

Auxiliar de ingeniería civil en IBG ingeniería para realizar análisis hidrológicos e hidráulicos del proyecto “Especificaciones técnicas para el acotamiento de la ronda hídrica de la quebrada La Palmira ubicada en el municipio Piedecuesta, Santander”

Karen Lizeth Martínez Jaimes

Trabajo de Grado para Optar al Título de Profesional en Ingeniería Civil

Director

Sandra Rocío Villamizar Amaya

Ph.D. Sistemas Ambientales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Programa Académico

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mis padres y mi hermana por su apoyo incondicional y amor infinito

En memoria de mi abuela María Antonia Quintero

Agradecimientos

A Jorge Luis Martínez, Ingeniero Civil UIS

A Julieth Paola Martínez, Ingeniera de Petróleos UIS

A Yolanda Jaimes, Administradora de Empresas

A Ing. Sandra Rocío Villamizar profesora de hidrología e hidráulica UIS

A Iban Gustavo Blanco, Ingeniero civil y director del proyecto

A Andrés Felipe Blanco, Ingeniero Civil UIS

A Juan José Martínez, Ingeniero Civil UPB

A María Fernanda Arciniegas, Química UIS

A Vianny Mildred Peña, Ingeniera Metalúrgica UIS

A Jhon Sebastián García

A mi familia y amigos, pues sin su apoyo no hubiera sido posible este logro

Tabla de Contenido

| | Pág. |
|--|-------------|
| Introducción | 17 |
| 1. Objetivos | 20 |
| 1.1 Objetivo General | 20 |
| 1.2 Objetivos Específicos..... | 20 |
| 2. Marco conceptual..... | 21 |
| 2.1 Gestión y análisis de la información hidroclimatológica para el estudio de la quebrada La Palmira | 21 |
| 2.1.1 Delimitación de la unidad hidrográfica..... | 21 |
| 2.1.2 Aplicación de los polígonos de Thiessen para la distribución espacial de los datos hidroclimatológicos..... | 22 |
| 2.1.3 Identificación de valores atípicos..... | 22 |
| 2.1.4 Periodo de retorno..... | 23 |
| 2.1.5 Tiempo de concentración | 23 |
| 2.1.5.1 Ecuación de Kirpich..... | 24 |
| 2.1.5.2 Ecuación de Témez | 24 |
| 2.1.5.3 Ecuación de Giandotti..... | 25 |
| 2.1.6 Curvas IDF (Intensidad – Duración – Frecuencia)..... | 25 |
| 2.1.7 Tormenta de diseño..... | 28 |
| 2.2 Implementación del modelo hidrológico para estimar los caudales asociados a periodos de retorno de interés | 29 |
| 2.2.1 Método racional | 29 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.2.1.1 | Coeficiente de escorrentía..... | 30 |
| 2.2.2 | Método de hidrograma SCS..... | 31 |
| 2.2.2.1 | Número Curva..... | 31 |
| 2.2.2.2 | Modelo hidrológico en el software HEC-HMS | 34 |
| 2.3 | Implementación del modelo hidráulico para la delimitación de la ronda hídrica de la quebrada La Palmira | 35 |
| 2.3.1 | Conceptos hidráulicos aplicados para la correcta modelación hidráulica | 36 |
| 2.3.1.1 | Ecuación de Manning | 36 |
| 2.3.1.2 | Coeficiente de rugosidad de Manning | 36 |
| 2.3.2 | Delimitación del cauce permanente | 37 |
| 2.3.3 | Delimitación del componente hidrológico para definición del límite físico..... | 38 |
| 3. | Generalidades del proyecto..... | 38 |
| 3.1 | Localización..... | 39 |
| 3.2 | Características morfométricas..... | 42 |
| 3.2.1 | Área de la cuenca | 43 |
| 3.2.2 | Longitud del cauce..... | 43 |
| 3.2.3 | Pendiente..... | 43 |
| 4. | Metodología | 44 |
| 4.1 | Gestión y análisis de la información hidroclimatológica para el estudio de la quebrada La Palmira | 44 |
| 4.1.1 | Recopilación de la información hidroclimatológica..... | 44 |
| 4.1.2 | Análisis de la información hidroclimatológica..... | 45 |
| 4.1.2.1 | Delimitación de la unidad hidrográfica..... | 45 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 4.1.2.2 | Aplicación de los polígonos de Thiessen para la distribución espacial de los datos hidroclimatológicos..... | 45 |
| 4.1.2.3 | Identificación de valores atípicos..... | 45 |
| 4.1.2.1 | Periodo de retorno..... | 46 |
| 4.1.2.1 | Tiempo de concentración..... | 46 |
| 4.1.2.1.1 | Ecuación de Kirpich..... | 46 |
| 4.1.2.1.2 | Ecuación de Témez..... | 46 |
| 4.1.2.1.3 | Ecuación de Giandotti..... | 47 |
| 4.1.2.2 | Curvas IDF (Intensidad – Duración – Frecuencia)..... | 47 |
| 4.1.2.3 | Tormenta de diseño..... | 47 |
| 4.2 | Implementación del modelo hidrológico para estimar los caudales asociados a periodos de retorno de interés..... | 48 |
| 4.2.1 | Método racional..... | 48 |
| 4.2.1.1 | Coefficiente de escorrentía..... | 48 |
| 4.2.2 | Método de hidrograma SCS..... | 49 |
| 4.2.2.1 | Número Curva..... | 49 |
| 4.2.2.2 | Modelo hidrológico en el software HEC-HMS..... | 50 |
| 4.3 | Implementación del modelo hidráulico para la delimitación de la ronda hídrica de la quebrada La Palmira..... | 50 |
| 4.3.1 | Coefficiente de rugosidad de Manning..... | 51 |
| 4.3.2 | Delimitación del cauce permanente..... | 51 |
| 4.3.3 | Delimitación del componente hidrológico para definición del límite físico..... | 52 |
| 5. | Resultados..... | 53 |

| | | |
|---------|---|----|
| 5.1 | Gestión y análisis de la información hidroclimatológica..... | 53 |
| 5.1.1 | Delimitación de la unidad hidrográfica..... | 53 |
| 5.1.1 | Recopilación de la información hidroclimatológica | 54 |
| 5.1.1.1 | Estaciones de interés para cada variable climática | 54 |
| 5.1.1.2 | Polígonos de Thiessen con la distribución espacial de las estaciones de precipitación de interés | 57 |
| 5.1.2 | Análisis de la información de precipitación..... | 58 |
| 5.1.2.1 | Precipitación anual..... | 59 |
| 5.1.2.2 | Precipitación media mensual | 59 |
| 5.1.2.3 | Precipitación máxima 24 horas anual | 60 |
| 5.1.2.4 | Identificación de valores atípicos..... | 61 |
| 5.1.2.1 | Tiempo de concentración..... | 62 |
| 5.1.2.2 | Curvas IDF (Intensidad – Duración - Frecuencia)..... | 63 |
| 5.1.2.3 | Tormenta de diseño..... | 64 |
| 5.2 | Cálculo de caudales máximos por medio del modelo hidrológico | 65 |
| 5.2.1 | Método racional | 65 |
| 5.2.1.1 | Coefficiente de escorrentía..... | 66 |
| 5.2.1.2 | Caudales máximos calculados por el método racional | 68 |
| 5.2.1 | Método de hidrograma SCS..... | 69 |
| 5.2.1.1 | Número Curva..... | 69 |
| 5.2.1.2 | Caudales máximos calculados por el método del hidrograma SCS..... | 72 |
| 5.3 | Modelación hidráulica | 74 |
| 5.3.1 | Coefficiente de rugosidad de Manning | 74 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.3.2 | Manchas de inundación para diferentes periodos de retorno..... | 76 |
| 5.3.3 | Delimitación del cauce permanente | 77 |
| 5.3.4 | Delimitación del componente hidrológico..... | 78 |
| 6. | Aportes | 84 |
| 6.1 | Creación de rásteres que representan la distribución espacial de cada variable climática | 84 |
| 6.2 | Manual para el acotamiento de una ronda hídrica | 84 |
| 6.3 | Construcción del hidrograma por el método SCS en Excel y el manual para su uso | 85 |
| 7. | Conclusiones | 86 |
| | Referencias Bibliográficas | 88 |
| | Apéndices..... | 91 |

Lista de Tablas

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1 <i>Estaciones de interés para análisis de precipitación</i> | 54 |
| Tabla 2 <i>Estaciones de interés para análisis de temperatura</i> | 54 |
| Tabla 3 <i>Estaciones de interés para análisis de brillo solar</i> | 55 |
| Tabla 4 <i>Estaciones de interés para análisis de humedad relativa</i> | 55 |
| Tabla 5 <i>Tiempos de concentración</i> | 63 |
| Tabla 6 <i>Coefficientes de escorrentía correspondientes a cada periodo de retorno</i> | 68 |
| Tabla 7 <i>Caudales máximos calculados por el método racional</i> | 69 |
| Tabla 8 <i>Número Curva ponderado (CN)</i> | 72 |
| Tabla 9 <i>Caudales máximos calculados por el método del hidrograma SCS con la ayuda del software HEC-HMS</i> | 73 |
| Tabla 10 <i>Cuadro comparativo de los caudales máximos obtenidos por los dos métodos propuestos</i> | 74 |
| Tabla 11 <i>Valores de los coeficientes de rugosidad de Manning para cada tramo de la quebrada La Palmira</i> | 76 |
| Tabla 12 <i>Niveles de inundación correspondientes a cada periodo de retorno</i> | 83 |

Lista de Figuras

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1 <i>Parámetros de ajuste de la regresión</i> | 26 |
| Figura 2 <i>Regiones en Colombia para definición de parámetros a, b, c y d</i> | 27 |
| Figura 3 <i>Hietograma guía de precipitación</i> | 28 |
| Figura 4 <i>Valores del coeficiente de escorrentía</i> | 30 |
| Figura 5 <i>Número de curva de escorrentía para áreas urbanas</i> | 32 |
| Figura 6 <i>Número de curva de escorrentía para área rurales</i> | 33 |
| Figura 7 <i>Número de curva de escorrentía de otras tierras agrícolas</i> | 34 |
| Figura 8 <i>Valores para el coeficiente de rugosidad de Manning</i> | 37 |
| Figura 9 <i>Localización de la quebrada La Palmira en el municipio de Piedecuesta</i> | 39 |
| Figura 10 <i>Tramo uno: Aguas arriba de la quebrada La Palmira.</i> | 40 |
| Figura 11 <i>Tramo dos: Zona canalizada de la quebrada La Palmira</i> | 41 |
| Figura 12 <i>Tramo tres: Aguas debajo de la quebrada La Palmira</i> | 42 |
| Figura 13 <i>Áreas desarrolladas y no desarrolladas para el cálculo del coeficiente de escorrentía</i> | 49 |
| Figura 14 <i>Delimitación de la cuenca hidrográfica</i> | 53 |
| Figura 15 <i>Rásteres de distribución espacial de cada variable climática</i> | 56 |
| Figura 16 <i>Polígonos de Thiessen estaciones de precipitación</i> | 58 |
| Figura 17 <i>Gráfica de precipitación anual de la estación Piedecuesta Granja</i> | 59 |
| Figura 18 <i>Gráfica de precipitación media mensual de la estación Piedecuesta Granja</i> | 60 |
| Figura 19 <i>Gráfica de precipitación máxima 24 horas anual de la estación Piedecuesta Granja</i> | 61 |
| Figura 20 <i>Caja de bigotes de la estación “PIEDECUESTA GRANJA [23190700]”</i> | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 21 <i>Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF)</i> | 64 |
| Figura 22 <i>Tormenta de diseño o hietograma</i> | 65 |
| Figura 23 <i>Fotografía de la quebrada La Palmira aguas arriba</i> | 67 |
| Figura 24 <i>Fotografía de la quebrada La Palmira aguas abajo</i> | 67 |
| Figura 25 <i>Identificación del tipo de suelo según el IGAC</i> | 70 |
| Figura 26 <i>Clasificación litológica del tramo aguas arriba de la Quebrada La Palmira</i> | 71 |
| Figura 27 <i>Clasificación litológica del tramo aguas abajo de la Quebrada La Palmira</i> | 71 |
| Figura 28 <i>Caudal pico para el periodo pico de 2.33 años obtenido del software HEC-HMS</i> | 73 |
| Figura 29 <i>Fotografías de los tres tramos en los que se subdividió la quebrada La Palmira para determinar el coeficiente de rugosidad de Manning</i> | 75 |
| Figura 30 <i>Manchas de inundación a lo largo del drenaje para los periodos de retorno de interés</i> | 77 |
| Figura 31 <i>Manchas de inundación para los Tr de 2.33 y 15 años</i> | 78 |
| Figura 32 <i>Mancha de inundación para un Tr de 100 años</i> | 79 |
| Figura 33 <i>Sección transversal de abscisa ubicada en el tramo 1</i> | 80 |
| Figura 34 <i>Sección transversal de abscisa ubicada en el tramo 2</i> | 81 |
| Figura 35 <i>Sección transversal de abscisa ubicada en el tramo 3</i> | 82 |

Lista de Apéndices

| | pág. |
|---|-------------|
| Apéndice A. Manual para el acotamiento de una ronda hídrica | 91 |
| Apéndice B. Manual de uso del hidrograma en Excel | 91 |
| Apéndice C. Construcción del hidrograma por el método SCS..... | 91 |

Glosario

Acotamiento: proceso mediante el cual se define el límite físico de la ronda hídrica de los cuerpos de agua, teniendo en cuenta los criterios geomorfológicos, hidrológicos y ecosistémicos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2017).

Cauce permanente: masa de agua que generalmente fluye en un cauce natural sin interrupción espacio-temporal durante el año; también corresponde a la faja de terreno que ocupan los niveles máximos ordinarios de un cuerpo de agua sin producir desbordamiento de sus márgenes naturales. Este se delimita mediante un análisis de formas de terreno que corresponde a la geoforma sobre la que fluye o se acumula el agua y los sedimentos en condiciones de flujo de caudales sin que se produzca el desbordamiento (Ministerio de ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2017).

Criterios hidrológicos: determinan el tamaño y forma del cauce junto con su entorno, para lo cual es necesario tener en cuenta el área que ocupa el cuerpo de agua, considerando las variaciones que se pueden presentar a lo largo de los meses y años. Adicionalmente, se tienen en cuenta los eventos de inundaciones más frecuentes presentados, considerando el grado de alteración morfológica (Ministerio de ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2017).

Curvas IDF (Intensidad, Duración y Frecuencia): son una relación entre la intensidad de precipitación, que es la cantidad de lluvia caída por unidad de tiempo, su duración y la frecuencia o tiempo de retorno (T_r). Para su construcción, se hacen necesarios los datos históricos de precipitación con el fin de poder establecer patrones de comportamiento de las lluvias que permitan realizar diseños racionales y efectivos para el análisis hidrológico (Instituto Nacional de Vías, 2009).

Modelo hidráulico: simula el comportamiento del flujo del agua en sistemas de drenaje y otras estructuras hidráulicas, centrándose en cómo el agua se distribuye en el sistema y cómo interactúa con su entorno físico. Este modelo permite calcular los niveles máximos de inundación en áreas específicas, ayudando en la planificación de medidas de mitigación y en la definición de las zonas de riesgo (Osorio, 2016).

Modelo hidrológico: simula el comportamiento del ciclo de agua en una cuenca hidrográfica, permitiendo estimar los caudales de la fuente hídrica para diferentes periodos de retorno y condiciones de precipitación (MODELACIÓN HIDROLÓGICA - IDEAM, 2024).

Ronda hídrica: zona riparia o ribereña, región de transición y de interacciones entre los medios terrestre y acuático, es decir, un ecotono. Comprende la faja paralela a la línea del cauce permanente de ríos y lagos, de hasta treinta metros de ancho. En estas zonas se tiene transferencia de agua, nutrientes, sedimentos, materia orgánica y organismos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

Sistemas lóticos: se clasifica de acuerdo con la dinámica del flujo y en este sistema hay un constante flujo de agua unidireccional que se encuentra influenciado por factores como la pendiente, el caudal y la profundidad. Este constante movimiento afecta la erosión del suelo, la distribución de nutrientes, entre otros aspectos, haciendo que el ecosistema sea dinámico y variable (SIGAM - GLOSARIO DE LA GESTIÓN AMBIENTAL, 2024).

Tormenta de diseño: también conocida como hietograma, muestra la variación de la intensidad de la precipitación con respecto al tiempo para un periodo de retorno específico; es el insumo fundamental para el cálculo de caudales de diseño (Instituto Nacional de Vías, 2009).

Resumen

Título: Auxiliar de ingeniería civil en IBG ingeniería para realizar análisis hidrológico e hidráulicos del proyecto “Especificaciones técnicas para el acotamiento de la ronda hídrica de la quebrada La Palmira ubicada en el municipio de Piedecuesta, Santander”*

Autor: Karen Lizeth Martínez Jaimes**

Palabras Clave: Acotamiento de ronda hídrica, modelación hidrológica, modelación hidráulica, HEC-HMS, HEC-RAS, Manual de drenaje para carreteras INVIAS, riesgos de inundación.

Descripción: Este trabajo de grado describe el aporte, a través de una práctica empresarial de ingeniería civil, al acotamiento de la ronda hídrica de la quebrada La Palmira, ubicada en Piedecuesta, Santander, como respuesta a problemáticas ambientales y urbanísticas relacionadas con la invasión del área de protección y posibles riesgos asociados a inundaciones. El objetivo principal fue realizar la modelación hidrológica e hidráulica necesaria para el acotamiento de la ronda hídrica del ecosistema acuático, garantizando la sostenibilidad del recurso hídrico y la mitigación de riesgos, según lo establecido en la “Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia” del Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. La metodología incluyó tres fases: la gestión y análisis de la información hidroclimatológica, la implementación de los modelos hidrológicos mediante los métodos racional y del hidrograma SCS, y la modelación hidráulica con el software HEC-RAS. Estas herramientas permitieron estimar los caudales máximos asociados a los periodos de retorno claves, facilitando la delimitación tanto del cauce permanente como del componente hidrológico necesario para la delimitación del límite físico, en cumplimiento con los criterios normativos y adaptados a las condiciones específicas del área de estudio. Este trabajo constituye un modelo base para la delimitación de rondas hídricas aplicable a sistemas lóticos, destacando el uso de normativas vigentes y la implementación de herramientas tecnológicas avanzadas. La experiencia de práctica permitió combinar conocimientos teóricos y prácticos para análisis hidrológicos e hidráulicos. Como aporte al conocimiento, se desarrolló un manual para el acotamiento de rondas hídricas y una hoja de Excel, junto con su manual de uso, para la construcción del hidrograma por el método del SCS. Estos productos serán de utilidad para la empresa en sus futuros proyectos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Programa académico. Director: Sandra Rocío Villamizar Amaya. Título académico completo de mayor rango.

Abstract

Title: Civil engineering assistant at IBG Ingeniería to perform hydrological and hydraulic analysis of the project “Technical specifications for the delimitation of the water ring of the La Palmira creek located in the municipality of Piedecuesta, Santander”*

Author(s): Karen Lizeth Martínez Jaimes **

Key Words: Water ring road bounding, hydrological modelling, hydraulic modelling, HEC-HMS, HEC-RAS, Drainage Manual for roads INVIAS, flood risks.

Description: This thesis describes the contribution, through a civil engineering corporate internship, to the delineation of the hydrological boundary of La Palmira stream, located in Piedecuesta, Santander, in response to environmental and urban issues related to the invasion of the protection area and potential flood risks. The main objective was to perform the necessary hydrological and hydraulic modeling for the delineation of the aquatic ecosystem's hydrological boundary, ensuring the sustainability of water resources and risk mitigation, as established in the "Technical Guide of Criteria for the Delimitation of Hydrological Boundaries in Colombia" by the Ministry of Environment and Sustainable Development. The methodology included three phases: management and analysis of hydroclimatic data, implementation of hydrological models using the rational method and SCS hydrograph method, and hydraulic modeling using HEC-RAS software. These tools allowed for the estimation of maximum flow rates associated with key return periods, facilitating the delineation of both the permanent channel and the hydrological component necessary for the physical boundary, in compliance with regulatory criteria and adapted to the specific conditions of the study area. This work serves as a baseline model for the delimitation of hydrological boundaries applicable to lotic systems, highlighting the use of current regulations and the implementation of advanced technological tools. This internship experience allowed for the integration of theoretical and practical knowledge for hydrological and hydraulic analyses. As a contribution to the state of art, a manual for the delineation of hydrological boundaries and an Excel spreadsheet, along with its user manual, were developed for constructing the hydrograph using the SCS method. These deliverables will be useful for the company in its future projects.

* Degree Work

** Faculty of Physico-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Academic Program. Director: Sandra Rocío Villamizar Amaya. Full academic title of highest rank.

Introducción

El acotamiento de una ronda hídrica es esencial para abordar los desafíos asociados al uso, conservación y gestión de los componentes físicos y socioambientales que conforman esta franja contigua al cuerpo de agua y que se conoce a nivel internacional como zona riparia o ribereña, región de transición y de interacciones entre los medios terrestre y acuático, es decir, un ecotono (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018). La ronda hídrica es una zona de transferencia de agua, nutrientes, sedimentos, organismos y materia orgánica, y su acotamiento busca asegurar que los recursos acuáticos se utilicen de manera equitativa y responsable, minimizando el impacto ambiental y promoviendo la equidad entre los diversos usuarios. En general, el acotamiento mantiene la integridad hidrológica, hidráulica y ecológica del canal del cauce, del suelo, de la fauna y la flora (Paz et al., 2018).

