

Análisis de los eventos de inundación en varios periodos de retorno para la cuenca de la Quebrada Miracielo, corregimiento de Bábega (Norte de Santander) a partir de simulación por HEC-RAS.

Margarita María Albarracín Díaz

Carlos Andrés Kopp Tarazona

Trabajo de Grado para Optar el Título de Geólogo

Director

Joaquin Andrés Valencia Ortiz

Ms.C Geología Ambiental y Aplicada

Codirector

Jorge Leonardo Camargo Daza

Ms.C en Geofísica

Universidad Industrial De Santander

Facultad Ingenierías Físico Químicas

Escuela De Geología

Bucaramanga

2018

Dedicatoria

A mi madre, de alma noble y espíritu fuerte.

A mi padre, mi guía y mi maestro.

A Jimena, como una segunda mamá

Y José, por las risas y la memoria.

Margarita A.

Este trabajo es dedicado a mi madre quien ha sido mi guía y mi fortaleza.

A mi hermana por sus consejos y apoyo.

Y a toda mi familia por acompañarme a lo largo de este camino.

Andrés K.

Agradecimientos

Agradecemos especialmente al director de tesis Joaquín Andrés Valencia Ortiz, por la paciencia, el apoyo y las enseñanzas brindadas a lo largo de la carrera y durante la ejecución de este proyecto.

Agradecemos a nuestros padres por ofrecernos la oportunidad de estudiar, ellos se han esforzado por cuidar de nosotros y, siempre han sido el impulso para salir adelante.

A la Universidad Industrial de Santander, por la preparación y el acompañamiento a lo largo de este pregrado universitario.

A los profesores de geología, quienes con su conocimiento y sabiduría ayudaron en el proceso de los que hoy nos convertimos en geólogos.

A nuestros compañeros y amigos, que recorrieron este largo camino de lo que es la universidad y entre risas y alegrías fueron claves para alcanzar este éxito, agradecemos por su compañía, su amistad y sus consejos.

A los habitantes del corregimiento de Bábeaga, por su amabilidad y disposición a la hora de ejecutar este proyecto. A doña Mercedes por su gentileza y atención, y a Juanchito, quien fue guía y colaborador durante la campaña de campo y quien aprendió a reconocer los cambios litológicos.

Muchas gracias.

Margarita y Andrés

Tabla de contenido

	Pág.
1	Introducción..... 16
2	Objetivos..... 18
2.1	Objetivo general 18
2.2	Objetivos específicos..... 18
3	Planteamiento del problema 19
4	Justificación del proyecto 21
5	Localización..... 22
6	Marco geológico 23
7	Estado del arte 27
8	Marco teórico..... 32
9	Metodología..... 49
8.1	Recopilación de información 50
8.2	Modelamiento hidrológico en HEC-HMS 51
8.3	Modelamiento hidráulico en HEC-RAS 58
8.4	Análisis geológico y geomorfológico a partir del estudio de campo. 61
10	Resultados 67
11	Conclusiones 74
12	Recomendaciones 75

BIBLIOGRAFÍA 77

Apéndices..... 85

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación del área de la cuenca según Materón (1986). Modificado de Reyes (2010).	34
Tabla 2. Clasificación de índice de compacidad. Modificado de Reyes (2010).....	35
Tabla 3. Clasificación según el parámetro de la forma. Modificado de Reyes (2010).....	36
Tabla 4. Clasificación según el parámetro del índice de alargamiento. Modificado de Reyes (2010)	36
Tabla 5. Clasificación según el parametro del índice asimétrico. Modificado de Reyes (2010)..	37
Tabla 6. Clasificación de cuencas según su pendiente media. Modificado de Ortiz (2004) en Reyes (2010).....	37
Tabla 7. Clases de masividad. Modificado del Instituto Nacional de Ecología, 2004 en Reyes (2010).....	39
Tabla 8. Valores del coeficiente de rugosidad n de Manning, Modificado de Ven Te Chow (1994).	47
Tabla 9. Parámetros asociados al factor de forma de la cuenca.	53
Tabla 10. Parámetros asociados al relieve.	54
Tabla 11. Caudales máximos para el modelo 1	57
Tabla 12. Caudales máximos para el modelo 2.	57

Lista de figuras

Figura 1. Antiguo molino destruido por la inundación presentada en el año 2011.	19
Figura 2. Representación del cauce de la Quebrada Miracielo debajo de la calle principal del corregimiento de Bábega. La línea verde corresponde a los muros del canal en superficie.....	20
Figura 3. Levantamiento de las tapas o lozas ocurrido durante la inundación del año 2015.....	21
Figura 4. Mapa de localización para la Cuenca de la Quebrada Miracielo, corregimiento de Bábega, departamento de Norte de Santander. La línea roja representa el límite de la cuenca. ..	23
Figura 5. Modelo general del macizo de Santander modificado de Goldsmith et al., (1971).	24
Figura 6. Mapa geológico realizado para el area de estudio.....	25
Figura 7. Línea del tiempo de los avances sobre el estudio y aplicación a la zonificación de la amenaza por inundación, empleando HEC-RAS y HEC-HMS.....	32
Figura 8. Curva hipsométrica, características del ciclo erosivo y del tipo de cuenca. Modificado de Campos (1998).....	38
Figura 9. Metodología aplicada al proyecto de investigación.	49
Figura 10. Estación pluviométrica Los Rincón. Tomado de IDEAM (2017).....	50
Figura 11. Metodología empleada para la obtención de caudales en HEC-HMS	51
Figura 12. Representación de los elementos morfométricos realizados en HEC-geoHMS. A. subcuencas B. Centroides de cada subcuenca.....	52
Figura 13. Curva hipsométrica para la cuenca de la Quebrada Miracielo.	55
Figura 14. Representación de los elementos morfométricos en HMS.....	57
Figura 15. Etapas correspondientes al modelamiento hidráulico.	58
Figura 16. Representación de los elementos geométricos realizados en HEC-GeoRAS. A. Cauce principal de la Quebrada Miracielo. B. Orillas del cauce principal.....	59

Figura 17. Representación de los elementos geométricos realizados en HEC-GeoRAS. A. Líneas de flujo representando las llanuras de inundación. B. Secciones transversales a lo largo del cauce	60
Figura 18. Segunda etapa del modelamiento hidráulico, correspondiente a la generación de los modelos de inundación.	61
Figura 19. Mapa geomorfológico para la cuenca de la Quebrada Miracielo.....	64
Figura 20. Geoformas relacionadas con el ambiente denudacional que se visualizaron en la campaña de campo. A. Cono o lóbulo de flujo de detritos. B. Ladera erosiva muy abrupta.....	65
Figura 21. Geoformas relacionadas con el ambiente denudacional que se visualizaron en la campaña de campo. A. Lomo denudado moderado de longitud media. B. Lomo denudado moderado de longitud larga y a su lado izquierda lomo denudado moderado de longitud corta. ..	66
Figura 22. Puntos críticos en los cuales se realizaron medidas de ancho de cauce, llanura de inundación y nivel máximo de inundación	67
Figura 23. Modelo 1. de profundidades (isóbatas) y velocidades (isotacas) para la cuenca de la Quebrada Miracielo.	68
Figura 24. Modelo 2. de profundidades (isóbatas) y de velocidades (isotacas) para la cuenca de la Quebrada Miracielo.....	69
Figura 25. Delimitación de la zona de amenaza por inundación tomado de Ayala-Carcedo 2002	70
Figura 26. Daños laterales causados a estructuras dentro del corregimiento.	71
Figura 27. Acumulación de manegueras utilizadas para la captación de agua.	72
Figura 28. Canalización de la quebrada en la parte inicial de corregimiento.	72

Figura 29. Deposito coluvial en la parte media de la cuenca, margen derecho de la quebrada

(aguas abajo) 73

Figura 30. caida de árboles sobre la quebrada. 74

Lista de apéndices

Apéndice A. Mapa geológico	I
Apéndice B. Mapa geomorfológico	II
Apéndice C. Mapa de estaciones	III
Apéndice D. Descripción geomorfológica.....	IV
Apéndice E. Modelo 1. De profundidades (isóbatas)	VI
Apéndice F. Modelo 2. De profundidades (isóbatas)	VII
Apéndice G. Modelo 1. De velocidades (isotacas).....	VIII
Apéndice H. Modelo 2. De velocidades (isotacas).....	IX

Resumen

Título: Análisis de los eventos de inundación en varios periodos de retorno para la cuenca de la Quebrada Miracielo, corregimiento de Bábeca (Norte de Santander) a partir de simulación por HEC-RAS.*

Autores: Margarita María Albarracín Díaz , Carlos Andrés Kopp Tarazona **

Palabras clave: HEC-RAS, HEC-HMS, modelamiento hidrológico, modelamiento hidráulico, caudales, Bábeca, Norte de Santander.

En el presente proyecto se muestran los resultados concernientes a la generación de modelos de inundaciones a partir de registros puntuales de precipitación, para la cuenca de la Quebrada Miracielo, del corregimiento de Bábeca (Norte de Santander) cuya área es de 16.91 Km². Para realizar este estudio se aplicaron las herramientas de modelamiento hidrológico HEC-HMS 3.5 y HEC-geoHMS 10.3 y las herramientas de modelamiento hidráulico HEC-RAS 5.0.3 y HEC-geoRAS 10.3. Para simular la respuesta hidrológica de la cuenca, se tuvieron en cuentas los datos de precipitación registrados en la estación Los Rincón del IDEAM de los últimos 31 años. Se estimaron dos modelos de caudales para periodos de retornos de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 años. El primer modelo se realizó con los datos puntuales de la precipitación, y, el segundo modelo se realizó con base en un aumento del 10% sobre los datos de precipitaciones, debido a los cambios climáticos que se puedan presentar por factores externos. Se obtuvieron mapas de simulación de la inundación con perfiles de profundidades y velocidades, para los diferentes periodos de retorno. Según el análisis de los resultados para ambos modelos, el corregimiento se encuentra en amenaza alta, debido a que, a partir del periodo de retorno de 2 años se presentan isóbatas de 4,45 m e isotacas de 1,61 m/s. Dentro de la investigación se determinó que la zona norte del centro poblado es la que mayor grado de afectación presenta, ocupando el 15,50% del área total del corregimiento para un periodo de retorno de 25 años. Esta amenaza se presenta en gran medida al represamiento causado por la canalización de la quebrada, la cual no permite que el cauce fluya en su totalidad afectando la infraestructura del centro poblado.

Abstract

Title: Analysis of the flood events in several return periods for the Quebrada Miracielo watershed, Bábeca's town (Norte de Santander) from simulation by HEC-RAS. **

Authors: Margarita María Albarracín Díaz, Carlos Andrés Kopp Tarazona *

Keywords: HEC-RAS, HEC-HMS, hydrological modeling, hydraulic modeling, flows, Bábeca, Norte de Santander.

The present project shows results regarding the generation of flooding models from specific rainfall records, for the Quebrada Miracielo watershed, at Bábeca (Norte de Santander) in a 16.91 Km² area. To carry out this study, the hydrological modeling tools HEC-HMS 3.5 and HEC-geoHMS 10.3 and the hydraulic modeling tools HEC-RAS 5.0.3 and HEC-geoRAS 10.3, of the United States Army Corps of Engineers, were applied. To simulate the hydrological response of the basin, the precipitation data registered in the Los Rincón IDEAM station of the last 31 years was used. Two models of flow were estimated for return periods of 2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 years. The first model was made with the punctual data of the precipitation, and the second model was made with a base in increase of 10% on the precipitated data, due to the climatic changes that could be presented by the external factors. Flood simulation maps with depth and velocity profiles were obtained for the different return periods. According to the analysis of the results for both models, the town is in danger of discharge, because, from the return period of 2 years, depths of 4,45 m and velocities of 1,61 m / s are presented. Within the investigation it was determined that the northern zone of the populated center is the one that has the greatest degree of affectation, occupying 15,50% of the total area of the town for a return period of 25 years. This hazard comes in large measure to the damming caused by the canalization of the creek, which does not allow the channel to flow in its entirety affecting the infrastructure of the town.

1 Introducción

En Colombia la mayoría de los casos de inundaciones se ven influenciados por las condiciones topográficas del terreno, sumado a factores climáticos, geológicos y geomorfológicos (Campos *et al.*, 2012). Estos aspectos van ganando importancia al momento de generar un evento de inundación, que es definida como un “Desbordamiento del agua fuera de los confines normales de un río o cualquier masa de agua” o también como, “Acumulación de agua procedente de drenajes en zonas que normalmente no se encuentran anegadas” (WMO, 2012).

Ahora, si se observa con mayor detalle, por ejemplo, la topografía juega un papel desfavorable, al aumentar la velocidad del flujo, generando así, un evento de desbordamiento que puede afectar zonas de actividades antrópicas, como el tejido urbano, vías de comunicación y actividad agrícola. Estos sucesos se encuentran en su mayoría relacionados con episodios de alta pluviosidad (Campos *et al.*, 2012).

Estos escenarios son de suma fragilidad porque ante mayores precipitaciones, su geomorfología y su cercanía al canal pueden no permitir la evacuación oportuna del agua. Colombia se encuentra ubicada en la zona de convergencia intertropical (ZCIT), debido al flujo convergente, la ZCIT es la zona de máxima nubosidad y lluvia (León Aristizabal *et al.*, 2000). Las grandes lluvias propiciadas en el corregimiento de Bábeга, permiten que el nivel de agua de la quebrada aumente haciéndose más propensa al desborde de esta misma.

A partir de información secundaria y datos de campo se realizó un estudio de inundación en el corregimiento de Bábeга (Departamento de Norte de Santander), este corregimiento se encuentra ubicado sobre la Quebrada Miracielo en un valle en forma de V cerrada con pendientes altas, y que se encuentra atravesado por la falla Bábeга (Goldsmith & Ward, 1973). Gran parte del casco

urbano y del sector rural del corregimiento de Bábega se sitúa sobre zonas propicias a inundaciones. Estos eventos son controlados por las condiciones climatológicas variables de su entorno y a los aumentos súbitos de caudal a valores no usuales.

En la región se han presentado 3 grandes episodios, el primero ocurrido en 1954 en donde gran parte de la población quedó inundada. Para el 2011 se presentó un episodio con grandes pérdidas económicas, ambientales y de infraestructura. El evento más reciente fue el ocurrido en el 2015, donde se produjeron cuantiosas pérdidas de enceres de tipo eléctrico, destruyéndose también vías y generando daños parciales en el acueducto municipal, como también la pérdida de suministro eléctrico por un tiempo prolongado (Balaguera, 2015).

Este estudio también comprende la generación de un modelo de inundación, a partir de escenarios creados en varios periodos de retornos (2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 años) donde se determinaron los niveles máximos de inundación (isóbatas) y velocidades de flujo (isotacas). Todos estos datos fueron simulados en el programa HEC-HMS 3.5 (USACE, 2016), para establecer los caudales de la cuenca, y en HEC-RAS 5.0.3 (USACE, 2016) se modelaron las condiciones morfométricas, hidrológicas y cambios en la superficie del canal. Con estas dos herramientas sumado a un análisis en un sistema de información geográfica (SIG) se entregaron como resultado los índices de inundación y velocidad del cauce. Este estudio contribuye al mejoramiento de los planes de ordenamiento territorial del corregimiento de Bábega a futuro.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Elaborar un modelo de simulación hidrológica e hidráulica generado mediante el uso de los programas HEC-HMS 3.5 y HEC-RAS 5.0.3 que permita analizar los eventos de inundación de la cuenca de la Quebrada Miracielo (Bábega, Norte de Santander) y así determinar las condiciones de amenaza por inundación.

2.2 Objetivos específicos

1. Crear y delimitar los aspectos hidrológicos para la cuenca de la Quebrada Miracielo mediante el uso de la extensión HEC-geoHMS 10.3 para ArcMap 10.3.
2. Calcular los caudales máximos e hidrogramas para la cuenca de la Quebrada Miracielo empleando el programa HEC-HMS 3.5
3. Crear y delimitar los aspectos morfométricos para la cuenca de la Quebrada Miracielo mediante el uso de la extensión HEC-geoRAS 10.1 para ArcMap 10.3.
4. Generar el modelo de inundación para los diferentes periodos los de retorno (2,5,10,25,50,100,500 años) usando el programa HEC-RAS 5.0.3.
5. Obtener el modelo de velocidades (Isotacas) y de profundidades (Isóbatas) para la cuenca de la Quebrada Miracielo empleando el programa HEC-geoRAS 10.3.

3 Planteamiento del problema

El corregimiento de Bábeга en las últimas décadas ha sido afectado por múltiples eventos de inundación, eventos datados desde 1954 hasta 2011, con un incidente en el 2015. Todos estos relacionados con la Quebrada Miracielo, la cual cruza al corregimiento en sentido Noroeste-Suroeste. En el año de 1954, este problema ocurrió debido a que la quebrada no se encontraba canalizada en los márgenes del pueblo. Para el año 2011 el evento de inundación afectó las vías del corregimiento, la infraestructura del casco urbano y enceres (Fig. 1) (Balaguera, 2015).



Figura 1. Antiguo molino destruido por la inundación presentada en el año 2011.

Estos eventos de inundación están acompañados por el transporte de algunos volúmenes de material que obstaculizan el cauce formando flujos turbulentos, los cuales se producen por procesos de erosión lateral del cauce, que desgastan las paredes generando una leve carga activa sobre

el cauce con arrastre de diversos materiales.

Otro de los problemas que se visualizan corresponde a la canalización de la quebrada, la cual se encuentra cubierta (Fig. 2) y actúa como un cuello de botella cuando existe aumento significativo de caudal. Durante el episodio ocurrido en 2015 algunas de las tapas o lozas de cemento que cubrían la quebrada canalizada se levantaron ocasionando grandes daños como se observa en la Fig. 3.



Figura 2. Representación del cauce de la Quebrada Miracielo debajo de la calle principal del corregimiento de Bábega. La línea verde corresponde a los muros del canal en superficie.



Figura 3. Levantamiento de las tapas o lozas ocurrido durante la inundación del año 2015.

De acuerdo con el esquema de ordenamiento territorial del municipio de Silos, el corregimiento de Bábega se encuentra en estado de alerta debido a este tipo de eventos. Conociendo esta problemática, este trabajo de investigación se enfocó en la estimación de estos eventos de inundación, como también en las condiciones del cauce con respecto a su velocidad de flujo, lo cual permitió realizar un análisis del grado de afectación en la región.

4 Justificación del proyecto

El conocimiento de las condiciones morfométricas de la cuenca y la estimación de los datos hidrológicos para obtener el caudal de la misma, permitió desarrollar un modelo en donde se consideraron diferentes estados de comportamiento para un determinado flujo sobre el cauce. Con la visualización de las áreas inundadas para los diferentes periodos de retorno y los impactos que inciden en la infraestructura y la estabilidad económica de los habitantes, este estudio permitió entender las dimensiones del problema. Su contribución mejorará el diagnóstico ante eventos de inundación como medida de atención temprana dentro de los planes de ordenamiento territorial de la región.

También, el conocimiento de esta problemática brinda un apoyo en la delimitación de las regiones con intervención antrópica, condición que para el área de estudio se manifiesta por su desarrollo en actividades económicas que son el sustento de la región y que se caracterizan por estar asociadas a factores en mayor medida de tipo agrícola y ganadero (EOT, 2000), sectores que se ven críticamente afectados en meses de lluvias en donde las inundaciones arrasan con los cultivos y zonas de pastoreo.

5 Localización

La zona de estudio (Fig.4) comprende al corregimiento de Bábega y la Quebrada Miracielo, los cuales se encuentran bajo jurisdicción del municipio de Santo Domingo de Silos. El corregimiento de Bábega se encuentra a una altura de 2.409 m.s.n.m. Presenta una temperatura media de 14°C y es el segundo centro poblado después de Silos con una población aproximada de 450 habitantes equivalente al 48,45% de la cabecera municipal (Vargas, 2017).

Además de esto, el corregimiento cuenta con tres vías de acceso, la primera es la vía que comunica al municipio de Chitaga con el corregimiento, la segunda es la entrada por el municipio de Cacota y, la última, es la que conecta al municipio de Santo Domingo de Silos al cual se encuentra sucrita el corregimiento de Bábega. Esta última vía es la más importante debido a su comunicación con la vía Cucuta-Bucaramanga, por donde se transportan la mayoría de los productos agrícolas generados en la región, los cuales tienen como principal destino la ciudad de Bucaramanga.

La principal actividad económica desarrollada en el corregimiento es la agricultura y a la comercialización de estos mismos, los principales productos cultivados en la región son: el durazno, papa, maíz, fresa, frijol, y ciruela (EOT, 2000).

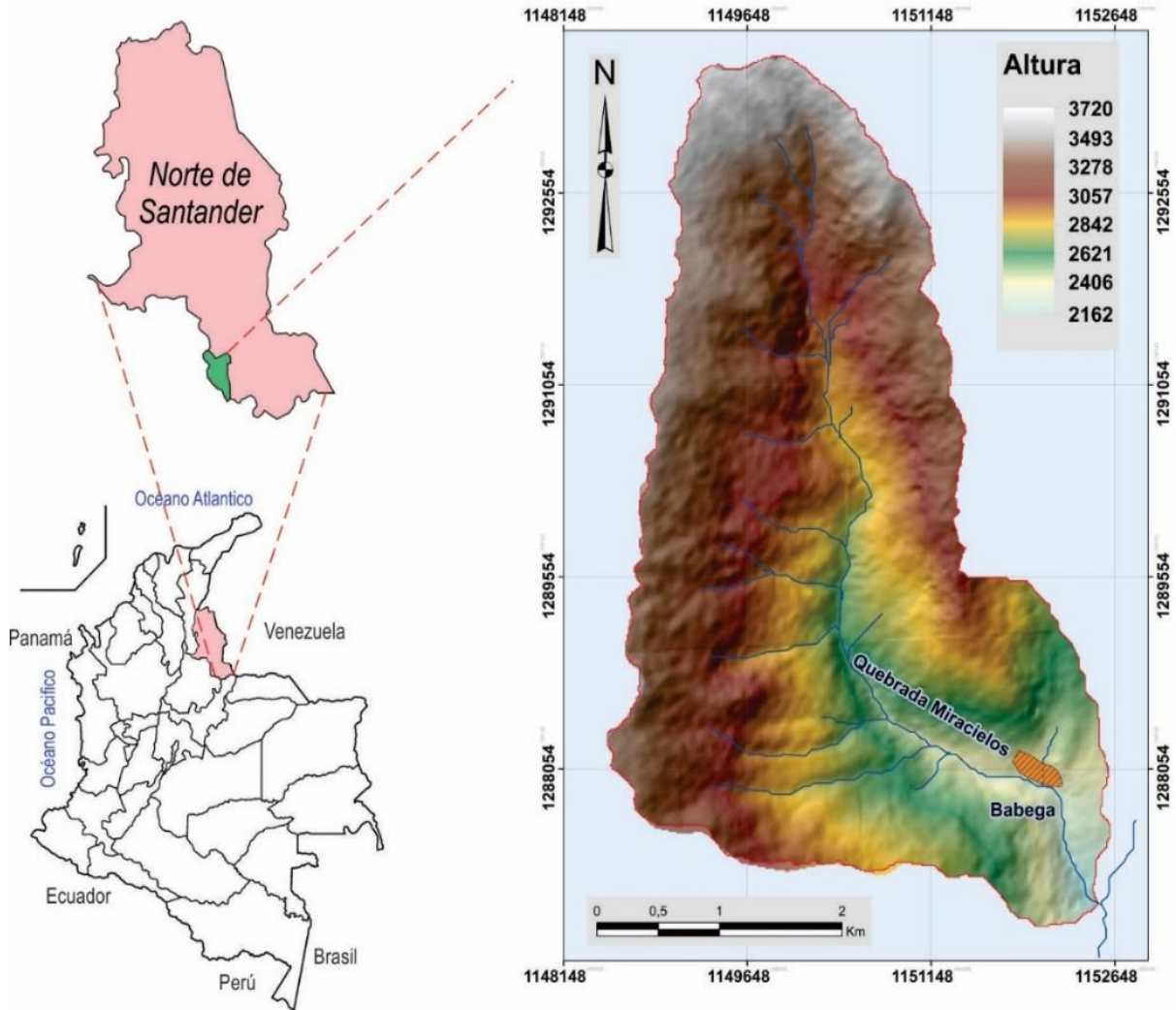


Figura 4. Mapa de localización para la Cuenca de la Quebrada Miracielo, corregimiento de Bábega, departamento de Norte de Santander. La línea roja representa el límite de la cuenca.

