

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE HÁBITAT, INFRAESTRUCTURA Y CREATIVIDAD
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

EVALUACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE EVENTOS
EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN EN EL PARQUE METROPOLITANO
GUANGÜILTAGUA (QUITO): MODELACIÓN EN HEC-HMS PARA
DETERMINAR CAUDALES DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL Y
ZONAS DE INUNDACIÓN

AUTOR:

ORBE ANDRADE ROBERTO ANDRES

TUTOR:

DR. JOSEPH SÁNCHEZ-BALSECA

QUITO DM, ENERO 2026

DEDICATORIA

A mi madre, quien ha sido el impulso constante de mi vida. Gracias por depositar siempre toda tu confianza en mí y por hacer todo lo posible para que yo viviera este sueño, a costa de tu propio esfuerzo y sacrificio. Este logro es tan tuyo como mío, señora mamá.

A mi familia, por aportar siempre con su granito de arena y sus palabras de aliento que siempre me motivaron a continuar sin detenerme ni por un segundo. Gracias por construir y ser parte de ese refugio al que tengo la fortuna de llamar hogar.

Y a todas las personas que formaron parte de este proceso. A quienes me apoyaron cuando lo necesité, a quienes estuvieron presentes en el día a día ayudándome a sobrellevar las cargas de este camino, y a quienes, a pesar de la distancia, me hicieron sentir su cercanía y preocupación. Gracias por motivarme a cumplir mis objetivos.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador por abrirnos las puertas en aquellos tiempos de pandemia, cuando la incertidumbre era el temor de cada día. Agradezco que nos dieran la oportunidad a cientos de jóvenes de acceder a una educación de excelencia y, sobre todo, por brindarnos las herramientas para forjar nuestro futuro profesional en medio de la adversidad.

A mis profesores y profesoras, quienes desde el primer día demostraron un interés genuino por brindarnos una educación diferente. Gracias por no enfocarse solo en la materia y enseñarnos valores profesionales que despertaron en nosotros una conciencia crítica sobre la realidad de nuestro país.

A mi tutor, por su guía y acompañamiento constante en todo este proceso. Gracias por su predisposición para resolver dudas y por su vocación de enseñar, logrando que este proyecto no sea solo un requisito de grado, sino una herramienta útil que aporte valor real a nuestra área de desarrollo.

Finalmente, quiero agradecer a todas las personas e instituciones que compartieron sus conocimientos y recursos para el desarrollo de este trabajo. Es vital reconocer a quienes luchan por liberar la información, publicando sus hallazgos y trabajos para que el conocimiento sirva al mundo entero.

RESUMEN

Las inundaciones urbanas se han intensificado en ciudades de alta montaña como Quito, donde las pendientes pronunciadas y la rápida urbanización amplifican los riesgos de escorrentía. Aunque la infraestructura verde se promueve para la mitigación de inundaciones, la evidencia cuantitativa de su capacidad protectora en parques metropolitanos andinos es escasa. Este estudio evalúa cómo el Parque Metropolitano Guangüiltagua regula la escorrentía ante eventos extremos históricos (1981–2025) mediante el uso de precipitación satelital CHIRPS, curvas IDF basadas en la distribución de Gumbel y modelación hidrológica-hidráulica en HEC-HMS y HEC-RAS.

Los resultados demuestran que, bajo condiciones forestales actuales (CN=45), el parque absorbe casi la totalidad de tormentas con periodos de retorno de 5 años en varias microcuencas. En contraste, un escenario hipotético de urbanización (CN=85) incrementa los caudales pico hasta en un 700% para eventos de 500 años, alcanzando picos de 7.8 m³/s en la unidad más crítica (MIC 10). La validación estadística mostró una fuerte consistencia ($R^2 > 0.93$) al contrastar las tendencias con el Método Racional. Esta investigación demuestra que preservar los espacios verdes urbanos es una estrategia de resiliencia basada en la naturaleza altamente efectiva para ciudades de montaña con escasez de datos, ofreciendo un marco metodológico replicable para la planificación urbana adaptada al cambio climático.

ABSTRACT

Urban flooding is intensifying in high-altitude cities like Quito, where steep terrain and rapid urbanization amplify runoff risks. While green infrastructure is increasingly promoted for flood mitigation, quantitative evidence of its protective capacity against extreme rainfall in Andean metropolitan parks remains scarce—a critical gap this study addresses. We evaluate how the Guanguiltagua Metropolitan Park buffers runoff under historical extreme events (1981–2025) using CHIRPS satellite rainfall, Gumbel-based IDF curves, and integrated HEC-HMS and HEC-RAS modeling.

Results show that under current forested conditions (CN=45), the park fully absorbs 5-year storms in several micro-catchments. Conversely, a hypothetical urbanized scenario (CN=85) increases peak discharges by up to 700% for 500-year events, reaching 7.8 m³/s in the most critical unit (MIC 10). Statistical validation confirmed a strong consistency ($R^2 > 0.93$) when contrasting trends with the Rational Method. Our approach demonstrates that preserving urban green spaces is a highly effective, nature-based flood resilience strategy in data-scarce mountain cities. This methodology offers a replicable framework for integrating satellite data and hydrological modeling into climate-adaptive urban planning.

Tabla de contenido

1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES	9
1.1. TEMA.....	9
1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	9
1.3. OBJETIVOS	10
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	10
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
1.4. DISEMINACIÓN DE LA INFORMACIÓN	10
1.5. ALCANCE	10
1.6. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	11
2.1. MARCO TEÓRICO	11
2.1.1. FUNDAMENTOS HIDROLÓGICOS Y TOPOGRÁFICOS.....	11
2.1.2. ANÁLISIS DE EVENTOS HIDROLÓGICOS	12
2.1.3. GESTIÓN Y MODELACIÓN	13
2.2. ESTADO DEL ARTE	15
3. CAPITULO III: METODOLOGÍA	22
3.1. FASE 1: ANÁLISIS HIDROMETEOROLÓGICO Y TORMENTAS DE DISEÑO.....	22
3.1.1. Fuente de Datos de Precipitación (CHIRPS).....	22
3.1.2. Modelo Probabilístico (Distribución de Gumbel).....	22
3.1.3. Construcción de Curvas IDF	23
3.2. FASE 2: CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA Y ESCENARIOS.....	23
3.2.1. Procesamiento Digital del Terreno (DEM y QGIS)	23
3.2.2. Definición de Escenarios de Uso de Suelo (SCS-CN)	24
3.3. FASE 3: MODELACIÓN HIDROLÓGICA (HEC-HMS).....	25
3.4. FASE 4: MODELACIÓN HIDRÁULICA (HEC-RAS).....	26
3.4.1. Selección del Método Numérico	27
3.4.2. Discretización del Dominio (Malla Computacional).....	27
3.4.3. Parámetros de Resistencia al Flujo.....	28
3.4.4. Condiciones de Estabilidad Numérica.....	28
3.4.5. Definición de Escenarios	28
3.5. FASE 5: VALIDACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA PLAUSIBILIDAD DEL MODELO	29
3.5.1. Fase 1: Validación de la Intensidad de Lluvia.....	29

3.5.2.	Fase 2: Validación de la Tendencia de Caudales Máximos	29
4.	CAPITULO IV: RESULTADOS.....	31
4.1.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN (CURVAS IDF).....	31
4.2.	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA (HEC-HMS)	31
4.2.1.	Caudales Máximos de Escorrentía	31
4.2.2.	Volúmenes Totales de Escorrentía	34
4.3.	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA (HEC-RAS).....	35
4.3.1.	Análisis Comparativo del Evento de Diseño (TR = 100 AÑOS).....	35
4.3.2.	Análisis Comparativo del Evento Extremo (TR=500 AÑOS)	39
4.4.	VALIDACIÓN Y DESEMPEÑO DEL MODELO	43
4.4.1.	Validación Meteorológica	43
4.4.2.	Validación Hidrológica (Tendencia de Caudales).....	44
4.5.	ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA URBANIZACIÓN	46
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	47
5.1.	Plausibilidad hidráulica y coherencia teórica	47
5.2.	Limitaciones del modelo: flujo de agua clara vs. Hiperconcentrado	47
5.3.	Implicaciones para la Zonificación.....	47
5.4.	Líneas de Investigación y Trabajos Futuros	48
6.	CAPÍTULO V	49
6.1.	CONCLUSIONES.....	49
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	50
8.	ANEXOS.....	55
8.1.	variación del caudal máximo en las cuencas delimitadas.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa topográfico, red de drenaje y delimitación de microcuencas del Parque Metropolitano Guanguiltagua, Quito	24
Figura 2. Variación de los caudales máximos debido al cambio de uso de suelo en la microcuenca 5.	33
Figura 3 Variación de los caudales máximos debido al cambio de uso de suelo en la microcuenca 10.	34
Figura 4 Mapa de Profundidad - Escenario Forestal (CN=45) – TR=100 Años	36
Figura 5 Mapa de Profundidad - Escenario Urbano (CN=85) – TR=100 Años	37
Figura 6 Mapa de Velocidad - Escenario Forestal (CN=45) - TR 100 Años	38
Figura 7 Mapa de Velocidad - Escenario Urbano (CN=85) - TR 100 Años	39
Figura 8 Mapa de Profundidad - Escenario Forestal (CN=45) – TR=500 Años	40
Figura 9 Mapa de Profundidad - Escenario Urbano (CN=85) – TR=500 Años	41
Figura 10 Mapa de Velocidad - Escenario Forestal (CN=45) - TR 500 Años	42
Figura 11 Mapa de Velocidad - Escenario Urbano (CN=85) - TR 500 Años	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caudales máximos (m^3/s) simulados en HEC-HMS (m^3/s) para los escenarios forestal (CN=45) y urbanizado hipotético (CN=85) a través de los periodos de retorno evaluados.	32
Tabla 2 Volúmenes totales de escorrentía (m^3) simulados en HEC-HMS para los escenarios forestal (CN=45) y urbanizado hipotético (CN=85) a través de los periodos de retorno evaluados.	35
Tabla 3 Comparación estadística (RME) entre las intensidades de lluvia derivadas por satélite (IHEC) y los registros oficiales de la estación terrestre (IINAMHI) a través de los periodos de retorno evaluados.	44
Tabla 4. Caudales máximos (m^3/s) estimados mediante el Método Racional para los escenarios forestal y urbano.....	45
Tabla 5 Coeficiente de determinación (R^2) comparando los caudales pico simulados por HEC-HMS (QHEC) y las estimaciones del Método Racional (QRat) para validar la consistencia hidrológica.	45
Tabla 6. Incremento relativo (%) en el caudal pico resultante del cambio de uso de suelo (de forestal a urbanizado) para todos los periodos de retorno evaluados.	46

1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1. TEMA

Evaluación hidrológica e hidráulica de eventos extremos de precipitación en el parque metropolitano Guanguiltagua (Quito): Modelación en HEC-HMS para determinar caudales de escorrentía superficial y zonas de inundación.

1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

La gestión adecuada de las aguas pluviales en parques urbanos es un componente muy importante para la resiliencia hídrica de las ciudades. En entornos andinos, donde las precipitaciones presentan alta variabilidad espacial y temporal, diversos estudios han evidenciado que la falta de infraestructura adaptativa incrementa significativamente el riesgo de inundaciones urbanas y erosión de cauces naturales (Miller & Hutchins, 2017; Li et al., 2020).

Este tema adquiere mayor relevancia frente a las proyecciones climáticas de UK Climate Projections 2009 (UKCP09), que es un sistema de proyecciones climáticas del Reino Unido que provee escenarios futuros de temperatura y precipitación (Murphy et al., 2009). Este sistema advierte sobre incrementos de hasta un 20 % en las intensidades de lluvia hacia 2085 (Miller & Hutchins, 2017), lo cual complicaría aún más los problemas de drenaje urbano en zonas densamente urbanizadas. Además, la literatura internacional ha demostrado que la presencia de áreas verdes y superficies permeables puede reducir significativamente los picos de escorrentía, con reducciones cercanas al 30% en eventos de lluvia intensa (Flores Armas, 2022), lo que resalta su papel como infraestructura natural de mitigación.

Desde el punto de vista científico, investigaciones previas han señalado que los coeficientes de escorrentía en zonas verdes son considerablemente menores, en este caso, alrededor de 0,20 frente a 0,80 en áreas industriales, lo que evidencia su efecto amortiguador frente a eventos extremos (Li et al., 2020).

En el plano social, este tipo de estudios se alinea con el mandato del Art. 389 de la Constitución ecuatoriana, que establece la obligación del Estado de reducir las vulnerabilidades frente a amenazas naturales. De modo que, generar evidencia científica sobre el rol de los parques metropolitanos en la mitigación de inundaciones no solo responde a un vacío técnico, sino también a una necesidad de política pública que puede ser replicada en otras ciudades de montaña de la región, fortaleciendo la resiliencia hídrica y protegiendo tanto a las personas como a los ecosistemas urbanos.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la escorrentía superficial a diferentes tiempos de retorno de precipitación incluyendo los eventos extremos del parque metropolitano Guangüiltagua en la ciudad de Quito usando modelos hidrológicos e hidráulicos en softwar libre.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar la información hidrometeorológica, topográfica, de infraestructura del Parque Metropolitano Guangüiltagua y su área de influencia, necesaria para el desarrollo de la modelación hidrológica e hidráulica.
2. Simular, mediante HEC-HMS y HEC-RAS, los caudales de escorrentía correspondientes a tiempos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años, así como la extensión de las zonas de inundación y el volumen de escorrentía que se dirige al sistema de alcantarillado de Quito.
3. Analizar la influencia de los eventos de 100 y 500 años asociados al cambio climático.

1.4. DISEMINACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Orbe, R., Sánchez-Balseca, J. (2025). Urban Flood Risk Amplification from Land-Use Change in High-Altitude Metropolitan Parks: A Nature-Based Solution Perspective. Enviado a la revista Natural Hazards (Editor Assigned).

1.5. ALCANCE

Este estudio se centra en el Parque Metropolitano Guangüiltagua y busca, a través de herramientas como HEC-HMS y HEC-RAS, simular el comportamiento del agua ante lluvias de distinta intensidad —desde eventos que ocurren cada 5 años hasta eventos de 500 años— para identificar zonas de inundación y los caudales de escorrentía. Para ello se usarán datos de precipitación del Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) y del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), y los mapas topográficos del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGAP). Quedan fuera aspectos como el diseño detallado de obras, análisis económicos o modelaciones de calidad del agua; el objetivo es generar insumos técnicos que fortalezcan la gestión del riesgo hídrico y la resiliencia urbana de la ciudad.

1.6. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las inundaciones urbanas ya no son un problema lejano y cada vez son más frecuentes (Li et al., 2020). No solo interrumpen la rutina, también pueden cobrarse vidas, dañar la infraestructura que sostiene la economía y generar un caos social difícil de controlar (Li et al., 2020). El cambio climático agrava este panorama; a medida que las temperaturas suben, las lluvias extremas se vuelven más intensas y comunes (Kane et al., 2019; Wasko et al., 2021).

En Europa, las pérdidas económicas entre 1970 y 2006 llegaron a los US\$140 mil millones, como consecuencia de inundaciones en zonas urbanas en 31 países europeos (Li et al., 2020). En América Latina, las proyecciones para Argentina indican un aumento del 13 % en las precipitaciones anuales (Zimmermann et al., 2016). En Quito, la urgencia es evidente, 78 sectores presentan peligro de inundación y 72 riesgo de deslizamientos (Cisneros & Granja, 2023). El crecimiento poblacional del 2,2% y la expansión sobre laderas inestables no ayudan; en barrios como San Enrique de Velasco, la impermeabilización del suelo supera el 80%, reduciendo la infiltración y sobrecargando el alcantarillado (Flores Armas, 2022).