En Colombia, las rondas hídricas se definen como “La faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho”, considerando criterios técnicos y ecológicos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2017). Su regulación inicial se encuentra en el Código de Recursos Naturales (Decreto Ley 2811 de 1974), Artículo 83, literal d, que las define como franjas paralelas de hasta 30 metros al cauce de ríos y lagos, consideradas bienes inembargables e imprescriptibles del Estado (Congreso de la República de Colombia, 1974). Actualmente, el artículo 206 de la Ley 1450 de 2011 incorpora una visión ecosistémica, adaptando su delimitación a las particularidades de los cuerpos de agua y asignando esta responsabilidad a las Corporaciones Autónomas Regionales, los Grandes Centros Urbanos y los Establecimientos Públicos Ambientales (Congreso de la República de Colombia, 2011).

A nivel internacional, normativas como las de España y Canadá incluyen aspectos adicionales como la regionalización, una técnica que permite ajustar los modelos hidrológicos e hidráulicos a las características particulares de cada región. Este enfoque facilita una estimación más precisa de variables como la topografía, la rugosidad y el análisis de frecuencia de inundación en zonas que tienen mayor impacto. Su aplicación no solo contribuye a una planificación más eficiente, sino que también promueve la implementación de medidas preventivas adecuadas, reduciendo los riesgos y optimizando los recursos en las regiones donde hay amenazas de inundaciones recurrentes (López-Vásquez, 2019).

En este contexto, empresas como IBG Ingeniería han desempeñado un papel fundamental en la aplicación de soluciones técnicas para el manejo y conservación de rondas hídricas en Colombia. Fundada en el año 2008, IBG Ingeniería se especializa en áreas como hidrogeología, hidráulica, geología, geotecnia y medio ambiente, contribuyendo significativamente a proyectos de consultoría para entidades como lo son el Instituto Nacional de Vías (INVÍAS), Ecopetrol, Marval Construcciones, Autopista de Santander S.A., entre otras. Esta empresa, a lo largo de toda su trayectoria, ha proporcionado respuestas óptimas y con alto grado de confiabilidad a los requerimientos y perspectivas de cada proyecto realizado, implementando medidas de mejoramiento continuo en sus procesos y una capacitación constante del personal.

En el marco de lo dispuesto por la ley 1450 de 2011, que establece la obligación de las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) para el acotamiento de las rondas hídricas en su área de jurisdicción, IBG Ingeniería se encuentra realizando una consultoría a la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), cuyo objetivo es “realizar el acotamiento de la ronda hídrica de la quebrada La Palmira, ubicada en el municipio de Piedecuesta, Santander”. Esta delimitación es crucial debido a la invasión de la ronda de protección

por parte de la urbanización Palermo I del municipio de Piedecuesta, generando una contaminación de aguas negras en la fuente. La delimitación, soportada en modelación hidrológica e hidráulica, tiene como objetivo principal garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico mediante una gestión eficiente y eficaz del agua. Además, actúa como un gestor de riesgos al reducir las inundaciones y, por ende, minimizar la vulnerabilidad de la población a estos eventos. Es importante aclarar que el acotamiento de las rondas hídricas se aplica exclusivamente a cuerpos de agua naturales, como corrientes tipo permanente o tipo intermitente, siempre que este último presente evidencias geomorfológicas que indiquen un cauce permanente (Paz et al., 2018).

IBG Ingeniería cuenta con un equipo de profesionales altamente calificados y capacitados; sin embargo, para fortalecer su equipo en este proyecto, la empresa incorporó una estudiante de último semestre de ingeniería civil como auxiliar de ingeniería. Bajo la orientación del tutor empresarial, la estudiante combinó los conocimientos adquiridos a lo largo de su carrera universitaria con los nuevos aprendidos sobre el análisis hidrológico e hidráulico de las rondas hídricas, para lograr un correcto acotamiento siguiendo los estándares y normativas vigentes.

Este documento se encuentra estructurado en tres fases: 1) Gestión y análisis de la información hidroclimatológica para el estudio de la quebrada La Palmira, 2) Implementación del modelo hidrológico para estimar los caudales asociados a periodos de retorno de interés, 3) Implementación del modelo hidráulico para la delimitación de la ronda hídrica de la quebrada La Palmira. Lo anterior cumple con los lineamientos establecidos por la Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de Rondas Hídricas en Colombia del Ministerio de Ambiente (2018).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar la modelación hidrológica e hidráulica necesaria para el acotamiento de la ronda hídrica del ecosistema acuático “Quebrada La Palmira” en el municipio de Piedecuesta, departamento de Santander, según lo establecido en la “Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia”, expedida por el ministerio del medio ambiente en el año 2018.

1.2 Objetivos Específicos

- Gestionar la información hidroclimatológica necesaria para realizar las modelaciones hidrológicas e hidráulicas.
- Implementar un modelo hidrológico que permita establecer los caudales asociados a los periodos de retorno establecidos en la “Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia” expedida por el ministerio del Medio Ambiente en el año 2018.
- Implementar un modelo hidráulico que contribuya a la delimitación de la ronda hídrica en el sistema de estudio.

2. Marco conceptual

2.1 Gestión y análisis de la información hidroclimatológica para el estudio de la quebrada

La Palmira

El análisis hidroclimatológico es un enfoque integral que estudia la relación entre el clima y los recursos hídricos, permitiendo una gestión eficiente del agua. El proceso comienza con la delimitación de la unidad hidrográfica, lo que define la zona de captación y establece los límites del área de estudio.

Posteriormente, se evalúan variables clave como la precipitación, cuyos patrones y variaciones anuales determinan la disponibilidad hídrica; la temperatura, que influye en la evaporación y transpiración; la humedad relativa, que afecta la capacidad de los ecosistemas para retener agua; y el brillo solar, regulador de la energía disponible para la evapotranspiración.

Este análisis es esencial para el desarrollo de los modelos hidrológicos e hidráulicos que permiten la delimitación precisa de la ronda hídrica de la Quebrada La Palmira, facilitando así la conservación y distribución sostenible del recurso hídrico. A continuación, se explicarán los conceptos que son esenciales para comprender el análisis hidroclimatológico.

2.1.1 Delimitación de la unidad hidrográfica

Consiste en delimitar geográficamente la zona de captación de agua que alimenta un cuerpo hídrico, considerando factores clave como la topografía y el relieve. Este proceso es fundamental para estimar el volumen de agua que fluye hacia el cauce, analizar la relación entre precipitación, escorrentía y caudal, y fomentar una gestión sostenible de los recursos hídricos. Además, contribuye a la conservación ambiental y a la mitigación de riesgos de inundación. Al proporcionar un análisis integral del comportamiento hídrico, esta delimitación respalda estudios hidrológicos más precisos y efectivos (Garay & Agüero, 2018).

2.1.2 Aplicación de los polígonos de Thiessen para la distribución espacial de los datos hidroclimatológicos

Los polígonos de Thiessen son una herramienta utilizada en análisis hidroclimático para dividir un área en regiones basadas en la proximidad de estaciones hidrometeorológicas. Estos polígonos ayudan a asignar valores de variables como la precipitación y temperatura a áreas geográficas específicas, dependiendo de la cercanía a las estaciones. Cada polígono representa el área en la que una estación tiene la mayor influencia, delimitada por la mitad de la distancia entre estaciones vecinas. Así, se puede distribuir espacialmente la información de las estaciones, lo que es útil para interpolar datos en zonas donde no hay estaciones cercanas. (Ly et al., 2013).

2.1.3 Identificación de valores atípicos

Se utilizó la metodología denominada “Detección de valores atípicos basada en el Rango Intercuartílico (IQR)” adaptada por Baker en 1994. El objetivo de esta metodología es detectar y excluir valores anómalos en los datos hidrológicos para garantizar la calidad de los análisis. Esto se hace evaluando cada valor en el contexto de su distribución estadística mensual para un periodo de años. Para identificar valores atípicos, se calcula el rango intercuartílico (IQR), que representa la diferencia entre el tercer cuartil (Q3) y el primer cuartil (Q1), es decir, el rango donde se encuentra el 50% central de los datos. Los límites para considerar un dato como extremo se determinan con las ecuaciones (1) y (2):

$$\text{Límite Superior} = Q_3 + f * RI \quad (1)$$

$$\text{Límite Inferior} = Q_1 - f * RI \quad (2)$$

Donde “f” es un factor que controla la detección de los valores atípicos y en esta metodología es de cuatro para datos de precipitación, debido a su alta variabilidad, y de tres para las otras variables climáticas.

Para visualizar los resultados, se emplean diagramas de caja de bigotes, que permiten resumir y analizar de forma gráfica la distribución de los datos. En estos diagramas, la caja central representa el rango intercuartílico (Q1 a Q3), la línea central marca la mediana y los bigotes se extienden hasta los valores más cercanos dentro de los límites aceptables. Los puntos que caen fuera de los bigotes son considerados valores extremos. Este enfoque facilita la identificación de valores anómalos, la comprensión de la variabilidad de los datos y la comparación antes y después de los ajustes, asegurando así la confiabilidad de los análisis hidrológicos y climatológicos (Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, 2014).

2.1.4 Periodo de retorno

Se define como el intervalo de tiempo, expresado en años, que permite evaluar la frecuencia de los eventos extremos. Esta metodología es fundamental para gestionar de manera efectiva tanto los riesgos frecuentes como los de mayor impacto, siendo crucial para la planificación y protección de los recursos hídricos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

2.1.5 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración (T_c) es el período que tarda el agua de lluvia en llegar al punto más bajo de la cuenca, como la quebrada. Este periodo se ve influenciado por diversos factores, como la topografía, el uso del suelo y las características del suelo mismo. Para calcularlo, se utilizan ecuaciones empíricas que consideran aspectos como la longitud del flujo, el área y la pendiente de la cuenca, lo que permite estimar de manera efectiva el tiempo necesario para que el agua recorra toda la cuenca.

Un tiempo de concentración corto puede provocar un aumento rápido del caudal en la quebrada, lo que conlleva un mayor riesgo de inundaciones, mientras que un tiempo más prolongado permite una absorción más gradual, resultando en una respuesta más moderada del flujo. A continuación, se muestran algunas de las ecuaciones empíricas para su determinación presentadas por el (INVIAS, 2009).

2.1.5.1 Ecuación de Kirpich

$$T_c = 0.06628 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77} \quad (3)$$

Donde:

T_c: Tiempo de concentración, en horas (h).

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).

S: Pendiente entre las elevaciones máxima y mínima del cauce principal, en (m/m).

2.1.5.2 Ecuación de Témez

$$T_c = 0.30 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76} \quad (4)$$

Dónde:

T_c: Tiempo de concentración, en horas (h).

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).

S: Pendiente total del cauce principal, en porcentaje (%).

2.1.5.3 Ecuación de Giandotti

$$T_c = \frac{4A^{0.5} + 1.50L}{0.8(LS)^{0.5}} \quad (5)$$

Dónde:

T_c: Tiempo de concentración, en horas (h).

A: Área de la cuenca, en kilómetros cuadrados (km²).

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).

S: Pendiente del cauce principal, en metros por metro (m/m).

Conforme al ítem 2.1 del Manual de Drenaje (Instituto Nacional de Vías, 2009), se establece un tiempo mínimo de concentración de 15 minutos. Este parámetro considera el intervalo inicial necesario para que el agua se acumule en una cuenca, evitando así sobreestimar la intensidad de la precipitación.

2.1.6 Curvas IDF (*Intensidad – Duración – Frecuencia*)

Es una herramienta fundamental en la hidrología que se utiliza para estimar la intensidad de las lluvias extremas en función de su duración y frecuencia de ocurrencia. Estas curvas representan gráficamente la relación entre la intensidad de la precipitación en [mm/h], la duración en minutos y la frecuencia en años. Las curvas IDF son esenciales no solo para el diseño de infraestructuras como sistemas de drenaje y alcantarillado, sino también para gestionar inundaciones en áreas urbanas y rurales, simular escurrimientos y prever el comportamiento de cuencas durante eventos de lluvia. Además, facilitan la identificación de áreas vulnerables a inundaciones y proporcionan datos críticos para la planificación del uso del suelo, consolidándose

como herramientas clave en la ingeniería y gestión de recursos hídricos (Acosta Castellanos & Sierra Aponte, 2013).

La metodología usada para el cálculo de curvas IDF fue el método simplificado, que está dado por la ecuación (6). En este se divide el territorio nacional en cinco grandes zonas, permitiendo un análisis independiente de estaciones dentro de las mismas regiones geográficas y buscando condiciones meteorológicas similares. La clasificación mostrada en la Figura 1 y Figura 2, propuesta por Vélez (1983), incluye las regiones Andina (R1), Caribe (R2), Pacífica (R3), Orinoquia (R4) y Amazonia (R5) (Instituto Nacional de Vías, 2009).

$$i = \frac{a \times T^b \times M^d}{(t/60)^c} \quad (6)$$

Donde:

i: Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h).

T: Periodo de retorno, en años.

M: Precipitación máxima promedio anual en 24 horas a nivel multianual.

t: Duración de la lluvia, en minutos (min).

a, b, c, d: Parámetros de ajuste de la regresión.

Figura 1

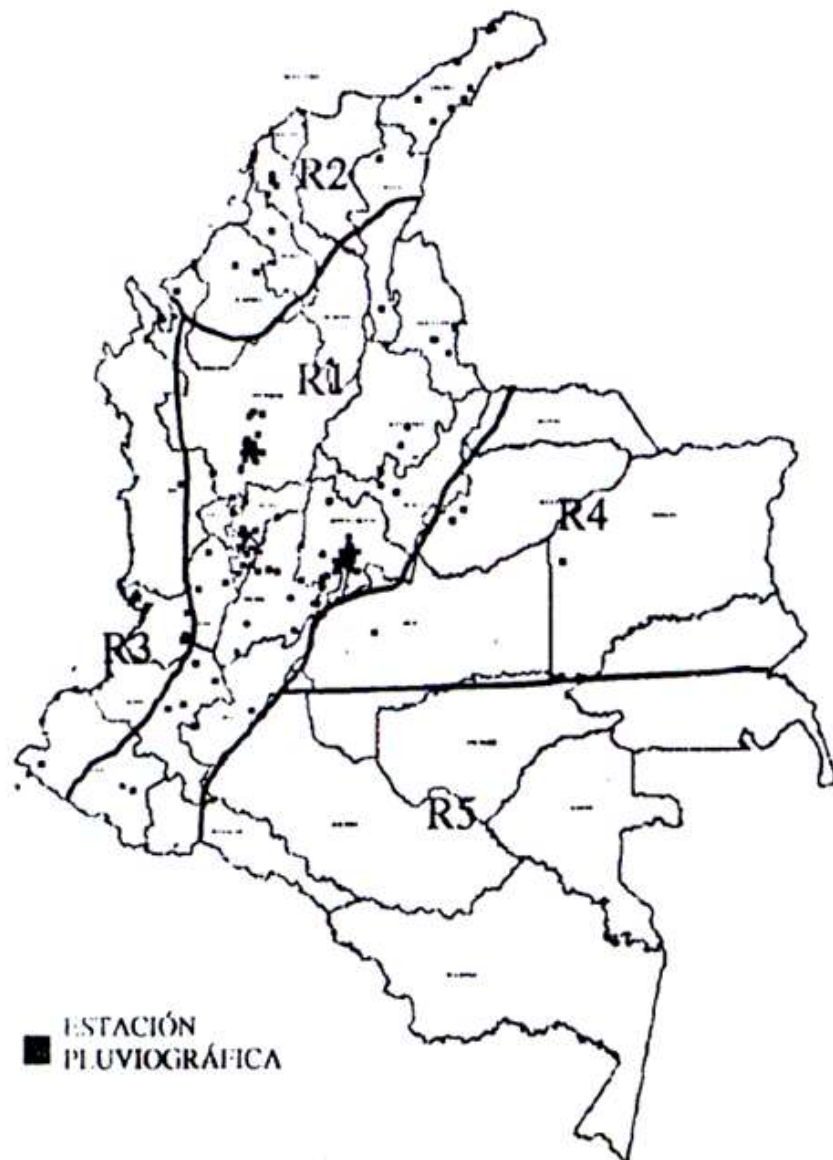
Parámetros de ajuste de la regresión

| REGIÓN | a | b | c | d |
|----------------|-------|------|------|------|
| Andina (R1) | 0.94 | 0.18 | 0.66 | 0.83 |
| Caribe (R2) | 24.85 | 0.22 | 0.50 | 0.10 |
| Pacífico (R3) | 13.92 | 0.19 | 0.58 | 0.20 |
| Orinoquía (R4) | 5.53 | 0.17 | 0.63 | 0.42 |

Nota. Tomado del Instituto Nacional de Vías, 2009.

Figura 2

Regiones en Colombia para definición de parámetros a, b, c y d



Nota. Tomado del Instituto Nacional de Vías, 2009

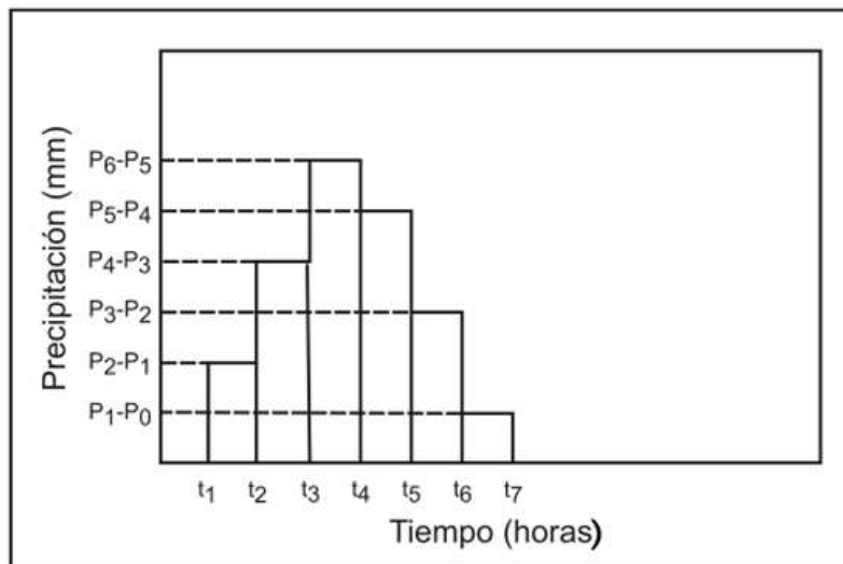
2.1.7 Tormenta de diseño

La tormenta de diseño o hietograma es una representación gráfica que ilustra la intensidad y duración de una tormenta en una zona específica, permitiendo estimar la cantidad de agua que puede acumularse durante eventos de precipitación extrema.

Para hacer el hietograma más crítico, se aplica el método del bloque alterno, que reorganiza los incrementos de lluvia en un patrón alternado: el menor valor se coloca al inicio, el siguiente menor al final, y así sucesivamente, hasta completar el ordenamiento como se muestra en la Figura 3. El resultado es un hietograma de diseño que simula una distribución más concentrada y crítica del aguacero, útil para el diseño de obras hidráulicas y análisis hidrológicos (Instituto Nacional de Vías, 2009).

Figura 3

Hietograma guía de precipitación



Nota. Tomado del Instituto Nacional de Vías, 2009.

2.2 Implementación del modelo hidrológico para estimar los caudales asociados a periodos de retorno de interés.

El modelo hidrológico es una herramienta fundamental para estimar los caudales máximos, ya que permite predecir el comportamiento del agua bajo condiciones específicas de precipitación. Este caudal es un factor crucial en la definición del límite físico, ya que a partir de este se definen las zonas de protección. De acuerdo con el INVIAS, se pueden emplear modelos de lluvia-escorrentía para calcular el caudal máximo, utilizando dos métodos principales, según el tamaño del área de la cuenca hidrográfica. El método racional es aplicable para áreas de drenaje de hasta 2.5 km², mientras que el método del hidrograma es utilizado para áreas mayores a 2.5 km², especialmente en cuencas de hasta 20 km², y en áreas más grandes se recomienda subdividir la cuenca en subcuencas y aplicar metodologías computacionales.

2.2.1 Método racional

El método racional se emplea para estimar el caudal máximo de escorrentía generado por eventos de precipitación en cuencas o áreas de drenaje con un área menor o igual a 2.5 km². Este método se basa en una fórmula empírica que relaciona la intensidad de la lluvia, el área de la cuenca y un coeficiente de escorrentía, el cual se ajusta según las características específicas de la superficie, tales como el tipo de suelo, vegetación y uso del suelo, que afectan la rapidez con la que el agua fluye hacia los cuerpos de agua. El caudal máximo está dado por la ecuación (7):

$$Q_{max} = k \cdot C \cdot i \cdot A \quad (7)$$

Donde:

Q_{max}: Caudal máximo instantáneo anual, en metros cúbicos por segundo (m³/s).

A: Área de la cuenca, en kilómetros cuadrados (km²).

C: Coeficiente de escorrentía.

K: Coeficiente de transformación de unidades; tiene un valor de 0,278.

i: Intensidad de la lluvia (mm/h) durante la duración de la lluvia (Tc).