6 Marco geológico

El área de estudio se encuentra ubicada sobre la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos, específicamente sobre el macizo de Santander. Este macizo cuenta con la falla Bucaramanga-Santa Marta como su límite al Oeste, y al costado Este se tiene como límite el sistema de fallas Pamplona-Cubogon-Mercedes (García *et al.*, 2005).

La geología del macizo de Santander fue descrita por primera vez por Julivert (Julivert M., 1958, 1959 & 1961), y posteriormente Ward *et al.*, (1973), mejoró esta descripción, dividiendo el

macizo en un basamento metamórfico, compuesto por el Neis de Bucaramanga, Formación Silgará, y una unidad denominada Ortogneis, de edades pre Devónicas (Goldsmith *et al.*, 1971), que se encuentran instruidos por cuerpos ígneos (Fig. 5).

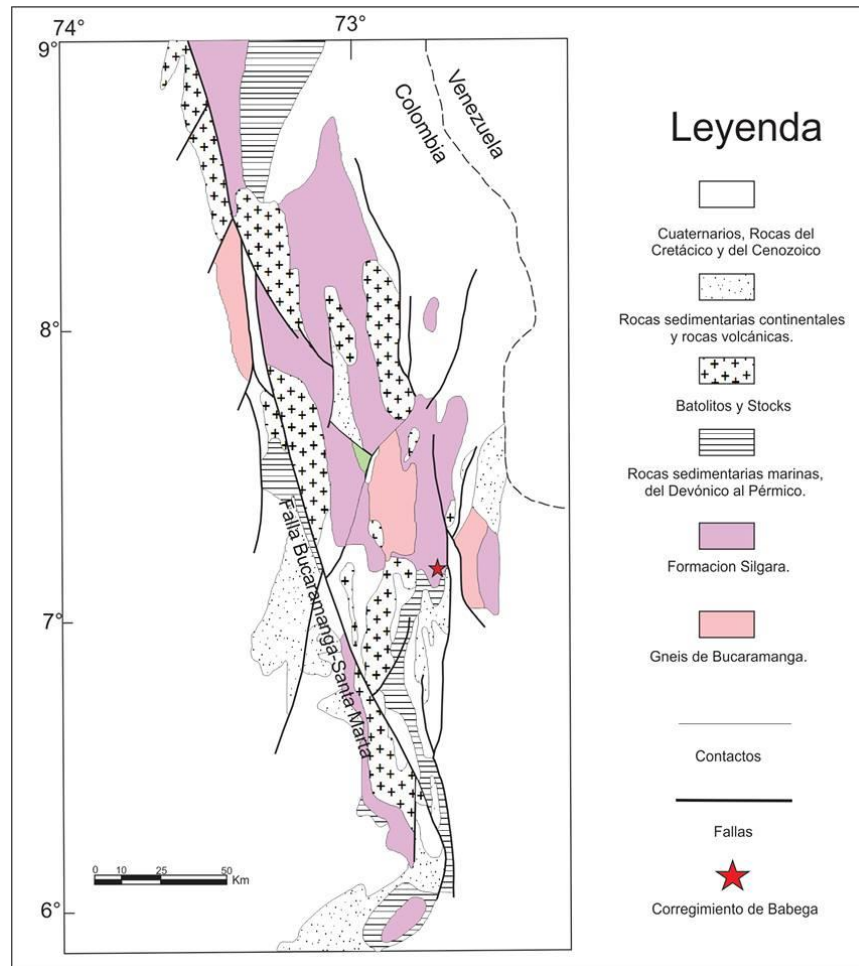


Figura 5. Modelo general del macizo de Santander modificado de Goldsmith *et al.*, (1971).

El basamento se encuentra en contacto discordante con las rocas de la formación Floresta, y estas, se encuentran disconformes sobre unidades calcáreas del Carbonífero Pérmico, y sobre estas, se hallan rocas del Triásico, y Cretácico. Sobre las rocas del Cretácico, se localizan unidades sedimentarias marinas del Paleozoico, y en los últimos niveles se presentan intercalaciones de

rocas vulcano-clásticas con capas rojas de grano fino, con clastos intrusivos (Ward *et al.*, 1973; García *et al.*, 2005).

Ahora para el área de estudio se encuentra como basamento las formaciones Esquistos de Silgará y Ortogneis, este último es el que se encuentra en contacto inconforme (Ward *et al.*, 1973) con la litología suprayacente la cual es denominada formación Tibú-Mercedes, que se halla en contacto con la formación Aguardiente, como observa en la Fig. 6.

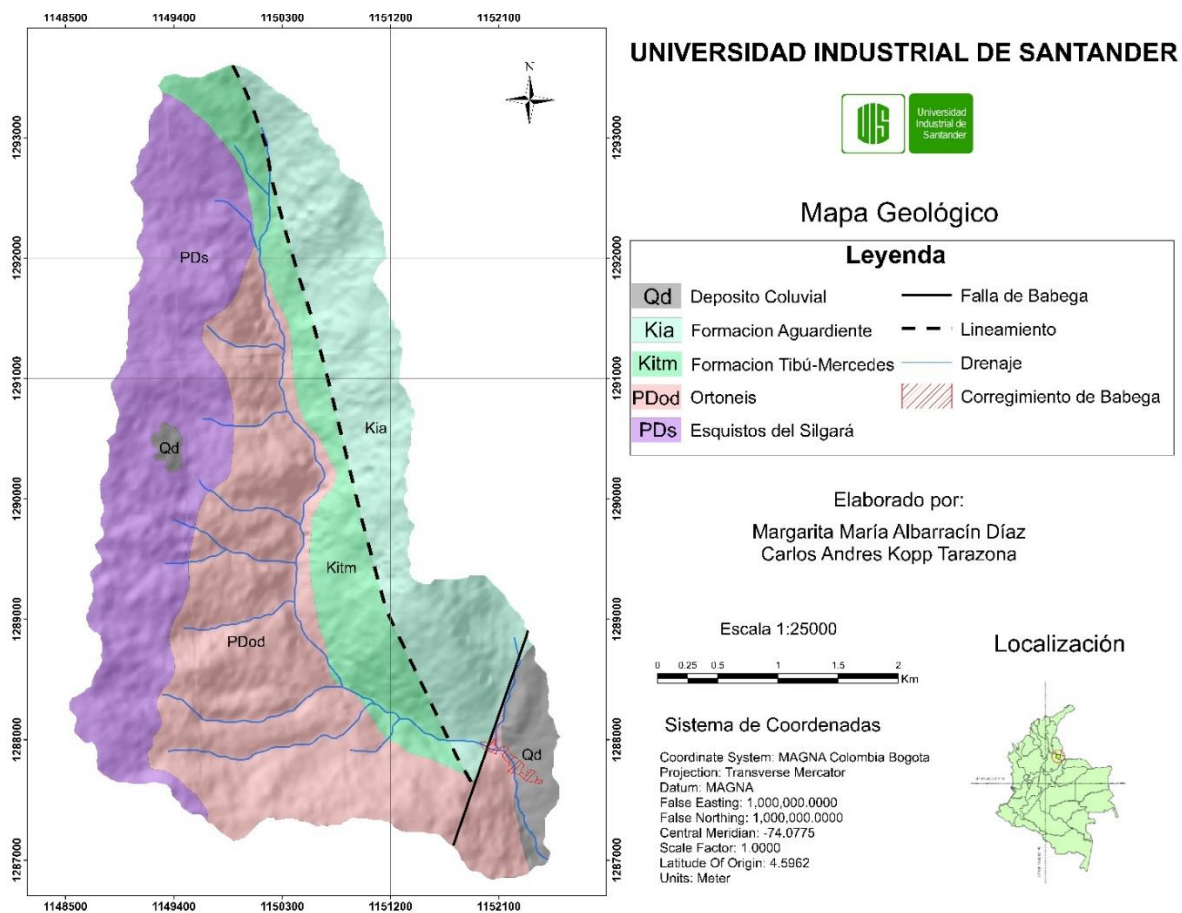


Figura 6. Mapa geológico realizado para el área de estudio.

La formación Esquistos de Silgará se encuentra conformada por rocas metamórficas de bajo a medio grado, específicamente pizarras, filitas, meta-limolitas, y meta-waca. Sobre la faja Berlín-Silos-Mutiscua se identifican varias litologías como lo son cuarcitas, esquistos micáceos, esquistos

cuarzo moscovíticos, las cuales se encuentran en contacto con el Ortogneis (Ward *et al.*, 1973). De acuerdo a lo revisado en campo para los Esquistos de Silgará se observaron rocas metamórficas de medio grado las cuales en su mayoría fueron clasificadas como esquistos cuarzo micáceos y esquistos micáceos con tonalidades verdosas.

La siguiente unidad presente en el área es el Ortogneis, el cual ha sido definido como un neis cuarzo feldespático con un protolito que varía desde granito hasta tonalita. Dicho cuerpo tiene un grado de metamorfismo que varía de medio a alto grado. El emplazamiento de este cuerpo se puede presentar de dos maneras, en la primera se encuentra como una masa no homogénea que pasa a migmatita con un metamorfismo de alto grado. El segundo tipo, no está confinado solo a rocas metamórficas de alto grado, ya que puede encontrarse en rocas de un metamorfismo de grado medio, aunque también pueden encontrarse algunos sitios con migmatitas (Ward *et al.*, 1973). Con respecto a los cuerpos de Ortogneis observados en campo se apreciaron variedades composicionales, estas asociadas en algunos casos a mayores contenidos de feldespato potásico y en otros a un mayor contenido de feldespato plagioclasa.

Sobre esta unidad se halla aflorante la Formación Tibú y Mercedes, a la base de la Formación Tibú se observan areniscas guijosas de grano grueso las cuales se encuentran cubriendo las rocas del basamento, posteriormente se observan intercalaciones de capas de calizas fosilíferas con capas de shale. Sobre estos niveles de calizas se observa el contacto entre la Formación Tibú y la Formación Mercedes, el cual es un contacto conforme con shales grises con contenido micáceo que varía de gris a negro, la formación presenta intercalaciones de caliza, shale y areniscas, las calizas tienen semejanzas con las descritas en la formación Tibú y las areniscas de grano finos con colores grisáceos y contenidos de glauconita (Ward *et al.*, 1973). Para la Formación Tibú y Mercedes, en campo se pudieron apreciar varios niveles de shales, intercalados con paquetes de

areniscas de grano fino que tenían colores que iban desde gris oscuro hasta blanco. También se apreciaron paquetes de rocas carbonatadas con altos contenidos de fósiles las cuales fueron clasificadas por Dunham (1962) como Wackston.

La Formación Tibú y Mercedes se encuentra en contacto conforme con la Formación Aguardiente. La Formación Aguardiente está conformada por arenisca de grano grueso, glauconítica y calcárea, con colores que varían desde el gris hasta el verde claro, con estratificación cruzada, con capas delgadas de shale carbonáceo y micáceo (Ward *et al.*, 1973).

7 Estado del arte

Durante el presente capítulo se definirán los trabajos realizados por los diferentes autores relacionados con la zonificación de amenaza por inundaciones, empleando distintos programas entre los que se encuentran la familia de HEC-RAS y de HEC-HMS, se explicará la metodología implementada en cada uno de ellos y los resultados obtenidos (Fig. 7).

El análisis de amenazas por inundaciones puede llevarse a cabo utilizando 3 tipos de metodologías: hidrológicas, históricas y geológicas-geomorfológicas. En su revisión Diez (2002) consideró la metodología hidrológica, la cual se divide en dos etapas: la primera, consiste en el análisis estadístico de los caudales registrados o métodos hidrometeorológicos que simulan el proceso de precipitación, de este se obtienen los caudales de crecida. La segunda etapa consiste en crear un modelo hidráulico que permite obtener los niveles de inundación y velocidad del cauce (Isóbatas e Isóbatas). Como resultado, la amenaza se expresa cartográficamente mediante mapas de áreas inundables para los diferentes periodos de retorno (Diez Herrero, 2002).

En el 2002, se realizó un estudio para el sector de valle de Oiartzun (Noreste de Gipuzkoa), España por parte de Etxeberría (2002). Su objetivo fue el de generar un mapa de amenaza por

inundación. La zonificación se realizó sobre la base de los caudales de inundación calculados para diferentes tormentas de diseño en períodos de retorno de 10, 100 y 500 años. Para el cálculo de la escorrentía superficial, se implementó el método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS). Como resultado se obtuvo un mapa de las zonas que resultarían inundadas en formato Raster 5 m x 5 m, a partir de la diferencia entre el mapa de altura del agua y el Modelo Digital del Terreno “MDT” (Etxeberria *et al.*, 2002).

El estudio realizado por Patel (2009), para la cuenca del lago Wreck al sur de New Jersey, incorporó datos de elevación detallada (información LIDAR del Condado de Monmouth) en el HEC-RAS y HEC-HMS mejorando la eficiencia del modelo de cuenca. La planicie de inundación modelada mostró una mayor precisión en comparación con la llanura de inundación modelada por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) para el periodo de retorno de 100 años (Patel, 2009).

El modelo propuesto por Aranoa (2011) para el sector de Pejibaye y San Rafael de Platanares (Costa Rica), comparó diversas metodologías de modelamiento para la delimitación de la cuenca, así como el tratamiento de la información y los resultados obtenidos. Se adoptaron para la generación de tormentas de diseño dos metodologías, en primer lugar, se utilizaron las tormentas tipo, propuestas por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS). La segunda alternativa, empleó necesariamente las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), que representan las intensidades máximas alcanzadas en una localización, dada una duración y una frecuencia determinadas. Con ello, se creó una tormenta de diseño de 12 horas de duración, que se basa en las curvas IDF para la zona de estudio, y en las curvas intensidad área empleadas normalmente por HEC-HMS (USACE, 2000 en Aranoa, 2011). Según los resultados se seleccionó la hipótesis que usa las curvas IDF, ya que presentaron mayor similitud con las curvas de recurrencia de caudales calculados en

base a las mediciones directas, considerando caudales para periodos de retorno de 100 y 500 años (Aranoa, 2011).

Así mismo, comparó el comportamiento de dos modelos hidrodinámicos: HEC-RAS (1D) e IBER (2D), en dos tramos de la red de drenaje de estudio, con objeto de evaluar su mayor o menor aptitud para su aplicación en la valoración de la amenaza de inundación. Como resultado se encontraron que los modelos presentan gran variación cuando la inundación ocupa grandes llanuras, ya que aumenta el componente multidireccional, seleccionado el modelo hidrodinámico de simulación bidimensional de cauces “IBER” para grandes caudales (Aranoa, 2011).

En el 2015, se realizó un “Análisis hidrológico e hidráulico para el sistema de drenaje de obras de arte mayor en el proyecto PACALORI”, del sistema Calabí, en la provincia de Los Ríos, Ecuador. Por parte de Centeno (2015) con el propósito de establecer los parámetros de diseño en los puentes que serán afectados por el proyecto. Dentro del análisis intervienen aspectos hidrometeorológicos, morfológicos, hidrológicos e hidráulicos, referentes al drenaje, flujo y socavación general. Con el programa HEC-HMS se determinaron caudales máximos para un período de retorno de 100 años para las diversas cuencas, con valores que varían desde 33,8 m³/s hasta los 2548,7 m³/s (Centeno Dávila, 2015).

Aplicando el programa HEC-RAS se aprecia el desbordamiento de los cauces en dos de los puentes, sobre el río Paján y Las Tablas. Además, se determinaron parámetros hidráulicos referentes a las Isóbatas que varían entre 1,98 m a 5,58 m; y las Isótacas fluctúan entre 1,01 m/s a 6,26 m/s, se empleó el régimen subcrítico en todo el proyecto a excepción del río Las Tablas, en donde es supercrítico. Esta investigación concluye, que las condiciones de ubicación para los puentes del río Lagarto y Lechugal son favorables, no así, para los puentes del río Paján y Las

Tablas al ser estos inundados; pero habiendo una posible solución de emplazar un nuevo puente aguas abajo, en el río Las Tablas (Centeno Dávila, 2015).

Para Colombia, en el año 2007 se presentó una metodología para la generación de mapas de inundación y zonas de amenaza, a partir de la precipitación, esta se enfocó en la cuenca del río las Ceibas, Neiva (Rodríguez *et al.*, 2007). El desarrollo de este estudio arrojó como resultado la estimación de la precipitación efectiva usando el método de análisis de curva. Para la transformación de precipitación de excesos en escorrentía directa, se empleó el hidrograma triangular del SCS y el método de tránsito de Muskingum para el tránsito hidrológico de la creciente entre tramos.

Como conclusión del modelo HEC-HMS, se deben tener dos conjuntos de parámetros diferentes para simular satisfactoriamente en condiciones de suelo húmedo y seco, para que no exista una subestimación del volumen total de la hidrógrafa. Por su parte, la implementación de la versión usada de HEC-RAS, posee restricciones asociadas a su característica 1D, como solución para flujo no permanente se debió definir las condiciones de frontera y la topología con mucho cuidado, debido a su alta sensibilidad (Rodríguez *et al.*, 2007).

En el año 2013, se realizó una modelación del tránsito de crecientes para un tramo del río Medellín por parte de Marín Muños (2013) en la cual se calibró un modelo de inundaciones para este río, que se encuentra entre Girardota y el Hatillo, donde se realizó una caracterización hidrológica, para la que se usó información de 6 estaciones (3 limnigráficas y 3 pluviográficas), de las cuales se seleccionaron los datos según las fechas en las cuales se presentaron las crecientes. Definido esto, se realizó un modelamiento hidrológico de las quebradas tributarias, para la cual se empleó el programa HEC-HMS, que calculó los caudales para estas quebradas. En la última etapa se realizó la modelación del tránsito de las crecientes usando la modelación hidráulica que se

calculó en HEC-RAS, con el fin de obtener un modelo que pudo representar un evento de inundación para el sector de estudio (Marín Muños, 2013).

En el municipio de La Dorada (Caldas), en el 2013, se realizó un estudio de amenazas por inundación, para un tramo de 13 km del río Magdalena. Los datos hidrológicos fueron adquiridos de 5 estaciones hidrológicas. De las series diarias de caudal se obtuvieron los máximos diarios registrados, durante los periodos de retorno: 5,15, 30, 50, 100, 500 años. Posteriormente se aplicaron múltiples funciones de distribución extrema para reducir la incertidumbre, para esto se empleó el programa AFINS. Empleando HEC-RAS se obtuvieron mapas de velocidades y mapa de zonificación por amenaza (Aristizabal, 2013).

En la siguiente figura (Fig.7) se detalla la línea de tiempo correspondiente al estado del arte, lo que incluye los avances sobre el estudio y la implementación de las herramientas para el análisis de amenaza por inundación.

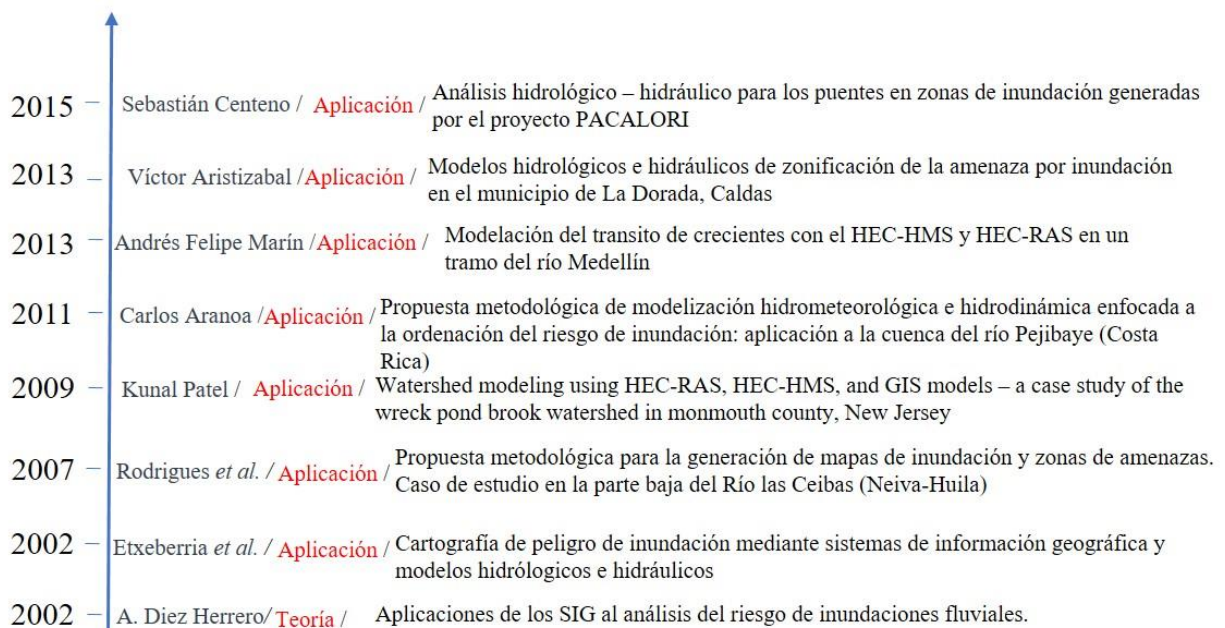


Figura 7. Línea del tiempo de los avances sobre el estudio y aplicación a la zonificación de la amenaza por inundación, empleando HEC-RAS y HEC-HMS.

8 Marco teórico

Durante el siguiente capítulo se tratarán los aspectos teóricos y técnicos referentes a cada uno de las herramientas y metodologías empleadas para este estudio y de esta forma contextualizar y comprender los resultados.

Se entiende por *inundación* a la “Acumulación temporal de agua fuera de los cauces y áreas de reserva hídrica de las redes de drenaje (naturales y construidas). Se presentan debido a que los cauces en su escorrentía superan la capacidad de retención e infiltración del suelo y/o la capacidad de transporte de los canales” (SNGRD, 2017).

El aumento de las precipitaciones a valores no usuales, es el factor amenazante más importante en la generación de inundaciones. La *precipitación* es el agua procedente de la atmósfera que cae sobre la superficie terrestre, ya sea en forma líquida o sólida. La precipitación que ocurre en una zona no es constante y el escurrimiento que genera depende en gran medida de la extensión donde tiene lugar y de las características de esta (Salinas & Jiménez, 2014).

La precipitación en el transcurso del tiempo puede medirse por su intensidad o por la altura total de la misma. La cantidad de lluvia que se precipita en cierto tiempo es conocida como la *intensidad de precipitación* (altura de precipitación por unidad de tiempo) (Salinas & Jiménez, 2014).

Estos excesos de precipitación que no se infiltran, denominados *escorrentía superficial*, discurren rápidamente por la red de drenaje de la cuenca hidrográfica concentrándose en los cauces (Robredo, 2003). En consecuencia, el aumento de las precipitaciones a magnitudes extraordinarias,

genera que la superficie de la cuenca no sea capaz de asimilarlas en su totalidad, resultando en un aumento del *caudal*, que se define como “el volumen por unidad de tiempo” (Quiñones & Guzmán, 1986).

La unidad geográfica y el sistema de análisis ideal de los recursos hídricos, que permite realizar un balance superficial entre el agua que entra al sistema, es decir la precipitación y el agua que sale de este, es decir la escorrentía, se denomina *cuenca hidrográfica* (Reyes, *et al.*, 2010).

De acuerdo con las definiciones dadas por la política nacional de gestión del riesgo de desastres, artículo 4 de la ley 1523 de 2012, se define a la *amenaza* como “El peligro latente de un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, que se presenta con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.” (Congreso de la Republica de Colombia, 2012).