En este contexto, la función hidrológica del Parque Metropolitano Guangüiltagua es muy importante. Al estar situado en las cotas más altas del sector de estudio y actuar como una zona de cabecera natural, el parque es el principal responsable de regular los caudales que drenan hacia los barrios aledaños. Aunque estudios como el de Li et al. (2020) en Gante (Bélgica) muestran que áreas verdes pueden reducir hasta un 80 % la escorrentía superficial, y Kane et al. (2019) en Sídney (Australia) demuestran que parques con sistemas de almacenamiento pueden disminuirla hasta 20 veces, son escasas las evaluaciones integrales en Quito para escenarios realmente extremos.

La pregunta del presente trabajo es ¿Cómo afectan los eventos de precipitación extrema — con periodos de retorno entre 5 y 500 años— a la escorrentía del Parque Guangüiltagua? La respuesta no es trivial, porque las evidencias indican que estos eventos crecen de manera desproporcionada con el calentamiento global (Wasko et al., 2021).

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. FUNDAMENTOS HIDROLÓGICOS Y TOPOGRÁFICOS

- **Escorrentía**

Fracción de la precipitación que fluye sobre la superficie del terreno hacia los cauces, sin infiltrarse en el suelo. (Chow, Maidment, & Mays, 1988).

- **Infiltración**

Proceso mediante el cual el agua de lluvia penetra en el suelo y se mueve hacia las capas internas, reduciendo la cantidad de escorrentía superficial. (Chow, Maidment, & Mays, 1988).

- **Cuenca Hidrográfica**

Área delimitada del terreno que capta la precipitación y la conduce hacia un punto común de salida a través de una red organizada de drenaje. (Chow, Maidment, & Mays, 1988).

- **Red de Drenaje**

Sistema de cauces naturales o artificiales que colectan y transportan el agua dentro de una cuenca hacia su salida principal, siguiendo una estructura jerárquica. (Chow, Maidment, & Mays, 1988).

- **Caudal**

Volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un cauce por unidad de tiempo (m^3/s). (Brunner, 2022).

- **Modelo Digital de Elevación (DEM)**

Un Modelo de Elevación Digital (MED) es una representación digital de la altitud como variable continua sobre una superficie bidimensional, a través de una red regular de valores Z referenciados a un datum común (Roa Lobo & Kamp, 2008).

2.1.2. ANÁLISIS DE EVENTOS HIDROLÓGICOS

- **Hidrograma**

Representación gráfica que muestra cómo varía el caudal en un cauce a lo largo del tiempo durante y después de un evento de lluvia. Permite analizar la respuesta de una cuenca ante la precipitación. (Chow, Maidment, & Mays, 1988).

- **Hietograma**

Gráfico que presenta la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta, normalmente expresada como intensidad o profundidad de lluvia en intervalos de tiempo definidos. (Chow, Maidment, & Mays, 1988).

- **Curva Intensidad–Duración–Frecuencia**

Diagrama que muestra la relación entre la intensidad de lluvia, su duración y la frecuencia (o período de retorno) con la que ocurre. (Chow, Maidment, & Mays, 1988).

- **Tiempo de Retorno (TR)**

Período estadístico donde la magnitud de un evento extremo tiene probabilidad $P=1/TR$ de ser igualado/excedido anualmente. (Salas et al., 2020).

- **Coefficiente de Escorrentía (C)**

Parámetro adimensional que expresa la razón entre el volumen de escorrentía superficial y la precipitación total caída sobre un área determinada. Su magnitud varía según la cobertura y el uso del suelo, pudiendo ser estimado matemáticamente en función del potencial de almacenamiento del terreno derivado del Número de Curva (CN) (Li et al., 2020; United States Department of Agriculture-Soil Conservation Service (USDA-SCS), 1972).

2.1.3. GESTIÓN Y MODELACIÓN

- **Infraestructura Verde (GI)**

La green infrastructure o infraestructura verde es un conjunto de prácticas que filtran, infiltran y evapotranspiran el agua lluvia donde cae para gestionar escorrentías y aportar beneficios ambientales y sociales (Environmental Protection Agency (EPA, 2025).

- **Precipitación Satelital (CHIRPS)**

El conjunto de datos Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) es un registro climático de cuasi-globalidad que combina imágenes satelitales infrarrojas con datos de estaciones in situ para crear series temporales de precipitación de alta resolución (0.05°). Es una herramienta fundamental para el monitoreo de eventos extremos en regiones con baja densidad de estaciones meteorológicas, como las zonas montañosas de los Andes (López-Bermeo et al., 2022).

- **Distribución de Gumbel (Valor Extremo Tipo I)**

La distribución de Gumbel es un modelo estadístico de valores extremos utilizado en hidrología para estimar la probabilidad de ocurrencia de eventos máximos de precipitación a partir de registros históricos. Su aplicación permite derivar lluvias de diseño para distintos periodos de retorno, siendo valorada por su robustez y

simplicidad en el análisis de series de tiempo de longitud moderada (Koutsoyiannis, 2004).

- **Modelación Hidrológica: HEC-HMS**

El Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) es un software diseñado para simular los procesos de precipitación-escorrentía en una amplia variedad de cuencas, permitiendo modelar desde el drenaje urbano hasta la respuesta de grandes ríos (U.S. Army Corps of Engineers (USACE), 2021).

- **Modelación Hidráulica: HEC-RAS**

El River Analysis System (HEC-RAS) es un software que permite realizar simulaciones hidráulicas unidimensionales y bidimensionales en cauces naturales y artificiales. Se utiliza principalmente para determinar niveles de agua, velocidades de flujo y la extensión de zonas de inundación bajo diferentes escenarios de caudal (Brunner, 2022).

- **Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN)**

Acciones encaminadas a proteger, gestionar de forma sostenible y restaurar ecosistemas naturales o modificados, que abordan desafíos sociales (como el riesgo de inundación) de forma eficaz y adaptativa (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), 2020).

2.2. ESTADO DEL ARTE

AUTOR	AÑO Y UBICACIÓN	PROPUESTA	RESULTADOS
Peker, I. B., Gülbaz, S., Demir, V., Orhan, O., & Beden, N.	(2024). Cuenca del Río Göksu, provincia de Mersin, ciudad de Silifke, Turquía.	<p>Integración de HEC-RAS y HEC-HMS con GIS en el modelado de inundaciones y la cartografía de riesgos de inundación:</p> <p>Los autores proponen y demuestran la aplicación de una metodología integrada que combina modelos hidrológicos (HEC-HMS) e hidráulicos (HEC-RAS) dentro de un entorno GIS para modelar inundaciones y, de manera crítica, generar mapas de peligro cuantitativos.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. El modelo HEC-HMS demostró ser eficaz para estimar caudales de escorrentía asociados a diferentes escenarios de lluvia, permitiendo representar adecuadamente los eventos extremos. 2. El uso de HEC-RAS 2D permitió delimitar de manera clara las zonas de inundación y clasificar los niveles de peligro en función de las condiciones hidráulicas del área. 3. La validación de los resultados con datos oficiales confirmó la confiabilidad de la integración entre ambos modelos para la elaboración de mapas de inundación y riesgo.
Yu, X., & Zhang, J.	(2023). Cuenca del Río Pu, Shenyang, China.	Aplicación y aplicabilidad del modelo HEC-HMS en la simulación de inundaciones en condiciones de urbanización de cuencas hidrográficas:	<ol style="list-style-type: none"> 1. El modelo HEC-HMS mostró un desempeño adecuado en cuencas urbanizadas, aunque con mejores resultados en condiciones naturales debido a los cambios en la superficie urbana.

		<p>Los autores proponen evaluar explícitamente el desempeño del modelo HEC-HMS antes y después de la urbanización de una cuenca, analizando cómo los cambios en la superficie (aumento de áreas impermeables) afectan la precisión de la simulación de escorrentía.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 2. Los parámetros relacionados con la impermeabilidad del suelo y el número de curva resultaron ser los más influyentes en la generación de escorrentía y caudales pico. 3. La calibración basada en la sensibilidad de los parámetros se evidenció como una estrategia práctica y efectiva para lograr simulaciones confiables del comportamiento hidrológico.
<p>Rohmat, F. I. W., Sa'adi, Z., Stamataki, I., Kuntoro, A. A., Farid, M., & Suwarman, R.</p>	<p>(2022). Área de Majalaya, Cuenca del Río Citarum, Indonesia.</p>	<p>Modelado de inundaciones y estudio de referencia en entornos urbanos y densamente poblados: un estudio de caso de Majalaya, Indonesia:</p> <p>Los autores proponen y demuestran una metodología robusta para modelar inundaciones en entornos urbanos de países en desarrollo, donde los datos son limitados. Esto se logra mediante la integración de HEC-HMS y HEC-RAS 2D, utilizando una combinación de datos topográficos de alta resolución (LiDAR) y datos de lluvia corregidos</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. El modelo HEC-HMS logró una alta precisión en la simulación de crecidas provocadas por lluvias intensas, reflejando con fidelidad el comportamiento real de la cuenca. 2. El análisis hidráulico permitió identificar que la causa principal de la inundación estuvo relacionada con la limitada capacidad del cauce para conducir el flujo. 3. Con base en los resultados, se propusieron medidas de mitigación como la creación de zonas de retención para disminuir el impacto de futuros eventos de inundación.

		por satélite, y validando los resultados con datos de crowdsourcing.	
Castro Ortegón, Y. A., Acosta-Prado, J. C., & Acosta Castellanos, P. M.	(2022). Parque Natural Regional Serranía de Las Quinchas, departamento de Boyacá, Colombia.	Impacto de los cambios en la cobertura del suelo en la disponibilidad del recurso hídrico en el Parque Natural Regional Serranía de Las Quinchas: Los autores proponen utilizar el modelo hidrológico SWAT para cuantificar el impacto de los cambios en la cobertura del suelo en los componentes del balance hídrico (como la escorrentía superficial, la infiltración y la evapotranspiración) en una cuenca protegida.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se evidenció que el aumento de la cobertura vegetal contribuye a reducir la escorrentía superficial, favoreciendo la infiltración y la recarga de acuíferos. 2. La vegetación desempeña un papel fundamental en la retención de humedad, al incrementar la evapotranspiración y regular el flujo de agua hacia los cauces. 3. El estudio destacó que la cobertura forestal protege el suelo frente a la erosión, disminuyendo el arrastre de sedimentos y la degradación del terreno.
Chiang, S., Chang, C.-H., & Chen, W.-B.	(2022). Cuenca de Hen Chi, una zona rural al norte de Taiwán.	Comparación de la simulación de lluvia-escorrentía entre la regresión de vectores de soporte y HEC-HMS para una cuenca rural en Taiwán: Los autores proponen comparar el desempeño del modelo físico HEC-HMS con el modelo de inteligencia	<ol style="list-style-type: none"> 1. El modelo HEC-HMS requirió una calibración exhaustiva de múltiples parámetros para lograr una adecuada representación del comportamiento hidrológico. 2. Durante la validación, se observó una ligera subestimación de los caudales máximos en eventos de lluvia extrema, atribuida a las

		artificial SVR para la simulación lluvia-escorrentía, evaluando específicamente cómo el tamaño del conjunto de datos afecta a cada modelo.	diferencias entre los escenarios calibrados y los validados. 3. En comparación con otros métodos, el modelo HEC-HMS mostró un desempeño sólido, aunque fue superado por enfoques más recientes basados en técnicas de aprendizaje automático.
Wasko, C., Nathan, R., Stein, L., & O'Shea, D.	(2021). Estudio global, con estaciones principalmente en Norteamérica, Europa, Brasil, Oceanía y el sur de África.	Evidencia de lluvias más cortas y extremas y una mayor variabilidad de las inundaciones bajo el cambio climático: Los autores proponen investigar las tendencias en los drivers de las inundaciones (lluvia pico, volumen de tormenta y humedad del suelo) para comprender por qué las tendencias observadas en las lluvias extremas no se traducen universalmente en aumentos de las inundaciones.	1. El estudio evidenció un incremento en la intensidad de las lluvias extremas asociado al calentamiento global, lo que implica una mayor frecuencia de eventos severos. 2. Se observó una tendencia opuesta entre inundaciones comunes y raras: las primeras disminuyen, mientras que las segundas aumentan en magnitud y extensión. 3. La humedad del suelo se identificó como un factor determinante, ya que las condiciones secas reducen las inundaciones menores, pero no logran mitigar los eventos más intensos.
Choi, Y., Kang, J., & Kim, J.	(2021). Distrito de Gangdong-gu, Seúl, Corea del Sur.	Planificación de la adaptación a inundaciones urbanas para gobiernos	1. La implementación de medidas de adaptación basadas en infraestructura verde resultó

		<p>locales: análisis y optimización hidrológica:</p> <p>Los autores proponen una metodología de planificación de adaptación a inundaciones urbanas para gobiernos locales, que combina el análisis hidrológico (usando DEM y ArcGIS) con la implementación optimizada de tecnologías de pequeña escala y bajo costo (como tanques de almacenamiento, áreas de retención y cauces ecológicos).</p>	<p>altamente efectiva para reducir las áreas susceptibles a inundaciones.</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. El uso de herramientas SIG y modelos digitales de elevación permitió identificar con precisión las zonas de riesgo y las ubicaciones óptimas para intervenciones. 3. El análisis de escenarios climáticos futuros mostró que las estrategias propuestas serían sostenibles y funcionales a largo plazo, incluso bajo condiciones de cambio climático.
Hamdan, A. N. A., Almuktar, S., & Scholz, M.	(2021). Cuenca del río Al-Adhaim, norte de Irak.	<p>Modelado de precipitación y escorrentía mediante el modelo HEC-HMS para la cuenca del río Al-Adhaim, norte de Irak:</p> <p>Los autores propusieron desarrollar y calibrar un modelo hidrológico (HEC-HMS) acoplado a herramientas SIG (HEC-GeoHMS) para simular los procesos de lluvia-escorrentía y</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. El modelo HEC-HMS, una vez calibrado y validado, demostró alta confiabilidad para representar los hidrogramas de escorrentía en la cuenca estudiada. 2. Los parámetros relacionados con la infiltración del suelo, especialmente el número de curva, fueron los más sensibles en la simulación del comportamiento hidrológico.

		predecir caudales en una cuenca, con el fin de gestionar embalses y prever inundaciones.	3. Se comprobó que el modelo puede integrarse eficazmente con herramientas hidráulicas para generar mapas de inundación y apoyar la gestión de crecidas.
Li, L., Uyttenhove, P., & Vaneevelde, V.	(2020). Ciudad de Gante, Bélgica.	Planificación de infraestructuras verdes para mitigar el riesgo de inundaciones por aguas superficiales urbanas: una metodología para identificar áreas prioritarias aplicada en la ciudad de Gante: Los autores proponen una metodología GIS-based multi-criterio (con AHP) para identificar áreas prioritarias donde implementar Infraestructura Verde, con el fin de mitigar el riesgo de inundaciones por escorrentía superficial en entornos urbanos.	<ol style="list-style-type: none"> 1. El estudio destacó que las zonas con mayor impermeabilización del suelo son las principales generadoras de escorrentía durante eventos de lluvia intensa. 2. Los espacios verdes y abiertos demostraron ser eficaces para disminuir el volumen de escorrentía y mejorar la respuesta del sistema urbano ante precipitaciones. 3. Se identificó una falta de alineación entre la ubicación actual de las áreas verdes y las zonas más críticas, lo que plantea la necesidad de una planificación más estratégica.
Kane, A., Hettiarachchi, S., Ou, Y., & Sharma, A.	(2019). Sídney, Australia (Cuencas de la Universidad de Nueva	¿Pueden los espacios verdes integrados y las instalaciones de almacenamiento absorber el mayor riesgo de inundaciones debido al cambio	1. La comparación entre una cuenca natural y otra urbanizada mostró que la presencia de infraestructura verde mejora notablemente la retención y el control del escurrimiento.

