



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN LA GENERACIÓN DEL
HIDROGRAMA DE CRECIDA, CASO DE ESTUDIO: BARRIO “LA GASCA”, QUITO,
ECUADOR**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

título de Ingeniera Civil

AUTORA: Varela Villavicencio Naomy Carolina
TUTOR: Domínguez González Christian Gonzalo

Quito – Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Naomy Carolina Varela Villavicencio con documento de identificación N° 0604938977; manifiesto que:

Soy la autora y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 15 de agosto de 2024

Atentamente,



Naomy Carolina Varela Villavicencio
0604938977

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo , Naomy Carolina Varela Villavicencio con documento de identificación N° 0604938977; expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del Artículo Académico: “Estimación de la incertidumbre en la generación del hidrograma de crecida, caso de estudio: Barrio “La Gasca”, Quito, Ecuador”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 15 de agosto de 2024

Atentamente,



Naomy Carolina Varela Villavicencio
0604938977

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Domínguez González Christian Gonzalo con documento de identificación N° 1716568785, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN LA GENERACIÓN DEL HIDROGRAMA DE CRECIDA, CASO DE ESTUDIO: BARRIO “LA GASCA”, QUITO, ECUADOR, realizado por Naomy Carolina Varela Villavicencio con documento de identificación N° 0604938977, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 30 de julio de 2024

Atentamente,



Ing. Domínguez González Christian Gonzalo, PhD.

1716568785

ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN LA GENERACIÓN DEL HIDROGRAMA DE CRECIDA, CASO DE ESTUDIO: BARRIO “LA GASCA”, QUITO, ECUADOR

ESTIMATION OF UNCERTAINTY IN THE GENERATION OF THE FLOOD HYDROGRAM, CASE STUDY: “LA GASCA” NEIGHBORHOOD, QUITO, ECUADOR

Naomy Varela - Villavicencio¹, Christian Domínguez -González²

Resumen

El crecimiento urbano global ha alterado los procesos naturales de drenaje, incrementando la escorrentía superficial debido a una menor infiltración del suelo. En el barrio La Gasca, se evaluaron hidrogramas de crecida con diferentes métodos. El Método SCS estima un caudal medio de 2.75 m³/s (rango 0.11-5.39 m³/s), un volumen de escorrentía de 21.96 mm y un tiempo pico de 688 minutos. En contraste, el Método de Clark proporciona un caudal medio de 6.91 m³/s (rango 6.79-7.02 m³/s), un volumen de escorrentía de 38.74 mm y un tiempo pico de 647 minutos. El Método SCS presenta una incertidumbre del 48.50% para el límite superior y del 55.42% para el inferior, mientras que el Método de Clark muestra una incertidumbre del 27.92% y 55.01%, respectivamente. Esto indica que el Método de Clark ofrece estimaciones más consistentes con menor incertidumbre comparado con el Método SCS.

Palabras Clave: Escorrentía, Hidrograma de crecida, Tasa de infiltración, Tormenta de diseño, Incertidumbre.

Abstract

Global urban growth has altered natural drainage processes, increasing surface runoff due to less soil infiltration. In the La Gasca neighborhood, flood hydrographs are evaluated with different methods. The SCS Method estimates an average flow rate of 2.75 m³/s (range 0.11-5.39 m³/s), a runoff volume of 21.96 mm and a peak time of 688 minutes. In contrast, the Clark Method provides an average flow rate of 6.91 m³/s (range 6.79-7.02 m³/s), a runoff volume of 38.74 mm and a peak time of 647 minutes. The SCS Method presents an uncertainty of 48.50% for the upper limit and 55.42% for the lower limit, while the Clark Method shows an uncertainty of 27.92% and 55.01%, respectively. This indicates that the Clark Method offers more consistent estimates with lower uncertainty compared to the SCS Method.

Keywords: Runoff, Flood hydrograph, Infiltration rate, Design storm, Uncertainty.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador.

² Docente de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador.

Autor para correspondencia: nvarela@est.ups.edu.ec

1 Introducción

Las inundaciones representan una amenaza directa para la seguridad de la población, ya que las crecidas repentinas ponen en peligro la vida de las personas. Este riesgo se ha evidenciado en el barrio "La Gasca", ubicado en la ciudad de Quito, donde la interacción de diversos factores ha incidido en el sistema hidrológico de la ciudad. Desde 1961 hasta 2022 esta área ha experimentado recurrentes inundaciones, las cuales han generado daños significativos a las viviendas, infraestructuras y negocios, lo que conlleva considerables costos económicos para la ciudad y sus habitantes [1].

La relación entre fenómenos naturales como las inundaciones y el comportamiento hidrológico de una cuenca subraya cómo las alteraciones en el uso del suelo inciden directamente en el escurrimiento de agua. Este efecto se ve agravado en áreas urbanas donde el desarrollo ha transformado profundamente la infraestructura, modificando los procesos naturales de drenaje al expandir superficies impermeables como calles e infraestructura de hormigón. Estos cambios afectan negativamente la capacidad del suelo para filtrar el agua de lluvia, generando incertidumbre en la precisión de la tasa de infiltración, el uso del suelo y otros parámetros relevantes para la generación de hidrogramas de crecida.

Para generar hidrogramas de crecida es fundamental utilizar modelos hidrológicos puesto que son herramientas esenciales para predecir el comportamiento de las cuencas hidrográficas, aunque enfrentan desafíos significativos, especialmente en la modelación de la precipitación-escorrentía. Las variaciones notables en la estimación de caudales máximos y volúmenes de escorrentía

subrayan la complejidad y la falta de certeza en el análisis del comportamiento hidrológico.

Dada la complejidad inherente a la modelación hidrológica, el uso de herramientas, como el programa HEC-HMS, puede facilitar el proceso. Este software de código abierto, ampliamente reconocido a nivel global, incorpora una diversidad de modelos hidrológicos especializados en la simulación del proceso de precipitación-escorrentía para cuencas tanto urbanas como rurales, mediante enfoques que pueden ser aislados, continuos o semi-distribuidos [2]. La capacidad analítica avanzada de HEC-HMS no solo posibilita una modelación detallada y precisa de estos sistemas hidrológicos, sino que también facilita la evaluación cuantitativa de la incertidumbre en los parámetros y en las variables de entrada, reforzando su valor en el diseño y la implementación de estrategias de gestión de recursos hídricos efectivas.

Este estudio se enfoca en la generación de hidrogramas de crecida utilizando diferentes métodos hidrológicos, el objetivo principal es evaluar cómo los distintos escenarios afectan la precisión de los hidrogramas y, en consecuencia, determinar la incertidumbre asociada con estas estimaciones. Para lograr esto, se aplicarán los métodos de Clark y SCS bajo diversas configuraciones, tomando en cuenta la información proveniente de los mapas de uso del suelo, tipo de suelo, entre otros parámetros. Estos datos son fundamentales, ya que influyen directamente en las estimaciones de caudales y volúmenes de escorrentía. El análisis se centrará en cómo las variaciones en los datos de entrada, como la información sobre el uso y tipo de suelo, pueden impactar en la generación de hidrogramas de crecida y en la incertidumbre inherente a estos procesos.

2 Materiales y Métodos

Este estudio se basa en una metodología cuantitativa que se enfoca en la medición detallada y el análisis de variables hidrológicas fundamentales. El proceso comienza con la aplicación de las curvas IDF. Posteriormente, se procede a la obtención de los parámetros morfométricos de la cuenca, los cuales desempeñan un papel clave en la determinación de pérdidas y transformaciones hidrológicas.

Para la estimación del hidrograma de crecida se utilizan dos métodos: el método SCS y el método de Clark. Estos modelos hidrológicos se implementan mediante el programa HEC-HMS, cada uno proporcionando enfoques únicos para modelar la respuesta hidrológica ante las precipitaciones. Para abordar la incertidumbre asociada a estas estimaciones se calcula intervalos de confianza de las estimaciones.

2.1 Zona de estudio

La zona en la que se determina los caudales de crecida, se ubica en la provincia de Pichincha, en el cantón Quito, parroquia Belisario Quevedo, barrio “La Gasca”. Las coordenadas de la desembocadura de la cuenca, 17M 777308.72m E 9978223.89m S. Los límites del análisis de estudio se observan en la figura 1.

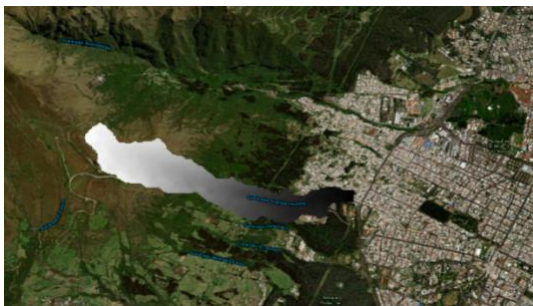


Figura 1. Elevación digital de la Cuenca Guanga Huaycu [3]. Zona gris delimita la cuenca de estudio ubicada en el barrio “La Gasca”, Quito, Ecuador.

2.2 Delimitación y características morfométricas de la cuenca

La delimitación de la cuenca es fundamental, ya que permite definir claramente el área geográfica que contribuye al flujo de agua hacia un punto de salida específico, lo cual facilita la estimación de parámetros de la cuenca. Para lograr esto, empleamos un modelo digital del terreno (MDT) con una precisión de 12.5 metros, obtenido del geo portal ASF data search-University of Alaska System [3]. Utilizando herramientas de ArcGIS, delineamos la zona de estudio e identificamos la dirección y acumulación de los ríos dentro de la cuenca.

A partir de esta información, se obtuvo los parámetros morfométricos como el área, perímetro, cota máxima, cota mínima, centroide, altitud media, altitud más frecuente, altitud de frecuencia media, pendiente promedio de la cuenca, longitud del curso principal, orden de la red hídrica y longitud de la red hídrica. Asimismo, se determinó la curva hipsométrica, la cual nos permite visualizar la distribución altitudinal de la cuenca.

La información sobre el tipo y uso del suelo fue obtenida del Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador (2021). En la cuenca de estudio, el tipo de suelo predominante es franco arenoso y arenoso. En cuanto al uso del suelo, se identifican áreas de pastizales, vegetación arbustiva, páramos, zonas pobladas y bosques de eucalipto. Estos datos se presentan visualmente en las figuras 2 y 3.

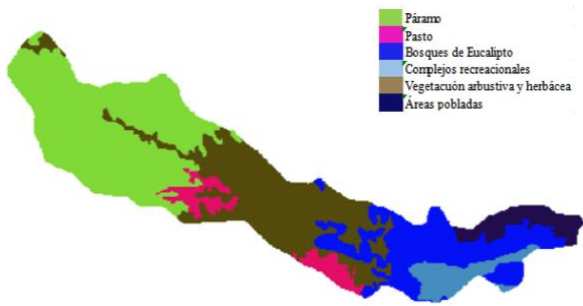


Figura 2. Uso del suelo [4].



Figura 3. Tipo de suelo. El color verde representa suelos que tienen bajo potencial de escurrimiento aun cuando estén húmedos. Tienen menos del 10% de arcilla y más del 90% de arena o grava. El color gris indica Suelos con moderada capacidad de infiltración cuando se encuentran saturados, tienen texturas franco-arenosas [4].

2.1.1 Tiempo de concentración

En este estudio, se empleó el método de isocronas a partir del MDT, utilizando ArcGIS, para determinar el tiempo de concentración en la cuenca de estudio. La construcción de isocronas implicó crear líneas que representan las rutas de flujo de agua desde los puntos más alejados hasta el punto de salida, identificando la red de drenaje natural, incluyendo los cauces más relevantes. Se calcularon los tiempos de recorrido del agua considerando la longitud de los cauces y la pendiente del terreno dentro de la cuenca. Estas isocronas muestran las áreas que contribuyen al caudal en intervalos de tiempo definidos de 2.5 min, lo que ha permitido estimar el tiempo que tarda el agua en recorrer distintas distancias dentro de la

cuenca antes de converger en el punto de salida [5]. Al tiempo de concentración estimado se agregó un intervalo de ± 5 min para considerar la incertidumbre existente en la topografía del terreno, El tiempo de retardo se estimó con la ecuación (1). En donde T_c es el tiempo de concentración [6]. Para utilizar el método de Clark es necesario el tiempo de concentración directamente obtenido por el método de isocronas así como también la relación área acumulada y tiempo acumulado.

$$Tiempo\ Retardo = 0.6 * T_c \quad (1)$$

2.3 Tormenta de diseño

La tormenta de diseño se emplea para describir un modelo de precipitación como entrada en un modelo hidrológico. Dependiendo del modelo, éste puede representar la intensidad en un punto o distribuir la precipitación a lo largo del tiempo. Para la estimación de las tormentas de diseño se utilizó la ecuación de intensidad máxima de la estación meteorológica Rumipamba-Bodegas-P08 [7]. En donde T es el tiempo de retorno en años, t es el tiempo de concentración en minutos:

$$I(t, T) = \frac{10.4503 \log(T) + 19.9919}{(28.9484 + t)^{0.9327}} \quad (2)$$

Se definieron tormentas de diseño para períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. En la implementación de la tormenta de diseño se aplicaron dos métodos: Bloque alterno y curvas de Huff.

2.2.1 Bloque alterno

El método del bloque alterno utiliza las relaciones de las curvas IDF para calcular la intensidad de precipitación en una cuenca específica, representándola en un hietograma de diseño donde la precipitación varía a lo largo del tiempo. El método implica dividir el registro histórico de precipitaciones en bloques de tiempo y seleccionar alternadamente los eventos de máxima precipitación dentro de cada bloque. Posteriormente, se calcula la precipitación acumulada y se determina el incremento de precipitación en cada intervalo. Finalmente, se ordenan los valores de precipitación por intervalo de manera que los valores más bajos se coloquen al inicio y al final, dejando los máximos en el centro del hietograma de diseño.

2.2.2 Curvas de Huff

Las curvas de Huff tuvieron su origen en 1967 a partir de datos pluviométricos recopilados en estaciones del estado de Illinois. Dado que no se han realizado investigaciones sobre las curvas de Huff en Ecuador, su aplicación en nuestro país podría no reflejar con precisión las condiciones locales [8].

Estas curvas representan un método analítico que combina el estudio de tormentas históricas con curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF). Cada evento de precipitación es analizado mediante gráficos de precipitación acumulada estandarizada, permitiendo la evaluación de su distribución a lo largo de diferentes periodos. La magnitud de las tormentas se define como la precipitación resultante al aplicar la máxima intensidad para una duración determinada.

El método clasifica las tormentas en cuatro cuartiles: los primeros dos corresponden a tormentas cortas y frecuentes, mientras que los dos últimos engloban tormentas más prolongadas y menos frecuentes. Para el caso

de este estudio, se utiliza el tercer cuartil, que abarca tormentas con duraciones entre 12.1 y 24 horas, para estudiar la magnitud y el comportamiento temporal de la precipitación [9].

