

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CONSIDERACIÓN DEL FLUIDO
NEWTONIANO vs NO NEWTONIANO PARA LA MODELACIÓN DE
INUNDACIONES EN RONDAS HÍDRICAS CASO APLICATIVO
QUEBRADA LA PALMICHALA, MUNICIPIO DE FLORIDABLANCA,
DEPARTAMENTO DE SANTANDER**

JOSE RUBÉN TORRES CAMARGO

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL
BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO
BUCARAMANGA
2019**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CONSIDERACIÓN DEL FLUIDO
NEWTONIANO vs NO NEWTONIANO PARA LA MODELACIÓN DE
INUNDACIONES EN RONDAS HÍDRICAS CASO APLICATIVO
QUEBRADA LA PALMICHALA, MUNICIPIO DE FLORIDABLANCA,
DEPARTAMENTO DE SANTANDER**

JOSE RUBÉN TORRES CAMARGO

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de
Magister en Ingeniería civil**

DIRECTOR DE PROYECTO

Msc JUAN CARLOS FORERO

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL
BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO
BUCARAMANGA
2019**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del Jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Julio 2019

DEDICATORIA

Dedico este trabajo va dedicado a mi familia y amigos por el apoyo durante el proceso de ejecución de este trabajo

AGRADECIMIENTOS

Agradezco inicialmente a la Universidad Pontificia Bolivaria seccional Bucaramanga por ser una institución de alta calidad, en la cual he fortalecido conocimientos, también agradezco al Msc. Juan Carlos Forero por su diligencia en la dirección de este proyecto de grado y al comité evaluador por sus observaciones constructivas las cuales permitieron que este trabajo llegara a su máximo potencial.

Finalmente, quiero agradecer a la empresa TORRES ING S.A.S y a mi familia por su apoyo incondicional.

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO	5
1. INTRODUCCIÓN	9
2. OBJETIVOS	10
2.1. OBJETIVO GENERAL	10
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
3. METODOLOGÍA	10
4. ESTADO DEL ARTE	15
4.1. MARCO TEÓRICO.....	21
4.2. PERIODO DE RETORNO	21
4.3. MODELOS LLUVIA ESCORRENTÍA	22
4.3.1. MÉTODO RACIONAL	22
4.3.2. HIDROGRAMA DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL	22
4.4. DISTINCIÓN ENTRE EL FLUIDO NEWTONIANO Y NO NEWTONIANO	23
4.5. DEFINICIÓN DE UN FLUJO HIPERCONCENTRADO	24
4.5.1. PARÁMETROS PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS ESFUERZOS CORTANTES Y LA VISCOSIDAD DEL FLUJO EN TÉRMINOS DE LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS.	26
4.6. MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA HIDRODINÁMICA DE RÍOS27	
4.6.1. ECUACIONES QUE DESCRIBEN EL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN FLO-2D	28
4.6.2. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS PROPUESTOS	30
4.7. CARACTERIZACIÓN DE UNA CUENCA.....	32
4.8. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE FLUIDO	34
4.9. MARCO NORMATIVO	37
5. GENERALIDADES.....	38
5.1. UBICACIÓN Y LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	38
6. DESCRIPCIÓN HIDROLÓGICA Y CLIMATOLÓGICA	39
6.1. HIDROGRAFÍA DE LA CUENCA	39
6.2. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA PALMICHALA.	40
6.3. ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN ...	43
6.4. EVALUACIÓN DE LA INFILTRACIÓN MEDIANTE EL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA	56
6.5. CLASIFICACIÓN DE LOS ESFUERZOS CORTANTES Y LA VISCOSIDAD DEL FLUJO.....	57
6.6. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE LA CUENCA	59
7. DIAGNÓSTICO HIDRÁULICO DE LA QUEBRADA LA PALMICHALA	65
7.1. EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE INUNDACIÓN UTILIZANDO EL SOFTWARE HEC-GeoRAS	65

7.2.	EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE INUNDACIÓN UTILIZANDO EL SOFTWARE FLO-2D.	69
8.	RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	74
9.	CONCLUSIONES	94
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

GLOSARIO

Cuenca hidrográfica: Territorio drenado por un único sistema de drenaje natural, es decir, que sus aguas dan al cuerpo de agua de mayor orden a través de un único río. (Aparicio Mijares, 1992)

Drenaje: Hace referencia al sistema natural que permite el desalojo de los líquidos de escorrentía. (Aparicio Mijares, 1992).

Intensidad de la lluvia: Esta corresponde a la cantidad registrada de lluvia en una hora. (Aparicio Mijares, 1992).

Ronda hídrica: Zonas o franjas de terreno aledañas a los cuerpos de agua que tienen como fin permitir el normal funcionamiento de las dinámicas hidrológicas, geomorfológicas y ecosistémicas propias de dicho cuerpo de agua. (CDMB, 2009)

Pendiente de la cuenca: Relación entre la diferencia de altura desde el punto más bajo al punto más alto de una cuenca con la longitud media de la cuenca. (Aparicio Mijares, 1992).

Sedimentos: Material sólido acumulado sobre la superficie de un cuerpo de agua. (SUAREZ, 2009).

Escorrentía: Corresponde a la parte de la precipitación que llega a alimentar a las corrientes superficiales, continuas o intermedias de una cuenca. (Aparicio Mijares, 1992).

Velocidad del flujo: Corresponde a un campo vectorial empleado para describir matemáticamente el movimiento en un medio continuo, la velocidad del flujo corresponde propiamente a la longitud del vector. (SUAREZ, 2009).

Transporte de sólidos en suspensión: Al bajar la velocidad de la corriente del agua, se disminuye su capacidad de arrastre y el material se deposita en el fondo

del cauce, lo que podría generar colmataciones en los cuerpos de agua. (SUAREZ, 2009).

Flujo Hiperconcentrado: Consiste en flujos con altas concentraciones de partículas finas. A medida que la concentración aumenta, la estructura de los sedimentos se floccula rápidamente y la viscosidad aumenta fuertemente, formando cohesión de la mezcla suelo-agua. (SUAREZ, 2009).

Fluido Newtoniano: Corresponde a un Fluido que se caracteriza por la propiedad de que el gradiente de velocidad en un punto es proporcional al esfuerzo cortante en dicho punto. (LEVENSPIEL, 2011).

Fluido no Newtoniano: Son aquellos fluidos cuya viscosidad varía con el gradiente de tensión que se le aplica, es decir, se deforma en la dirección de la fuerza aplicada. (Tippens, 2007).

Inundación: Las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente, se producen por lluvias persistentes que generan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua. (IDEAM, 2017).

Avenidas Torrenciales: Corresponden a crecidas repentinas producto de fuertes precipitaciones que causan aumentos rápidos del nivel de agua de los ríos y quebradas de alta pendiente. Estas crecidas pueden ser acompañadas por flujo de sedimentos de acuerdo a las condiciones de la cuenca. (GEMMA, 2017).

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CONSIDERACIÓN DEL FLUIDO NEWTONIANO vs NO NEWTONIANO PARA LA MODELACIÓN DE INUNDACIONES EN RONDAS HÍDRICAS CASO APLICATIVO QUEBRADA LA PALMICHALA, MUNICIPIO DE FLORIDABLANCA, DEPARTAMENTO DE SANTANDER

AUTOR(ES): JOSE RUBEN TORRES CAMARGO

PROGRAMA: Maestría en Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): JUAN CARLOS FORERO

RESUMEN

Entre los fenómenos naturales con mayor incidencia en el desarrollo económico y social del país se encuentran las inundaciones, desde el punto de vista de la ingeniería, al abordar estudios con relación a estos fenómenos generalmente se aplican los conceptos basados en flujos compuestos por un caudal líquido, sin embargo, el material transportado en estos fenómenos corresponde al volumen de líquidos y sólidos, lo que incide en los diseños y modelos de simulación matemática de los mismos. En el siguiente proyecto se desarrolla la comparación de dos modelos hidráulicos de la quebrada La Palmichala localizada adyacente al campus de la Universidad Pontificia Bolivariana, un modelo fue desarrollado considerando un caudal líquido mediante el software Hec-GeoRas y otro considerando también el caudal sólido mediante el software Flo2D, los resultados obtenidos fueron analizados teniendo en cuenta evidencias existentes identificando cuál de las dos metodologías se ajustaba con mayor precisión a dichas evidencias y a eventos torrenciales que se presentaron previamente en el área en estudio.

PALABRAS CLAVE:

FLUJOS HIPERCONECTADOS; INUNDACIÓN; HIDRÁULICA; QUEBRADA LAPALMICHALA; HEC-GeoRAS; FLO-2D;

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: EVALUATION OF THE EFFECT OF THE CONSIDERATION OF THE NEWTONIAN vs. NO NEWTONIAN FLUID FOR THE MODELING OF FLOODS IN WATER ROUNDS APPLICABLE CASE OF LA PALMICHALA, MUNICIPALITY OF FLORIDABLANCA, DEPARTMENT OF SANTANDER

AUTHOR(S): JOSE RUBEN TORRES CAMARGO

FACULTY: Maestría en Ingeniería Civil

DIRECTOR: JUAN CARLOS FORERO

ABSTRACT

Among the natural phenomenoms that affects with increased incidence in the economic and social development of the country are the floods, from the point of view of engineering, the studies related to these phenomenom usually apply the concepts based on flows composed of a liquid flow, however, in some cases, corresponds to a volume composed of liquids and solids that affects designs and simulation models mathematics of these phenomenoms. In the following project the comparison of two hydraulic models of the La Palmichala gorge located adjacent to the campus of the Pontifical Bolivarian University is developed, a model was developed considering a liquid flow through the Hec-GeoRas software and another also considering the solid flow through the Flo2D software, the results obtained were analyzed taking into account existing evidence identifying which of the two methodologies was more precisely adjusted to said evidence and torrential events that were previously presented in the area under study.

KEYWORDS:

HYDROLOGY, HYPERCONCENTRATE FLOWS, FLOW NO NEWTONS, HYDRAULIC, HECGEORAS, FLO2D, WATER LEVEL

1. INTRODUCCIÓN

La inundación es uno de los fenómenos naturales que afecta con más frecuencia a las poblaciones colombianas debido al complejo sistema hídrico existente y la localización de asentamientos dentro de las rondas hídricas de los cauces afluentes del país (IDEAM, 2011).

Para controlar este problema, las entidades ambientales y entes territoriales han emitido diferentes decretos en los cuales se estipula la ronda hídrica a utilizar de acuerdo al cauce en estudio. Esta delimitación es un insumo fundamental que corresponde a los límites de inundación del cuerpo de agua en estudio.

Entre las metodologías utilizadas principalmente para la determinación de los límites de inundación se encuentran las modelaciones hidráulicas empleándose el software HEC-GeoRAS, en el cual se asume que, el cauce presenta un fluido newtoniano compuesto totalmente por agua, no obstante, en gran parte de las emergencias registradas en el país se deben a fenómenos de avenidas torrenciales, relacionados con fluidos no newtonianos compuestos por agua y diversas partículas de arrastre tales como lodo o sedimentos de diferentes tamaños, conformando un caudal líquido y un caudal sólido; al incluir dichos parámetros en el modelo hidráulico de inundación la franja inundable puede aumentar considerablemente y modificar sustancialmente la ronda hídrica calculada al contemplar únicamente el caudal de los líquidos.

Con el fin de comparar la diferencia entre un modelo simulado como flujo newtoniano y un modelo como flujo no newtoniano se realiza el análisis de inundación de la quebrada La Palmichala utilizando los dos modelos descritos anteriormente y comparando los resultados con evidencias de campo que permitieran realizar una aproximación a eventos de inundación generados dentro del campus universitario.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la influencia del criterio de tipo de fluido (newtoniano vs no newtoniano) en la modelación de inundaciones en la ronda hídrica de la quebrada La Palmichala del municipio de Floridablanca (Santander).

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Parametrizar la cuenca en sus aspectos morfométricos, climatológicos e hidrológicos a partir de datos y estudios existentes.
- ❖ Modelar la inundación de la corriente para casos de periodos de retorno de 10, 20, 50, 100, 200 y 500 años usando la consideración de fluido Newtoniano (Software HEC-GeoRAS).
- ❖ Determinar los caudales máximos de la cuenca para un periodo de retorno de 10, 20, 50, 100, 200 y 500 años.
- ❖ Realizar la evaluación determinística de la inundación mediante el software HEC-GeoRAS y FLO2D para los diferentes periodos de retorno en estudio.
- ❖ Comparar los resultados obtenidos mediante el software HEC-GeoRAS y FLO-2D.
- ❖ Analizar comparativamente los resultados obtenidos mediante las dos estrategias de modelación para definir cuál se aproxima mejor a las evidencias existentes y de esta manera emitir un concepto que pueda ser usado para estudios similares.

3. METODOLOGÍA

El proyecto de investigación planteado tiene como alcance realizar dos modelos hidráulicos de la quebrada La Palmichala ubicada en el municipio de Floridablanca, departamento de Santander.

El primer modelo se realizará mediante el software HEC-GeoRAS, el segundo modelo se ejecutará con el modelo propuesto en el software FLO-2D. Posteriormente se comparará los resultados obtenidos a partir de cada modelo con aforos históricos de la quebrada La Palmichala evaluando el porcentaje de error para cada modelo.

La metodología para la ejecución de este trabajo se divide en cinco (5) actividades principales, las cuales se describen de manera detallada a continuación.

- **INVESTIGACIÓN Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN**

Corresponde a la primera etapa del proyecto, en ella se desarrolla el acopio y la revisión de la información cartográfica del sitio tomado como referencia para el estudio, los estudios hidrológicos e hidráulicos anteriores realizados con enfoques similares a los modelos matemáticos de fluido newtoniano y no newtoniano; los documentos recopilados correspondientes al Plan de Ordenamiento Territorial - POT del municipio de Floridablanca, Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica - POMCA del río Lebrija, planchas cartográficas número 120-II-B-3, 120-II-B-4, 120-II-D-1 y 120-II-D-2 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC escala 1:10.000 del municipio de Floridablanca y series históricas de la precipitación registradas en la base de datos de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la meseta de Bucaramanga – CDMB y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM para las estaciones: La Esperanza, Piedecuesta Granja y Club Campestre.

- **ANÁLISIS CARTOGRÁFICO DE LA INFORMACIÓN**

En esta etapa se construye la digitalización de las planchas cartográficas a escala 1:10.000 correspondiente a curvas de nivel, drenajes, estructuras y vías empleando el software AutoCAD Civil 3D versión 2017 y ArcGIS versión 5.0. Posteriormente, se realiza la creación del modelo digital de elevación a partir de las curvas de nivel. Adicional a lo anterior, se utilizan imágenes satelitales Landsat disponibles en el software Google Earth Pro georreferenciadas en el sistema de coordenadas Magna Sirgas Colombia Bogotá Zone y se incluyen dentro de la base de datos creada en ArcGIS para el presente proyecto.

- **EVALUACIÓN HIDROLÓGICA Y CLIMATOLÓGICA**

A partir del modelo digital de elevación, la delimitación de los drenajes y las imágenes satelitales se delimita la cuenca de la quebrada La Palmichala y se determina su área, la pendiente media y la longitud media de la cuenca, con el objetivo de realizar la clasificación de la cuenca con base en la categorización definida por el índice de Gravelius, índice asimétrico e índice de alargamiento. Se incluye la determinación del tiempo de concentración de la cuenca con base en los métodos de Giandotti, Kirpich, Témez, Johnstone y Cross, Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos y Ven Te Chow y se analiza el coeficiente de escorrentía para la cuenca empleando la metodología dispuesta por el Soil Conservation Service.

Con la información de las estaciones y el tiempo de concentración se evalúa la intensidad máxima para periodos de retorno de 10 a 100 años, para así realizar la estimación del caudal máximo probable para diferentes periodos de retorno a partir del hidrograma de escorrentía superficial aplicado por el software HEC-HMS. Además, se determina el caudal máximo probable de los sólidos basados principalmente en el tipo de suelo que caracteriza el lecho de la quebrada La Palmichala.

- **EVALUACIÓN DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS**

Los modelos hidráulicos se analizarán a partir de la metodología reológica del software HEC-GeoRAS y FLO-2D.

Para la ejecución del modelo con el software HEC-GeoRAS es necesario delimitar la geometría del cauce en el software ArcGIS, identificar el coeficiente de Manning para el canal natural en estudio, incorporar los caudales calculados en la evaluación hidrológica para los periodos de retorno de 10, 20, 50, 100, 200 y 500 años, la definición de las condiciones de contorno del modelo a partir de la topografía, para finalmente, realizar la espacialización de los resultados en la base de datos del proyecto.

Los máximos niveles de inundación en el software FLO-2D se calculan a partir de las imágenes satelitales en la interfaz GDS y del modelo digital de elevación. Con base en estos insumos se crea la malla de discretización de elementos finitos con tamaño 2.0 m x 2.0m. A cada celda de la malla generada se le asigna el coeficiente de Manning y se incluye en el modelo el hidrograma unitario de los sólidos y el hidrograma unitario de los líquidos, para finalmente, espacializar los resultados en el aplicativo MAPPER del software y visualizar los resultados para cada una de las celdas.

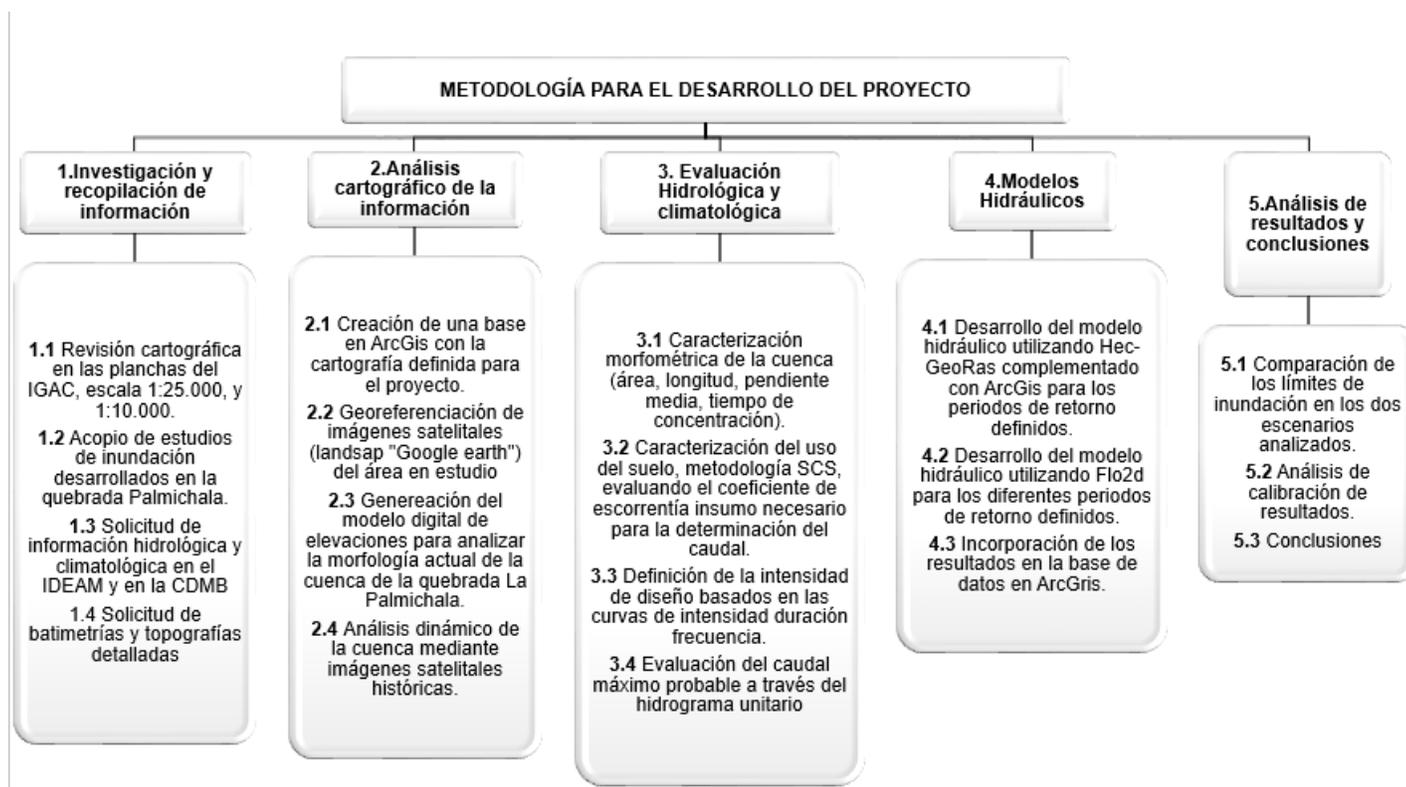
- **ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

A partir de los mapas con los límites de inundación y sus niveles máximos calculados a partir del procedimiento expuesto anteriormente, se realiza la comparación de los resultados de las dos metodologías, identificándose cuál de estos modelos genera los resultados con mayor afectación al campus universitario e identificando que modelo presenta la mayor aproximación al comportamiento de la

quebrada teniendo en cuenta evidencias de campo y de la amenaza por avenidas torrenciales de la cuenca.

En la Figura 1 se encuentra el esquema conceptual de la metodología detallada anteriormente.

Figura 1 Metodología para el desarrollo del proyecto.



Fuente: Autor del proyecto.

4. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presenta la recopilación de los estudios e investigaciones desarrolladas para el análisis y modelación matemática de inundaciones integrando flujos.

(Ingeniería, 2014) Observando la necesidad apremiante de analizar cada vez con más detalle los fenómenos de inundación, las instituciones han generado diferentes mecanismos para la evaluación de estos fenómenos.

Los primeros avances en el estudio de inundaciones se realizaron a mediados del siglo XX a través de los modelos unidimensionales, en los cuales se considera el río como una línea con una serie de puntos de cálculo que representan las secciones transversales, de tal forma que la geometría del cauce es una propiedad de cada punto de cálculo o sección. En estos modelos se asume que la velocidad del agua es constante en cada sección y son considerados fáciles en cuanto a su manejo, creación y ejecución.

Para este tipo de modelos el software de referencia es HEC-RAS, creado por el Hydrologic Engineering Center del U.S. Army Corps of Engineers, el cual permite realizar cálculos tanto en régimen permanente como en régimen variable. Otra herramienta de simulación 1D menos utilizada corresponde al Mike-11 (Danish Hydraulic Institute), programa previo al HEC-RAS.

En la década de los 70 se desarrolló una metodología para considerar las áreas anexas al cauce principal como un grupo de celdas o depósitos conectados entre sí, a estos modelos se les denomina Cuasi 2D. Este modelo resulta efectivo cuando en la zona de inundación no se requiere el detalle del campo de velocidades, sino que el objetivo es conocer los niveles de la lámina de agua.

Cercano a la creación de estos modelos se iniciaron a emplear los modelos 2D, en donde el drenaje ya no representa una línea sino una malla formada por una serie de celdas poligonales, representando así la topografía del cauce y llanuras de inundación.

Al contar con modelos 2D, los investigadores comenzaron a emplear combinaciones entre el esquema 1D y 2D, ya que en modelos 1D se invierte menor tiempo computacional, pero los modelos 2D generan mayor precisión. Entre las conexiones más significativas se encuentran las propuestas por: Verway, 2001, Finaud-Guyot, 2011, Blade, 2012, Morales Hernández, 2013. Entre los modelos comerciales que permiten la conexión mixta se encuentra el definido en el software Mike-Flood, SOBEK.

Debido a la acelerada tecnificación en la arquitectura de ordenadores, los modelos 2D son cada vez más utilizados ya que consumen un gran porcentaje de los recursos de los ordenadores debido a la utilización y refinación de mallas.

En cuanto a la historia de los modelos 2D, los software pioneros corresponden a Mike-21(DHI) y SOBEK. Estos programas utilizan esquemas en diferencias finitas de direcciones alternadas, posterior a estos software, se emplearon los modelos de elementos finitos, entre ellos los más destacados corresponden al modelo americano SMS (RMA2 y HIVEL2D) y el modelo Telemac (Hervouet, 2000), desarrollado en el laboratorio National d'Hydraulique (Departamento de Electricité de France).

Otro programa europeo empleado para el análisis de volúmenes finitos en 2D es InfoWorks 2D, desarrollado inicialmente por H.R. Wallingford. Finalmente, en los Estados Unidos se creó, empleó y comercializó rápidamente el software FLO-2D.