2.2.1.1 Coeficiente de escorrentía

Representa la proporción de la precipitación que se convierte en escorrentía superficial, dependiendo de características como el uso del suelo, la vegetación, la pendiente y la capacidad de infiltración del suelo. La selección de este coeficiente se realizó basándose en la clasificación de Ven T. Chow, presentada en la Figura 4, y su valor varía entre 0 y 1.

Figura 4

Valores del coeficiente de escorrentía

| Característica de la superficie | Periodo de retorno (años) | | | | | | |
|---|---------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 2 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 | 500 |
| Áreas desarrolladas | | | | | | | |
| Asfáltico | 0.73 | 0.77 | 0.81 | 0.86 | 0.90 | 0.95 | 1.00 |
| Concreto / techo | 0.75 | 0.80 | 0.83 | 0.88 | 0.92 | 0.97 | 1.00 |
| Zonas verdes (jardines, parques, etc.) | | | | | | | |
| <i>Condición pobre (cubierta de pasto menor del 50 % del área)</i> | | | | | | | |
| Plano, 0-2% | 0.32 | 0.34 | 0.37 | 0.40 | 0.44 | 0.47 | 0.58 |
| Promedio, 2-7% | 0.37 | 0.40 | 0.43 | 0.46 | 0.49 | 0.53 | 0.61 |
| Pendiente, superior a 7% | 0.40 | 0.43 | 0.45 | 0.49 | 0.52 | 0.55 | 0.62 |
| <i>Condición promedio (cubierta de pasto del 50 al 75 % del área)</i> | | | | | | | |
| Plano, 0-2% | 0.25 | 0.28 | 0.30 | 0.34 | 0.37 | 0.41 | 0.53 |
| Promedio, 2-7% | 0.33 | 0.36 | 0.38 | 0.42 | 0.45 | 0.49 | 0.58 |
| Pendiente, superior a 7% | 0.37 | 0.40 | 0.42 | 0.46 | 0.49 | 0.53 | 0.60 |
| <i>Condición buena (cubierta de pasto mayor del 75 % del área)</i> | | | | | | | |
| Plano, 0-2% | 0.21 | 0.23 | 0.25 | 0.29 | 0.32 | 0.36 | 0.49 |
| Promedio, 2-7% | 0.29 | 0.32 | 0.35 | 0.39 | 0.42 | 0.46 | 0.56 |
| Pendiente, superior a 7% | 0.34 | 0.37 | 0.40 | 0.44 | 0.47 | 0.51 | 0.58 |
| Áreas no desarrolladas | | | | | | | |
| Área de cultivos | | | | | | | |
| Plano, 0-2% | 0.31 | 0.34 | 0.36 | 0.40 | 0.43 | 0.47 | 0.57 |
| Promedio, 2-7% | 0.35 | 0.38 | 0.41 | 0.44 | 0.48 | 0.51 | 0.60 |
| Pendiente, superior a 7% | 0.39 | 0.42 | 0.44 | 0.48 | 0.51 | 0.54 | 0.61 |
| Pastizales | | | | | | | |
| Plano, 0-2% | 0.25 | 0.28 | 0.30 | 0.34 | 0.37 | 0.41 | 0.53 |
| Promedio, 2-7% | 0.33 | 0.36 | 0.38 | 0.42 | 0.45 | 0.49 | 0.58 |
| Pendiente, superior a 7% | 0.37 | 0.40 | 0.42 | 0.46 | 0.49 | 0.53 | 0.60 |
| Bosques | | | | | | | |
| Plano, 0-2% | 0.22 | 0.25 | 0.28 | 0.31 | 0.35 | 0.39 | 0.48 |
| Promedio, 2-7% | 0.31 | 0.34 | 0.36 | 0.40 | 0.43 | 0.47 | 0.56 |
| Pendiente, superior a 7% | 0.35 | 0.39 | 0.41 | 0.45 | 0.48 | 0.52 | 0.58 |

Nota. Tomado de Ven Te Chow, 1949 (Tabla 15.1.1).

2.2.2 Método de hidrograma SCS

Esta técnica se emplea para calcular la escorrentía superficial, considerando factores como las distintas coberturas del suelo y las condiciones de uso de la tierra ante eventos de precipitación en cuencas que superan los 2.5 km². Según el manual de drenaje para carreteras, cuando se trata de cuencas más grandes, se sugiere el uso de metodologías computacionales avanzadas, como programas especializados como el HEC-HMS, que permiten modelar de manera más precisa el comportamiento del flujo de agua y la escorrentía en áreas extensas.

2.2.2.1 Número Curva

El Soil Conservation Service (SCS) de los Estados Unidos desarrolló el método Número de Curva de Escorrentía (CN) para estimar las abstracciones de una tormenta, que incluyen la intercepción, la detención superficial y la infiltración. En este método, la escorrentía depende de la precipitación total y un parámetro de abstracción, el número de curva (CN), que varía entre 1 y 100 (Instituto Nacional de Vías, 2009). Este número se selecciona de acuerdo a las características del área hidrográfica, como el tipo de suelo, uso del terreno, condiciones superficiales y la humedad antecedente del suelo, como se observa en la Figura 5, Figura 6 y Figura 7. La información del tipo de suelo y coberturas se descarga de las respectivas planchas del IGAC, para luego clasificarlos según su potencial de escorrentía, que consta de cuatro grupos:

- **A** (Bajo potencial de escorrentía): Presentan una alta tasa de infiltración, incluso cuando están muy húmedos, como en el caso de las arenas o gravas profundas y bien drenadas.
- **B** (Moderadamente bajo potencial de escorrentía): Con una tasa de infiltración moderada en suelos profundos y bien drenados, cuya permeabilidad varía de moderadamente lenta a moderadamente rápida.

- **C** (Moderadamente alto potencial de escorrentía): Su infiltración es lenta debido a la presencia de estratos que dificultan el movimiento del agua, como suelos con altos niveles de salinidad o niveles freáticos elevados.
- **D** (Alto potencial de escorrentía): Infiltración muy lenta, característica de suelos arcillosos, niveles freáticos altos o suelos poco profundos sobre materiales casi impermeables.

Figura 5

Número de curva de escorrentía para áreas urbanas

| TIPO DE COBERTURA Y CONDICIÓN HIDROLÓGICA | % PROMEDIO ÁREAS IMPERMEABLES ¹ | NUMERO DE CURVAS PARA GRUPOS DE SUELOS HIDROLÓGICOS | | | |
|---|--|---|----|----|----|
| | | A | B | C | D |
| Áreas urbanas totalmente desarrolladas (vegetación ya establecida): | | | | | |
| Espacios abiertos (prados, parques, campos de golf, cementerios, etc.) ² | | | | | |
| Condición pobre (menos del 50% cubierto de pasto) | | 68 | 79 | 86 | 89 |
| Condición regular (del 50% al 75% cubierto de pasto) | | 49 | 69 | 79 | 84 |
| Condición buena (más del 75% cubierto de pasto) | | 39 | 61 | 74 | 80 |
| Áreas Impermeables: | | | | | |
| Parqueaderos pavimentados, techos, autopistas, etc. (excluyendo derecho de vía) | | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Calles y caminos: | | | | | |
| Pavimentados | | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Pavimentados; zanjas abiertas (incluyendo derecho de vía) | | 83 | 89 | 92 | 93 |
| Grava (incluyendo derecho de vía) | | 76 | 85 | 89 | 91 |
| Tierra (incluyendo derecho de vía) | | 72 | 82 | 87 | 89 |
| Áreas desiertas urbanas: | | | | | |
| Paisajes desérticos naturales (solamente áreas permeables) ³ | | 63 | 77 | 85 | 88 |
| Paisajes desérticos artificiales (barreras impermeables de maleza, arbustos de desierto con 1 a 2 pulg de diámetro; Cubierta de arena o grava y orillas de áreas húmedas) | | 96 | 96 | 96 | 96 |
| Áreas urbanas: | | | | | |
| Comercial y de negocios | 85 | 89 | 92 | 94 | 95 |
| Industrial | 72 | 81 | 88 | 91 | 93 |
| Áreas residenciales por promedio del tamaño del lote: | | | | | |
| 1/8 de acre o menos (506 m ² o menos) | 65 | 77 | 85 | 90 | 92 |
| 1/4 acre (1012 m ²) | 38 | 61 | 75 | 83 | 87 |
| 1/3 acre (1350 m ²) | 30 | 57 | 72 | 81 | 86 |
| 1/2 acre (2025 m ²) | 25 | 54 | 70 | 80 | 85 |
| 1 acre (4050 m ²) | 20 | 51 | 68 | 79 | 84 |
| 2 acre (8100 m ²) | 12 | 46 | 65 | 77 | 82 |
| Áreas urbanas desarrolladas: | | | | | |
| Áreas permeables conformadas (solamente áreas permeables, sin vegetación) | | 77 | 86 | 91 | 94 |

Nota. Tomado de Instituto Nacional de Vías, 2009 (Tabla 2.14).

Figura 6*Número de curva de escorrentía para área rurales*

| COBERTURA | | CONDICIÓN HIDROLÓGICA | GRUPO DE SUELOS | | | |
|---|----------------------------|--------------------------|--------------------|----|----|----|
| USO DE LA TIERRA | TRATAMIENTO O PRÁCTICA | | A | B | C | D |
| | | | NÚMERO DE CURVA | | | |
| Rastrojo | Hileras Rectas | --- | 77 | 86 | 91 | 94 |
| Cultivos en hileras | Hileras Rectas | Mala | 72 | 81 | 88 | 91 |
| | | Buena | 67 | 78 | 85 | 89 |
| | Curvas de nivel | Mala | 70 | 79 | 84 | 88 |
| | | Buena | 65 | 75 | 82 | 86 |
| | Curvas de nivel y terrazas | Mala | 66 | 74 | 80 | 82 |
| | | Buena | 62 | 71 | 78 | 81 |
| Cultivos en hileras estrechas | Hileras rectas | Mala | 65 | 76 | 84 | 88 |
| | | Buena | 63 | 75 | 83 | 87 |
| | Curvas de nivel | Mala | 63 | 74 | 82 | 85 |
| | | Buena | 61 | 73 | 81 | 84 |
| | Curvas de nivel y terrazas | Mala | 61 | 72 | 79 | 82 |
| | | Buena | 59 | 70 | 78 | 81 |
| Leguminosas en ¹ hileras estrechas o forraje en rotación | Hileras rectas | Mala | 66 | 77 | 85 | 89 |
| | | Buena | 58 | 72 | 81 | 85 |
| | Curvas de nivel | Mala | 64 | 75 | 83 | 85 |
| | | Buena | 55 | 69 | 78 | 83 |
| | Curvas de nivel y terrazas | Mala | 63 | 73 | 80 | 83 |
| | | Buena | 51 | 67 | 76 | 80 |

Nota. Tomado de Instituto Nacional de Vías, 2009 (Tabla 2.15).

Figura 7

Número de curva de escorrentía de otras tierras agrícolas

| DESCRIPCIÓN Y TIPO DE COBERTURA | CONDICIÓN HIDROLÓGICA | NÚMERO DE CURVA PARA GRUPOS DE SUELOS HIDROLÓGICOS | | | |
|---|-----------------------|--|----|----|----|
| | | A | B | C | D |
| Pastos, forraje para pastoreo ¹ | Mala | 68 | 79 | 86 | 89 |
| | Regular | 49 | 69 | 79 | 84 |
| | Buena | 39 | 61 | 74 | 80 |
| Prados continuos, protegidos de pastoreo, y generalmente segados para heno | --- | 30 | 58 | 71 | 78 |
| Maleza mezclada con pasto de semilla con la maleza como principal elemento ² | Mala | 48 | 67 | 77 | 83 |
| | Regular | 35 | 56 | 70 | 77 |
| | Buena | 30 ³ | 48 | 65 | 73 |
| Combinación de bosques y pastos (huertas o granjas con árboles) ⁴ | Mala | 57 | 73 | 82 | 86 |
| | Regular | 43 | 65 | 76 | 82 |
| | Buena | 32 | 58 | 72 | 79 |
| Bosques ⁵ | Mala | 45 | 66 | 77 | 83 |
| | Regular | 36 | 60 | 73 | 79 |
| | Buena | 30 | 55 | 70 | 77 |
| Predios de granjas, construcciones, veredas, caminos y lotes circundantes | --- | 59 | 74 | 82 | 86 |

Nota. Tomado de Instituto Nacional de Vías, 2009 (Tabla 2.16).

2.2.2.2 Modelo hidrológico en el software HEC-HMS

El programa HEC-HMS utiliza el método del hidrograma SCS para estimar los caudales e hidrogramas generados por eventos de precipitación en cuencas hidrográficas. Este método se basa en la relación entre la precipitación efectiva y la escorrentía superficial, la cual depende de varios factores, como el tipo de suelo, el uso de la tierra y la condición de la humedad antecedente del suelo. A través de la asignación de un valor de CN (número de curva), el HEC-HMS calcula la escorrentía generada por la lluvia en la cuenca, distribuyendo esta escorrentía a lo largo del tiempo según el tiempo de concentración.

El programa también divide la cuenca en subáreas y calcula la esorrentía de cada una, sumando los resultados para obtener el caudal total. El hidrograma resultante muestra los valores de caudales a lo largo del tiempo, permitiendo obtener el caudal máximo para cada periodo de retorno de interés, parámetro hidrológico necesario para el modelo hidráulico y el correcto acotamiento de la ronda hídrica (Estrada Sifontes & Pacheco Moya, 2012).

2.3 Implementación del modelo hidráulico para la delimitación de la ronda hídrica de la quebrada La Palmira

El análisis hidráulico se enfoca en caracterizar los procesos que ocurren en las zonas inundables, lo cual es fundamental para evaluar la magnitud y el impacto de las inundaciones. Esta evaluación se realiza mediante indicadores específicos como el nivel y la velocidad del flujo, facilitando una mejor comprensión del comportamiento hidráulico del área de estudio.

La modelación hidráulica se realiza con la ayuda del software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), que implica la simulación del flujo de agua en ríos, quebradas, tuberías, embalses, canales y redes de drenaje, permitiendo analizar diversas condiciones de flujo, como inundaciones, distribución de presiones y flujos normales.

Este software es una herramienta clave en el diseño de infraestructuras hidráulicas, proporcionando análisis confiables que garantizan tanto su seguridad como su funcionalidad. Una de sus capacidades destacadas es la generación de mapas de inundación basados en los perfiles de la superficie del agua y la geometría del terreno. A través del Mapeador RAS, se producen conjuntos de datos geospaciales que incluyen la profundidad de la inundación y los límites de las llanuras aluviales. Además, este software permite obtener información detallada para análisis avanzados, como la distribución de velocidades, esfuerzos cortantes e impacto en cauces fluviales (US Army Corps of Engineers, 2025).

2.3.1 Conceptos hidráulicos aplicados para la correcta modelación hidráulica

2.3.1.1 Ecuación de Manning

La ecuación de Manning es una fórmula empírica utilizada en hidráulica que permite calcular la velocidad del flujo de agua en canales abiertos o tuberías parcialmente llenas, tomando en cuenta la pendiente del canal y las características de la superficie del lecho. Está dada por la ecuación (8).

$$v = \frac{1}{n} * R^{2/3} * S^{1/2} \quad (8)$$

Donde:

V = velocidad del flujo.

n = coeficiente de rugosidad de Manning; depende de las características del canal.

R = radio hidráulico, relación entre el área de la sección transversal y el perímetro mojado.

S = pendiente del canal.

2.3.1.2 Coeficiente de rugosidad de Manning

El coeficiente de rugosidad de Manning, denotado como “n”, es un parámetro que representa la resistencia al flujo en un canal debido a la superficie del material que lo recubre. Este coeficiente varía según el tipo de material y las condiciones del canal.

De acuerdo a los criterios técnicos expuestos por Ven Te Chow, la selección adecuada de un “n” significa hacer una buena selección de resistencia al escurrimiento. En general, las condiciones que inducen turbulencia y retardo aumentan n, mientras que las que lo reducen disminuyen n. Para estimar el valor “n” se tiene en cuenta la Figura 8.

Figura 8

Valores para el coeficiente de rugosidad de Manning

| Condiciones del Canal | | Valores | |
|---|---------------|---------|-------|
| Material | Tierra | n0 | 0.020 |
| | Roca | | 0.025 |
| | Grava Fina | | 0.024 |
| | Grava Gruesa | | 0.028 |
| | Arenoso | | 0.023 |
| Grado de Irregularidad | Ligero | n1 | 0.000 |
| | Menor | | 0.005 |
| | Moderado | | 0.010 |
| | Severo | | 0.020 |
| Variaciones en la sección transversal del canal | Gradual | n2 | 0.000 |
| | Ocasional | | 0.005 |
| | Frecuente | | 0.010 |
| | Muy Frecuente | | 0.015 |
| Efecto relativo de obstáculos | Despreciable | n3 | 0.000 |
| | Menor | | 0.012 |
| | Apreciable | | 0.025 |
| | Severo | | 0.055 |
| Vegetación | Nula | n4 | 0.000 |
| | Baja | | 0.007 |
| | Media | | 0.017 |
| | Alta | | 0.037 |
| | Muy Alta | | 0.075 |
| Grado de sinuosidad | Menor | m5 | 1,000 |
| | Apreciable | | 1,150 |
| | Severo | | 1,300 |

Nota. Tomado de Ven Te Chow, 1994 (Pag. 105).

2.3.2 Delimitación del cauce permanente

La delimitación del cauce permanente se refiere a la identificación y marcación del área donde se presenta el flujo constante de agua en un sistema lótico. Esta delimitación se basa en los criterios morfológicos e hidrológicos, así como en las características del flujo del agua. “El cauce permanente se definirá a partir de una aproximación jerárquica desde el análisis de las formas de terreno, teniendo en cuenta que éste corresponde a la zona de terreno sobre la cual fluye la corriente de agua con sus sedimentos en condiciones de flujo de caudales sin que se llegue a producir desbordamiento de sus márgenes naturales” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

2.3.3 Delimitación del componente hidrológico para definición del límite físico

La delimitación del componente hidrológico implica establecer un área de protección alrededor del cauce permanente de un cuerpo de agua, lo cual es esencial para la conservación del recurso hídrico y los ecosistemas acuáticos. En el caso de la fuente hídrica bajo estudio, se trata de un sistema lótico que ha experimentado modificaciones significativas en su morfología debido a la presencia de infraestructuras construidas a lo largo de su recorrido. En particular, aguas abajo, la quebrada ha sido canalizada en un tramo de aproximadamente 1 km, lo que ha alterado considerablemente la geometría del cauce y transformado su forma natural.

Como resultado final, se obtiene el mapa de delimitación del componente hidrológico, el cual debe integrarse con los otros dos componentes necesarios para definir el límite físico de la ronda hídrica: el componente geomorfológico y el ecosistémico.

3. Generalidades del proyecto

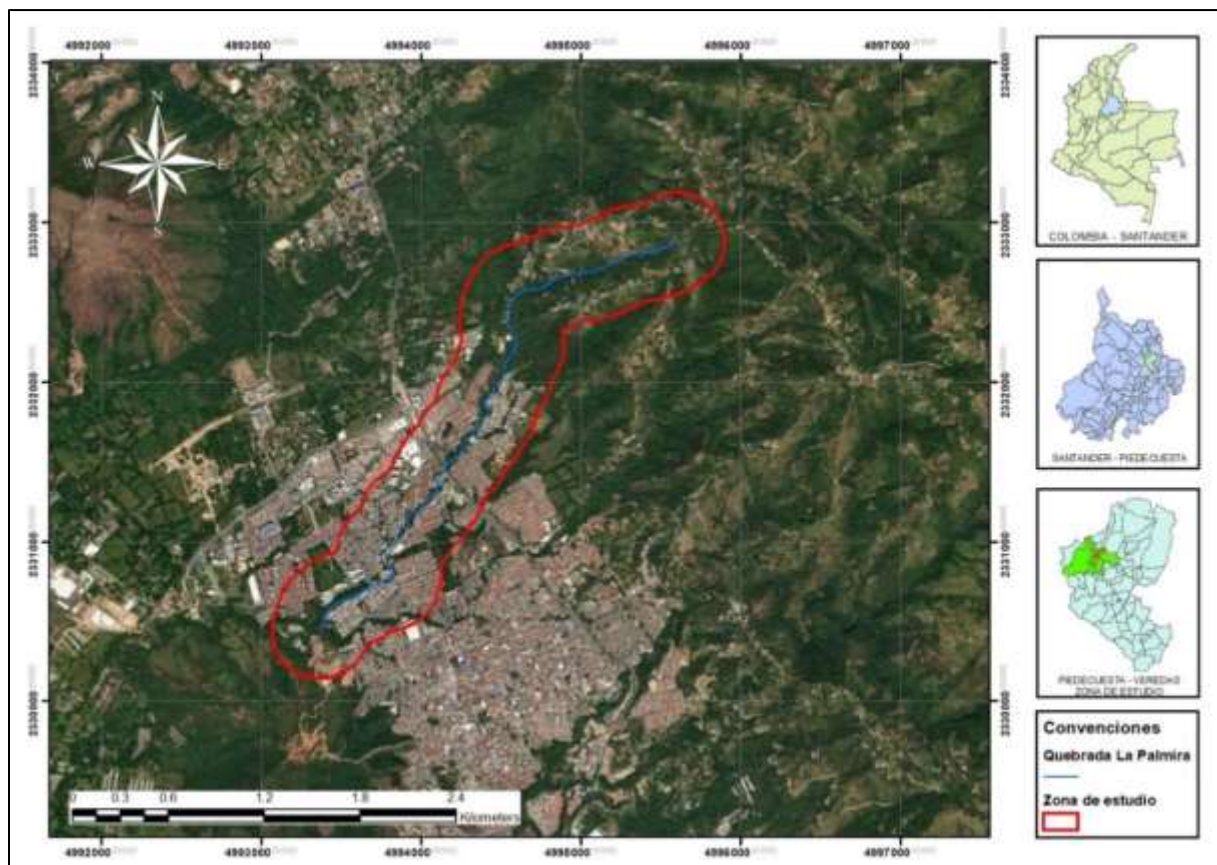
El proyecto de delimitación de la ronda hídrica de la quebrada La Palmira surge como una respuesta a un fallo judicial derivado de la Acción Popular 2018-00881-00, que evidenció la invasión de la ronda de protección de la quebrada por parte de la urbanización Palermo I en Piedecuesta, así como su contaminación por aguas negras (Prensa Jurídica, 2022). Además, se busca abordar los riesgos asociados a desbordamientos históricos, como el ocurrido en mayo de 2015, que resultó en víctimas mortales y daños materiales (Vanguardia, 2015). El proyecto tiene como objetivo establecer una delimitación técnica que garantice la protección del recurso hídrico, minimice los riesgos de inundaciones, y promueva la conservación ambiental; todo ello cumpliendo con los estándares normativos y técnicos. La delimitación no solo responde a una obligación legal, sino que también es fundamental para la sostenibilidad del ecosistema, la gestión responsable del agua y la protección de los derechos colectivos de la comunidad.