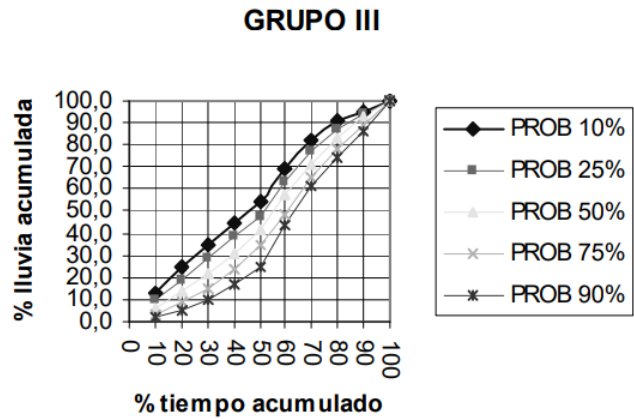


Figura 4. Distribución temporal de la lluvia. tercer cuartil (Huff, 1967) [10].

2.4 Incremento de porcentaje de impermeabilidad de suelo para escenario futuro

El porcentaje de permeabilidad para las condiciones actuales es de 10.33% , para hallar el incremento de este porcentaje para un escenario futuro proyectado a 50 años , se debe determinar el área total de urbanización a futuro en la cuenca de estudio perteneciente a la parroquia Belisario Quevedo para generar un escenario en el que se presente el incremento de porcentaje de impermeabilidad del suelo por desarrollos residenciales, para lo cual, se realizó un análisis de la tasa de crecimiento en la parroquia desde el año 2010 en donde se registra 3146 habitantes, hasta 2021 con 3663 habitantes, estos datos se han obtenido de los libros históricos de censos de población y vivienda del Ecuador (INEC) [11].

Para determinar la tasa de crecimiento se aplica el método geométrico ya que aumenta de forma proporcional al tamaño de la muestra, para lo que se aplica la ecuación (3), en donde r es la tasa de crecimiento poblacional, N^f es

la población del año final, N^f es la población del año inicial y k es el número de periodos en los que se observa el crecimiento, en este caso para 9 años [12].

$$r = \left(\frac{N^f}{N^i}\right)^{\frac{1}{k}} - 1 \quad (3)$$

Al obtener la tasa de crecimiento poblacional se proyecta el incremento de población para 50 años, de esta forma se simula el escenario futuro asumiendo que la tasa de crecimiento es constante. Para hallar la proyección se usa la ecuación (4) en donde PF es población futura, Pa es población actual, Ca es la tasa de crecimiento anual y N es el número de años de la proyección [12].

$$PF = Pa * (1 + CA)^N \quad (4)$$

Después de calcular la población futura, se revisó la encuesta de condiciones de vida llevada a cabo por el INEC, lo cual permitió determinar el tamaño de los hogares por áreas, de acuerdo con los datos del censo. Para esta zona de estudio, en 2021 se tiene 4 personas por hogar, este dato es importante ya que nos ayuda a encontrar el número de viviendas a futuro teniendo en cuenta que el tamaño promedio de estas edificaciones es de 110 m², para determinar el área total urbanizada se debe tomar en cuenta un porcentaje que pertenece a calles y áreas de recreación que es 10% [12].

2.5 Métodos para estimación de pérdidas

2.5.1 Método SCS o de abstracciones.

Este modelo relaciona la precipitación neta (P_f) y la precipitación total (P) en función de un número de curva (CN) y considerando una pérdida al inicio del evento de precipitación (I_a), seguida por una abstracción continua (F_a). Cuando el suelo alcanza la saturación, se produce escorrentía superficial [9].

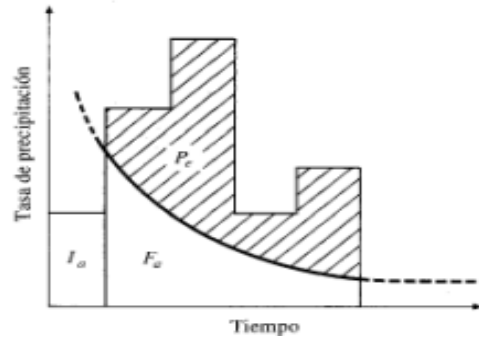


Figura 5. Abstracciones en un evento de precipitación, P_e es la abstracción continuada, I_a es la abstracción inicial, F_a es la parte que realmente se pierde [12].

$$Pn = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (5)$$

$$S = 25.4 * \left(\frac{1000}{CN} - 10\right) \quad (6)$$

La precipitación neta depende de S que es la capacidad máxima de almacenamiento. El elemento de precipitación y la capacidad máxima de almacenamiento se relaciona con el número hidrológico conocido como el número de curva (CN), esta es la parte empírica, se prueba la relación entre la precipitación y la precipitación neta con la ecuación (5) [9].

El número hidrológico CN está influenciado por varios factores como el uso y el tipo de suelo. Además, se considera el estado de humedad del suelo cuya clasificación es en condiciones secas (AMC I) con la ecuación (7), húmedas (AMC III) con la ecuación (8) y normales (AMC II) [9].

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad (7)$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 - 0.13CN(II)} \quad (8)$$

Conociendo el tipo del suelo se clasifica en 4 grupos que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 1. Tipos de suelo Ven Te Chow (1994) [9].

Grupo	Tipo de suelo
Grupo A	Arena Profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados
Grupo B	Suelos Poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.
Grupo C	Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla
Grupo D	Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos

En cuanto al uso del suelo, en la tabla 2 se puede observar una descripción detallada sobre el número de curva que corresponde a cada uso del suelo en función de su pendiente.

Tabla 2. Uso de suelo Tempez (1977) [13].

Grupo	Pendiente	A	B	C	D
Pasto	>3	68	79	86	89
	<3	39	61	74	80
Bosque eucalipto	>3	30	55	70	77
	<3	30	55	70	77
Bosque pino	>3	56	67	78	89
	<3	56	67	78	89
Bosque en regeneración	>3	45	66	77	83
	<3	45	66	77	83
Páramo Arbustivo	>3	39	55	69	75
	<3	17	33	67	80
Páramo Herbáceo	>3	49	69	78	85
	<3	39	59	75	83
Arbustos	>3	48	67	77	83
	<3	30	48	65	73
Cultivo	>3	67	76	82	86
	<3	64	73	78	82
Páramo arbustivo herbáceo	>3	43	65	76	82
	<3	32	58	72	79
Bosque con pasto	>3	57	73	82	86
	<3	32	58	72	79
Arbustos con pasto	>3	48	67	77	83
	<3	30	48	65	73
Parqueaderos y patios	>3	98	98	98	98
	<3	98	98	98	98
	>3	98	98	98	98

Aceras	<3	98	98	98	98
	>3	89	92	94	95
Centros comerciales	<3	89	92	94	95
	>3	77	86	91	94
Zonas permeables sin vegetación	<3	77	86	91	94
	>3	63	77	85	88
Zona ajardinada	<3	63	77	85	88
	>3	57	73	82	86
Árboles con pasto	<3	32	58	72	79
	>3	45	66	77	83
Pequeñas arboledas	<3	30	55	70	77
	>3	48	67	77	83
Matorral con pasto	<3	30	48	35	73

Para los mapas de uso y tipo de suelo, se estableció un intervalo en el número de curva debido a la incertidumbre presente en los mapas obtenidos del Geoportal del Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador.

2.4.2 Método de infiltración Inicial y constante.

Este enfoque emplea una sola capa hipotética de suelo para adaptarse a los cambios en el contenido de humedad, lo cual lo hace relativamente sencillo y adecuado para modelar cuencas hidrológicas donde la información detallada del subsuelo es limitada. El modelo de pérdida inicial y tasa constante parte de la premisa de que, al inicio de una precipitación, parte del agua que cae no se convierte de inmediato en escorrentía superficial. Esta fracción inicial permanece en la superficie o se infiltra en el suelo, dependiendo de su capacidad de absorción, siendo conocida como pérdida inicial; una vez que el suelo alcanza su capacidad de saturación o la tasa de infiltración se ve superada, el exceso de agua comienza a generar escorrentía superficial. Durante el evento de precipitación, esta tasa de generación de escorrentía se considera constante, siempre y cuando las condiciones no experimenten cambios significativos, y su magnitud está determinada por la capacidad de infiltración del suelo

Es esencial identificar dos factores clave que deben ser incorporados en el modelo del software HEC HMS. El primer factor corresponde al porcentaje de área impermeable de la cuenca, el cual en este contexto se estima en un 10.33%. El segundo factor es la tasa constante de infiltración, la cual describe la rapidez con la que la precipitación penetra en el suelo después de una pérdida inicial. Esta tasa se establece al categorizar los suelos en función de su capacidad de infiltración, empleando valores estimados disponibles en tablas de referencia cuando no se cuenta con información directa de campo como se muestra en la tabla 3, para este parámetro se obtiene un intervalo debido a la incertidumbre existente en los mapas de uso de suelo obtenidos del Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador [14].

Tabla 3. Texturas del suelo y conductividad hidráulica saturada, reproducida de Rawls, Brakensiek y Miller [14].

Textura	Conductividad hidráulica saturada (mm/h)
Arcilla	0.254
Arcilla arenosa	0.508
Arcilla limosa	0.508
Franco arcilloso	1.016
Franco arcilloso limoso	1.016
Franco arcilloso arenoso	1.524
Marga	7.62
Franco limoso	7.62
Franco arenoso	10.16
Arena arcillosa	30.48
Arena	116.84

2.6 Métodos de transformación de escorrentía a caudal

Los métodos de transformación de escorrentía a caudal son técnicas usadas para calcular la cantidad de agua que fluye en la cuenca como

resultado de la escorrentía superficial generada por un evento de precipitación, en este caso se utilizó dos métodos: el método SCS y el método de Clark.

2.5.1 Método SCS.

Este método fue utilizado para computar el hidrograma de crecida, utilizando un hidrograma unitario curvilíneo adimensional que dirige el exceso de precipitación hacia la salida de la subcuenca. Este hidrograma adimensional representa el caudal como una fracción del caudal máximo en cualquier momento, en relación con el tiempo de ascenso hasta el punto máximo del hidrograma. Para convertir las coordenadas adimensionales del hidrograma en valores concretos, se requiere conocer tanto el tiempo hasta el punto máximo como los caudales máximos (qp), utilizando las ecuaciones correspondientes (9) y (10) [15].

$$Tp = 0.6 * Tc \quad (9)$$

$$qp = Cp * \frac{A}{Tp} \quad (10)$$

Donde Tp es el tiempo que transcurre desde el centro de la precipitación efectiva hasta el caudal pico, Tc es el tiempo de concentración, qp es el caudal en el tiempo (m^3/s), A es el área de la cuenca, Cp es el coeficiente pico igual a 2.08 para unidades del S.I [9].

2.5.2 Método de Clark

Este enfoque se basa en la utilización del tiempo de concentración en conjunto con el hidrograma tiempo-área derivado de las isocronas de la cuenca. Con esta información, se formula un hidrograma unitario teórico que representa el recorrido del exceso de precipitación desde su origen hasta el punto de salida de la cuenca. Se emplea el hidrograma de escorrentía unitario, mientras que la ecuación de enrutamiento lineal del embalse, identificada como ecuación (11), se utiliza para el procesamiento de la información, en

donde O_1, O_2 son el flujo de salida C_0, C_2 pertenecen a los coeficientes de enrutamiento, I es el flujo de entrada [16].

$$O_2 = 2 * C_0 * I + C_2 + O_1 \quad (11)$$

Para este modelo también se determina el coeficiente de almacenamiento que es igual a una fracción equivalente al 70% del tiempo de concentración [17].

2.7 Modelos hidrológicos en HEC-

HMS

Estos modelos han sido desarrollados para replicar los caudales que atraviesan un lecho durante períodos de tiempo que exceden un episodio de lluvia. Por ende, no solo simulan la generación de escorrentía directa, sino también la escorrentía indirecta originada por el flujo sub-superficial (que en este caso no es considerado). En estos casos se ha realizado simulaciones del balance de humedad en la cuenca, lo que permite obtener pronósticos del volumen de escorrentía, estimaciones del caudal máximo y del tiempo pico en que este ocurre. Dado que el objetivo es la determinación de hidrogramas de crecida en escenarios desfavorables, se ha considera que el suelo se encuentra casi saturado al inicio del evento. En este contexto, la abstracción inicial y la pérdida inicial no se consideran en los modelos [18].

La estimación del hidrograma de crecida se divide en dos partes principales. En la primera parte, se determinan las pérdidas mediante los modelos de precipitación-escorrentía. En la segunda parte, se transforma la escorrentía en caudal, el cual posteriormente genera un hidrograma de crecida. Para este propósito, se han desarrollado cuatro casos específicos:

Caso I: Método SCS con hietograma de Bloque alterno

Caso II: Método SCS con hietograma por Curvas de Huff

Caso III: Método de Clark con hietograma de Bloque alterno

Caso IV: Método de Clark con hietograma por curvas de Huff

Además, se desarrolló un escenario que simula el cambio de uso del suelo ante el crecimiento poblacional en esta zona de estudio.

2.8 Estimación de la incertidumbre.

Para evaluar la incertidumbre en este estudio, se analizaron los hidrogramas resultantes para los diferentes periodos de retorno, parámetros y métodos utilizados. Se aplicó la prueba de Jarque-Bera a cada serie de datos de los caudales para determinar si las variables se ajustan a una distribución normal a partir de la asimetría y la curtosis de la muestra, usando la ecuación 12 [19].

$$JB = \frac{N}{6} * [S^2 + \frac{(K-3)^2}{4}] \quad (12)$$

Una vez confirmada la aplicabilidad de la distribución normal, es necesario determinar los intervalos de confianza, los cuales indican el rango en el cual se espera que se encuentre la media. Estos intervalos se calculan utilizando las ecuaciones (13) para el límite inferior y (14) para el límite superior, donde \bar{x} representa la media y Sx la desviación estándar. [19]

$$Li = \bar{x} - k\alpha * Sx \quad (13)$$

$$Ls = \bar{x} + k\alpha * Sx \quad (14)$$

$k\alpha$ representa el valor Z en la distribución normal estandarizada que para un intervalo de confianza del 95% tiene un valor de 1.96.

3 Resultados y Discusión

3.1 Parámetros morfométricos de la cuenca.

En la tabla 5 se presenta un resumen de los parámetros morfométricos obtenidos para la cuenca. Con un área de 1.15 km², se clasifica como una microcuenca. La pendiente promedio es de 48.20%. Esta pendiente es considerablemente pronunciada en relación con el tamaño de la cuenca, lo cual sugiere que la velocidad de escurrimiento y la erosión del suelo podrían ser significativamente elevadas [20].