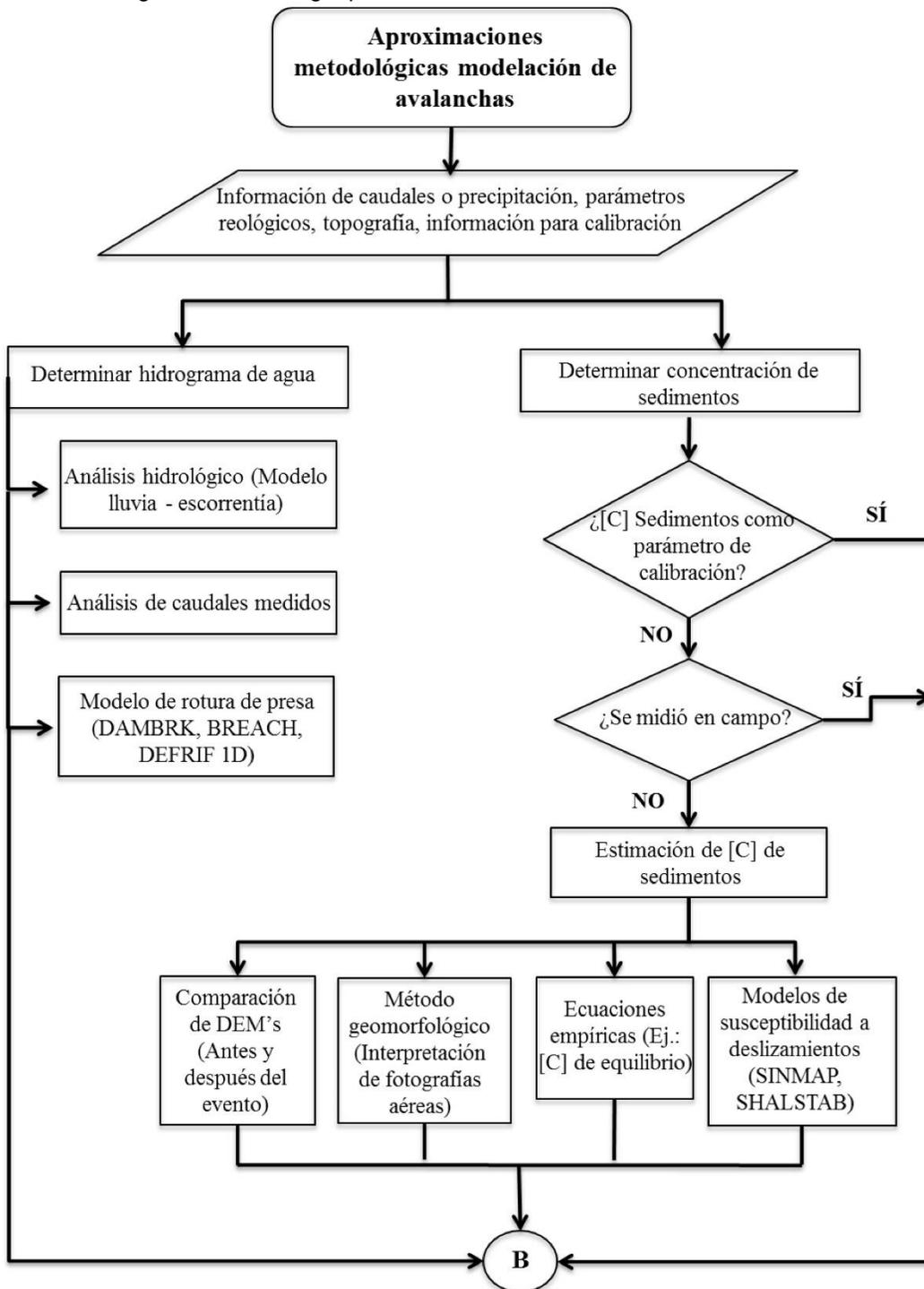
Al verificar la mejora en los modelos 2D, los investigadores incursionaron en la modelación 3D de inundaciones y flujos, si bien este modelo presenta la mayor exactitud, actualmente no es muy utilizado ya que requiere la utilización de mallas de

cálculo de varios millones de elementos finitos, lo que implica una alta inversión en equipos computacionales. Este modelo en 3D se realiza en el software Flow3D donde es posible capturar las formas de la lámina de agua a partir de la utilización de la malla tridimensional fija, metodología frecuentemente utilizada en aplicaciones de ingeniería hidráulica, fluvial y medioambiental.

En el ámbito colombiano los modelos mayormente utilizados corresponden a los modelos 2D, sin embargo, en vista de la tendencia en el país a ocurrencias de avalanchas ha sido necesario modificar las metodologías de estudio frente a estos fenómenos naturales.

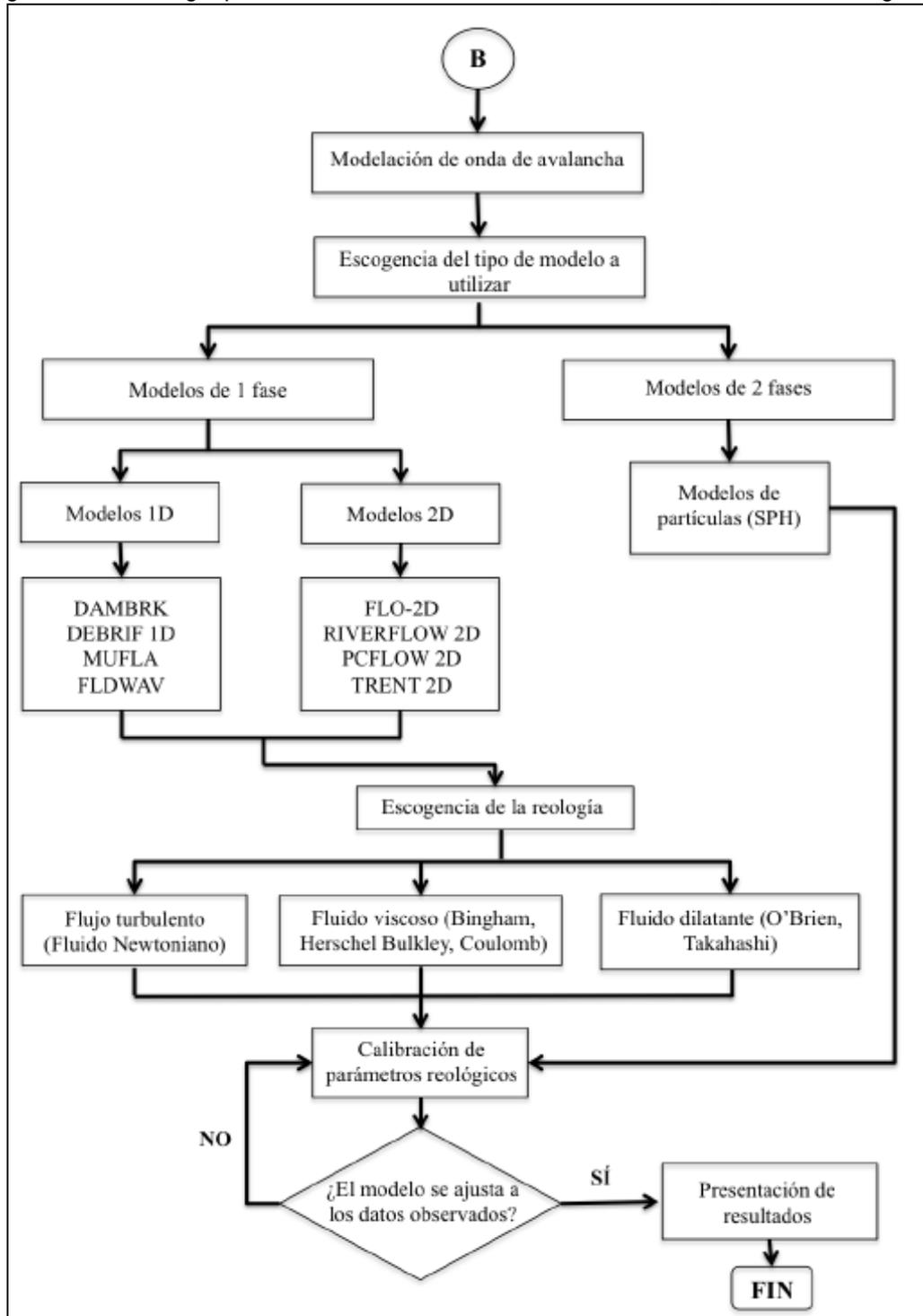
(Pedraza, 2016) En junio del 2016 se presentó ante la universidad de los Andes la tesis “Modelación matemática de flujos de avalancha”, elaborada por la Ing. Jessica Paola Páez, en ella se define la metodología típica para abordar las modelaciones de flujos o avalanchas empleando diferentes software disponibles en el mercado. En la Figura 2 y Figura 3 se encuentra el diagrama de flujo definido dentro del proyecto para abordar las modelaciones hidráulicas incorporando avalanchas, en ellas se evidencia la metodología referenciada.

Figura 2 Metodología para la modelación matemática de avalanchas.



Fuente: Diagrama de flujo aproximaciones metodológicas existentes (Paéz, 2016).

Figura 3 Metodología para la modelación matemática de avalanchas, continuación figura 2.



Fuente: Diagrama de flujo aproximaciones metodológicas existentes (Paéz, 2016).

Algunos estudios previos relacionados con la implementación del software FLO-2D en el modelo matemático del flujo se presentan a continuación:

- **Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú (2006)** (Castillo, 2006):

Corresponde al modelo matemático de la quebrada Paihua, localizada en el Perú, en ella se estimó el comportamiento del caudal a través del hidrograma sintético calculado por la metodología del Soil Conservation Service. Además, se desarrollaron mediciones de la concentración de sedimentos con el fin de introducir dichos parámetros en el software FLO-2D y estimar el comportamiento del flujo en condiciones críticas.

- **Simulación matemática del flujo de detritos en Eslovenia** (Cetina, 2006):

Se realiza la evaluación del transporte de flujos en el valle a partir de datos de concentración y caudal medidos directamente, empleando el modelo bidimensional en FLO-2D. Con los datos obtenidos, se establece que el coeficiente de rugosidad de Manning presenta una gran influencia en los resultados de la modelación.

- **Aplicación de las técnicas de simulación en la delimitación de amenaza por fenómenos de flujo de escombros - Caso de estudio Hualien, Taiwan** (Hsu, 2010):

Para la evaluación de la concentración de sedimentos se emplearon ecuaciones empíricas, reflejando una concentración en equilibrio, en el modelo de FLO-2D se empleó el modelo lluvia-escorrentía para determinar el hidrograma de entrada y el módulo hidráulico para simular la onda de la avalancha.

- **Aplicación de modelo FLO-2D en la simulación de flujo de detritos caso de estudio en Song-Her, Taiwan** (LIN, 2011):

Con base en el software FLO-2D se evalúa el modelo de los niveles de avalancha teniendo como insumos principales la concentración de sedimentos calculada mediante la comparación de imágenes satelitales antes y después del evento de avalancha y el hidrograma de caudal mediante el análisis hidrológico de la cuenca.

- **Modelación matemática de avalanchas y verificación en el caso de estudio de la quebrada La Negra en Útica, Cundinamarca** (Balanta, 2007):

Se utilizó el modelo HEC-HMS para determinar un hidrograma unitario de la avalancha, la concentración de sedimentos es tomada de forma directa y la actividad de la avalancha fue modelada a través del software FLO-2D, resultados calibrados a través de un modelo MUFLA en MATLAB, basado en las ecuaciones de Saint Venant y el modelo reológico de O'Brien.

4.1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describen los conceptos básicos requeridos para la ejecución de la modelación hidrológica e hidráulica de la quebrada La Palmichala.

4.2. PERIODO DE RETORNO

Para la definición del periodo de retorno se toma como referencia la resolución 1294 emitida por la CDMB en el año 2009, en el título 5.2.1 se establece que para estudios de inundación deben analizarse como mínimo los siguientes periodos de retorno.

❖ **Crecientes básicos:** Corresponde a la creciente con el 1% de posibilidad de ocurrencia en un año, es decir una creciente con periodo de retorno igual a 100 años, es posible utilizar el criterio de creciente básica cuando no existe riesgo de pérdidas humanas por la amenaza de la creciente.

❖ **Creciente máximo:** Corresponde a la creciente que tiene un 0.2% probabilidad de ocurrencia, es decir, una creciente con periodo de retorno de 500 años, la cual debe utilizarse como criterio siempre que exista riesgo de pérdidas humanas por la amenaza de la creciente.

4.3. MODELOS LLUVIA ESCORRENTÍA

Son métodos donde se calcula la escorrentía superficial a través de datos históricos de lluvia de corta duración aplicados a la cuenca hidrográfica con características geométricas específicas y de cobertura del suelo, a partir de estos datos se define el caudal máximo instantáneo.

Para la definición del caudal existen dos métodos dependientes del área de la cuenca correspondientes al método racional para cuencas con áreas de drenaje inferiores a 2.5 km² y al método del hidrograma de escorrentía superficial para áreas de drenaje superiores o iguales a 2.5 km².

4.3.1. MÉTODO RACIONAL

El método racional asume que el caudal determinado corresponde al caudal máximo del área de drenaje, producto de la precipitación que se mantiene por un tiempo igual al tiempo de concentración [Tc]. La expresión que identifica el caudal por este método es:

$$Q_p = C * I * A \quad (1)$$

Ya que el área está dada en km², la intensidad en mm/h y requerimos en caudal el m³/s, la ecuación se expresa de la siguiente manera:

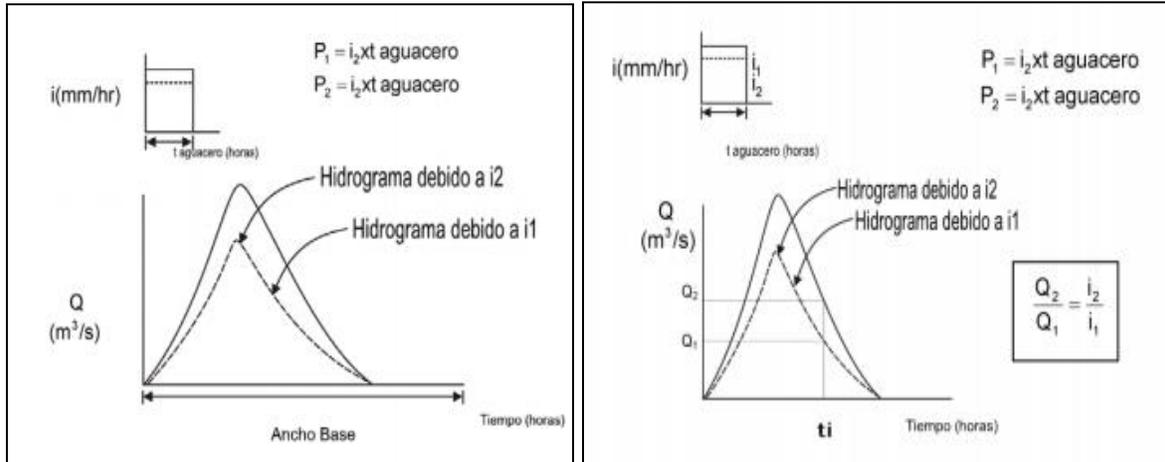
$$Q_p = 0.278 * C * I * A \quad (2)$$

4.3.2. HIDROGRAMA DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

(INVIAS, 2008) Los hidrogramas unitarios de escorrentía conservan la teoría clásica de linealidad, es decir que los hidrogramas generados por lluvias de la misma duración tienen el mismo ancho de base, sin importar la intensidad de lluvia neta. También se mantiene que los caudales son proporcionales a las alturas de lluvia neta, esto es válido para cualquier tiempo.

En la Figura 4 se presenta gráficamente el hidrograma unitario y la definición del caudal para un periodo de retorno específico.

Figura 4 Principios del hidrograma unitario.



Fuente: INVIAS, Manual de drenajes para carreteras,2008.

4.4. DISTINCIÓN ENTRE EL FLUIDO NEWTONIANO Y NO NEWTONIANO

La diferencia principal entre un fluido newtoniano y no newtoniano se basa en la aplicación de un esfuerzo tangencial y la velocidad con que se deforma, en los fluidos newtonianos la velocidad de deformación es directamente proporcional al esfuerzo aplicado. Se expresa mediante la siguiente expresión:

$$\tau_{yx} = \mu * \frac{du}{dy} \quad (3)$$

Los fluidos en los cuales el esfuerzo cortante no es directamente proporcional a la relación de deformación se consideran no newtonianos, los fluidos no newtonianos se clasifican con respecto a su comportamiento en el tiempo, este se expresa de manera empírica a través de un modelo de la ley de potencia expresado de la siguiente manera:

$$T_{yx} = k \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (4)$$

Donde el exponente se denomina índice de comportamiento y k el índice de consistencia.

4.5. DEFINICIÓN DE UN FLUJO HIPERCONCENTRADO

(Gámez, 1996) Corresponden a flujos que transportan una mezcla entre agua y sedimentos, el cual presenta un comportamiento visco-plástico y en donde las concentraciones de sólidos pueden llegar a ser superiores al 100%.

Existen diversas definiciones de flujo, entre las definiciones con mayor aplicación se encuentran:

- **Jonhson (1970):** Se considera el flujo hiperconcentrado como un movimiento en masa inducido por la gravedad, teniendo en cuenta que las características mecánicas de los flujos se encuentran en un nivel intermedio entre un deslizamiento y un flujo de agua.
- **Varnes (1996):** Este autor define el flujo como un movimiento espacialmente continuo, donde las superficies de corte son temporales, define los deslizamientos de escombros como flujo hiperconcentrado o avalanchas cuando el material deslizado pierde cohesión y este se encuentra en contacto con el agua.
- **García (2006):** Considera el flujo como una sustancia en movimiento compuesto por un alto porcentaje de material fino. Este flujo tiene la característica de detenerse y es dominado por el comportamiento hidráulico, la detención del flujo y las distancias de viaje.
- **Beverage y Culbertson:** Definen el flujo hiperconcentrado de manera cuantitativa, como un flujo con una concentración de sedimentos suspendida de al menos 20% en volumen y de 40% en masa, sin superar el 60% en volumen y 80% en masa. Esta categorización fue desarrollada a partir de la experiencia de los autores, sin embargo, no presenta criterios objetivos aparentes lo que hace que estos límites cambien de acuerdo al flujo.

(Fread, Agosto 1999) El comportamiento de un flujo hiperconcentrado varía en función de las propiedades geométricas del canal, la rugosidad, la pendiente y la matriz de suelo conformada por partículas finas de sedimento y agua, con una concentración que altera propiedades tales como viscosidad, densidad y esfuerzos del flujo.

Físicamente existen relaciones que permiten definir la naturaleza de un flujo basados en la concentración volumétrica de los sedimentos, la concentración por peso y la densidad del sedimento. Esta relación se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{C_{mg}}{l} = \frac{10^6 \text{ mg}}{l} * G * C_v \quad (5)$$

$$C_v = \frac{\text{Vol.Sedimentos}}{\text{Vol.lagua} + \text{Vol.sedimentos}} \quad (6)$$

$$C_w = \frac{C_v * G}{1 - C_v} \quad (7)$$

$$C_{ppm} = 10^6 * C_w \quad (8)$$

Dónde:

Cv= Concentración en volumen.

Cw= Concentración en peso.

Cppm= Concentración en partes por millón.

Cmg/l= Concentración en mg/L.

G= Gravedad específica del sedimento.

Basado en el planteamiento de (Garcia, 2006), se asume que la máxima concentración en volumen de sedimentos transportados por un cauce sin que modifique el comportamiento newtoniano del flujo es igual a 2.5%, en concentraciones superiores al 5% se establece que el flujo cambia su

comportamiento de agua modificándose a un flujo mixto donde sus propiedades se definen a partir de la concentración y las características físicas de los sedimentos transportados. García desarrolla una categorización y estandarización de las concentraciones de sedimentos diferenciando sedimentos en suspensión y flujos hiperconcentrados, la cual se presenta en la Tabla 2.

Tabla 1 Concentraciones equivalentes.

FLUJO	C_v	C_w	C_{ppm}	C_{mg/l}
SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN	0.0010	0.0026	2645.0	2650.0
	0.0025	0.0066	6598.0	6625.0
	0.0050	0.0131	13141.0	13250.0
	0.0075	0.0196	19632.0	19875.0
	0.0100	0.0261	26070.0	26500.0
	0.0250	0.0636	63625.0	66250.0
FLUJOS HIPERCONCENTRADOS	0.0500	0.1224	122402.0	132500.0
	0.0750	0.1769	176863.0	198750.0
	0.1000	0.2275	227468.0	265000.0
	0.2500	0.4690	469027.0	662500.0
	0.5000	0.7260	726027.0	1325000.0
	0.7500	0.8883	888268.0	1987500.0

Fuente: García (2006)

4.5.1. PARÁMETROS PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS ESFUERZOS CORTANTES Y LA VISCOSIDAD DEL FLUJO EN TÉRMINOS DE LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS.

La parametrización de los esfuerzos cortantes es propuesta por (O'Brien, 1988) basado en técnicas empíricas de los resultados obtenidos del análisis geológico de diferentes muestras tomadas en cauces donde se han presentado avenidas torrenciales, resultados asociados con el análisis del material fino, estableciéndose así relaciones entre dichos coeficientes y los diámetros representativos D16, D50 y D84.

A partir del análisis mencionado anteriormente se obtienen los coeficientes α_1 , α_2 , β_1 y β_2 , que representan los esfuerzos y la viscosidad del flujo en términos de la

concentración de sólidos en volumen. Los resultados del análisis se exponen en la Tabla 2 para diferentes tipos de muestras analizadas por O'Brien (1988).

Tabla 2 Datos y resultados tomados por O'Brien, et al (1988).

Muestra	Arcilla (%)	D16 (mm)	D50 (mm)	D84 (mm)	W.L	W.P	α_2	β_2	α_1	β_1
Glenwood Sample 1	6.8	0.009	0.023	0.050			0.0345	20.1	0.00283	23
Glenwood Sample 2	3.0	0.016	0.035	0.061			0.0765	16.9	0.0648	6.2
Glenwood Sample 3	4.8	0.011	0.025	0.053			0.00071	29.8	0.00632	19.9
Glenwood Sample 4	7.6	0.001	0.018	0.032			0.00172	29.5	0.0006	33.1
Aspen Pit 1	31.3	0.001	0.011	0.032	0.32	0.11	0.181	25.7	0.036	22.1
Aspen natural soil	27.0	0.001	0.012	0.028	0.25	0.06	0.152	18.7	0.00136	28.4
Aspen mine fill	27.8	0.001	0.013	0.030	0.24	0.06	0.0473	21.1	0.128	12
Aspen natural soil source	31.6	0.001	0.016	0.039			0.0383	19.6	0.0005	27.1
Aspen mine fill source	25.2	0.001	0.018	0.061			0.291	14.3	0.0002	33.1

Fuente: ASCE.

4.6. MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA HIDRODINÁMICA DE RÍOS

(Zhao, 1983) La modelación numérica de la hidrodinámica de los ríos requiere el uso de las teorías hidráulicas de flujo libre y sus métodos numéricos para resolver las ecuaciones de conservación. Uno de los aspectos más importantes en los modelos de flujo de ríos es la representación de la topografía del cauce y de la llanura de inundación.

A lo largo de la historia las simulaciones hidráulicas se han desarrollado principalmente a partir de modelos unidimensionales, donde se considera el río como una línea con una serie de puntos de cálculo correspondientes a la sección transversal, en estos modelos la hipótesis básica que influencia los resultados del modelo son:

- ❖ El flujo del agua se produce en el sentido del eje del río y es perpendicular a la sección transversal.
- ❖ La cota de agua es constante en cada sección.
- ❖ La velocidad del agua es constante en cada sección.

(Sendra, 2002) Comúnmente el software con modelos unidimensionales más utilizado es HEC-RAS, del Hydrologic Engineering Center del U.S Army Corps of Engineers, el cual además de las limitaciones expresadas anteriormente no permite modelar cambios de régimen en un mismo río. En el modelo descrito anteriormente, el flujo se simula netamente compuesto por agua, sin embargo, en el último siglo se han creado programas que permiten evaluar la inundación como una avenida, la cual ejerce una mayor fuerza sobre el terreno, modificando las condiciones normales del cauce, adicionalmente, la concentración de sólidos en suspensión puede llegar a varios gramos por litro y el agua cambiar su comportamiento de flujo newtoniano a no newtoniano, uno de estos programas corresponde a FLO-2D, el cual incorpora una ecuación de continuidad del sedimento, la ecuación de capacidad de transporte y una ecuación de convección difusión para los sedimentos en suspensión, no obstante, presenta la limitante que el análisis se ejecuta para sedimentos caracterizados por un único diámetro.

4.6.1. ECUACIONES QUE DESCRIBEN EL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN FLO-2D

(Piña, 2015) FLO-2D se basa en el principio de conservación de volúmenes, donde se establece que el avance de una crecida es controlado por la topografía y la rugosidad del cauce y de las planicies. En el modelo numérico es posible simular el proceso de lluvia esorrentía incluyendo la infiltración, el transporte de flujo en el canal y el flujo en las planicies de la cuenca.