	<p>Gales del Sur - UNSW - y del Centennial Park).</p>	<p>climático en los entornos urbanos desarrollados?:</p> <p>Los autores proponen evaluar y comparar, mediante modelación hidrológica-hidráulica, la capacidad de dos cuencas urbanas (con y sin infraestructura verde de almacenamiento) para absorber el aumento de escorrentía provocado por el cambio climático.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 2. Las áreas con vegetación y estanques presentaron una respuesta hidrológica más estable, incluso frente a escenarios de incremento de temperatura. 3. En contraste, las cuencas urbanas mostraron una mayor variabilidad en los caudales y un comportamiento menos predecible, lo que incrementa su vulnerabilidad ante lluvias extremas.
--	---	---	--

3. CAPITULO III: METODOLOGÍA

Este estudio fue desarrollado con un enfoque cuantitativo y descriptivo, utilizando herramientas de modelación hidrológica e hidráulica para evaluar la respuesta de la cuenca del Parque Metropolitano Guanguiltagua ante eventos extremos. A continuación, se detallan las fases del procedimiento, justificando la selección de datos, herramientas y procedimientos matemáticos empleados.

3.1. FASE 1: ANÁLISIS HIDROMETEOROLÓGICO Y TORMENTAS DE DISEÑO

3.1.1. Fuente de Datos de Precipitación (CHIRPS)

Debido a la ausencia de estaciones meteorológicas in situ dentro del parque y a la necesidad de contar con series históricas robustas, se utilizaron los registros de precipitación máxima diaria del producto satelital CHIRPS v2.0 para el periodo 1981–2025 (44 años). La elección de esta fuente se fundamenta en su alta resolución espacial de 0.05° (~5 km) y porque CHIRPS ha demostrado una alta precisión en la representación de la variabilidad climática en regiones montañosas tropicales de Sudamérica, lo que justifica su idoneidad para suplir la falta de instrumentación en zonas de topografía compleja como la de Guanguiltagua (López-Bermeo et al., 2022).

3.1.2. Modelo Probabilístico (Distribución de Gumbel)

Para la estimación de las lluvias de diseño se utilizó la distribución de Valores Extremos Tipo I de Gumbel, debido a que es una de las metodologías más empleadas en hidrología para modelar eventos extremos y obtener precipitaciones de diseño a partir de series de máximos anuales (Koutsoyiannis, 2004). Además, investigaciones recientes como la de Mamun et al. (2021) respaldan su uso al demostrar que Gumbel presenta un desempeño adecuado en el análisis de precipitación extrema para infraestructura. La función de probabilidad acumulada utilizada se describe en la Ecuación 1:

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-\mu}{\beta} \right) \right] \quad \text{Ec. 1}$$

Donde μ y β son parámetros de ubicación y escala, estimados a partir de la media y la desviación estándar de la muestra, y se generaron eventos de diseño para periodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años.

3.1.3. Construcción de Curvas IDF

Dado que CHIRPS proporciona datos diarios (24 horas), fue necesario desagregar la precipitación a duraciones en minutos utilizando los coeficientes de Campos Aranda (1978). La intensidad de lluvia (I) para cada duración se calculó mediante la Ecuación 2:

$$I = \frac{P_d}{d} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde P_d es la precipitación de diseño para la duración d (minutos). Se calibraron relaciones de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) basadas en leyes de potencia con la forma $I = aT^b/d^c$ mediante un análisis de regresión de las series de lluvia de CHIRPS desagregadas. Para esto, se ajustaron los datos a la estructura general de la ecuación de intensidad propuesta por Chow et al. (1988), la cual relaciona simultáneamente la duración y la frecuencia, tal como se detalla en la Ecuación 3:

$$i = \frac{K \cdot T^m}{t^n} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde i es la intensidad de la lluvia (mm/h), T es el período de retorno (años), t es la duración (minutos) y K, m, n son parámetros de ajuste característicos de la zona de estudio, los cuales se determinaron estadísticamente para minimizar el error entre los datos observados y la curva teórica. Esta ecuación calibrada sirvió como insumo fundamental para generar hietogramas de diseño mediante el método de bloques alternados, el cual sitúa el bloque de máxima intensidad en el centro del evento y distribuye los restantes alternadamente a los lados, asegurando un escenario crítico donde la precipitación acumulada respeta fielmente las curvas IDF para cualquier duración (Chow et al., 1988) y proporcionó la base para la validación estadística cruzada con los registros de intensidad terrestres de la estación Iñaquito.

3.2. FASE 2: CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA Y ESCENARIOS

3.2.1. Procesamiento Digital del Terreno (DEM y QGIS)

La base topográfica utilizada fue el Modelo Digital de Elevación (DEM) con resolución de 5 metros, proporcionado por el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP), ya que el uso de información oficial de esta

institución estatal garantiza la precisión altimétrica necesaria para estudios de ingeniería a escala local en el territorio ecuatoriano.

El procesamiento se realizó en la plataforma QGIS 3.40 debido a que este software SIG (Sistemas de Información Geográfica, en inglés GIS), cuando trabaja con un MDE de alta resolución, permite delimitar con precisión las microcuencas, y porque el uso combinado de SIG y datos DEM se ha consolidado como una metodología estándar en hidrología, permitiendo derivar redes de drenaje y áreas de drenaje de forma eficiente y detallada (Advances in remote sensing and GIS applications in watershed hydrology, 2025).

Con este procedimiento se definió la configuración espacial del modelo, tal como se presenta en la Figura 1. En dicho mapa se observa la división del parque en 15 microcuencas (MIC 1 a MIC 15) y la red de drenaje natural; esta geometría constituye la base indispensable para la simulación, ya que define por dónde bajará el agua desde la zona alta (este) hacia la zona baja (oeste) antes de ingresar cualquier dato de lluvia.

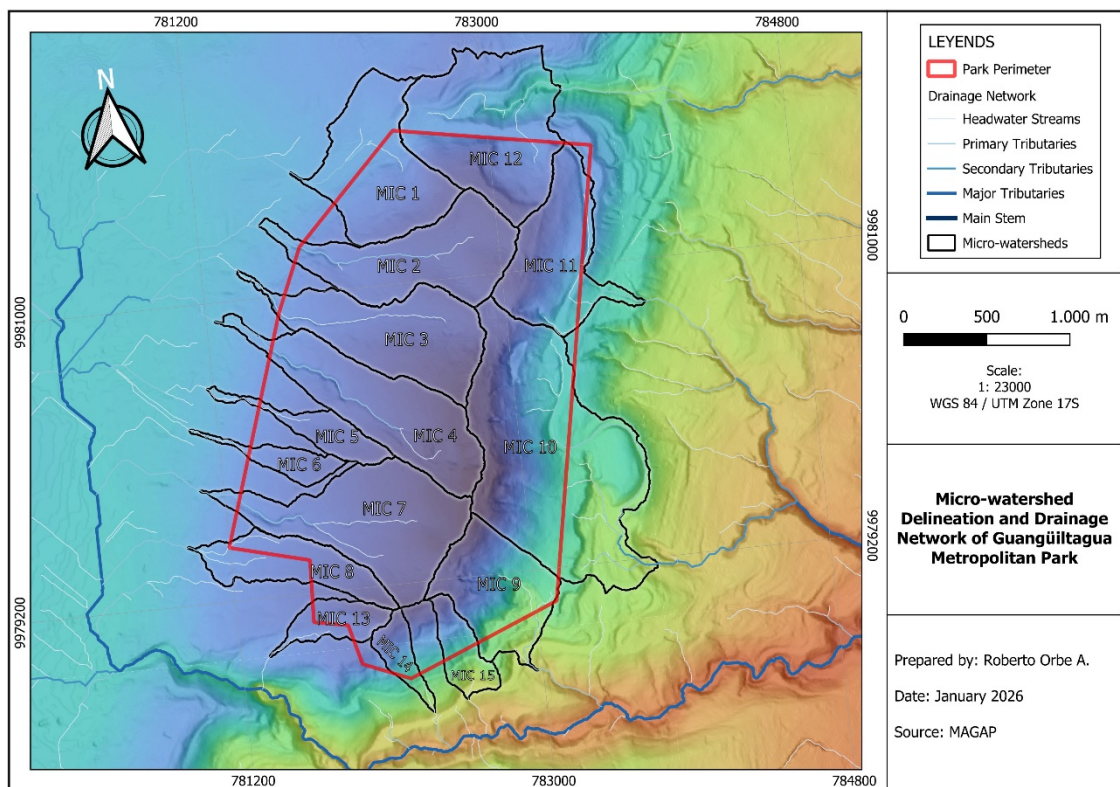


Figura 1. Mapa topográfico, red de drenaje y delimitación de microcuencas del Parque Metropolitano Guaguilitagua, Quito

3.2.2. Definición de Escenarios de Uso de Suelo (SCS-CN)

Para representar la interacción suelo-cobertura, se aplicó el método del Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos (SCS-CN). Este método fue

seleccionado por su amplia aceptación internacional para estimar la capacidad de retención en cuencas no aforadas, basándose en las características físicas del terreno (USDA-SCS, 1972). Se definieron dos escenarios para el análisis comparativo:

1. Escenario Forestal (Base): Asignación de CN=45 que pertenece a un bosque con buena cobertura vegetal sobre un suelo de Grupo Hidrológico B, considerando condiciones óptimas de infiltración (USDA-SCS, 1972).
2. Escenario Urbano (Hipotético): Asignación de CN=85 que representa una urbanización de densidad media-alta sobre el mismo Grupo Hidrológico B, reflejando la pérdida de permeabilidad por la introducción de superficies impermeables (USDA-SCS, 1972).

La incorporación de este escenario hipotético de urbanización en la zona de estudio tiene como finalidad establecer un marco de comparación cuantitativo. El objetivo de simular este cambio de uso de suelo no es proponer el desarrollo urbano del sector, sino generar una línea base de contraste para medir matemáticamente la protección o “servicio ecosistémico de regulación hídrica” que proporciona la cobertura vegetal actual. De esta manera, la diferencia entre ambos escenarios revela la magnitud del beneficio que el parque brinda a la ciudad. Este impacto se cuantificará mediante el Incremento Relativo de Caudal (ΔQ) tal como se define en la Ecuación 4:

$$\Delta Q(\%) = \frac{Q_{urban} - Q_{forest}}{Q_{forest}} \times 100 \quad \text{Ec. 4}$$

Donde Q_{forest} es el caudal máximo obtenido de la simulación de HEC-HMS utilizando el número de curva del escenario forestal (CN=45), por otro lado, Q_{urban} es el caudal máximo de la misma simulación, pero utilizando el número de curva del escenario urbano (CN=85).

3.3. FASE 3: MODELACIÓN HIDROLÓGICA (HEC-HMS)

La simulación del proceso lluvia-escorrentía se ejecutó en el software HEC-HMS 4.11, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. Se seleccionó este software por ser el estándar de la industria para la modelación de eventos de crecida en cuencas con redes de drenaje ramificadas, permitiendo una integración robusta de los componentes del ciclo hidrológico (USACE, 2021).

La configuración del modelo incluyó los siguientes componentes metodológicos:

1. Método de Pérdidas (SCS Curve Number): Utilizado para calcular la precipitación efectiva acumulada, separando la infiltración de la escorrentía directa según el tipo de suelo y cobertura (USDA-SCS, 1972).
2. Método de Transformación (Hidrograma Unitario SCS): Empleado para convertir el exceso de precipitación en un hidrograma de escorrentía directa. Se eligió este método por su idoneidad para cuencas pequeñas y medianas donde la respuesta hidrológica está dominada por factores topográficos estandarizados (USACE, 2021).
3. Método de Tránsito (Lag Routing): Para simular el movimiento de la onda de avenida o la onda del agua bajando a través de los cauces, se seleccionó el método de desfase (Lag Method). Este algoritmo es el más idóneo para cuencas urbanas o naturales pequeñas con tiempos de concentración cortos, ya que simplemente calcula el tiempo que tarda el caudal en bajar, asumiendo que el flujo se traslada sin detenerse ni perder fuerza significativamente, tal como lo establecen los manuales de modelación hidrológica del Cuerpo de Ingenieros (USACE, 2021).

3.4. FASE 4: MODELACIÓN HIDRÁULICA (HEC-RAS)

Para la simulación del comportamiento del flujo en la microcuenca y la determinación de las manchas de inundación, se empleó el software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) en su versión 6.5. Este modelo numérico, desarrollado por el US Army Corps of Engineers permite realizar análisis hidráulicos multidimensionales (USACE, 2023). Se optó por una modelación bidimensional (2D) dado que, en zonas de topografía compleja y pendientes pronunciadas, el flujo tiende a expandirse lateralmente y a poseer componentes de velocidad que un análisis unidimensional no puede representar con precisión (Brunner, 2016).

Si bien la caracterización hidrológica en HEC-HMS abarcó la totalidad de las 15 unidades de drenaje del parque, la simulación hidráulica bidimensional en HEC-RAS se centró exclusivamente en la unidad que presentó la respuesta hidrológica más crítica, aplicando el criterio de selección basado en el peor escenario de carga, donde se eligió como dominio de análisis aquella microcuenca que registró el caudal pico

de mayor magnitud. Este enfoque metodológico permitió focalizar el análisis hidráulico detallado y la generación de mapas de inundación en el sector del parque expuesto a la mayor amenaza dinámica y volumétrica.

3.4.1. Selección del Método Numérico

Para la ejecución del modelo hidráulico en HEC-RAS, se definieron los parámetros de cálculo basándose en las características físicas de la quebrada y la naturaleza del evento simulado.

Se seleccionó el régimen de Flujo No Permanente (Unsteady Flow). Según Chow (1959), esta aproximación es indispensable cuando el caudal varía en el tiempo, como ocurre durante el paso de un hidrograma de crecida, permitiendo simular el ascenso y descenso del nivel del agua de manera dinámica.

Respecto a las ecuaciones de gobierno, el software HEC-RAS permite resolver las ecuaciones de Saint-Venant completas (Full Momentum) o su simplificación de Onda Difusiva (Diffusion Wave). Para esta investigación se optó por el método de Onda Difusiva. De acuerdo con el manual técnico de USACE (2016), este método desprecia los términos de aceleración inercial, lo cual ofrece dos ventajas clave para este estudio:

- Mayor estabilidad numérica: En cauces de alta pendiente y topografía irregular (como la zona de estudio), el método de Onda Difusiva evita inestabilidades y errores de cálculo que suelen presentarse con las ecuaciones de Momentum completo (Brunner, 2022).
- Eficiencia: Permite obtener resultados precisos en tiempos de cómputo razonables, considerando que las fuerzas gravitacionales y de fricción son las que dominan el flujo en este tipo de quebradas.

3.4.2. Discretización del Dominio (Malla Computacional)

La geometría del modelo se construyó sobre un Modelo Digital de Elevación (MDE) de alta resolución espacial. Se generó una malla computacional flexible o no estructurada para representar el terreno dentro del software. Según Brunner (2016), la principal ventaja de este tipo de malla es que las celdas (o polígonos de cálculo) no son rígidas, sino que pueden deformarse para adaptarse a la geometría irregular y curva de los bordes del río. Para garantizar que el agua fluya correctamente dentro del modelo, se dibujaron líneas de ruptura, conocidas técnicamente como Breaklines.