Tabla 4. Resultados de los parámetros morfométricos de la Cuenca Guanga-Huaycu

Descripción	Unidad	Valor
Área	Km ²	1.15
Perímetro de la cuenca	Km	7.25
Cotas		
Cota máxima	m.s.n.m	4032.99
Cota mínima	m.s.n.m	2988.02
Centroide (WGS 1984 UTM zona 17S)		
Centroide X	m	775294.75
Centroide Y	m	9979246.26
Centroide Z	m.s.n.m	3536.48
Altitud		
Altitud media	m.s.n.m	3536.48
Altitud más frecuente	m.s.n.m	3643
Altitud de frecuencia media	m.s.n.m	3584.16
Pendiente		
Pendiente promedio de la cuenca	%	48.20
De la red hídrica		
Longitud del curso principal	Km	3.44
Orden de la red hídrica	UND	3
Longitud de la red hídrica	Km	6.29

3.1.2 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración (Tc) determinado por isócronas es de 14.5 min. Para el método

SCS se obtuvo un tiempo de retraso de 8.7y 13.7 minutos (usando intervalos). El tiempo de concentración usado para el método de Clark es de 9.5, 14.5 y 19.5 minutos.

En la figura 6 se muestra el porcentaje de área de la cuenca respecto al porcentaje de tiempo obtenidos mediante la construcción de isócronas. El mapa correspondiente a estas isocronas se puede visualizar en la figura 7.

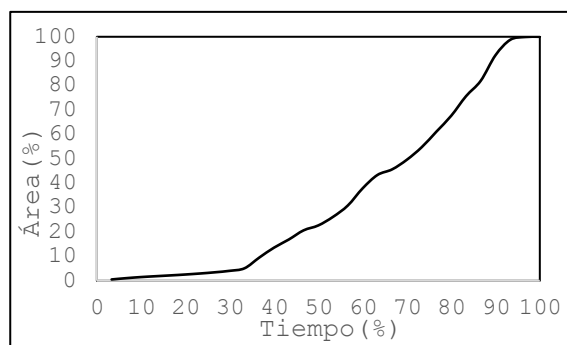


Figura 6. Área acumulada (%) vs Tiempo acumulado de recorrido (%)

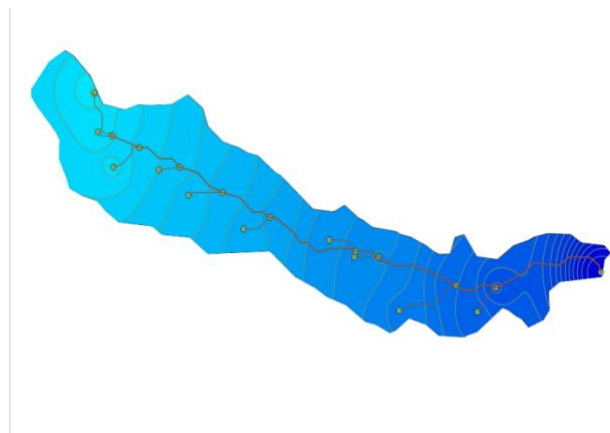


Figura 7. Mapa de isocronas.

3.1.3 Número de curva.

Al tener información del MDT, del uso y tipo de suelo, y pendiente, se aplicó una media ponderada para determinar el número de curva en relación a la tabla 5, obteniendo de esta forma valores que están 75.5 en condiciones normales a 90.1 en condiciones húmedas.

Tabla 5. Porcentaje de uso de suelo [4].

Uso de suelo	Porcentaje de ocupación	Pendiente (%)	Tipo de suelo	CN
Pasto	5.39	<3	Franco	61
		>3	arenos	79
Páramo	39.36	<3		17
		>3	Arena	39
		<3		33
		>3	Franco Arenos	55
Bosques de eucalipto	18.42	>3	o	36
		<3		55
		>3	Arena Franco Arenos	55
Complejos recreacionales	5.10	<3	Arenos	92
		>3	o	92
		>3	Arena	80
Zonas pobladas	4.72	<3		80
		>3		80
		>3	Arena Franco	48
Vegetación arbustiva y herbácea	27.004	<3	Arenos	48
		>3	o	67
			Arena Franco Arenos	
			o	

En cuanto al tipo de suelo, predominan dos tipos principales. El suelo tipo A, que abarca el 23.23% de la cuenca, se caracteriza por un bajo potencial de escurrimiento incluso en condiciones húmedas debido a su alta proporción de arena o gravas y baja presencia de arcilla. Por otro lado, el suelo tipo B, que cubre el 78.10% del área, presenta una capacidad moderada de infiltración cuando está saturado, con un contenido de arcilla en baja cantidad y un porcentaje importante de arena [4].

3.1. 4 Tasa de infiltración

La tasa constante de infiltración tiene valores que están entre 1.014 a 5.84 mm/h. Estos resultados indican variaciones significativas en la capacidad del suelo para absorber y retener agua durante los eventos de lluvia.

3.1.5 Incremento de porcentaje de impermeabilidad del suelo

La tasa de crecimiento poblacional para el área de estudio es 1.34% anualmente, obtenemos que para el año 2 074 en la zona de estudio se tendrá un incremento de 3 066 habitantes siendo el número total de personas de 6 729, por lo tanto el número de viviendas podría llegar a 1 683, ocupando un área de 184 948.59 m², tomando en cuenta las áreas de recreación y las calles que se construyen al urbanizar el total del área urbanizada es de 195 245.488m². En la actualidad tenemos que el área urbanizada en la cuenca es del 10.33%, para condiciones futuras es de 18.55 %

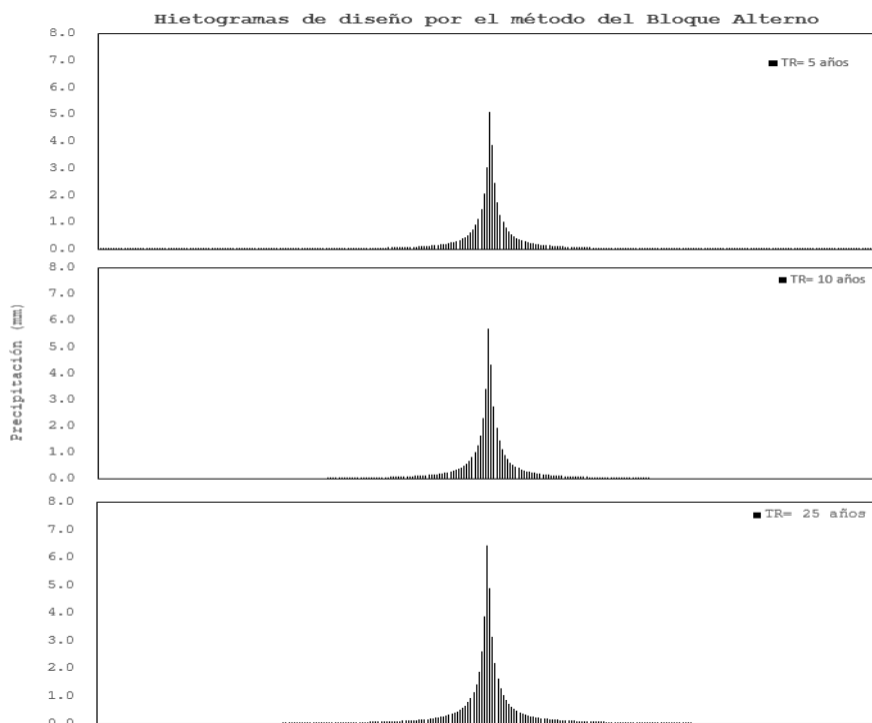
3.1.6 Tormenta de diseño.

Los hietogramas generados por el método del Bloque Alternado muestran la concentración de precipitación en un intervalo corto con intensidades muy altas. Por otro lado, las curvas de Huff proporcionan una distribución más uniforme, simplificando la representación temporal de las tormentas de diseño. En términos de intensidad máxima de precipitación, los hietogramas del Bloque Alternado muestran picos más pronunciados en comparación con las curvas de Huff.

La figura 8 muestra las precipitaciones máximas estimadas utilizando el método del bloque alternado para diferentes periodos de retorno. Para un periodo de retorno de 5 años, la precipitación máxima es de 5.09 mm en el intervalo de 715 a 720 minutos. Para un periodo de retorno de 10 años, la precipitación máxima asciende a 5.68 mm, con un periodo de retorno de 25 años, la precipitación máxima aumenta a 6.46 mm. Para un periodo de retorno de 50 años, se observa una precipitación máxima de 7.04 mm. Finalmente, para un periodo de retorno de 100 años, la precipitación máxima es de 7.64 mm, todos los resultados máximos se dan en un intervalo de tiempo de 715 a 720 minutos.

Por otro lado, la figura 9 presenta las precipitaciones máximas según las curvas de Huff. Para un periodo de retorno de 5 años, la precipitación máxima es de 0.152 mm en el intervalo de 800 a 860 minutos. En un periodo de retorno de 10 años, la precipitación máxima es de 0.406 mm en el intervalo de 510 a 575 minutos. Para un periodo de retorno de 25 años, la precipitación máxima llega a 0.462 mm, con un periodo de retorno de 50 años, la precipitación máxima es de 0.504 mm, finalmente, para un periodo de retorno de 100 años, la precipitación máxima es de 0.546 mm todos en un mismo intervalo de 510 a 575 minutos. El incremento de la precipitación para el método del bloque alterno y para las curvas de Huff respecto al periodo de retorno de 5 años hasta 10 es del 10.34%, para el año 10 al 25 incrementa en un 12.01%, de 25 a 50 años aumenta un 8.33% y de 25 a 50 años incrementa un 7.69%. La diferencia entre ambos métodos se debe a que, en el método del bloque alterno, la estimación de la precipitación para duraciones cortas es considerablemente mayor que para duraciones largas. En contraste, el método de las curvas de Huff proporciona una distribución más

uniforme de las precipitaciones, lo que explica las diferencias observadas [9].



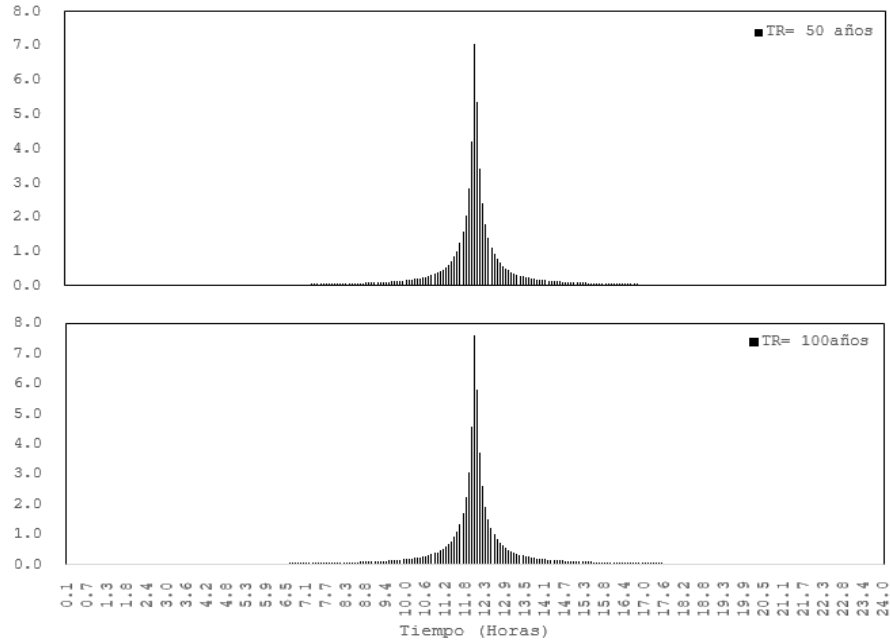
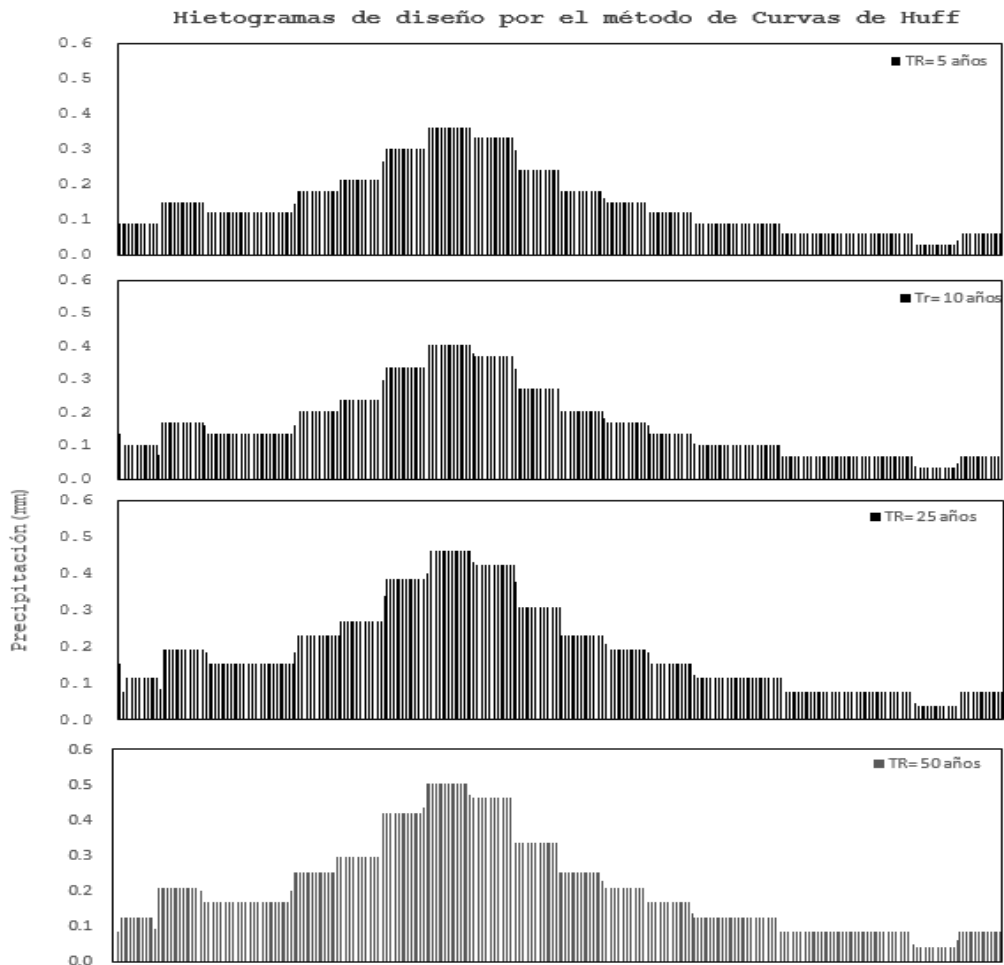


Figura 8. Hietogramas de diseño por el método de bloque alterno para períodos de retorno 5,10,25,50,100 años.



