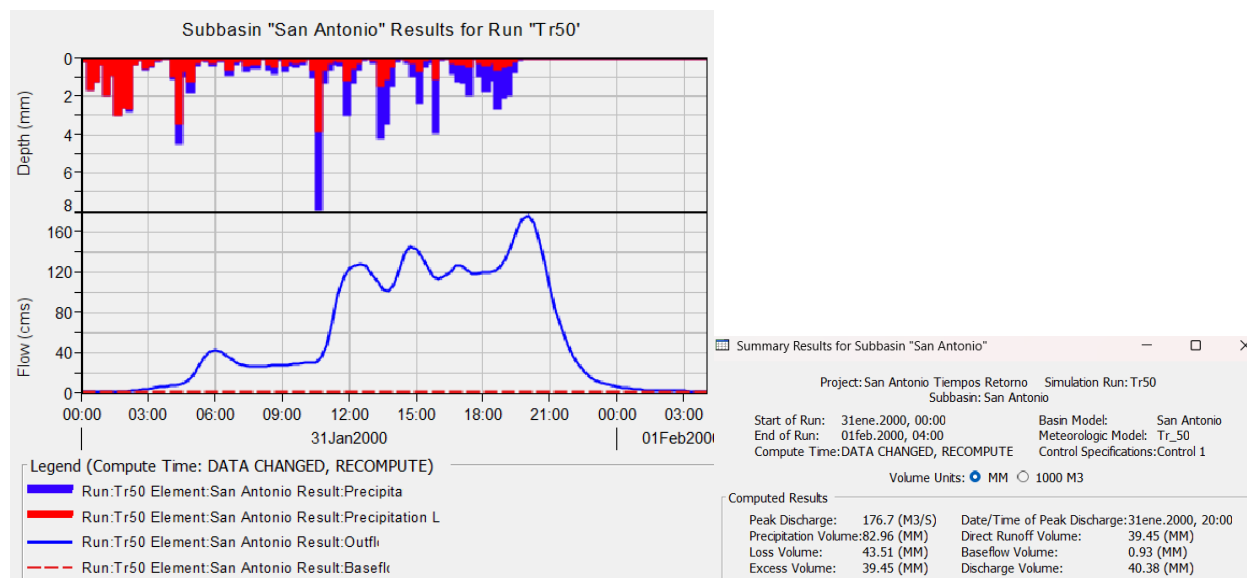
Peak Discharge:	70.9 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	31ene.2000, 20:00
Precipitation Volume:	45.30 (MM)	Direct Runoff Volume:	12.43 (MM)
Loss Volume:	32.87 (MM)	Baseflow Volume:	0.93 (MM)
Excess Volume:	12.43 (MM)	Discharge Volume:	13.36 (MM)

Nota. Los resultados corresponden solo a la modelación del sector San Antonio.

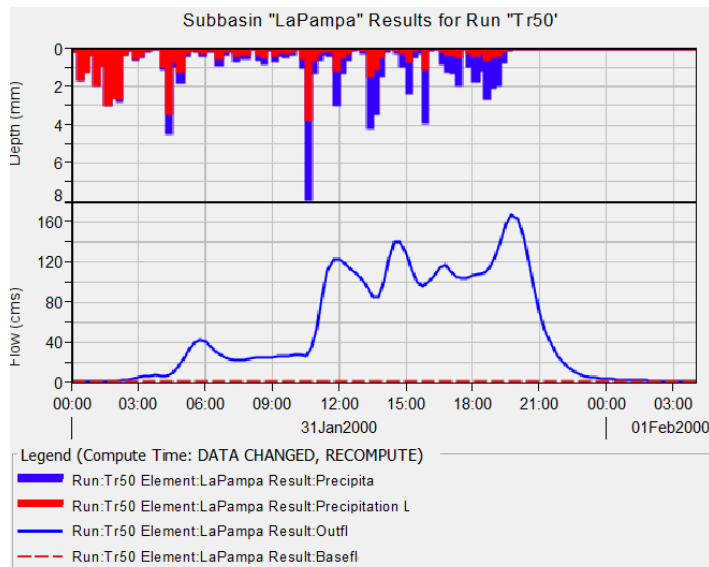


Nota. Los resultados corresponden solo a la modelación del sector La Pampa.

(5) Modelación predictiva Tr 50



Nota. Los resultados corresponden solo a la modelación del sector San Antonio.