Estas líneas actúan como "guías" que fuerzan a la malla a alinearse con características clave del terreno, específicamente:

- Las orillas del río: Para diferenciar claramente el canal principal de las zonas secas.
- El Talweg: Que corresponde a la línea imaginaria que une los puntos más profundos del cauce, es decir, el camino principal por donde circula el agua.

Al alinear las caras de las celdas con estas líneas, se logra que la malla siga la dirección natural del flujo, lo cual reduce significativamente el error numérico y mejora la precisión de los cálculos de velocidad y profundidad (USACE, 2016).

3.4.3. Parámetros de Resistencia al Flujo

La resistencia hidráulica se modeló mediante el coeficiente de rugosidad de Manning (n). La selección de estos valores se realizó en función de la cobertura del suelo identificada en campo y las tablas de referencia estándar propuestas por Chow (1959).

- Cauce natural y riberas: $n = 0.040$ (Cauces de montaña con piedras y vegetación).
- Zona urbana (Escenario futuro): $n = 0.015$ a 0.025 (Superficies impermeables y concreto).

3.4.4. Condiciones de Estabilidad Numérica

Para garantizar la estabilidad del modelo y la precisión de los resultados, se seleccionó un paso de tiempo (Time Step) de 1 segundo. Esta selección responde a la condición de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), la cual establece que, para modelos explícitos o semi-implícitos, la partícula de agua no debe atravesar más de una celda de computación en un solo paso de tiempo (USACE, 2016). Dado el tamaño de celda y las altas velocidades esperadas, un paso de tiempo mayor induciría errores de inestabilidad numérica.

3.4.5. Definición de Escenarios

Con el fin de cuantificar el impacto hidrológico-hidráulico del cambio de uso de suelo, se establecieron dos escenarios comparativos:

- Escenario Forestal: Condiciones actuales de cobertura vegetal, utilizando los caudales generados con el Número de Curva (CN=45).

- Escenario Urbanizado: Proyección de cambio de uso de suelo a zona urbana (CN = 85), simulando la pérdida de capacidad de infiltración y el aumento de la escorrentía superficial.

3.5. FASE 5: VALIDACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA PLAUSIBILIDAD DEL MODELO

Debido a la ausencia de medidores de caudal (estaciones de aforo) dentro del Parque Guangüiltagua, no fue factible realizar una calibración directa del modelo HEC-HMS, así que, para garantizar la fiabilidad de los resultados, se llevó a cabo una validación cruzada de doble fase, donde se evaluó tanto la entrada meteorológica como la tendencia hidrológica resultante.

3.5.1. Fase 1: Validación de la Intensidad de Lluvia

La fiabilidad de la lluvia de diseño se evaluó comparando las intensidades derivadas del marco CHIRPS-Gumbel (I_{HEC}) contra las de la estación oficial Ñaquito del INAMHI (I_{INAMHI}), ubicada a 3 km del parque.

La concordancia se cuantificó utilizando las siguientes métricas:

- Error Medio Relativo (RME): Esta métrica se utilizó para cuantificar la desviación porcentual promedio entre las intensidades derivadas por satélite y los datos de la estación terrestre, tal como se define en la Ecuación 5. Además, proporciona una medida normalizada del sesgo sistemático, permitiéndonos evaluar si los datos de CHIRPS sobreestiman o subestiman consistentemente la lluvia local.

$$RME(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{I_{INAMHI,i} - I_{HEC,i}}{I_{HEC,i}} \right] \times 100 \quad \text{Ec. 5}$$

- Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE): Esta métrica mide la magnitud absoluta del error en unidades de intensidad (mm/h) y debido a que eleva al cuadrado las desviaciones, es particularmente sensible a grandes diferencias, tal como se muestra en la Ecuación 6, lo cual es crucial para evaluar la fiabilidad del modelo durante eventos extremos de alta intensidad.

$$RMSE (mm/h) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{INAMHI,i} - I_{HEC,i})^2} \quad \text{Ec. 6}$$

3.5.2. Fase 2: Validación de la Tendencia de Caudales Máximos

Para evaluar la consistencia de la transformación lluvia-escorrentía, se estimaron caudales máximos de referencia (Q_{Rat}) utilizando el Método Racional, definido en la Ecuación 7. Este método sirve como un punto de referencia simplificado y reconocido internacionalmente para el drenaje urbano, proporcionando un punto de comparación para los resultados de las simulaciones en HEC-HMS.

$$Q_{Rat} = 0.278 \cdot C \cdot I(T, d) \cdot A \quad \text{Ec. 7}$$

Donde Q_{Rat} es el caudal máximo estimado (m^3/s), C es el coeficiente de escorrentía (aproximado a partir del Número de Curva SCS como $C \approx CN/(200 - CN)$ (Jensen, 1970; USDA-SCS, 1972)), $I(T, d)$ es la intensidad de lluvia (mm/h) para el periodo de retorno T y duración d obtenida de la ecuación IDF de Iñaquito, definida en la Ecuación 8, y A es el área de la subcuenca (km^2).

$$i = 418.754 \cdot T^{0.2196} \cdot t^{-0.7210} \quad (\text{INAMHI, 2015}) \quad \text{Ec. 8}$$

Posteriormente, se calculó el Coeficiente de Determinación (R^2) para comparar los resultados de referencia (Q_{Rat}) contra los caudales máximos obtenidos en HEC-HMS (Q_{HEC}), como se muestra en la Ecuación 9. Este coeficiente mide la fuerza de la relación lineal entre ambos métodos, por lo que en este estudio el R^2 se utiliza como un indicador de "bondad de ajuste" para demostrar que, a pesar de las diferencias en los valores absolutos de flujo, el modelo HEC-HMS replica correctamente la tendencia hidrológica esperada y la varianza a través de todos los periodos de retorno (Nash & Sutcliffe, 1970; Moriasi et al., 2007).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{HEC,i} - \bar{Q}_{HEC})(Q_{Rat,i} - \bar{Q}_{Rat})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{HEC,i} - \bar{Q}_{HEC})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{Rat,i} - \bar{Q}_{Rat})^2}} \right]^2 \quad \text{Ec. 9}$$

Donde \bar{Q}_{HEC} y \bar{Q}_{Rat} son el caudal máximo simulado medio y el caudal máximo de referencia medio, respectivamente (Nash & Sutcliffe, 1970; Moriasi et al., 2007).

Si bien la falta de registros de caudal impide realizar una calibración tradicional, esta validación cruzada otorga solidez técnica al modelo. Al verificar tanto la calidad del

insumo meteorológico (intensidad) como la coherencia de la respuesta hidrológica (tendencia de caudales), se establece un marco de referencia robusto y confiable. Esto garantiza que las simulaciones entreguen resultados admisibles y seguros para la planificación urbana en cuencas andinas con escasa información.

4. CAPITULO IV: RESULTADOS

4.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN (CURVAS IDF)

Se determinaron los parámetros locales de ajuste (K, m, n) que caracterizan el régimen pluviométrico de la cuenca del Parque Guangüiltagua, aplicando la regresión estadística detallada en la metodología sobre los registros satelitales, dando como resultado la ecuación de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), que rige el comportamiento de las tormentas de diseño para la zona de estudio, y se define en la Ecuación 10 como:

$$i = 254.5326 \cdot T^{0.150089} \cdot t^{-0.61885} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde i es la intensidad de la lluvia (mm/h), T es el período de retorno (años) y t es la duración (minutos). Esta expresión matemática permitió la generación de los hietogramas de diseño sintéticos que sirvieron como condición de frontera meteorológica para la simulación de los caudales resultantes que se muestran a continuación.

4.2. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA (HEC-HMS)

4.2.1. Caudales Máximos de Escorrentía

Las simulaciones realizadas para el escenario actual (Condición Forestal, CN=45) y el escenario hipotético (Condición Urbana, CN=85) permitieron cuantificar la respuesta de las 15 microcuencas ante los distintos eventos de diseño. Los resultados de caudales máximos se detallan en la Tabla 1.

Se observa un contraste hidrológico marcado entre ambos escenarios:

- **Escenario Forestal (CN=45):** Bajo las condiciones actuales, la capacidad de regulación del parque se nota mucho. Para periodos de retorno frecuentes (5 a 10 años), los caudales pico se mantienen bajos, oscilando entre 0.1 m³/s y

0.7 m³/s, inclusive hay casos donde el caudal máximo es nulo (MIC 6 y MIC 14). De igual manera, ante eventos extremos (500 años), las microcuencas no supera los 2.0 m³/s, lo que evidencia la efectividad del suelo forestal para retener la precipitación.

- **Escenario Urbano (CN=85):** Por el contrario, al simular la impermeabilización hipotética de la cuenca, los caudales se disparan drásticamente. En este escenario, los picos para los mismos eventos extremos (500 años) alcanzan valores entre 0.60 m³/s y 7.80 m³/s. Particularmente en la Microcuenca 10 (la más grande), el caudal pasa de un comportamiento moderado a un flujo torrencial peligroso, lo que aportaría en gran medida a la saturación de cualquier sistema de drenaje convencional.

Tabla 1. Caudales máximos (m³/s) simulados en HEC-HMS (m³/s) para los escenarios forestal (CN=45) y urbanizado hipotético (CN=85) a través de los periodos de retorno evaluados.

ELEMENTO	A (KM2)	PR=5 AÑOS		PR=10 AÑOS		PR=25 AÑOS		PR=50 AÑOS		PR=100 AÑOS		PR=500 AÑOS	
		CN 45 (M3/S)	CN 85 (M3/S)	CN 45 (M3/S)	CN 85 (M3/S)	CN 45 (M3/S)	CN 85 (M3/S)	CN 45 (M3/S)	CN 85 (M3/S)	CN 45 (M3/S)	CN 85 (M3/S)	CN 45 (M3/S)	CN 85 (M3/S)
MIC 1	0.5	0.3	0.7	0.3	0.9	0.4	1.2	0.4	1.6	0.4	2	0.5	3.4
MIC 2	0.5	0.3	0.7	0.3	0.9	0.4	1.2	0.4	1.6	0.4	2	0.6	3.4
MIC 3	0.5	0.3	0.7	0.3	0.9	0.4	1.2	0.4	1.6	0.4	2	0.5	3.4
MIC 4	0.6	0.3	0.7	0.3	0.9	0.4	1.3	0.4	1.7	0.5	2.1	0.6	3.5
MIC 5	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.3	0.1	0.4	0.1	0.5	0.1	0.8
MIC 6	0.1	0	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.3	0.1	0.3	0.1	0.6
MIC 7	0.6	0.3	0.8	0.4	1.1	0.4	1.5	0.5	1.9	0.5	2.4	0.7	4.1
MIC 8	0.3	0.1	0.3	0.2	0.4	0.2	0.6	0.2	0.8	0.2	1	0.3	1.7
MIC 9	0.4	0.2	0.5	0.2	0.7	0.3	0.9	0.3	1.2	0.3	1.5	0.4	2.6
MIC 10	1.2	0.6	1.5	0.7	2	0.8	2.8	0.9	3.6	1	4.6	1.3	7.8
MIC 11	0.5	0.2	0.6	0.3	0.7	0.3	1	0.3	1.3	0.4	1.7	0.5	2.9
MIC 12	0.7	0.4	0.9	0.4	1.2	0.5	1.6	0.5	2.1	0.6	2.7	0.7	4.5
MIC 13	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.3	0.1	0.4	0.1	0.5	0.1	0.8
MIC 14	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.3	0.1	0.3	0.1	0.6
MIC 15	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.3	0.1	0.4	0.1	0.5	0.1	0.8

Para ilustrar los cambios hidrológicos críticos observados en el área de estudio, las Figuras 2 y 3 presentan la variación del caudal máximo para dos unidades

representativas, MIC 5 y MIC 10, el resto de unidades se encuentran en el Anexo 1. Se seleccionó la MIC 5 (0.1 km²) porque representa a las microcuencas pequeñas más vulnerables, exhibiendo el mayor incremento relativo en la escorrentía, hasta un 700% para el periodo de retorno de 500 años bajo condiciones urbanizadas. Por el contrario, se eligió la MIC 10 (1.2 km²) por ser la microcuenca más grande del parque, generando los caudales pico absolutos más altos (alcanzando 7.8 m³/s en el escenario urbano). Estos ejemplos contrastan efectivamente la capacidad de amortiguamiento del parque a través de diferentes escalas espaciales y magnitudes de impacto.

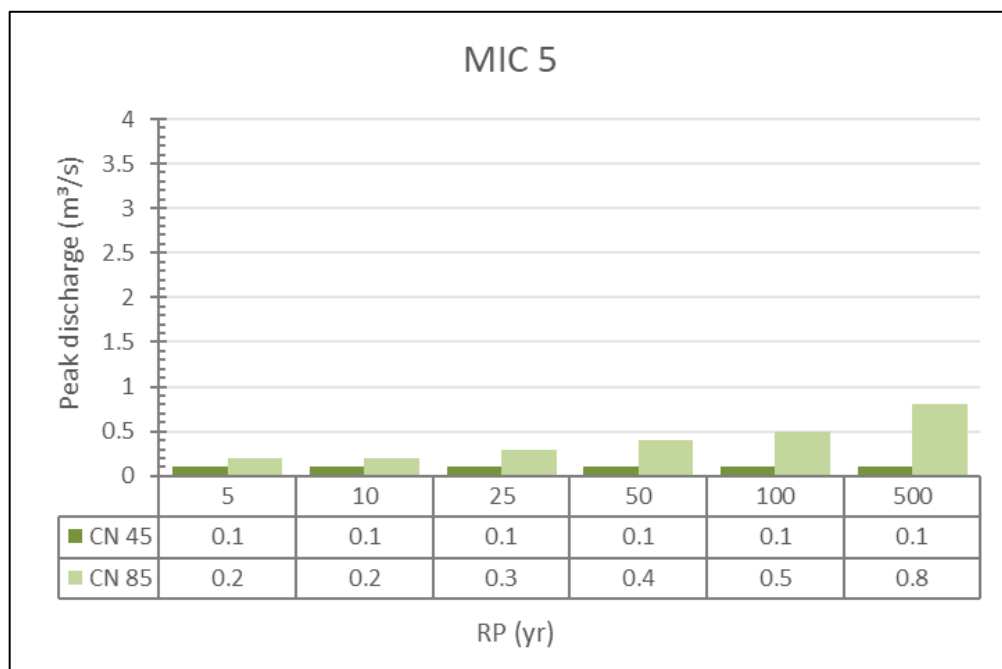


Figura 2. Variación de los caudales máximos debido al cambio de uso de suelo en la microcuenca 5.