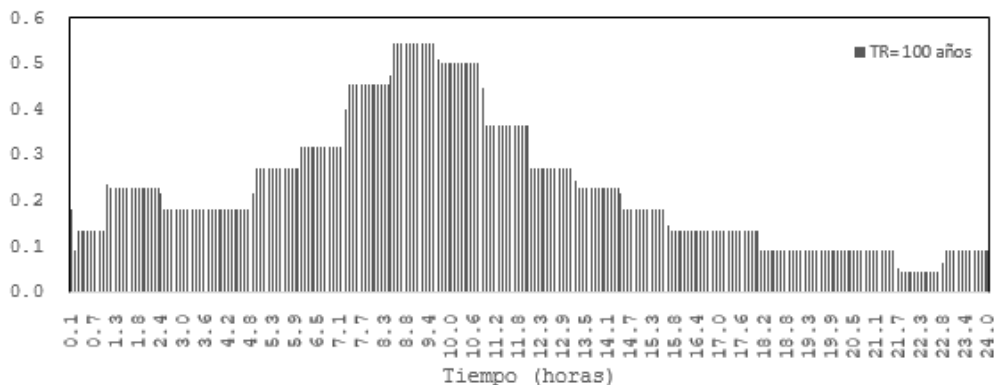


Figura 9. Hietogramas de diseño por el método de Curvas de Huff para períodos de retorno 5,10,25,50,100 años.

3.1.7 Modelos Hidrológicos en HEC HMS

Caso I y Caso III:

La comparación entre el Caso I y el Caso III se realiza para analizar cómo las variaciones en las condiciones hidrológicas, tales como la tasa de infiltración, el número de curva, el tiempo de concentración y los tiempos de retorno (TR) que oscilan entre 5 y 100 años, afectan los resultados de caudales pico, volumen de escorrentía y tiempo pico. En el Caso I, que emplea el hietograma del bloque alterno aplicado al método SCS, se observó en la figura (10) un incremento en los volúmenes de escorrentía y los caudales pico, siendo el número de curva el factor que más influye en estos aumentos. Los resultados mostraron volúmenes de escorrentía que variaron entre 6.76 y 40.9 mm, y caudales pico que oscilaron de 1.1 a 10.5 m³/s. El valor máximo de caudal para un número de curva de 75.5 fue de 4.3 m³/s, con un volumen máximo de escorrentía de 18.27 mm y un tiempo pico de 735 minutos, con un tiempo de concentración de 8.7 minutos. En contraste, para un número de curva de 90.12 en el mismo tiempo de retorno, con un tiempo de concentración mínimo de 8.7 minutos, se obtuvo un caudal pico de 10.5 m³/s, un volumen de escorrentía de 40.9 mm y un tiempo pico de 730 minutos.

En el Caso III, que utiliza el método de Clark y también el hietograma del bloque

alterno, se observa en la figura (12) que la tasa de infiltración resultó ser el factor más influyente. Esta variabilidad produjo volúmenes de escorrentía que oscilaron entre 28.93 y 58.68 mm, obtenidos en el menor tiempo de concentración, que en este caso fue de 9.5 minutos, con caudales pico que variaron de 1.2 a 17.4 m³/s. Para un tiempo de retorno de 100 años, los valores máximos fueron obtenidos con una tasa de infiltración de 1.014 mm/h, que resultó en un caudal pico de 17.4 m³/s, un volumen de escorrentía de 58.68 mm y un tiempo pico de 730 minutos. Con una tasa de infiltración de 5.84 mm/h, se obtuvo un caudal pico de 17 m³/s, un volumen de escorrentía de 47.19 mm y un tiempo pico de 730 minutos. Estos resultados evidencian que una mayor tasa de infiltración conduce a menores volúmenes de escorrentía y caudales pico, destacando la significativa influencia de las condiciones de infiltración en la respuesta hidrológica de la cuenca.

Caso II y Caso IV:

En el Caso II, se desarrolló el hietograma de diseño utilizando las curvas de Huff aplicadas al método SCS lo que se evidencia en la figura (11). Se observó que, a medida que aumentaba el tiempo de retorno (de 5 a 100 años) y el número de curva disminuía, el volumen de escorrentía aumentaba progresivamente, alcanzando valores que oscilaban entre 6.76 mm y 41.17 mm. Simultáneamente, el caudal

pico varió entre 0.2 m³/s y 1.3 m³/s en los mismos periodos de retorno. El número de curva resultó ser el factor más influyente en la determinación de los volúmenes máximos de escorrentía y caudales pico. Para un número de curva de 75.5 y un tiempo de concentración mínimo de 8.7 minutos, se obtuvo un caudal pico de 0.6 m³/s y un volumen de escorrentía de 18.45 mm en un tiempo pico de 650 minutos para un periodo de retorno de 5 años. Al aumentar el número de curva a 90.12, con un tiempo de concentración de 8.7 minutos, se alcanzó un caudal pico de 1.3 m³/s y un volumen de escorrentía de 41.17 mm en un tiempo pico de 580 minutos.

Los resultados del Caso IV se observan en la figura (13), la tasa de infiltración fue el factor más influyente. Esta variabilidad produjo volúmenes de escorrentía que fluctuaron entre 36.54 mm y 58.68 mm, con los valores más altos obtenidos en el menor tiempo de concentración, que en este caso fue de 9.5 minutos. Los caudales pico variaron de 0.7 m³/s a 1.6 m³/s. Para un tiempo de retorno de 100 años, los valores máximos se alcanzaron con una tasa de infiltración de 1.014 mm/h, que produjo un caudal pico de 1.7 m³/s, un volumen de escorrentía de 58.68 mm y un tiempo pico de 540 minutos. Con una tasa de infiltración de 5.84 mm/h, se obtuvo un caudal pico de 1.2 m³/s, un volumen de escorrentía de 28.93 mm y un tiempo pico de 570 minutos.

En el análisis comparativo entre el método de Clark y el método SCS, se observó que el método de Clark tiende a generar caudales pico y volúmenes de escorrentía significativamente mayores que el método SCS. Esta diferencia se debe a las características fundamentales de cada método en la modelización de la respuesta hidrológica de una cuenca. El método de Clark utiliza hidrogramas unitarios y parámetros empíricos para modelar la acumulación y el desbordamiento de escorrentía, lo cual tiende a producir

estimaciones más elevadas cuando se calibran para eventos de precipitación intensos o condiciones extremas [21]. En contraste, el método SCS emplea el Número de Curva (CN) y un enfoque basado en la capacidad de retención del suelo y el uso del terreno, lo que resulta en estimaciones más conservadoras. El método SCS limita los valores extremos de escorrentía al suavizar la respuesta hidrológica, ofreciendo caudales pico y volúmenes de escorrentía más moderados. Además, el método Clark captura eventos más extremos debido a su detallada modelización del tiempo de concentración y la distribución temporal de la precipitación, mientras que el método SCS tiende a suavizar estas variaciones [9]. Esto sugiere que la capacidad de infiltración del suelo juega un papel crucial en la mitigación del escurrimiento superficial durante eventos de lluvia intensa, afectando el volumen de escorrentía, por lo que, En ese mismo sentido, se tiene incertidumbre en este parámetro y la elección del mismo es crucial por lo que al no tener completa certeza se usa un intervalo para estimar la incertidumbre en los resultados del hidrograma.

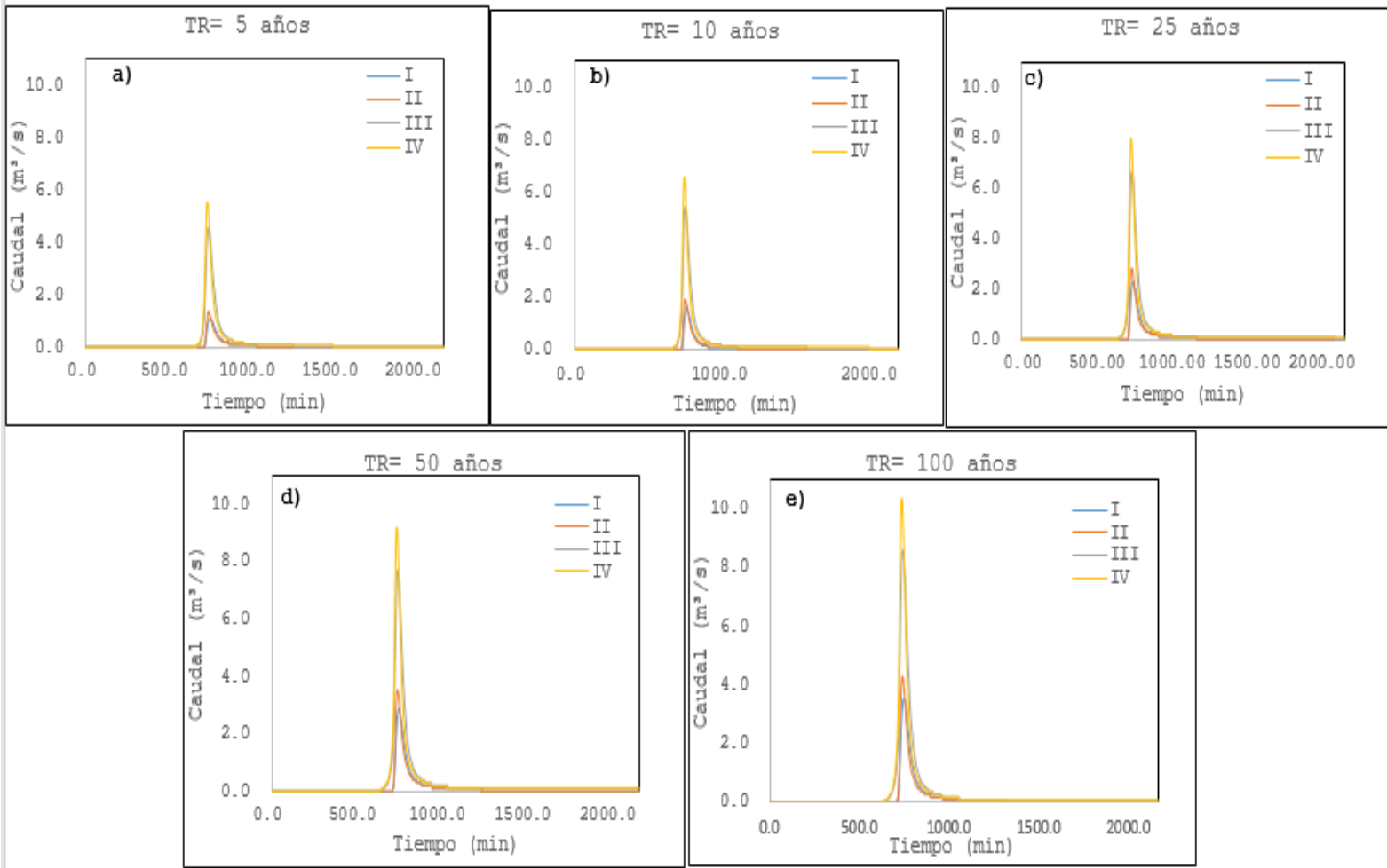
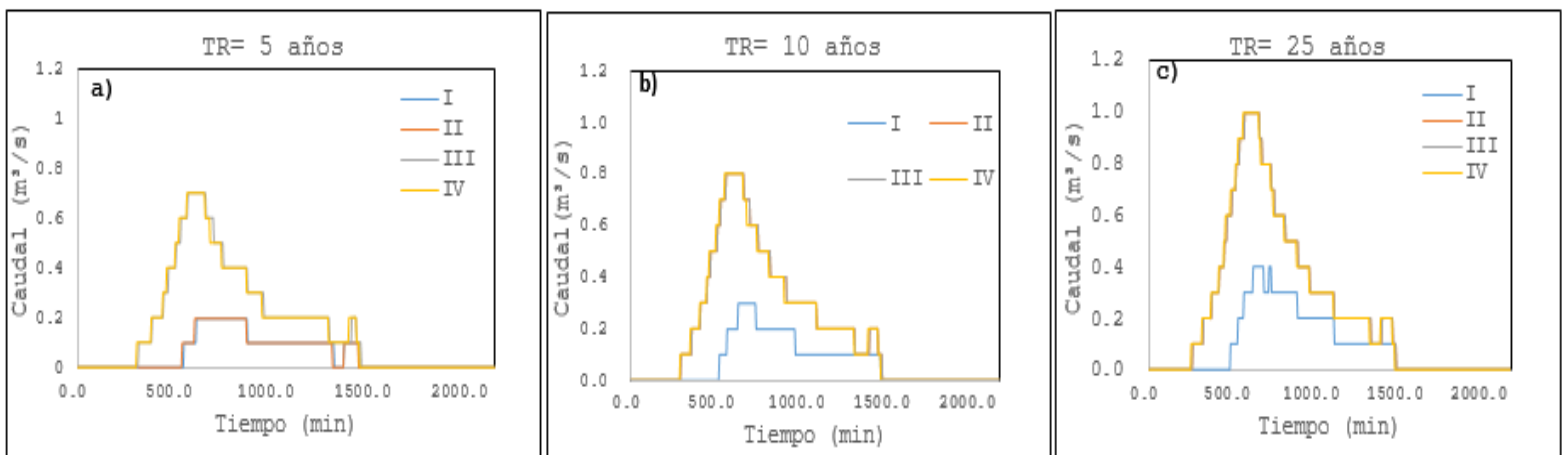


Figura 10. Caso I: Hidrogramas de crecida utilizando el método SCS con variaciones de parámetros: **I.** Tiempo de concentración: 13.7 min, CN= 75.5. **II.** Tiempo de concentración: 8.7 min, CN= 75.5. **III.** Tiempo de concentración: 13.7 min, CN= 90.12. **IV.** Tiempo de concentración: 8.7 min, CN= 90.12, aplicados para hidrograma de Bloque Alterno. Estos hidrogramas corresponden a diferentes periodos de retorno, representados en las figuras a, b, c, d y e.



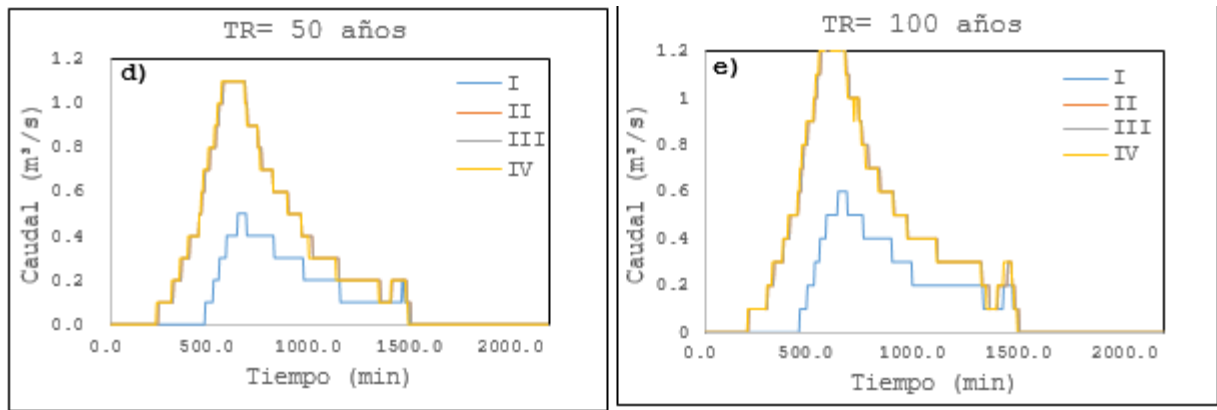


Figura 11. Caso II: Hidrogramas de crecida utilizando el método SCS con variaciones de parámetros: **I.** Tiempo de concentración: 13.7 min, CN= 75.5. **II.** Tiempo de concentración: 8.7 min, CN= 75.5. **III.** Tiempo de concentración: 13.75 min, CN= 90.12. **IV.** Tiempo de concentración: 8.7 min, CN= 90.12, aplicados para hidrograma de Curvas de Huff. Estos hidrogramas corresponden a diferentes periodos de retorno, representados en las figuras a, b, c, d y e.