Las ecuaciones fundamentales del modelo matemático del programa es la ecuación de continuidad del flujo y la ecuación de onda dinámica para la cantidad de movimiento:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} = i \quad (9)$$

Ecuación de la cantidad de movimiento o de momentum:

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad (10)$$

Donde:

V_x	Componente promedio de la velocidad en una celda
S_{fx}	Pendiente de la línea de energía, o pendiente de fricción
S_{ox}	Pendiente del lecho
h	Profundidad del flujo
g	Aceleración de la gravedad
i	Intensidad de lluvia de exceso
t	Tiempo

(Simons, 1963) Estas dos ecuaciones, definen el movimiento como cuasi-bidimensional, puesto que la ecuación de momentum se resuelve empleando la velocidad promedio del flujo en los bordes de una celda, la cual cuenta con ocho posibles direcciones del flujo: norte, este, sur, oeste, noreste, sureste, suroeste y noroeste. Esta velocidad es esencialmente unidimensional y se calcula independiente de la dirección; es decir, el cálculo de la velocidad es esencialmente unidimensional.

El modelo reológico más empleado por el modelo bidimensional FLO-2D es el propuesto por O'Brien y Julien (1985), definido a partir de la siguiente ecuación:

$$\tau = \tau_y + \eta \frac{du}{dy} + \xi \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad (11)$$

$$\tau_y = \tau_{MC} + \tau_C \quad (12)$$

Siendo τ el esfuerzo cortante, τ_y esfuerzo cortante de cedencia, η corresponde a la viscosidad dinámica del agua, ξ es el parámetro turbulento dispersivo y du/dy corresponde al gradiente de velocidad normal del flujo.

Existen tres tipos de flujos hiperconcentrados y su expresión matemática se presenta a continuación.

Flujos con exceso de tensiones de corte τ^* :

$$\tau^* = \frac{\tau - \tau_y}{\eta \left(\frac{du}{dy} \right)} \quad (13)$$

Relación dispersiva-viscosa Dv^* (para grandes Dv^* el flujo es disperso, para pequeños Dv^* el flujo es viscoso):

$$Dv^* = \frac{\rho s \lambda^2 ds^2}{\eta} * \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (14)$$

Relación turbulenta dispersiva TD^* (Para grandes TD^* el flujo es turbulento, para valores pequeños es dispersivo):

$$TD^* = \frac{\rho M l^2 m}{a 1 \rho s \lambda^2 ds^2} \quad (15)$$

A partir de los resultados de contrastes de modelos surgieron los siguientes valores guía para los flujos hiperconcentrados.

- Inundaciones de barro ocurren cuando son dominantes las tensiones turbulentas con $Dv > 400$ y $TD > 1$.
- Flujo de barro ocurren cuando son dominantes las tensiones viscosas y de cedencia, con $Dv < 30$.
- Flujos de detritos son esperados cuando son dominantes las tensiones dispersivas con $Dv > 400$ y $TD < 1$.

4.6.2. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS PROPUESTOS

Para el desarrollo del proyecto se propone realizar la comparación, empleando el software Hec-GeoRas y Flo2D, a continuación, se presenta la comparación de cada uno de los modelos según la metodología de cálculo que emplea, los parámetros de

ingreso empleados para obtener los niveles de inundación y la interfaz que cada uno maneja para el desarrollo de los proyectos, esta se encuentra en la

Tabla 3 Comparación de los modelos hidráulicos en HEC-GeoRAS y FLO-2D

DESCRIPCIÓN	FLO-2D	HEC-GeoRAS
Dimension del modelo	Bidimensional	Modelo unidimensional, sin embargo al dividir la sección en subsecciones lo convierte en un modelo aproximado al 2D.
Modelo Digital de elevaciones	Se requiere un modelo digital de elevación en formato Raster	Se requiere un modelo digital de elevaciones en formato vectorial TIN
Discretización del modelo	A partir de una malla formada por una serie de celdas poligonales que representan la topografía del cauce y llanuras de inundación	Se realiza mediante una línea que asume el cauce con una serie de secciones transversales distribuidas a lo largo del drenaje
Límites de inundación	Se definen mediante el modelo digital de elevaciones	Son definidos a partir de los límites establecidos según el método de FlowPaths
Caudal evaluado	Calcula la inundación a partir de los pulsos a lo largo del hidrograma realizado	Se calcula para el caudal pico de un periodo de retorno específico.
Tipo de Fluido analizado	Agua, Flujos, Flujos hiperconcentrados	Agua (100%), agua+ sedimentos
Coefficiente de Rugosidad	Permite delimitar el coeficiente de manning en cada una de las celdas, esto permite tener mayor exactitud en cuecas con variaciones en la rugosidad a lo largo del cauce	Se emplea el coeficiente de rugosidad de Manning para la totalidad del canal dividiendo el cauce de las laderas
Método de cálculo empleado para delimitar la altura de la lámina del fluido	Emplea la ecuación de continuidad y cantidad del movimiento, el análisis del flujo hiperconcentrado se analiza mediante el modelo reológico cuadrático de O'Brien y Julie, 1985	Ecuación de la energía Ecuación simplificada Cunge 1975, Saint Venant y Onda Difusa 2D
Viscosidad y peso específico de la mezcla	Tiene en cuenta la viscosidad dinámica y el peso específico a partir de los porcentajes de la mezcla del fluido, adicionalmente requiere el parámetros de resistencia K, el cual depende de la forma, pendiente y condiciones de vegetación del canal.	No tiene en cuenta la viscosidad, el peso específico asumido corresponde al peso específico del agua.
Modo de visualización	Presenta los resultados de acuerdo a la malla asignada según la gama de colores y capa de colores asignada	Presenta un visualización amena para presentar propiedades escalares y vectoriales de acuerdo a los límites de cálculo generados en el modelo

Fuente: Autor del proyecto a partir del Manual de uso HEC-RAS v5 (2016) e Instituto Flumen, Modelación numérica de inundaciones fluviales (2014).

4.7. CARACTERIZACIÓN DE UNA CUENCA

La cuenca hidrográfica se define como un área limitada topográficamente, drenada por un curso de aguas o un sistema de cursos de aguas, de tal forma que todo el caudal es descargado a través de una salida simple, localizada en el punto más bajo de la cuenca.

Las características físicas más importantes de las cuencas hidrográficas corresponden a su área de drenaje, la forma de la cuenca, sistema de drenaje, pendiente media de la cuenca y tiempo de concentración. El área, el sistema y la pendiente de la cuenca se determinan directamente a partir de la morfología de la cuenca, mientras que, la forma de la cuenca y su tiempo de concentración se establecen indirectamente a través de los parámetros morfométricos.

Las expresiones utilizadas para definir la forma y el tiempo de concentración de una cuenca se presentan a continuación.

FORMA DE LA CUENCA:

La forma de la cuenca se define mediante el factor de forma (Kf), coeficiente de compacidad (Kc), índice de alargamiento (Ia) e índice asimétrico (Ias). En la Tabla 4 se presenta la descripción de cada uno de los índices con su respectiva expresión matemática.

Tabla 4 Resumen de los parámetros de clasificación de la cuenca

PARÁMETRO	ECUACIÓN	SIGNIFICADO
Factor de Forma (Kf)	$Kf = \frac{A}{L^2}$	Kf>1, tendencia a ocurrencias de avenidas; Kf<1, cuenca alargada, baja susceptibilidad a las avenidas
Coeficiente de compacidad (Kc)	$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi * A}}$	Kc 1.00-1.25 Redonda a oval redonda Kc 1.25 - 1.50 Oval redonda a oval oblonga Kc 1.50 - 1.75 Oval oblonga a rectangular oblonga
Índice de alargamiento (Ia)	$Ia = \frac{Lm}{i}$	Ia>>1, Cuenca alargada Ia=1, Cuenca achatada
Índice asimétrico (Ias)	$Ias = \frac{A_{may}}{A_{men}}$	Ias >>1, Cauce principal bastante recargado a una de las vertientes. Ias =1, Distribución del cauce principal aproximadamente uniforme

Fuente: GAVILÁN Germán, Manual de diseño de drenajes superficiales, 2001.

TIEMPO DE CONCENTRACIÓN:

Se define como el tiempo que toma el flujo desde los límites más externos de la cuenca hasta llegar a la salida de la misma. Este parámetro se calcula a través de ecuaciones empíricas, las más comúnmente utilizadas son las presentadas a continuación, donde el tiempo de concentración se encuentra en función del área de drenaje, longitud de la cuenca y pendiente de acuerdo a cada uno de los autores:

- **Ecuación de Giandotti.**

$$T_c = \frac{4A^{0.5} + 1.5L}{25.3(LS)^{0.5}} \quad (16)$$

- **Ecuación de Kirpich**

$$T_c = 0.06628 * \left(\frac{L}{(S)^{0.5}}\right)^{0.77} \quad (17)$$

- **Ecuación de Témez**

$$T_c = 0.3 * \left(\frac{L}{(S)^{0.25}}\right)^{0.76} \quad (18)$$

- **Ecuación de Johnson y Cross**

$$T_c = 2.6 * \left(\frac{L}{(S)^{0.5}}\right)^{0.5} \quad (19)$$

- **Ecuación de Ven Te Chow**

$$T_c = 0.273 * \left(\frac{L}{(S)^{0.5}}\right)^{0.64} \quad (20)$$

- **Ecuación del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos**

$$T_c = 0.28 * \left(\frac{L}{(S)^{0.25}}\right)^{0.76} \quad (21)$$

Donde:

T_c: Tiempo de concentración, en horas [h].

A: Área de la cuenca, en kilómetros cuadrados [km²].

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros [km].

S: Pendiente del cauce principal, en metros por metros [m/m].

4.8. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE FLUIDO

Para la definición del caudal del flujo se define la propuesta expuesta por O'Brien (J.D. O'Brien, 2006), el volumen total de un flujo de lodos se determina mediante la amplificación del volumen de agua por un factor de engrosamiento (BF). El factor de engrosamiento expresado en términos de caudal corresponde a la relación entre el caudal total y el caudal líquido, parámetro definido a partir de la siguiente expresión:

$$QT = QW + QS \quad (22)$$

$$BF = \frac{QT}{QW} = \frac{QW + QS}{QW} \quad (23)$$

Donde:

QT= Caudal de flujo engrosado (m³/s).

QW= Caudal Pico de agua clara (m³/s).

QS=Caudal de sedimentos volumétricos (m³/s).

BF=Factor de engrosamiento (Bulking factor).

Si el factor de engrosamiento corresponde al cociente entre el caudal engrosado y el caudal de agua clara, este se puede representar como:

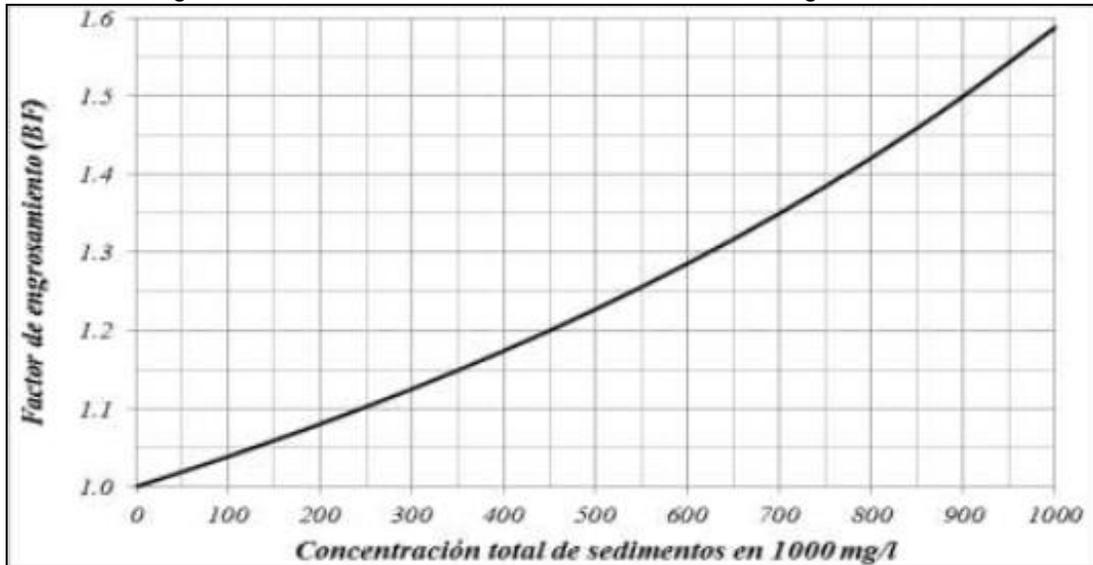
$$Qt = BF * Qw$$

Es posible calcular el factor de engrosamiento en función de la concentración volumétrica de sedimentos en el flujo a través de la siguiente expresión:

$$BF = \left(\frac{1}{1 - Cv} \right)$$

La siguiente gráfica resume el aumento del factor de engrosamiento (BF) en función de la concentración del sedimento (ver Figura 5), en ella se identifica una tendencia de crecimiento logarítmica entre la concentración total de sedimentos en 1000 mg/l vs factor de engrosamiento (BF).

Figura 5 Concentración de sedimentos vs. Factor de engrosamiento.



Fuente: J.D. O'Brien, 2006

Takahashi también propuso una metodología para la determinación del caudal del flujo, la cual depende de la concentración de los sedimentos ya sean finos o gruesos del cauce. Para un caudal de diseño en un periodo de retorno específico se calcula el volumen de sedimentos transportados por alud torrencial (V_s). Esta metodología se basa en la recopilación de experiencias de avenidas por flujos hiperconcentrados en Japón, a partir de los cuales Takahashi define el volumen de sólidos que transporta una creciente como:

$$V_s = V_w * \frac{C_D}{C^* - C_D} \quad (24)$$

Donde,

V_s = Volumen de los sólidos.

V_w = Volumen de agua.

C_D = Densidad volumétrica del flujo y rocas.

C^* = Concentración volumétrica de sedimentos en el lecho.

La densidad volumétrica del flujo de lodos y rocas trituradas C_D y la concentración volumétrica de sedimentos se calcula a partir de las siguientes expresiones:

$$CD = \frac{\rho M \tan S}{(\sigma - \rho M)(\tan \phi - \tan S)} \quad (25)$$

$$C^* = 1 - \eta \quad (26)$$

Donde,

ρ =Densidad de la mezcla agua-sedimentos (T/m³).

σ =Densidad de los sedimentos (T/m³).

Φ =Ángulo de fricción del material (30°-40°).

S=Pendiente del lecho en grados.

A partir de la expresión anterior se estima el caudal máximo de la mezcla agua-sedimento en función del caudal líquido y el caudal del material fino:

$$Q_t = Q_s + Q_f \quad (27)$$

$$Q_s = \left(\frac{C^*}{C^* - CD} \right) Q_w \quad (28)$$

$$Q_s = \left(\frac{C^*}{C^* - CD} \right) Q_w \quad (29)$$

$$Q_T = Q_s + Q_f \quad (30)$$

La expresión se resume de la siguiente manera:

$$Q_t = \left[\left(1 + \frac{V_s}{V_w} \right) + \frac{\rho M - 1}{\sigma - \rho M} \right] Q_w \quad (31)$$

Donde,

Q_w =Caudal líquido (m³/s).

Q_f =Caudal del material fino (m³/s).

Q_t =Caudal total del fluido (m³/s).

4.9. MARCO NORMATIVO

El marco normativo analizado para el presente trabajo de investigación corresponde a las resoluciones, decretos y leyes definidas a nivel regional para la delimitación de rondas hídricas y estudios de amenaza por fenómenos de inundación, a continuación, se relacionan estos documentos:

❖ **MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (DECRETO 2245 del 2017):** Establece los criterios técnicos con base en los cuales las autoridades ambientales realizarán los estudios para el acotamiento de las rondas hídricas.

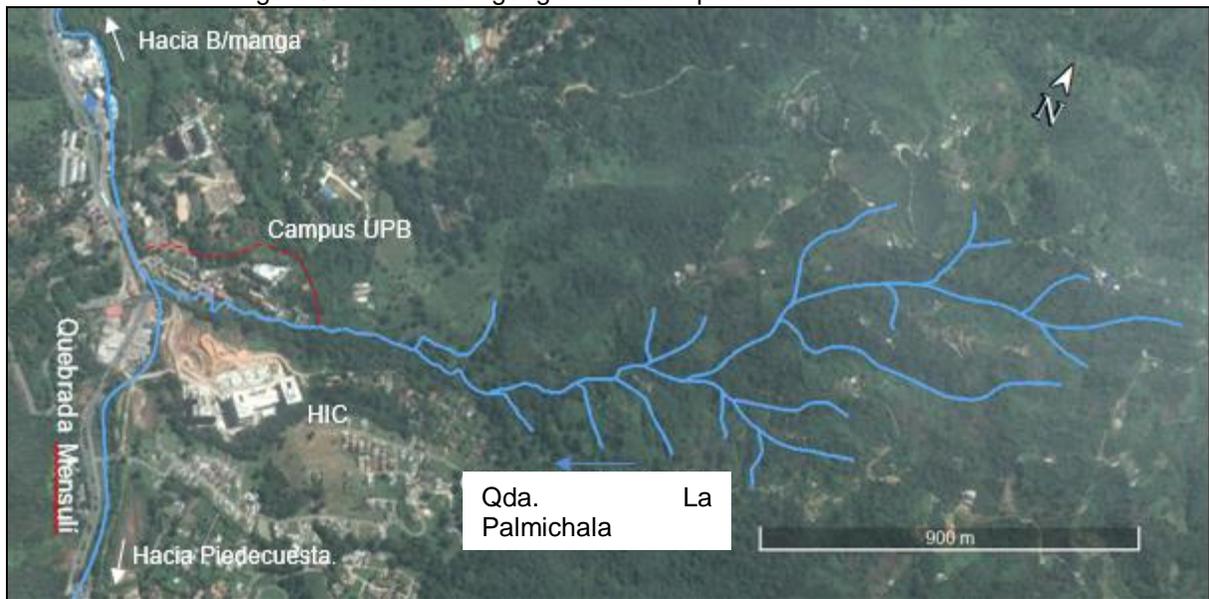
❖ **NORMAS GEOTÉCNICAS CDMB (RESOLUCIÓN 1294 DEL 2009) TÍTULO 5 y TÍTULO 7.5:** Se definen las especificaciones técnicas para delimitar los aislamientos mínimos en cauces principales y secundarios, donde estos se definen a partir de los límites definidos por la cota de inundación de la creciente máxima.

5. GENERALIDADES

5.1. UBICACIÓN Y LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El área de estudio corresponde a la cuenca de la quebrada La Palmichala, localizada paralela al campus de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga en el municipio de Floridablanca, departamento de Santander. En la Figura 6 se presenta la ubicación del cuerpo de agua y las estructuras adyacentes a esta quebrada.

Figura 6 Localización geográfica de la quebrada La Palmichala.



Fuente: Autor del proyecto a partir de las imágenes satelitales de Google Earth.

La quebrada La Palmichala se encuentra dentro de la cuenca del río Frío, que a su vez pertenece a la subcuenca del río de Oro, la cual hace parte de la subcuenca superior del río Lebrija, en el departamento de Santander con una latitud de $7^{\circ} 3' 32''$ y longitud $73^{\circ} 8' 51''$.

6. DESCRIPCIÓN HIDROLÓGICA Y CLIMATOLÓGICA

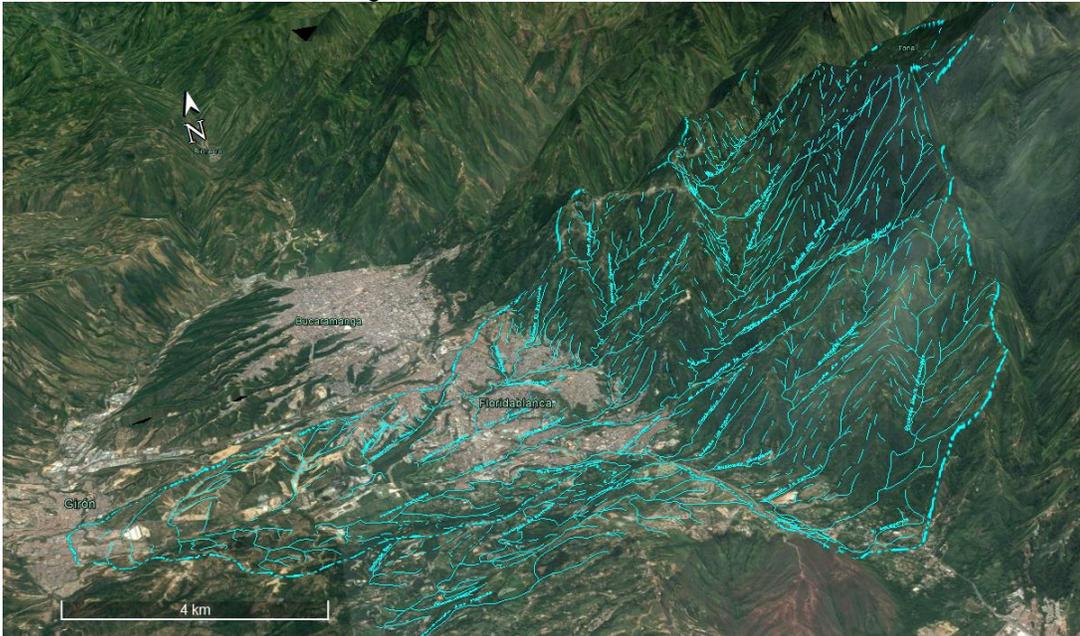
6.1. HIDROGRAFÍA DE LA CUENCA

Para la caracterización hidrográfica de la cuenca de la quebrada La Palmichala se empleó la información contenida en el POMPA de la cuenca del río Lebrija desarrollado por la CDMB y las características establecidas en el POT del municipio de Floridablanca.

La quebrada La Palmichala se localiza dentro de la cuenca del río Lebrija, en la subcuenca del río de Oro (2319-9), siendo parte de la zona hidrográfica del Medio Magdalena. Esta subcuenca abarca en total 5 municipios, correspondientes a Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta y Tona, dentro de ella se delimitan cinco microcuencas, correspondientes a la microcuenca del río de Oro Alto, río de Oro Medio, río de Oro Bajo, río Lato y río Frío.

La quebrada La Palmichala se encuentra dentro de la microcuenca del río Frío (2319-9-2). Cuenta con una extensión superficial igual a 11795.0 m², abarcando los municipios Floridablanca y Girón. En la Figura 7 se presenta la localización de la microcuenca del río Frío.

Figura 7 Microcuenca del río Frío.



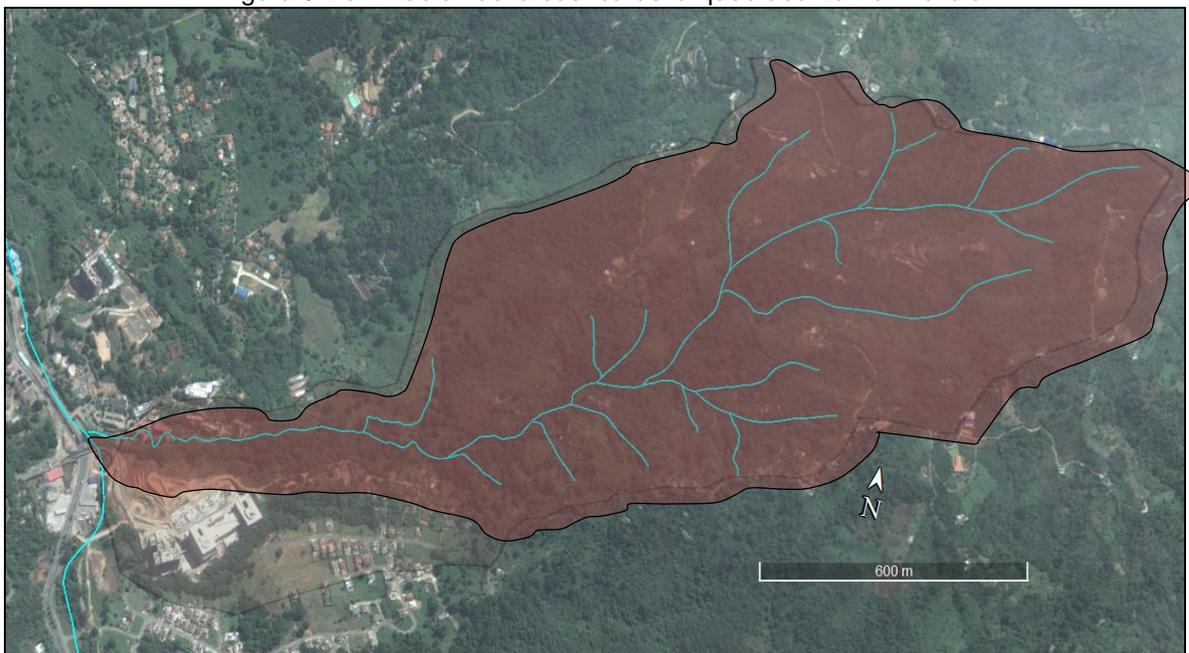
Fuente: Autor del proyecto a partir de Google Earth y el POT del municipio de Floridablanca.