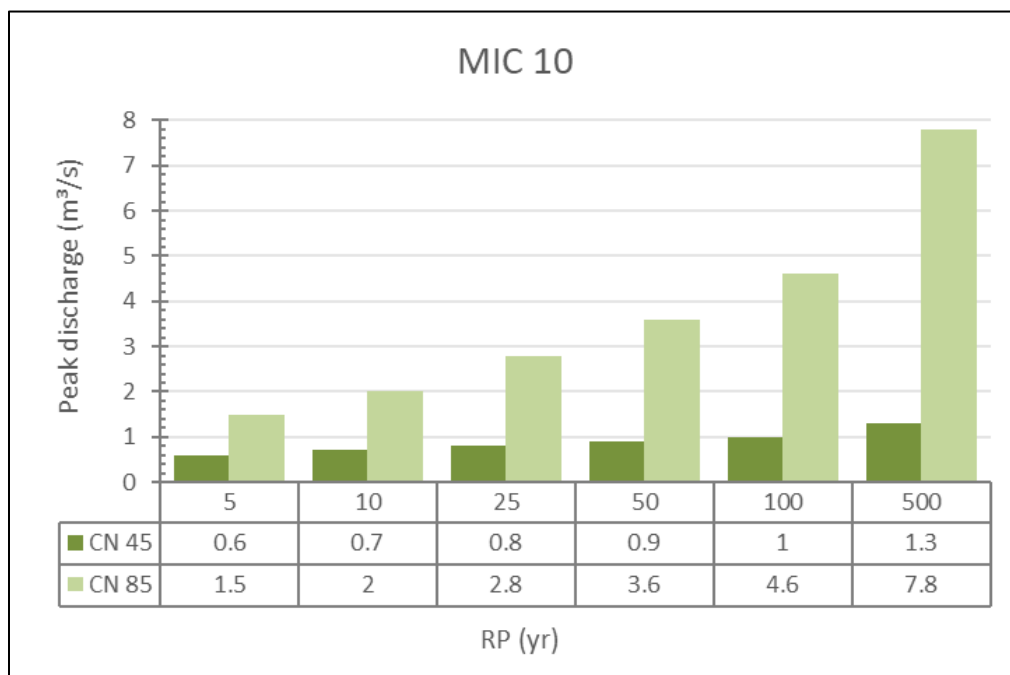


Figura 3 Variación de los caudales máximos debido al cambio de uso de suelo en la microcuenca 10.

4.2.2. Volúmenes Totales de Escorrentía

Además de los caudales máximos, se determinó el volumen total de agua que cada microcuenca descarga hacia el sistema de alcantarillado de la ciudad durante el evento de tormenta de diseño (ver Tabla 2). Este parámetro es crítico para evaluar la carga hidráulica sobre los colectores urbanos.

Se evidencia que la capacidad de retención del escenario forestal (CN=45) es altamente efectiva para eventos de frecuencia media y alta, ya que en microcuencas pequeñas (<0.2 km²) como la MIC 5, MIC 6 y MIC 14, el volumen de escorrentía es nulo o despreciable para periodos de retorno de 5 y 10 años. Esto indica hidrológicamente que la precipitación de diseño no superó la abstracción inicial del suelo forestal; es decir, toda el agua fue infiltrada o interceptada por la vegetación. Por el contrario, bajo el escenario de urbanización (CN=85), incluso estas microcuencas pequeñas comienzan a generar volúmenes significativos desde el periodo de retorno de 5 años (entre 100 y 300 m³), perdiendo su función de amortiguamiento.

En la microcuenca principal (MIC 10), el impacto es masivo: para una tormenta de 100 años, el volumen de agua a gestionar pasaría de 600 m³ (bosque) a 2000 m³ (urbano). Esto implica que los colectores deberían manejar más del triple del

volumen de agua, lo que incrementaría exponencialmente el riesgo de colapso del sistema de drenaje y las consecuentes inundaciones en las vías aledañas.

Tabla 2 Volúmenes totales de escorrentía (m³) simulados en HEC-HMS para los escenarios forestal (CN=45) y urbanizado hipotético (CN=85) a través de los periodos de retorno evaluados.

ELEMENTO	A (KM2)	PR =5 AÑOS		PR=10 AÑOS		PR=25 AÑOS		PR=50 AÑOS		PR=100 AÑOS		PR=500 AÑOS	
		CN 45 (M3)	CN 85 (M3)	CN 45 (M3)	CN 85 (M3)	CN 45 (M3)	CN 85 (M3)	CN 45 (M3)	CN 85 (M3)	CN 45 (M3)	CN 85 (M3)	CN 45 (M3)	CN 85 (M3)
MIC 1	0.5	200	300	200	400	200	500	200	700	300	900	300	1500
MIC 2	0.5	200	300	200	400	200	500	200	700	300	900	300	1500
MIC 3	0.5	200	300	200	400	200	500	200	700	300	900	300	1500
MIC 4	0.6	200	300	200	400	200	600	200	700	300	900	300	1500
MIC 5	0.1	0	100	0	100	100	100	100	200	100	200	100	400
MIC 6	0.1	0	100	0	100	0	100	0	100	0	200	100	300
MIC 7	0.6	200	400	200	500	300	600	300	800	300	1100	400	1800
MIC 8	0.3	100	100	100	200	100	300	100	300	100	400	200	700
MIC 9	0.4	100	200	100	300	200	400	200	500	200	700	200	1100
MIC 10	1.2	400	700	400	900	500	1200	500	1600	600	2000	700	3400
MIC 11	0.5	100	200	200	300	200	500	200	600	200	700	300	1300
MIC 12	0.7	200	400	200	500	300	700	300	900	300	1200	400	2000
MIC 13	0.1	0	100	0	100	0	100	100	200	100	200	100	300
MIC 14	0.1	0	0	0	100	0	100	0	100	0	100	100	200
MIC 15	0.1	0	100	0	100	0	100	100	200	100	200	100	400

4.3. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA (HEC-RAS)

Cumpliendo con el criterio de selección establecido en la metodología, el análisis de los caudales máximos resultantes (ver Tabla 1) identificó a la Microcuenca 10 (MIC 10) como la unidad crítica del sistema. Esta microcuenca generó el caudal máximo absoluto de toda el área de estudio, alcanzando un pico de 1.30 m³/s y 7.80 m³/s para el evento de 500 años en los escenarios forestal y urbanizado respectivamente. Dando como resultado que la MIC 10 fue definida como el dominio computacional para la modelación bidimensional en HEC-RAS, cuyos mapas de amenaza (profundidad y velocidad) se presentan a continuación.

4.3.1. Análisis Comparativo del Evento de Diseño (TR = 100 AÑOS)

Para evaluar el impacto hidrológico-hidráulico del cambio de uso de suelo, se sometió a la microcuenca a la tormenta de diseño (TR=100 años) bajo dos

condiciones opuestas: cobertura natural (Bosque, CN=45) y urbanización densa (CN=85).

4.3.1.1. Zonas de Inundación (TR=100 AÑOS)

Escenario Natural (Figura 4): El flujo se mantiene dentro del cauce principal. La mancha azul es delgada, lo que indica que la quebrada tiene capacidad suficiente para transportar el caudal generado por el bosque (CN=45).

Escenario Urbano (Figura 5): Al urbanizar (CN=85), el caudal aumenta y supera la capacidad de la sección. Se observan dos fenómenos claros:

1. Desborde en curvas: En los meandros del cauce, el agua se sale de las orillas por la fuerza centrífuga y el exceso de volumen.
2. Acumulación en zona baja: En la parte inferior de la imagen, las zonas de inundación aisladas se unen, formando una llanura inundada continua y de mayor profundidad que no existía en el escenario natural.

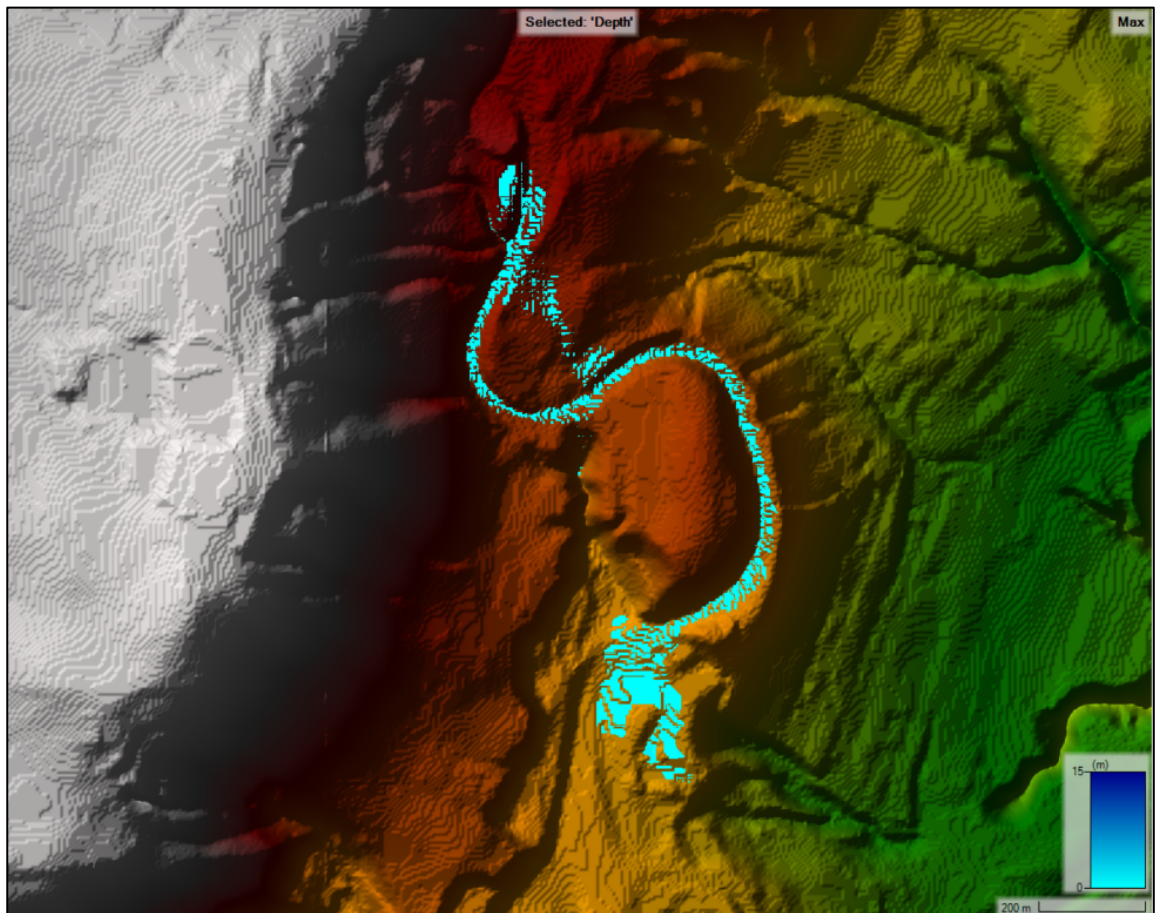


Figura 4 Mapa de Profundidad - Escenario Forestal (CN=45) – TR=100 Años

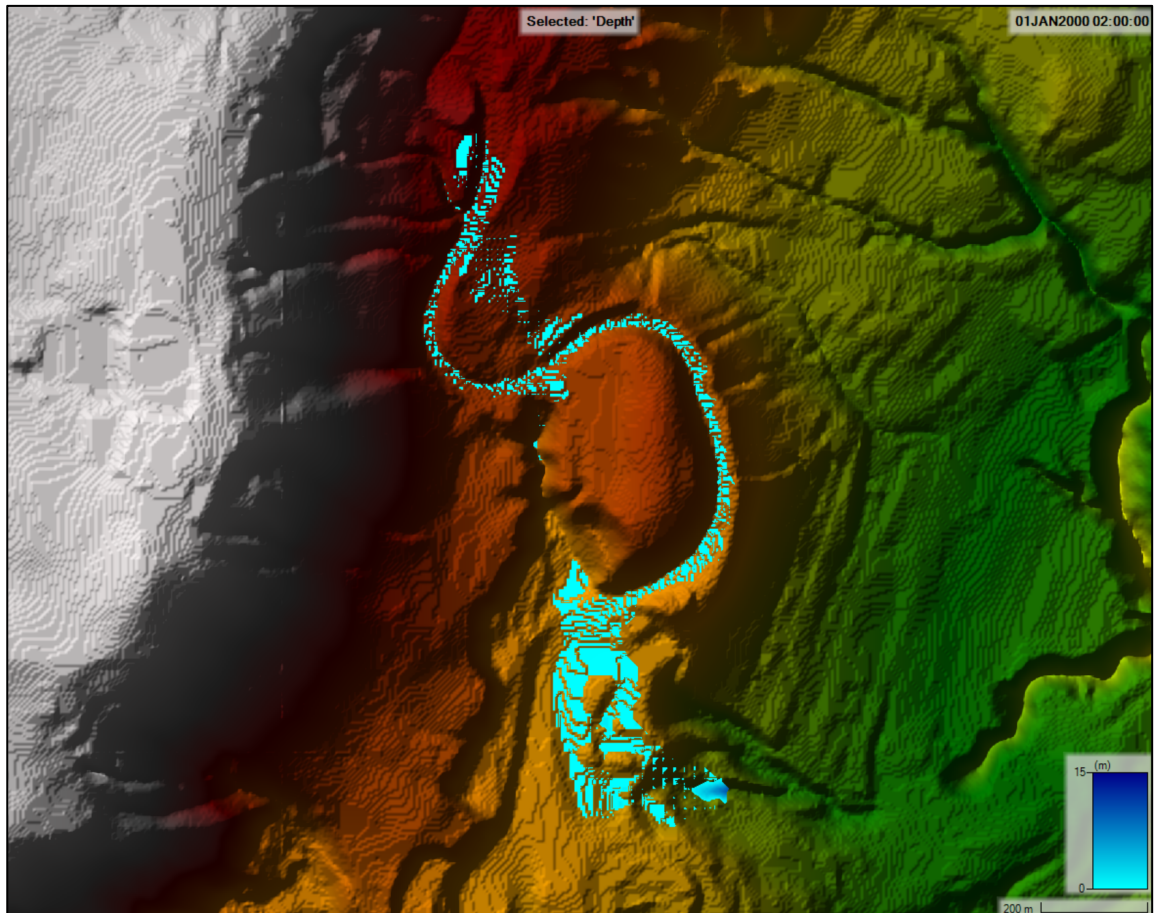


Figura 5 Mapa de Profundidad - Escenario Urbano (CN=85) – TR=100 Años

4.3.1.2. Velocidades de Flujo (TR=100 AÑOS)

Se comparan las velocidades máximas entre la Figura 6 (Forestal) y la Figura 7 (Urbano) para evaluar la peligrosidad del flujo.

Incremento de Velocidad por Caudal, en la Figura 6, los colores oscuros indican velocidades moderadas. En contraste, la Figura 7 muestra colores un poco más claros en el centro del cauce, lo que indica que la velocidad se acerca a 2 m/s pero no lo supera. Esto se debe a que, al aumentar drásticamente el caudal de ingreso (por el efecto del CN=85), aumenta la profundidad y, consecuentemente, la velocidad del flujo, incrementando el poder erosivo del agua sobre las riberas.