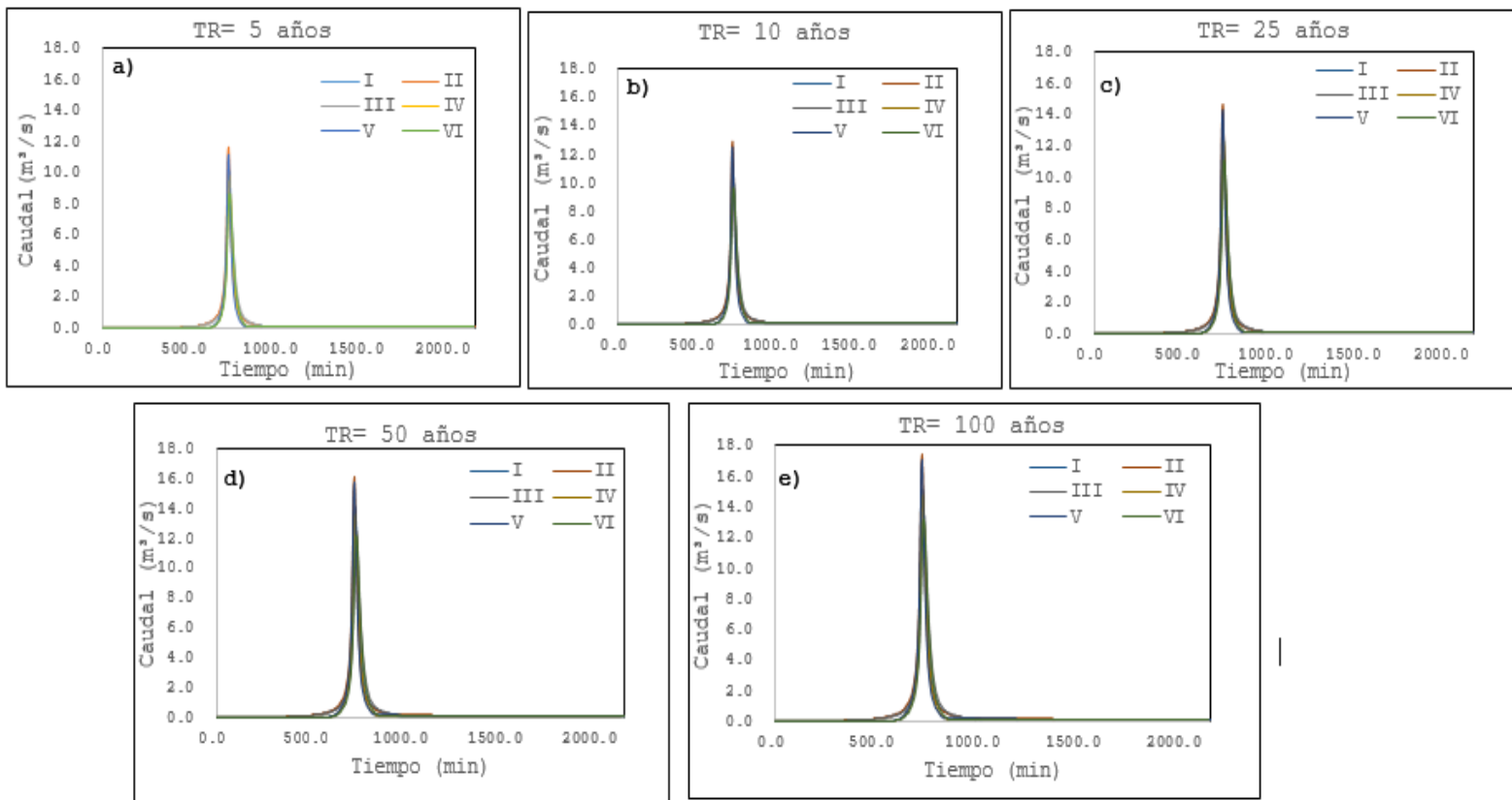


Figura 12. Caso III: Hidrogramas de crecida utilizando el método de Clark con variaciones de parámetros: **I.** Tiempo de concentración: 14.5 min, Tasa de infiltración= 1.014 mm/h. **II.** Tiempo de concentración: 9.5 min, Tasa de infiltración= 1.014 mm/h. **III.** Tiempo de concentración: 19.5 min, Tasa de infiltración= 1.014 mm/h. **IV.** Tiempo de concentración: 14.5 min, Tasa de infiltración= 5.84. **V.** Tiempo de concentración: 9.5 min, Tasa de infiltración= 5.84 mm/h. **VI.** Tiempo de concentración: 19.5 min, Tasa de infiltración= 5.84

mm/h, aplicados para hietograma de Bloque alterno. Estos hidrogramas corresponden a diferentes periodos de retorno, representados en las figuras a b, c, d y e.

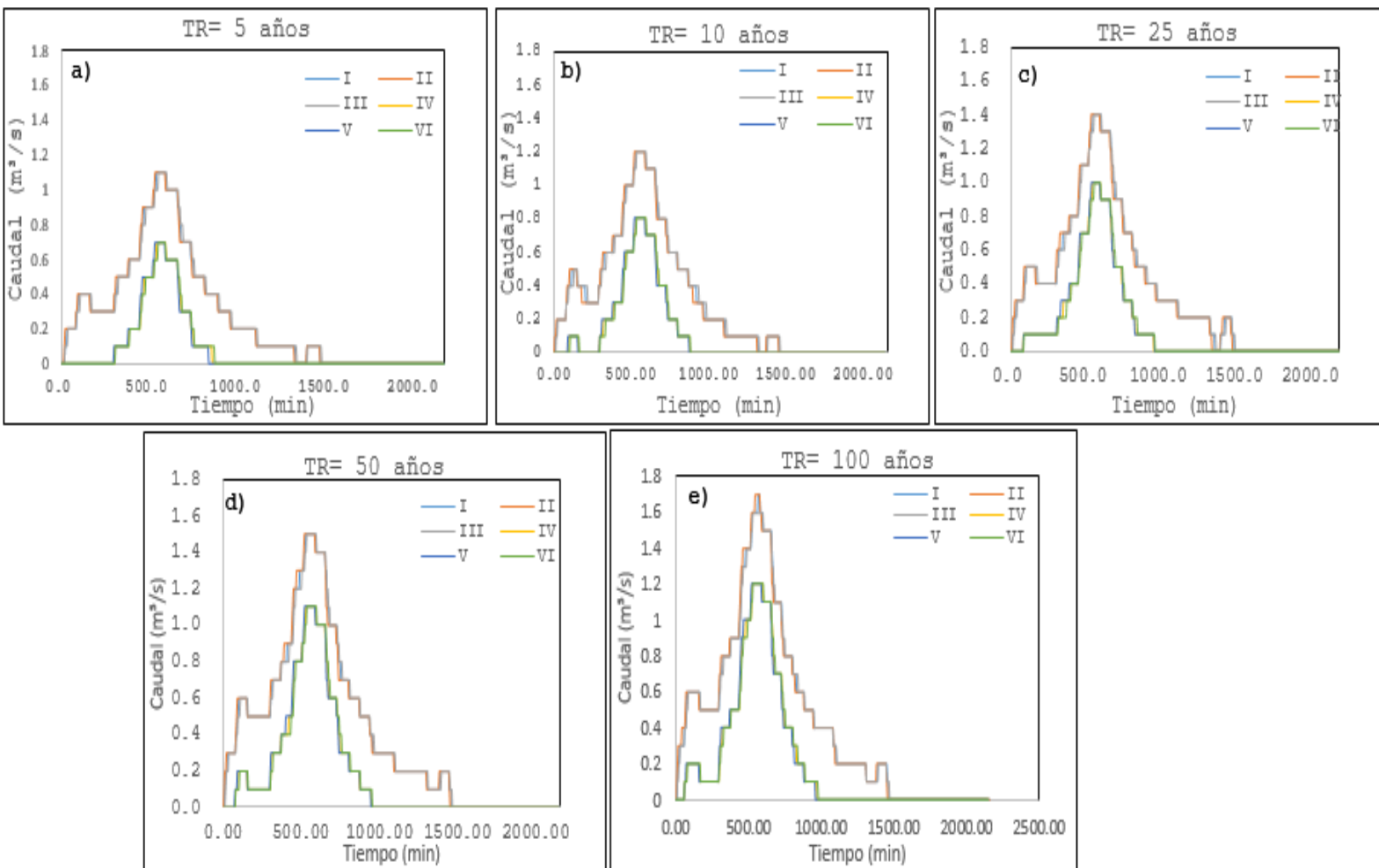


Figura 13. Caso IV: Hidrogramas de crecida utilizando el método de Clark con variaciones de parámetros: **I.** Tiempo de concentración: 14.5 min, Tasa de infiltración= 1.014 mm/h. **II.** Tiempo de concentración: 9.5 min, Tasa de infiltración= 1.014 mm/h. **III.** Tiempo de concentración: 19.5 min, Tasa de infiltración= 1.014 mm/h. **IV.** Tiempo de concentración: 14.5 min, Tasa de infiltración= 5.84. **V** Tiempo de concentración: 9.5 min, Tasa de infiltración= 5.84 mm/h. **VI** Tiempo de concentración: 19.5 min, Tasa de infiltración= 5.84 mm/h, aplicados para hietograma de Clark. Estos hidrogramas corresponden a diferentes periodos de retorno, representados en las figuras a b, c, d y e.

3.1.8 Modelo Hidrológico: Escenario futuro con incremento de porcentaje de impermeabilidad del suelo.

Caso I y III:

En los casos analizados con el método SCS utilizando el hietograma de diseño del bloque alterno como se observa en la figura (14) , se observó que, al incrementar el porcentaje de impermeabilidad del suelo, los resultados variaron significativamente. Para un número de curva de 90.12 y un tiempo de retardo de 8.7 minutos, el caudal pico alcanzó 11.1 m³/s, y el volumen máximo de escorrentía fue de 45.46 mm con un tiempo pico de 730 minutos. Al aumentar el tiempo de retardo a 13.7 minutos, el caudal máximo se redujo a 9.2 m³/s, mientras que el volumen de escorrentía se mantuvo en 45.46 mm con un tiempo pico de 740 minutos, ambos para un periodo de retorno de 100 años. Comparado con el escenario actual observado en la figura (10), el caudal pico muestra una variación del 56.7%, mientras que el volumen de escorrentía aumenta en un 10.04%.

En el Caso III, se analiza el método de Clark con el método del bloque alterno se observa en la figura (16) , se aplicó una tasa de infiltración de 1.014 mm/h. Con un tiempo de concentración de 14.5 minutos, se obtuvo un caudal máximo de 15.2 m³/s y un volumen de escorrentía de 59.31 mm. Al reducir el tiempo de concentración, el caudal pico aumentó a 17.4 m³/s, manteniéndose el volumen de escorrentía en 59.31 mm, con un tiempo pico de 730 minutos. Comparado con el escenario actual (Figura 12) , se observa que la variación en los resultados no es muy significativa: el caudal pico se mantiene igual, el volumen de escorrentía aumenta en un 1.07%, y el caudal pico disminuye en un 14.47%.

Caso II y IV

En el Caso II, se analiza el método SCS utilizando las curvas de Huff (Figura 15) . Los resultados muestran que para un número de curva de 90.12 y un tiempo de retardo de 13.7 minutos, el caudal pico es de 1.4 m³/s y el volumen de escorrentía es de 49.85 mm con un tiempo pico de 580 minutos. Al reducir el tiempo de retardo a 8.7 minutos, el caudal pico se mantiene en 1.4 m³/s, mientras que el volumen de escorrentía sigue siendo 49.85 mm, pero con un tiempo pico de 575 minutos. Comparado con el escenario actual (Figura 11), el caudal pico muestra un incremento del 7.69%, mientras que el volumen de escorrentía en un 17.39%.

En el Caso IV (Figura 17), utilizando el método de Clark, se obtiene que con una tasa de infiltración de 1.014 mm/h y un tiempo de concentración de 14.5 minutos, el caudal pico es de 1.7 m³/s y el volumen de escorrentía es de 59.08 mm con un tiempo pico de 570 minutos. Al reducir el tiempo de concentración a 9.5 minutos, el caudal pico se mantiene en 1.7 m³/s, y el volumen de escorrentía aumenta a 59.33 mm. Comparado con el escenario actual (Figura 13), el caudal pico se mantiene constante en 1.7 m³/s, mientras que el volumen de escorrentía incrementa en un 1.09%.

Al analizar todos los casos se puede observar que el parámetro más influyente sigue siendo la tasa de infiltración ya que se evidencia un mayor volumen de escorrentía.