Summary Results for Subbasin "LaPampa"

Project: La Pampa Tiempos retorno Simulation Run: Tr50
 Subbasin: LaPampa

Start of Run: 31ene.2000, 00:00 Basin Model: LaPampa
 End of Run: 01feb.2000, 04:00 Meteorologic Model: Tr_50
 Compute Time: DATA CHANGED, RECOMPUTE Control Specifications: Control 1

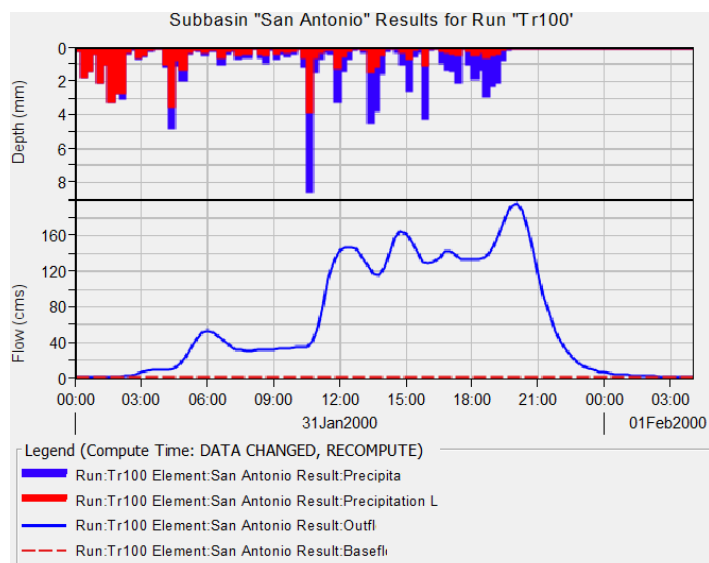
Volume Units: MM 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge: 166.9 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge: 31ene.2000, 19:45
Precipitation Volume: 82.96 (MM)	Direct Runoff Volume: 39.52 (MM)
Loss Volume: 43.43 (MM)	Baseflow Volume: 0.98 (MM)
Excess Volume: 39.52 (MM)	Discharge Volume: 40.50 (MM)

Nota. Los resultados corresponden solo a la modelación del sector La Pampa.

(6) Modelación predictiva Tr 100



Summary Results for Subbasin "San Antonio"

Project: San Antonio Tiempos Retorno Simulation Run: Tr100
 Subbasin: San Antonio

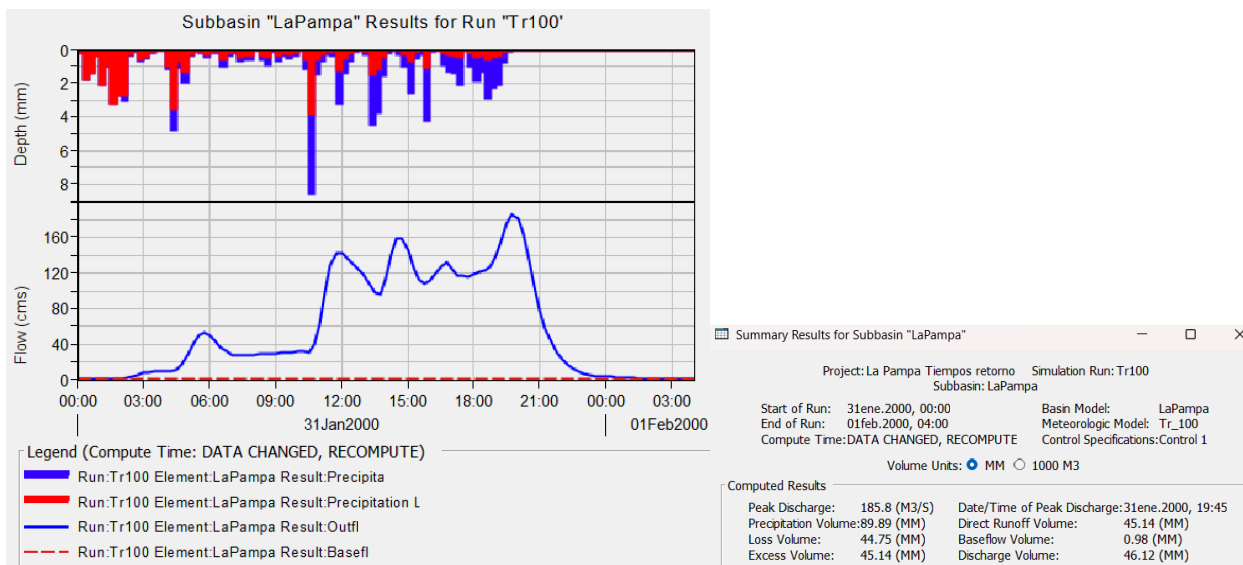
Start of Run: 31ene.2000, 00:00 Basin Model: San Antonio
 End of Run: 01feb.2000, 04:00 Meteorologic Model: Tr_100
 Compute Time: DATA CHANGED, RECOMPUTE Control Specifications: Control 1

Volume Units: MM 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge: 196.7 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge: 31ene.2000, 20:00
Precipitation Volume: 89.89 (MM)	Direct Runoff Volume: 45.07 (MM)
Loss Volume: 44.82 (MM)	Baseflow Volume: 0.93 (MM)
Excess Volume: 45.07 (MM)	Discharge Volume: 46.00 (MM)

Nota. Los resultados corresponden solo a la modelación del sector San Antonio.



Nota. Los resultados corresponden solo a la modelación del sector La Pampa.