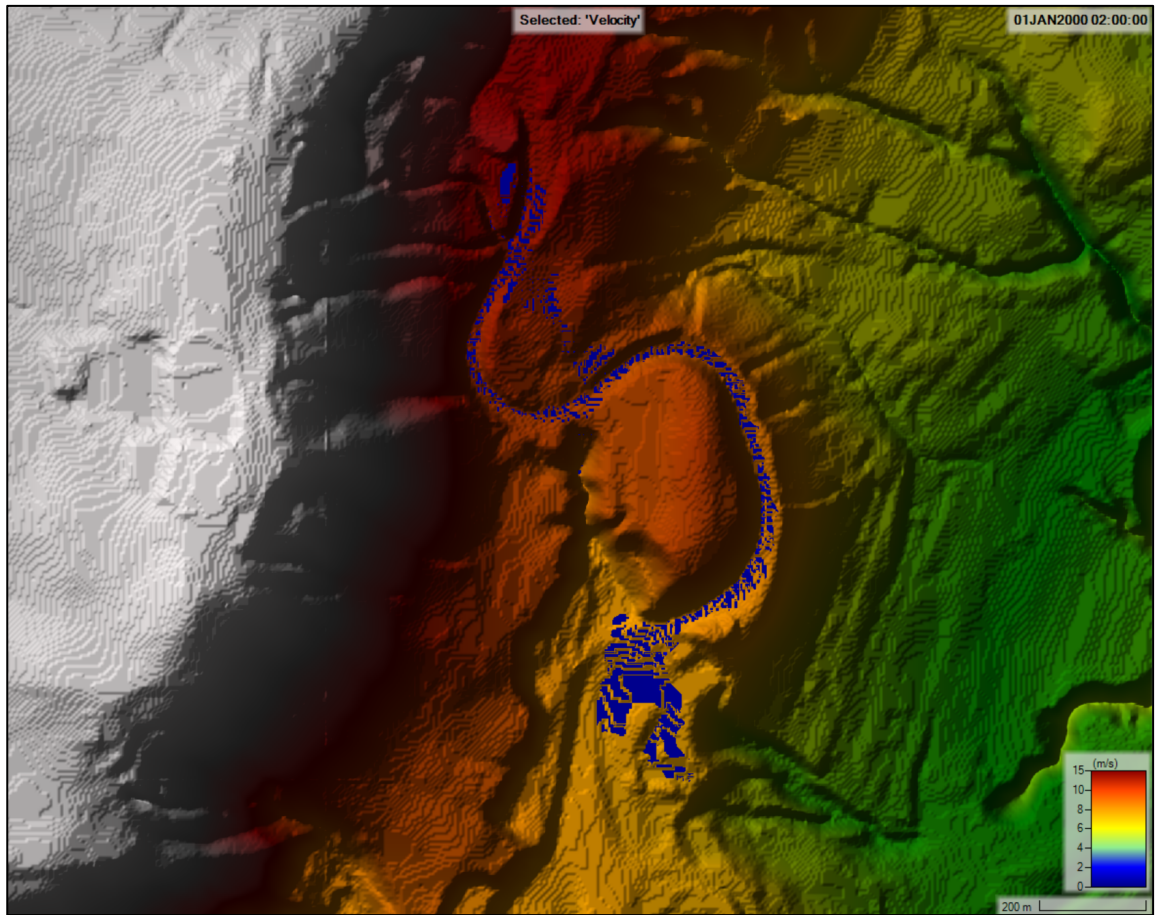


Figura 6 Mapa de Velocidad - Escenario Forestal (CN=45) - TR 100 Años

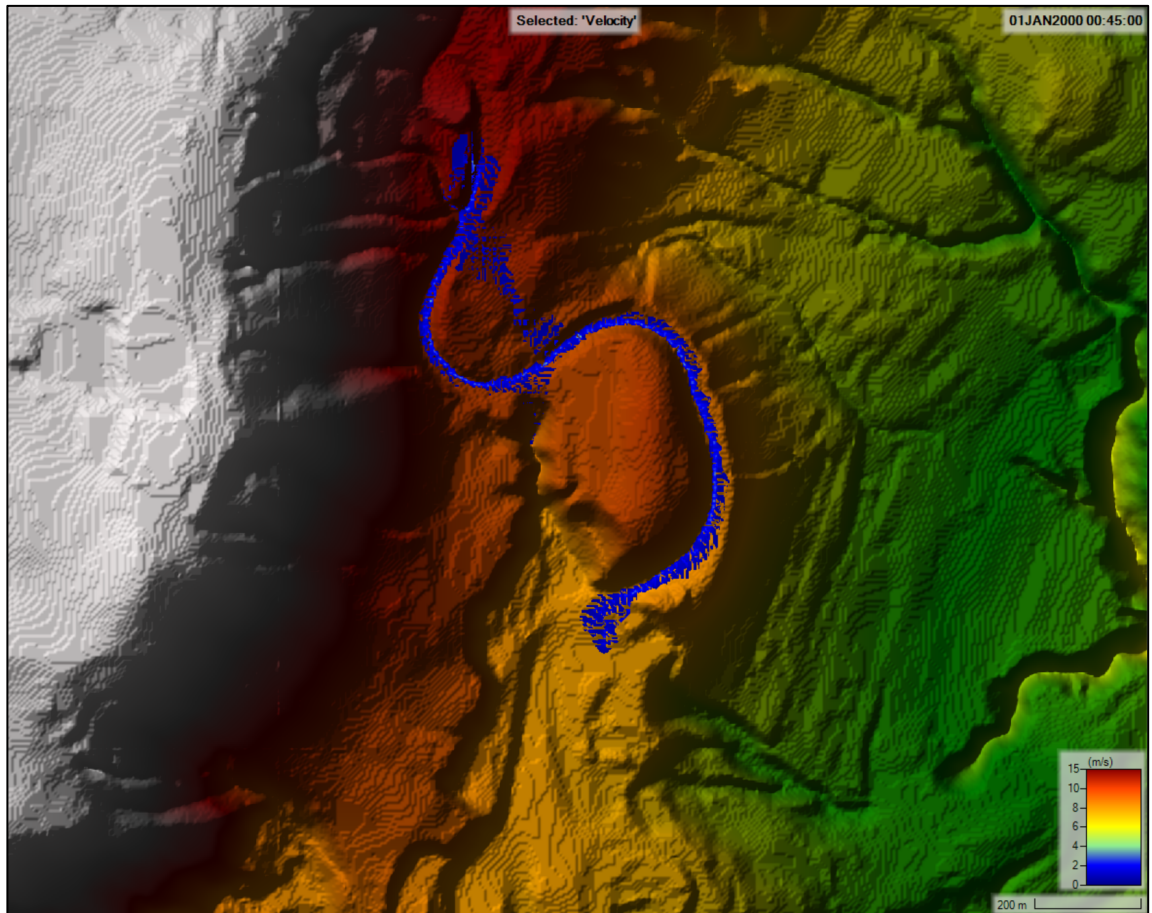


Figura 7 Mapa de Velocidad - Escenario Urbano (CN=85) - TR 100 Años

4.3.2. Análisis Comparativo del Evento Extremo (TR=500 AÑOS)

Para evaluar el impacto hidrológico-hidráulico del cambio de uso de suelo, se sometió a la microcuenca 10 a la tormenta de diseño (TR=500 años) bajo dos condiciones opuestas: cobertura natural (Bosque, CN=45) y urbanización densa (CN=85).

El evento de 500 años representa un escenario de riesgo residual extremo, utilizado para identificar zonas de falla en el sistema.

4.3.2.1. Zonas de Inundación (TR=500 AÑOS)

Las Figuras 8 y 9 ilustran el impacto de la urbanización ante un evento extremo.

- Saturación del Valle: En el Escenario Natural (Figura 8), aunque la magnitud de la tormenta genera desbordes, la mancha de inundación mantiene cierta coherencia con la morfología del cauce. Sin embargo, en el Escenario Urbano (Figura 9), se observa una desconexión total:

la quebrada desaparece visualmente, convertida en un cuerpo de agua masivo que ocupa todo el fondo del valle.

- Impacto en Zona Baja: La zona de deposición final en el escenario urbano se expande lateralmente de forma agresiva, creando una "balsa" de inundación con tirantes que harían inviable la presencia de cualquier infraestructura habitacional en la cota baja de la microcuenca.

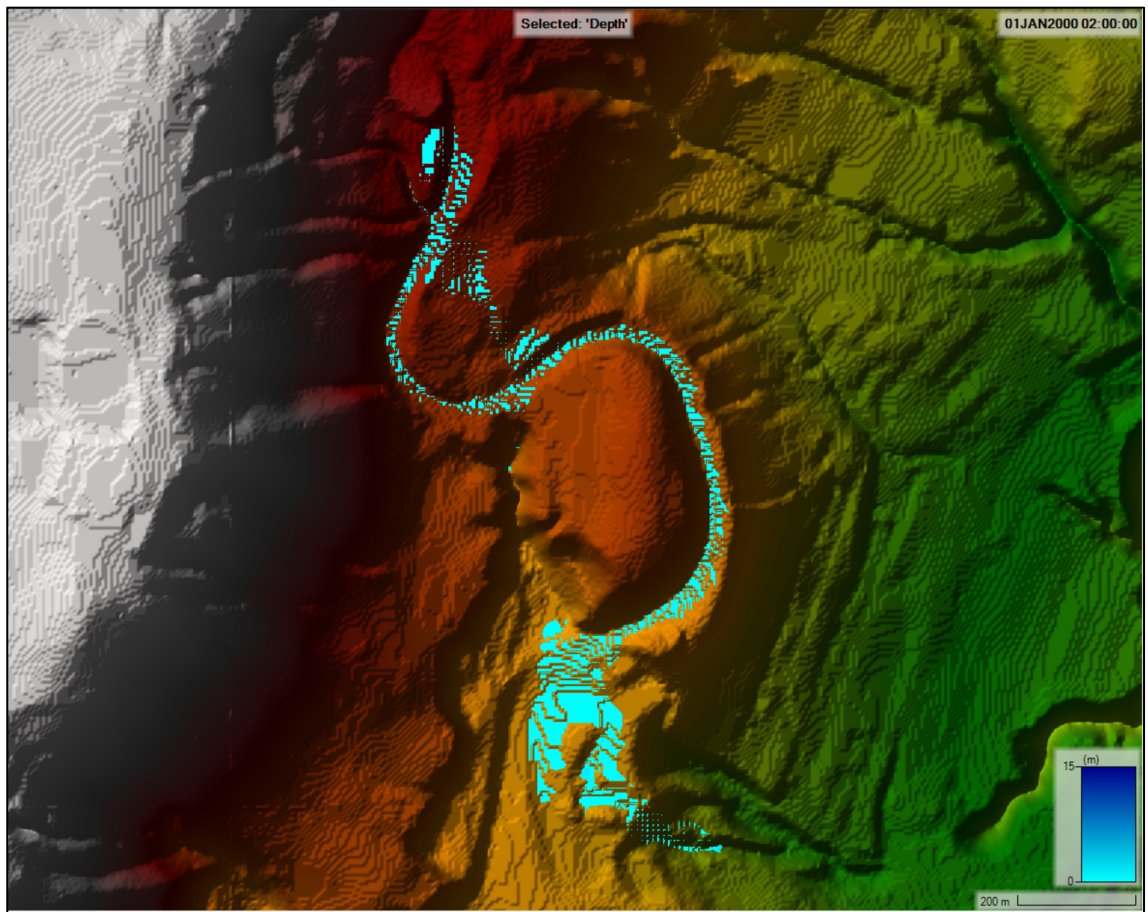


Figura 8 Mapa de Profundidad - Escenario Forestal (CN=45) – TR=500 Años

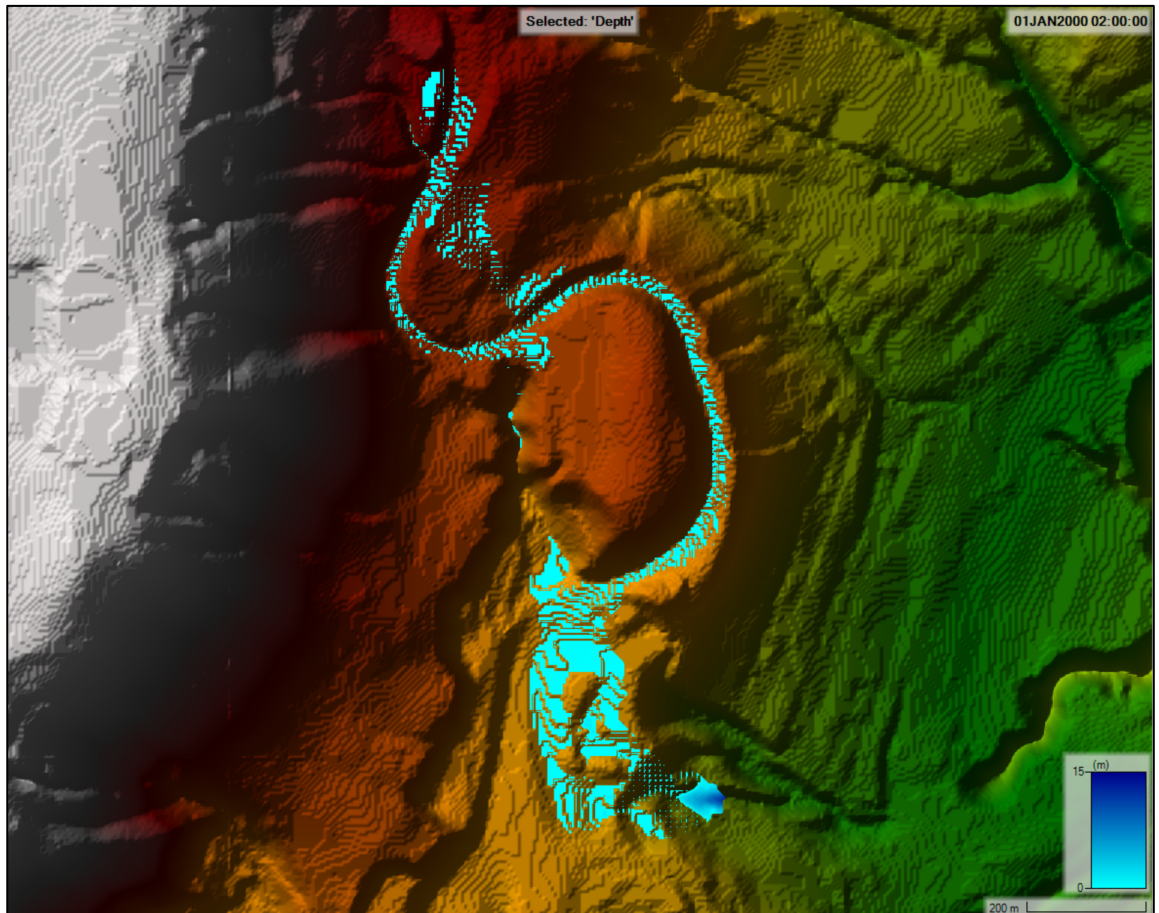


Figura 9 Mapa de Profundidad - Escenario Urbano (CN=85) – TR=500 Años

4.3.2.2. Velocidades de Flujo (TR= 500 AÑOS)

La comparación entre la Figura 10 y la Figura 11 muestra un salto cualitativo en la peligrosidad del flujo.

- **Superación del Umbral Erosivo:** En el Escenario Urbano (Figura 11), la aparición de zonas con colores más claros indica que el flujo alcanza velocidades superiores a 2.0 m/s. Este valor es crítico para la estabilidad del cauce, ya que de acuerdo con las tablas de velocidades máximas permisibles citados en Chow (1959), los materiales típicos de lechos naturales (como gravas y tierras francas) tienen un límite de resistencia a la erosión que oscila entre 1.2 y 1.5 m/s. Al superar los 2.0 m/s, el flujo sobrepasa la tensión tractiva crítica del material, garantizando procesos de socavación activa que pueden desestabilizar taludes y cimientos (Chow, 1959).