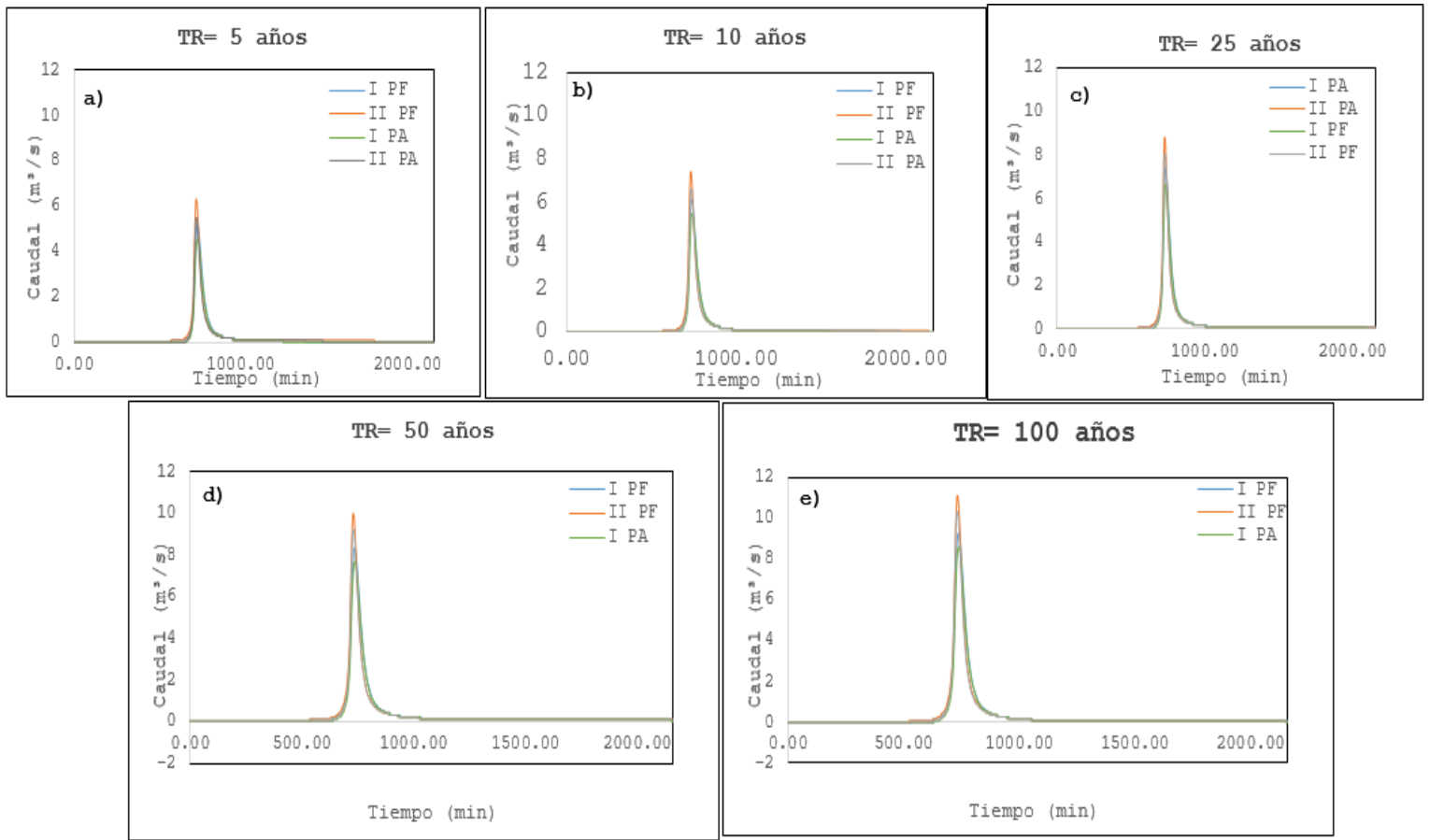
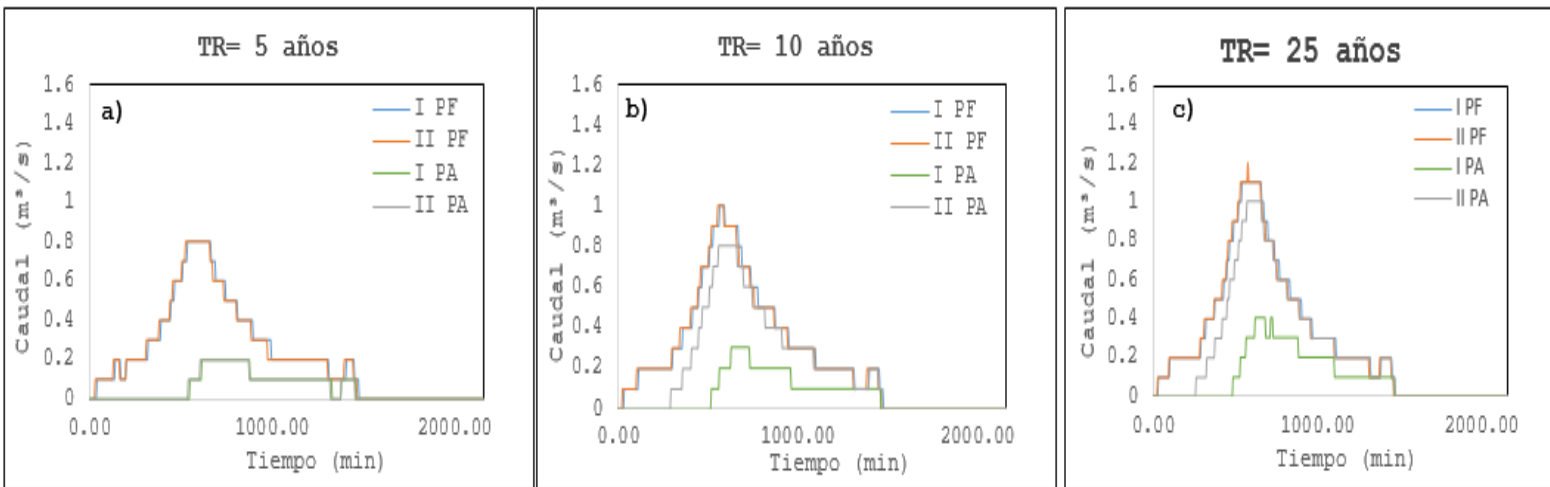


Figura 14. Caso I: Hidrogramas de crecida utilizando el método SCS, para el escenario actual la impermeabilidad del suelo es 10.33% y 18.55 % para el escenario futuro con variaciones de parámetros: **I PF Y II PA**. Tiempo de concentración: 13.7 minutos, CN= 90.12. **II PF Y II PA**. Tiempo de concentración: 8.7 minutos aplicados para hidrograma de Bloque Alterno. Estos hidrogramas corresponden a diferentes periodos de retorno, representados en las figuras a, b, c, d y e.



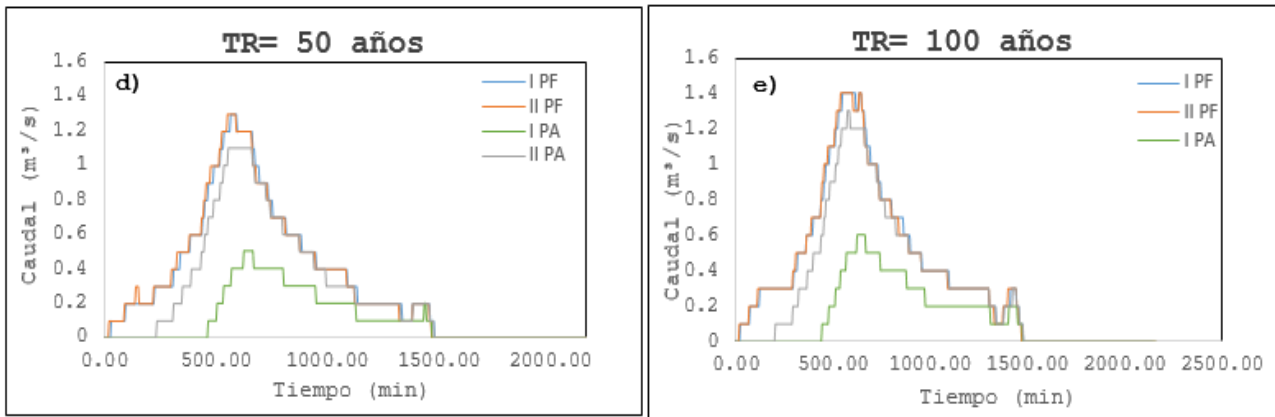


Figura 15. Caso II: Hidrogramas de crecida utilizando el método SCS para el escenario actual la impermeabilidad del suelo es 10.33% y 18.55 % para el escenario futuro, con variaciones de parámetros: **I PF Y I PA.** Escenario futuro, tiempo de concentración: 13.7 minutos, CN= 90.12. **II PF Y II PA.** Tiempo de concentración: 8.7 minutos aplicados para hidrograma de Curvas de Huff. Estos hidrogramas corresponden a diferentes periodos de retorno, representados en las figuras a, b, c, d y e.

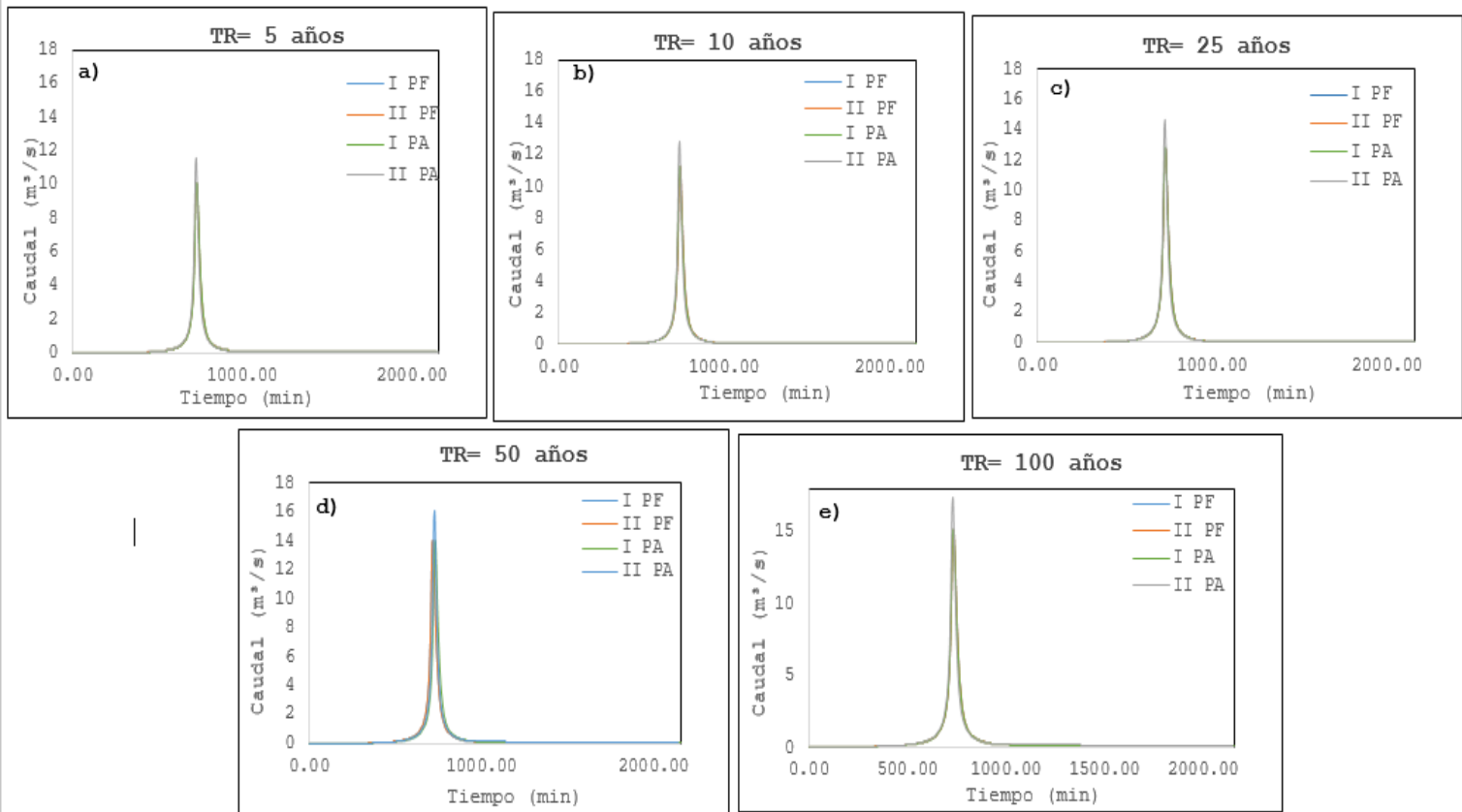


Figura 16. Caso III: Hidrogramas de crecida utilizando el método de Clark, para el escenario actual la impermeabilidad del suelo es 10.33% y 18.55 % para el escenario futuro, las variaciones de parámetros: **I PF Y I PA.** Tiempo de concentración: 14.5 minutos, Tasa de infiltración= 1.014 mm/h. **II PF Y I PA.** Tiempo de concentración: 9.5 minutos, Tasa de infiltración= 1.014 mm/h., aplicados para

hietograma de Bloque alterno. Estos hidrogramas corresponden a diferentes periodos de retorno, representados en las figuras a b, c, d y e.

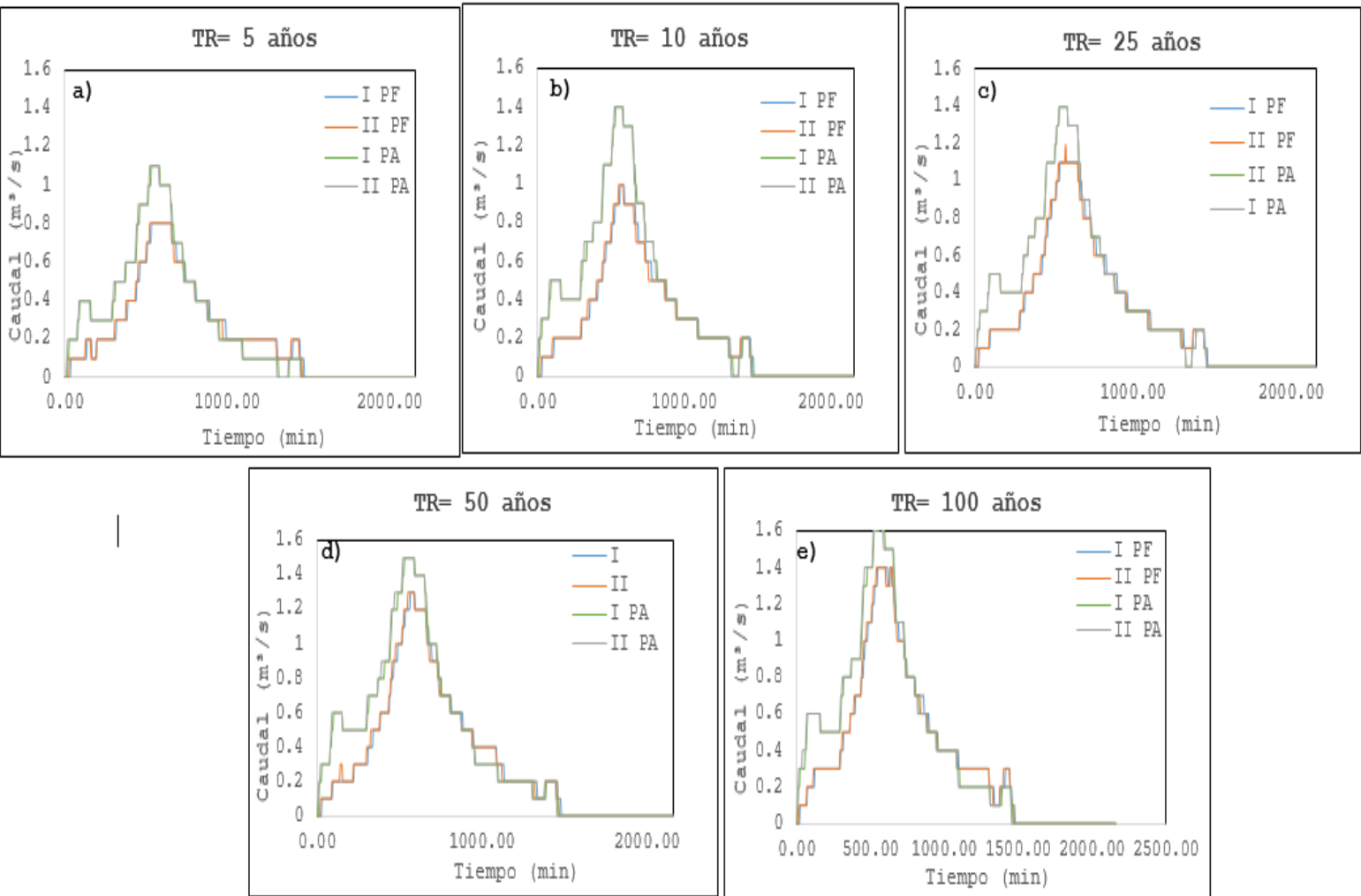


Figura 17. Caso IV: Hidrogramas de crecida utilizando el método de Clark, para el escenario actual la impermeabilidad del suelo es 10.33% y 18.55 % para el escenario futuro, las variaciones de parámetros: **I PF Y I PA.** Tiempo de concentración: 14.5 minutos, Tasa de infiltración= 1.014 mm/h. **II PF Y I PA.** Tiempo de concentración: 9.5 minutos, Tasa de infiltración= 1.014 mm/h., aplicados para hietograma de Curvas de Huff. Estos hidrogramas corresponden a diferentes periodos de retorno, representados en las figuras a b, c, d y e.