3.1 Localización

La quebrada La Palmira se encuentra ubicada en el municipio de Piedecuesta, en el departamento de Santander, Colombia, como se muestra en la Figura 9. Este cuerpo de agua cuenta con una longitud del cauce de 3.88 km, un área de 2.5 km² y una elevación media de 1219 msnm. Es afluente de la quebrada Suratoque, que vierte sus aguas al río de Oro; por lo tanto, la hoya hidrográfica de la quebrada La Palmira se consigna en la unidad hidrográfica Nivel III de la delimitación hidrográfica del río de Oro Alto, cauce que es afluente del río Lebrija Alto.

Figura 9

Localización de la quebrada La Palmira en el municipio de Piedecuesta



Nota. El mapa representa la localización exacta de la quebrada La Palmira. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

Para facilitar el análisis, la quebrada La Palmira se dividió en tres tramos. El primero corresponde a la sección aguas arriba, desde las abscisas 1400 hasta la 3650, donde el flujo cuenta con una condición natural, como se muestra en la Figura 10, y cuenta con una longitud aproximada de 2.41 km. El segundo tramo abarca la zona canalizada que abarca aproximadamente 1 km, comprendida entre las abscisas 1350 y 300, como se observa en la Figura 11. Finalmente, el tercer tramo se refiere a la sección aguas abajo, donde retorna a su condición natural, extendiéndose desde la abscisa 250 hasta la 0 con una longitud de 0.46 km, como se observa en la Figura 12.

Figura 10

Tramo uno: Aguas arriba de la quebrada La Palmira.



Nota. La figura muestra el tramo uno de la quebrada La Palmira, donde se tiene condición natural del flujo. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

Figura 11

Tramo dos: Zona canalizada de la quebrada La Palmira



Nota. La figura muestra el tramo dos de la quebrada La Palmira, donde se encuentra la canalización. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

Figura 12

Tramo tres: Aguas debajo de la quebrada La Palmira



Nota. La figura muestra el tramo tres de la quebrada La Palmira, donde el canal retorna en su condición natural nuevamente. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

3.2 Características morfométricas

Las características morfométricas, que incluyen propiedades geométricas y topográficas como forma, tamaño y pendiente, son esenciales para delimitar una ronda hídrica. Estas medidas permiten identificar las áreas que contribuyen al escurrimiento y abastecimiento de agua, lo que facilita la gestión sostenible de los recursos hídricos. También ayudan a evaluar la disponibilidad

y distribución del agua, detectar zonas vulnerables a inundaciones o sequías, y son clave para la conservación del medio ambiente. En resumen, las características morfométricas son fundamentales para comprender la dinámica hidrológica de una cuenca, evaluar su respuesta a eventos climáticos y desarrollar modelos que apoyen decisiones informadas en la gestión del agua (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

3.2.1 Área de la cuenca

El área de la cuenca hace referencia a la superficie terrestre que drena sus aguas hacia un punto específico, que en este caso hace referencia a su confluencia con la quebrada Suratoque. Esta área influye en el volumen de agua que puede fluir hacia la fuente, afectando su caudal. Una cuenca más grande generalmente puede captar más agua de precipitaciones y escorrentías, lo que puede llevar a mayores caudales en la quebrada (Ibisate González de Matauco, 2004). La cuenca de estudio presenta un área de aproximadamente 2.5 km².

3.2.2 Longitud del cauce

Es la medida de la distancia que recorre el agua desde el inicio hasta el final de la quebrada. Esta longitud afecta el tiempo que tarda el agua en llegar a diferentes puntos del cauce y puede influir en la dinámica del flujo, la erosión y la sedimentación. Un cauce más largo puede tener más zonas de acumulación de sedimentos y variaciones en la velocidad del flujo (Gaspari et al., 2013). El drenaje de interés presenta una longitud aproximada de 3.88 km.

3.2.3 Pendiente

La pendiente hace referencia a la inclinación promedio del terreno a lo largo de su curso principal. Cuanto más pronunciada sea, se tendrá un flujo más rápido, lo que puede aumentar la erosión y la capacidad de transporte de sedimentos. Por el contrario, una pendiente más suave puede permitir una mayor acumulación de sedimentos y un flujo más lento (Ibisate González de

Matauco, 2004). La pendiente entre las elevaciones máximas y mínimas de la fuente hídrica en estudio es de 0.129 [m/m].

4. Metodología

4.1 Gestión y análisis de la información hidroclimatológica para el estudio de la quebrada

La Palmira

4.1.1 Recopilación de la información hidroclimatológica

Para la elaboración del análisis hidrológico de la fuente hídrica en estudio, se hizo necesaria la recopilación de información hidroclimatológica, la cual fue obtenida a partir de estaciones climatológicas bajo la supervisión de entidades competentes, como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). El proceso incluyó la localización de estaciones dentro o cerca del área de estudio. Una vez identificadas, se realizó una revisión detallada basada en dos criterios claves: el estado operativo de la estación (activa o suspendida) y la calidad de los registros, requiriendo un mínimo de 15 años de datos con un porcentaje de faltantes inferior al 10% (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

La información recopilada de las estaciones climáticas, en especial las relacionadas con la variable de precipitación, constituyó la base para el análisis hidroclimatológico de la Quebrada La Palmira. Adicionalmente, los datos de las estaciones correspondientes a las otras variables climáticas se utilizaron para realizar una interpolación considerando un gradiente altitudinal, a lo que se le conoce como el método de regresión lineal con gradiente altitudinal. Este proceso se realizó con la ayuda del software ArcGIS y permitió generar rásteres que representan la distribución espacial de cada variable climática durante los meses con valores máximos y mínimos.

4.1.2 Análisis de la información hidroclimatológica

4.1.2.1 Delimitación de la unidad hidrográfica

Para la delimitación de la unidad hidrográfica, se utilizó como base la cartografía a escala 1:25,000 proporcionada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), descargada desde su página web. A partir de esta cartografía, se analizaron aspectos claves como las curvas de nivel, los drenajes dobles y sencillos, y la topografía general del área, identificando los puntos más altos y las curvas con mayor elevación, garantizando que todo el flujo del agua se dirigiera hacia el punto de salida. Finalmente, con la ayuda del software ArcGIS, se trazó la delimitación de la cuenca. Adicionalmente, tras realizar el levantamiento topográfico detallado en campo a escala 1:2,000, se corroboró la delimitación de la zona de estudio.

4.1.2.2 Aplicación de los polígonos de Thiessen para la distribución espacial de los datos hidroclimatológicos

Se recopilaron datos de estaciones hidrometeorológicas que cubren variables como la precipitación, brillo solar, humedad relativa y temperatura para el periodo comprendido entre 1998 y 2022. Posteriormente, se utilizaron herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), como ArcGIS, para generar los polígonos de Thiessen alrededor de cada estación, con la ayuda de la herramienta “Create Thiessen Polygons”. Estos se crean a partir del parámetro de área con mayor influencia, en función de su proximidad geográfica a la zona de estudio. Este proceso permitió identificar las estaciones consideradas para el análisis detallado.

4.1.2.3 Identificación de valores atípicos

Siguiendo la metodología de “Detección de valores atípicos basada en el Rango Intercuartílico (IQR)”, adaptada por Baker en 1994, se identificaron datos anómalos o ausentes dentro del conjunto de información analizado. Para corregir estas inconsistencias y asegurar la

continuidad de los datos, se optó por un método ampliamente utilizado en el procesamiento de series temporales: la interpolación mediante el promedio de los valores adyacentes. Este enfoque permite estimar los datos faltantes de manera sencilla y efectiva, minimizando el impacto de la ausencia de información en los análisis posteriores.

4.1.2.1 Período de retorno

Según la guía para el acotamiento de la ronda hídrica del Minambiente, para la delimitación del cauce permanente, se consideraron los eventos de crecientes ordinarias con un período de retorno de 2.33 años en zonas rurales y de 15 años en zonas urbanas. En cuanto a la definición del componente hidrológico del límite físico, se tomó en cuenta un período de retorno de 100 años para los eventos de creciente. No obstante, se evaluaron eventos con períodos de retorno más cortos, como 10, 25 y 50 años, para obtener una comprensión más completa del comportamiento del cauce en diversas condiciones de caudal. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

4.1.2.1 Tiempo de concentración

Una vez determinadas las características morfométricas del área de estudio y aplicando las ecuaciones empíricas propuestas por el (Instituto Nacional de Vías, 2009), se obtuvieron las siguientes expresiones al sustituir las ecuaciones (3), (4) y (5).

4.1.2.1.1 Ecuación de Kirpich

$$T_c = 0.06628 \left(\frac{3.88}{(0.128)^{0.5}} \right)^{0.77}$$

4.1.2.1.2 Ecuación de Témez

$$T_c = 0.30 \left(\frac{3.88}{(12.88\%)^{0.25}} \right)^{0.76}$$

4.1.2.1.3 Ecuación de Giandotti

$$Tc = \frac{4(2.5)^{0.5} + 1.50(3.88)}{0.8(3.88 * 0.128)^{0.5}}$$

4.1.2.2 Curvas IDF (Intensidad – Duración – Frecuencia)

Para la determinación de las curvas IDF se empleó la ecuación (6) del método simplificado, ajustando los coeficientes según la ubicación del proyecto en la región andina. Los valores adoptados fueron: $a = 0.94$, $b = 0.18$, $c = 0.66$ y $d = 0.83$.

A partir de los datos de precipitación disponibles, se calculó el promedio de la precipitación máxima anual en 24 horas (M) y, posteriormente, se realizó una variación en los valores del periodo de retorno (T) y la duración (t) para obtener las intensidades correspondientes a cada uno. Finalmente, se obtuvo la siguiente expresión.

$$i = \frac{0.94 \times T^{0.18} \times 94.92^{0.83}}{(t/60)^{0.66}}$$

4.1.2.3 Tormenta de diseño

Su construcción se realizó con base en las intensidades obtenidas de las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) de la estación meteorológica representativa de la cuenca hidrográfica. A partir de estas, se calcularon las curvas de masas acumuladas para diferentes duraciones (de 0 a 180 minutos) y periodos de retorno seleccionados. Estos cálculos se realizaron utilizando intervalos de tiempo congruentes con la duración efectiva de la lluvia.

Posteriormente, se derivan los incrementos de lluvia en cada intervalo, construyendo un hietograma base. Para hacer el hietograma más crítico, se aplicó el método del bloque alterno,

reorganizando los incrementos de lluvia en un patrón alternado. Como resultado se obtuvo el hietograma de diseño.

4.2 Implementación del modelo hidrológico para estimar los caudales asociados a periodos de retorno de interés

El modelo hidrológico se desarrolló utilizando dos métodos: el método racional y el método del hidrograma SCS. Aunque la cuenca presenta un área relativamente pequeña, se optó por aplicar ambos enfoques para comparar los caudales máximos obtenidos por cada uno de ellos. A continuación, se describe la metodología empleada en cada uno.

4.2.1 Método racional

Para estimar el caudal máximo de escorrentía generado por eventos de precipitación, se aplicó el método racional, representado por la ecuación (7). En este cálculo, se utilizaron las características morfométricas del área de estudio, las intensidades de precipitación previamente determinadas para los periodos de retorno de interés y el coeficiente de escorrentía, cuyos parámetros considerados para su determinación se explican a continuación.

4.2.1.1 Coeficiente de escorrentía

Siguiendo la clasificación de Ven T. Chow, y considerando que el coeficiente de escorrentía varía dependiendo de si el área está desarrollada o no, se dividió la zona de estudio en dos partes, como se muestra en la Figura 13. El área uno representa la zona no desarrollada, con una extensión de 1.425 km², mientras que el área dos corresponde a la zona desarrollada, con un tamaño de 1.121 km². Con esta información y tomando en cuenta la pendiente del terreno, se calcularon los coeficientes de escorrentía correspondientes a cada periodo de retorno.

Figura 13

Áreas desarrolladas y no desarrolladas para el cálculo del coeficiente de escorrentía



Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

4.2.2 Método de hidrograma SCS

4.2.2.1 Número Curva

Para determinar el número de curva, se tomó en cuenta la clasificación litológica de la quebrada La Palmira, basada en los *Mapas de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Santander* (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2024). A partir de esta clasificación, se categorizó cada tramo según su potencial de escorrentía, el cual depende del tipo de suelo presente.

Por otro lado, gracias a las fotografías tomadas en campo y a la ortofoto, se clasificó el tipo de cobertura presente y se asignó el número de curva a cada tramo. Finalmente, se calculó el valor ponderado del número de curva considerando el área de cada uno.

4.2.2.2 Modelo hidrológico en el software HEC-HMS

Para el cálculo de los caudales máximos, se utilizó el software HEC-HMS. Como datos de entrada, se emplearon el número de curva, el hietograma y el tiempo de rezago, este último correspondiente al 60% del tiempo de concentración (T_c) (Instituto Nacional de Vías, 2009).

Inicialmente, se creó la subcuenca y se definió el punto de salida, interconectando estos elementos. Posteriormente, se generó el administrador de datos de serie temporal, donde se ingresaron los valores de los hietogramas correspondientes a cada período de retorno. Luego, se construyó un modelo meteorológico para cada período de retorno, asegurando su conexión con el hietograma respectivo. Finalmente, se configuró el administrador de control de especificaciones, en el que se estableció el intervalo de tiempo.

Una vez cargados todos estos datos en el software, se ejecutó la simulación y se obtuvieron los caudales máximos estimados para cada período de retorno.

4.3 Implementación del modelo hidráulico para la delimitación de la ronda hídrica de la quebrada La Palmira

Con base en la información topobatimétrica recolectada en campo a escala detallada 1:2.000 y utilizando el Modelo de Elevación Digital (MDE) como insumo principal, se desarrolló un modelo hidráulico para simular el comportamiento de la mancha de inundación en los distintos períodos de retorno establecidos en la *Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia*.

A partir del MDE, el cual se cargó en *RAS Mapper*, se creó la geometría del modelo y se definieron secciones transversales cada 50 metros para garantizar un análisis detallado. Luego, se ingresaron los coeficientes de Manning correspondientes a cada tramo, aspecto que se explicará a continuación. Posteriormente, se incorporaron los datos de flujo constante, correspondientes a los caudales previamente calculados para cada período de retorno.

Finalmente, se estableció el régimen de flujo como mixto, permitiendo considerar tanto el flujo supercrítico como el subcrítico en el análisis. Una vez configurado el modelo, se ejecutó la simulación y se obtuvieron las manchas de inundación, las cuales fueron fundamentales para delimitar el cauce permanente y definir el límite físico de la ronda hídrica.

4.3.1 Coeficiente de rugosidad de Manning

Para la determinación del coeficiente de rugosidad de Manning, se tomó como referencia la clasificación de valores propuesta por Ven Te Chow y, con el fin de facilitar el análisis, la quebrada La Palmira se dividió en los tres tramos: tramo 1, tramo 2 y tramo 3.

La selección del coeficiente de Manning en cada tramo se realizó en función de las condiciones de la superficie observadas en campo, considerando factores como la vegetación, la presencia de sedimentos y la morfología del cauce. Además, se utilizaron las fotografías tomadas durante la inspección de campo para corroborar y ajustar la asignación de valores, garantizando así una representación más precisa de la rugosidad del lecho y las márgenes de la quebrada.

4.3.2 Delimitación del cauce permanente

Para llevar a cabo esta delimitación en sistemas lóticos, se asoció un caudal promedio de los máximos anuales con un período de retorno de 2.33 años para las zonas rurales y de 15 años para las zonas urbanas, según lo establecido en la Guía. Este proceso requirió un análisis utilizando el software HEC-RAS para simular inundaciones y determinar las áreas afectadas. Finalmente, se

identificaron y delimitaron las áreas susceptibles a inundaciones, estableciendo el cauce permanente y las zonas adyacentes que debían ser protegidas. Como resultado, se obtuvo el mapa definitivo del cauce permanente de la quebrada La Palmira.

4.3.3 Delimitación del componente hidrológico para definición del límite físico

Para definir el límite físico de este sistema fluvial, fue fundamental considerar un período de retorno de al menos 100 años, lo que permitió evaluar con precisión las variaciones del flujo y los posibles eventos de inundación. Por ello, en la definición del componente hidrológico se tomó en cuenta la mancha de inundación obtenida para dicho período de retorno. Esta información se debe integrar con los componentes geomorfológicos y ecosistémicos para delimitar la ronda hídrica de manera integral.

Adicionalmente, se realizó una inspección detallada de las secciones transversales correspondientes a cada uno de los tramos en los que se dividió la quebrada, con el objetivo de evaluar los riesgos reales de inundación y analizar los niveles obtenidos en la modelación.

5. Resultados

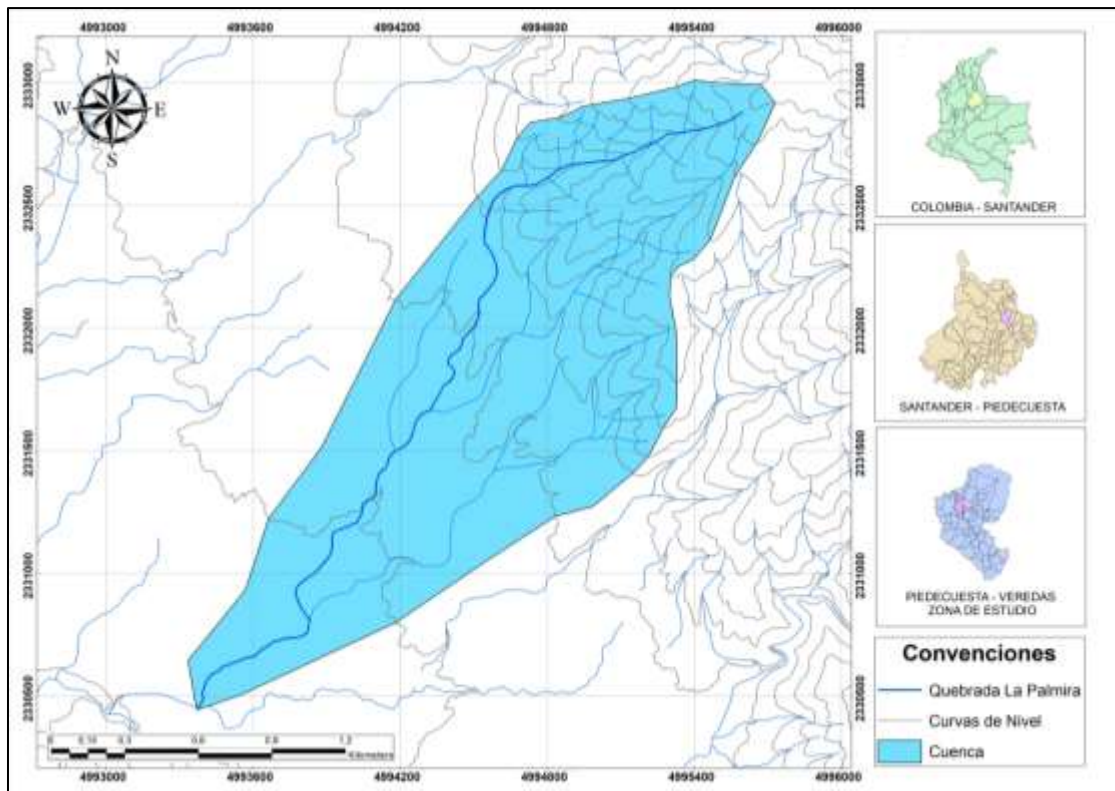
5.1 Gestión y análisis de la información hidroclimatológica

5.1.1 Delimitación de la unidad hidrográfica

Utilizando la información proporcionada por el IGAC y los datos obtenidos del levantamiento topobatemétrico, se generó el mapa que se muestra en la Figura 14, mediante el software ArcGIS. Como resultado, se obtuvo un área de la cuenca de 2.5 km², una longitud de drenaje de 3.88 km y una pendiente de 0.129 (m/m).