La amenaza por inundación está asociada con la presencia de grandes caudales que puedan generar situaciones en las cuales se desborde el agua de su curso natural. De acuerdo con el ciclo hidrológico, el caudal de salida de una cuenca es función de la precipitación, junto con otros aspectos como la infiltración del terreno y parámetros físicos (área de la cuenca, tiempos de concentración, pendientes del cauce, densidad de drenajes, entre otros) (González Velandia, 2014).

Con el fin analizar cuantitativamente las características físicas de una cuenca hidrográfica es necesario realizar una *caracterización morfométrica*, que resulta de gran utilidad en el análisis espacial de cuencas hídricas, y que puede ayudar a determinar las características ambientales del

territorio a partir de la descripción de la geometría de las formas superficiales (Gaspari, 2012) y a su vez, permite determinar la semejanza de flujos de diferentes tamaños (Ruiz, 2001).

Para determinar la geometría de la cuenca es necesario definir aspectos morfométricos principales como, el área de la cuenca, el perímetro de la cuenca y la longitud. De esta manera se define el **área de la cuenca (A)** (Tabla 1.), como la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido, directa o indirectamente a un mismo cauce natural. Y hace referencia a la superficie que se encuentra delimitada por la divisoria de aguas de la zona de estudio (Reyes *et al.*, 2010).

Tabla 1. Clasificación del área de la cuenca según Materón (1986). Modificado de Reyes (2010).

Área (Km ²)	Nombre
< 5	Unidad
5 – 20	Sector
20 – 100	Microcuenca
100 – 300	Subcuenca
> 300	Cuenca

La línea formada por el parteaguas o la divisoria de la cuenca de estudio se define como **Perímetro (P)** (Reyes *et al.*, 2010). La **longitud de la cuenca (l)** se define como la distancia horizontal desde la desembocadura de la cuenca y otro punto más lejano de la cuenca. El área de la cuenca se mide en Km², el perímetro y la longitud en Km (Reyes *et al.*, 2010).

Los principales parámetros para determinar la geometría de la cuenca se asocian a la forma de la cuenca, los parámetros de relieve y a las características de la red de drenaje. La forma de la cuenca juega un papel importante en el comportamiento hidrológico, ya que, las cuencas de igual

área, pero de distinta forma, se comportan diferente, lo que condiciona la velocidad del escurrimiento superficial (Lux Cardona, 2016).

La forma de la cuenca ha sido comparada con distintas formas ideales. Por una parte, el *índice de compacidad o índice de Gravelius* (K_c) (Gravelius, 1914) (Eq. 1) relaciona la longitud del perímetro (P) de la cuenca con respecto al área (A) de un círculo con igual superficie a la de la cuenca, de esta manera se define como es la forma de la cuenca con respecto al círculo.

$$K_c = 0,28 \times \left(\frac{P}{\sqrt{A}} \right) \quad (1)$$

Como su nombre lo indica el índice de compacidad, señala la mayor o menor compacidad de la cuenca, entre más cercano se encuentra a uno, más circular es la forma de la cuenca y por tanto más compacta, si por el contrario el índice de compacidad es mayor a uno, su compacidad disminuye (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de índice de compacidad. Modificado de Reyes (2010)

Parámetro	Interpretación
$K_c=1-1,25$	Cuenca redonda a oval redonda
$K_c=1,25-1,5$	Cuenca de oval redonda a oval oblonga
$K_c=1,5-1,75$	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga

Por otra parte, el factor de *forma de Horton* (F), (Eq. 2), compara el área de la cuenca con la de un cuadrado que tenga lados iguales al eje mayor de la cuenca (Horton, 1932). Este índice denota la forma alargada de la cuenca y es la relación entre el área de la cuenca (A) y el cuadrado de la longitud del máximo recorrido (L_m) (Tabla 3).

$$F = \frac{A}{L_m^2} \quad (2)$$

Tabla 3. Clasificación según el parámetro de la forma. Modificado de Reyes (2010)

Parámetro	Interpretación
$F > 1$	Cuenca achatada
$F < 1$	Cuenca alargada

Si la relación del factor de forma es menor a uno, la cuenca va a tener una forma rectangular, y, por tanto, una baja susceptibilidad a las crecientes que una con la misma área y mayor factor de forma. Si, por el contrario, el factor de forma es mayor a la unidad, la forma de la cuenca será más cuadrada, encontrándose un río principal más corto y por tanto una tendencia a que exista una gran concentración del escurrimiento cuando concurren grandes precipitaciones y por ende una mayor tendencia a ocurrencias de crecientes (Lux Cardona, 2016).

Según la guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas de Reyes (2010), otro parámetro para definir la cuenca con respecto a su forma es el **Índice de alargamiento** (I_a) (Eq. 3) el cual muestra el comportamiento de la forma de la cuenca (Tabla 4), en este caso con respecto a su tendencia de ser alargada, en relación con su longitud axial (L_m) y el ancho máximo (I) de la cuenca (Reyes *et al.*, 2010).

$$I_a = \frac{L_m}{I} \quad (3)$$

Tabla 4. Clasificación según el parámetro del índice de alargamiento. Modificado de Reyes (2010)

Parámetro	Interpretación
$I_a > 1$	Cuenca alargada
$I_a \approx 1$	Cuenca achatada

La evaluación de la homogeneidad en la distribución de la red de drenaje se denota por **Índice asimétrico** (I_{as}) (Eq.4) (Tabla 5) que consiste entre la relación del área de las vertientes, la mayor (A_{may}) y la menor (A_{men}) (Reyes *et al.*, 2010).

$$I_{as} = \frac{A_{may}}{A_{men}} \quad (4)$$

Tabla 5. Clasificación según el parámetro del índice asimétrico. Modificado de Reyes (2010)

Parámetro	Interpretación
$I_{as} > 1$	Cauce principal bastante recargado a una de las vertientes
$I_{as} \approx 1$	Distribución uniforme del cauce principal

Dentro de los parámetros morfométricos a analizar, también deben considerarse aquellos asociados al relieve, ya que este afecta la concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje. Entre estos parámetros se encuentra, en primer lugar, la **pendiente media de la cuenca** (S_m) (Eq. 5) (Tabla 6), la cual hace referencia a la variación de la inclinación de la cuenca, y toma su importancia en la cantidad de la erosión o sedimentación (Reyes *et al.*, 2010).

El cálculo en la estimación de la pendiente media de la cuenca se puede realizar empleando el método de Alvord en Reyes (2010), para su cálculo se necesitan datos como la diferencia de nivel entre las curvas de nivel del plano topográfico (D), el área total de la cuenca (A) y la sumatoria de las longitudes de la curva de nivel que están dentro de la cuenca (L_c).

$$S_m = \frac{D \cdot L_c}{A} \quad (5)$$

Tabla 6. Clasificación de cuencas según su pendiente media. Modificado de Ortiz (2004) en Reyes (2010).

Pendiente media (%)	Tipo de relieve	Símbolo
0-3	Plano	P ₁
3-7	Suave	P ₂
7-12	Medianamente Accidentado	P ₃
12-20	Accidentado	P ₄
20-35	Fuertemente Accidentado	P ₅
35-50	Muy Fuertemente Accidentado	P ₆
50-75	Escarpado	P ₇
> 75	Muy Escarpado	P ₈

Los datos de variación en la elevación de la cuenca son significativos para la representación del relieve, ya que estos muestran la influencia de la altitud con respecto al comportamiento de la temperatura y la precipitación (Díaz Delgado *et al.*, 1999), para conocer la distribución del área de la cuenca en diferentes niveles topográficos se emplea la curva hipsométrica.

La *curva hipsométrica* (Fig. 8), representa gráficamente las elevaciones del terreno en función del área correspondiente, y permite calcular la elevación media de la cuenca (Campos Aranda, 1998). Así mismo representa las características del ciclo erosivo y del tipo de cuenca, de esta manera se puede observar, por una parte, que la cuenca **A** al ser una cuenca que posee una mayor cantidad de área a mayor altura que las demás cuencas posee un gran potencial erosivo, y que se encuentra en su fase de juventud. Por otra parte, la cuenca **B**, es una cuenca que se encuentra en una fase de equilibrio, es geológicamente una cuenca madura y generalmente son cuencas que se encuentran a pie de montaña. Por último, la curva de la cuenca **C**, posee una mayor cantidad de área a poca altura, por lo tanto, se considera una cuenca sedimentaria, es decir que acumula gran cantidad de material porque ya pasó su etapa de erosión, es una cuenca que se encuentra en su fase de vejez (Campos Aranda, 1998).

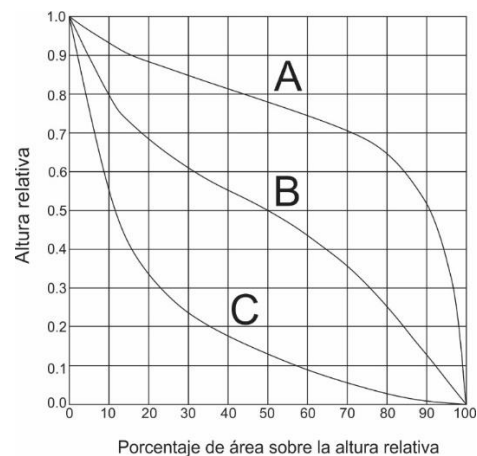


Figura 8. Curva hipsométrica, características del ciclo erosivo y del tipo de cuenca. Modificado de Campos (1998)

La *elevación media* (E_m) (Eq. 6) de la cuenca hace referencia a la cota de la curva de nivel que divide la cuenca en dos zonas con áreas iguales, es decir, aquella en donde la elevación corresponde al 50% del área total (Reyes *et al.*, 2010). Para su cálculo se emplean, el promedio de las curvas de nivel que se encuentran entre cada franja (e_i), el área de cada franja (A_i) y el área total de la cuenca (A_t).

$$E_m = \frac{\sum A_i \times e_i}{A_t} \quad (6)$$

Los últimos dos coeficientes en función del relieve se relacionan directamente con la elevación media de la cuenca y hacen referencia al *coeficiente de masividad o de Marotone* (K_m) (Eq. 7), el cual indica la relación entre la elevación media de la cuenca (h) y el área total de la cuenca (A_t) y al *coeficiente orográfico o de Fournier* (C_o) (Eq. 8), el cual relaciona al cuadrado de la elevación media de la cuenca (h) y el área total de la cuenca (A_t) (Marmol, 2008).

Por una parte, el coeficiente de masividad se encarga de diferenciar aquellas cuencas con elevación media igual, pero con distinto relieve. Si el coeficiente de masividad posee valores altos, las cuencas serán montañosas y si son bajos, serán cuencas planas (Tabla 7) (Reyes *et al.*, 2010).

$$K_m = \frac{h}{A_t} \quad (7)$$

Tabla 7. Clases de masividad. Modificado del Instituto Nacional de Ecología, 2004 en Reyes (2010)

Rangos de K_m	Clases de masividad
0-35	Moderadamente montañosa
35-70	Montañosa
70-105	Muy montañosa

Por otra parte, el coeficiente orográfico caracteriza el relieve en dos tipos de cuencas, el primer tipo de cuenca se caracteriza por un relieve accidentado y se presenta cuando el $C_o > 6$, mientras

que, $C_o < 6$, representa un relieve poco accidentado propio de cuencas extensas y de baja pendiente (Reyes *et al.*, 2010).

$$C_o = \frac{h^2}{A_t} \quad (8)$$

En el completo análisis morfométrico de una cuenca, es necesario realizar una caracterización de la red de drenaje, la cual se encuentra conformada por el cauce principal y sus respectivos afluentes. De acuerdo con las diversas características, Horton (1945) y Strahler, (1964) establecieron distintos índices (Farfán *et al.*, 2010).

De acuerdo con Horton (1945), el **número de orden** (N_u) de cauce es una clasificación que se le da a los diferentes cauces y que toman un valor de acuerdo con el grado de bifurcación (Reyes *et al.*, 2010). Estos pueden variar desde primero, segundo, tercero ... etc. ordenes.

Se consideran corrientes de primer orden, aquellas corrientes que no poseen afluentes y que contienen agua de nacimiento. Al unirse dos corrientes de orden uno, se formará una corriente de orden dos, y así sucesivamente (Lux Cardona, 2016)

A la relación existente entre el número total de cauces de cierto orden (n_i) con el número total de cauce de orden inmediatamente superior (n_{i+1}), se le denomina **relación de bifurcación** (R_b) (Eq. 9), la cual fue propuesta por Horton.

$$R_b = \frac{n_i}{n_{i+1}} \quad (9)$$

Horton, (1945) reconoció la relación de bifurcación como una de las características más importantes del drenaje de la cuenca. Esta relación permite comprender las diferencias importantes en las condiciones climáticas, las características geológicas, estructurales, la litología y la etapa de desarrollo de la cuenca (Horton, 1945).

El factor de bifurcación normalmente tiene un valor entre 3-5. Los valores muy altos de R_b indican regiones muy montañosas y rocosas con fuertes pendientes o cuencas alargadas en la dirección del río de mayor orden, además, presentan una rápida concentración de escorrentía, pero con picos de crecidas. Las cuencas con bajo R_b por su parte producen hidrogramas con picos altos, y si poseen forma redondeada presentan una mayor amenaza por inundación (Reyes *et al.*, 2010).

Definir la **densidad de drenaje** (D_d) (Eq.10) es de gran importancia ya que, esta implica la velocidad en la respuesta frente a una tormenta. Horton (1945) la define como el cociente existente entre la suma de longitud de los cauces ($\sum L_i$) y el área total de la cuenca (A_T).

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A_T} \quad (10)$$

Según Jiménez, (1992) los valores de densidad de drenaje que se encuentren próximos a 0,5 Km/Km² corresponden a cuencas pobremente drenadas, mientras, que los valores mayores a 3,5 Km/Km² indican una red de drenaje eficiente, es decir una densidad de drenaje alta (Reyes *et al.*, 2010).

El **índice de torrencialidad** (C_T) (Eq. 11) es un indicador de la erodabilidad de una región, relacionado a la capacidad de descarga de una cuenca. El índice de torrencialidad se define como el cociente entre el número de corrientes de primer orden (n_1) y la superficie total de la cuenca (A_T) en km² (Busnelli & Horta, 2014). Altos valores, indican elevada susceptibilidad a la erosión y mayor grado de torrencialidad para la cuenca (Reyes *et al.*, 2010).

$$C_T = \frac{n_1}{A_T} \quad (11)$$

A partir de las características morfométricas de la cuenca y meteorológicas de una región, se puede diseñar un modelo hidrológico. Los *modelos hidrológicos* facilitan la manipulación de las variables que intervienen en el proceso de conversión lluvia-caudal, aportando datos sobre la distribución espacial de la escorrentía superficial (Ortiz & Triviño, 2004).

Los modelos encargados de simular el comportamiento mecánico del agua en condiciones abiertas o cerradas (tales como cauces, canales, tuberías entre otros) se denominan *modelos hidráulicos* (Lázaro López, 1997) y permiten mejorar la calidad de la cartografía sobre zonas inundables y zonas con amenaza por inundación (Ortiz & Triviño, 2004).

En la actualidad, herramientas metodológicas tales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la interpretación de imágenes satelitales, permiten realizar la caracterización espacio temporal de las propiedades morfométricas de las cuencas hídricas y de las redes de drenaje (Gaspari, 2012).

El desarrollo del presente trabajo, implicó el diseño de un modelo hidrológico para el que se empleó el programa HEC-HMS en su versión 3.5 y un modelamiento hidráulico empleando el programa HEC-RAS en su versión 5.0.3, en conjunto con sus extensiones para ArcMap 10.3.

El *sistema de modelamiento hidrológico (HEC-HMS)* es un programa diseñado para simular los procesos de precipitación-escorrentía de las diferentes configuraciones de tipos de drenaje. Es de gran utilidad en la resolución de problemas como la hidrología de las inundaciones de pequeñas corrientes de las cuencas hidrográficas (Fleming & Brauer, 2016).

La implementación del programa HEC-HMS presenta varias fases, en primer lugar, se debe de calcular la probabilidad de ocurrencia del valor de precipitación para eventos extremos mediante métodos paramétricos basado en el ajuste de determinadas distribuciones de probabilidad de los

datos de las estaciones pluviométricas, a partir de esto se realizó la segunda fase que consiste en el cálculo de los caudales (Fleming & Brauer, 2016).

Las *distribuciones de probabilidad* son funciones matemáticas que relacionan la magnitud de un evento con su probabilidad de ocurrencia. Dicha probabilidad puede expresarse, también, en forma de frecuencia por medio del periodo de retorno o recurrencia (Beguería, 2002). Para la evaluación de las precipitaciones, en grandes periodos de retorno, se puede emplear la distribución de Valores Extremos tipo 1 (EV1), también conocida como distribución de Gumbel (Eq. 12) por la contribución a su desarrollo de este investigador (Gumbel, 1958). La función de distribución acumulada Gumbel

$$F(x \leq X) = e^{-e^{-\frac{x-\beta}{\alpha}}}, k \neq 0 \quad (12)$$

Donde x , α , β son los parámetros de distribución (Beguería, 2002).

El *periodo de retorno* es el tiempo que, en promedio, debe transcurrir para que se presente un evento igual o mayor a una cierta magnitud. Normalmente, el tiempo que se usa son años, y la magnitud del evento puede ser el escurrimiento, expresado como una lámina de precipitación o una profundidad de inundación (Salinas & Jiménez, 2014).

Una vez evaluadas las precipitaciones para diferentes periodos de retorno, se procede a definir las *curvas de intensidad de duración (IDF)*, las cuales son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno (Temez, 1978).

Ya definidas las curvas de intensidad de duración, deben definirse parámetros morfométricos y el número de curva, para esto deben emplearse el MDE y los usos del suelo respectivamente, así como también, se utiliza la herramienta para ArcMap, HEC-GeoHMS.

La extensión de *modelado hidrológico geoespacial (HEC-GeoHMS)* se ha desarrollado como un conjunto de herramientas de hidrología. HEC-GeoHMS utiliza ArcMap para desarrollar una serie de entradas de modelado hidrológico para HEC-HMS. Al analizar los datos digitales del terreno, HEC-GeoHMS transforma las rutas de drenaje y los límites de las cuencas hidrográficas en una estructura de datos hidrológicos que representa la red de drenaje. El programa permite visualizar información espacial, documentar características de cuencas hidrográficas, realizar análisis espaciales y delinear subcuencas y corrientes (Fleming & Brauer, 2016).

Ahora, el primer parámetro a trabajar en HEC-HMS es la *subcuenca*, la cual es utilizado para representar la parte física de la cuenca y es definida como la superficie de terreno cuya escorrentía superficial fluye en su totalidad a través de un drenaje hacia un determinado punto de un curso de agua y, donde se realizarán los cálculos de las precipitaciones las cuales serán transformadas en caudales de salida para cada una de las subcuencas (Scharffenberg, 2013).

Una vez, determinada la unidad base se procederá a definir los 4 parámetros usados por HEC-HMS para controlar las características de cada una de las subcuencas generadas.

El primero de estos parámetros es el *método de perdida*, el cual se encarga de realizar los cálculos de infiltraciones en la subcuenca. Este cálculo lo realiza mediante un análisis de la precipitación que se infiltra en el terreno más la precipitación que queda en la superficie, dando esta suma como resultado el total de la precipitación que cae sobre la zona. El programa nos permite realizar el cálculo por 12 métodos diferentes, y en caso de no elegir alguno la subcuenca

no calculará la infiltración y las precipitaciones que caigan sobre el terreno se tomaran como exceso (Scharffenberg, 2013).

El segundo parámetro es el *método de transformación* y se encarga de los cálculos de la escorrentía superficial dentro de la subcuenca, en total se pueden usar 8 métodos diferentes, y si no se escoge ningún método, dentro de la subcuenca se transformará todo el exceso de precipitación como escorrentía (Scharffenberg, 2013).

El tercer parámetro es el *método de flujo base* el cual se encarga del cálculo de las aguas subterráneas que contribuyen al flujo de la corriente durante un evento de precipitación, para este cálculo se tienen 8 métodos a elegir, y si no se elige algún método, el flujo base no tendrá efecto en el caudal de salida, con lo cual solo se obtendrá el caudal mediante el método de transformación al solo tener en cuenta la escorrentía superficial (Scharffenberg, 2013).

Y el último parámetro es el *método de ruta* que se encarga de controlar cómo se comporta el hidrograma a medida que el agua se está moviendo por cada una de las subcuencas, y para este método se tienen 7 métodos diferentes (Scharffenberg, 2013).

Otro parámetro utilizado es el método del *número de curva* que “fue elaborado por el SCS empleado para la obtención directa de la escorrentía superficial de una lluvia aislada, a partir de las características del suelo, uso del mismo y su cubierta vegetal” (Lopez Cadena de Llano, 1994).

El tiempo que tarda en llegar a la salida, o punto de desagüe de la cuenca, la gota de agua que procede desde el punto más alejado hidráulicamente de la cuenca, se define como *tiempo de concentración* (T_c) (Eq. 13) (Reyes *et al.*, 2010). Según Temez (1977), el tiempo de concentración, se mide en relación con la longitud del recorrido más largo del agua en la subcuenca, (L) en Km,

y la pendiente media del recorrido más largo en la subcuenca, (i) en m/m (Pascual Aguilar & Díaz Martín, 2016).

$$T_c = 0.3 \times \left(\frac{L}{i^{0.25}}\right)^{0.76} \quad (13)$$

El *tiempo de retardo* (T_r)(Eq.14) se define como el tiempo transcurrido entre el centroide del hietograma y el centroide del hidrograma de escorrentía, o también como el tiempo transcurrido entre el centroide del hietograma y el caudal máximo registrado durante una avenida (caudal punta). Y según el SCS el tiempo de retardo puede ser calculado mediante una relación con el tiempo de concentración (Veléz Upegui & Botero Gutiérrez, 2010).

$$T_r = 0.6 * T_c \quad (14)$$

Teniendo en cuenta que la representación gráfica de los caudales del curso de agua de una cuenca en función del tiempo se denomina hidrograma (Monsalve Sáenz, 1995)

El efecto producido por el caudal para diferentes periodos de retorno es evaluado usando el *sistema de análisis de ríos (HEC-RAS)*, el cual es un programa de modelamiento hidráulico creado por el cuerpo de ingenieros de la armada de Estados Unidos, que permite analizar cauces naturales o canales artificiales (USACE, 2016).

El sistema HEC-RAS trabaja en conjunto con la extensión *HEC-GeoRAS* desarrollada entre el cuerpo de ingenieros de la armada de Estados Unidos (HEC) y el Instituto de Investigación de Sistemas Ambientales (ESRI). Se trata de un conjunto de herramientas diseñadas para procesar y georreferenciar los datos necesarios en el SIG de tal manera que se simulen dentro de las condiciones establecidas para el proyecto (Solano Zuñiga & Vintimilla Villavicencio, 2013).

Utilizando la extensión HEC-GeoRAS se define la información geométrica, la cual consiste en la creación y digitalización de las condiciones de frontera (eje del cauce, las orillas y las líneas del flujo) y el establecimiento del mapa de usos del suelo y las condiciones de profundidad como las secciones transversales.

Las *secciones transversales* son las encargadas de extraer la información altitudinal del terreno y su interacción con otros elementos sirve como referencia para la posterior localización en HEC-RAS de los atributos, como las áreas sin flujo, las orillas, los puentes, obstrucciones y los valores del Número de Manning (Valencia, 2017).

El *número n de Manning* fue presentado en 1889 por Robert Manning e indica la resistencia que ofrece una superficie al fluido en función de la condición de rugosidad de esa superficie. Cuanto mayor sea la rugosidad de una superficie, mayor será la resistencia que ofrece al flujo y por tanto más alto será este valor (Chow, 1994). la Tabla 8 muestra la clasificación utilizada para esta investigación.

Tabla 8. Valores del coeficiente de rugosidad *n* de Manning, Modificado de Ven Te Chow (1994).