3.1.9 Estimación de la incertidumbre en los modelos hidrológicos

Caso I y III

En el Caso I, como se ilustra en la Figura 18, se observan los siguientes resultados para los diferentes periodos de retorno. Para un periodo de retorno de 5 años (caso a), el límite superior del caudal es de 7.41 m³/s, el caudal medio es de 3.025 m³/s, y el límite inferior es de 1.86 m³/s. Para un periodo de retorno de 10 años (caso b), el límite superior es de 8.76 m³/s, el caudal medio es de 3.75 m³/s, y el límite inferior es de 1.71 m³/s. Para un periodo de retorno de 25 años (caso c), el límite superior es de 10.41 m³/s, el caudal medio es de 4.77 m³/s, y el límite inferior es de 1.78 m³/s. Para un periodo de retorno de 50 años (caso d), el límite superior es de 11.79 m³/s, el caudal medio es de 5.55 m³/s, y el límite inferior es de 1.76 m³/s. Finalmente, para un periodo de retorno de 100 años (caso e), el límite superior es de 13.79 m³/s, el caudal medio es de 6.4 m³/s, y el límite inferior es de 1.76 m³/s.

En la Figura 20, los resultados son los siguientes: para un periodo de retorno de 5 años (caso a), el límite superior es de 12.84 m³/s, el caudal medio es de 9.73 m³/s, y el límite inferior es de 6.76 m³/s. Para un periodo de retorno de 10 años (caso b), el límite superior es de 14.33 m³/s, el caudal medio es de 10.33 m³/s, y el límite inferior es de 7.61 m³/s. Para un periodo de retorno de 25 años (caso c), el límite superior es de 16.33 m³/s, el caudal medio es de 12.43 m³/s, y el límite inferior es de 8.64 m³/s. Para un periodo de retorno de 50 años (caso d), el límite superior es de 17.89 m³/s, el caudal medio es de 13.56 m³/s, y el límite inferior es de 9.49 m³/s. Finalmente, para un periodo de retorno de 100 años (caso e), el límite superior es de 19.38 m³/s, el caudal medio es de 14.7 m³/s, y el límite inferior es de 10.36 m³/s.

Caso II y IV

En el Caso III, como se muestra en la Figura 19, se observan los siguientes resultados: para el caso (a), el límite superior del caudal es de 1.07 m³/s, el caudal medio es de 0.45 m³/s, y el límite inferior es de 0.07 m³/s. En el caso (b), el límite superior del caudal es de 1.311 m³/s, el caudal medio es de 0.675 m³/s, y el límite inferior es de 0.231 m³/s. Para el caso (c), el límite superior del caudal es de 1.511 m³/s, el caudal medio es de 0.85 m³/s, y el límite inferior es de 0.308 m³/s. En el caso (d), el límite superior del caudal es de 1.68 m³/s, el caudal medio es de 0.95 m³/s, y el límite inferior es de 0.354 m³/s. Finalmente, en el caso (e), el límite superior del caudal es de 1.884 m³/s, el caudal medio es de 1.1 m³/s, y el límite inferior es de 0.431 m³/s.

En el Caso IV, también ilustrado en la Figura 19, los resultados son los siguientes: para el caso (a), el límite superior del caudal es de 1.32 m³/s, el caudal medio es de 0.9 m³/s, y el límite inferior es de 0.47 m³/s. En el caso (b), el límite superior del caudal es de 1.42 m³/s, el caudal medio es de 1 m³/s, y el límite inferior es de 0.57 m³/s. Para el caso (c), el límite superior del caudal es de 1.62 m³/s, el caudal medio es de 1.2 m³/s, y el límite inferior es de 0.77 m³/s. En el caso (d), el límite superior del caudal es de 1.72 m³/s, el caudal medio es de 1.3 m³/s, y el límite inferior es de 0.87 m³/s. Finalmente, en el caso (e), el límite superior del caudal es de 1.93 m³/s, el caudal medio es de 1.43 m³/s, y el límite inferior es de 0.97 m³/s.

La comparación entre los métodos y configuraciones revela que el Método SCS presenta un porcentaje de incertidumbre del 48.50% respecto al límite superior y del 55.42% respecto al límite inferior. Por otro lado, el Método de Clark muestra una incertidumbre del 27.92% respecto al límite

superior y del 55.01% respecto al límite inferior. Estos resultados indican que el Método de Clark tiende a proporcionar estimaciones más consistentes y con menor incertidumbre en comparación con el Método SCS. La menor variabilidad en los resultados obtenidos con el Método de Clark sugiere que este método es más confiable para prever caudales pico y volúmenes de escorrentía. Sin embargo, es importante considerar que el Método de Clark aún muestra una incertidumbre considerable en relación con el límite inferior. En contraste, el Método SCS presenta una mayor variabilidad en los resultados, lo que resalta la importancia de seleccionar el método más adecuado para obtener previsiones precisas en estudios hidrológicos. La elección del método debe basarse en una evaluación cuidadosa de los parámetros específicos que afectan cada método y en la necesidad de balancear la precisión de las estimaciones con la aceptabilidad de la incertidumbre inherente.

Finalmente, los resultados para el caudal medio utilizando el Método SCS muestran un valor de 2.75 m³/s, con un límite superior de 5.39 m³/s y un límite inferior de 0.11 m³/s. El volumen de escorrentía correspondiente es de 21.96 mm, con un límite superior de 44.03 mm y un límite inferior de 2.09 mm. El tiempo pico registrado es de 688 minutos, con un límite

superior de 795.64 minutos y un límite inferior de 580 minutos

La comparación entre los métodos SCS y Clark revela diferencias significativas en las estimaciones de caudal, volumen de escorrentía y tiempo pico. El Método SCS proporciona un caudal medio de 2.75 m³/s con un límite superior de 5.39 m³/s y un límite inferior de 0.11 m³/s. En contraste, el Método de Clark ofrece un caudal medio más alto de 6.91 m³/s, con límites superiores e inferiores más estrechos, 7.02 m³/s y 6.79 m³/s, respectivamente. En cuanto al volumen de escorrentía, el Método SCS estima 21.96 mm con límites que van de 2.09 mm a 44.03 mm, mientras que el Método de Clark predice 38.74 mm, con un rango más amplio entre 12.66 mm y 64.80 mm. El tiempo pico promedio para el Método SCS es 688 minutos (rango de 580 a 795.64 minutos), mientras que para el Método de Clark es 647 minutos (rango de 478.67 a 815.5 minutos). En resumen, el Método de Clark tiende a ofrecer estimaciones más altas y menos variables en caudales y volúmenes de escorrentía, con tiempos pico generalmente menores, mientras que el Método SCS proporciona resultados más conservadores con mayor variabilidad. La selección del método debe considerar las características específicas de la cuenca y los objetivos del estudio.

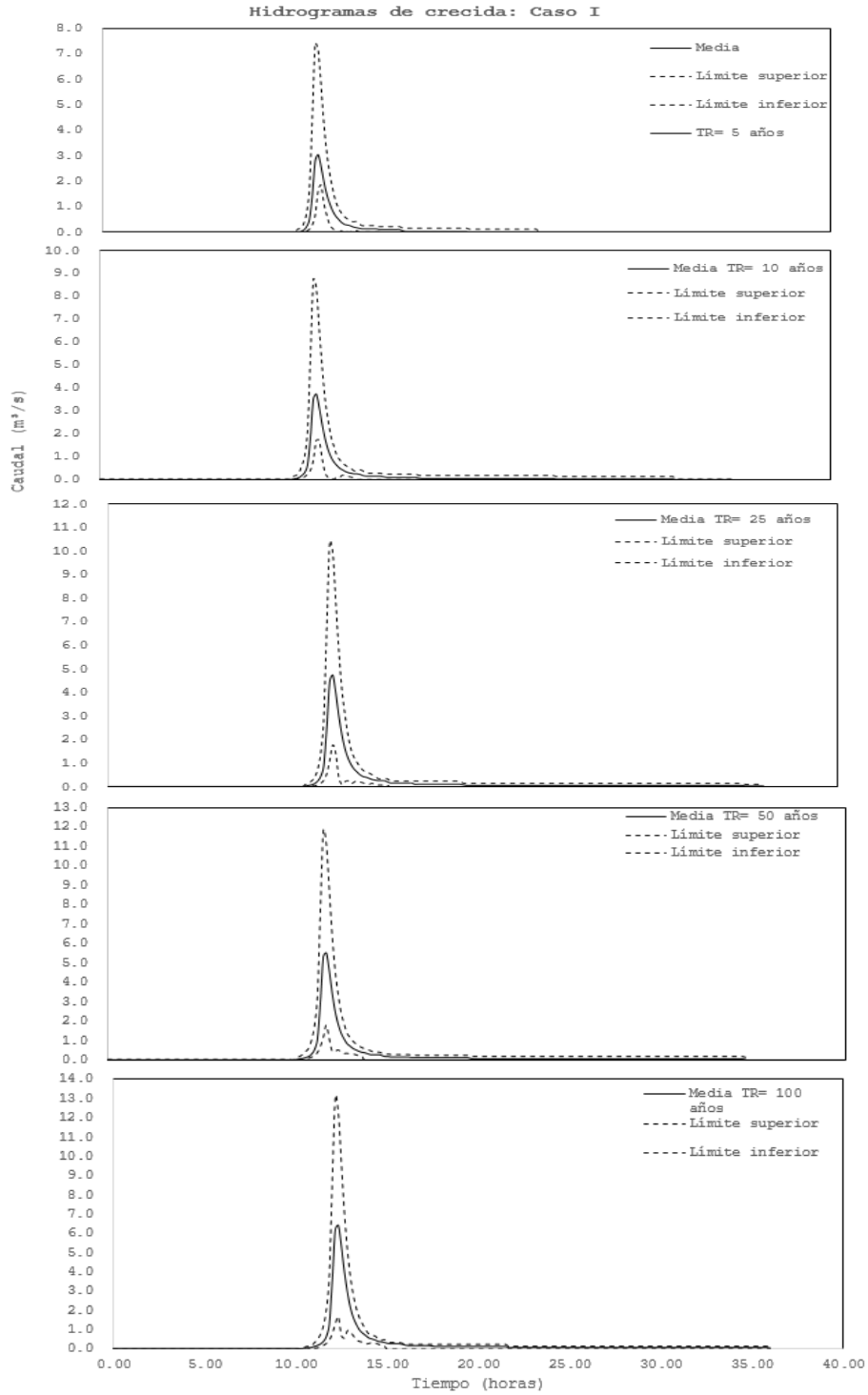


Figura 18. Incertidumbre existente en los hidrogramas de crecida para el **Caso I**, aplicado a los diferentes períodos de retorno. Para una confianza del 95% se obtiene que el límite superior corresponde al máximo caudal esperado que podría alcanzarse en la crecida, el límite inferior representa el caudal mínimo esperado representando las condiciones menos extremas.

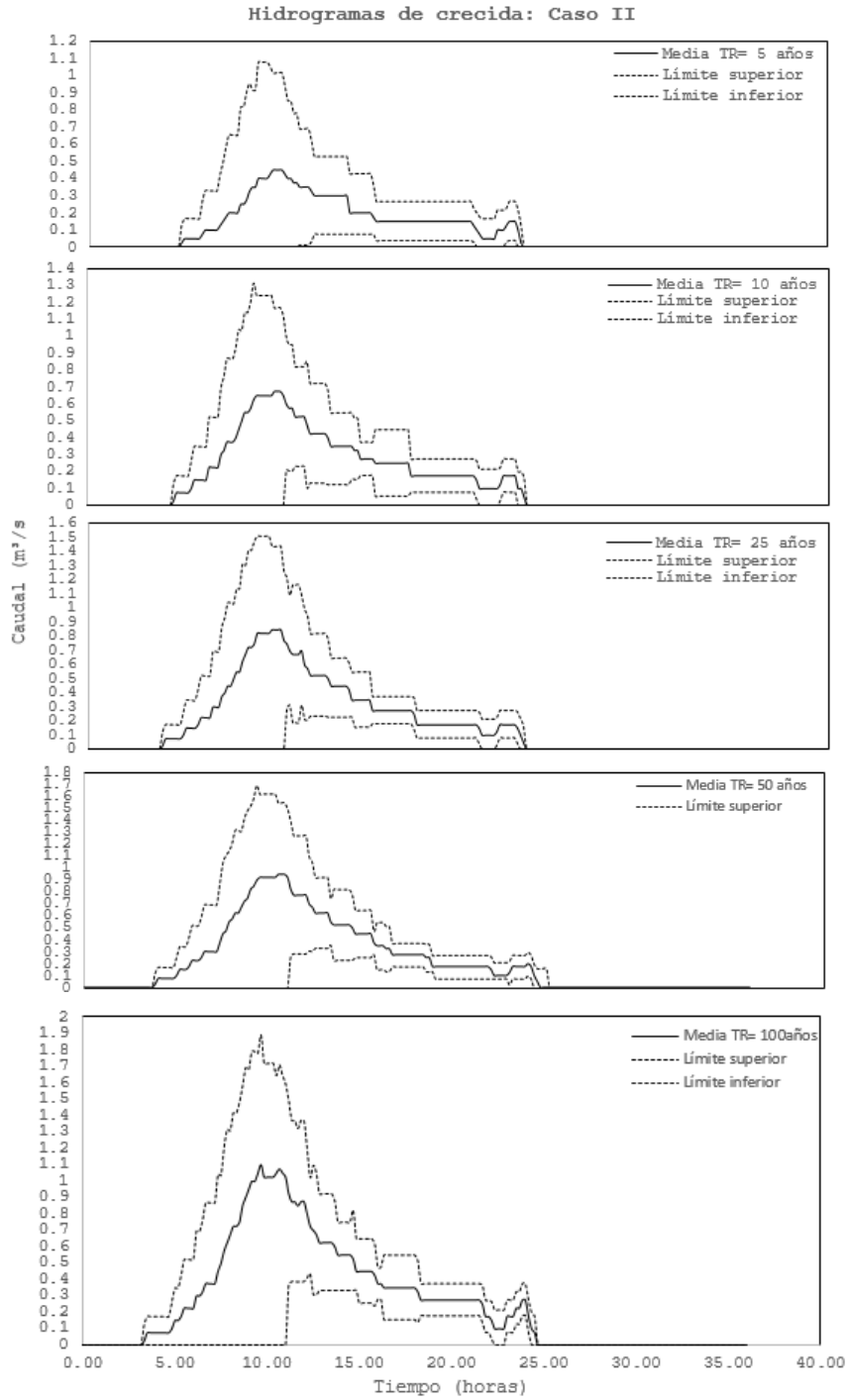


Figura 19. Incertidumbre existente en los hidrogramas de crecida para el **Caso II**, aplicado a los diferentes períodos de retorno. . Para un confianza del 95% se obtiene que el límite superior corresponde al máximo caudal esperado que podría alcanzarse en la crecida, el límite inferior representa el caudal mínimo esperado representando las condiciones menos extremas.