Figura 14

Delimitación de la cuenca hidrográfica



Nota. Este mapa se generó con el software ArcGIS y se obtuvo un área de la cuenca de 2.5 km².

Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

5.1.1 Recopilación de la información hidroclimatológica

5.1.1.1 Estaciones de interés para cada variable climática

Con base en la información de las estaciones proporcionada por el IDEAM y la cuenca delimitada, se identificaron las estaciones correspondientes a cada variable climática, considerando los datos registrados entre 1998 y 2023. A continuación, se presentan las estaciones en las siguientes tablas: Tabla 1. Precipitación, Tabla 2. Temperatura, Tabla 3. Brillo solar y Tabla 4. Humedad relativa.

Tabla 1

Estaciones de interés para análisis de precipitación

| Nombre de Estación | Tipo | Latitud | Longitud | Altura | Código |
|---------------------|---------------|---------|----------|--------|----------|
| PIEDRECUESTA GRANJA | Pluviográfica | 6,993 | -73,068 | 951 | 23190700 |
| GALVICIA LA | Pluviométrica | 7,124 | -73,057 | 1779 | 23190400 |
| TOPE EL | Pluviométrica | 6,940 | -72,932 | 250 | 24030330 |
| PICACHO EL | Pluviométrica | 7.11 | -72,966 | 3310 | 23190300 |

Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

Tabla 2

Estaciones de interés para análisis de temperatura

| Nombre de Estación | Tipo | Latitud | Longitud | Altura | Código |
|----------------------|------------------------|---------|----------|--------|----------|
| AEROPUERTO PALONEGRO | Sinóptica Principal | 7,121 | -73,185 | 1189 | 23195502 |
| BERLIN | Climática Principal | 7,187 | -72,869 | 3214 | 37015020 |
| LLANO GRANDE – AUT | Climática Ordinaria | 7,026 | -73,167 | 777 | 23195110 |

Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

Tabla 3*Estaciones de interés para análisis de brillo solar*

| Nombre de Estación | Tipo | Latitud | Longitud | Altura | Código |
|---------------------------|---------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|
| ABREGO CENTRO | Climática Principal | 8,087 | -73,223 | 1430 | 16055040 |
| ADMO | Climática Principal | 7,187 | -72,869 | 3214 | 37015020 |
| BERLIN | Climática Principal | 7,775 | -72,831 | 860 | 16025030 |
| SALAZAR | Climática Principal | 7,456 | -73,537 | 328 | 23185010 |

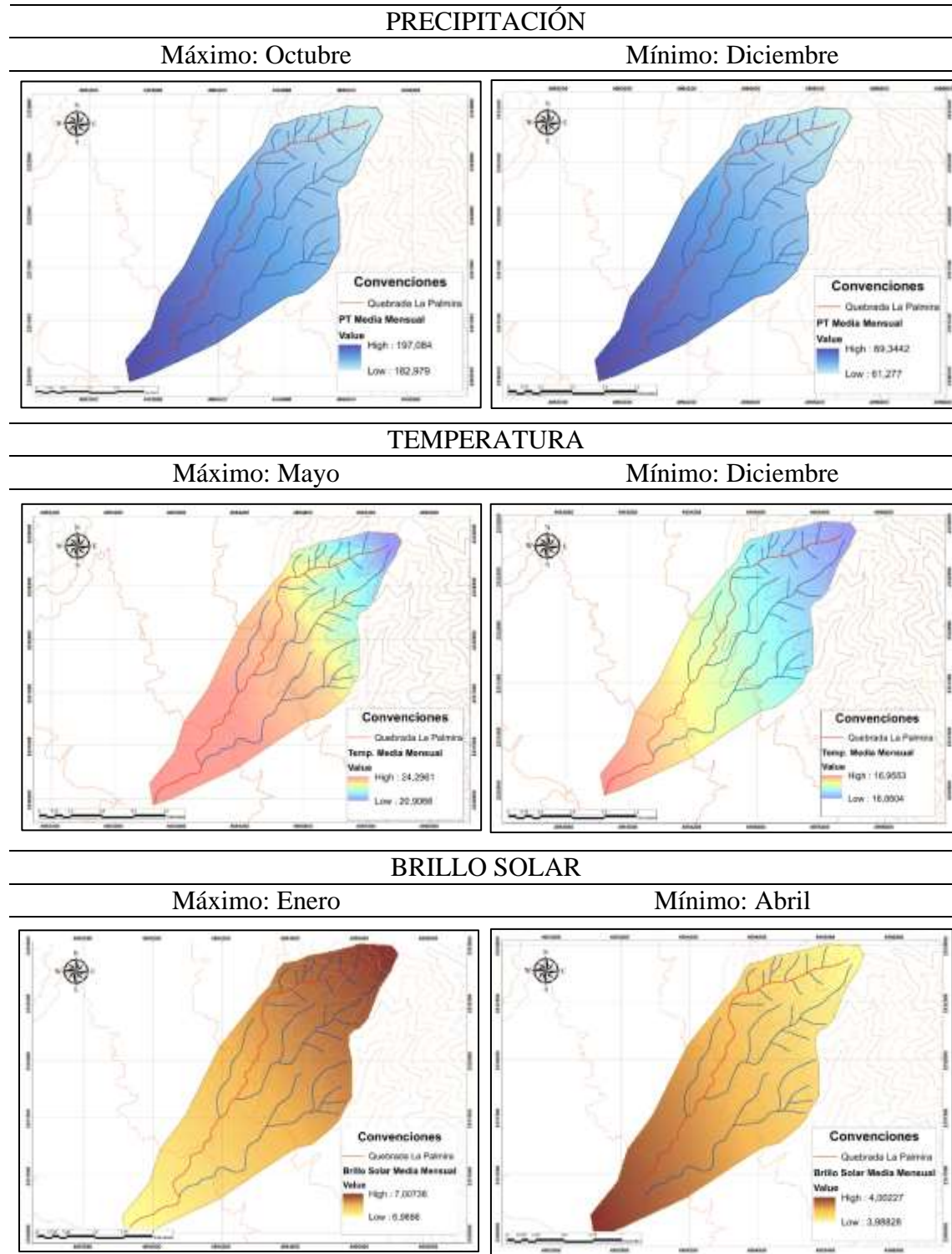
Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

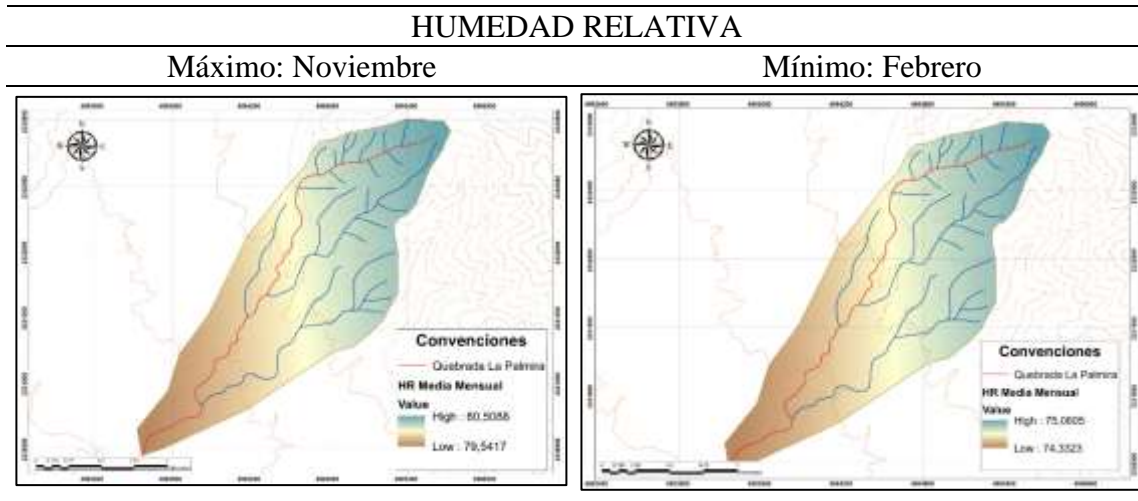
Tabla 4*Estaciones de interés para análisis de humedad relativa*

| Nombre de Estación | Tipo | Latitud | Longitud | Altura | Código |
|---------------------------|---------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|
| AEROPUERTO | Sinóptica | 7,121 | -73,185 | 1189 | 23195502 |
| PALONEGRO | Principal | | | | |
| BERLIN | Climática Principal | 7,187 | -72,869 | 3214 | 37015020 |
| LLANO GRANDE - AUT | Climática Ordinaria | 7,026 | -73,167 | 777 | 23195110 |

Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

Las estaciones de precipitación constituyeron la base del análisis hidroclimatológico, y a partir de la información proporcionada por las demás variables, se generaron rásteres de cada una durante los meses, con valores máximos y mínimos, como se detalla en la Figura 15. Este análisis facilitó la visualización y comprensión de las tendencias climáticas a lo largo del año y su impacto en la disponibilidad de agua en la cuenca.

Figura 15*Rásteres de distribución espacial de cada variable climática*



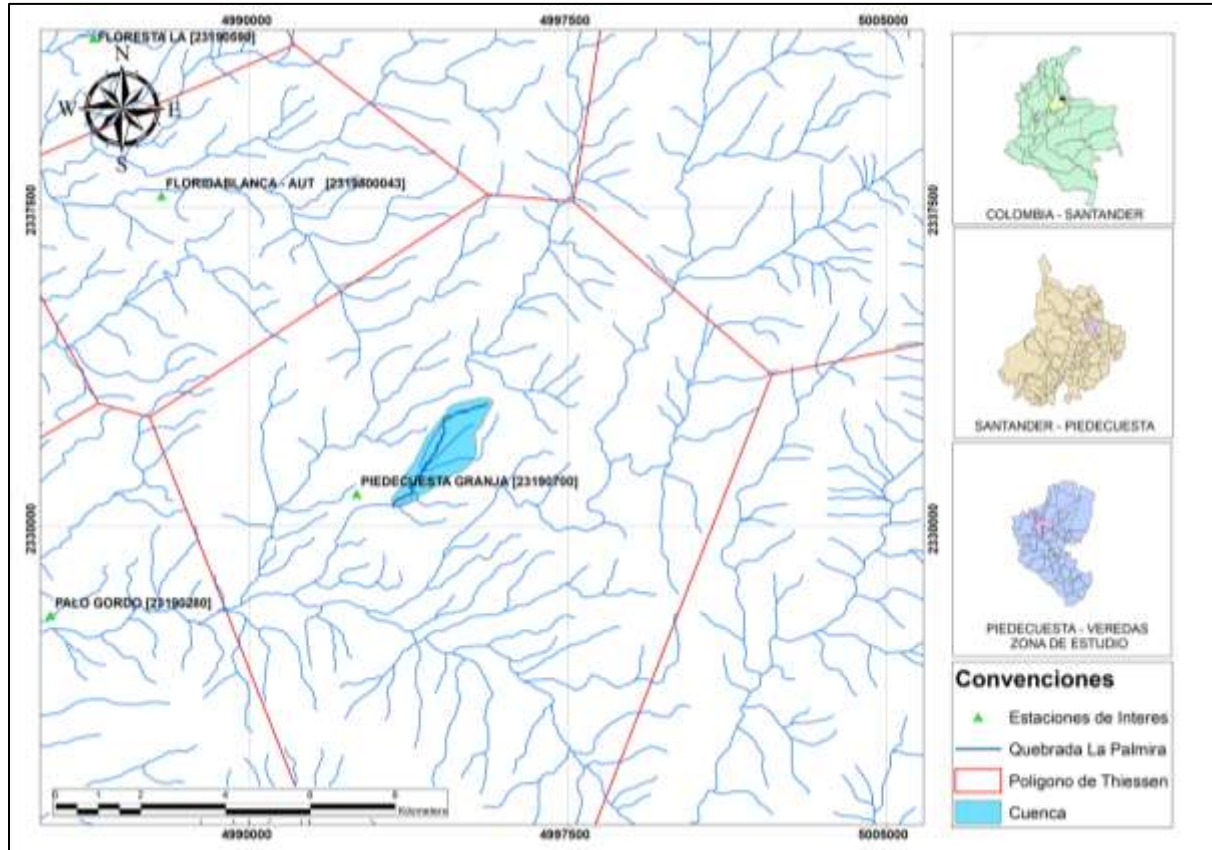
Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

5.1.1.2 Polígonos de Thiessen con la distribución espacial de las estaciones de precipitación de interés

A partir de la Figura 16, se observa que, debido al amplio distanciamiento de entre las estaciones de precipitación y el tamaño reducido de la cuenca, la estación “PIEDECUESTA GRANJA [23190700]” es la que tiene mayor influencia sobre el área de estudio. Por esta razón, se consideró únicamente la información hidroclimatológica de esta estación.

Figura 16

Polígonos de Thiessen estaciones de precipitación



Nota. Se realizó con el software ArcGIS, con la ayuda de la herramienta “Create Thiessen Polygons”. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

5.1.2 Análisis de la información de precipitación

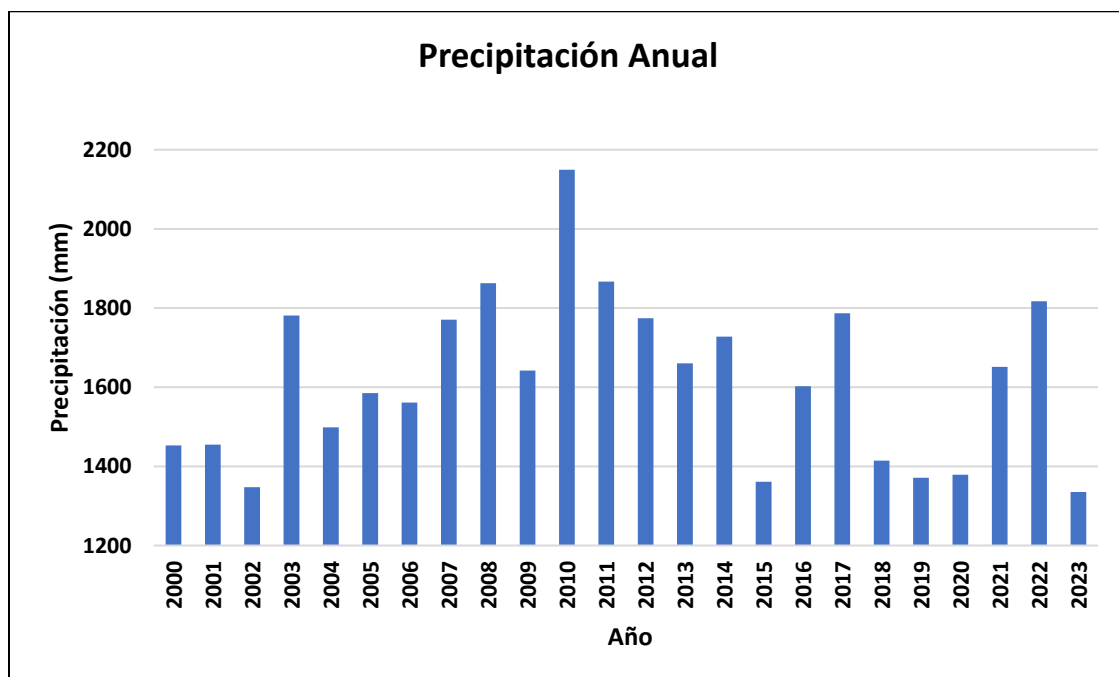
Con base en la información proporcionada por la estación con mayor influencia identificada previamente mediante los polígonos de Thiessen, se obtuvo un registro diario de datos de precipitación desde el año 2000 hasta el año 2023. Estos datos fueron organizados utilizando la función de tabla dinámica en Excel. A partir de esta serie de datos temporal, se realizó un análisis de precipitación para observar su variación a lo largo del tiempo.

5.1.2.1 Precipitación anual

En la Figura 17 se presentan los valores registrados a lo largo de los diferentes años y permite observar de manera más clara la variación de la precipitación a lo largo del tiempo. Según el análisis, el año con mayor precipitación fue 2010, con un total de 2149.6 [mm].

Figura 17

Gráfica de precipitación anual de la estación Piedecuesta Granja



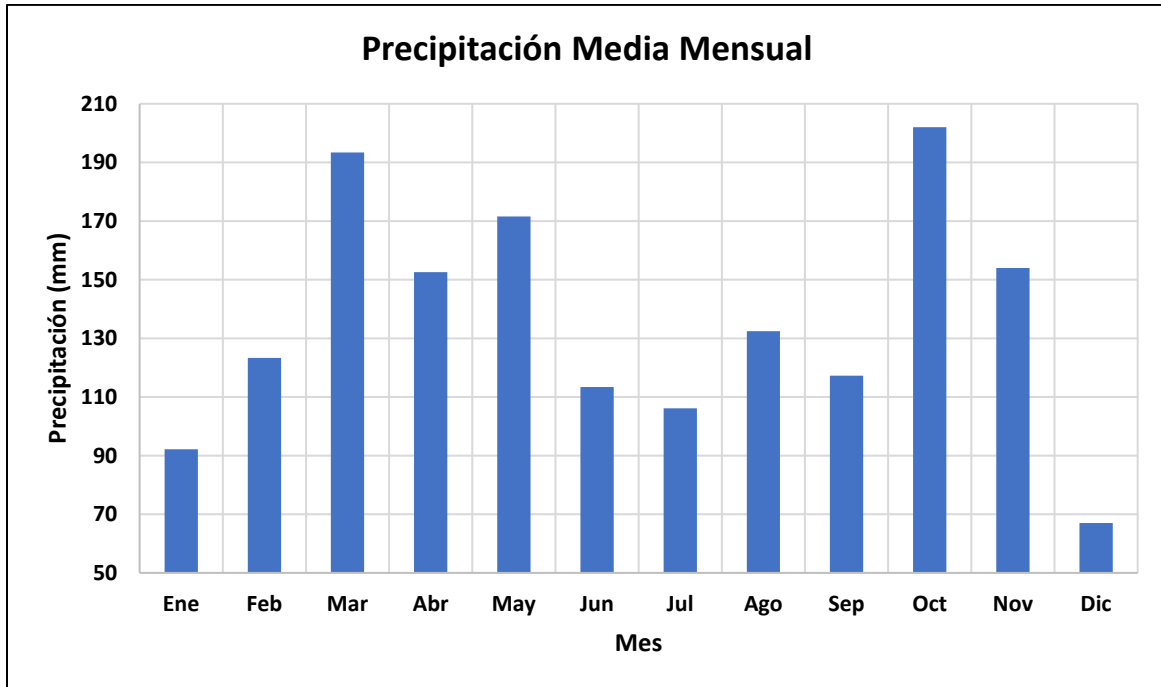
Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

5.1.2.2 Precipitación media mensual

Con base en la Figura 18, se identifican los valores medios de precipitación de cada mes, destacando que los meses de marzo y octubre presentan los mayores valores. Donde en estos meses se visualizan claramente los picos más altos. Este análisis permite identificar patrones climáticos, señalando los meses con mayor precipitación y aquellos en condiciones más secas.

Figura 18

Gráfica de precipitación media mensual de la estación Piedecuesta Granja



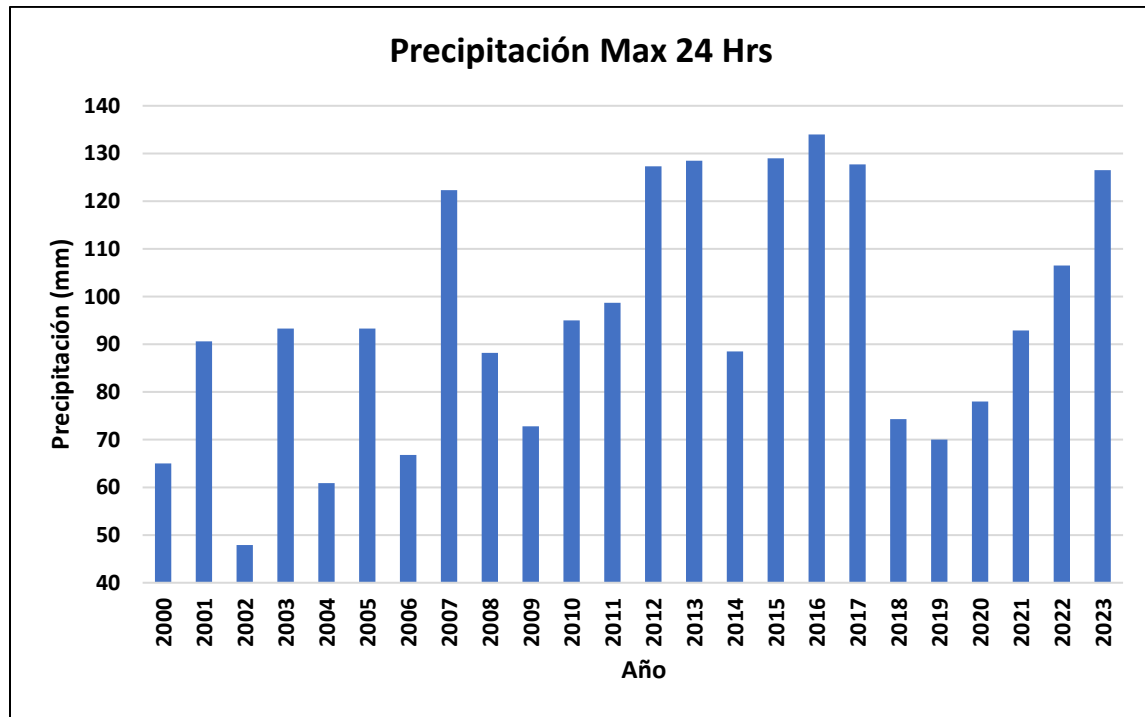
Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

5.1.2.3 Precipitación máxima 24 horas anual

Tras realizar el análisis, los resultados obtenidos se presentan en la Figura 19, donde se observa que la precipitación máxima en 24 horas tuvo un valor de 134 [mm], registrada en el año 2016. Estos datos de precipitación son la base de la construcción de las curvas IDF y los hietogramas.