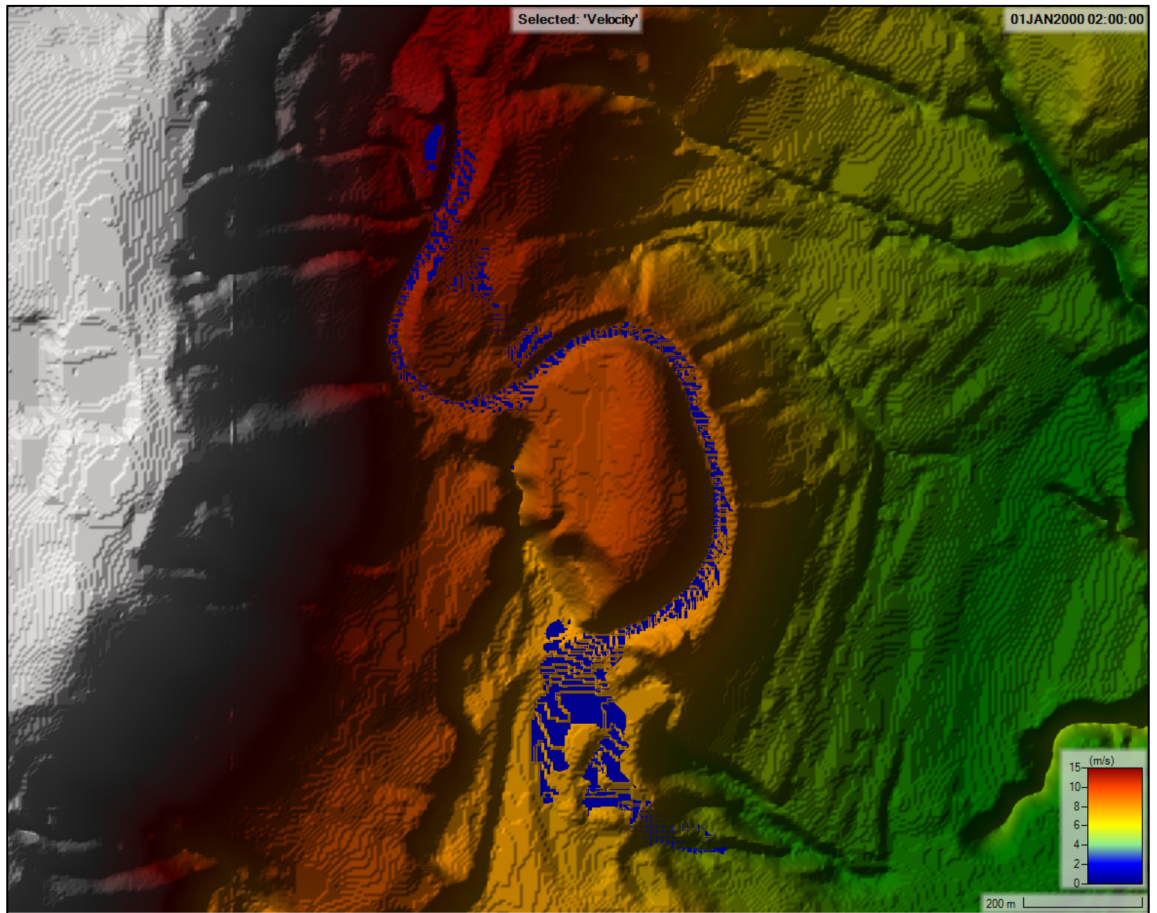


Figura 10 Mapa de Velocidad - Escenario Forestal (CN=45) - TR 500 Años

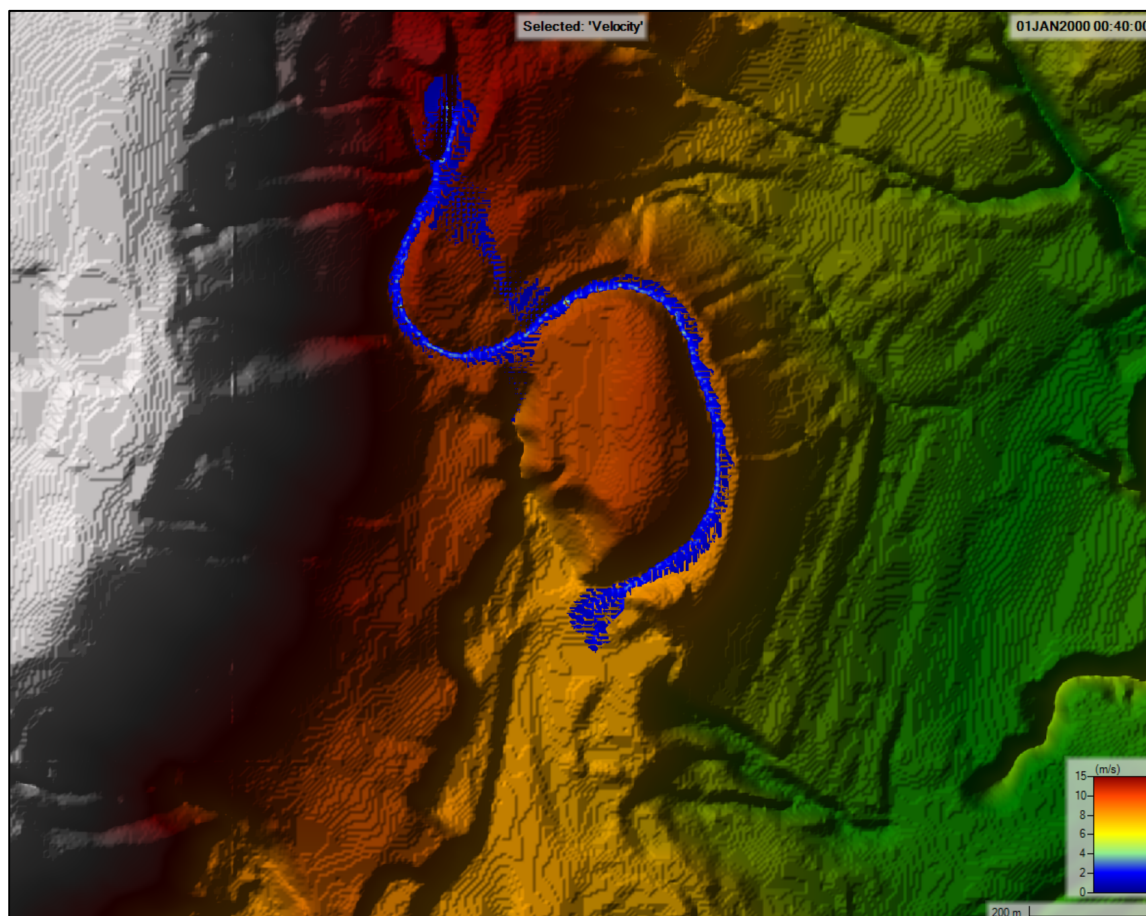


Figura 11 Mapa de Velocidad - Escenario Urbano (CN=45) - TR 500 Años

4.4. VALIDACIÓN Y DESEMPEÑO DEL MODELO

Siguiendo la metodología establecida en la Fase 5, se evaluó la plausibilidad de los resultados mediante validación cruzada.

4.4.1. Validación Meteorológica

La Tabla 3 presenta la comparación estadística entre las intensidades de lluvia derivadas del esquema CHIRPS-Gumbel (I_{HEC}) y los datos observados en la estación Iñaquito (I_{INAMHI}). Este análisis se centra en las intensidades para validar el insumo principal del modelo antes de su transformación en escorrentía. Los errores observados (RME 23% – 44%) son esperables debido a la distancia de 3 km entre el parque y la estación, lo que refleja la alta variabilidad espacial de la precipitación en los Andes. Además, si bien las magnitudes de los caudales pico difieren entre HEC-HMS y el Método Racional, está bien documentado que el Método Racional suele arrojar resultados conservadores y sobreestimados en cuencas naturales (Weaver, 2005), debido a que sus coeficientes simplificados no pueden replicar completamente la compleja infiltración forestal (Chow et al., 1988). Sin embargo, la fuerte

consistencia de los datos de precipitación y las tendencias hidrológicas compartidas confirman que el marco de modelación es confiable según los estándares internacionales (Moriassi et al., 2007).

Tabla 3 Comparación estadística (RME) entre las intensidades de lluvia derivadas por satélite (I_{HEC}) y los registros oficiales de la estación terrestre (I_{INAMHI}) a través de los periodos de retorno evaluados.

Periodo de Retorno (AÑOS)	I_{HEC} (mm/h)	I_{Rat} (mm/h)	RME (%)
5	39.49	51.34	23%
10	43.82	59.78	27%
25	50.29	73.10	31%
50	55.80	85.12	34%
100	61.92	99.12	38%
500	78.83	141.14	44%

Adicionalmente, el análisis del error absoluto arrojó una Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) global de 34.26 mm/h. Este valor que indica la magnitud promedio de la desviación entre el modelo y la estación es técnicamente justificable considerando no solo la distancia horizontal de 3 km, sino también el significativo desnivel orográfico existente. Mientras la estación Ñaquito se ubica a una cota de 2.789 m.s.n.m. (INAMHI, 2015), el Parque Guanguiltagua alcanza los 2.915 m.s.n.m. (Fundación Sembrando Esperanza, 2023). Este gradiente altitudinal de 126 metros influye directamente en la dinámica de las tormentas convectivas y la distribución espacial de la lluvia, por lo que las diferencias observadas reflejan la variabilidad natural del clima andino más que una deficiencia del modelo satelital.

4.4.2. Validación Hidrológica (Tendencia de Caudales)

Para verificar la consistencia física de la transformación lluvia-escorrentía simulada en HEC-HMS, se estableció primero una línea base de referencia utilizando el Método Racional. Este método, aunque simplificado, proporciona un estándar de diseño reconocido para evaluar magnitudes de flujo en ingeniería hidráulica.

Los caudales pico estimados mediante este método (Q_{Rat}) para los escenarios forestal y urbano se detallan en la Tabla 4. Como se puede observar, el Método Racional tiende a generar valores absolutos más altos que HEC-HMS debido a que sus coeficientes estandarizados no capturan la complejidad de la abstracción inicial del suelo forestal con la misma precisión que el método del Número de Curva.

Tabla 4. Caudales máximos (m^3/s) estimados mediante el Método Racional para los escenarios forestal y urbano.

ELEMENTO	MÉTODO RACIONAL CN=45 (QRat) (M3/S)						MÉTODO RACIONAL CN=85 (QRat) (M3/S)					
	RP=5 AÑOS	RP=10 AÑOS	RP=25 AÑOS	RP=50 AÑOS	RP=100 AÑOS	RP=500 AÑOS	RP=5 AÑOS	RP=10 AÑOS	RP=25 AÑOS	RP=50 AÑOS	RP=100 AÑOS	RP=500 AÑOS
MIC 1	2.1	2.4	3.0	3.4	4.0	5.7	5.3	6.1	7.5	8.7	10.2	14.5
MIC 2	2.1	2.4	3.0	3.4	4.0	5.7	5.3	6.1	7.5	8.7	10.2	14.5
MIC 3	2.1	2.4	3.0	3.4	4.0	5.7	5.3	6.1	7.5	8.7	10.2	14.5
MIC 4	2.5	2.9	3.5	4.1	4.8	6.8	6.3	7.4	9.0	10.5	12.2	17.4
MIC 5	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.1	1.1	1.2	1.5	1.7	2.0	2.9
MIC 6	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.1	1.1	1.2	1.5	1.7	2.0	2.9
MIC 7	2.5	2.9	3.5	4.1	4.8	6.8	6.3	7.4	9.0	10.5	12.2	17.4
MIC 8	1.2	1.4	1.8	2.1	2.4	3.4	3.2	3.7	4.5	5.2	6.1	8.7
MIC 9	1.7	1.9	2.4	2.7	3.2	4.6	4.2	4.9	6.0	7.0	8.1	11.6
MIC 10	5.0	5.8	7.1	8.2	9.6	13.7	12.7	14.7	18.0	21.0	24.4	34.8
MIC 11	2.1	2.4	3.0	3.4	4.0	5.7	5.3	6.1	7.5	8.7	10.2	14.5
MIC 12	2.9	3.4	4.1	4.8	5.6	8.0	7.4	8.6	10.5	12.2	14.3	20.3
MIC 13	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.1	1.1	1.2	1.5	1.7	2.0	2.9
MIC 14	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.1	1.1	1.2	1.5	1.7	2.0	2.9
MIC 15	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.1	1.1	1.2	1.5	1.7	2.0	2.9

Una vez obtenidos estos valores de referencia, se procedió a evaluar la correlación con los resultados del modelo HEC-HMS (Q_{HEC}). La concordancia en la tendencia se cuantificó mediante el Coeficiente de Determinación (R^2). Los resultados, presentados en la Tabla 5, muestran valores de R^2 entre 0.93 y 0.99. Este alto nivel de correlación lineal demuestra que, aunque las magnitudes difieren (por la naturaleza conservadora del Racional), el modelo HEC-HMS replica con exactitud la física de la cuenca, respondiendo a los incrementos de lluvia y cambios de uso de suelo con la misma tendencia y proporcionalidad que la teoría hidrológica clásica establece.

Tabla 5 Coeficiente de determinación (R^2) comparando los caudales pico simulados por HEC-HMS (Q_{HEC}) y las estimaciones del Método Racional (Q_{Rat}) para validar la consistencia hidrológica.

Periodo de Retorno (AÑOS)	(R^2) for NC 45	(R^2) for NC 85
5	0.93	0.98
10	0.98	0.98
25	0.98	0.99
50	0.98	0.99
100	0.99	0.99

4.5. ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA URBANIZACIÓN

La conversión a una cobertura de suelo urbana (CN=85) alteró drásticamente la respuesta de escorrentía. Para la misma tormenta de 5 años, todas las microcuencas generaron escorrentía medible, con la MIC 10 alcanzando 1.5 m³/s, lo que representa un incremento del 150% respecto al caso forestal.

A medida que aumentó el periodo de retorno, el efecto de amplificación se volvió marcadamente no lineal:

- Al nivel de 50 años, la MIC 10 produjo 3.6 m³/s, un incremento del 300% sobre la condición forestal (0.9 m³/s).
- Al nivel de 100 años, el caudal pico en la MIC 10 subió a 4.6 m³/s, un aumento del 360%.
- Para el evento de 500 años, la MIC 10 generó 7.8 m³/s, representando un incremento del 500%.

Los cambios relativos más dramáticos ocurrieron en las microcuencas más pequeñas. Por ejemplo, la MIC 5 y la MIC 13 (de 0.1 km² cada una) experimentaron un incremento del 700% en el caudal pico (pasando de 0.1 a 0.8 m³/s) bajo la tormenta de 500 años. De manera similar, la MIC 15 mostró un comportamiento idéntico, subrayando la elevada vulnerabilidad de las cuencas pequeñas y empinadas ante la cobertura impermeable.

El incremento relativo del caudal pico debido a la urbanización exhibió una clara tendencia positiva con el periodo de retorno. En la mayoría de las microcuencas, el incremento relativo subió del 100–200% para eventos de 5 a 10 años, al 300–400% para eventos de 50 a 100 años, y excedió el 500% para el evento de 500 años.

Esta no linealidad indica que la infraestructura verde, como el Parque Guangüiltagua, proporciona beneficios de mitigación de inundaciones desproporcionadamente mayores durante eventos de lluvia extrema, precisamente aquellos que se proyecta se vuelvan más frecuentes bajo el cambio climático.

Tabla 6. Incremento relativo (%) en el caudal pico resultante del cambio de uso de suelo (de forestal a urbanizado) para todos los periodos de retorno evaluados.