En la microcuenca del río Frío se localiza la cuenca de la quebrada Mensulí Aranzoque, la cual presenta una extensión superficial igual a 3191 Ha, dentro de ella se caracterizan las cuencas de la quebrada Mensulí, Guayana, Arrayanes y La Palmichala.

6.2. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA PALMICHALA.

La delimitación de la cuenca de la quebrada La Palmichala se desarrolló a partir de las planchas 120-II-B-3, 120-II-B-4, 120-II-D-1 y 120-II-D-2 del IGAC escala 1:10.000 del municipio de Floridablanca. En la Figura 8 se presenta la delimitación de la cuenca de la quebrada La Palmichala.

Figura 8 Delimitación de la cuenca de la quebrada La Palmichala.



Fuente: Autor del proyecto a partir de Google Earth y el POT del municipio de Floridablanca.

A partir de la topografía existente realizada por la Universidad Pontificia Bolivariana y el IGAC se define el área de drenaje junto con sus parámetros morfométricos resumidos en la Tabla 5. En la Tabla 6 se presentan los resultados de los factores de forma calculados con base en los parámetros geométricos de la cuenca de la quebrada La Palmichala.

Tabla 5 Parámetros morfométricos de la cuenca de la quebrada La Palmichala.

Área de la cuenca	A	1.52	km ²
Longitud media de la cuenca	L	2.48	km
Perímetro de la cuenca	P	6.43	km
Ancho máximo perpendicular al cauce principal	i	0.83	km
Pendiente media de la cuenca	m	9.60	%

Fuente: Autor del proyecto.

Tabla 6 Factores de forma de la cuenca de la quebrada La Palmichala.

Factor de Forma [Kf]	0.23
Coficiente de compacidad [kc]	1.47
Índice de alargamiento [Ia]	8.13
Índice asimétrico [Ias]	6.11

Fuente: Autor del proyecto.

La cuenca de la quebrada La Palmichala tiene un área de 1.52 km², la longitud media de la cuenca de 6.75 km, la pendiente media de la cuenca corresponde a 9.6% y un ancho máximo perpendicular al drenaje igual a 0.83 km. En cuanto a la forma de la cuenca se define como una cuenca oval oblonga, con su cauce principal recargado por una de las vertientes localizadas en la parte alta de la cuenca, que de acuerdo al factor de forma, presenta una susceptibilidad baja a procesos de avenidas torrenciales.

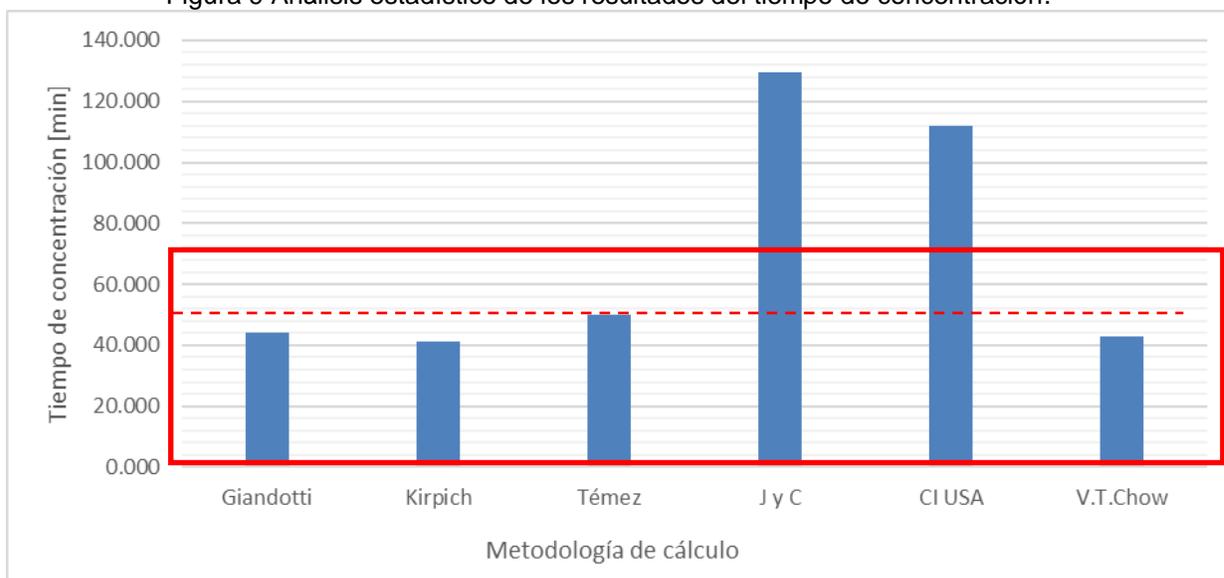
A continuación, se encuentran los resultados de la determinación del tiempo de concentración de la cuenca de la quebrada La Palmichala a partir de los diferentes métodos de estimación: Giandotti, Kirpich, Témez, Johnstone y Cross, Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos y Ven Te Chow (Tabla 7).

Tabla 7 Determinación del tiempo de concentración.

Giandotti		Kripich		Témez		Johnstone y Cross		C-I USA		Ven Te CHOW	
Tc [hr]	Tc [min]	Tc [hr]	Tc [min]	Tc [hr]	Tc [min]	Tc [hr]	Tc [min]	Tc [hr]	Tc [min]	Tc [hr]	Tc [min]
0.74	44.29	0.69	41.31	0.83	49.96	2.16	129.38	1.86	111.87	1.96	117.57

Fuente: Autor del proyecto.

Figura 9 Análisis estadístico de los resultados del tiempo de concentración.



Fuente: Autor del proyecto.

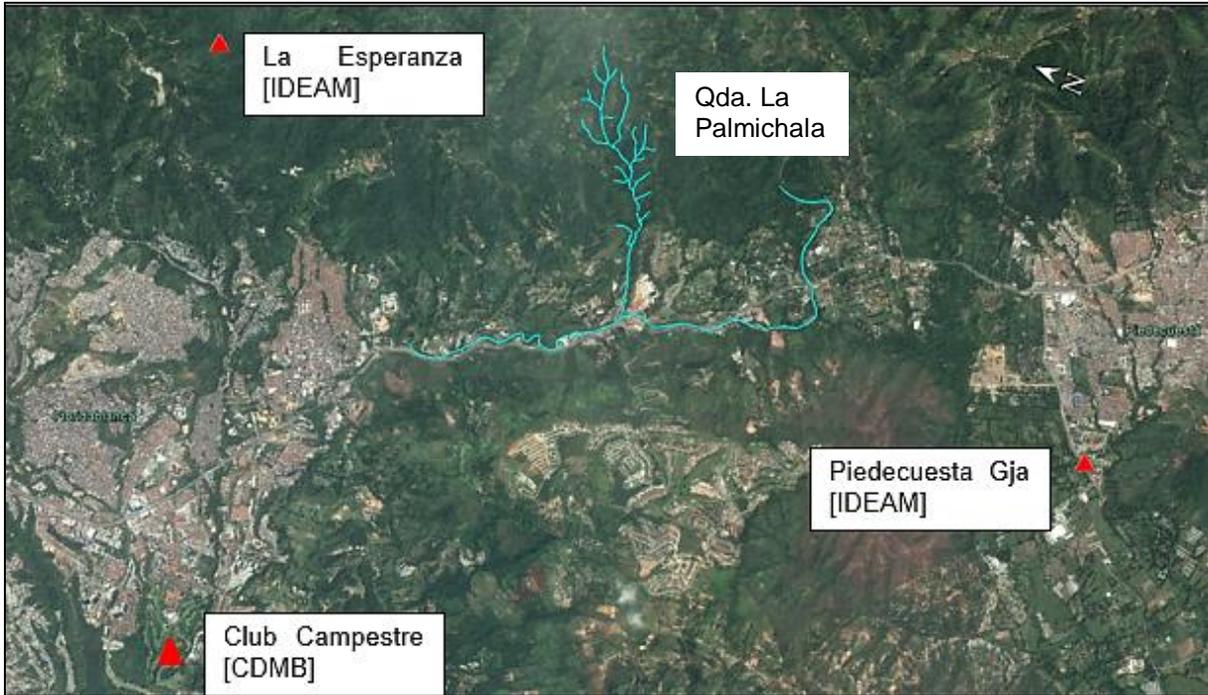
En la figura anterior se evidencia que los resultados entre el método de Giandotti, Kirpich, Témez y Ven Te Chow presentan magnitudes similares, mientras que, los valores estimados por los métodos de Johnstone y Cross y el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos presentan diferencias significativas con respecto a los otros métodos de cálculo del tiempo de concentración.

De acuerdo a este análisis descriptivo se calcula el tiempo de concentración de la cuenca como el promedio de las magnitudes obtenidas a partir de los métodos de Giandotti, Kirpich, Témez y Ven Te Chow, ya que contemplan un mayor número de parámetros geométricos a los métodos restantes. El resultado del tiempo de concentración corresponde a 44.66 minutos.

6.3. ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

El análisis de la precipitación se desarrolla a partir de la información climatológica existente en las bases de datos del IDEAM y la CDMB. Del IDEAM se cuenta con información de las estaciones La Esperanza y Piedecuesta Granja, por parte de la CDMB se tiene la estación del Club Campestre. La espacialización de las estaciones meteorológicas en estudio se presenta en la Figura 10.

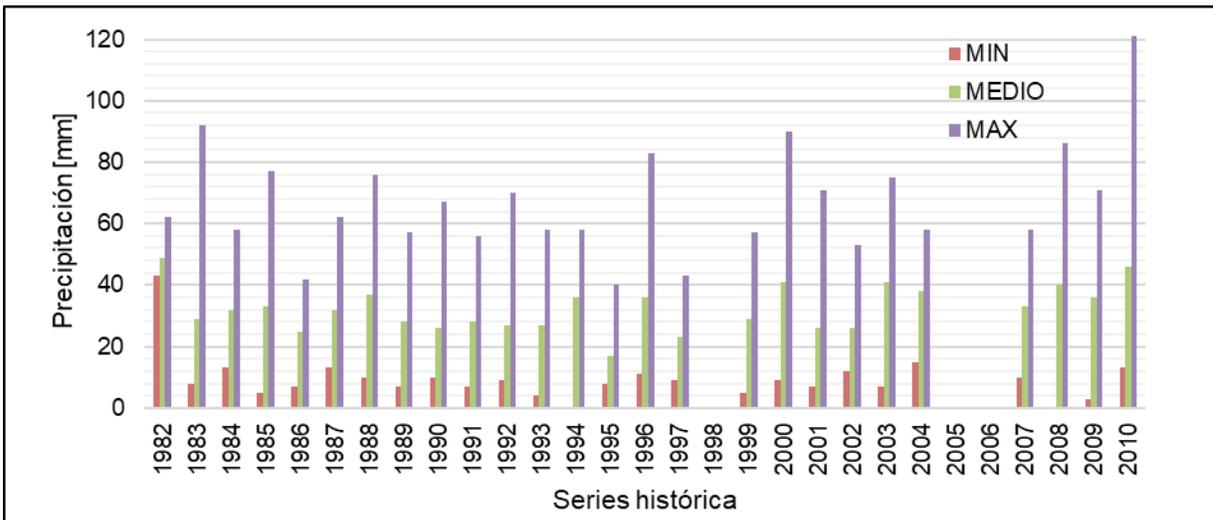
Figura 10 Localización de las estaciones meteorológicas.



Fuente: Autor del proyecto a partir de la información del IDEAM y la CDBM.

Para la evaluación de las avenidas se considera la precipitación máxima en 24 horas de cada una de las estaciones, de la Figura 11 a la Figura 13 se encuentra el resumen del registro de datos históricos registrados para cada una de las estaciones definidas.

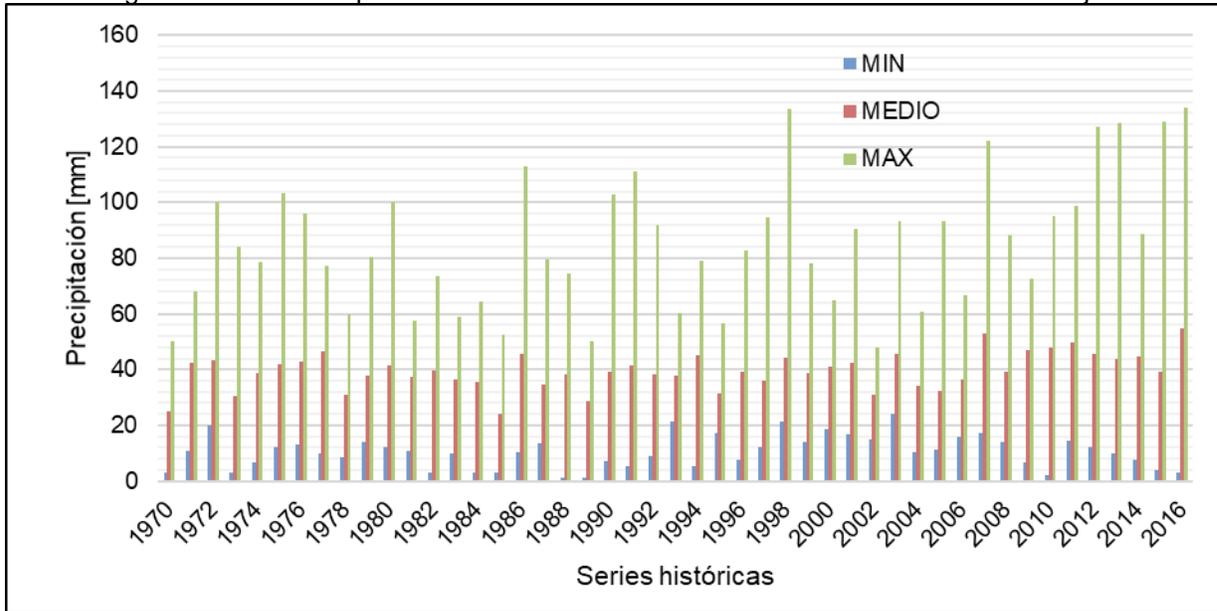
Figura 11 Valores de precipitación máxima en 24 horas de la estación Club Campestre.



Fuente: Autor del proyecto a partir de la información la CDBM.

La estación Club Campestre se encuentra ubicada dentro de la jurisdicción del municipio de Floridablanca, en el barrio Cañaveral, a una distancia igual a 5 km de la quebrada La Palmichala y una altura de 840 metros sobre el nivel del mar. Esta estación cuenta con series históricas desde el año 1982 hasta el año 2010, con el mayor registro de precipitación máxima en 24 horas correspondiente a 120 mm.

Figura 12 Valores de precipitación máxima en 24 horas de la estación Piedecuesta Gja.

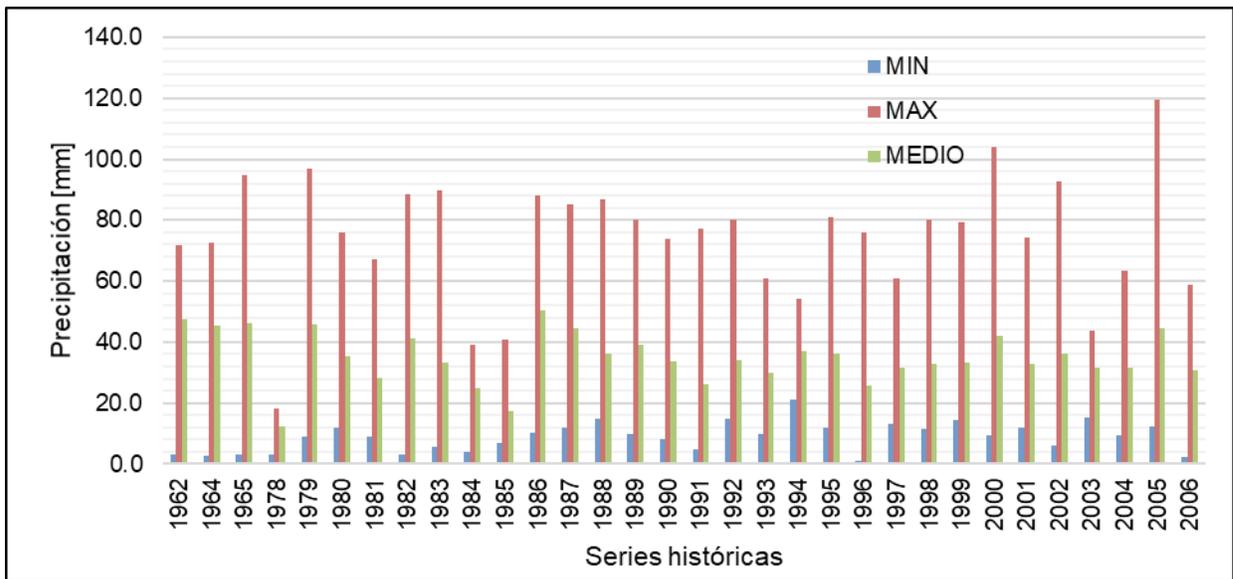


Fuente: Autor del proyecto a partir de la información del IDEAM.

La estación Piedecuesta se localiza en el municipio de Piedecuesta a 4.79 km de la quebrada La Palmichala, a una altura de 951 metros sobre el nivel del mar. Cuenta con datos históricos desde el año 1970 a 2016, en donde los valores de precipitación máxima en 24 horas se registran a partir del año 2012 al 2016 con intensidades máximas de 135 mm.

Para la estación meteorológica La Esperanza se tiene el registro histórico desde el año 1962 a 2006. Estación localizada a 4.8 km del área de estudio ya una altura de 1169 metros sobre el nivel del mar. El mayor registro de precipitación máxima en 24 horas es de 120 mm, valor registrado en el año 2005.

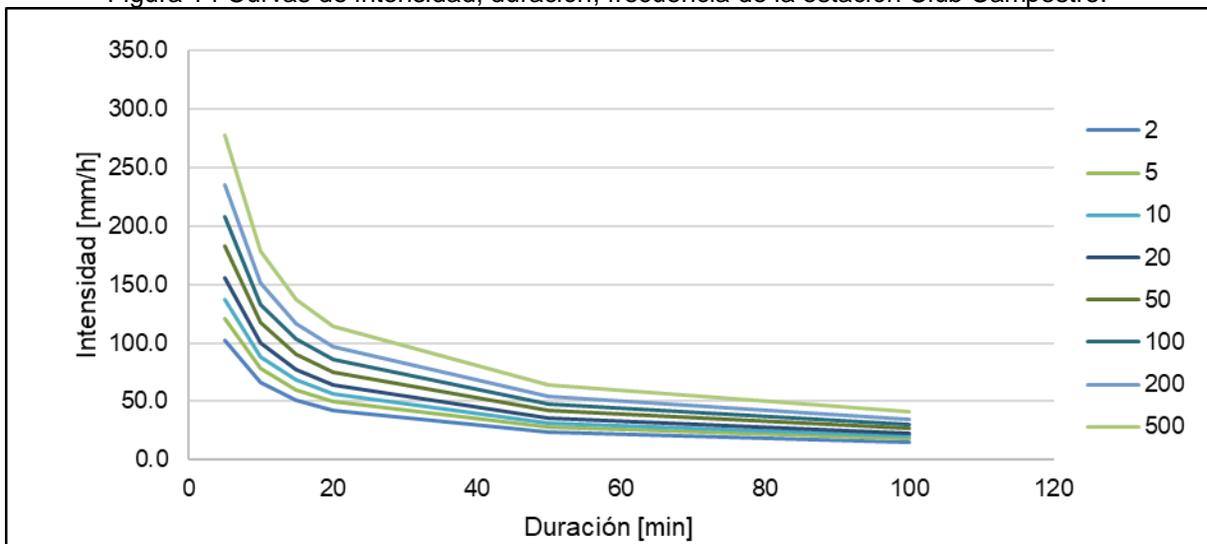
Figura 13 Valores de precipitación máxima en 24 horas de la estación La Esperanza.



Fuente: Autor del proyecto a partir de la información del IDEAM.

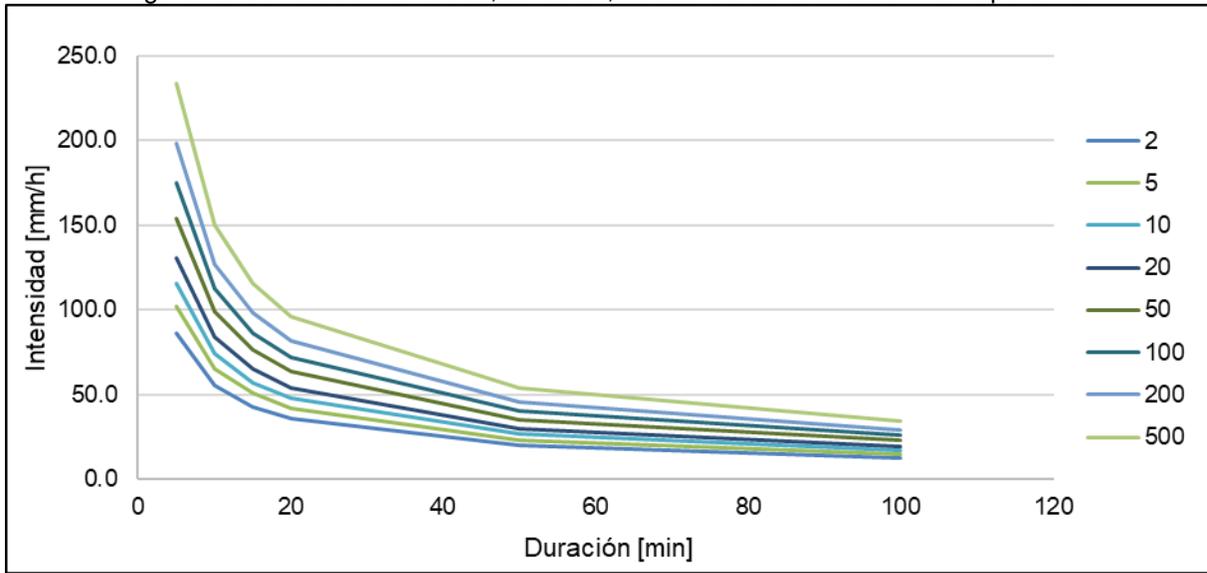
A partir de las precipitaciones históricas se definen las curvas de intensidad, duración, frecuencia para cada una de las estaciones, basados en la metodología de las curvas sintéticas establecida por Díaz Granados en 1998. Los resultados de las curvas IDF se presentan de la Figura 14 a la Figura 16.

Figura 14 Curvas de intensidad, duración, frecuencia de la estación Club Campestre.



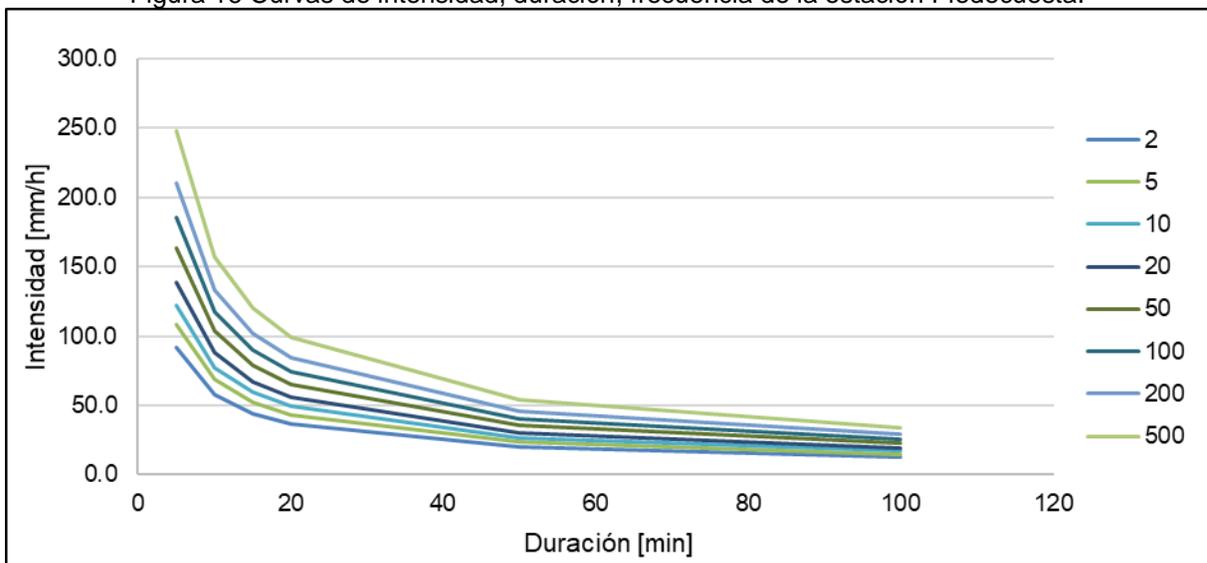
Fuente: Autor del proyecto a partir de la información de la CDMB.