Uso y descripción	Valor de N de Manning
Urbano	0,017
Pastos	0,03
Corrientes naturales	0,035
Áreas cultivadas	0,04
Arbustos	0,05
Bosques	0,1

La información geométrica del cauce establecida en HEC-geoRAS es imprescindible para configurar de manera adecuada el modelo de inundación en HEC-RAS. Este programa contiene varios componentes de análisis fluvial, modela perfiles de superficies de agua bajo condiciones de (1) flujo permanente 1D, (2) flujo no permanente en 1D y 2D, y realiza cálculos de (3) transporte

de sedimentos y (4) análisis de calidad de agua. Los cuatro componentes utilizan una representación de datos geométricos y cálculos hidráulicos (Brunner, 2016).

Además de estos componentes de análisis fluvial, el programa contiene diversas características de diseño hidráulico que se pueden mostrar una vez que se computan los perfiles básicos de la superficie del agua (Brunner, 2016).

El cálculo de los perfiles de la superficie de agua, HEC-RAS lo resuelve mediante un procedimiento interactivo denominado el método del paso estándar, el cual desarrolla los cálculos de ecuaciones de una sección transversal a la siguiente (Aranoa, 2011).

El modelo unidimensional para *flujo permanente* se basa en la aplicación de la ecuación de conservación de la energía descrita por Bernoulli (1738). Este componente del modelaje del sistema realiza los cálculos de los perfiles de la superficie del agua para un flujo gradualmente variado (Brunner, 2016). Debido a que el flujo de la Quebrada Miracielo es constante y su profundidad no cambia, se modela bajo condiciones de flujo permanente.

El modelamiento se puede realizar para régimen subcrítico, supercrítico, y para un régimen de flujo mixto para los perfiles de la superficie del agua, los cuales se describen a continuación. El comportamiento del flujo se ve delimitado por dos elementos, la viscosidad y la gravedad. Para definir el régimen se tiene en cuenta el *número de Froude (Fr)*, el cual se usa cuando se debe clasificar el estado de flujo en función de la acción que sobre él ejerce la gravedad (Chow, 1994).

El *flujo subcrítico* ($Fr < 1$) o tranquilo, tiene una velocidad relativa baja y la profundidad es relativamente grande, corresponde a un régimen de llanura. El *flujo supercrítico* ($Fr > 1$) o rápido, tiene una velocidad relativamente alta y poca profundidad, propios de cauces de gran pendiente o

ríos de montaña. El *flujo mixto* ($Fr=1$), es un estado teórico en corrientes naturales y representa el punto de transición entre los regímenes subcrítico y supercrítico (Chow, 1994).

9 Metodología

Con el fin de generar el mapa de amenaza por inundación en la cuenca de la Quebrada Miracielo, se implementó un modelo en HEC-HMS, con el cual se modelaron datos pluviométricos convirtiéndolos caudales máximos para un episodio de lluvia diseño de 17 horas. Estos caudales fueron ingresados al modelo HEC-RAS en donde se obtuvieron para diferentes periodos de retorno los datos de isóbatas e isotacas y de esta manera el mapa de inundaciones. Para el análisis de los resultados, fue necesario realizar un control de campo en donde se observaron los puntos críticos y se evaluó la sensibilidad del modelo. La metodología implementada en este proyecto de investigación fue llevada a cabo en cinco fases (Fig. 9).

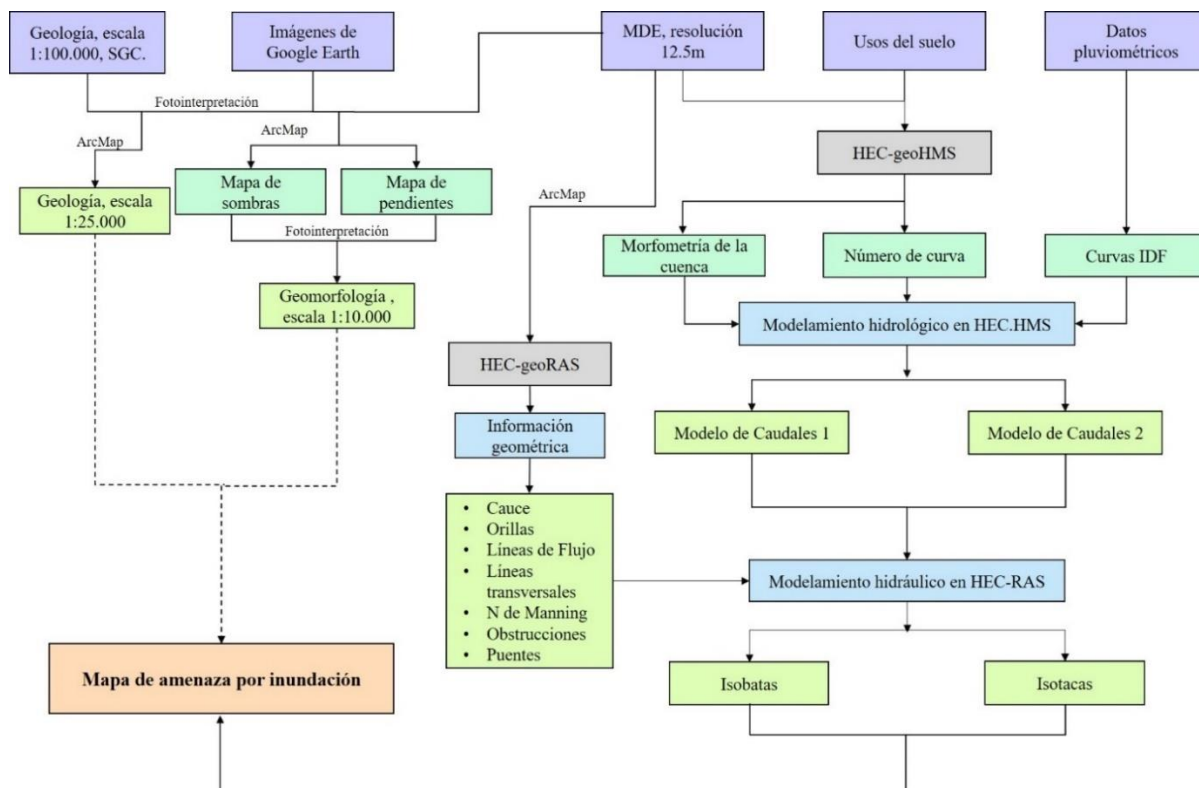


Figura 9. Metodología aplicada al proyecto de investigación.

8.1 Recopilación de información

Durante la primera fase del proyecto se procedió a consultar la estación pluviométrica del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) que se encuentra en el área de estudio (Corregimiento de Bábeaga), en este caso la estación Los Rincón (IDEAM, s.f.) (Fig. 10), de donde se tomaron los datos de pluviosidad (precipitaciones) para el desarrollo del modelo hidrológico en HEC-HMS 3.5. También, se consultaron datos a través de medios electrónicos como bases de datos institucionales como: CORPONOR y alcaldía municipal de Silos en su EOT. El modelo digital de elevación (MDE) con resolución 12.5 m x 12.5 m se obtuvo de la plataforma Alaska vertex y la información topográfica se tomó del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) donde se consultaron las planchas topográficas a escala 1:10.000 (Planchas 110-III-B4, 110-III-D2, 110-4-A3, 110-4-C1).

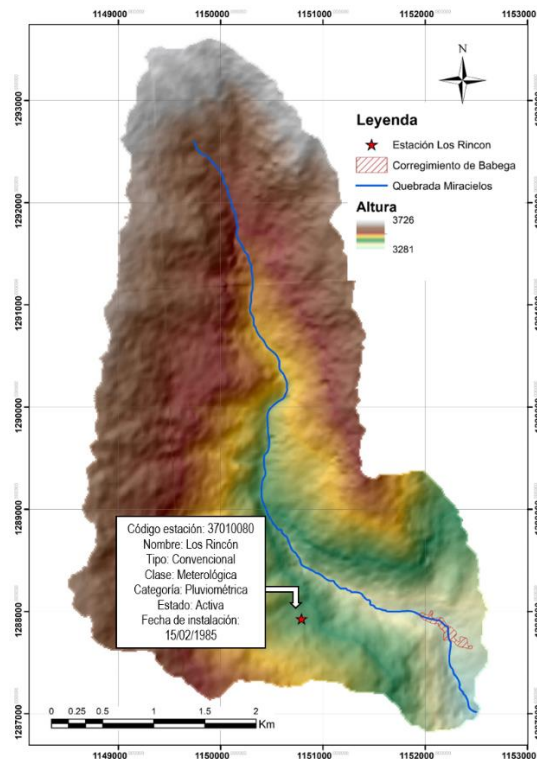


Figura 10. Estación pluviométrica Los Rincón. Tomado de IDEAM (2017)

8.2 Modelamiento hidrológico en HEC-HMS

Para el modelamiento hidrológico se establecieron cuatro etapas. La primera etapa consistió en el procesamiento de las características físicas del terreno de la cuenca de la Quebrada Miracielo mediante el uso de la herramienta HEC-geoHMS 10.3, la cual incluye un pre-procesamiento del modelo digital de elevación y la definición de las condiciones morfométricas. En la segunda etapa se escogieron los parámetros correspondientes a la hidrología de la cuenca. En la tercera etapa se procedió a realizar el análisis estadístico a los datos pluviométricos suministrados por el IDEAM, con los que se procede a generar las curvas IDF para los diferentes periodos de retorno. Todos los parámetros definidos se importaron al programa HEC-HMS para realizar la cuarta etapa, la cual consistió en el procesamiento de los datos y en la obtención de los caudales (Fig. 11).

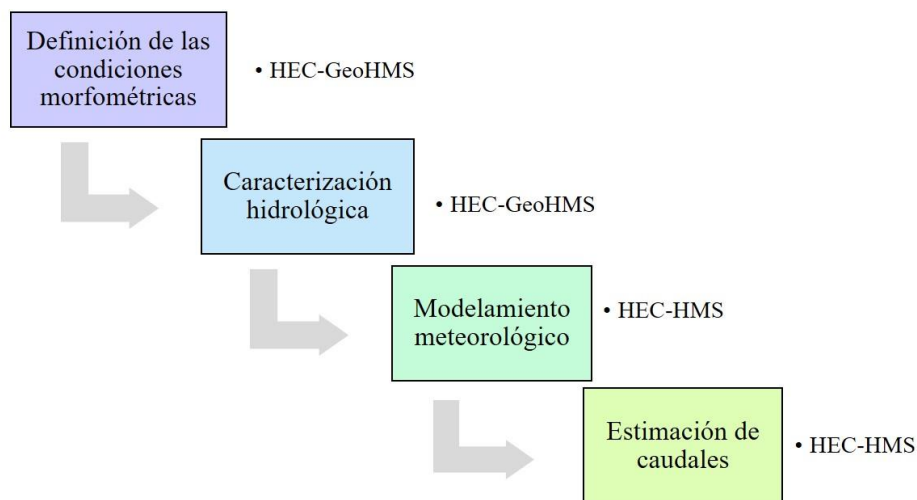


Figura 11. Metodología empleada para la obtención de caudales en HEC-HMS

También, cabe resaltar que este procedimiento se realizó dos veces, pues se generaron dos modelos de caudales, en el primer modelo se emplearon los datos puntuales de pluviometría del IDEAM, y para el segundo modelo los datos pluviométricos fueron aumentados en un 10%, debido a los cambios climáticos que se puedan presentar por factores externos.

Con el modelo digital de elevación se realizó el pre-procesamiento del terreno, determinando la dirección del flujo, el número de cauces y su orden, así mismo se delimitaron las subcuencas, que para este estudio se determinaron 24 subcuencas las cuales se fusionaron dando un total de 22 subcuencas a modelar. Estas se fusionaron debido a que no cumplían con el área mínima de trabajo en el programa.

Con el preprocesamiento realizado, se procedió a obtener las características morfométricas dentro de las cuales se encuentran el perfil de la quebrada, la longitud del drenaje, la pendiente de los drenajes que corresponden a la cuenca, los centroides de las subcuencas con sus respectivas elevaciones, y sus áreas correspondientes (Fig.12)

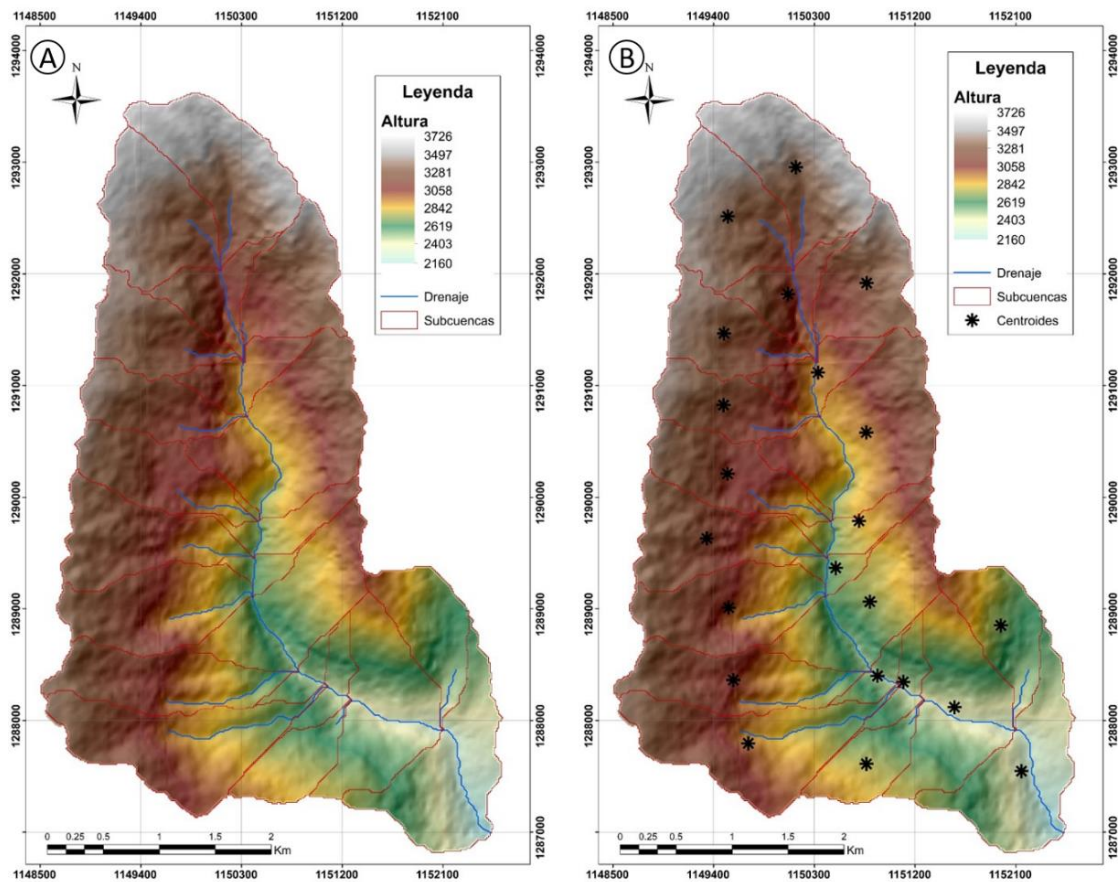


Figura 12. Representación de los elementos morfométricos realizados en HEC-geoHMS. A. subcuencas B. Centroides de cada subcuenca.

Durante esta fase se realizó también la caracterización morfométrica de la cuenca, teniendo en cuenta la guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas de Reyes (2010). La evaluación morfométrica de la cuenca de la Quebrada Miracielo se realizó tomando en cuenta aspectos correspondientes a la forma de la cuenca, los parámetros de relieve y a las características de la red de drenaje.

Para determinar la geometría de la cuenca fue necesario determinar aspectos morfométricos generales como el área de la cuenca, el perímetro de la cuenca y la longitud. De esta manera se encontró que el área de la cuenca que corresponde a 16,917 Km², lo que lo clasifica según Reyes (2010) en un sector hidrográfico, el perímetro corresponde 25,575 Km y la longitud máxima a 7,276 Km.

Teniendo de cuenta la forma de la cuenca se encontraron cuatro factores, índice de compacidad (Eq. 1), factor de forma de Horton (Eq. 2), índice de alargamiento (Eq. 3) e índice asimétrico (Eq. 4), a continuación, se explican cada uno de estos resultados (Tabla 9).

Tabla 9. Parámetros asociados al factor de forma de la cuenca.

Parámetro	Valor	Interpretación
Índice de Gravelius	1,714	Sector oval oblongo a rectangular oblongo
Factor de forma de Horton	0,319	Sector alargado
Índice de alargamiento	1,772	Sector alargado
Índice asimétrico	1,557	Cauce principal bastante recargado a una de las vertientes

Según los resultados obtenidos en la evaluación de los anteriores parámetros morfométricos del sector de la Quebrada Miracielo, se puede afirmar, que este tiene una forma oval oblonga a rectangular oblonga predominantemente alargada. Lo cual influye de manera directa en la eficiencia que puede presentar el sector en el momento de evacuar la escorrentía. Debido a su forma, el tiempo que tarda en evacuar los excesos de agua es mayor con relación a un sector en

donde el cauce sea corto. Sin embargo, el índice asimétrico indica que existe una distribución bastante recargada hacia una de las vertientes, en este caso la vertiente derecha (aguas abajo o ladera Oeste), por lo tanto, se puede afirmar que los volúmenes de escorrentía en esta vertiente son mayores y existe una mayor erodabilidad.

La topografía o relieve de una cuenca tiene influencia sobre la respuesta hidrológica, dentro de los parámetros morfométricos analizados se encuentran, la pendiente media de la cuenca (Eq. 5), la elevación media (Eq. 6), el coeficiente de masividad (Eq. 7), el coeficiente orográfico (Eq. 8), la curva hipsométrica. En la siguiente tabla se explican los resultados.

Tabla 10. Parámetros asociados al relieve.

Parámetro	Valor	Interpretación
Pendiente media	48,676	Muy fuertemente accidentado
Elevación media	3003,768	Gran altitud
Coeficiente de masividad	177,471	Muy montañoso
Coeficiente orográfico	0,5329	Poco accidentado

Tomando en cuenta que la elevación media del sector es de 3003,768 m.s.n.m y los resultados obtenidos con anterioridad de pendiente media, se puede deducir que el relieve es fuertemente accidentado y se encuentra a gran altitud, por lo que posee características de un clima micro térmico, así mismo el coeficiente de masividad indica que el relieve del sector es muy montañoso.

La curva hipsométrica (Fig. 13) para la cuenca, de acuerdo con Campos (1998), es una curva de tipo **B**, característica de cuencas que se encuentran en una etapa de equilibrio en su fase de madurez, presentan transporte de sedimentos y socavación lateral del cauce.

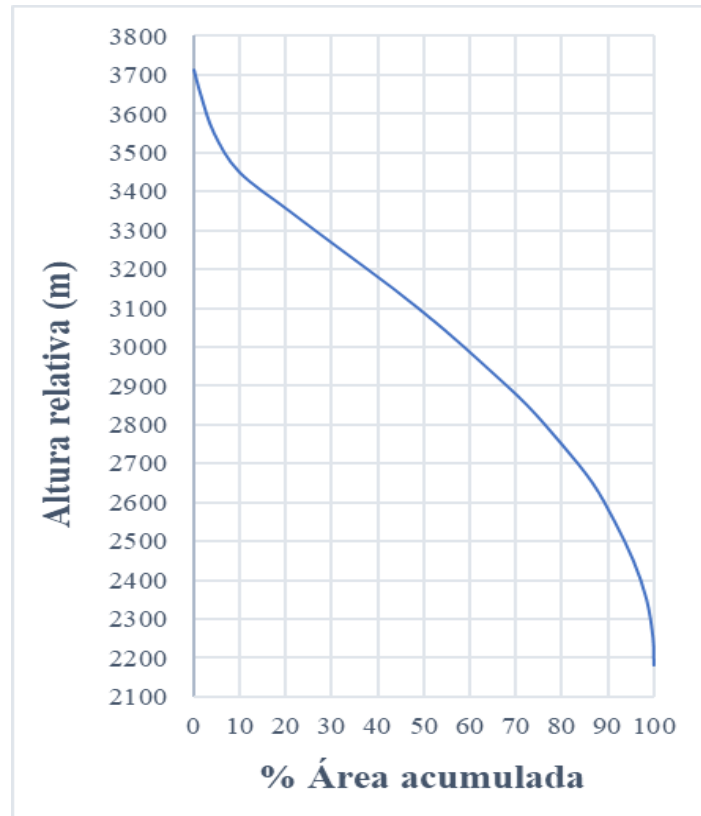


Figura 13. Curva hipsométrica para la cuenca de la Quebrada Miracielo.

Por último, se establecieron los parámetros asociados a la red del drenaje, que incluyen, para esta investigación la relación de bifurcación (Eq.9), densidad de drenaje (Eq.10) e índice de torrencialidad (Eq.11).

Según los cálculos realizados el factor de bifurcación corresponde a 1,6, se puede decir que es un factor de bifurcación bajo por lo que presenta alta amenaza por inundación, debido a la gran concentración de la escorrentía.

Los valores de densidad de drenaje corresponden a 0,774 km/km² lo que indica que el sector es pobremente drenado. Al ser la densidad de drenaje baja, una gota deberá recorrer una longitud de ladera alta, realizando la menor parte del recorrido a lo largo del cauce, es decir la velocidad de escorrentía es menor. Gracias a que este sector posee una baja densidad de drenaje aumenta la posibilidad de ocurrencia de inundaciones en la zona más baja. Por su parte, el índice de

torrencialidad evaluado es de 0,709, el cual es bajo, lo que significa que una gota de agua recorre bastante área antes llegar al cauce.

Para finalizar la primera etapa, se calcularon otros parámetros necesarios para la etapa de procesamiento en el programa HEC-HMS, como son el número de curva, el tiempo de concentración y el tiempo de retardo, para los cuales se usaron parámetros obtenidos dentro de las características morfométricas.

Con estos parámetros obtenidos se procedió a estipular la segunda etapa la cual incluye los parámetros relacionados con la hidrología de la cuenca en HEC-geoHMS 10.3, en los cuales se seleccionaron los parámetros correspondientes al método de pérdida para el cual se seleccionó el propuesto por SCS número de curva, para el método de transformación se seleccionó el SCS hidrograma único, el siguiente parámetro que se eligió fue el método de ruta para el que se seleccionó el método de Muskingum, y por último, para el método de flujo base no se seleccionó ningún parámetro, debido a que no se tienen valores de la existencia de una escorrentía previa.

La tercera etapa consistió en el cálculo del modelo de precipitación, el cual se obtuvo a partir de los datos pluviométricos que fueron suministrados por el IDEAM, a los cuales se les realizó un análisis estadístico en donde se determinó que el mejor método para su estimación fue la función GEV, con estos datos obtenidos se procedió a generar las curvas IDF para cada uno de los periodos de retorno y así obtener los hietogramas que se utilizaran en el modelo de precipitación en el programa HEC-HMS.

Durante la cuarta etapa se importaron los datos generados en los modelos morfométricos, hidrologicos y metereológicos (Fig. 14) al programa HEC-HMS, donde se elaboró el modelo de control metereológico el cual controló y evaluó las precipitaciones del hidrograma cada 3 minutos para una tormenta de duración de 3 horas, con estos parámetros se procedió a correr el programa

dando como resultado los caudales para cada uno de los diferentes periodos de retorno los cuales se pueven ver a continuacion en la Tabla 11 y Tabla 12.