Figura 19

Gráfica de precipitación máxima 24 horas anual de la estación Piedecuesta Granja



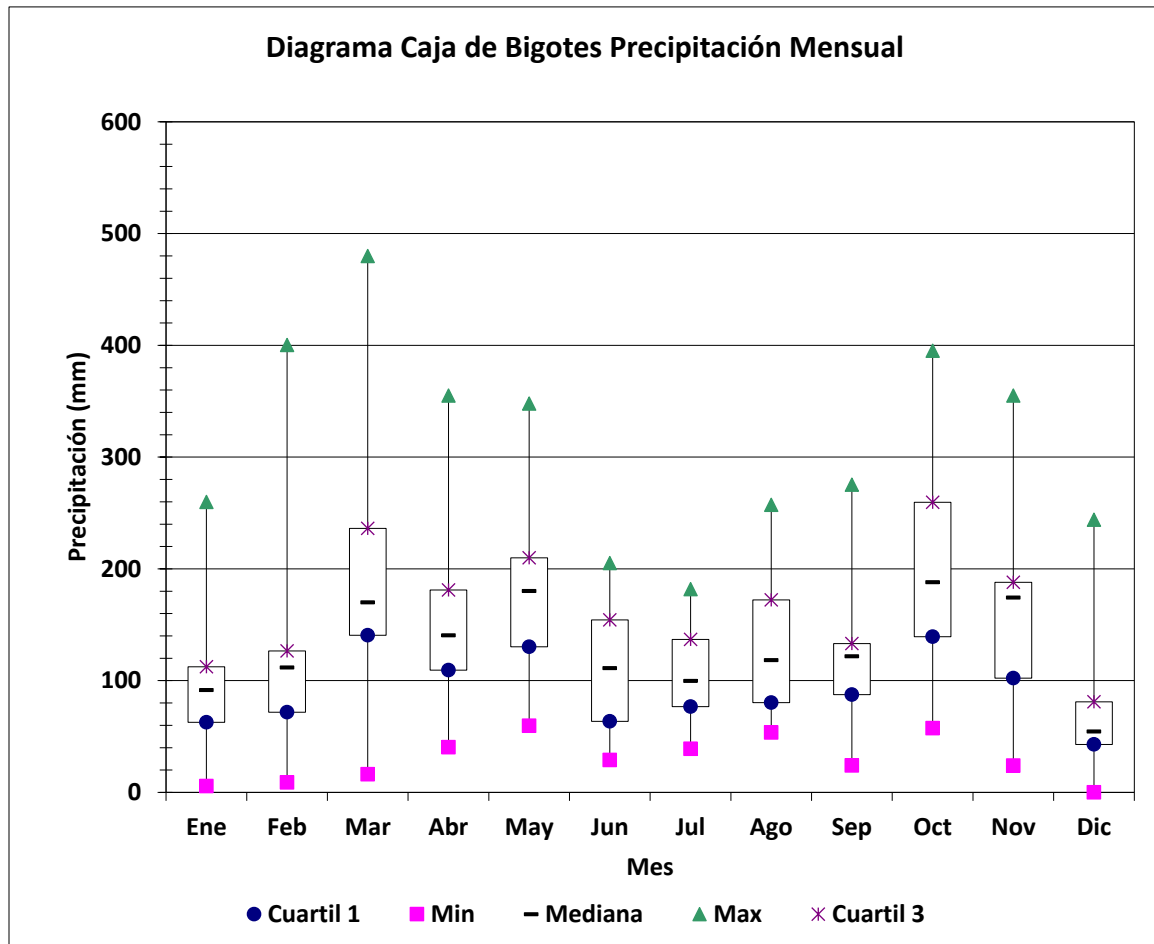
Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

5.1.2.4 Identificación de valores atípicos

Para la construcción del diagrama de bigotes de precipitación mensual, mostrado en la Figura 20, se utilizaron los datos estadísticos de la precipitación obtenidos con la ayuda de las herramientas de Excel. Al analizar estos resultados se observó que la mayoría de los datos están dentro de un rango esperado; sin embargo, en los meses de marzo y octubre se presentan precipitaciones máximas considerablemente más altas en comparación con otros meses, lo cual genera una mayor dispersión en los datos.

Figura 20

Caja de bigotes de la estación “PIEDRECUESTA GRANJA [23190700]”.



Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

5.1.2.1 Tiempo de concentración

En la Tabla 5, se presentan los valores del tiempo de concentración obtenidos mediante las diferentes ecuaciones propuestas por el INVIAS. Para el cálculo de los caudales máximos, se empleó el tiempo de concentración obtenido a través de la ecuación de Giandotti, con un valor de 40.91 minutos. Esta selección se realizó debido a que es la ecuación que tiene en cuenta más variables o factores, siendo el lado más conservador.

Tabla 5*Tiempos de concentración*

| Datos de entrada | | Ecuación de Kirpich | |
|-------------------------|--------|------------------------------|-------|
| Área [Km ²] | 2,5 | Tc [Minutos] | 24,86 |
| Longitud [Km] | 3,88 | Ecuación de Témez | |
| Cota Mayor [m] | 1500 | Tc [Minutos] | 31,04 |
| Cota Menor [m] | 1000 | Ecuación de Giandotti | |
| Pendiente [m/m] | 0,1289 | Tc [Minutos] | 40,91 |

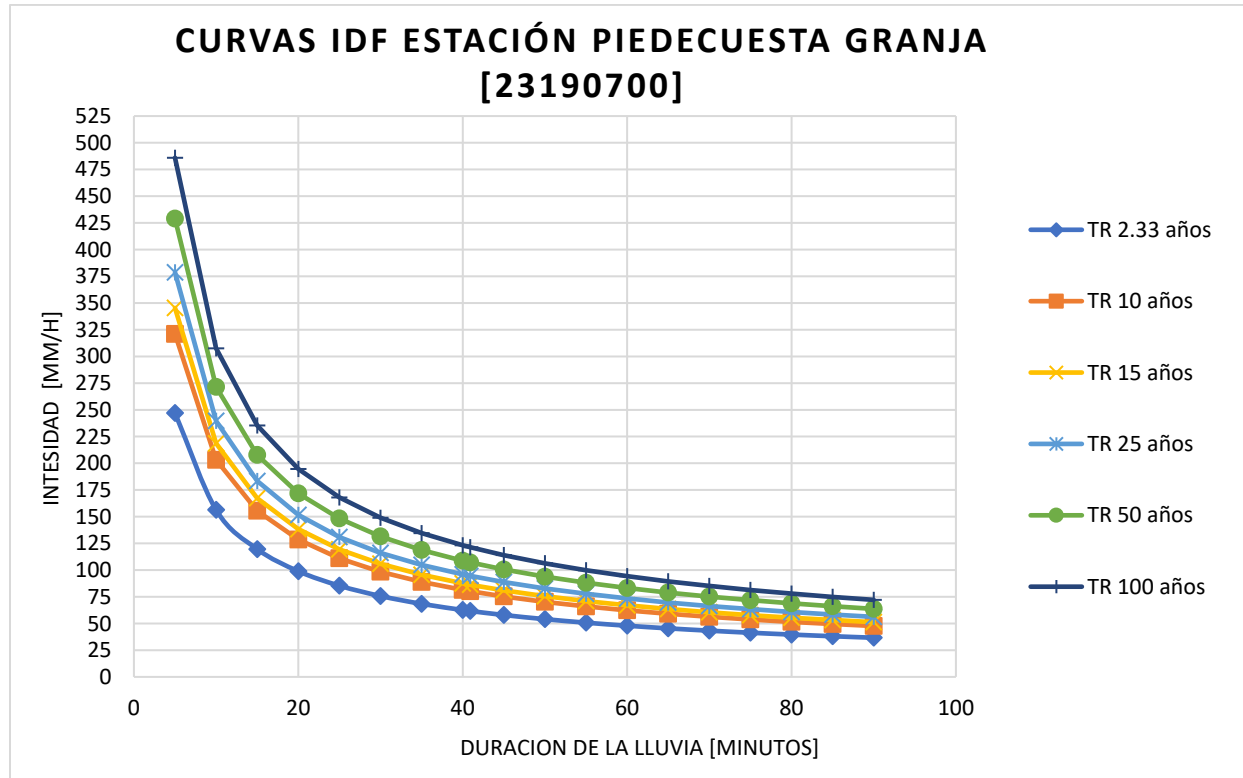
Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

5.1.2.2 Curvas IDF (Intensidad – Duración - Frecuencia)

Con el análisis de precipitación realizado previamente, se generaron las Curvas IDF para los diferentes periodos de interés. A partir de la Figura 21, se puede observar que las lluvias tienden a ser más intensas cuando su duración es corta, es decir, en intervalos de 5 a 10 min. Este patrón se repite para cada uno de los períodos de retorno. Sin embargo, se destaca que los eventos con un periodo de retorno más largo, aunque menos probables, son más intensos.

Figura 21

Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF)



Nota. Se realizaron las curvas para cada periodo de retorno de interés. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

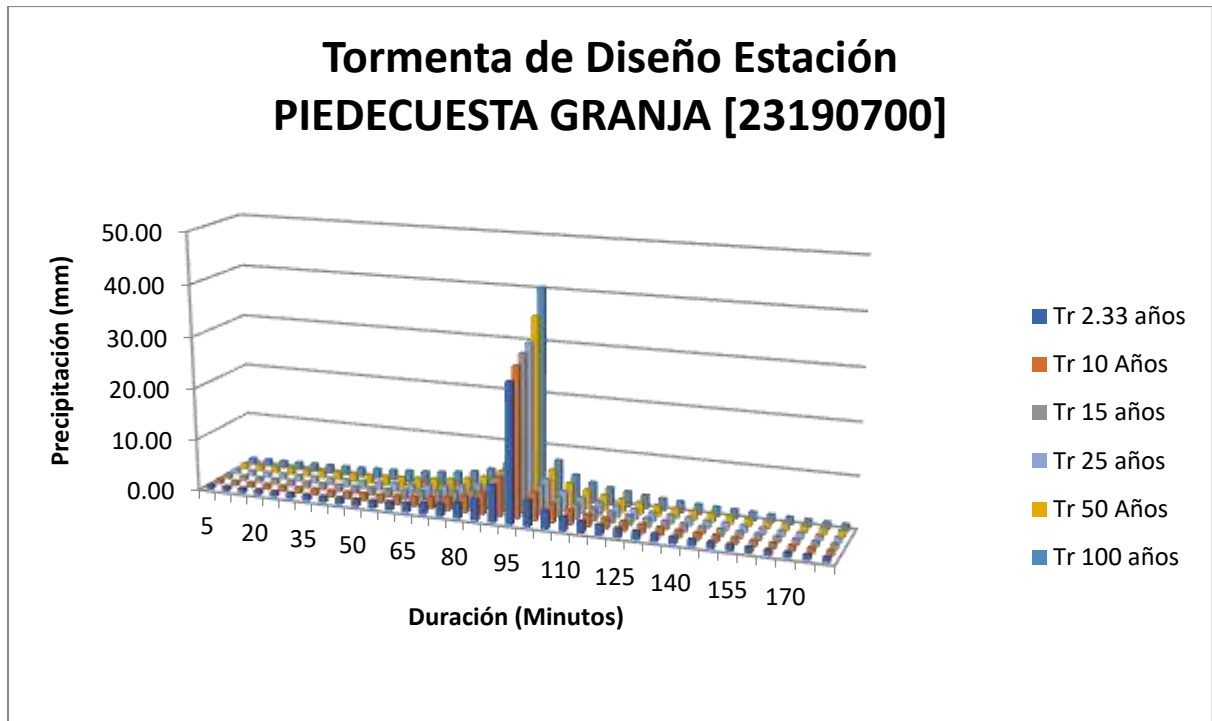
5.1.2.3 Tormenta de diseño

El hietograma representa la distribución temporal de la precipitación durante un evento específico de lluvia. En la Figura 22, se observa un aumento gradual en la precipitación entre los 0 y 85 minutos, seguido por un pico máximo entre los 90 y 95 minutos, indicando el momento de mayor intensidad de la tormenta. Tras este pico, disminuye la precipitación gradualmente hasta alcanzar valores cercanos al cero. Esta distribución sugiere que el evento de lluvia tiene una duración moderada con un pico concentrado en un periodo corto, lo cual genera un control sobre

la escorrentía, evitando una sobrecarga en el sistema de drenaje y, por ende, desbordamientos de la quebrada La Palmira.

Figura 22

Tormenta de diseño o hietograma



Nota. Se realizaron los hietogramas para cada periodo de retorno de interés. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

5.2 Cálculo de caudales máximos por medio del modelo hidrológico

La estimación de los caudales máximos correspondientes a los periodos de retorno de interés hallados por los dos métodos, presentó diferencias mínimas entre ellos, como se muestra a continuación.

5.2.1 Método racional

Para aplicar este método, fue indispensable contar con los valores de área de la cuenca, los coeficientes de escorrentía (C) y las intensidades correspondientes a cada periodo de retorno a

evaluar, teniendo en cuenta el tiempo de concentración calculado. A continuación, se presentan los resultados obtenidos del coeficiente de escorrentía y, finalmente, los caudales estimados para cada periodo de retorno de interés.

5.2.1.1 Coeficiente de escorrentía

Para hallar el coeficiente de escorrentía, se consideraron las características de la superficie, utilizando la ortofoto suministrada por el equipo que realizó el levantamiento topográfico, así como la Figura 23 y Figura 24, que incluyen fotografías tomadas durante una salida de campo realizada con la empresa IBG Ingeniería. Estas herramientas permitieron una mayor precisión en la identificación de tipos de superficie.

En el área uno, tramo aguas arriba, el área no desarrollada está en su mayoría cubierta por bosque, con una ligera pendiente. Basándose en esas características, se opta por escoger un coeficiente de escorrentía igual a 0.31 para el periodo de retorno de 2.33 años. Por otro lado, para el área dos, el tramo aguas abajo tiene un área desarrollada que incluye barrios con presencia de zonas verdes significativas, por lo que se consideró una condición promedio de presencia de estas, con una ligera pendiente, teniendo como resultado un coeficiente de escorrentía igual a 0.37 para un periodo de retorno de 2.33 años.

La Tabla 6 presenta los resultados correspondientes a cada periodo de retorno, incluyendo el coeficiente de escorrentía ponderado que se utilizará para calcular los caudales. Para realizar la ponderación, se consideraron las áreas de cada tramo.

Figura 23

Fotografía de la quebrada La Palmira aguas arriba



Nota. Se observa zona boscosa aguas arriba. Fuente propia.

Figura 24

Fotografía de la quebrada La Palmira aguas abajo



Nota. Se observa presencia de estructuras hidráulicas (canalización) y zona urbana alrededor.

Fuente propia.

Tabla 6*Coefficientes de escorrentía correspondientes a cada periodo de retorno*

| Periodo de retorno (Tr) | Intensidades [mm/h] | C de Área 1 (Vegetación) | C de Área 2 (Urbanizada) | Coef. De escorrentía ponderada |
|-------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| 2.33 | 61.69 | 0.31 | 0.37 | 0.34 |
| 10 | 80.19 | 0.36 | 0.43 | 0.39 |
| 15 | 86.26 | 0.37 | 0.44 | 0.40 |
| 25 | 94.56 | 0.40 | 0.46 | 0.43 |
| 50 | 107.13 | 0.43 | 0.49 | 0.46 |
| 100 | 121.37 | 0.47 | 0.53 | 0.50 |
| 500 | 162.15 | 0.56 | 0.61 | 0.58 |

Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

5.2.1.2 Caudales máximos calculados por el método racional

Finalmente, se presenta la Tabla 7, que muestra los caudales máximos obtenidos correspondientes a cada periodo de retorno de interés. Al analizar estos resultados, se observa una coherencia lógica, ya que, a medida que aumenta el periodo de retorno, se predice un caudal mayor. Esto se debe a que los eventos de precipitación asociados a periodos de retorno más largo son más intensos, lo que provoca un aumento en el volumen del agua. Este comportamiento es consistente con el principio de que las lluvias más extremas son menos frecuentes, pero van a tener una mayor magnitud.

Tabla 7*Caudales máximos calculados por el método racional*

| Periodo de retorno [Años] | Qmax [m³/s] |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| 2.33 | 14.84 |
| 10 | 22.19 |
| 15 | 24.60 |
| 25 | 28.55 |
| 50 | 34.62 |
| 100 | 42.66 |

Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

5.2.1 Método de hidrograma SCS

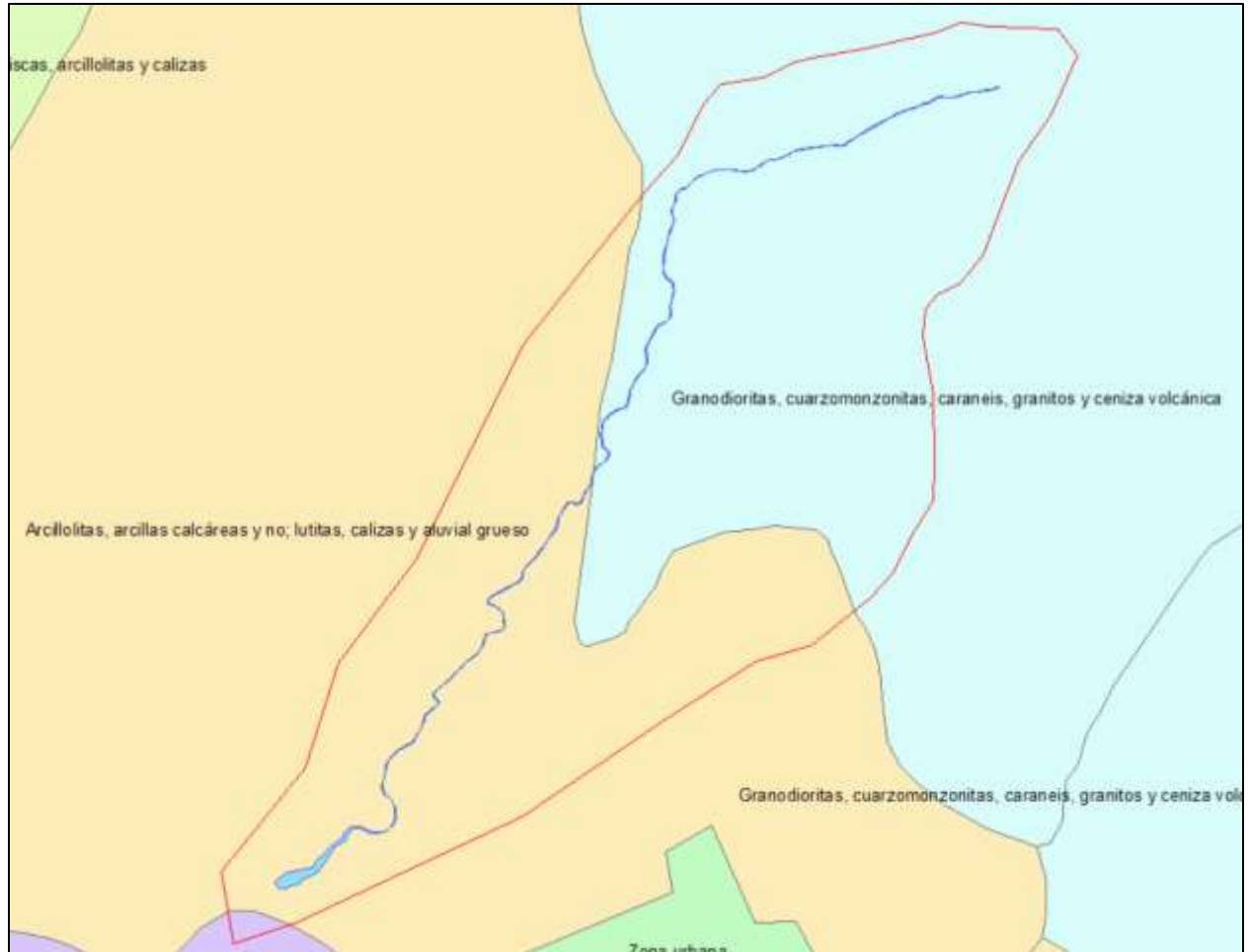
5.2.1.1 Número Curva

La Figura 25 muestra la clasificación del suelo según los mapas establecidos por el IGAC, información fundamental para la asignación del número curva.