Figura 15 Curvas de intensidad, duración, frecuencia de la estación La Esperanza.



Fuente: Autor del proyecto a partir de la información del IDEAM.

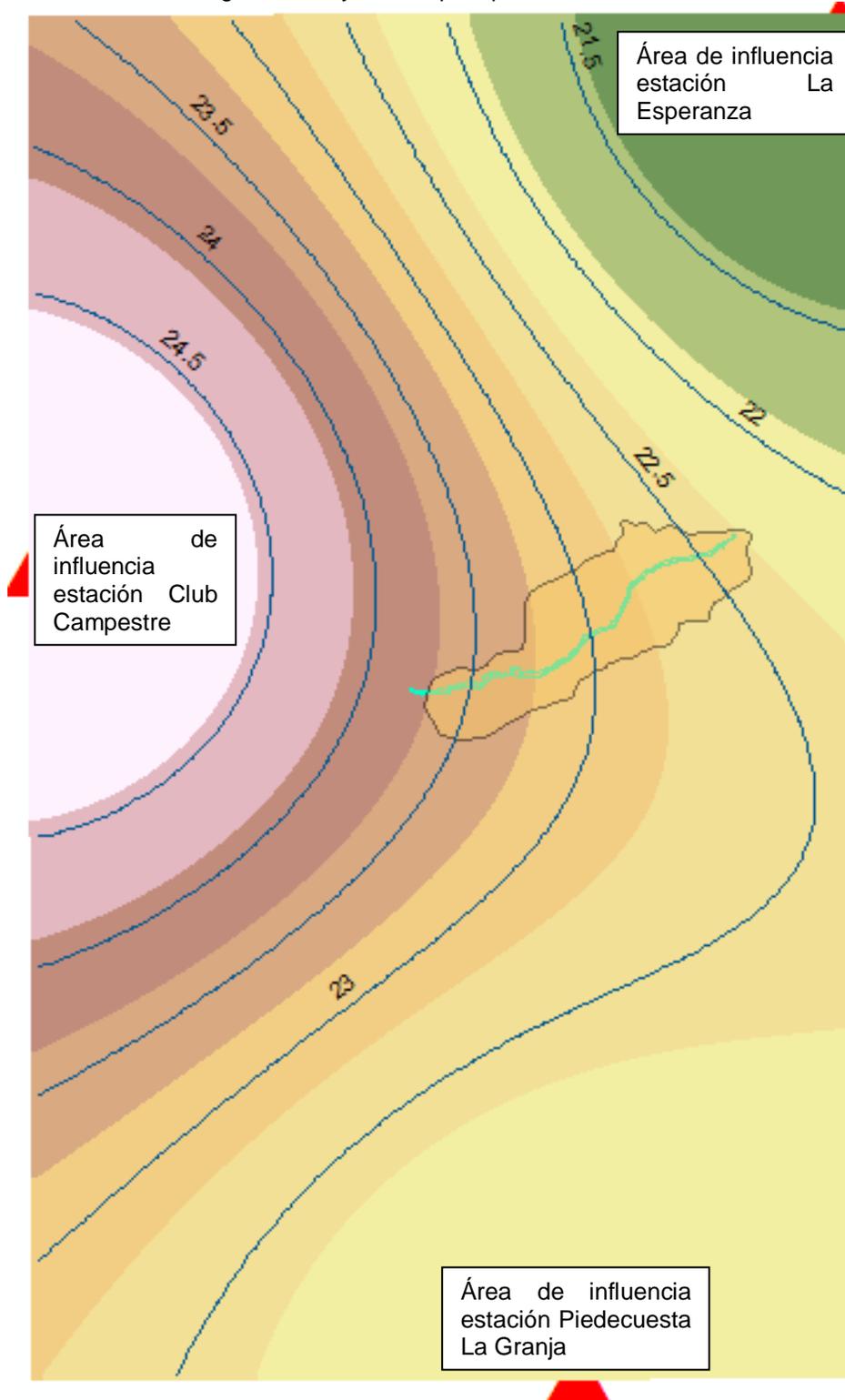
Figura 16 Curvas de intensidad, duración, frecuencia de la estación Piedecuesta.



Fuente: Autor del proyecto a partir de la información del IDEAM.

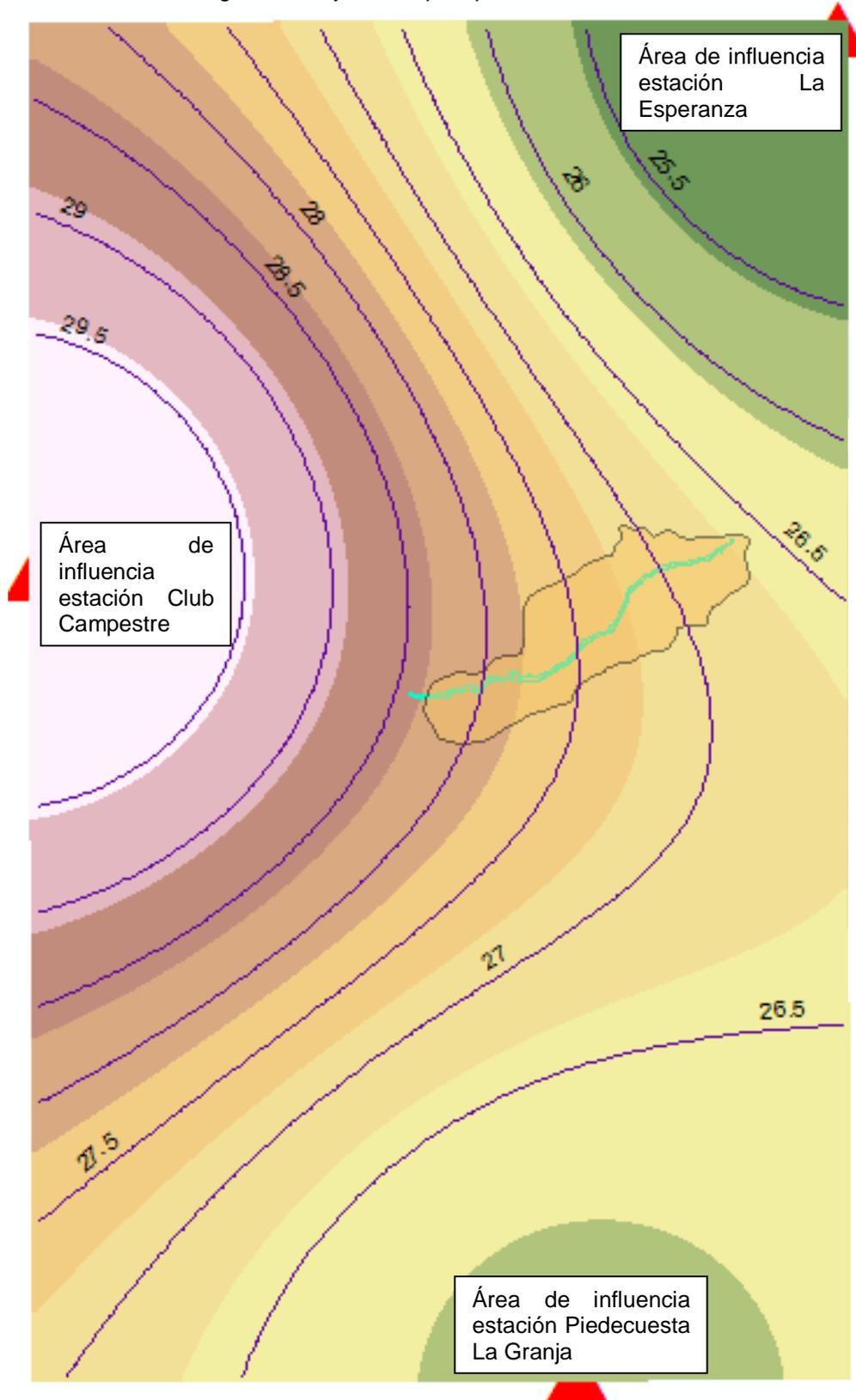
Teniendo en cuenta la distancia existente entre las tres estaciones y la quebrada La Palmichala para la definición de la intensidad se desarrolla el análisis geoespacial a partir de la interpolación tipo IDW, esta se desarrolla en base a la plataforma Spatial Analyst Tools del software ArcGIS, el resultado de esta evaluación se presenta en las siguientes figuras.

Figura 17 Isoyetas de precipitación TR 2años.



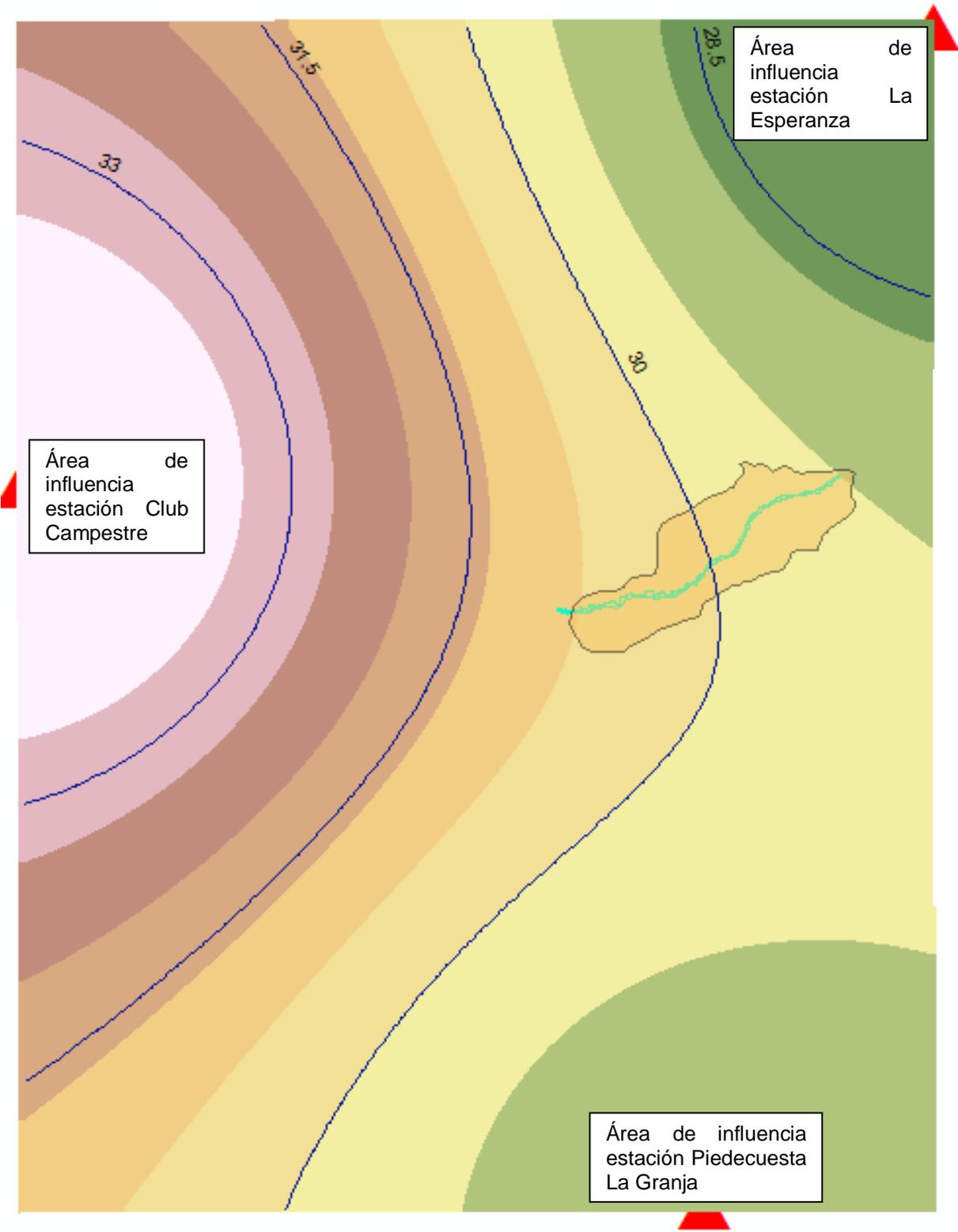
Fuente: Autor del proyecto a partir de ArcGIS.

Figura 18 Isoyetas de precipitación TR 5 años.



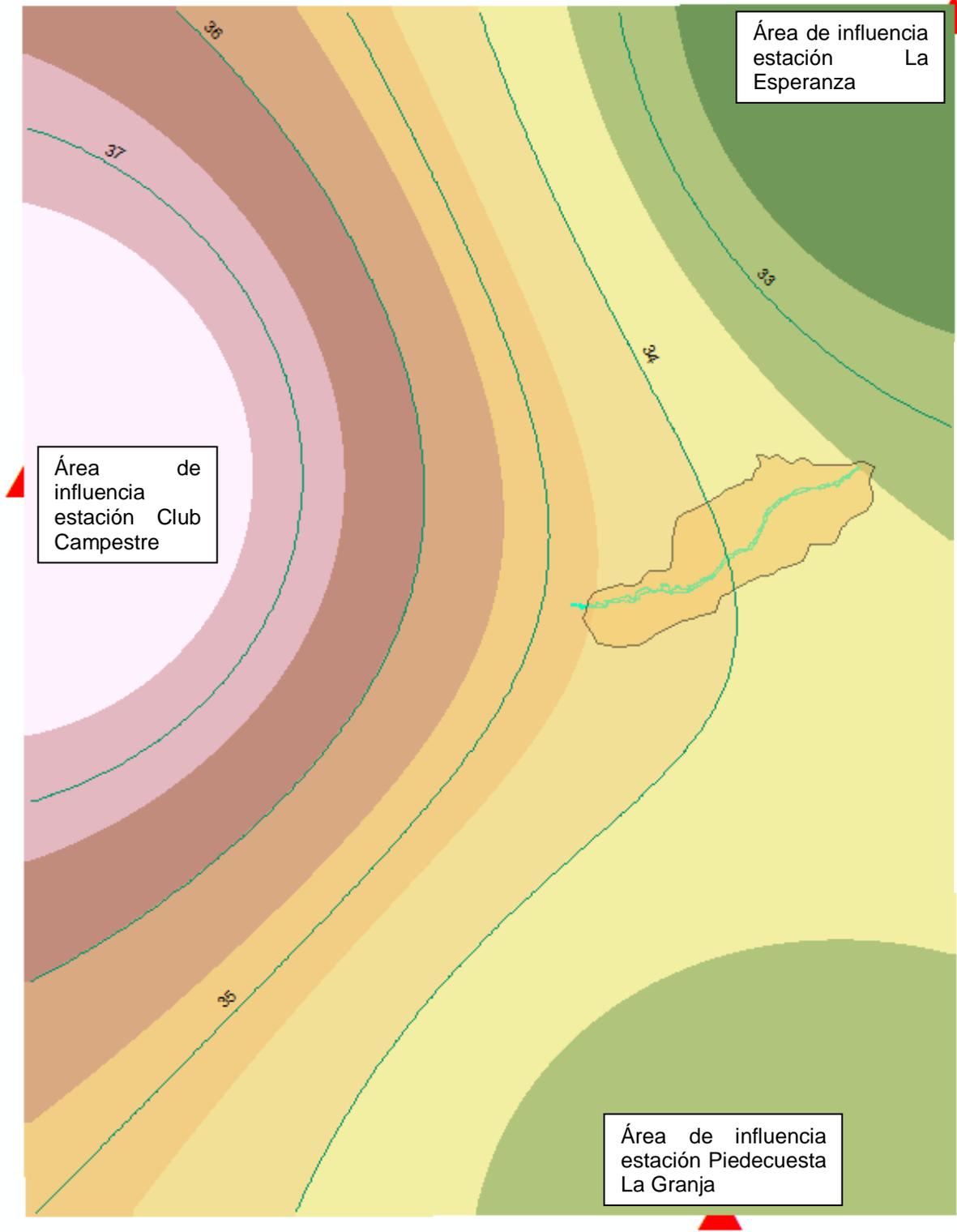
Fuente: Autor del proyecto a partir de ArcGIS.

Figura 19 Isoyetas de precipitación TR 10 años.



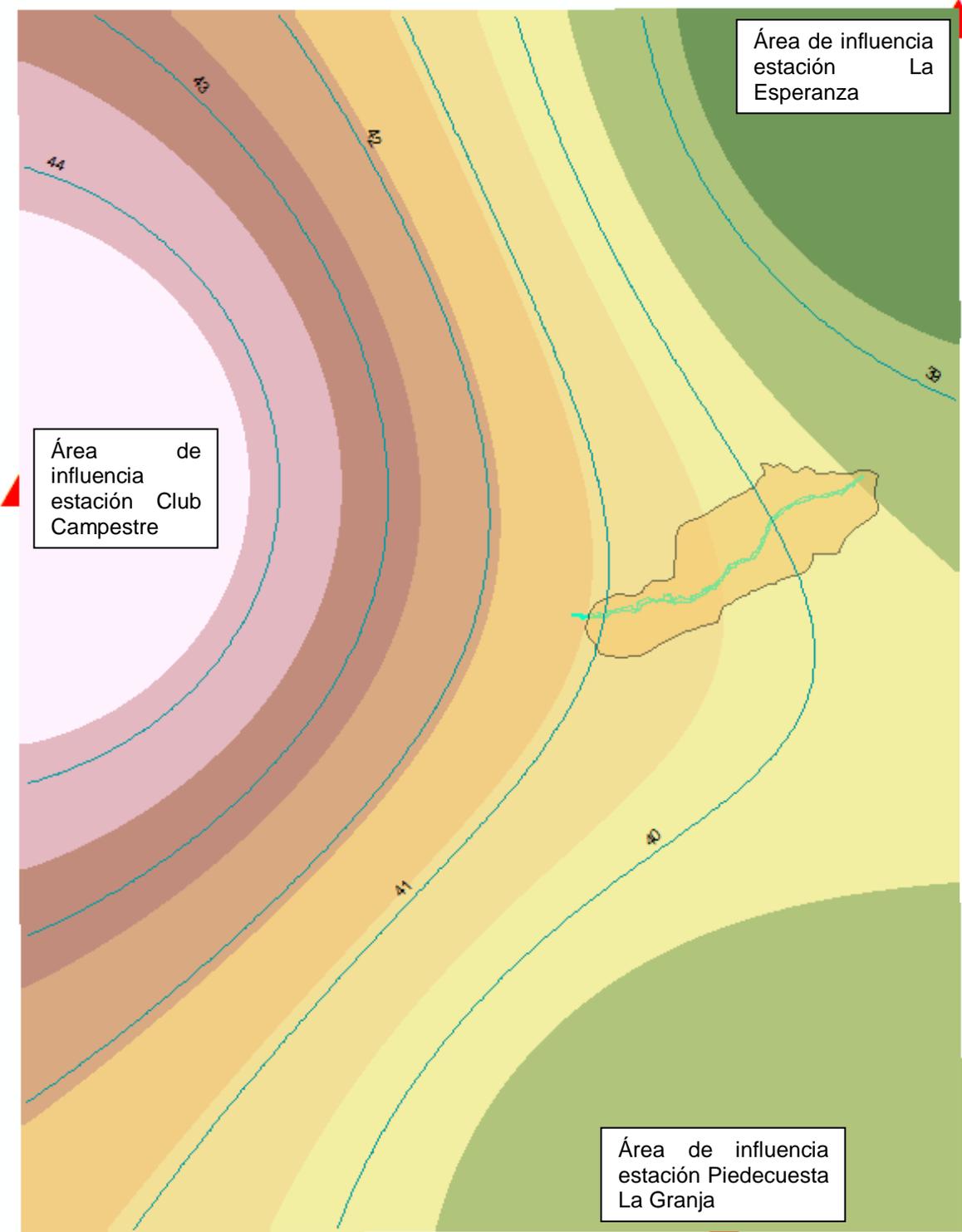
Fuente: Autor del proyecto a partir de ArcGIS.

Figura 20 Isoyetas de precipitación TR 20 años.



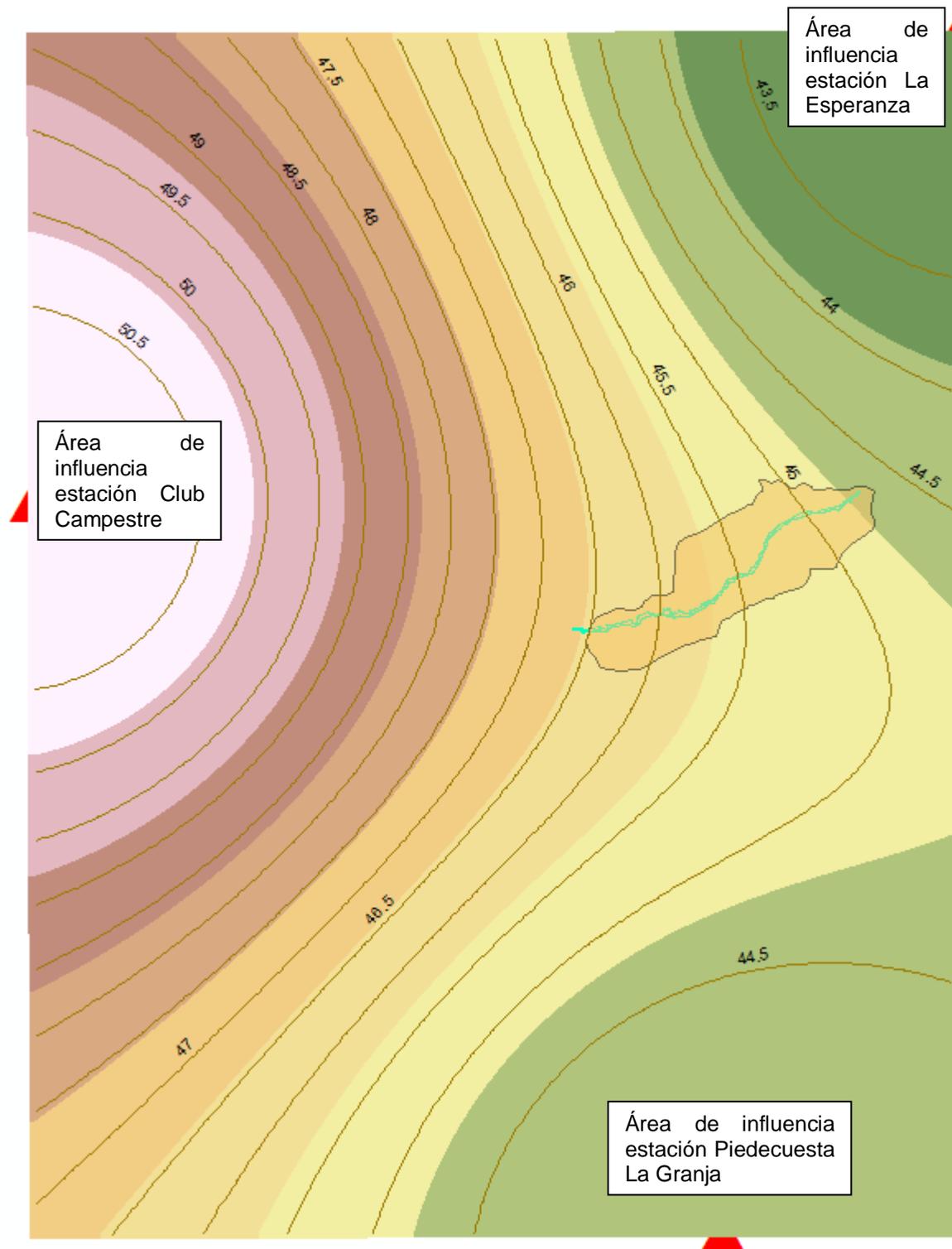
Fuente: Autor del proyecto a partir de ArcGIS.

Figura 21 Isoyetas de precipitación TR 50 años.