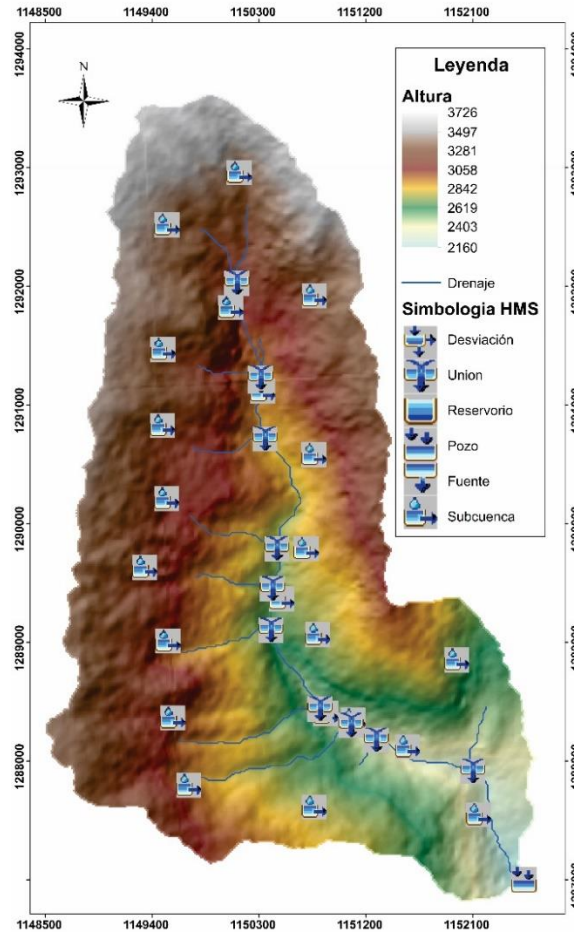


Figura 14. Representación de los elementos morfométricos en HMS

Tabla 11. Caudales máximos para el modelo 1

Periodo de retorno	Caudal (m ³ /s)
2 años	0,5
5 años	1,2
10 años	2,2
25 años	4,1
50 años	6,3
100 años	9,2
500 años	20,2

Tabla 12. Caudales máximos para el modelo 2.

Periodo de retorno	Caudal (m ³ /s)
2 años	0,7
5 años	1,7

10 años	2,8
25 años	5,2
50 años	7,8
100 años	11,2
500 años	23,8

8.3 Modelamiento hidráulico en HEC-RAS

El modelamiento hidráulico consta de tres etapas (Fig. 15), la primera etapa consiste en la creación de la geometría, para esto se empleó la extensión HEC-geoRAS en ArcMap. La segunda etapa corresponde a la simulación de los niveles de inundación en HEC-RAS para los distintos periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años, y la tercera, corresponde a la representación de los resultados obtenidos en HEC-geoRAS.

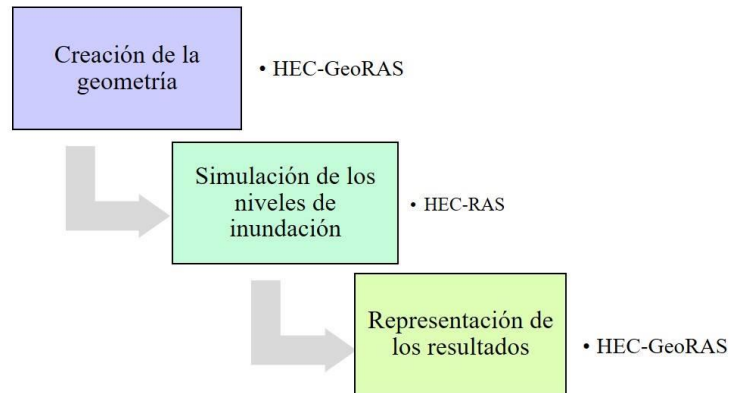


Figura 15. Etapas correspondientes al modelamiento hidráulico.

Las imágenes satelitales de Google Earth junto con el “basemap” de ArcMap, fueron de gran utilidad para obtener la información de la geometría del cauce, que corresponde a elementos longitudinales, transversales y estructurales.

El primer elemento longitudinal creado fue la línea central de la corriente, representada por el cauce principal en un tramo con una longitud de 7.268 metros. Posteriormente, se definieron las orillas, las cuales se encuentran separadas entre tres y seis metros (Fig. 16). A continuación, se

establecieron las líneas de flujo, las cuales corresponden a las llanuras de inundación y oscilan entre 13 y 45 metros.

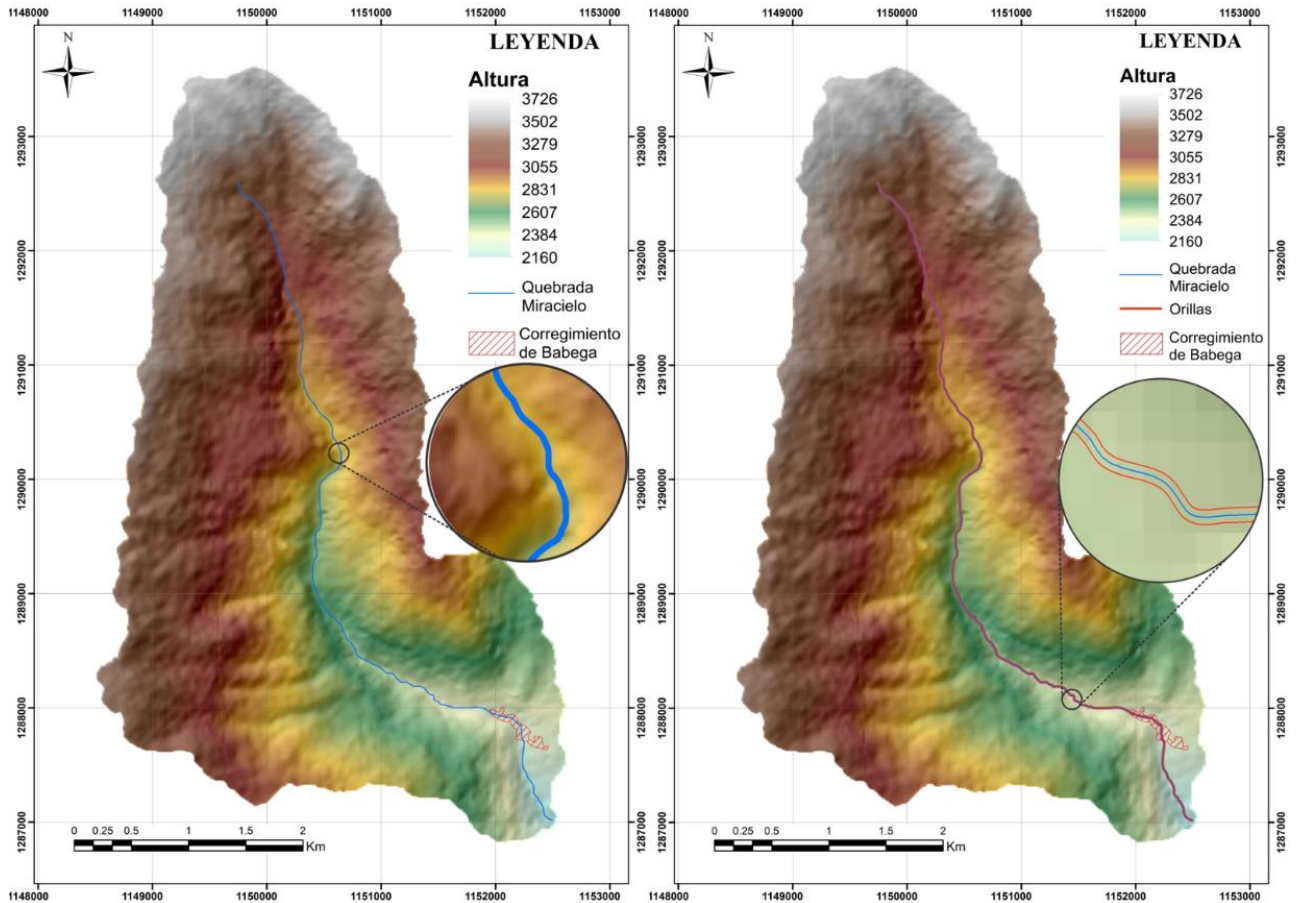


Figura 16. Representación de los elementos geométricos realizados en HEC-GeoRAS. A. Cauce principal de la Quebrada Miraciolo. B. Orillas del cauce principal.

Seguidamente, se definieron los elementos transversales, dentro de estos se encuentran las líneas transversales las cuales representan el perfil del cauce (batimetría). Se trazaron un total de 822 líneas transversales, separadas entre sí, entre a 10 metros a 15 metros y con longitudes que varían desde 165 a 585 metros (Fig. 17).

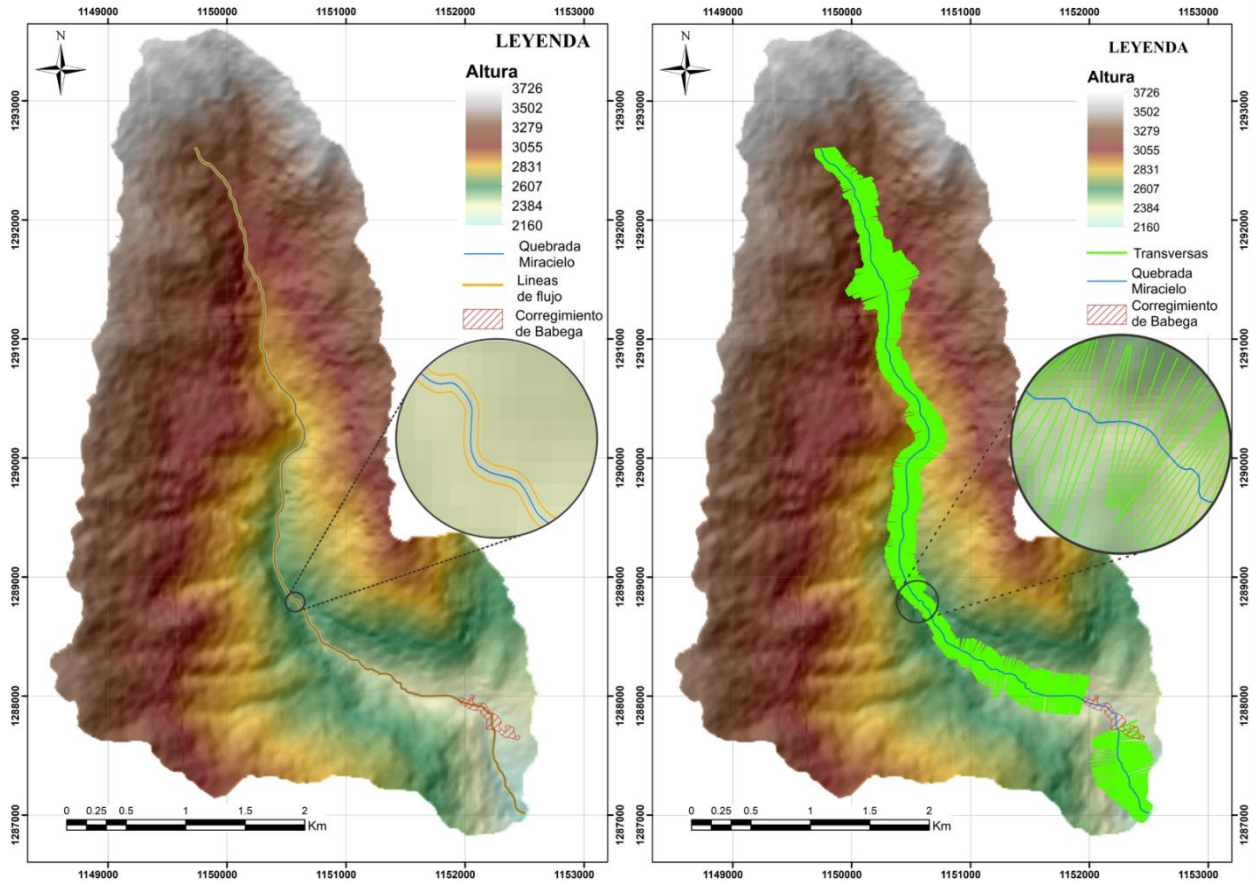


Figura 17. Representación de los elementos geométricos realizados en HEC-GeoRAS. A. Líneas de flujo representando las llanuras de inundación. B. Secciones transversales a lo largo del cauce

De igual manera, se delimitaron estructuras como los canalización, así como las áreas sin flujo que corresponden a las áreas donde el flujo es inefectivo y se localizan en las esquinas de la canalización, y por último las obstrucciones. Para esta investigación se encontró una canalización cerrada de 270 metros de longitud dentro del casco urbano.

Posteriormente, se asignaron los valores del coeficiente de rugosidad n de Manning tomando en cuenta las capas de usos del suelo, a los distintos tramos de las secciones transversales generadas para analizar el cauce y las zonas de inundación.

La geometría creada se exportó a HEC-RAS, en ella se introdujeron los datos caudal para un flujo permanente (Fig. 18), debido a que el flujo de la Quebrada Miracielo es constante y su

profundidad no cambia. Seguidamente, se establecieron como condiciones de contorno, la profundidad normal, ya que el flujo es uniforme y la pendiente del fondo del cauce es homogénea.

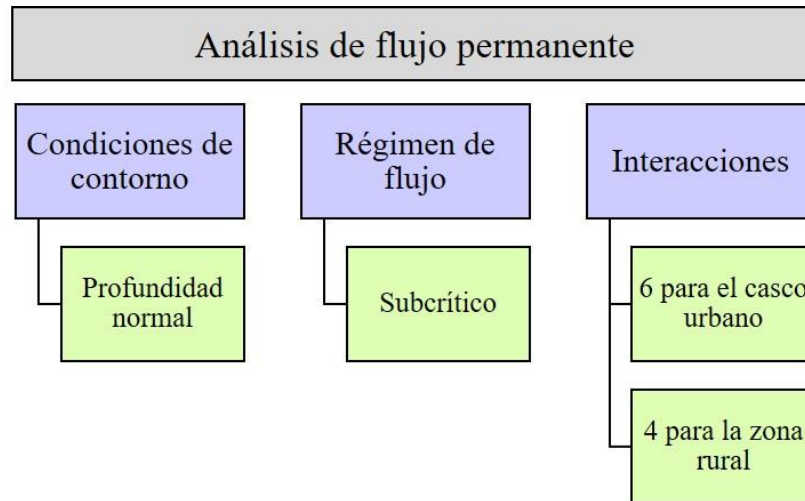


Figura 18. Segunda etapa del modelamiento hidráulico, correspondiente a la generación de los modelos de inundación.

Dentro del análisis se debieron establecer las condiciones de régimen de flujo, que en este caso corresponden a un régimen subcrítico debido a que el flujo es lento. Como último paso, para ejecutar el análisis, se configuraron las condiciones de obtención de los perfiles de velocidad para obtener un mayor detalle, de esta manera se realizaron seis interacciones para el casco urbano y cuatro para la zona restante, con el fin de refinar el modelo en esta zona ya que es el punto crítico.

Una vez terminado el procesamiento en HEC-RAS se exportaron los resultados numéricos a ArcMap, obteniendo un mapa de amenaza por inundación, el cual describe las condiciones de isóbatas e isotacas.

8.4 Análisis geológico y geomorfológico a partir del estudio de campo.

Para la ejecución de esta investigación se realizó un trabajo de campo, durante el mes de marzo, con una duración de 8 días, en la cual se registraron 63 estaciones de control (Anexo D). Como un análisis de las condiciones del entorno en donde se llevó a cabo el proyecto de investigación, se

realizó una verificación y organización de los contactos existentes de las unidades geológicas a escala 1:25.000 (ver capítulo 5- Marco Geológico), basándose en los mapas geológicos del SGC, como también de la topografía base del IGAC e imágenes satelitales.

Dentro del análisis geológico también se llevo a cabo la toma de datos estructurales, datos correspondientes a foliaciones, planos de estratificación, y diaclasas. Con la elaboración y actualización de los límites geológicos, se llevo a cabo un análisis de valores estándares de porosidad y permeabilidad para cada uno de los tipos de rocas aflorantes en la zona de estudio, con el fin de realizar una estimación de la infiltración.

Teniendo en cuenta la geología (Anexo A) se aprecia que el 60% de la cuenca esta cubierta por rocas metamórficas (Esquistos del Silagará y Ortoneis) que según Sanders (1998) tienen un porcentaje porosidad total de 0.01 a 1% y este aumenta si las superficies se encuentran fracturadas a valores que oscilan entre 1 y 10%. El 40% restante se divide en un 34% correspondiente a rocas sedimentarias y un 6 % que hace alusión a las rocas del cuaternario. Este 34% hace referencia a las rocas de la Formación Tibú-Mercedes y a la Formación Aguardiente. Para rocas sedimentarias se tienen valores diferentes para cada una de las litologías encontradas. Según Sanders (1998) para las areniscas halladas se tienen valores de 5 a 35%, para los shale de 1 a 10% y para las calizas 0,1 a 25% y si estan sufriendo procesos de karstificación su valor pasa de 5 a 50%.

Con base en estos datos y el análisis del mapa geológico (Anexo A) se aprecia que las rocas metamórficas pertenecientes al Ortoneis y a los Esquistos del Silgará, al margen Oeste de la cuenca, poseen valores de porosidad muy baja, lo cual indica que la pérdida por infiltración es casi nula. Las rocas situadas al margen Este de la cuenca, podrian llegar a presentar pérdidas por infiltración un poco mayores, debido a que sobre este sector afloran las rocas sedimentarias (Formación Tibú-Mercedes y a la Formación Aguardiente), las cuales presentan mayores valores

de porosidad lo que genera una mayor pérdida de escorrentía superficial por infiltración. La litología que mas podría estar generando estas pérdidas por infiltración serían las areniscas, ya que sobre el área de estudio no se apreciaron procesos de karstificación que estuvieran alterando las rocas calcareas.

Así mismo, en esta fase se creó el mapa geomorfológico a escala 1:10.000. Para realizar este análisis geomorfológico se empleó el glosario de unidades, subunidades y elementos geomorfológicos del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2013).

Con respecto a la geomorfología, se puede observar que el ambiente predominante en el área de estudio es de tipo denudacional, debido a la acción combinada de procesos de meteorización, erosión y transporte. De esta manera, las geoformas principales estan asociadas a laderas erosivas u onduladas, así como lomos denudados y algunos escarpes. En la parte baja de la cuenca se encontraron movimientos en masa como procesos activos. El segundo tipo de ambiente encontrado es el fluvial, el cual se encuentra caracterizado como procesos activos de la Quebrada Miracielo. A continuación se muestra el mapa geomorfológico (Fig. 19) elaborado y se observa con mayor detalle en el Anexo B.

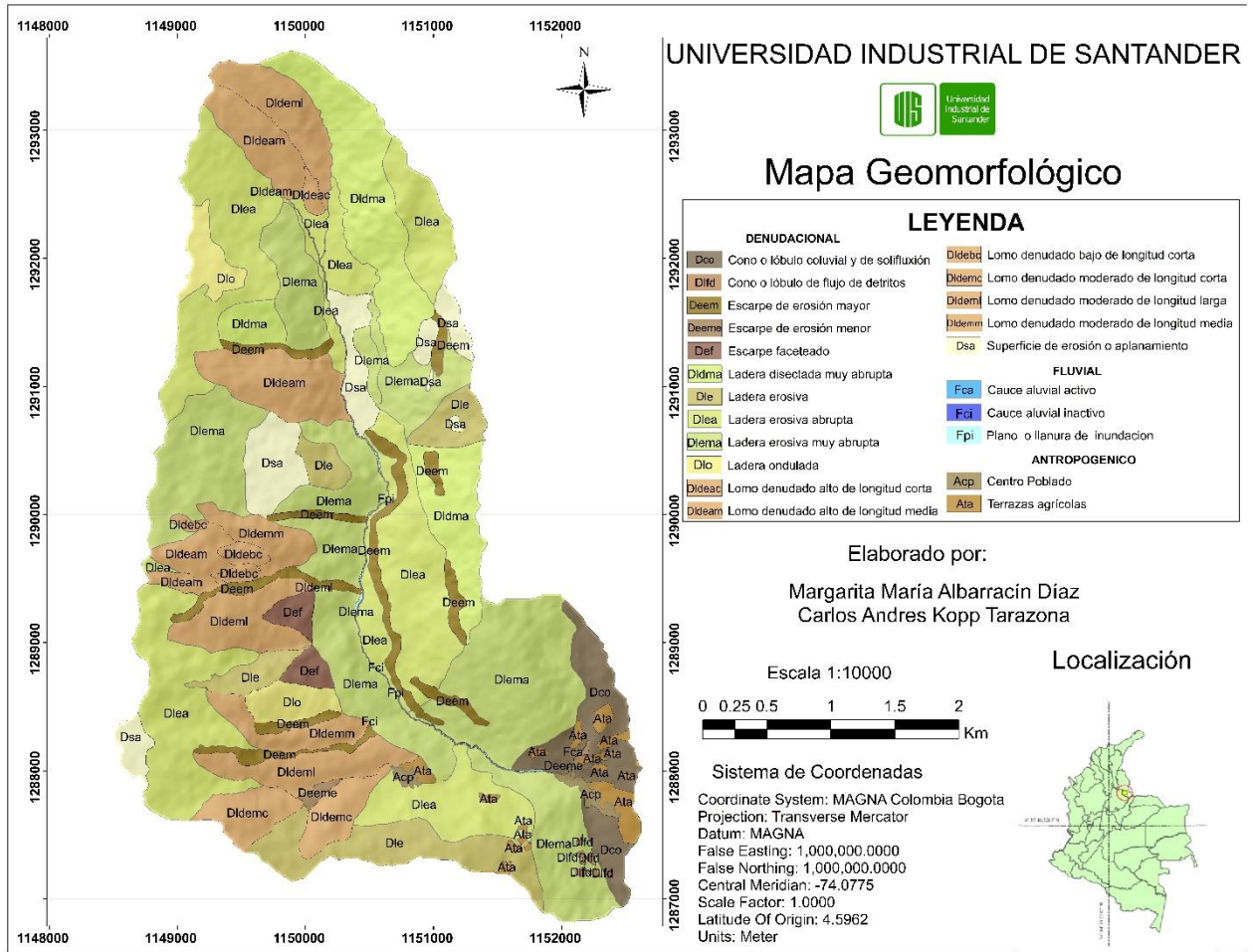


Figura 19. Mapa geomorfológico para la cuenca de la Quebrada Miracielo

A continuación se muestran algunas de las geofomas encontradas. En la Fig. 20 y Fig. 21 se observan geofomas asociadas al ambiente denudacional ubicadas en el área del proyecto. La Fig. 20A representa un cono o lóbulo de flujo de detritos, relacionado con procesos activos de movimientos en masa y que se encuentra ubicada sobre la carretera principal vía Silos – Bábega. Este flujo tiene una altura de aproximadamente 28 m y una longitud de 55 m. En la Fig. 20B se observa una ladera erosiva muy abrupta localizada en la zona sur de la cuenca, esta ladera presenta gran longitud de aproximadamente unos 70 m. La Fig. 21A muestra un lomo denudado moderado de longitud media, ubicado en el sector medio de la cuenca y sobre la imagen Fig. 21B se

encuentran un lomo denudado moderado de longitud larga y a su lado izquierdo se halla un lomo denudado moderado de longitud corta.