ELEMENT	A (KM ²)	RP=5 AÑOS	RP=10 AÑOS	RP=25 AÑOS	RP=50 AÑOS	RP=100 AÑOS	RP=500 AÑOS
		INCREMENTO RELATIVO (%)	INCREMENTO RELATIVO (%)	INCREMENTO RELATIVO (%)	INCREMENTO RELATIVO (%)	INCREMENTO RELATIVO (%)	INCREMENTO RELATIVO (%)

MIC 1	0.5	133%	200%	200%	300%	400%	580%
MIC 2	0.5	133%	200%	200%	300%	400%	467%
MIC 3	0.5	133%	200%	200%	300%	400%	580%
MIC 4	0.6	133%	200%	225%	325%	320%	483%
MIC 5	0.1	100%	100%	200%	300%	400%	700%
MIC 6	0.1	100%	100%	100%	200%	200%	500%
MIC 7	0.6	167%	175%	275%	280%	380%	486%
MIC 8	0.3	200%	100%	200%	300%	400%	467%
MIC 9	0.4	150%	250%	200%	300%	400%	550%
MIC 10	1.2	150%	186%	250%	300%	360%	500%
MIC 11	0.5	200%	133%	233%	333%	325%	480%
MIC 12	0.7	125%	200%	220%	320%	350%	543%
MIC 13	0.1	100%	100%	200%	300%	400%	700%
MIC 14	0.1	100%	0%	100%	200%	200%	500%
MIC 15	0.1	100%	100%	200%	300%	400%	700%

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Plausibilidad hidráulica y coherencia teórica

Debido a la ausencia de instrumentación fluviométrica en la zona de estudio, no fue factible realizar una calibración basada en registros limnimétricos históricos. No obstante, los resultados presentan consistencia técnica con la teoría hidrológica establecida. El comportamiento observado ante el incremento del Número de Curva se alinea con la metodología del SCS-CN (NRCS, 2004), donde la impermeabilización del suelo reduce las abstracciones iniciales y magnifica el volumen de escorrentía directa. Asimismo, las velocidades simuladas en el escenario natural (< 1.5 m/s) son congruentes con la estabilidad actual del cauce, mientras que las del escenario urbano (> 2.0 m/s) coinciden con los rangos de flujo erosivo descritos en la literatura clásica de hidráulica (Chow, 1959).

5.2. Limitaciones del modelo: flujo de agua clara vs. Hiperconcentrado

Es necesario precisar que el modelo HEC-RAS se ejecutó bajo la condición de "agua clara" (Clear Water Flow). Esta aproximación asume que el fluido mantiene las propiedades del agua pura, sin considerar el transporte de sedimentos o escombros. Sin embargo, en cuencas de montaña bajo eventos extremos, es probable la ocurrencia de flujos hiperconcentrados.

5.3. Implicaciones para la Zonificación

La expansión lateral de la mancha de inundación demostrada en los resultados valida la necesidad de actualizar los criterios de delimitación de zonas de riesgo. Los retiros fijos (ej. franjas de protección estáticas) resultan insuficientes ante la dinámica de una cuenca en proceso de urbanización. Se sugiere adoptar una zonificación basada en la envolvente máxima de inundación del escenario futuro (CN=85), garantizando así la seguridad de la infraestructura ante los cambios previstos en el uso del suelo.

5.4. Líneas de Investigación y Trabajos Futuros

La presente investigación ha establecido una línea base hidrológica-hidráulica crítica para el Parque Metropolitano Guanguiltagua; sin embargo, abre nuevas interrogantes que exceden el alcance de este estudio. Con el objetivo de dar continuidad a esta línea de investigación y fortalecer la gestión del riesgo en la capital, se recomiendan las siguientes temáticas para futuros trabajos de titulación:

1. Modelación de Flujos de Lodos y Transporte de Sedimentos

¿Por qué?: Porque este estudio asumió "agua limpia".

Propuesta: Se recomienda que futuras investigaciones incorporen la reología de fluidos no newtonianos utilizando módulos de transporte de sedimentos (ej. HEC-RAS Sediment Transport o FLO-2D). Esto permitiría cuantificar el riesgo de obstrucción en los colectores y pasos de agua aguas abajo, acercándose más a la realidad de un evento aluvional andino.

2. Evaluación de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS)

¿Por qué?: Porque aquí solo comparamos "Bosque vs. Cemento". Falta el punto medio.

Propuesta: Evaluar escenarios de urbanización de bajo impacto. Se sugiere modelar la implementación de infraestructuras verdes (techos vivos, pavimentos permeables, jardines de lluvia) dentro del escenario urbano, para determinar cuantitativamente si estas tecnologías pueden mitigar el incremento de caudal del 700% detectado en esta tesis.

3. Implementación de una Red de Monitoreo Participativo

¿Por qué?: Porque dependimos de datos satelitales (CHIRPS).

Propuesta: Diseño e instalación de una red básica de monitoreo hidrometeorológico (pluviómetros y sensores de nivel de bajo costo basados en Arduino/IoT) dentro del parque. La recolección de estos datos primarios permitiría, en el mediano plazo,

realizar una calibración precisa de los parámetros del modelo aquí presentado, reduciendo la incertidumbre.

6. CAPÍTULO V

6.1. CONCLUSIONES

Se demostró la viabilidad técnica y confiabilidad del uso de tecnologías de teledetección para la modelación hidrológica en zonas de montaña carentes de estaciones de aforo. La validación cruzada entre los datos satelitales (CHIRPS v2.0) y los registros terrestres confirmó que, a pesar de la variabilidad espacial inherente a los Andes, el modelo reproduce fielmente la física de la cuenca. Esto se sustenta en un coeficiente de determinación (R^2) superior a 0.93 al contrastar la tendencia de caudales con el Método Racional, validando así el marco metodológico propuesto como una herramienta robusta para la gestión de riesgos en la región.

Se determinó que el Parque Metropolitano Guangüiltagua, bajo su condición forestal actual (CN=45), funciona como una infraestructura de regulación hídrica altamente eficiente. Los resultados hidrológicos evidencian que, para eventos de precipitación frecuentes (periodos de retorno de 5 y 10 años), la cobertura vegetal es capaz de absorber casi en su totalidad la lluvia en las microcuencas pequeñas, generando volúmenes de escorrentía nulos o despreciables. Esto confirma que el parque actúa como una barrera hidráulica natural que protege a los barrios ubicados aguas abajo, evitando la saturación de los sistemas de drenaje urbano existentes.

La modelación de escenarios hipotéticos reveló que la conversión de la cobertura boscosa a suelo urbano impermeable (CN=85) no genera un aumento lineal del riesgo, sino exponencial. Mientras que para lluvias cotidianas el caudal pico se incrementa en un 150%, ante eventos extremos (500 años) el impacto se magnifica desproporcionadamente, registrando aumentos de hasta un 700% en los caudales máximos. Este hallazgo es crítico, pues demuestra que la pérdida del bosque eliminaría la resiliencia de la cuenca precisamente cuando más se necesita, que es durante los eventos climáticos extremos.

El análisis hidráulico bidimensional permitió identificar que la urbanización del parque transformaría radicalmente el comportamiento del flujo en la quebrada. Se observó que, bajo condiciones urbanizadas, el volumen de agua triplica la capacidad de los cauces naturales, generando una llanura de inundación masiva en la zona de

descarga que no existe en la actualidad. Además, el aumento de las velocidades de flujo por encima de los 2.0 m/s en el escenario urbano supera los umbrales de resistencia de los lechos naturales, lo que activaría procesos severos de socavación y erosión, añadiendo un riesgo geotécnico de inestabilidad de laderas al riesgo de inundación ya existente.

La investigación concluye que la preservación del Parque Guanguiltagua no responde únicamente a criterios ecológicos o paisajísticos, sino que constituye una medida estructural de gestión de riesgos costo-efectiva. La evidencia cuantitativa demuestra que reemplazar la función reguladora del parque con infraestructura gris (alcantarillado) requeriría sistemas sobredimensionados para manejar volúmenes de agua que actualmente son gestionados de forma natural. Por tanto, la conservación de esta cobertura boscosa es indispensable para garantizar la seguridad hídrica del norte de Quito y dar cumplimiento al mandato constitucional de reducción de vulnerabilidad frente a amenazas naturales.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Advances in remote sensing and GIS applications in watershed hydrology: a systematic review. (2025). *Journal of Hydrology*, 664(A), 134459. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134459>
- Berland, A., Shiflett, S. A., Shuster, W. D., Garmestani, A. S., Goddard, H. C., Herrmann, D. L., & Hopton, M. E. (2017). The role of trees in urban stormwater management. *Landscape and Urban Planning*, 162, 167-177.
- Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS River Analysis System: 2D Modeling User's Manual*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC). Davis, CA.
- Brunner, G. W. (2022). *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Davis, CA. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>
- Campos Aranda, D. F. (1978). Perfil del autor en ResearchGate. Recuperado de <https://www.researchgate.net/profile/Daniel-Francisco-Arand>
- Castro Ortigón, Y. A., Acosta-Prado, J. C., & Acosta Castellanos, P. M. (2022). Impact of Land Cover Changes on the Availability of Water Resources in the Regional

- Natural Park Serranía de Las Quinchas. *Sustainability*, 14(6), 3237. <https://doi.org/10.3390/su14063237>
- Chiang, S., Chang, C.-H., & Chen, W.-B. (2022). Comparison of Rainfall-Runoff Simulation between Support Vector Regression and HEC-HMS for a Rural Watershed in Taiwan. *Water*, 14(2), 191. <https://doi.org/10.3390/w14020191>
- Choi, Y., Kang, J., & Kim, J. (2021). Urban flood adaptation planning for local governments: Hydrology analysis and optimization. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 59, 102213. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102213>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Company. New York.
- Cisneros Mora, S., & Granja Guerra, E. A. (2023). Análisis del riesgo de inundaciones en seis barrios del sur de Quito y planificación de estrategias para la reducción de la vulnerabilidad, Cantón Quito, 2022-2023 [Tesis de Ingeniería Ambiental]. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/25628>
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). Registro Oficial 449. https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.pdf
- Choez, B., Cartaya, S., & Mero, D. (2019). Analysis of the vulnerability to flooding in the Santa Ana de Vuelta larga Parish, province of Manabí, Ecuador. *Investigaciones Geográficas*, 98, 1–14. <https://doi.org/10.14350/ig.59767>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2025). About green infrastructure. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/green-infrastructure/about-green-infrastructure>
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., ... & Mikkelsen, P. S. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525-542.
- Fletcher, T. D., Andrieu, H., & Hamel, P. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources*, 51, 261–279. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001>
- Flores Armas, I. P. (2022). Definición de estrategias de mitigación ante inundaciones en el contexto del cambio climático para los barrios ubicados en las laderas de Quito

– Caso de estudio barrio San Enrique de Velasco [Tesis de maestría]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

- Fundación Sembrando Esperanza. (2023). Parque Metropolitano Guanguiltagua de Quito. Recuperado de <https://fsembrandoesperanza.org/parque-metropolitano-guanguiltagua-de-quito/>
- Hamdan, A. N. A., Almuktar, S., & Scholz, M. (2021). Rainfall-Runoff Modeling Using the HEC-HMS Model for the Al-Adhaim River Catchment, Northern Iraq. *Hydrology*, *8*(2), 58. <https://doi.org/10.3390/hydrology8020058>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report*. Cambridge University Press.
- International Union for Conservation of Nature (IUCN). (2020). *Global Standard for Nature-based Solutions. A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS*. Gland, Switzerland. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.08.en>
- Kane, A., Hettiarachchi, S., Ou, Y., & Sharma, A. (2019). Can integrated green spaces and storage facilities absorb the increased risk of flooding due to climate change in developed urban environments? *Journal of Hydrology*, 124201. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124201>
- Koutsoyiannis, D. (2004). Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation. *Hydrological Sciences Journal*, *49*(4), 575–590. <https://doi.org/10.1623/hysj.49.4.575.54430>
- Li, L., Uyttenhove, P., & Vaneetvelde, V. (2020). Planning green infrastructure to mitigate urban surface water flooding risk – A methodology to identify priority areas applied in the city of Ghent. *Landscape and Urban Planning*, *194*, 103703. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103703>
- López-Bermeo, C., Montoya, R. D., Caro-Lopera, F. J., & Díaz-García, J. A. (2022). Validation of the accuracy of the CHIRPS precipitation dataset at representing climate variability in a tropical mountainous region of South America. *Physics and Chemistry of the Earth*, *127*, 103184. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103184>
- Mamun, A. A., Rahman, A., & Haddad, K. (2021). Regional flood frequency analysis: A comparison between Gumbel, log-Pearson Type III and GEV distributions. *Water*, *13*(3), 315. <https://doi.org/10.3390/w13030315>

- Miller, J., & Hutchins, M. (2017). The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality: A review of the evidence concerning the United Kingdom. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12, 345-362.
- Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., & Stouffer, R. J. (2015). On critiques of "Stationarity is dead: Whither water management?". *Water Resources Research*, 51(9), 7785-7789.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Ochoa-Tocachi, B. F., Bardales, J. D., & Buytaert, W. (2019). Potential contributions of pre-Inca infiltration infrastructure to Andean water security. *Nature Sustainability*, 2(7), 584-593.
- Peker, I. B., Gülbaz, S., Demir, V., Orhan, O., & Beden, N. (2024). Integration of HEC-RAS and HEC-HMS with GIS in Flood Modeling and Flood Hazard Mapping. *Sustainability*, 16(3), 1226. <https://doi.org/10.3390/su16031226>
- Roa Lobo, J., & Kamp, U. (2008). Modelos de elevación digital (MED) a partir de sistemas satelitales: una introducción y análisis comparativo en la cordillera de Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*. <https://www.redalyc.org/pdf/3477/347730375002.pdf>
- Rohmat, F. I. W., Sa'adi, Z., Stamataki, I., Kuntoro, A. A., Farid, M., & Suwarman, R. (2022). Flood modeling and baseline study in urban and high population environment: A case study of Majalaya, Indonesia. *Urban Climate*, 46, 101332. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101332>
- Salas, J. D., Obeysekera, J., & Vogel, R. M. (2020). Techniques for assessing water infrastructure for nonstationary extreme events: A review. *Journal of Hydrology*, 589, 125163.
- Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito y C40. (2020). Plan de Acción de Cambio Climático de Quito 2020. Municipio de Quito.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de Argentina. (2007). Second National Communication for the Framework Convention of the United Nations on Climate Change. Buenos Aires, Argentina.
- Soulis, K. X., Valiantzas, J. D., Ntoulas, N., Kargas, G., & Nektarios, P. A. (2017). Simulation of green roof runoff under different substrate depths and vegetation covers. *Journal of Environmental Management*, 200, 434-445.

- Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., & Parsons, D. B. (2003). The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9), 1205–1217. <https://doi.org/10.1175/BAMS-84-9-1205>
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. (2020). Estándar Global de la UICN para Soluciones Basadas en la Naturaleza. UICN.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE), Hydrologic Engineering Center. (2021). Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual. Davis, CA. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (2016). HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual. Version 5.0. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Davis, CA.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (2023). HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Version 6.5. US Army Corps of Engineers.
- United States Department of Agriculture-Soil Conservation Service (USDA-SCS). (1972). National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture.
- Wasko, C., Nathan, R., Stein, L., & O'Shea, D. (2021). Evidence of shorter more extreme rainfalls and increased flood variability under climate change. *Journal of Hydrology*, 603, 126994. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126994>
- Yu, X., & Zhang, J. (2023). The Application and Applicability of HEC-HMS Model in Flood Simulation under the Condition of River Basin Urbanization. *Water*, 15(12), 2249. <https://doi.org/10.3390/w15122249>
- Zhang, W., Villarini, G., & Wehner, M. (2021). Contrasting the responses of extreme precipitation to changes in surface air and dew point temperatures. *Journal of Climate*, 34(18), 7541-7555.
- Zimmermann, E., Bracalenti, L., Piacentini, R., & Inostroza, L. (2016). Urban flood risk reduction by increasing green areas for adaptation to climate change. *Procedia Engineering*, 161, 2241–2246. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.822>

8. ANEXOS

8.1. variación del caudal máximo en las cuencas delimitadas