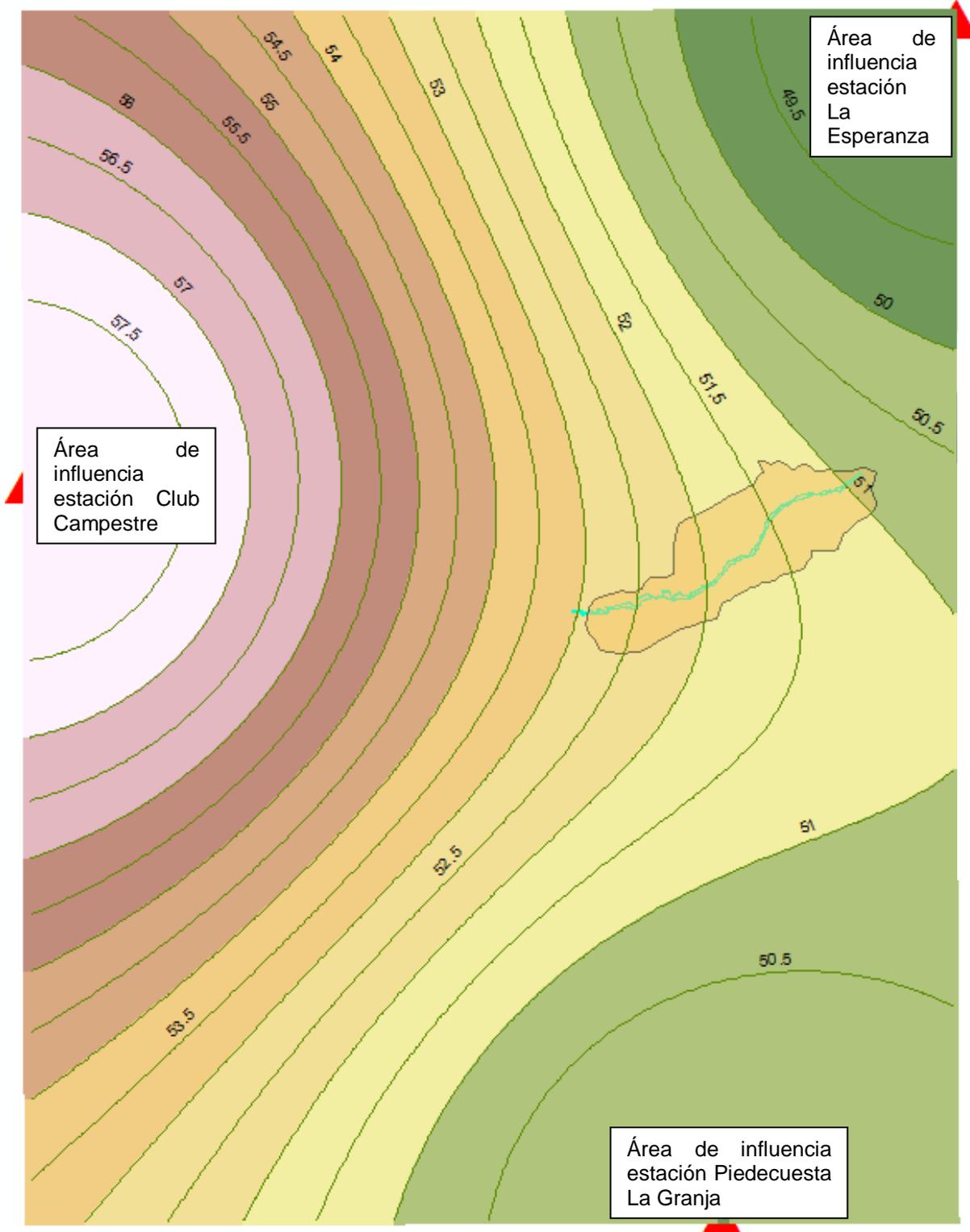
Fuente: Autor del proyecto a partir de ArcGIS.

Figura 22 Isoyetas de precipitación TR 100 años.



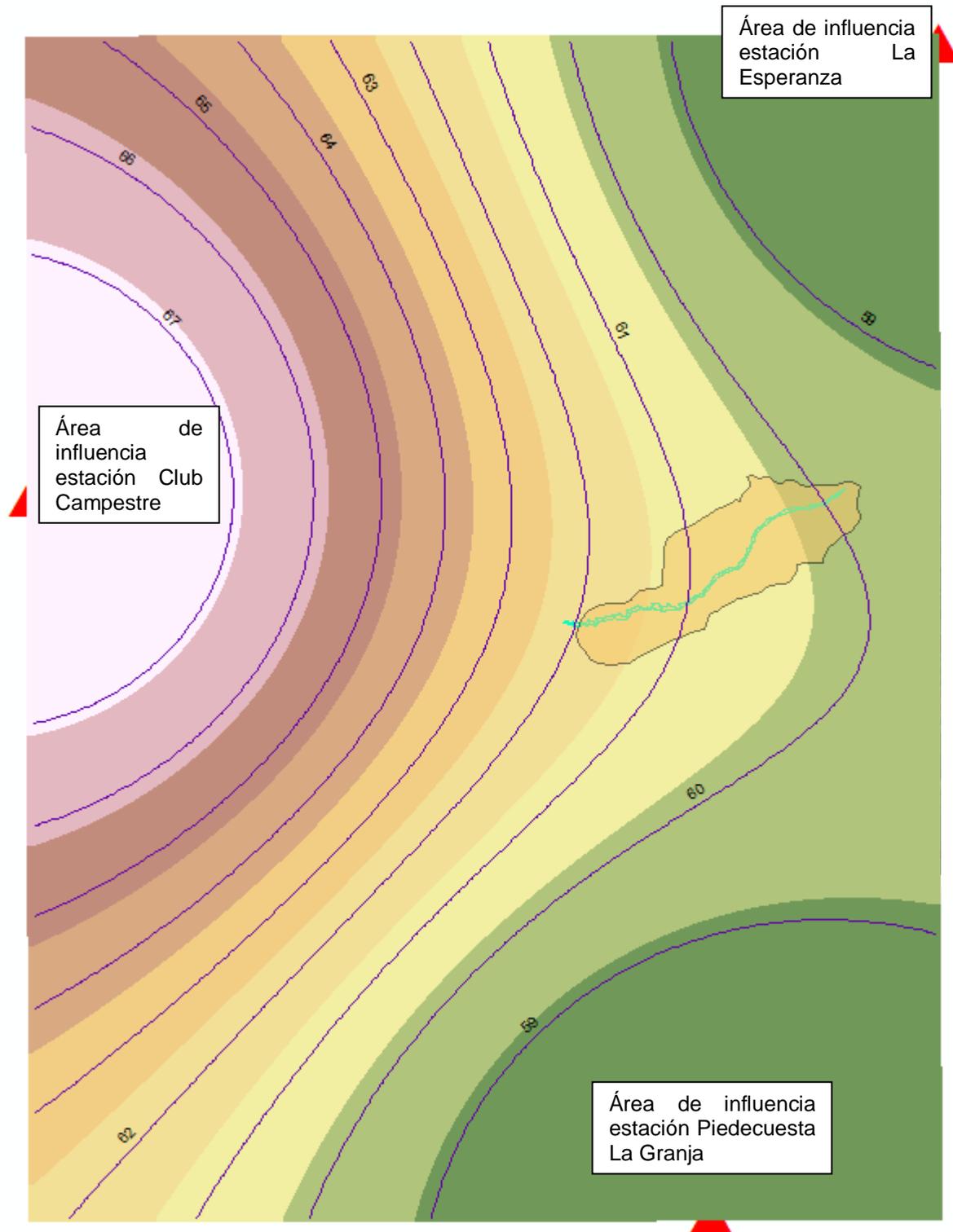
Fuente: Autor del proyecto a partir de ArcGIS.

Isoyetas de precipitación TR 200 años.



Fuente: Autor del proyecto a partir de ArcGIS.

Figura 23 Isoyetas de precipitación TR 500 años.



Fuente: Autor del proyecto a partir de ArcGIS.

En la siguiente tabla se presentan los valores de intensidad obtenidos para la cuenca en las isoyetas determinadas para cada uno de los periodos de retorno en análisis.

Tabla 8 Resultado de las isoyetas.

TR [años]	IDW [mm/h]	Promedio [mm/h]	Diferencia	% Diferencia
2	22.50	22.70	0.20	0.89%
5	27.00	26.80	0.20	0.74%
10	30.00	30.40	0.40	1.33%
20	34.00	34.40	0.40	1.18%
50	40.50	40.60	0.10	0.25%
100	45.50	45.90	0.40	0.88%
200	52.00	52.00	0.00	0.00%
500	61.00	61.40	0.40	0.66%

Fuente: Autor del proyecto.

6.4. EVALUACIÓN DE LA INFILTRACIÓN MEDIANTE EL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA

El coeficiente de escorrentía se calcula con el fin de caracterizar la infiltración a partir del uso del suelo con base en la estimación realizada a partir de la metodología del SCS, mediante el valor definido como el método del número de curva - CN.

En la Figura 24 se encuentra la delimitación del uso del suelo dentro de la cuenca de la quebrada La Palmichala y el resultado del coeficiente de escorrentía se presenta en la Tabla 9 .

Figura 24 Definición del uso del suelo de la cuenca.



Fuente: Autor del proyecto.

Tabla 9 Cálculo del coeficiente de escorrentía

Uso del suelo	Área [m ²]	CN	% USO	%CN	CN Ponderado	Po	Pd	C
Cultivos	430936.9	71	28.3%	20.2	77.0	15.4	120	0.59
Rastrojos	1089281.3	79	71.7%	56.8				
Total	1520218.2		100.0%	77.00				

Fuente: Autor del proyecto.

6.5. CLASIFICACIÓN DE LOS ESFUERZOS CORTANTES Y LA VISCOSIDAD DEL FLUJO.

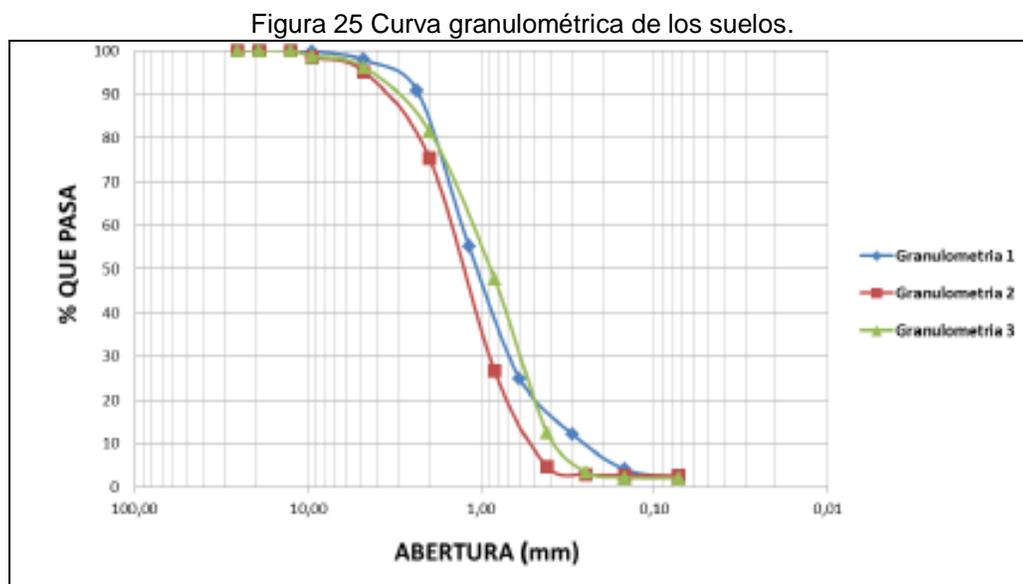
La clasificación de los suelos en el lecho de la quebrada La Palmichala es fundamental, ya que en el modelo de flujo se requiere conocer qué tipo de material será transportando en la avenida máxima.

De acuerdo al estudio “Descripción Preliminar de Parametros Geomorfologicos y de Conformacion de la Cuenca de la Quebrada Palmichala con Fines de Molelamiento (DALLOS LEON, 2011), geomorfológicamente, la cuenca de la Quebrada La Palmichala, cuenta con dos tipos de geomorfología, la primera

corresponde a montañosa. Localizada en la parte alta del Macizo de Santander (aguas arriba) y aguas abajo corresponde a geomorfología de terraza.

Teniendo en cuenta que aguas abajo de la quebrada se localizan los sedimentos transportados por la quebrada a lo largo de su drenaje y allí también se encuentran los depósitos aluviales transportados por la quebrada y que se han generado a partir de la dinámica fluvial, se caracteriza el lecho de la quebrada de acuerdo a el análisis puntual realizado aguas debajo de la quebrada.

Para su clasificación se toma como referencia estudios geotécnicos realizados anteriormente en la quebrada, uno de ellos corresponde a la comparación de pesos específicos y la humedad óptima para las arenas mal gradadas de la quebrada La Palmichala desarrollado por Fandiño y Garzón (2016) como proyecto de grado, además, se relacionan las granulometrías y el tipo de suelo caracterizado. Los resultados de la curva granulométrica de los suelos mencionados se presentan en la Figura 25 y en la Tabla 10 se encuentra el resumen de los resultados obtenidos.



Fuente: FANDIÑO, Leyla; GARZÓN, Andrés, 2016.

Tabla 10 Descripción de los porcentajes granulométricos.

Ensayo	%Gravas	%Arenas	%Finos
1	2.17	95.64	2.19
2	4.85	92.49	2.66
3	3.76	94.18	2.06
Promedio	3.59	94.10	2.30

Fuente: FANDINO, Leyla; GARZÓN, Andrés,2016.

La caracterización de los porcentajes indica que los suelos son arenas con aproximadamente 3.5% de gravas y 2.3% de finos, esto quiere decir que la plasticidad de estas arenas es baja por el bajo contenido de arcillas que existen en ellas.

Dentro del estudio referenciado, también se determina la densidad seca máxima promedio de las arenas correspondiente a 1.73 g/cm³, con una desviación estándar de 0.05 y un coeficiente de variación igual a 2.78.

De acuerdo a esta clasificación se estiman los esfuerzos cortantes y la viscosidad del flujo basados en la Tabla 2 detallada en el marco teórico, a partir de ella se establecen los parámetros para la quebrada La Palmichala, los cuales se indican en la Tabla 11.

Tabla 11 Datos y resultados de los esfuerzos cortantes del flujo tomados por O'Brien, et al (1988).

α_2	β_2	α_1	β_1
0.08	16.90	0.06	6.20

Fuente: Autor del proyecto a partir de los resultados empíricos propuestos por O'Brien, et al (1988).

6.6. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE LA CUENCA

Para la evaluación del caudal, se utilizó el hidrográma unitario, calculado a partir del software HEC-HMS a partir de la metodología del Soil Conservation Services el cual tiene en cuenta el área de la cuenca, el tiempo de concentración de la cuenca, el factor LagTime correspondiente al 60% del tiempo de concentración total, la

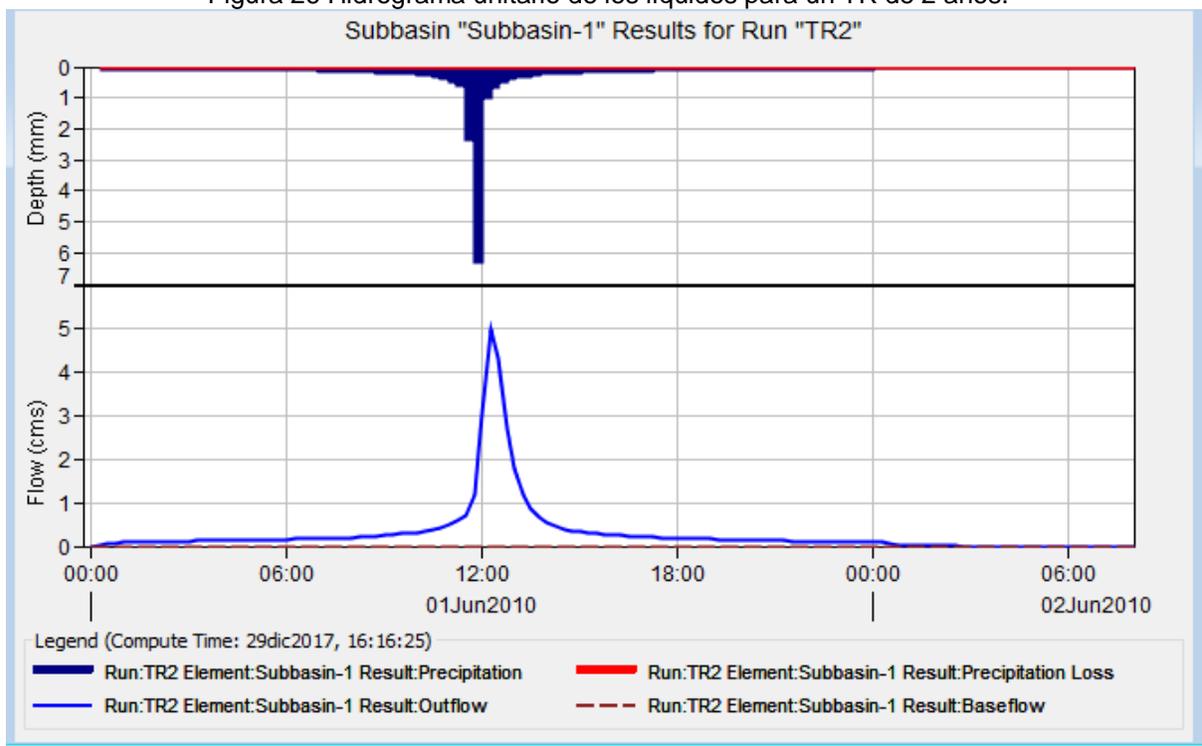
intensidad de diseño calculada para cada uno de los periodos de retorno variables entre 2 a 500 años

El hidrograma de los líquidos determinado por el software HEC-HMS se expone en la Fuente: Autor del proyecto a partir de los resultados del Hec-Hms.

En la siguiente figura se presenta el resumen de los hidrogramas calculados por el software para cada uno de los periodos de retorno en estudio durante 24 horas.

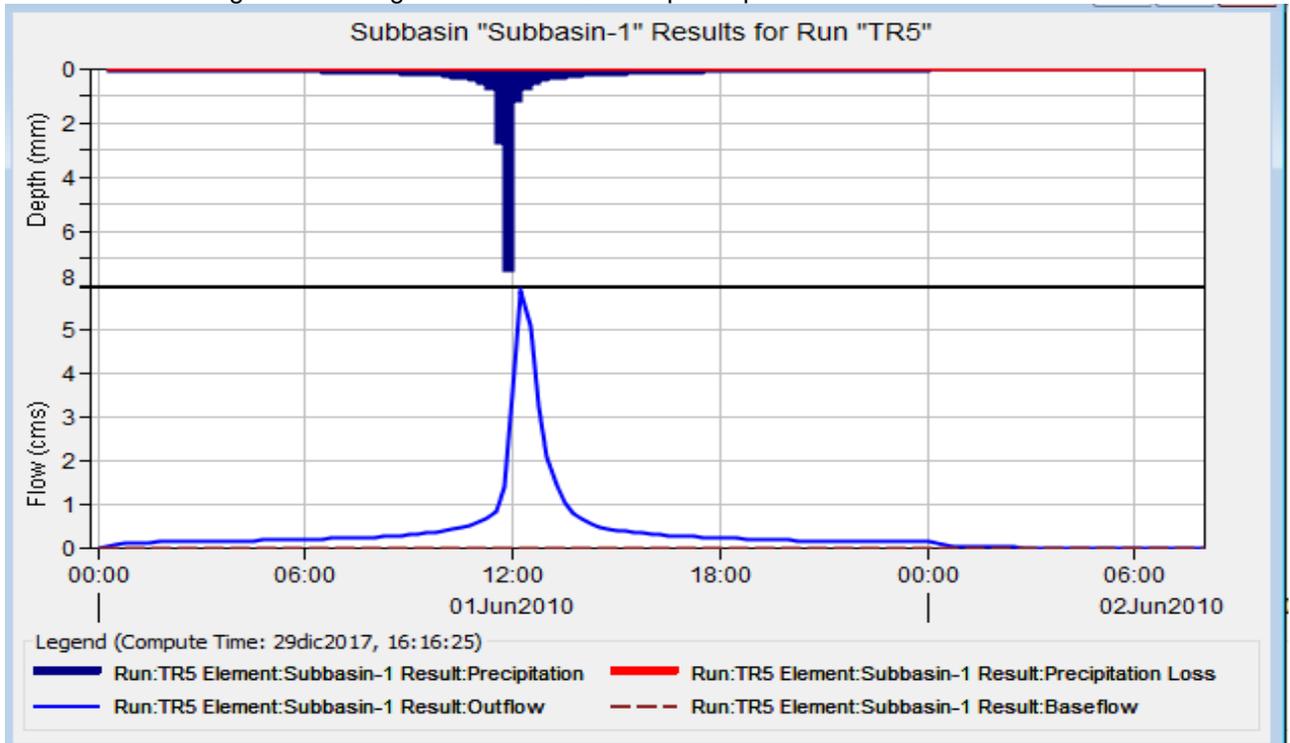
Figura 34 para cada uno de los periodos de retorno definidos a partir del hietograma de precipitación neta efectiva en un periodo igual a 24 horas.

Figura 26 Hidrograma unitario de los líquidos para un TR de 2 años.



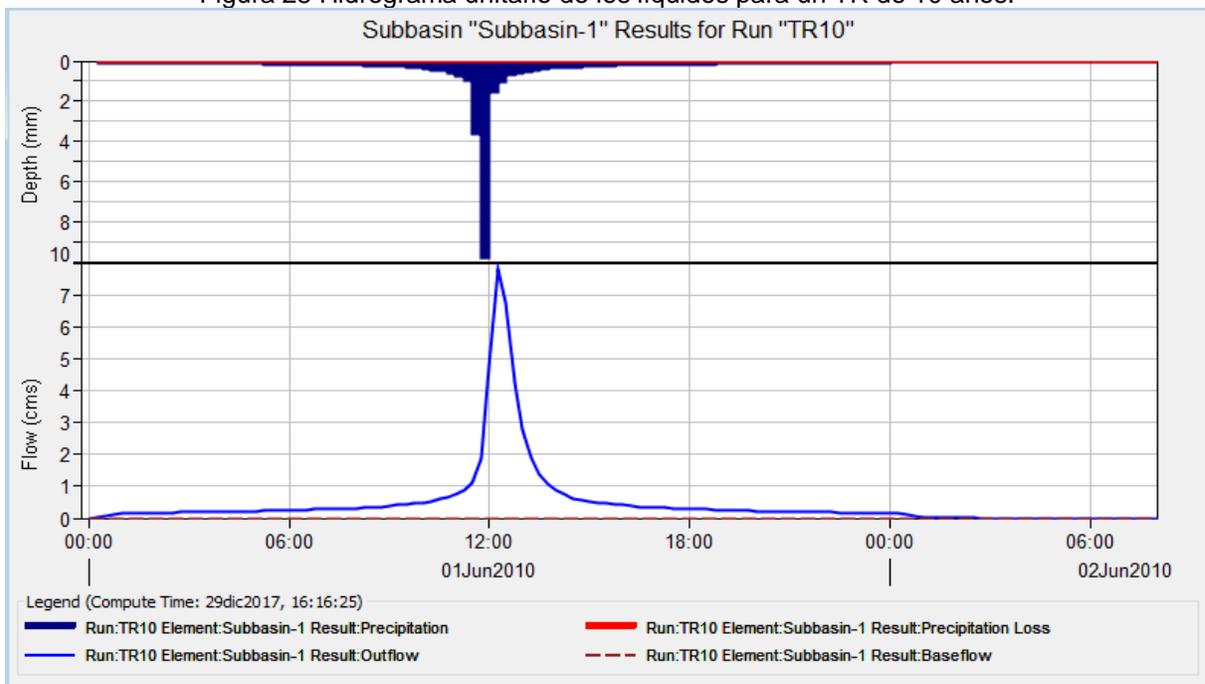
Fuente: Autor del proyecto a partir de los resultados del Hec-Hms.

Figura 27 Hidrograma unitario de los líquidos para un TR de 5 años.



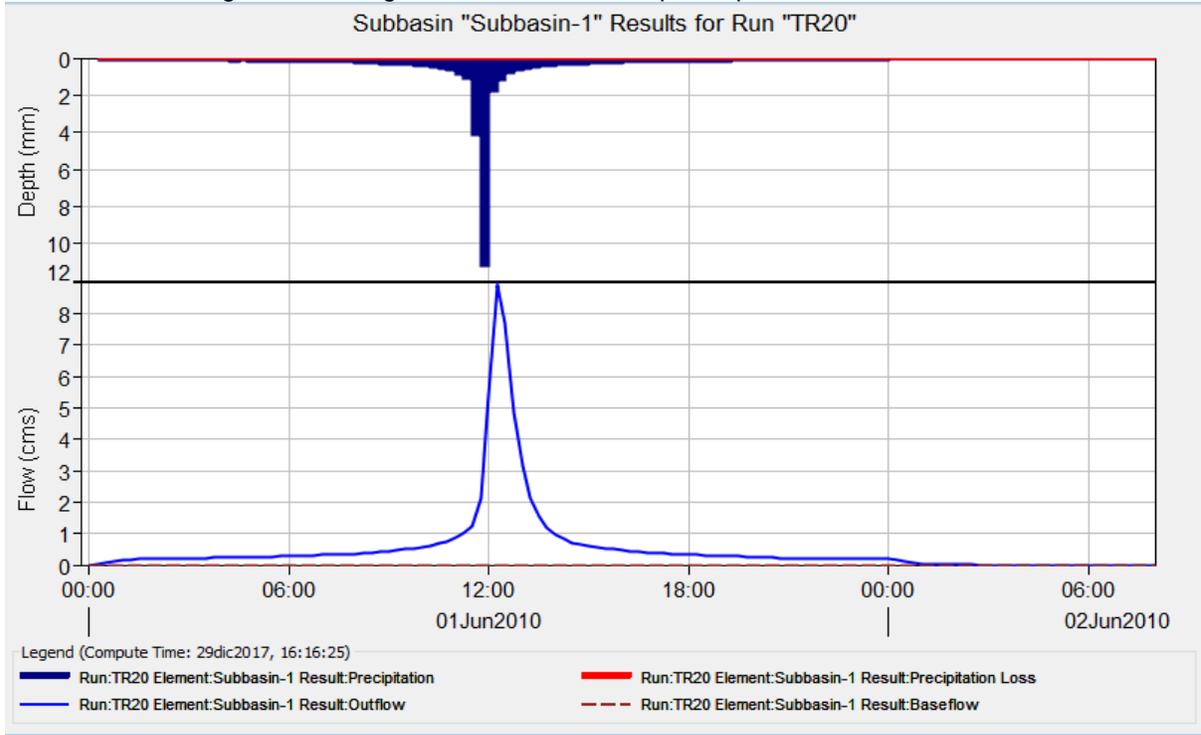
Fuente: Autor del proyecto a partir de los resultados del Hec-Hms.