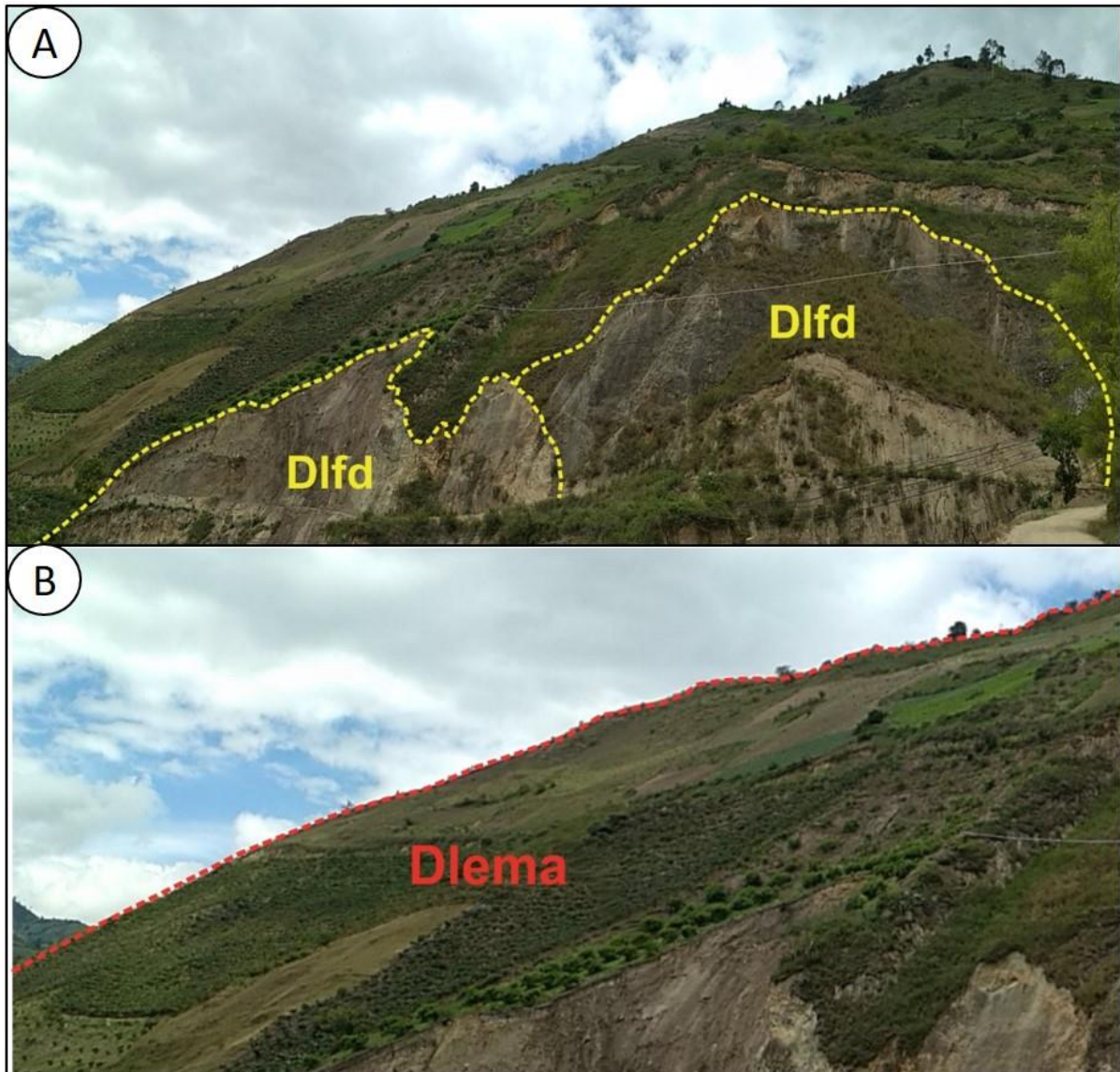


Figura 20. Geformas relacionadas con el ambiente denudacional que se visualizaron en la campaña de campo. A. Cono o lóbulo de flujo de detritos. B. Ladera erosiva muy abrupta.

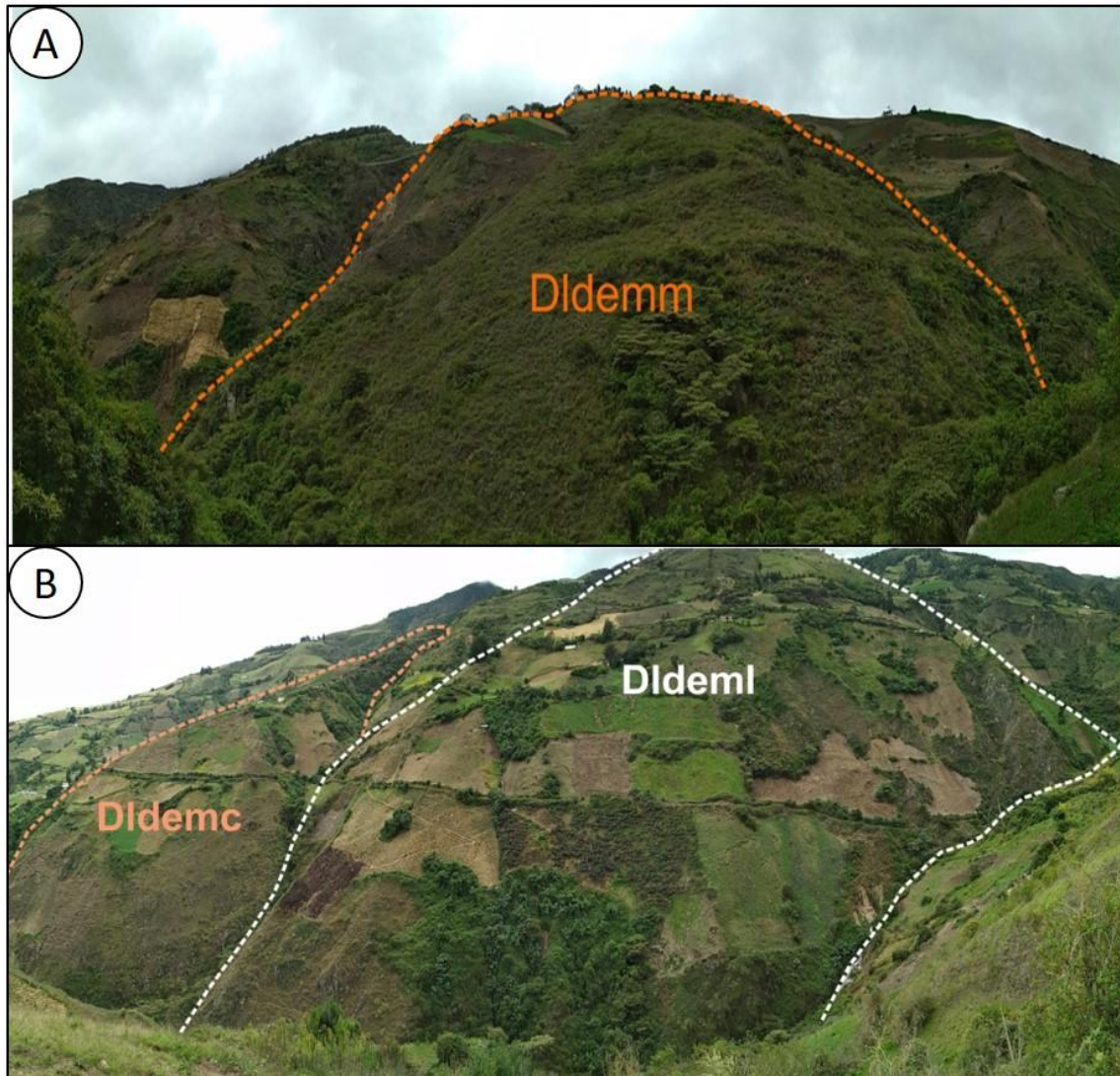


Figura 21. Geofomas relacionadas con el ambiente denudacional que se visualizaron en la campaña de campo. A. Lomo denudado moderado de longitud media. B. Lomo denudado moderado de longitud larga y a su lado izquierda lomo denudado moderado de longitud corta.

De igual manera, se revisaron los puntos críticos generados por el modelo, para visualizar las zonas afectadas por el modelo de inundación. En la Fig. 22, se observan los perfiles barimétricos de algunos puntos, con sus respectivos elementos. Para la Fig. 22A se observa un ancho de cauce activo de 1,93 m, el nivel máximo de inundación observable es de 2 m y las llanuras de inundación miden entre 4,5 m y 6,3 m. En la Fig. 22B se muestra que el ancho de cauce activo para esta sección es de 1,3 m y su parte inactiva es de 1,5, el nivel máximo de inundación observable es de 0,74 m y las llanuras de inundación varían entre 4,5 m y 1,7 m. Por último, para la Fig. 22C se

observa que el ancho del cauce activo es de 2.3 m, el nivel máximo de inundación observable es de 0,76 m y las llanuras de inundación varían entre 9 m y 12 m.

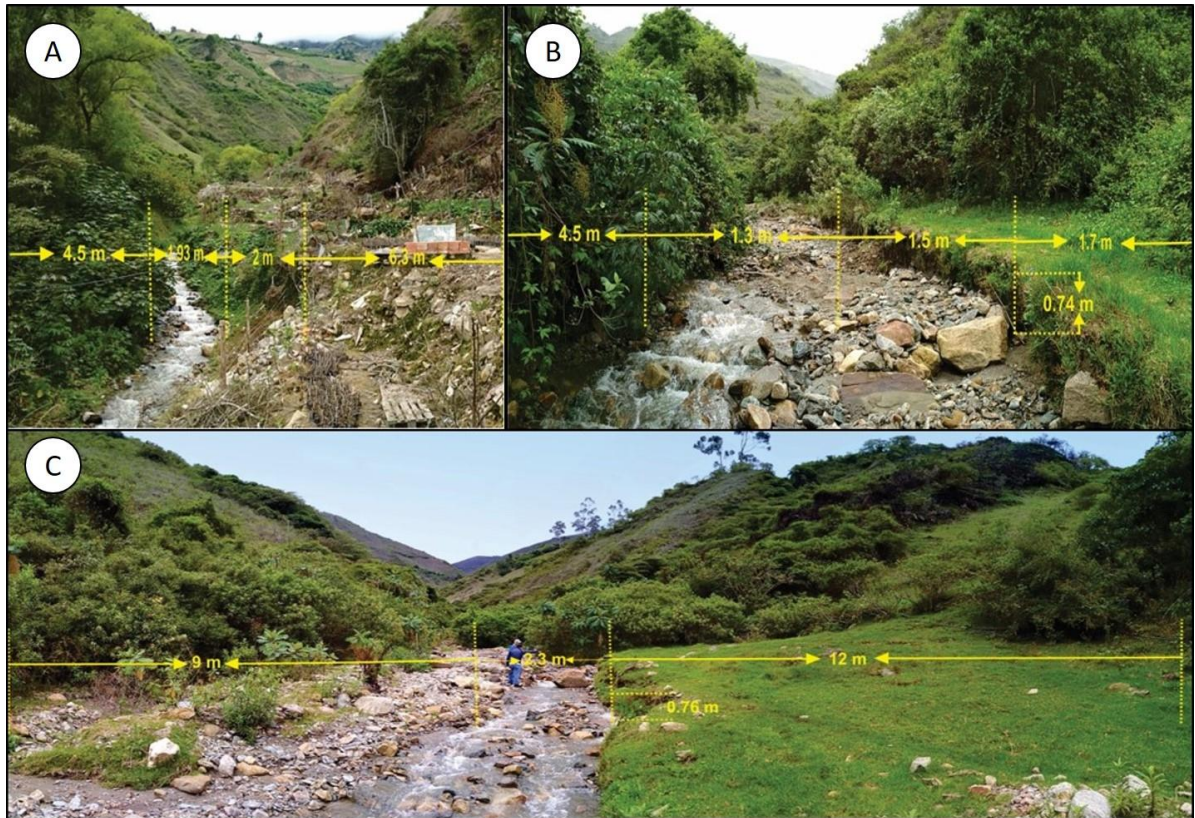


Figura 22. Puntos críticos en los cuales se realizaron medidas de ancho de cauce, llanura de inundación y nivel máximo de inundación

10 Resultados

Dentro del estudio realizado para este trabajo de investigación, el cual recopila el análisis de las condiciones morfométricas de la cuenca y el cauce, se recrearon las condiciones del caudal en dos simulaciones que para este trabajo se representan en modelo 1 y modelo 2.

Para el modelo 1 se obtienen resultados máximos para las profundidades y las velocidades (isóbatas e isotacas), así como el porcentaje del área del corregimiento afectada durante cada periodo de retorno (Fig. 23) y se observan con mayor detalle en el Anexo E y Anexo G. Para el periodo de retorno de 2 años se obtuvieron valores de isóbatas de 4,45 m e isotacas de 1,61 m/s ocupando el 13,87% del área total del corregimiento, para el periodo de retorno de 5 años se

encontraron isóbatas de 4,59 m e isotacas de 2,1 m/s en el 14,26% del área total del corregimiento, para el periodo de retorno de 10 años isóbatas de 4,73 m e isotacas de 2,45 m/s ocupando el 14,82% del área total del corregimiento, para el periodo de retorno de 25 años de isóbatas de 4,88 m e isotacas de 2,94 m/s en el 15,50% del área total del corregimiento para el periodo de retorno de 50 años isóbatas de 5,01 m e isotacas de 3,38 m/s para el 16,15% del área total del corregimiento , para el periodo de retorno de 100 años isóbatas de 5,12 e isotacas de 3,80 m/s para el 16,79% del área total del corregimiento y finalmente se hallaron para el periodo de retorno de 500 años isóbatas de 5,44 m e isotacas de 4,85 m/s ocupando el 18,73% del área total del corregimiento.

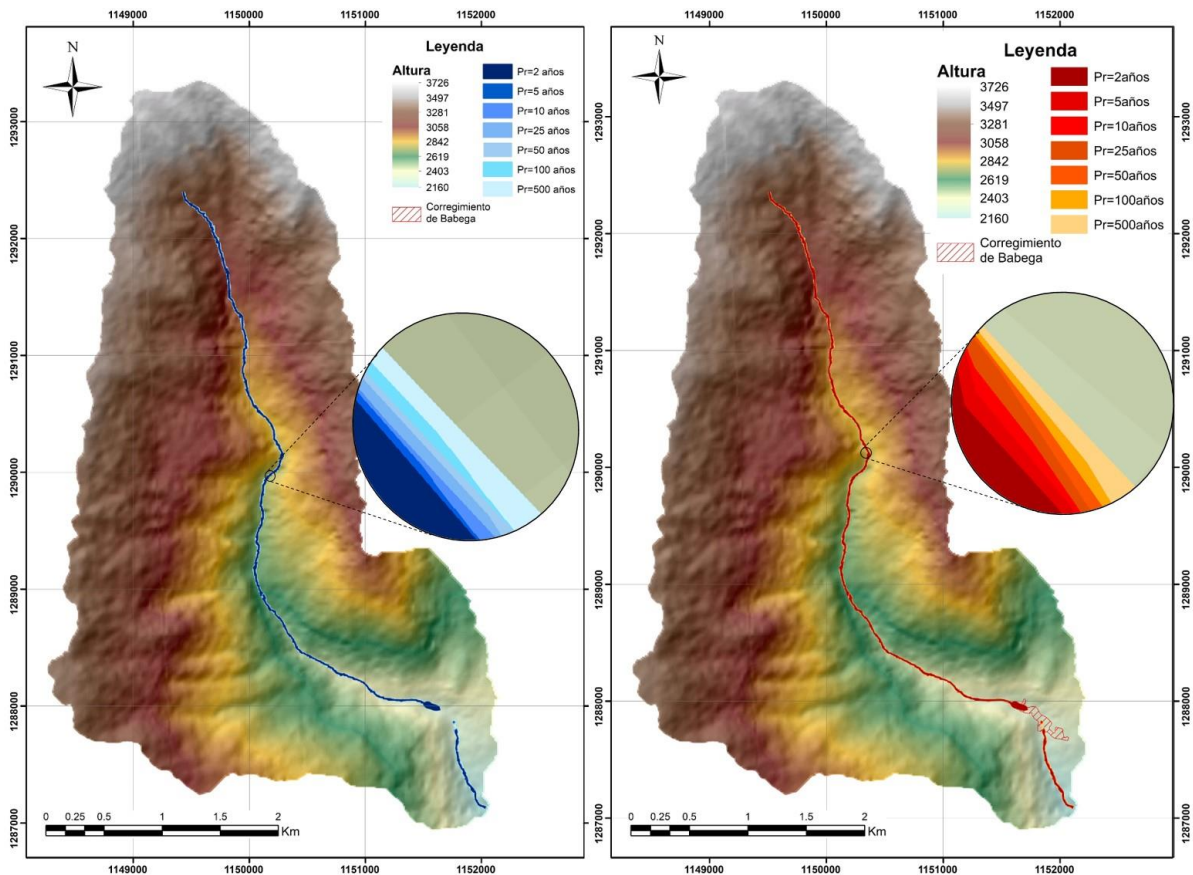


Figura 23. Modelo 1. de profundidades (isóbatas) y velocidades (isotacas) para la cuenca de la Quebrada Miracielo.

Así mismo, para el modelo 2 se muestran los resultados hallados para los máximos de profundidades y de velocidades (isóbatas e isotacas) comprendidos para cada periodo de retorno

(Fig. 24) y se observa con mayor detalle en el Anexo F y Anexo H. Para el periodo de retorno de 2 años se encontraron valores de isóbatas de 4,50 m e isotacas de 1,75 m/s para el 13,97% del área total del corregimiento, para el periodo de retorno de 5 años se obtuvieron isóbatas de 4,67 m e isotacas de 2,29 m/s en el 14,56% del área total del corregimiento, para el periodo de retorno de 10 años isóbatas de 4,79 m e isotacas de 2,62 m/s para el 15,07% del área total del corregimiento, para el periodo de retorno de 25 años de isóbatas de 4,95 m e isotacas de 3,17 m/s ocupando el 15,86% del área total del corregimiento, para el periodo de retorno de 50 años isóbatas de 5,08 m e isotacas de 3,60 m/s en el 16,52% del área total del corregimiento, para el periodo de retorno de 100 años isóbatas de 5,18 e isotacas de 4,05 m/s ocupando el 17,18% del área total del corregimiento y finalmente se determinaron para el periodo de retorno de 500 años isóbatas de 5,53 m e isotacas de 5,08 m/s para el 19,30% de área total del corregimiento.

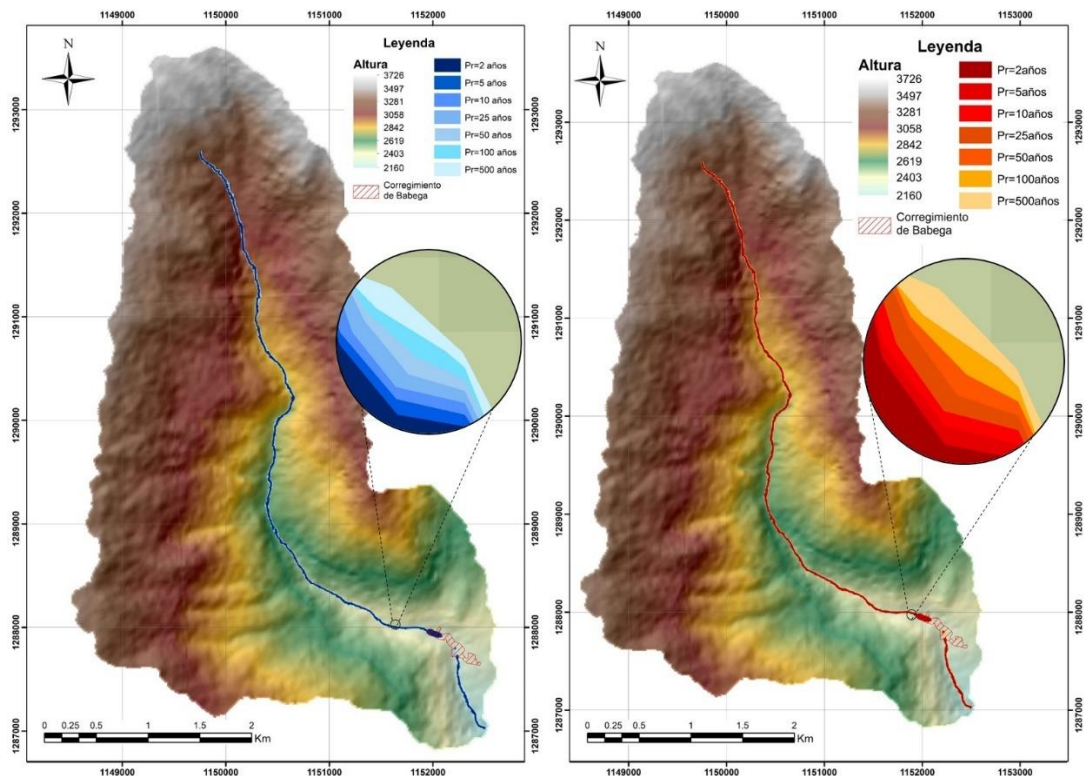


Figura 24. Modelo 2. de profundidades (isóbatas) y de velocidades (isotacas) para la cuenca de la Quebrada Miracielo.

Según (Ayala-Carcedo & Olcina Cantos, 2002) la delimitación de la zona de amenaza por inundación se realiza teniendo en cuenta las profundidades (isóbatas), las velocidades (isotacas) y su respectivo producto (Fig. 25). En otras palabras, para velocidades y profundidades superiores a 1m/s y 1 m respectivamente, y el producto entre velocidad y profundidad igual o superior a 0,5, se determina zona de amenaza alta.

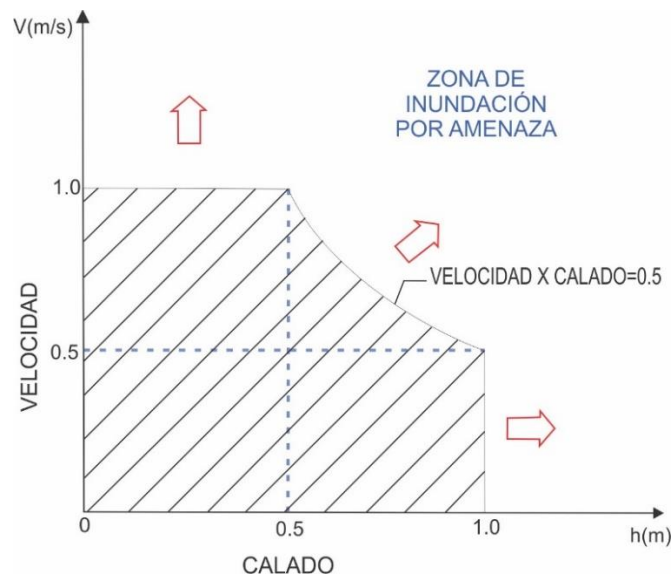


Figura 25. Delimitación de la zona de amenaza por inundación tomado de Ayala-Carcedo 2002

Las profundidades y velocidades obtenidas para las zonas inundables del modelo 1, muestran alta amenaza por inundación para todos los periodos de retorno establecidos. Para el periodo de retorno de 2 años se determina que la profundidad es de 4,45 m, sobrepasando el límite de no amenaza en 3,45 m. De igual forma la velocidad supera en 0,61 m/s el nivel de no amenaza, por lo que se determina que la amenaza es alta. A medida que se aumenta el periodo de retorno, aumentan las profundidades y las velocidades, y por ende la amenaza será alta.

De igual manera ocurre para el modelo 2, durante el periodo de retorno de 2 años las profundidades y velocidades superan en 1 m y en 1 m/s, respectivamente, la zona no de no

amenaza. Siendo la profundidad de 4,50 m y la velocidad de 1,75 m/s y esto aumenta a medida que el tiempo de retorno aumente, por lo cual se determina amenaza alta para cada uno de los periodos de retorno establecidos.

Dentro del análisis por inundación, se observan problemas asociados alrededor de la quebrada, dentro de estos se aprecian los daños laterales causados a las estructuras (Fig. 26) por acción del agua. Así mismo, en la parte media de la quebrada y en el pueblo, se encuentran gran cantidad de mangueras (Fig. 27) utilizadas para la captación de agua y abastecimiento de las fincas circundantes, la acumulación excesiva de estos elementos proporciona un escenario más susceptible a congestionar el flujo cuando exista un aumento del caudal, ya que se quiebran y trasladan ocasionando acumulación de mangueras y obstaculización del canal (efecto malla). Adicionalmente, cuando las mangueras se rompen, debido a que son colocadas de manera artesanal, proporcionan fugas de agua, las cuales, a través del golpeteo de sus gotas sobre la superficie del terreno y cambios en regímenes de humedad, generan desprendimiento y arrastre de partículas y masas de suelo.



Figura 26. Daños laterales causados a estructuras dentro del corregimiento.



Figura 27. Acumulación de manegueras utilizadas para la captación de agua.

Otro de los problemas encontrados hace referencia a la canalización del canal en la parte inicial del corregimiento (Fig. 28), esto es un problema debido a que actúa como un cuello de botella produciendo represamiento del cauce. Al momento de ocurrir un aumento de precipitaciones y por ende un aumento en el caudal, la quebrada aumentará el ancho del cauce activo, al llegar a la parte inicial del pueblo (norte) es forzada a disminuir el ancho de la lámina de agua, para que pueda pasar a través del canal, y esto ocasiona dicho represamiento. Para observar esta dinámica ver en las Fig. 23 y Fig. 24 en donde se encuentran los modelos de inundación.