De acuerdo a las Figura 26 y Figura 27, en el área uno, predominan las granodioritas y cuarzomonzonitas, con pendientes mayores al 50%, clasificándose como suelos tipo B (moderadamente bajo potencial de escorrentía) debido a su buen drenaje. En el área dos, los suelos están compuestos por arcillolitas y arcillas calcáreas con pendientes entre el 3 % y el 12 %. Este tramo se clasifica como C (moderadamente alto potencial de escorrentía), ya que, aunque los suelos tienen alta capacidad de retención de agua, su infiltración es lenta debido a su baja permeabilidad y textura fina.

Figura 25

Identificación del tipo de suelo según el IGAC



Nota. La figura muestra que la cuenca hidrográfica cuenta con dos diferentes litologías. Tomado del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2024.

Figura 26

Clasificación litológica del tramo aguas arriba de la Quebrada La Palmira

| Ubicación: 4,995,658.069 2,331,651.201 Metros | |
|---|--|
| Campo | Valor |
| FID | 752 |
| Shape | Polígono |
| UCS | MQB |
| UCS_F | MQBf2 |
| PAISAJE | Montaña |
| CLIMA | Medio, húmedo y muy húmedo |
| TIPO_RELIE | Filas y vigas |
| LITOLOGÍA | Granodioritas, cuarzomonzonitas, caraneis, granitos y ceniza volcánica |
| CARACTERÍ | Relieve moderado a fuertemente escarpado con pendientes mayores del 50%; moderadamente profundos |
| COMPONENTE | Grupo indiferenciado: Typic Troporthents; Oxic Dystrupepts |
| PERFIL | PS-342, PS-345 |
| PORCENTAJE | 40, 30 |
| ÁREA_ha | 6184.427098 |
| SHAPE_Leng | 75889.412643 |
| SHAPE_Area | 61844270.9811 |

Nota. La figura muestra las características del tramo aguas arriba de la quebrada La Palmira.

Tomado del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2024.

Figura 27

Clasificación litológica del tramo aguas abajo de la Quebrada La Palmira

| Ubicación: 4,994,904.005 2,330,856.126 Metros | |
|---|---|
| Campo | Valor |
| FID | 800 |
| Shape | Polígono |
| UCS | LWD |
| UCS_F | LWDb |
| PAISAJE | Lomerío |
| CLIMA | Cálido, seco |
| TIPO_RELIE | Glacis |
| LITOLOGÍA | Arcillitas, arcillas calcáreas y no; lutitas, calizas y aluvial grueso |
| CARACTERÍ | Relieve ligera a moderadamente inclinado con pendientes 3-7-12%; profundos y moderadamente profundo |
| COMPONENTE | Asociación: Typic Ustrospepts; Typic Ustfluvents; Fluventic Haplustolls |
| PERFIL | PS-364, PS-101, PS-140 |
| PORCENTAJE | 40, 35, 20 |
| ÁREA_ha | 3014.632802 |
| SHAPE_Leng | 56444.924348 |
| SHAPE_Area | 30146328.0199 |

Nota. La figura muestra las características del tramo aguas abajo de la quebrada La Palmira.

Tomado del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2024.

Con base al tipo de cobertura y las áreas de cada tramo, se determinaron los números de curva correspondiente, obteniendo un número de curva ponderado con valor de 74.245, como se muestra en la Tabla 8. Este valor fue esencial para el desarrollo del modelo hidrológico en el software HEC-HMS, utilizado para calcular los caudales mediante el método del hidrograma SCS.

Tabla 8

Número Curva ponderado (CN)

| Tramo | Longitud [Km] | Área [Km²] | CN | CN*A | CN Ponderado |
|--------------|--------------------------|----------------------------------|-----------|----------------|-------------------------|
| Área uno | 2.41 | 1.42 | 65 | 92.67 | |
| Área dos | 1.46 | 1.12 | 86 | 96.43 | |
| TOTAL | 3.88 | 2.5 | | 189.114 | 74.245 |

Nota. Autoría propia

5.2.1.2 Caudales máximos calculados por el método del hidrograma SCS

Dado que la cuenca no presenta un área mayor a los 2.5 km², no fue necesario dividirla en subcuencas, permitiendo obtener una única escorrentía total. Tras ingresar la información en el software HEC-HMS, se calcularon los caudales pico correspondientes a cada periodo de retorno, cuyos resultados se arrojaron como se muestra en la Figura 28 para cada periodo de retorno. Finalmente, se sintetizaron y se organizaron en la Tabla 9.

Figura 28

Caudal pico para el periodo pico de 2.33 años obtenido del software HEC-HMS

Global Summary Results for Run "TR002"

Project: Q. Palmira Simulation Run: TR002

Start of Run: 01ene.2000, 00:00 Basin Model: Basin 1
 End of Run: 01ene.2000, 06:00 Meteorologic Model: Met TR02.33
 Compute Time: 17ene.2025, 15:15:57 Control Specifications: Control 1

Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Watershed Explorer

| Hydrologic Element | Drainage Area (KM2) | Peak Discharge (M3/S) | Time of Peak | Volume (MM) |
|--------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|-------------|
| Subcuenca_1 | 2,5 | 11,2 | 1 January 2000, 02:... | 19,29 |
| Salida | 2,5 | 11,2 | 1 January 2000, 02:... | 19,29 |

Nota. Se observan los resultados obtenidos para un Tr de 2.33 años sobre un área de drenaje de 2.5 Km². Fuente propia.

Tabla 9

Caudales máximos calculados por el método del hidrograma SCS con la ayuda del software HEC-HMS

| Periodo de retorno [Años] | Qmax [m ³ /s] |
|---------------------------|--------------------------|
| 2.33 | 11.2 |
| 10 | 20.2 |
| 15 | 23.4 |
| 25 | 28.0 |
| 50 | 35.2 |
| 100 | 43.7 |

Nota. Fuente propia.

Al comparar los caudales máximos obtenidos mediante el método racional y el método del hidrograma SCS, como se muestra en la Tabla 10, se observa una similitud. Aunque las diferencias son más evidentes en los periodos de retorno más cortos, estas disminuyen progresivamente, volviéndose menos significativas en periodos más largos. Dado que el área de la cuenca no supera los 2.5 km², se optó por utilizar los caudales calculados con el método racional para la modelación hidráulica.

Tabla 10

Cuadro comparativo de los caudales máximos obtenidos por los dos métodos propuestos

| Periodo de retorno [Años] | Método hidrograma SCS Qmax [m³/s] | Método racional Qmax [m³/s] |
|----------------------------------|---|---|
| 2.33 | 11.2 | 14.84 |
| 10 | 20.2 | 22.19 |
| 15 | 23.4 | 24.6 |
| 25 | 28 | 28.55 |
| 50 | 35.2 | 34.62 |
| 100 | 43.7 | 42.66 |

Nota. Fuente propia.

5.3 Modelación hidráulica

5.3.1 Coeficiente de rugosidad de Manning

Para el cálculo del coeficiente de rugosidad de Manning, se dividió la longitud total de la quebrada en los tres tramos que se mencionaron en el ítem 3.1, como se muestra en la Figura 29.

Figura 29

Fotografías de los tres tramos en los que se subdividió la quebrada La Palmira para determinar el coeficiente de rugosidad de Manning



Nota. Fuente propia.

Con base en el registro fotográfico obtenido durante la salida técnica realizada con la empresa IBG Ingeniería y en concordancia con la clasificación de los coeficientes de Manning, se determinaron los valores para cada uno de los tramos que se presentan en la Tabla 11. Estos coeficientes se ingresaron como datos de entrada en el software HEC-RAS para llevar a cabo el modelamiento hidráulico de la quebrada La Palmira.

Tabla 11

Valores de los coeficientes de rugosidad de Manning para cada tramo de la quebrada La

Palmira

| Condiciones del canal | Tramo 1 | | | | Tramo 2 | Tramo 3 | | | |
|---|---------------|-------|---------------|-------|--|--------------|-------|--------------|-------|
| | Márgenes | | Lecho | | | Márgenes | | Lecho | |
| Material | Arenoso | 0.023 | Roca | 0.025 | Tramo canalizado, el cual está hecho de concreto | Arenoso | 0.023 | Grava gruesa | 0.028 |
| Grado de irregularidad | Moderado | 0.010 | Moderado | 0.01 | | Moderado | 0.01 | Menor | 0.005 |
| Variaciones en la sección transversal del canal | Muy frecuente | 0.015 | Muy frecuente | 0.015 | | Frecuente | 0.01 | Frecuente | 0.01 |
| Efecto relativo de obstáculos | Apreciable | 0.025 | Apreciable | 0.025 | | Apreciable | 0.025 | Apreciable | 0.025 |
| Vegetación | Alta | 0.037 | Baja | 0.007 | | Alta | 0.037 | Nula | 0 |
| Grado de sinuosidad | Apreciable | 1.15 | Apreciable | 1.15 | | Apreciable | 1.15 | Apreciable | 1.15 |
| Valor n | 0.127 | | 0.094 | | 0.014 | 0.121 | | 0.078 | |

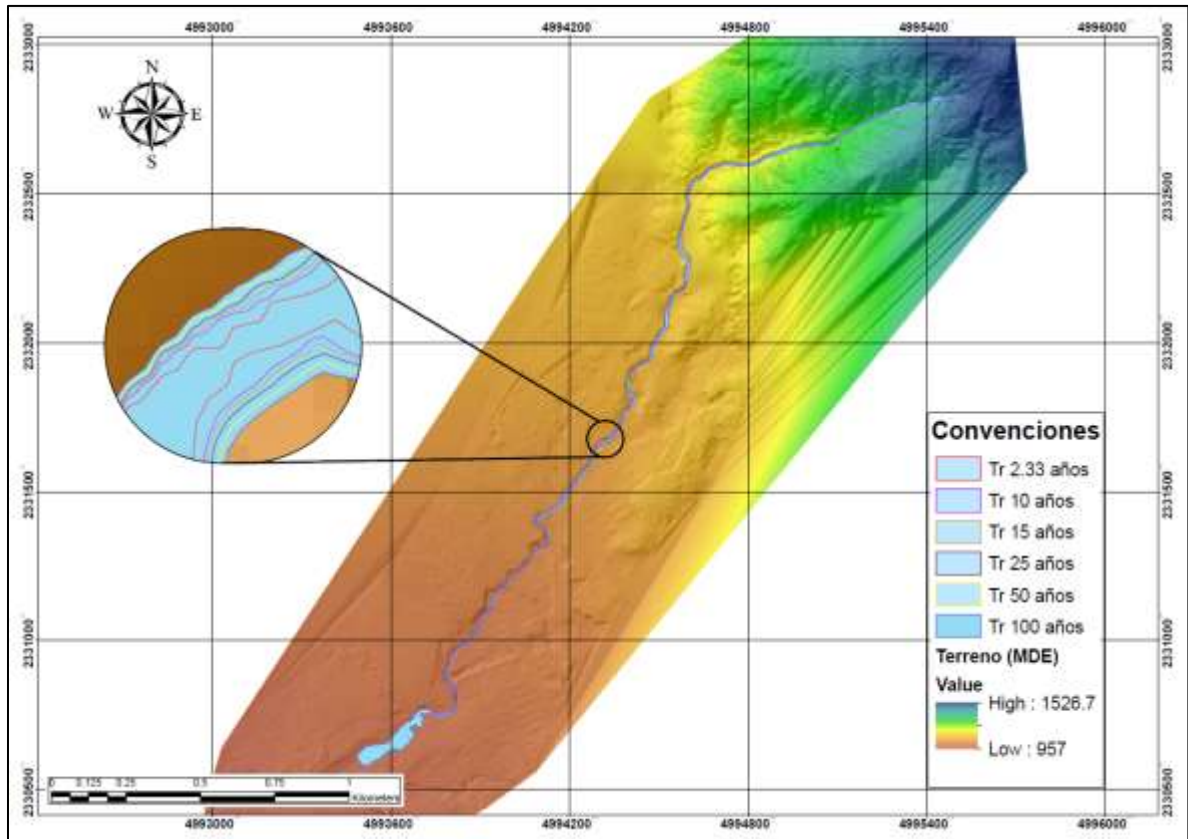
Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

5.3.2 Manchas de inundación para diferentes periodos de retorno

Para el modelamiento hidráulico de la quebrada La Palmira, se ingresan los caudales correspondientes a los periodos de retorno de interés utilizando el software HEC-RAS. Como resultado, se genera el mapa con los polígonos de manchas de inundación correspondientes a cada período de retorno, que se extrajeron del modelado hidráulico, los cuales se observan en la Figura 30.

Figura 30

Manchas de inundación a lo largo del drenaje para los periodos de retorno de interés



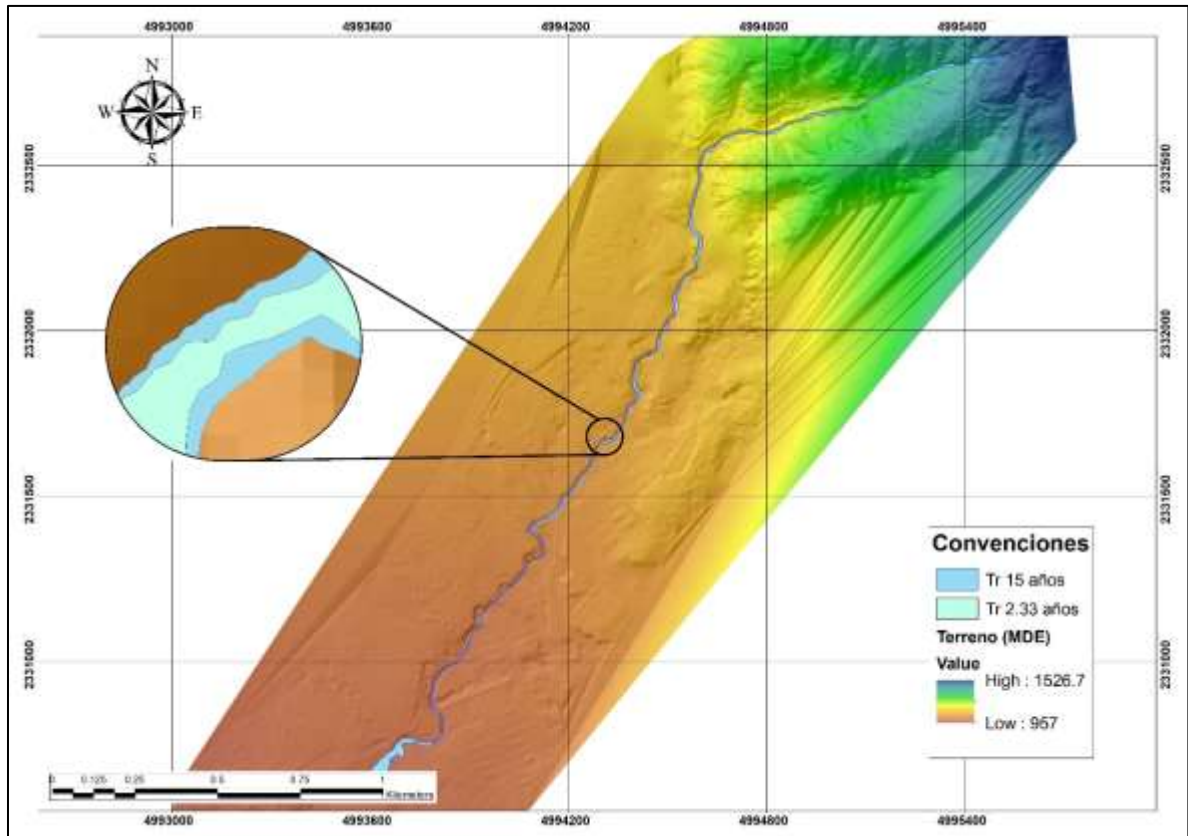
Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

5.3.3 Delimitación del cauce permanente

La delimitación del cauce permanente se establece a partir de la extensión máxima de la mancha de inundación, calculada mediante un modelo hidráulico para un período de retorno de 15 años. Esta mancha de inundación representa, de manera precisa y detallada, la lámina de agua sobre el terreno de la quebrada La Palmira, proporcionando una evaluación de los riesgos de inundación en la zona, tal como se muestra en la Figura 31.

Figura 31

Manchas de inundación para los Tr de 2.33 y 15 años



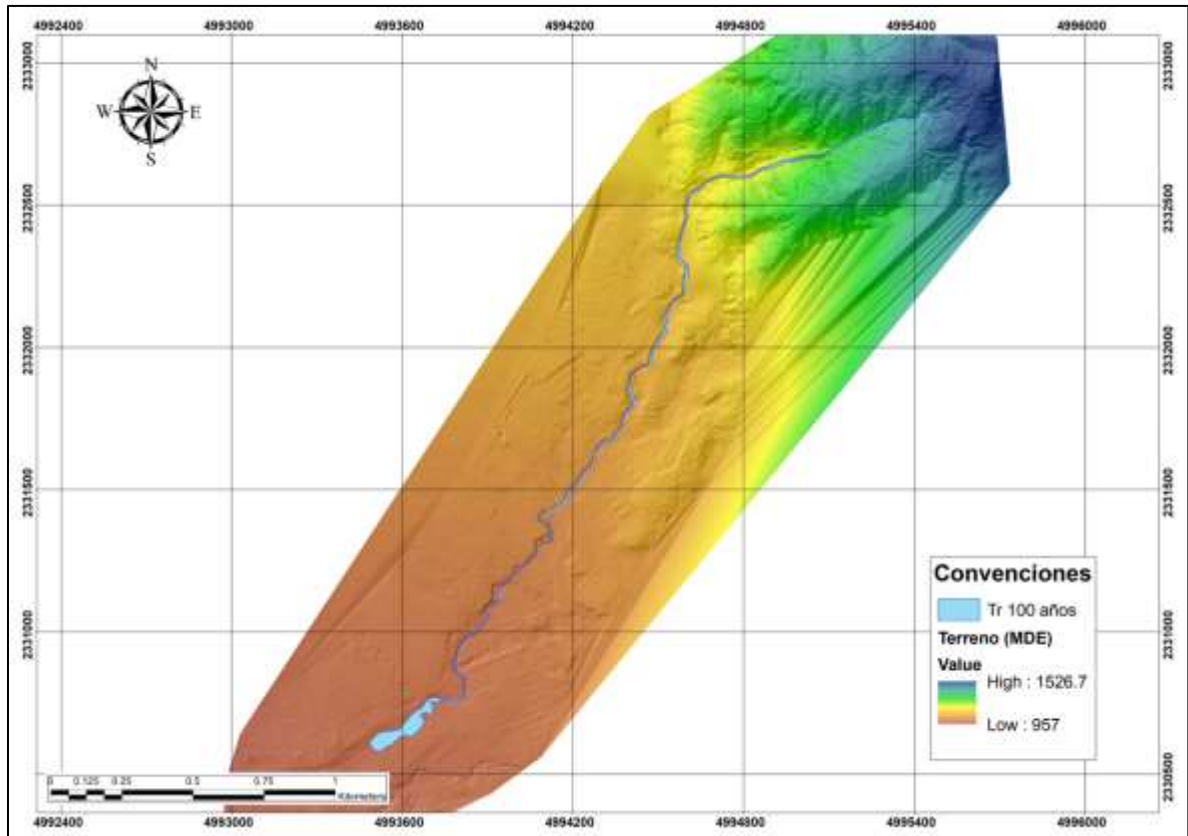
Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

5.3.4 Delimitación del componente hidrológico

Empleando la información topográfica y batimétrica detallada, así como los resultados de la modelación hidráulica realizada en HEC-RAS para la quebrada La Palmira, se obtiene el polígono trazado a partir del cauce permanente, el cual corresponde al componente hidrológico de la ronda hídrica, siendo la mancha de inundación obtenida para un periodo de retorno de 100 años, como se muestra en la Figura 32.