Figura 28 Hidrograma unitario de los líquidos para un TR de 10 años.



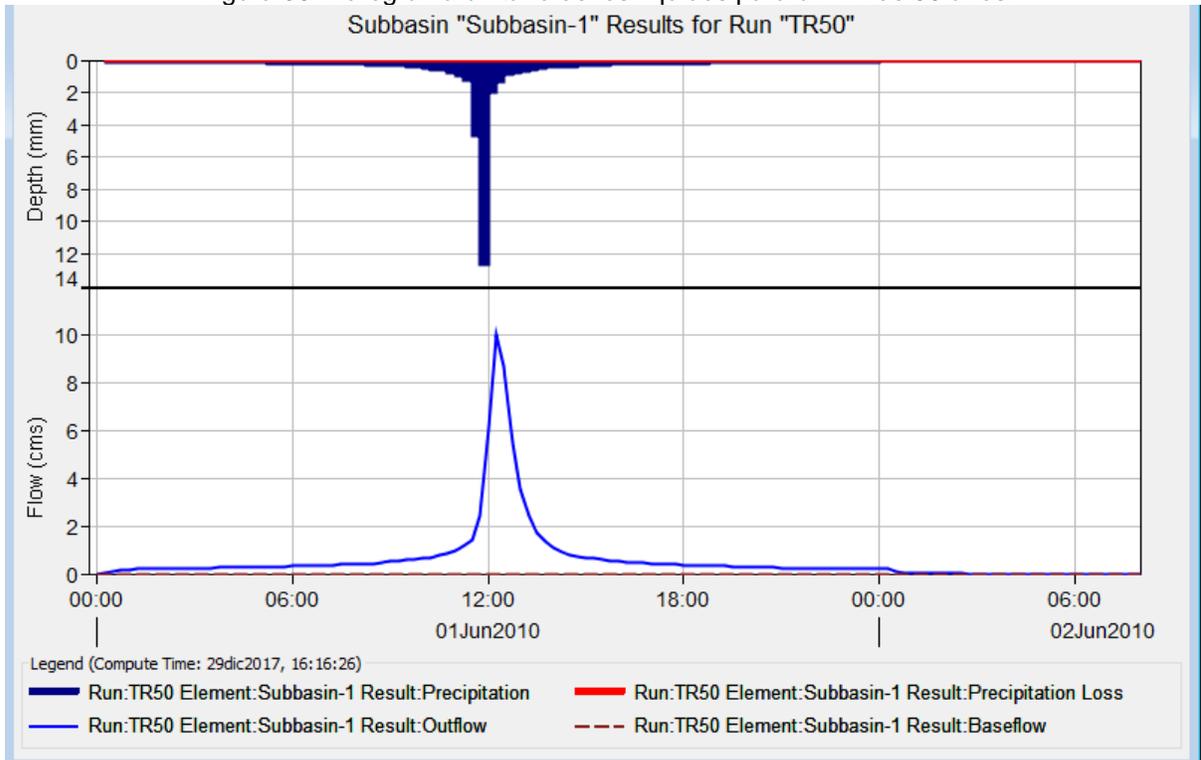
Fuente: Autor del proyecto a partir de los resultados del Hec-Hms.

Figura 29 Hidrograma unitario de los líquidos para un TR de 20 años.



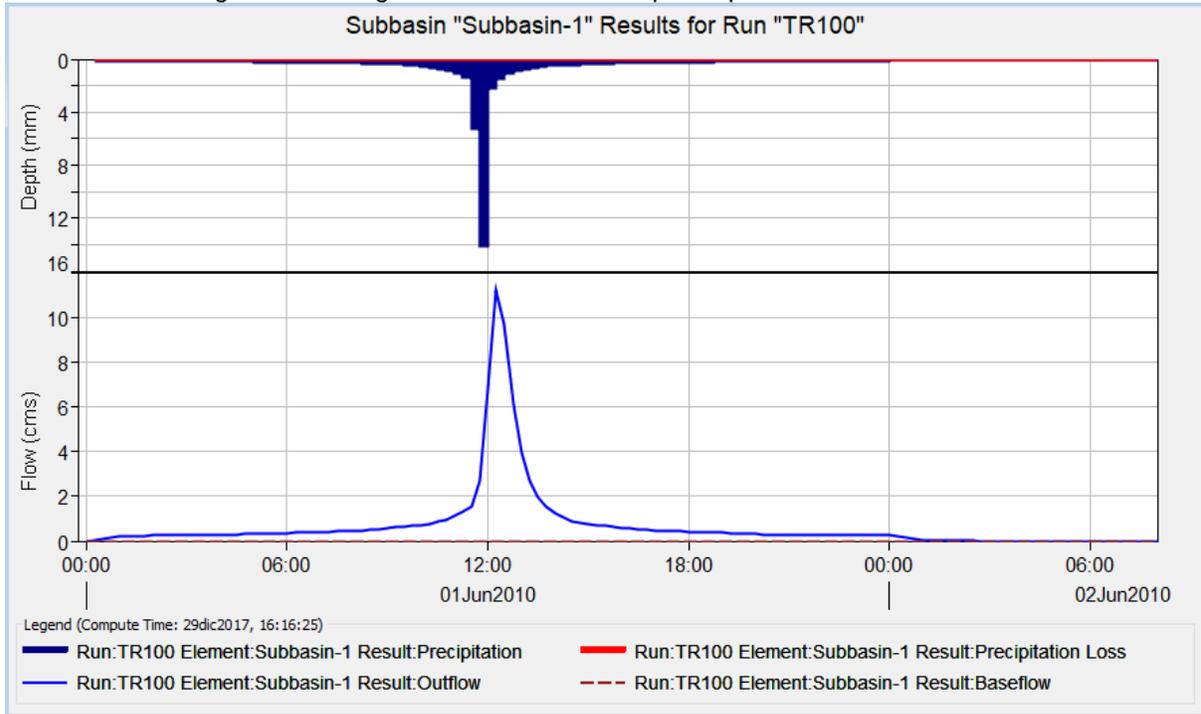
Fuente: Autor del proyecto a partir de los resultados del Hec-Hms.

Figura 30 Hidrograma unitario de los líquidos para un TR de 50 años.



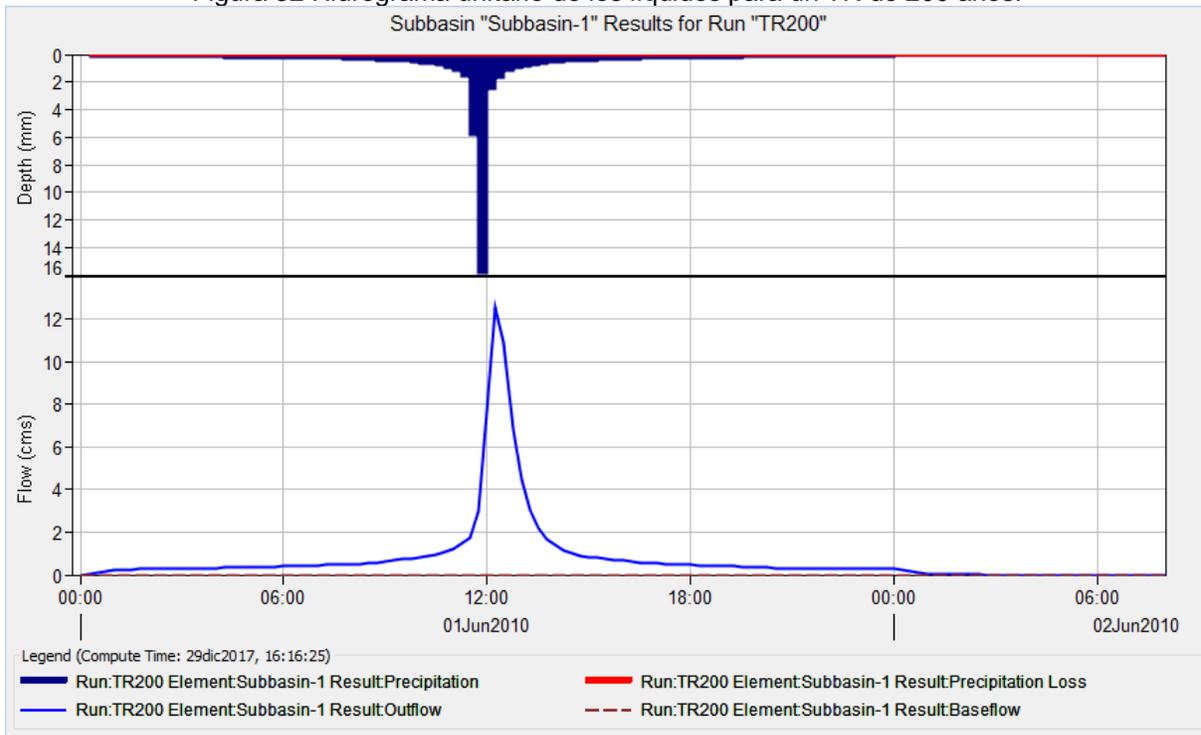
Fuente: Autor del proyecto a partir de los resultados del Hec-Hms.

Figura 31 Hidrograma unitario de los líquidos para un TR de 100 años.



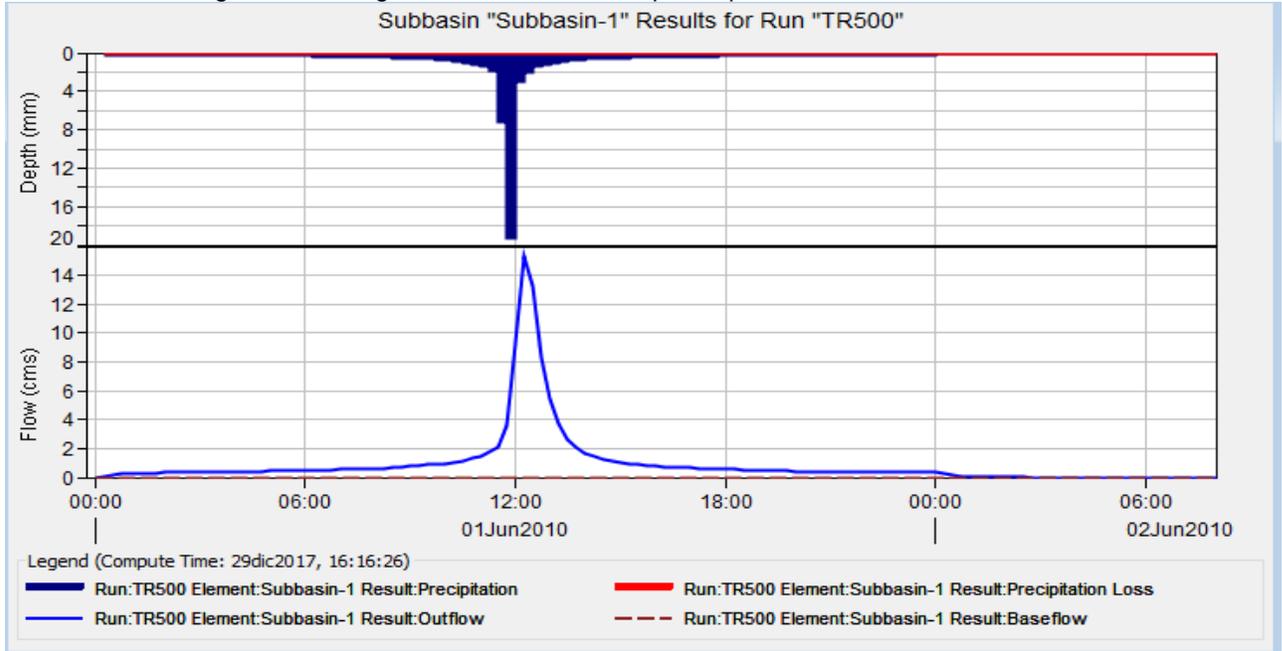
Fuente: Autor del proyecto a partir de los resultados del Hec-Hms.

Figura 32 Hidrograma unitario de los líquidos para un TR de 200 años.



Fuente: Autor del proyecto a partir de los resultados del Hec-Hms.

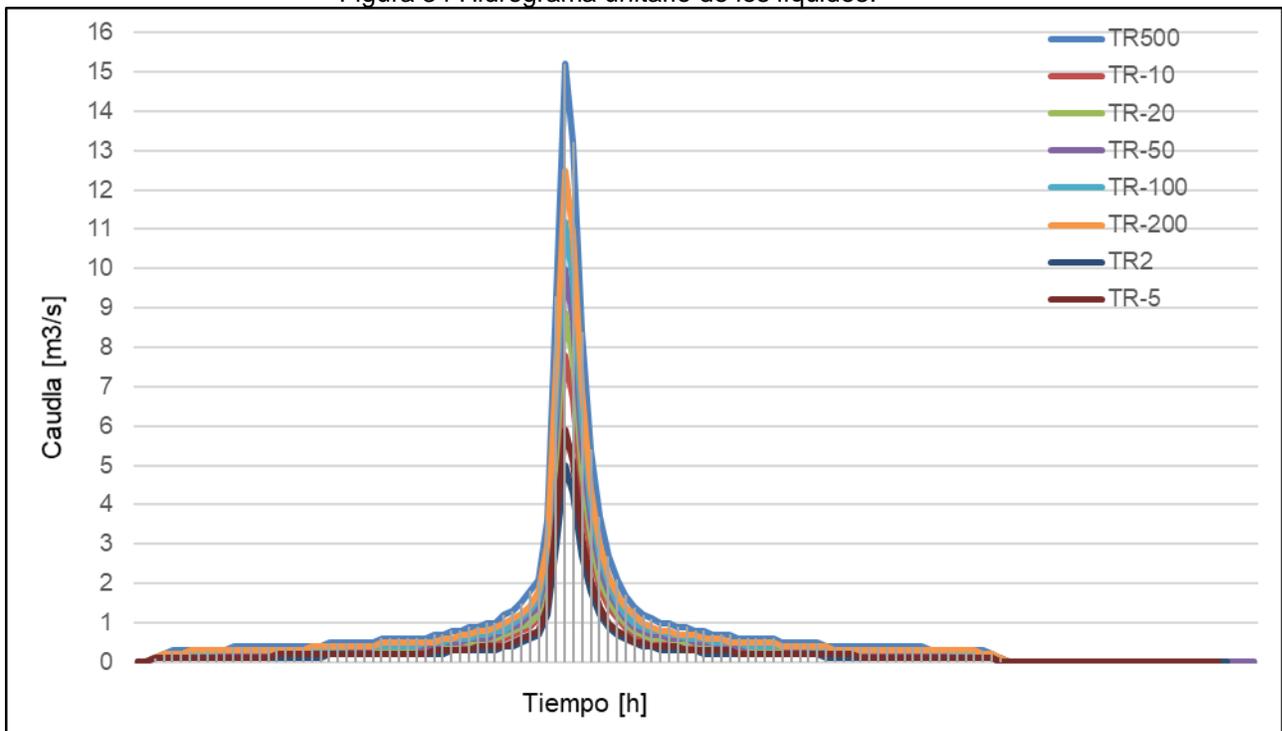
Figura 33 Hidrograma unitario de los líquidos para un TR de 500 años.



Fuente: Autor del proyecto a partir de los resultados del Hec-Hms.

En la siguiente figura se presenta el resumen de los hidrogramas calculados por el software para cada uno de los periodos de retorno en estudio durante 24 horas.

Figura 34 Hidrograma unitario de los líquidos.



Fuente: Autor del proyecto.

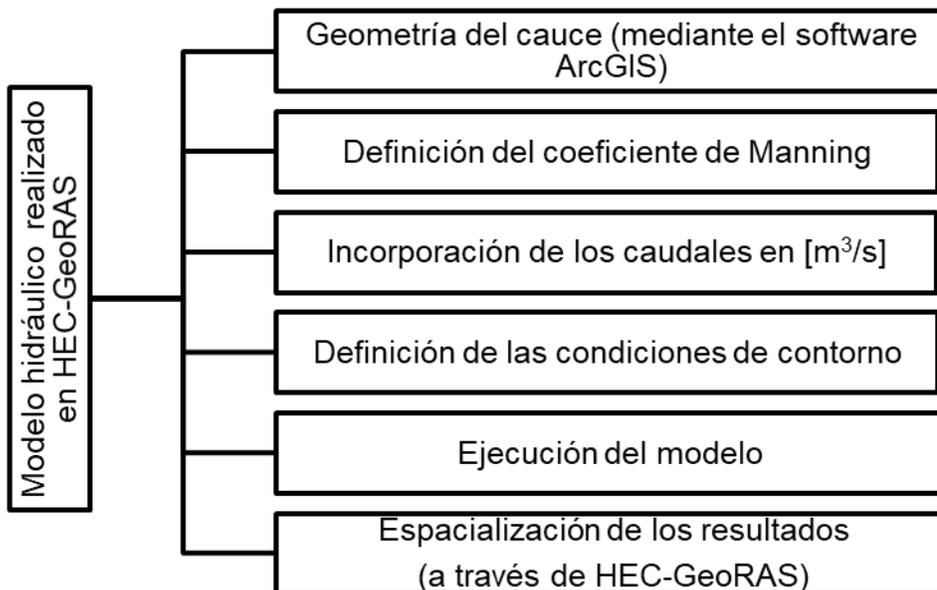
7. DIAGNÓSTICO HIDRÁULICO DE LA QUEBRADA LA PALMICHALA

A partir de los parámetros hidrológicos definidos anteriormente se desarrolla la evaluación hidráulica de la quebrada La Palmichala. A continuación, se presentan los resultados de la modelación hidráulica realizada en el software HEC-GeoRAS y FLO-2D.

7.1. EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE INUNDACIÓN UTILIZANDO EL SOFTWARE HEC-GeoRAS

Para la evaluación de los niveles de inundación a través del software HEC-GeoRAS es necesario utilizar las secciones transversales de la quebrada, el caudal para cada uno de los periodos de retorno y el coeficiente de Manning en el lecho y en el talud de la quebrada. En el siguiente diagrama de flujo se encuentra la metodología empleada.

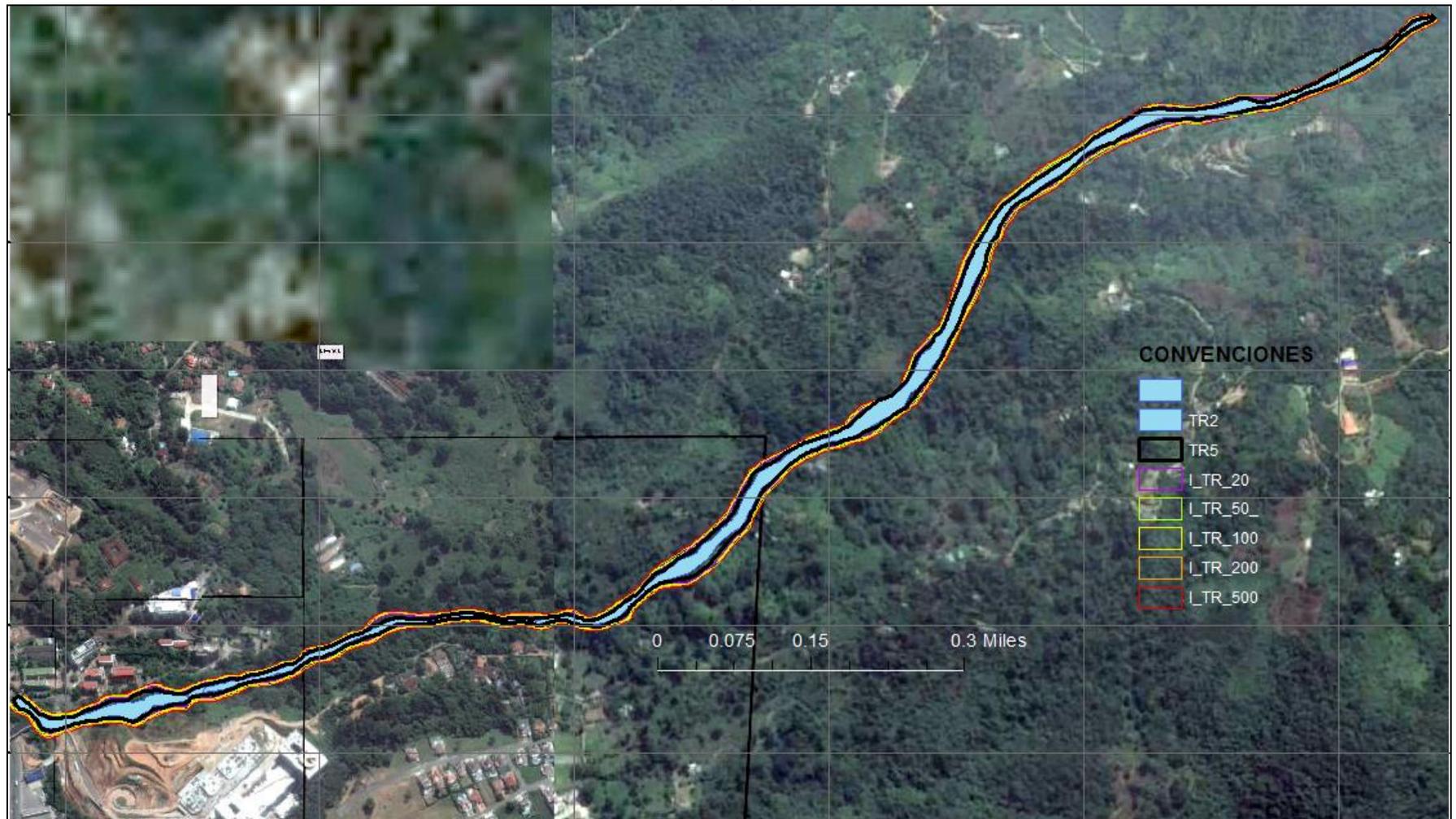
Figura 35 Metodología para la ejecución del modelo hidráulico por HEC-GeoRAS.



Fuente: Autor del proyecto.

Los resultados obtenidos del modelo hidráulico para la quebrada La Palmichala mediante el software HEC-GeoRAS se presenta en la Figura 36. La cota de inundación a nivel de detalle en el campus de la UPB se presenta en la Figura 37.

Figura 36 Modelo de inundaciones mediante el software HEC-GeoRAS de la quebrada La Palmichala.



Fuente: Autor del proyecto a partir de los resultados de HEC-GeoRAS.

Figura 37 Modelo de inundaciones detallado en el campus de la UPB mediante el software HEC-GeoRAS de la quebrada La Palmichala.



Fuente: Autor del proyecto a partir de los resultados de HEC-GeoRAS.

7.2. EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE INUNDACIÓN UTILIZANDO EL SOFTWARE FLO-2D.

La evaluación de los niveles de inundación en el software FLO-2D se realiza a partir del modelo digital del terreno, los límites actuales de la quebrada, la magnitud del caudal sólido y la magnitud del caudal líquido, en donde el caudal líquido corresponde a los valores calculados anteriormente mediante el software HEC-HMS y la evaluación del caudal sólido se realiza a partir de la teoría de Takahashi mediante la siguiente ecuación:

$$Q_s = \left(\frac{CD}{CD - C^*} \right) Q_w \quad (32)$$

Donde:

CD=Densidad volumétrica del flujo y rocas.

C*=Concentración volumétrica de sedimentos en el lecho.

Qw= Caudal del agua.

Los parámetros anteriormente relacionados se encuentran en la siguiente expresión:

$$CD = \frac{\rho M \tan S}{(\sigma - \rho M)(\tan \phi - \tan S)} \quad (33)$$

$$C^* = 1 - \eta \quad (34)$$

ρ =Densidad de la mezcla agua-sedimentos (T/m³).

σ =Densidad de los sedimentos (T/m³).

Φ =ángulo de fricción del material (30°-40°).

S=Pendiente del lecho en grados.