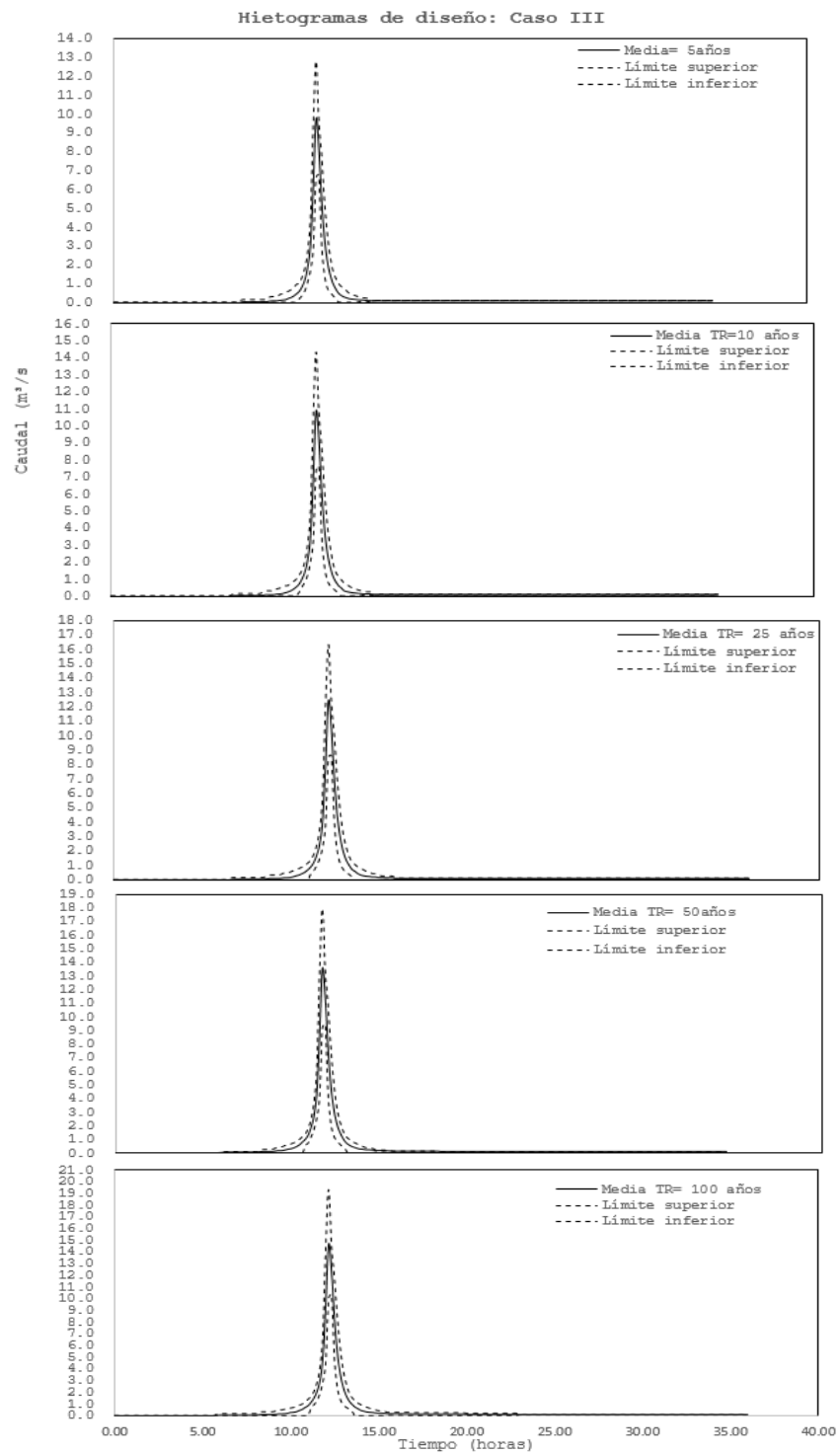


Figura 20. Incertidumbre existente en los hidrogramas de crecida para el **Caso III**, aplicado a los diferentes períodos de retorno. . Para un confianza del 95% se obtiene que el límite superior corresponde al máximo caudal esperado que podría alcanzarse en la crecida, el límite inferior representa el caudal mínimo esperado representando las condiciones menos extremas.

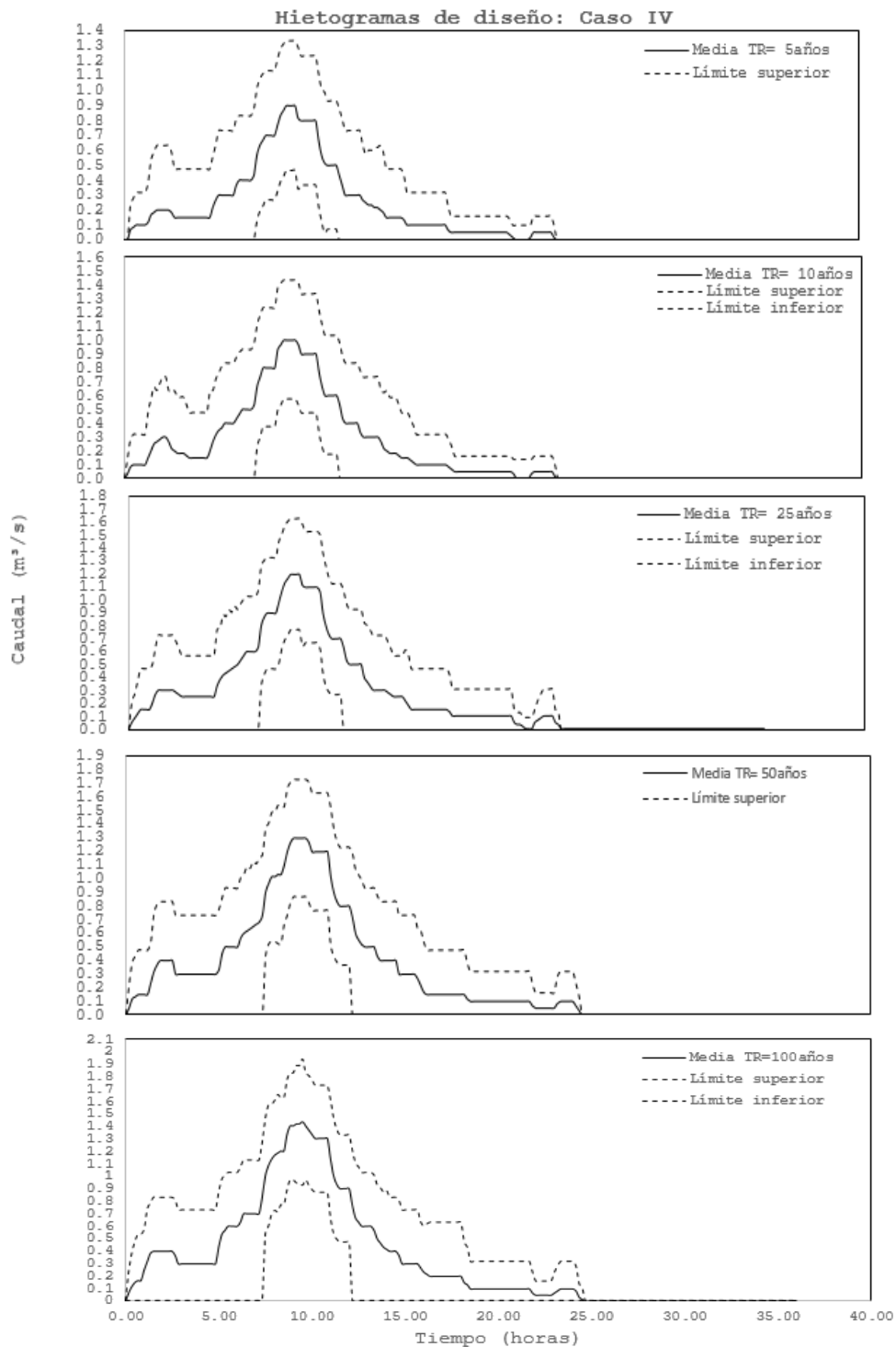


Figura 21. Incertidumbre existente en los hidrogramas de crecida para el **Caso IV**, aplicado a los diferentes períodos de retorno. Para una confianza del 95% se obtiene que el límite superior corresponde al máximo caudal esperado que podría alcanzarse en la crecida, el límite inferior representa el caudal mínimo esperado representando las condiciones menos extremas.

4 Conclusiones

Se seleccionaron los métodos Clark y SCS para el análisis hidrológico en la cuenca Guanga Huaycu, situada en el barrio "La Gasca". El objetivo principal fue evaluar la incertidumbre asociada con la generación de hidrogramas de crecida mediante la aplicación de diversos métodos hidrológicos. Para ello, se utilizaron hietogramas de diseño basados en el Bloque Alterno y las Curvas de Huff. Esta evaluación permitió una comprensión más profunda de cómo cada método influye en las estimaciones de caudal y volumen de escorrentía, así como en la precisión de los resultados obtenidos. La comparación de estos enfoques proporciona una base sólida para seleccionar el método más adecuado y para interpretar de manera crítica las previsiones hidrológicas en esta cuenca específica.

El análisis comparativo de los hietogramas generados por el método del Bloque Alterno y las curvas de Huff revela diferencias significativas en la estimación de precipitaciones máximas para diversos periodos de retorno. Los resultados muestran que el método del Bloque Alterno tiende a producir intensidades de precipitación mucho más altas en comparación con las curvas de Huff. En el caso del método del Bloque Alterno, se observa que los caudales máximos se registran para un periodo de retorno de 100 años alcanza 7.64 mm, mientras que para el método de las curvas de Huff, la precipitación máxima para un periodo de retorno de 100 años es de 0.546 mm, y para un periodo de.

El análisis de los resultados obtenidos con los métodos SCS y Clark revela diferencias notables en las estimaciones de caudal, volumen de escorrentía y tiempo pico. El Método SCS proporciona un caudal medio de 2.75 m³/s, con un rango que va desde 0.11 m³/s

hasta 5.39 m³/s. Para el volumen de escorrentía, estima 21.96 mm, con límites que oscilan entre 2.09 mm y 44.03 mm. El tiempo pico registrado para el Método SCS es de 688 minutos, con un rango de 580 a 795.64 minutos. En contraste, el Método de Clark presenta un caudal medio significativamente más alto de 6.91 m³/s, con límites más estrechos de 6.79 m³/s y 7.02 m³/s. Este método estima un volumen de escorrentía de 38.74 mm, con un rango que varía entre 12.66 mm y 64.80 mm. El tiempo pico promedio para el Método de Clark es de 647 minutos, con un intervalo de 478.67 a 815.5 minutos. Por lo tanto, el Método de Clark tiende a ofrecer estimaciones más elevadas y con menor variabilidad en caudales y volúmenes de escorrentía, además de tiempos pico generalmente menores en comparación con el Método SCS.

La aplicación de escenarios de cambio de uso de suelo y la modificación de los parámetros en los modelos hidrológicos han revelado cómo estos cambios afectan el comportamiento de la escorrentía con un incremento del 7.40% respecto al escenario actual y el caudal pico varía en un 8.64%. Este análisis ha permitido identificar las consecuencias potenciales del incremento de porcentaje de impermeabilidad en la cuenca de estudio.

Referencias

- [1] S. A. Bermeo, «Aluviones en Quito¿Un fenómeno o un error recurrente?,» *Repositorio UCE*, 2022.
- [2] Cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos, *Manual de usuario Sistema de modelamiento hidrológico HEC HMS*, 2000.
- [3] Universidad de Alaska , «Alaska.edu,» Universidad de Alaska, [En línea]. Available: [https://search.asf.alaska.edu/#/.](https://search.asf.alaska.edu/#/) [Último acceso: 19 Abril 2024].
- [4] Ministerio de Agricultura y Ganadería, «Sigtierras,» [En línea]. Available: [http://www.sigtierras.gob.ec/conflictos-de-uso/.](http://www.sigtierras.gob.ec/conflictos-de-uso/) [Último acceso: 20 Abril 2024].
- [5] Y. Stavros, C. Christos, A.Loukas y Giannopoulou, *Un análisis de sensibilidad de los parámetros del hidrograma unitario instantáneo de Clark*, 2013.
- [6] J. S. S. Román, *HEC HMS Manual elemental*, España: Departamento de Geología.
- [7] W. Palacios, M. Zambrano y D.P, *Análisis temporal de las lluvias extremas en el DMQ y cálculo de las curvas IDF*, 2014.
- [8] L. Vargas, *Evaluación del modelo de hidrograma unitario SCS en la determinación de caudales máximos en cuencas del norte de Santander*, España, 2018.
- [9] D. M. y V. T. C. H. a. M.-H. C. D. Maidment, *Hidrología aplicada*, Mc Graw-Hill companies, 1994.
- [10] E. Varas, *Influencia del hietograma de una tormenta en la crecida resultante*, 1985.
- [11] Instituto Nacional de Estadística y Censos, «Libros históricos- Censos de Población y Vivienda del Ecuador,» 2021.
- [12] A. Degró, «Tasas de crecimiento poblacional(r): Una mirada desde el modelo matemático lineal, geométrico y exponencial,» *CIDE digital*, pp. 143-162, 2011.
- [13] T. J.R, *Modelo matemático de transformación precipitación-aportación*, ASINEL, 1977.
- [14] Rawls, Brakensiek y Miller, *Texturas del suelo y conductividad hidráulica saturada*, 1983.
- [15] A. Günal y A. Güven, *Unidad sintética , hidrograma de pequeñas cuencas mediante el uso de SIG*, Polonia: Acta Physica, 2016.
- [16] P. V.M, *Hidrología, principios y prácticas*, New Jersey, 1989.
- [17] W.Viessman, *Introducción a la hidrología tercera edición*, Inglaterra, 1989.
- [18] F. M. Isabel, *Generación de hidrogramas de crecida mediante simulación estocástica multivariada de lluvia y modelación hidrológica distribuida. Aplicación seguridad de presas*, 2018.
- [19] C. J. y A. Bera, *Prueba de normalidad de las observaciones y residuos de regresión*, 1987.

- [20] M. Vásconez, A. Mancheno, C. Álvarez y C. Prehn, *Cuencas hidrográficas*, 2019.
- [21] G. E. E. Cordero, *Ajuste del número de curva mediante optimización en HEC HMS en la microcuenca la Vega , el Valle del Cauca*, Cartago, 2018.