Figura 32

Mancha de inundación para un Tr de 100 años

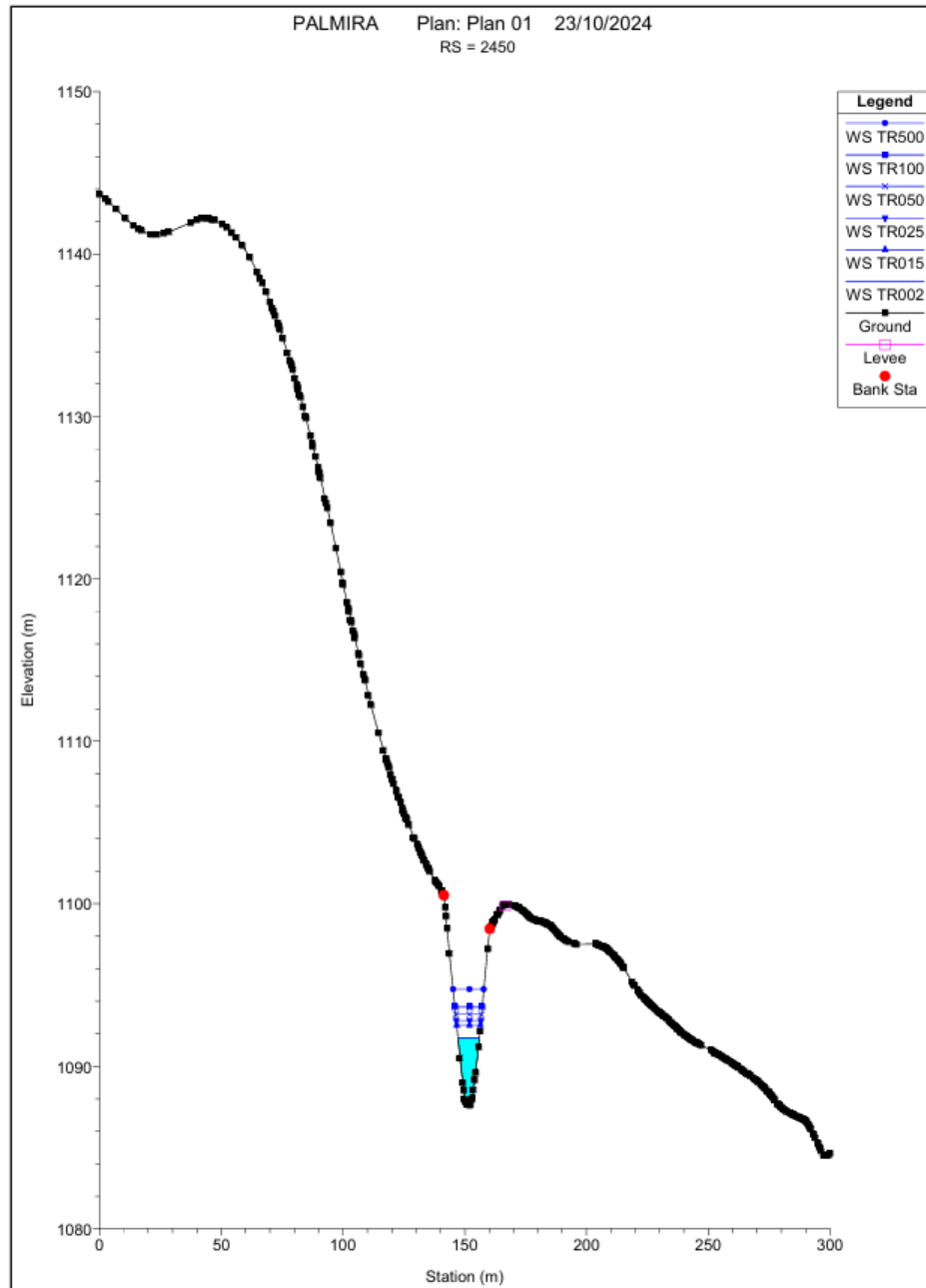


Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

Adicionalmente, a partir del modelamiento en HEC-RAS, se obtuvieron las secciones transversales de cada tramo, las cuales se presentan en la Figura 33 para el tramo 1, en la Figura 34 para el tramo 2 y en la Figura 35 para el tramo 3. Asimismo, los niveles correspondientes a cada tramo para los períodos de retorno de interés se detallan en la Tabla 12.

Figura 33

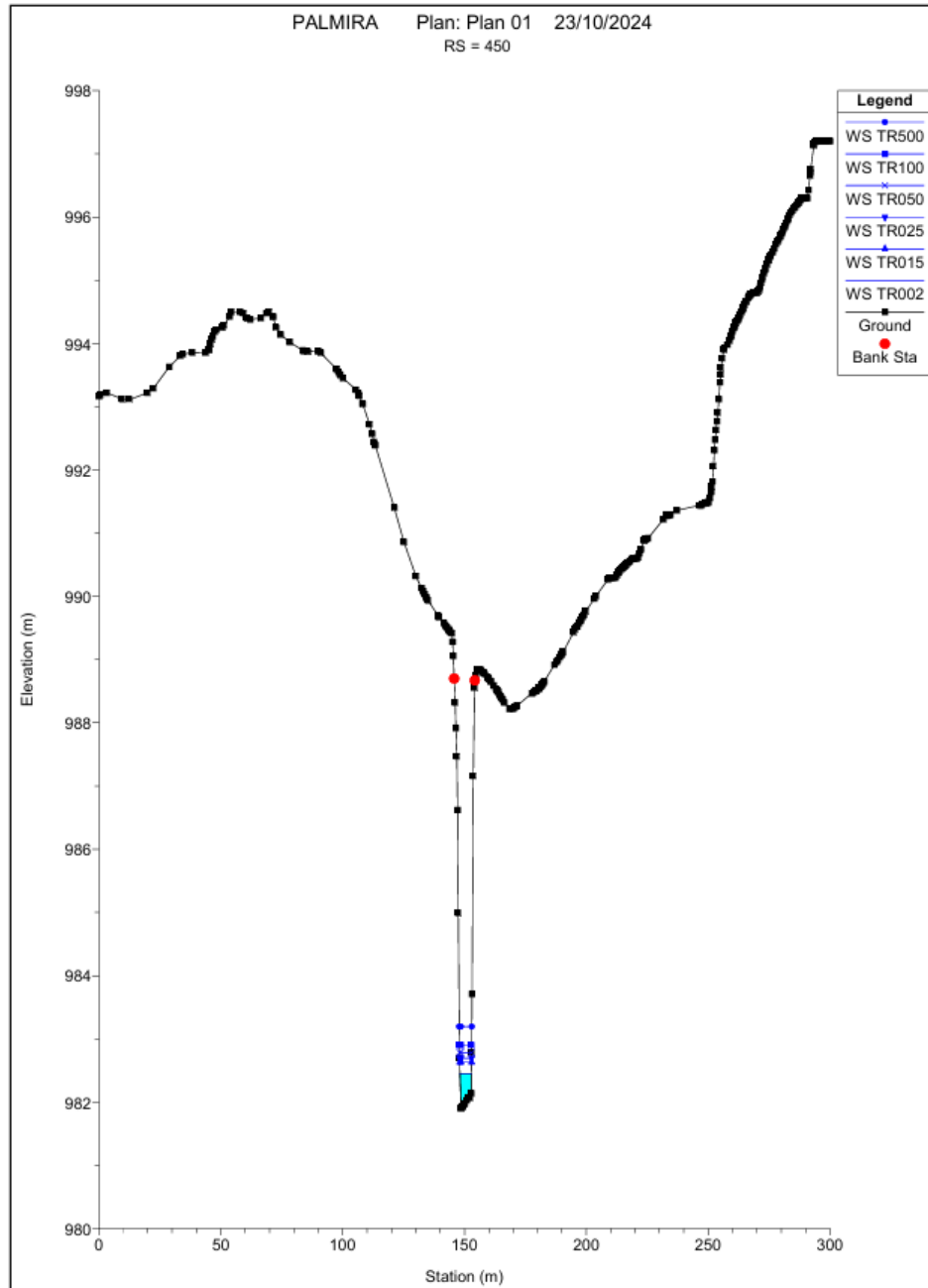
Sección transversal de abscisa ubicada en el tramo 1



Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

Figura 34

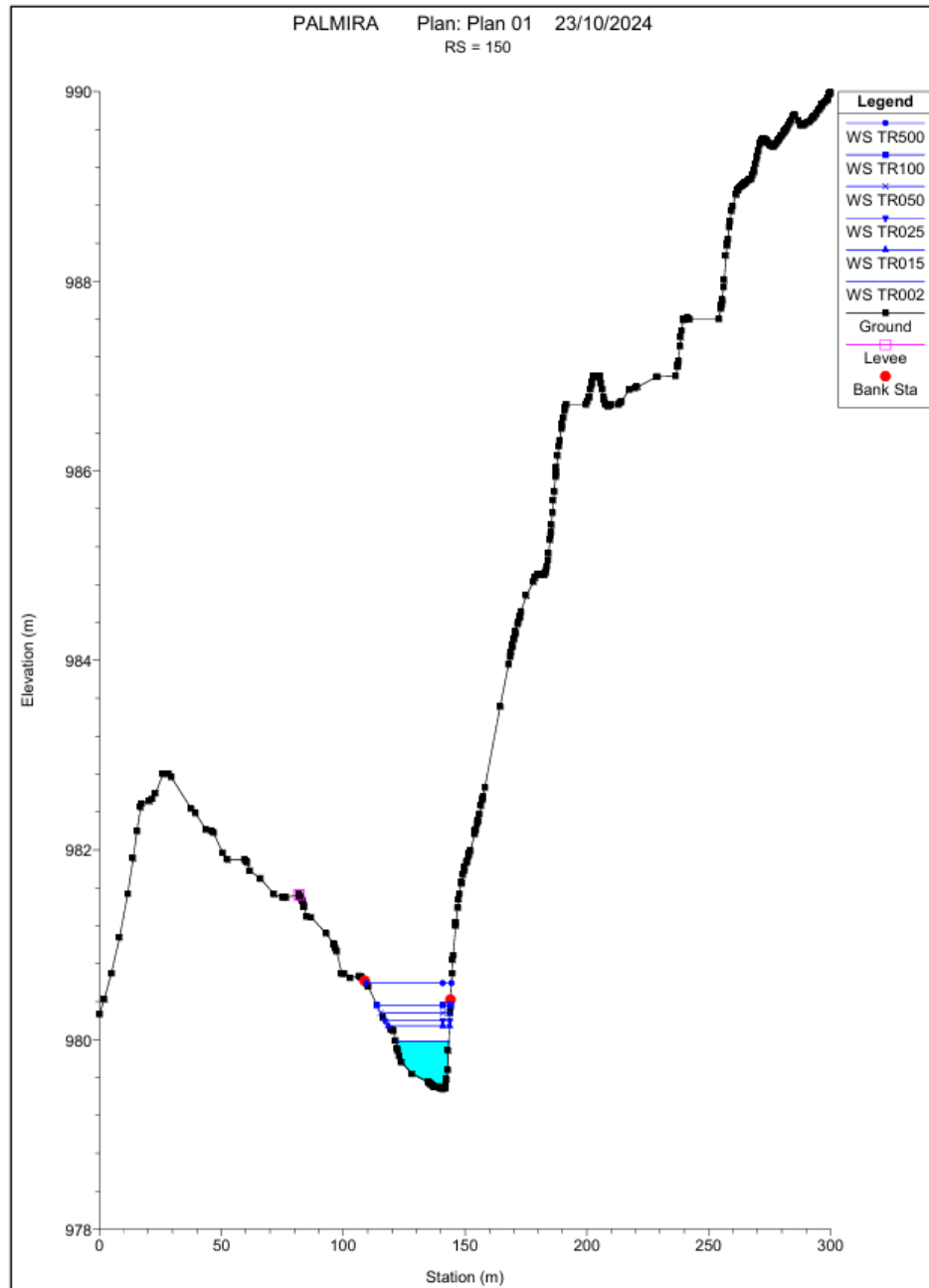
Sección transversal de abscisa ubicada en el tramo 2



Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

Figura 35

Sección transversal de abscisa ubicada en el tramo 3



Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería

Tabla 12*Niveles de inundación correspondientes a cada periodo de retorno*

| Sección de la Quebrada | Niveles (m) | | | Impacto estimado |
|------------------------|----------------|--------------|--------------|------------------|
| | Tr = 2.33 años | Tr = 15 años | Tr =100 años | |
| Tramo 1 | 1.42 | 1.81 | 2.39 | Sin afectación |
| Tramo 2 | 0.55 | 0.73 | 1.00 | Sin afectación |
| Tramo 3 | 0.5 | 0.67 | 0.88 | Sin afectación |

Nota. Tomado de la información base del proyecto realizado por IBG Ingeniería.

A partir de las secciones transversales y los niveles, se observa que no se presentan desbordamientos, concluyendo así que el cauce tiene la capacidad adecuada para manejar los caudales asociados con eventos extremos sin superar sus márgenes.

Esto, en términos de la definición del límite físico del componente hidrológico, implica que el límite de la ronda hídrica está bien establecido dentro de las condiciones modeladas, ya que el cauce es capaz de contener el flujo sin causar inundaciones en las zonas aledañas, lo que sugiere que el área susceptible a inundaciones está contenida dentro de los márgenes definidos y se encuentra dentro de lo que se consideraría un límite físico adecuado para este evento extremo.

6. Aportes

6.1 Creación de rásteres que representan la distribución espacial de cada variable climática

Para representar la distribución espacial de variables climáticas como precipitación, brillo solar, humedad relativa y temperatura, se seleccionaron estaciones meteorológicas con mayor influencia en el área de estudio. Con la información recolectada, se realizó una interpolación considerando un gradiente altitudinal, lo que permitió obtener rásteres mensuales para cada variable y analizar su comportamiento a lo largo del año. Para cada una de las variables se generaron mapas de su distribución temporal mínima y máxima de los meses más críticos, correspondientes a los que se presentaron en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Este análisis permite visualizar y comprender más ampliamente las tendencias climáticas a lo largo del año y cómo estas afectan la disponibilidad de agua en la cuenca, resaltando su importancia en la gestión sostenible de los recursos hídricos.

6.2 Manual para el acotamiento de una ronda hídrica

En este documento se presenta un resumen de los distintos parámetros que deben considerarse para un correcto acotamiento de una ronda hídrica. Se detalla cada uno de los elementos, normas y regulaciones aplicables, indicando con precisión dónde encontrarlos. El objetivo es que este documento sirva como referencia para futuras consultorías relacionadas con el acotamiento de rondas hídricas de fuentes de agua, facilitando y agilizando el desarrollo del proceso. No obstante, se enfatiza la importancia de verificar cada componente durante la ejecución del proyecto. Para una mejor comprensión, este manual se incluye como Apéndice A.

6.3 Construcción del hidrograma por el método SCS en Excel y el manual para su uso

Se elaboró un archivo de Excel que se incluye como Apéndice C, en el que se integran todas las hojas de cálculo relacionadas con el análisis de precipitación, incluyendo las curvas IDF y el hietograma. Estas hojas de cálculo, con un formato previamente establecido por IBG Ingeniería, se conectaron con otras dedicadas al método SCS para abstracciones y el método del hidrograma SCS para cálculo de caudales. Este enfoque permitió estimar los caudales y compararlos con los resultados obtenidos mediante el software HEC-HMS, tras ingresar la información de la cuenca de estudio.

Además, se entregó un manual que explica el uso del archivo de Excel que corresponde al Apéndice B, detallando los datos de entrada y los parámetros que deben ajustarse según las características del área de estudio. El objetivo principal fue garantizar la precisión de los resultados generados por el software en esta consultoría y en futuras aplicaciones. A nivel personal, este aporte también me permitió adquirir un entendimiento más profundo del funcionamiento del programa y de los parámetros claves en el cálculo de los caudales máximos asociados a un período de retorno.

7. Conclusiones

El acotamiento de rondas hídricas es una estrategia fundamental para proteger los ecosistemas riparios, fomentar la sostenibilidad hídrica y mitigar riesgos de inundación, especialmente en áreas urbanizadas. La "Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de Rondas Hídricas" (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018) fue clave en la orientación de este proyecto, proporcionando un marco normativo. Asimismo, el Manual de Drenaje para Carreteras (Instituto Nacional de Vías, 2009) sirvió como base metodológica fundamental para los análisis hidrológicos. La metodología empleada garantizó que la delimitación de la ronda hídrica cumpliera con las normativas nacionales vigentes, al mismo tiempo que se ajustó a las particularidades de la zona de estudio.

La gestión de la información hidroclimatológica permitió establecer una base de datos confiable y adaptada a las características de la cuenca de la quebrada La Palmira. A través de herramientas como ArcGIS, se delimitó la cuenca de forma precisa y se identificaron las estaciones climatológicas con mayor influencia para analizar variables relevantes. Estos datos fueron esenciales para generar curvas IDF y los hietogramas de diseño, que sirvieron de insumo para los modelos hidrológicos e hidráulicos.

Se determinaron los caudales asociados a distintos periodos de retorno, utilizando los métodos racional y del hidrograma del SCS. Ambos modelos proporcionaron estimaciones similares. Los resultados obtenidos permitieron identificar caudales asociados a escenarios de periodo de retorno de 2.33, 15 y 100 años, aportando información clave para analizar el comportamiento hídrico y servir como insumo fundamental para la modelación hidráulica subsecuente.

La modelación hidráulica, desarrollada con el software HEC-RAS, permitió simular de manera detallada el comportamiento de los niveles del agua para los tres periodos de retorno en la zona de estudio. Esto facilitó la delimitación precisa del cauce permanente y la definición del límite físico del componente hidrológico, identificando las áreas susceptibles a riesgos de inundación frente a eventos asociados a estos periodos de retorno. Los resultados de la modelación mostraron que el cauce tiene la capacidad suficiente para manejar los caudales generados por eventos extremos sin superar sus márgenes, lo que confirma su estabilidad y funcionalidad bajo estas condiciones.

El conocimiento y la adecuada implementación de herramientas tecnológicas aplicadas como ArcGIS, HEC-HMS y HEC-RAS son fundamentales para obtener resultados relevantes y verificables en este tipo de estudios.

Referencias Bibliográficas

Acosta Castellanos, P. M., & Sierra Aponte, L. X. (2013). Evaluación de métodos de construcción de curvas IDF a partir de distribuciones de probabilidad y parámetros de ajuste. *Revista Facultad de Ingeniería*, 22(35), 25-33.

Congreso de la república de Colombia. (1974). *Decreto 2811 de 1974—Gestor Normativo*. Función Pública. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1551>

Congreso de la república de Colombia. (2011). *Ley 1450 de 2011—Gestor Normativo*. Función Pública. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=43101>

Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. (2014). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río Alto Lebrija*. <https://www.cdmb.gov.co/cdmb/tematicas/pomcas>

Estrada Sifontes, V., & Pacheco Moya, R. M. (2012). Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 33(1), 71-80.

Garay, D. D., & Aguero, J. N. G. (2018). *Delimitación hidrográfica y caracterización morfométrica de la cuenca del río Anzulón* [Info:ar-repo/semantics/informe técnico]. Ediciones INTA. <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/17350>

Gaspari, F. J., Vagaría, A. M. R., Senisterra, G. E., Denegri, G. A., Delgado, M. I., & Besteiro, S. I. (2013). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGM DOMUS*, 4, 143-158.

Ibisate González de Matauco, A. (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. *BAGE. Boletín de la Asociación Española de Geografía*, 38, 311-330.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2024). *Datos Abiertos Agrología | GEOPORTAL*. Geoportal. <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>

Instituto Nacional de Vías. (2009). *Manual de drenaje para carreteras*.

López-Vásquez, C. (2019). *Estudio comparativo del componente hidráulico en la determinación de la ronda hídrica, desde las perspectivas nacional e internacional*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77480>

Ly, S., Charles, C., & Degré, A. (2013). Different methods for spatial interpolation of rainfall data for operational hydrology and hydrological modeling at watershed scale. A review. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 17(2), 392-406.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia*.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible de Colombia. (2017). *Decreto 2245 de 2017—Gestor Normativo. Función Pública*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=85056>

Modelación Hidrológica—IDEAM. (2024). <http://ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica#:~:text=Un%20modelo%20hidrol%C3%B3gico%20es%20pues,representado%20por%20una%20expresi%C3%B3n%20anal%C3%ADtica>.

Osorio, W. C. C. (2016). MODELACION HIDROLOGICO-HIDRAULICA DE EVENTOS DE INUNDACION EN EL RIO BOGOTA (SECTOR TOCANZIPIA-CHIA) USANDO HEC-RAS. *REVISTA AMBIENTAL AGUA, AIRE Y SUELO*, 7(2), Article 2. <https://doi.org/10.24054/aaas.v7i2.768>

Paz, C. J., Gómez, L. E. O., Dí-az, J. V. V., & Chamorro, F. R. M. (2018). La importancia de las rondas hí-dricas y el acotamiento de las mismas en Colombia. *Boletí-n Informativo CEI*, 5(1), Article 1.

Prensa Jurídica. (2022). *CE determinó que la quebrada La Palmira, del municipio de Piedecuesta, está siendo contaminada por desechos provenientes de conexiones erradas al sistema de alcantarillado, circunstancia que afecta los derechos colectivos de la comunidad*. Prensa Jurídica. <https://www.prensajuridica.com/details/item/21607-ce-determin%C3%B3-que-la-quebrada-la-palmira,-del-municipio-de-piedecuesta,-est%C3%A1-siendo-contaminada-por-desechos-provenientes-de-conexiones-erradas-al-sistema-de-alcantarillado,-circunstancia-que-afecta-los-derechos-colectivos-de-la-comunidad.html>

SIGAM - GLOSARIO DE LA GESTIÓN AMBIENTAL. (2024). SIGAM. <http://sigam.car.gov.co/mod/glossary/showentry.php?eid=2427>

US Army Corps of Engineers. (2025). *HEC-RAS Features*. Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/features.aspx>

Vanguardia. (2015). *Ante emergencias, piden canalización de La Palmira*. Vanguardia. <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/piedecuesta/2015/07/29/ante-emergencias-piden-canalizacion-de-la-palmira/>

Ven Te Chow. (1949). *Hidrologia Aplicada*. Scribd. <https://www.scribd.com/document/447733434/Hidrologia-Aplicada-Ven-Te-Chow-pdf>

Ven Te Chow. (1994). *HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS*. <https://webooks.co/images/team/academicos/ingenieria/civil/11.Hidraulica%20de%20Canales%20Abiertos%20-%20Ven%20Te%20Chow.pdf>

Apéndices



Apéndice A. Manual para el acotamiento de una ronda hídrica



Apéndice B. Manual de uso del hidrograma en Excel



Apéndice C. Construcción del hidrograma por el método SCS

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.