Figura 28. Canalización de la quebrada en la parte inicial de corregimiento.

En la parte media de la cuenca en la estación 36 (Anexo C) se puede observar un depósito coluvial (Fig. 29) de 17 metros de ancho por 10 metros de alto aproximadamente. Este depósito presenta clastos muy angulares y heterogéneos, que contiene fragmentos de rocas como el ortogneis, areniscas, calizas y esquistos. Su valoración como punto crítico es importante puesto que, al estar al margen de la quebrada, puede producir un emplazamiento sobre el cauce y generar así represamiento parcial o total del cauce.



Figura 29. Deposito coluvial en la parte media de la cuenca, margen derecho de la quebrada (aguas abajo)

También se encuentran obstrucciones a lo largo de la quebrada por caída de árboles (Fig. 29), las cuales constituyen otro problema, ya que aumentan la probabilidad de represamiento del cauce y ante la presencia de eventos de inundación pueden llegar a ser transportados ocasionando mayores daños a su paso.



Figura 30. caída de árboles sobre la quebrada.

11 Conclusiones

La cuenca tiene una forma oval oblonga a rectangular oblonga predominantemente alargada. Lo cual influye de manera directa en la eficiencia al momento de evacuar la escorrentía. Así mismo, se deduce que el relieve es fuertemente accidentado y muy montañoso. Los cálculos realizados para la determinación de los parámetros morfométricos referentes al drenaje indican que tiene un bajo factor de bifurcación y una baja densidad de drenaje, lo que indica que se puede presentar alta probabilidad de ocurrencia por inundaciones en la zona más baja, debido a la gran concentración de la escorrentía.

Se presentan diferencias mínimas en cuanto a los caudales determinados para los dos modelos de análisis, por lo tanto, se puede observar que el comportamiento hidrológico de la cuenca no presentará grandes variaciones.

A partir de la geometría realizada se puede apreciar que el cauce conserva en toda su trayectoria un ancho constante con pequeñas variaciones de 3 a 6 metros. Así mismo se evidencian procesos de erosión como socavación lateral del cauce la cual puede verse en algunas zonas en donde las llanuras de inundación son mayores.

La zona más crítica por amenaza de inundación en los diferentes periodos de retorno para los dos modelos se encuentra en la zona norte del corregimiento debido a la restricción del cauce, en la simulación generada por HEC-RAS se puede ver cómo el área de inundación es más extensa para este sector.

Los valores encontrados para velocidades y profundidades en ambos modelos en cada uno de los periodos de retorno evaluados superan los valores de 1m/s y 1m para velocidades y profundidades respectivamente. En el modelo 1 evaluando el periodo de retorno de 25 años se obtuvieron profundidades máximas de 4,88 m y velocidades de 2,94 m/s, ocupando el 15,50% del área total del corregimiento. En el modelo 2, para el periodo de retorno de 25 años se obtuvieron isóbatas de 4,95 m e isotacas de 3,17 m/s ocupando el 15,86% del área total del corregimiento. Por lo anterior, se puede inferir que la amenaza por inundación es alta.

12 Recomendaciones

Se recomienda emplear un modelo digital de elevación de mayor resolución ya que esto otorgaría una mayor precisión en el modelo.

Se recomienda actualizar y mejorar los usos del suelo ya que estos pueden presentar variaciones e influir directamente sobre el número de Manning y el número de curva.

Realizar una cartografía más detallada de la geología en donde se puedan caracterizar miembros y subunidades, para el modelo de escorrentía y pérdidas por infiltración.

Para la parte baja de la cuenca en el extremo suroeste por la vía que comunica a Silos con Bábeaga se presentan grandes movimientos en masa que en ocasiones han obstaculizado la vía.

Se recomienda hacer estudios futuros ya que la aportación de material de dichos deslizamientos

a la quebrada puede ocasionar fenómenos de avenidas torrenciales. Cabe aclarar que estos movimientos no afectan la cabecera municipal.

Realizar un estudio geofísico-estructural para determinar las superficies con fracturamiento y así estimar con un mayor grado de precisión, el porcentaje de pérdidas de escorrentía asociadas a este tipo de eventos.

Se recomienda realizar un estudio de aguas subterráneas que puedan contribuir en el aporte del flujo base para el modelamiento hidrológico.

El corregimiento debe respetar la ronda de protección hídrica que corresponde a 100 metros a la redonda en su lugar de nacimiento y 30 metros a lado y lado de los márgenes de cauces temporales o permanentes, de manera tal que solamente se podrán realizar usos de protección, conservación, preservación, recuperación y vegetación natural protectora.

BIBLIOGRAFÍA

- Aranoa, C. d. (2011). Propuesta metodológica de modelización hidrometeorológica e hidrodinámica enfocada a la ordenación del riesgo de inundación: aplicación a la cuenca del río Pejibaye (Costa Rica). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Aristizabal, V. M. (2013). Modelos hidrológicos e hidráulicos de zonificación de la amenaza por inundación en el municipio de La Dorada, Caldas. La Dorada: COROPOCALDAS.
- Ayala-Carcedo, F., & Olcina Cantos, J. (2002). Riesgos naturales. Barcelona: Ariel.
- Balaguera, K. J. (2015). Avalancha en el corregimiento de Bábeaga, Norte de Santander. Cúcuta: La Opinión. Recuperado el 7 de Julio de 2017, de <https://www.laopinion.com.co/region/avalancha-en-el-corregimiento-de-babega-norte-de-santander-99534#OP>
- Beguiría, S. (2002). Revisión de métodos paramétricos para la estimación de la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos en Climatología e Hidrología: El uso de series de excedencias y su comparación con las series de máximos anuales. Zaragoza: Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC).
- Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS, Hydraulic reference manual. Us Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center (HEC).
- Busnelli, J., & Horta, L. (2014). Morfometría de cuencas montañas y metamorfosis fluvial, Tucumán. Revista de la Asociación Geológica Argentina(71), 11-20.

- Cameron, T., & Ackerman, P. (2009). HEC-GeoRAS GIS tools for support of HEC-RAS . USA: US Army Corps of Engineers.
- Campos Aranda, D. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. San Luis de Potosí, México: Editorial universitaria Potosina.
- Campos, A., Holm-Nielsen, N., E., D., Díaz, C., Rubiano, D., Costa, C., & Ramírez, F. (2012). Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia, Un aporte para la construcción de políticas públicas. Bogotá. Recuperado el 21 de 08 de 2017, de https://www.gfdr.org/sites/gfdr.org/files/Analisis_de_la_gestion_del_riesgo_de_desastres_en_Colombia_2012.pdf
- Centeno Dávila, M. S. (2015). análisis hidrológico e hidráulico para el sistema de drenaje de obras de arte mayor en el proyecto PACALORI. (e. d. Facultad de ingeniería, Ed.) Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca. Recuperado el 25 de 11 de 2017, de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/21650/1/TESIS.pdf>
- Chow, V. T. (1994). Hidráulica de canales abiertos. Bogotá: McGraw-Hill.
- Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo SNGRD. (2017). Terminología sobre gestión del riesgo de desastres y fenómenos amenazantes. Bogotá. Recuperado el 03 de 09 de 2017, de <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/20.500.11762/20761/2/Terminologia-GRD-2017.pdf>
- Congreso de la Republica de Colombia. (2012). Ley 1523 de 2012. Bogotá. Recuperado el 14 de 03 de 2018, de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=47141>

- Díaz Delgado, C., Mamadou Bâ, K., Iturbe Posadas, A., Esteller Alberich, M. V., & Reyna Sáenz, F. (1999). Estimación de las características fisiográficas de una cuenca con la ayuda de SIG y MEDT: caso del curso alto del río Lerma, Estado de México. *Ciencia Ergo Sum*, 6(2), 124-134. Recuperado el 21 de 03 de 2018
- Díez Herrero, A. (2002). Aplicaciones de los SIG al análisis del riesgo de inundaciones fluviales. . En L. Laín Huerta, *Los SIG en la gestión de riesgos geológicos y el medio ambiente*. (págs. 87-112).
- Dunham, R. (1962). Classification of carbonte rocks according to depositional texture.
- Etxeberria, P., Brazaola, A., & Edeso, J. M. (Junio de 2002). Cartografía de peligro de inundación mediante sistemas de información geográfica y modelos hidrológicos e hidráulicos. XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica. Santander.
- Farfán, F., Urbina, L., Ferreira, S., & Brandan, M. (2010). Caracterización y red de drenaje de la subcuenca del río Tin-Tin, PN. Los Cardones, Salta. *Ciencia*, 5(16), 7-21.
- Fleming, M., & Brauer, T. (2016). Hydrologic Modeling System HEC-HMS. US Army Corps of Engineers.
- García, C. A., Ríos, C. A., & Castellanos, O. M. (2005). Medium-Pressure Metamorphism in the Central Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes.
- Gaspari, F. (2012). Caracterización Morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. La Plata Argentina: Septimo congreso de medio ambiente.
- Goldsmith, R., & Ward, D. (1973). Cuadrángulo H-13 Pamplona (planchas 110 Plamplona - 120 Cerrito). En *Mapa Geológico de Colombia*. INGEOMINAS.

- Goldsmith, R., Marvin, R., & Mehnert, H. (1971). Radiometric ages in the Santander massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. *GEOLOGICAL SURVEY, D44-D49*.
- González Velandia, J. C. (2014). *La gestión del riesgo de desastres en las inundaciones de Colombia: una mirada crítica*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Gravelius, H. (1914). En A. I. González de Matauco, *Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Xadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas*.
- Gumbel, E. (1958). *Statics of extremes*. Nueva York: Columbia University Press.
- Horton, R. E. (1932). En B. Lux Cardona, *Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas*.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of stream and their drainage basin: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 275-370.
- IDEAM. (s.f.). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. Recuperado el 25 de 10 de 2017, de www.ideam.gov.co
- Julivert M. (1959). Geología de la vertiente W del Macizo de Santander en el sector de Bucaramanga. *Boletín Geológico*.
- Julivert, M. (1958). La morfoestructura de la zona de mesas al SW de Bucaramanga. *Boletín Geológico*.
- Julivert, M. (1961). Geología de la vertiente W de la Cordillera Oriental en el sector de Bucaramanga. *Boletín geológico*.
- Lázaro López, A. (1997). *Manual de Hidráulica*. San Vicente del Raspeig: Universidad de Alicante.

- León Aristizabal, G. E., Zea Mazo, J. A., & Eslava Ramirez, J. A. (2000). Circulación general del trópico y la zona de confluencia intertropical en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 31-38.
- Lopez Cadena de Llano, F. (1994). Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. Madrid: Mundi Prensa.
- López Miñano, M. I. (2006). Análisis de los principales parámetros de un método hidrometeorológico para el cálculo de avenidas y aplicación a una cuenca mediterránea. Cartagena, Colombia: Universidad politécnica de Cartagena.
- Lux Cardona, B. (2016). Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas. (U. d. Guatemala, Ed.) Recuperado el 15 de 01 de 2018, de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos%20b%C3%A1sicos%20de%20Morfometr%C3%ADa%20de%20Cuencas%20Hidrogr%C3%A1ficas.pdf>
- Marín Muños, A. F. (2013). Modelación del transito de crecientes con el HEC-HMS y HEC-RAS en un tramo del río Medellín. Envigado: Escuela de ingeniería de Antioquia.
- Marmol, L. (2008). Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas y Corrección de Torrentes. Salta: Universidad Nacional de Salta.
- Monsalve Sáenz, G. (1995). Hidrología en la ingeniería (2 D.C ed.). Bogotá D.C: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Ortiz, S., & Triviño, A. (2004). Metodología para la modelación distribuída de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en Ramblas y ríos Rambla-Mediterráneos. Alicante, España: Universidad de Alicante.

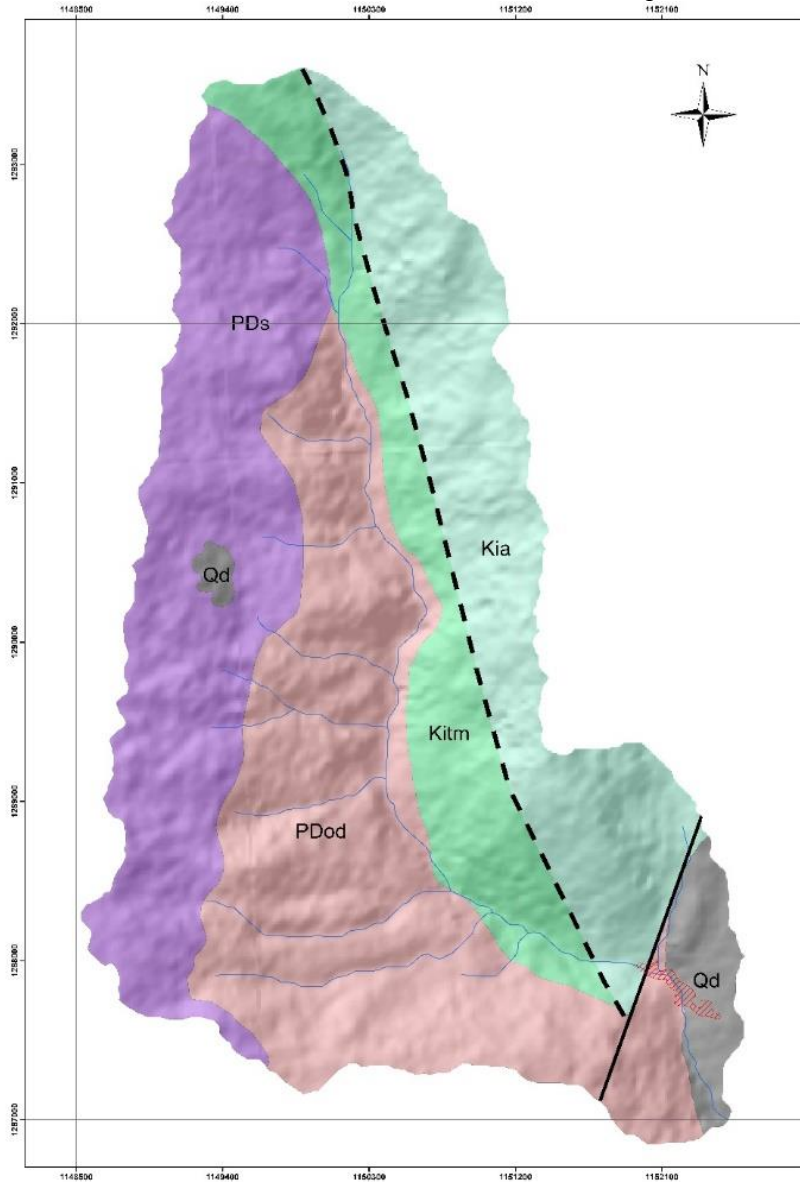
- Pascual Aguilar, J. A., & Díaz Martín, M. (2016). Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS. Alcalá de Henares.
- Patel, K. (2009). Watershed modeling using HEC-RAS, HEC-HMS, and GIS models – a case study of the wreck pond brook watershed in Monmouth County, New Jersey. New Brunswick.
- Quiñones, F., & Guzmán, S. (1986). Determinación de caudal y técnicas de muestreo en aguas superficiales. San Juan de Puerto Rico: U.S Geological Survey.
- Reyes, A., Barroso, F. U., & Carvajal, Y. (2010). Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas. Santiago de Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- Robredo, J. C. (2003). Cálculo de caudales de avenida. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Rodríguez, E., González, R., Medina, M. P., Pardo, Y. A., & Santos, A. C. (Octubre de 10 de 2007). Propuesta metodológica para la generación de mapas de inundación y zonas de amenazas. Caso de estudio en la parte baja del Río las Ceibas (Neiva-Huila). *avances en recursos hidráulicos*(16), 65-78.
- Ruiz, J. (2001). Hidrología; evolución y visión sistémica, la morfometría de cuencas como aplicación. Barinas, Venezuela: UNELLEZ.
- Salinas, M., & Jiménez, M. (2014). Inundaciones. Mexico DF: CENAPRED.
- Sanders, L. (1998). A manual of field Hydrogeology. Prentice-Hall.
- Santo Domingo de Silos Norte de Santander. (2000). Esquema de Ordenamiento Territorial Santo Domingo de Silos Norte de Santander 2000. Silos, Colombia. Recuperado el 20 de Julio

- de 2017, de http://cdim.esap.edu.co/BancoConocimiento/S/silos_-_norte_de_santander_-_eot_-_2000/silos_-_norte_de_santander_-_eot_-_2000.asp
- Scharffenberg, W. (2013). Hydrologic modelindg system HEC-HMS.
- Solano Zuñiga, T. D., & Vintimilla Villavicencio, N. C. (2013). Estudio fluviomorfologico del río Vinces y determinación de las áreas de inundación de la zona de influencia del proyecto Pacalori aplicando HEC-geoRas. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Temez, J. (1978). Cálculo Hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. (D. G. Carreteras, Ed.) Madrid, España.
- US Army Corps of Engineers. (Agosto de 2016). HEC-HMS.
- US Army Corps of Engineers. (Septiembre de 2016). HEC-RAS.
- Valencia Ortiz, J. (2017). Aplicación de redes neuronales y SIG en el análisis de riesgos de inundación y movimientos de ladera en el municipio de Capitanejo (Santander-Colombia). Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Vargas, D. (01 de 07 de 2016). Alcaldia de Santo Domingo de Silos-Norte de Santander. Recuperado el 20 de 07 de 2016, de <http://www.santodomingodesilos-nortedesantander.gov.co/territorios.shtml?apc=bbxx-1-&x=2704465>
- Veléz Upegui, J. J., & Botero Gutiérrez, A. (2010). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la Quebrada San Luis, Manizales.
- Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, J., & Hernan, R. (1973). Geologia de los cuadrangulos H-12 Bucaramanga y 4-13 Pamplona, Departamento de Santander. Boletin Geologico.

WMO. (2012). Glosario hidrológico internacional (385 ed.). Ginebra. Recuperado el 13 de 07 de 2017, de http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/publications/international_glossary/385_IGH_2012.pdf

Apéndices

Apéndice A. Mapa geológico












REPÚBLICA DE COLOMBIA
Departamento de Norte de Santander



Mapa Geológico

Leyenda

	Formacion Aguardiente		Falla de Babega
	Deposito Coluvial		Lineamiento
	Esquistos del Silgará		Drenaje
	Ortoneis		Corregimiento de Babega
	Formacion Tibú-Mercedes		

Elaborado por:

Margarita María Albarracín Díaz
Carlos Andres Kopp Tarazona

Escala 1:25000



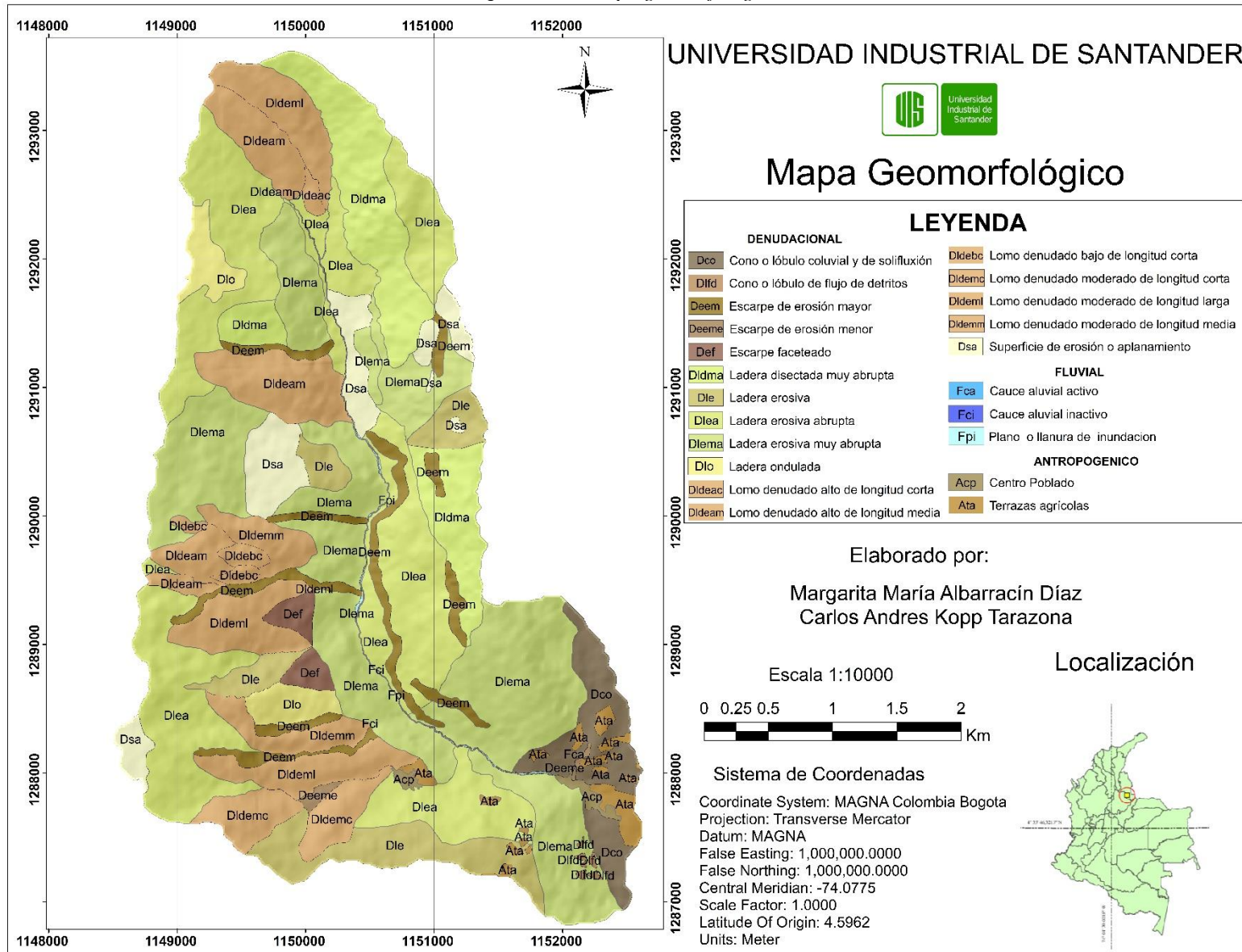
Localización



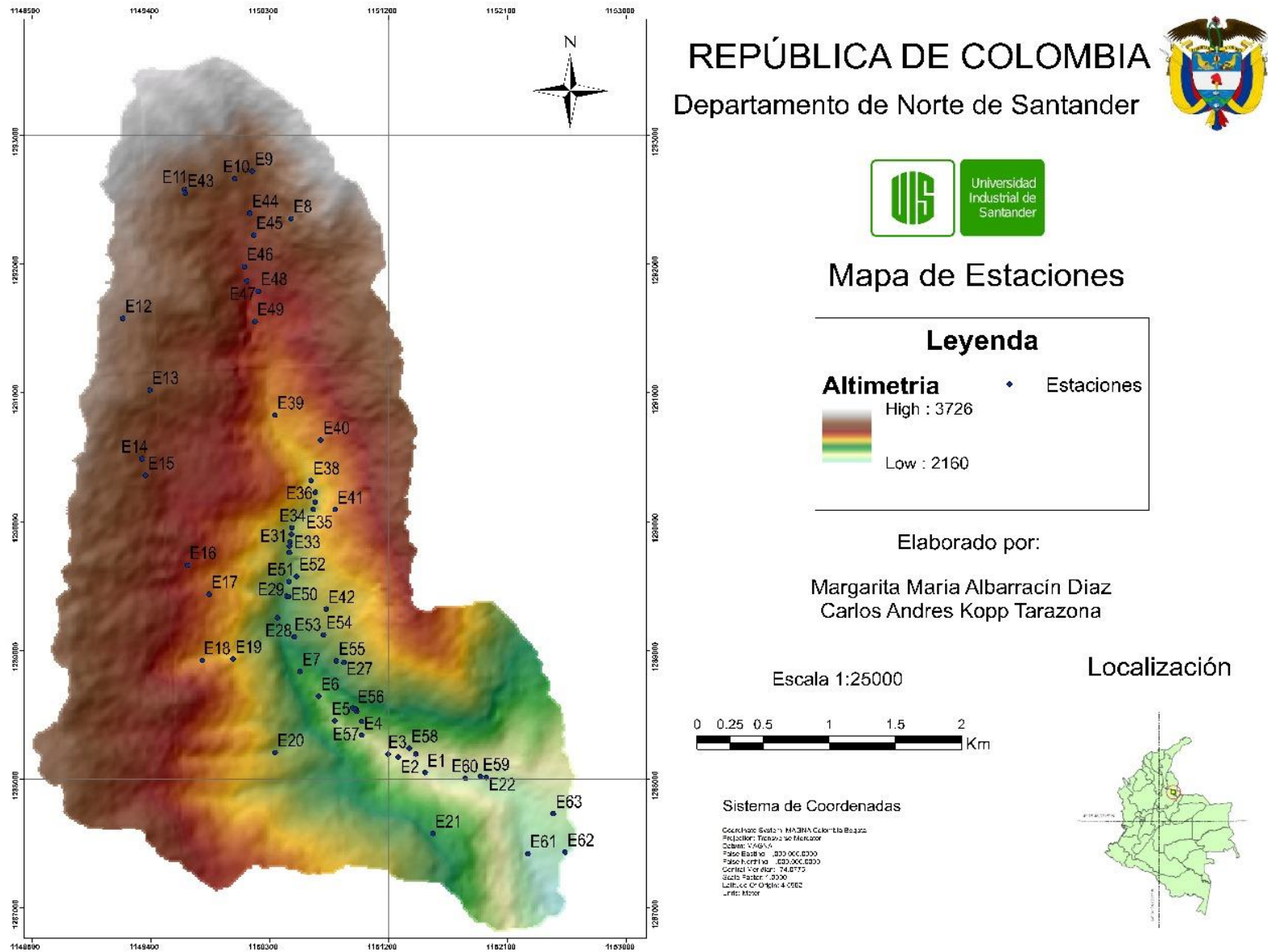
Sistema de Coordenadas

Coordenado System: MACNA Colombia Bogota
Proyeccion: Transversa Mercator
Datum: MAGNA
False Easting: 1 000 000.0000
False Northing: 10 000 000.0000
Central Meridian: -74.0000
Scale Factor: 1.0000
Latitude Of Origin: 4.5902
Units: Meter

Apéndice B. Mapa geomorfológico



Apéndice C. Mapa de estaciones

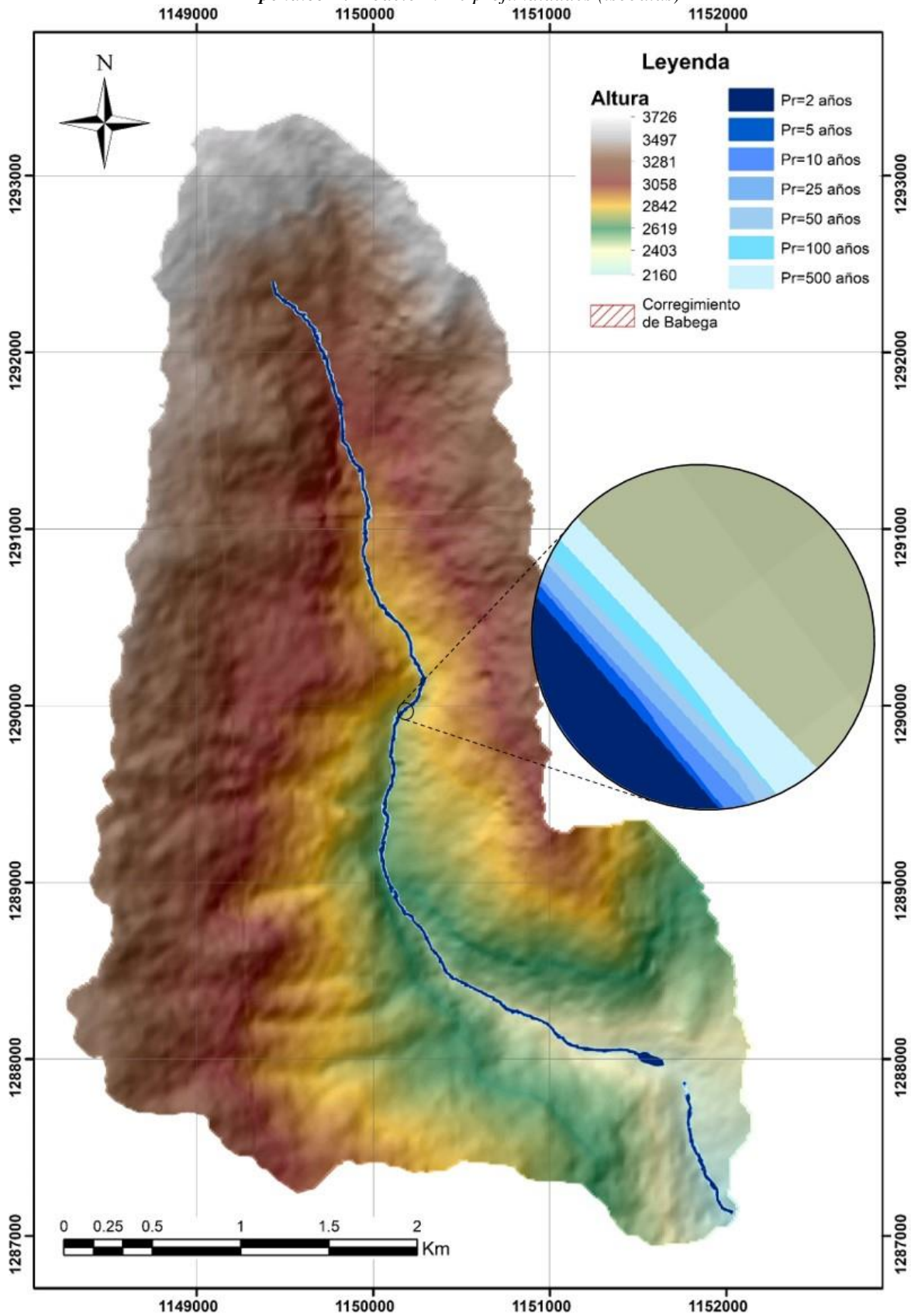


Apéndice D. Descripción geomorfológica

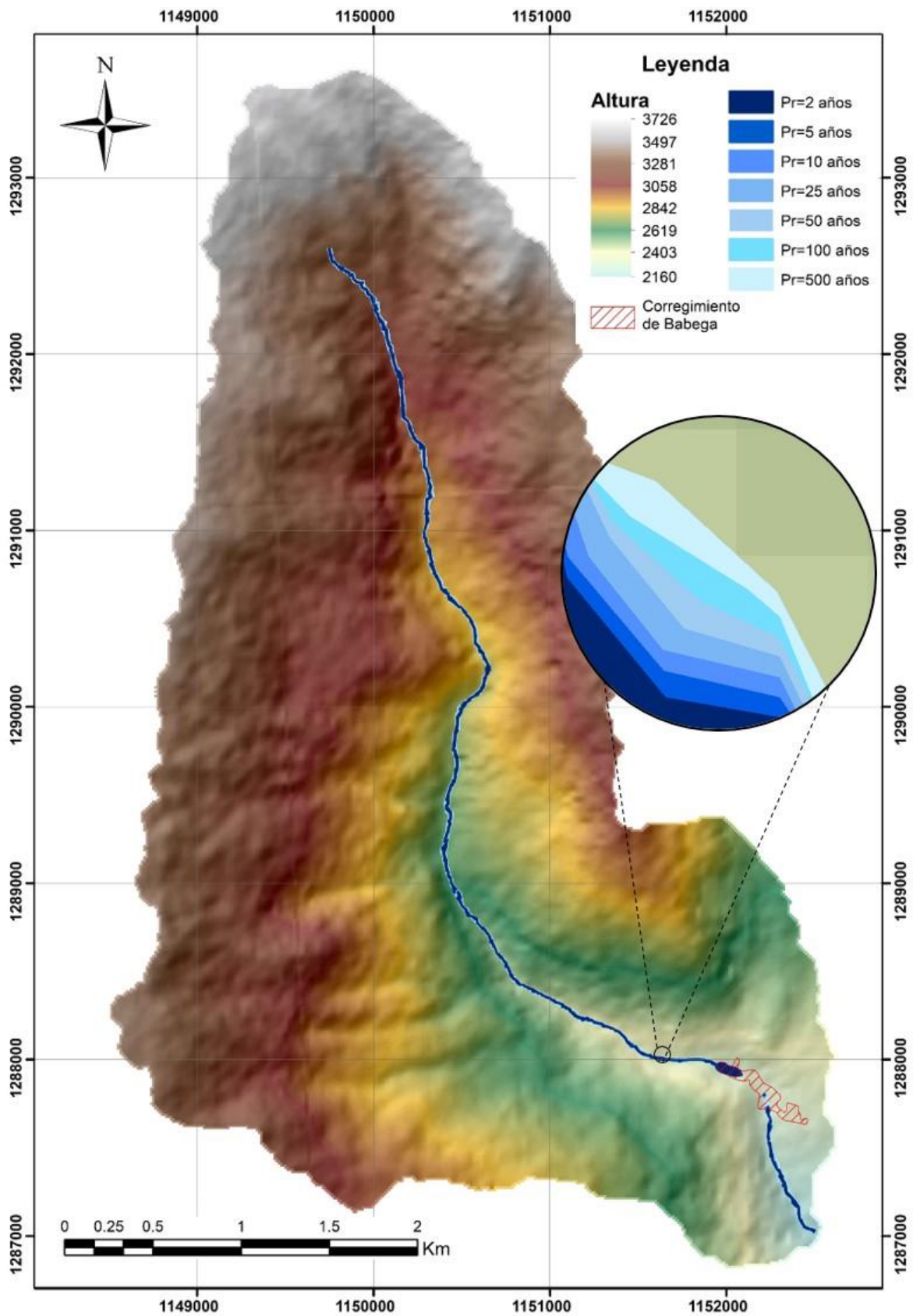
Código	Nombre	Definición
Acp	Centro Poblado	Concentración de viviendas contiguas, vecinas o adosadas entre sí, ubicada en el área rural o urbana de un municipio o de un corregimiento. Dicha concentración presenta características urbanas tales como la delimitación de vías vehiculares y peatonales.
Ata	Terrazas agrícolas	Son escalones muy anchos, construida por el hombre usando la misma tierra del lugar, para actividades agrícolas. Las terrazas son hechas con el objeto de que suelos inclinados puedan usarse con cultivos agrícolas o plantaciones forestales, sin que la tierra sea arrastrada por el agua.
Dco	Cono o lóbulo coluvial y de soliflucción	Estructura en forma de cono o lóbulo con morfología alomada baja. Su origen es relacionado a procesos de transporte y deposición de materiales sobre las laderas y por efecto de procesos de transporte y deposición de materiales sobre las laderas y por efecto de procesos hidrogravitacionales en suelos saturados y no saturados. Su depósito está constituido por bloques y fragmentos heterométricos de rocas preexistentes, embebidos en una matriz arcillosa a arena limo arcilloso.
Deem	Escarpe de erosión mayor	Ladera abrupta o a desplome de altura variable que puede tomarse por distintas causas tectónicas, por la abrasión (erosión fluvial y marina), por procesos gravitacionales, glaciales, tectógenos. Eventualmente de longitud corta a larga, de forma cóncava, convexa y recta, con pendiente escarpada a muy escarpada.
Deeme	Escarpe de erosión menor	Ladera abrupta o a desplome de longitud corta a larga, de forma cóncava, convexa y eventualmente recta, con pendiente escarpada a muy escarpada, originado por socavación fluvial lateral o por procesos de erosión y movimientos en masa remontantes a lo largo de un drenaje.
Def	Escarpe faceteado	Superficie triangular o trapezoidal, de base amplia y tope angosto, con ladera de morfología alomada, cóncava de longitud corta a moderadamente larga y pendientes escarpadas a muy escarpadas. Su origen es relacionado a procesos de erosión, incisión y movimientos en masa en laderas relictas que aparecen en torno a relieves estructurales constituidos por materiales fracturados.
Dldeac	Lomo denudado alto de longitud corta	Son sistemas o conjuntos de lomos o filos ubicados a diferentes alturas; con índice de relieve relativo mayor que 1000 m y la longitud del eje principal es menor que 250 m; son formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal. El tope o parte superior puede tener diferentes formas dependiendo del grado de incisión del drenaje, el tipo de saprolito que ha desarrollado la roca dominante y de los procesos erosivos que lo han modelado. La inclinación y orientación del eje del lomo puede informar de procesos y velocidades de levantamiento del conjunto cordillerano o de la velocidad de la erosión del río principal o eje geomorfológico
Dldeam	Lomo denudado alto de longitud media	Son sistemas o conjuntos de lomos o filos ubicados a diferentes alturas; con índice de relieve relativo mayor que 1000 m y el eje principal tiene una longitud entre 250 m y 1000 m; son formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal. El tope o parte superior puede tener diferentes formas dependiendo del grado de incisión del drenaje, el tipo de saprolito que ha desarrollado la roca dominante y de los procesos erosivos que lo han modelado. La inclinación y orientación del eje del lomo puede informar de procesos y velocidades de levantamiento del conjunto cordillerano o de la velocidad de la erosión del río principal o eje geomorfológico.
Dldebc	Lomo denudado bajo de longitud corta	Son sistemas o conjuntos de lomos o filos ubicados a diferentes alturas; con índice de relieve relativo menor que 250 m y la longitud del eje principal es menor que 250 m; son formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal. El tope o parte superior puede tener diferentes formas dependiendo del grado de incisión del drenaje, el tipo de saprolito que ha desarrollado la roca dominante y de los procesos erosivos que lo han modelado. La inclinación y orientación del eje del lomo puede informar de procesos y velocidades de levantamiento del conjunto cordillerano o de la velocidad de la erosión del río principal o eje geomorfológico.
Dldemc	Lomo denudado moderado de longitud corta	Son sistemas o conjuntos de lomos o filos ubicados a diferentes alturas; con índice de relieve relativo entre 250 m y 1000 m y la longitud del eje principal es menor que 250 m; son formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal. El tope o parte superior puede tener diferentes formas dependiendo del grado de incisión del drenaje, el tipo de saprolito que ha desarrollado la roca dominante y de los procesos erosivos que lo han modelado. La inclinación y orientación del eje del lomo puede informar de procesos y velocidades de levantamiento del conjunto cordillerano o de la velocidad de la erosión del río principal o eje geomorfológico.
Dldeml	Lomo denudado moderado de longitud larga	Son sistemas o conjuntos de lomos o filos ubicados a diferentes alturas; con índice de relieve relativo entre 250 m y 1000 m y la longitud del eje principal es mayor que 1000 m; son formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal. El tope o parte superior puede tener diferentes formas dependiendo del grado de incisión del drenaje, el tipo de saprolito que ha desarrollado la roca dominante y de los procesos erosivos que lo han modelado. La inclinación y orientación del eje del lomo puede informar de procesos y velocidades de levantamiento del conjunto cordillerano o de la velocidad de la erosión del río principal o eje geomorfológico.

Código	Nombre	Definición
Dldemm	Lomo denudado moderado de longitud media	Son sistemas o conjuntos de lomos o filos ubicados a diferentes alturas; con índice de relieve relativo entre 250 m y 1000 m y el eje principal tiene una longitud entre 250 m y 1000 m; son formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal. El tope o parte superior puede tener diferentes formas dependiendo del grado de incisión del drenaje, el tipo de saprolito que ha desarrollado la roca dominante y de los procesos erosivos que lo han modelado. La inclinación y orientación del eje del lomo puede informar de procesos y velocidades de levantamiento del conjunto cordillerano o de la velocidad de la erosión del río principal o eje geomorfológico.
Dldema	Ladera disectada muy abrupta	Superficie de erosión con pendientes entre 20° y 30°, la cual posee una red de drenaje subparalela, localmente subdendrítica, de alta densidad, con un grado de incisión fuerte, lo que da lugar a una alta disección en el terreno.
Dle	Ladera erosiva	Corresponde a superficies del terreno de pendientes muy inclinadas a escarpadas, de longitudes moderadas a extremadamente largas, de formas planas, cóncavas y convexas, patrón de drenaje típico dendrítico a subparalelo. Presenta procesos erosivos intensos como cárcavas, surcos y solifluxión, sobre materiales de suelo o roca. Estas laderas no necesariamente están asociadas a una geoforma mayor o una estructura.
Dlea	Ladera erosiva abrupta	Superficie de erosión con una pendiente entre 15° y 20°, de longitudes moderadas a extremadamente largas, de formas planas, cóncavas y convexas, patrón de drenaje típico dendrítico a subparalelo.
Dlema	Ladera erosiva muy abrupta	Superficie de erosión con una pendiente entre 20 y 30°, de longitudes moderadas a extremadamente largas, de formas planas, cóncavas y convexas, patrón de drenaje típico dendrítico a subparalelo.
Dlfd	Cono o lóbulo de flujo de detritos	Estructura en forma de lóbulo y abanico con morfología alomada y aterrazada, de longitud muy larga a extremadamente larga, convexa, limitada por escarpes abruptos a muy abruptos. Su origen es relacionado a eventos fluviotorrenciales encauzados. Su depósito está constituido por bloques rocosos angulares a subredondeados de detritos y bloques embebidos en una matriz más fina.
Dlo	Ladera ondulada	Superficie en declive de morfología alomada o colinada, pendiente inclinada a escarpada, la longitud varía entre corta y muy larga. El patrón de drenaje es subdendrítico a subparelo. Estas laderas se pueden formar en suelos residuales y depósitos coluviales.
Dsa	Superficie de erosión o aplanamiento	Área extensa y plana, elevada o basculada. La topografía plana horizontal recorta las capas del basamento geológico. Su origen es relacionado a intensos procesos denudacionales y degradacionales (meteorización) bajo condiciones climáticas y tectónicas estables antiguas.
Fca	Cauce aluvial activo	Canal de forma irregular excavado por erosión de las corrientes perennes o estacionales, dentro de macizos rocosos y/o sedimentos aluviales. Dependiendo de factores como pendiente, resistencia del lecho, carga de sedimentos y caudal, pueden persistir por grandes distancias. Los cauces rectos se restringen a valles estrechos en forma de V, generalmente relacionados al control estructural de fallas o diaclasas. Estos cauces cuando recorren grandes distancias pueden formar lagunas y rápidos. Cuando las corrientes fluyen en zonas semiplanas a planas (llanura aluvial), los cauces son de tipo meándrico o divagante, como producto del cambio súbito de la dirección del flujo. Dependiendo la cantidad de carga de sedimentos, la pendiente y caudal pueden llegar a formar sistemas anastomosados, trezados, divergentes y otras unidades asociadas.
Fci	Cauce aluvial intermitente	Canales de flujo de agua intermitente, generados por la incisión de pequeños nacimientos de agua o esorrentia, con pendientes inclinadas a escarpadas, asociadas a una alta presencia de vegetación tipo bosque de galería y ripario. Su depósito está constituido por bloques o fragmentos de roca, subangulares a angulares, dispuestos de forma caótica y que son arrastrados por procesos hidrohgravitacionales.
Fpi	Plano o llanura de inundación	Superficie de morfología plana, baja a ondulada, eventualmente inundable. Se localiza bordeando los cauces fluviales, donde es limitado localmente por escarpes de terraza. Incluye los planos fluviales menores en formas de "U" o "V", al igual que a los conos coluviales menores de los flancos de los valles intramontañosos. En regiones montañosas, donde las corrientes fluviales tienden a unirse con sus tributarios para formar el cauce principal, en red de drenaje de tipo subparalelo de mediana densidad, se presentan como superficies estrechas, alargadas y profundas. Su depósito está constituido por sedimentos finos, originados durante eventos de inundación fluvial.

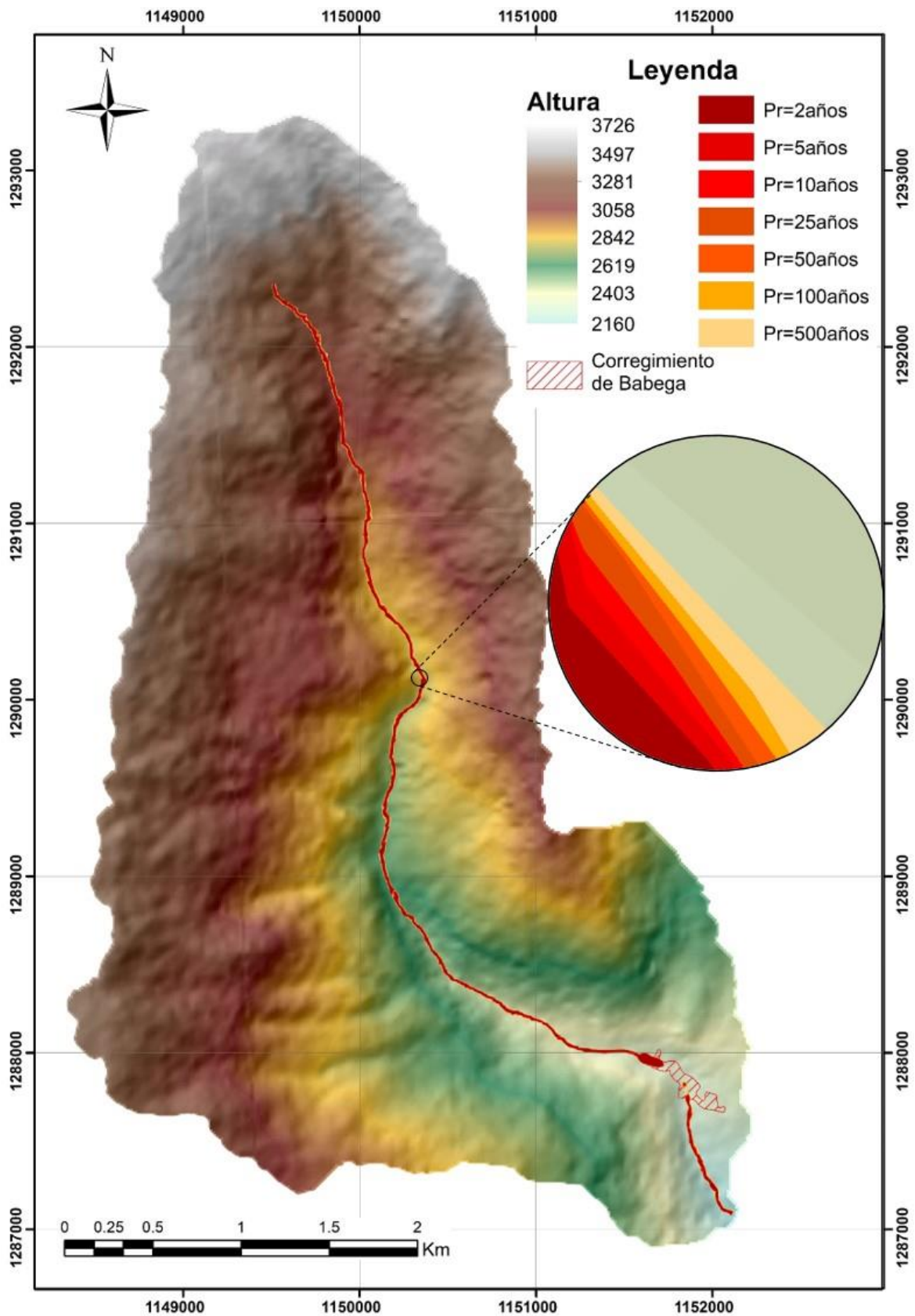
Apéndice E. Modelo 1. De profundidades (isóbatas)



Apéndice F. Modelo 2. De profundidades (isóbatas)



Apéndice G. Modelo 1. De velocidades (isotacas)



Apéndice H. Modelo 2. De velocidades (isotacas)