De acuerdo a esta expresión las magnitudes a implementar para cada parámetro corresponden a los expuestos en la Tabla 12, donde se delimita el caudal de los

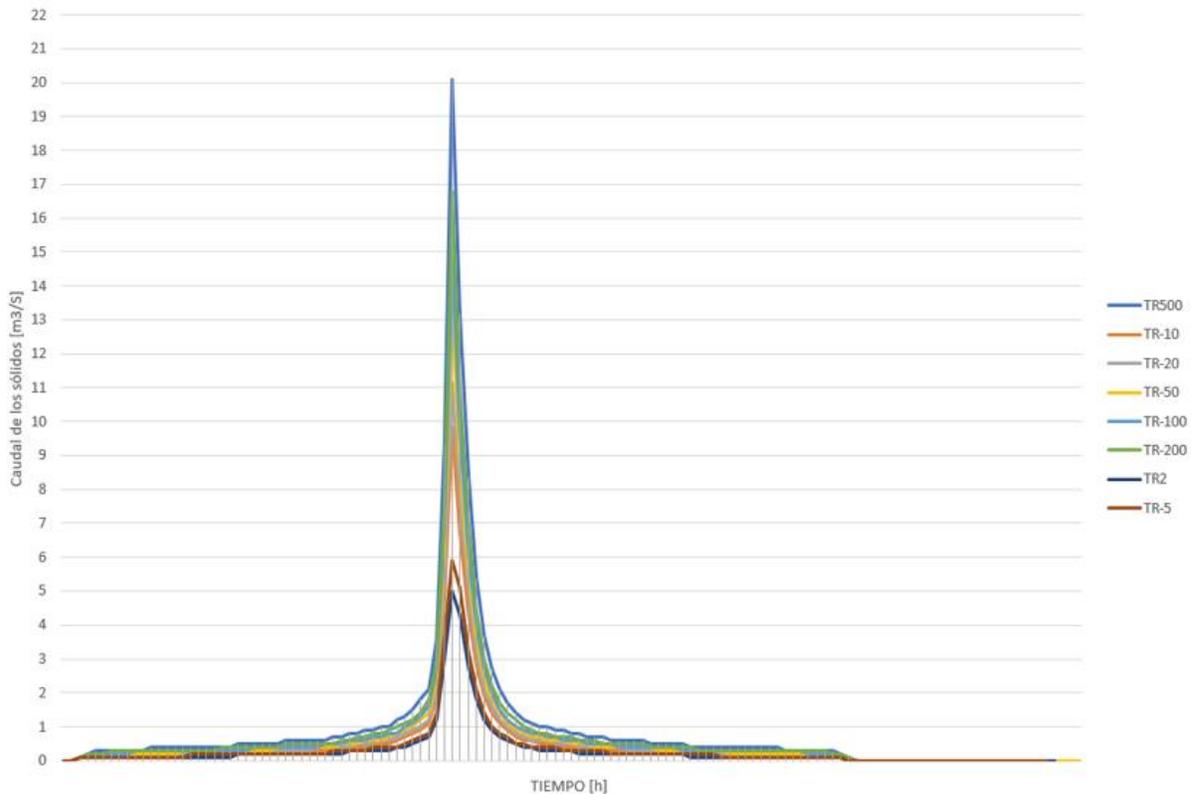
sólidos, caudal de los líquidos y caudal total para cada uno de los periodos de retorno analizados:

Tabla 12 Caudales totales para diferentes periodos de retorno.

TR [Años]	CAUDAL LÍQUIDO	CAUDAL SÓLIDOS	CAUDAL TOTAL
	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]
2	4.89	1.44	6.33
5	5.95	1.75	7.70
10	7.61	2.23	9.84
20	8.61	2.53	11.14
50	10.16	2.98	13.14
100	11.50	3.38	14.88
200	13.00	3.8	16.8
500	15.50	4.55	20.05

Fuente: Autor del proyecto.

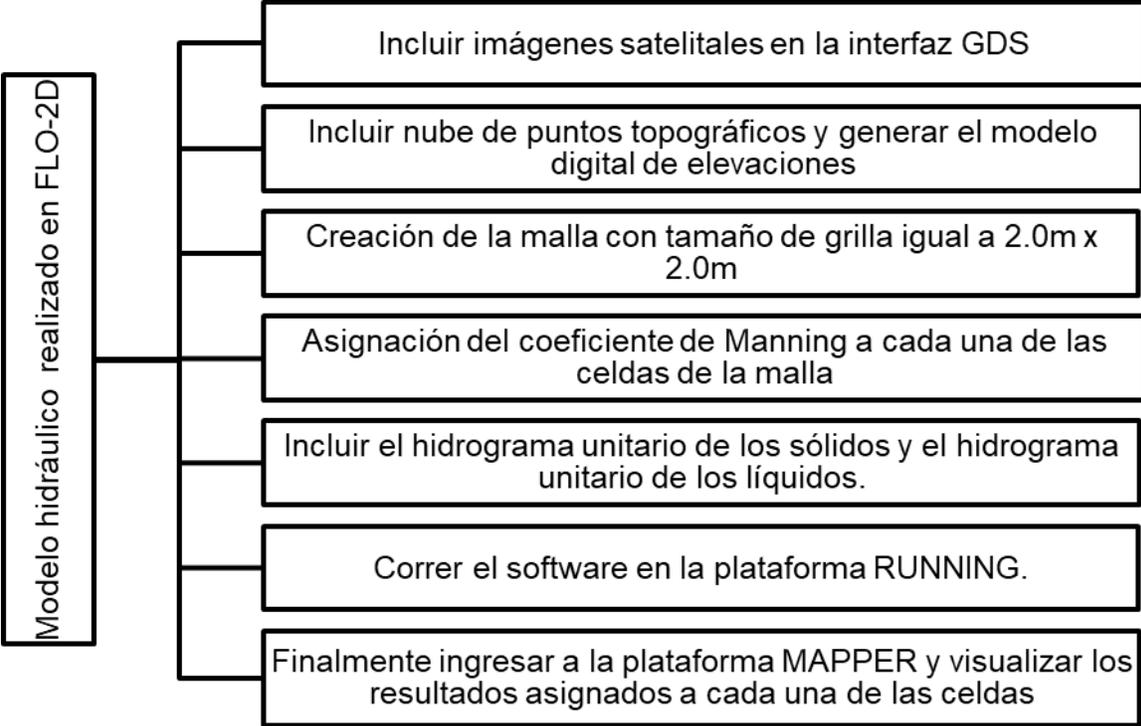
Figura 38 Hidrograma del caudal de los sólidos



Fuente: Autor del proyecto.

A partir de los resultados anteriormente definidos se incorporan en el software utilizando la metodología de análisis propia del software FLO-2D, la cual se resume en la Figura 39.

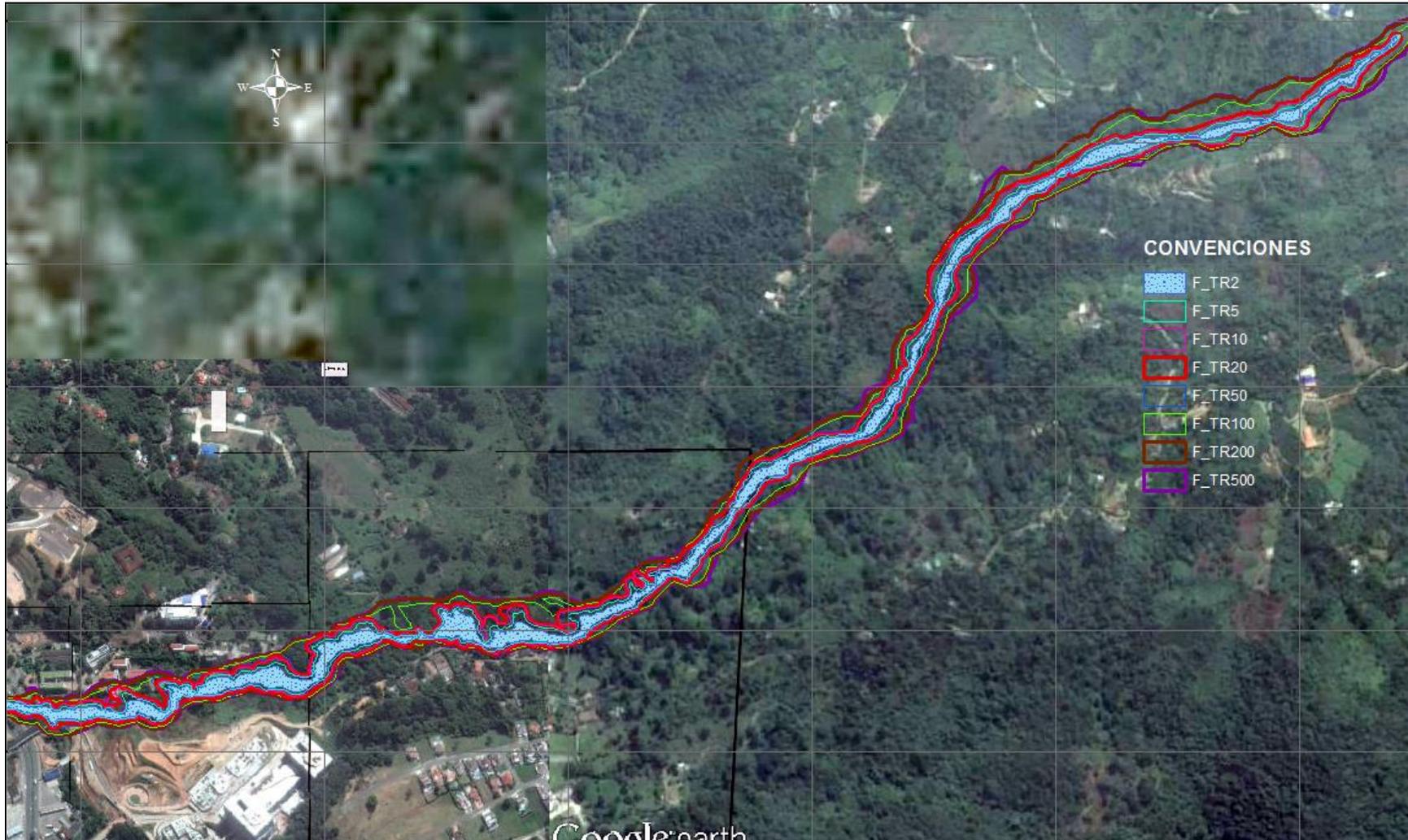
Figura 39 Metodología para la ejecución del modelo hidráulico por FLO-2D.



Fuente: Autor del proyecto.

Los resultados obtenidos del modelo hidráulico para la quebrada La Palmichala mediante el software FLO-2D se expone en la Figura 40. El nivel de inundación a detalle en el campus de la UPB se presenta en la Figura 41.

Figura 40 Modelo de inundaciones mediante el software FLO-2D de la quebrada La Palmichala.



Fuente: Autor del proyecto a partir de FLO-2D.

Figura 41 Modelo de inundaciones mediante el software FLO-2D en la quebrada Palmichal dentro del campus universitario.



Fuente: Autor del proyecto a partir de FLO-2D.

8. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

Al desarrollar la evaluación hidráulica de los modelos ejecutados con el software HEC-GeoRAS y FLO-2D, se obtuvieron los siguientes resultados en cuanto a niveles máximos de inundación para cada uno de los periodos de retorno analizados.

Tabla 13 Resultados de niveles máximos en la quebrada La Palmichala.

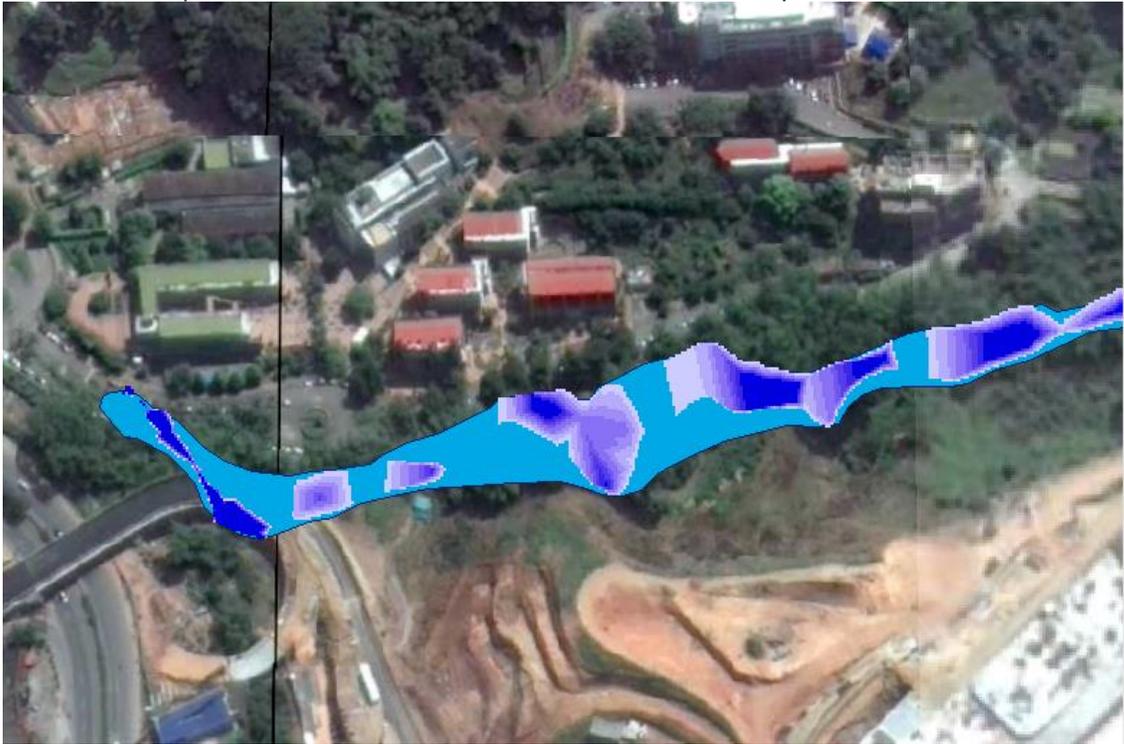
NIVELES MÁXIMOS A LO LARGO DEL CANAL [m]		
TR	HEC-GeoRAS	FLO-2D
TR 2	0.85	1.52
TR 5	1.05	1.85
TR10	1.12	2.81
TR 20	1.15	2.92
TR 50	1.22	3.14
TR 100	1.25	3.19
TR 200	1.31	3.35
TR 500	1.37	3.42

Fuente: Autor del proyecto a partir de HEC-GeoRAS y FLO-2D.

En la comparación anterior se evidencia que los niveles máximos de flujo por la metodología FLO-2D son significativamente superiores a los niveles obtenidos mediante HEC-GeoRAS, este hecho se debe principalmente a la consideración del caudal total en el modelo compuesto por FLO-2D, así mismo el software FLO-2D permite realizar la modelación en 2 dimensiones e identifica los obstáculos y los cambios topográficos en el modelo digital de elevaciones, mientras que el software HEC-GeoRAS, es un programa unidimensional que realiza una aproximación bidimensional realizando interpolaciones entre secciones transversales, lo que no le permite identificar cambios topográficos entre secciones transversales.

Con el fin de realizar la comparación de los límites de inundación generados por cada uno de los modelos se presentan las imágenes del avance del fluido en cada uno de los casos analizados para los periodos de retorno en estudio.

Figura 42 Modelo de inundaciones mediante el software HEC-GeoRAS para un TR-10 años en la quebrada La Palmichala a nivel detallado en el campus de la UPB.



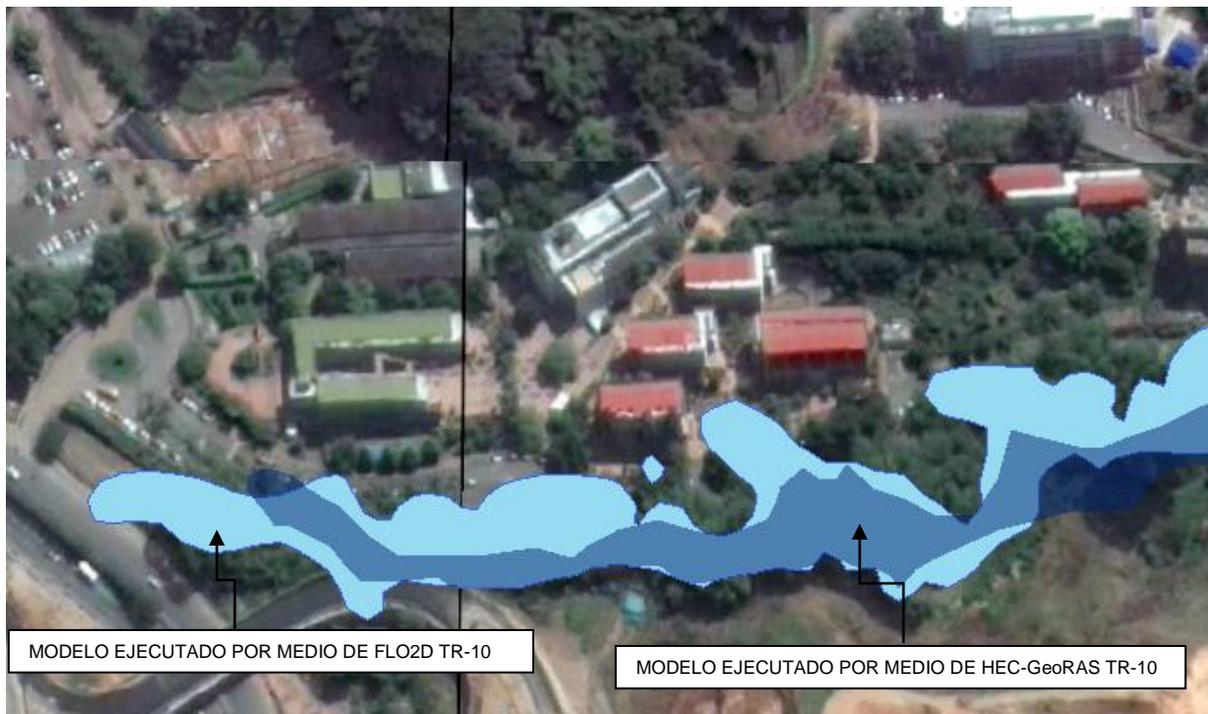
Fuente: Autor del proyecto a partir de HEC-GeoRAS

Figura 43 Modelo de inundaciones mediante el software FLO-2D para un TR-10 años en la quebrada La Palmichala a nivel detallado en el campus de la UPB.



Fuente: Autor del proyecto a partir de FLO-2D.

Figura 44 Comparación de los resultados por los modelos HECGEORAS y FLO2D TR 10 años



Fuente: Autor del proyecto a partir de FLO-2D.

Figura 45 Modelo de inundaciones mediante el software HEC-GeoRAS para un TR-20 años en la quebrada La Palmichala a nivel detallado en el campus de la UPB.

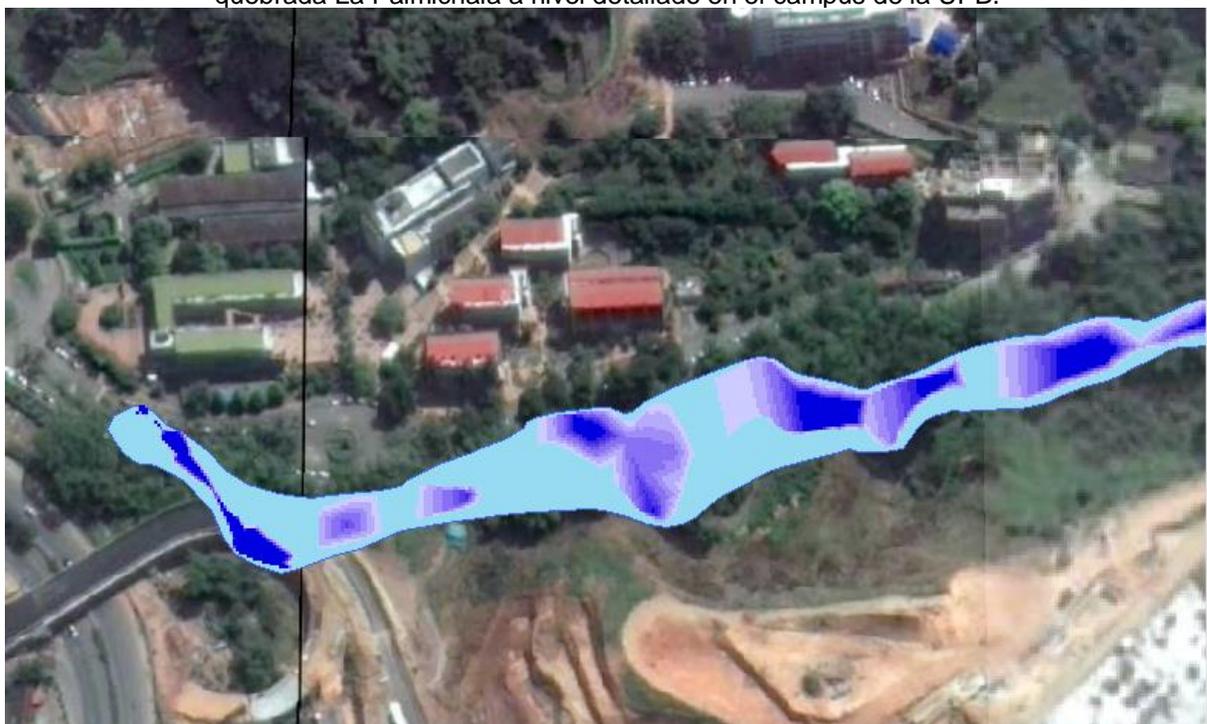


Figura 46 Modelo de inundaciones mediante el software FLO-2D para un TR-20 años en la quebrada La Palmichala a nivel detallado en el campus de la UPB.



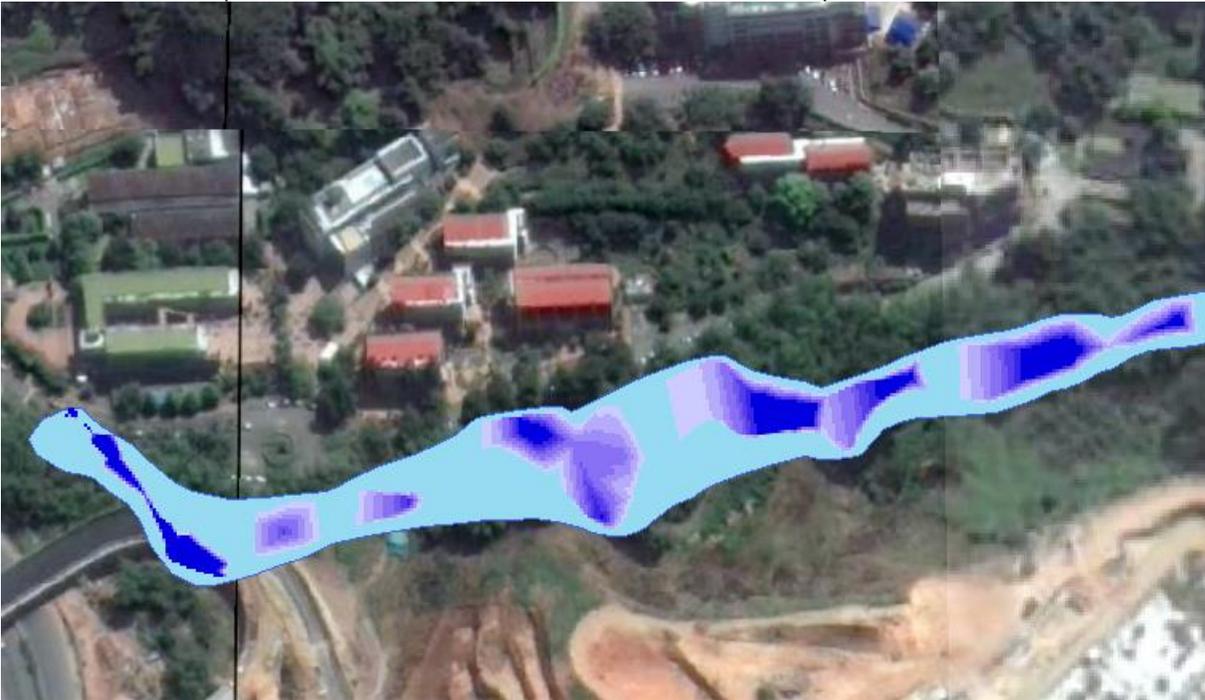
Fuente: Autor del proyecto a partir de FLO-2D.

Figura 47 Comparación de los resultados por los modelos HECGEORAS y FLO2D TR 20 años



Fuente: Autor del proyecto a partir de FLO-2D.

Figura 48 Modelo de inundaciones mediante el software HEC-GeoRAS para un TR-50 años en la quebrada La Palmichala a nivel detallado en el campus de la UPB



Fuente: Autor del proyecto a partir de HEC-GeoRAS

Figura 49 Modelo de inundaciones mediante el software FLO-2D para un TR-50 años en la quebrada La Palmichala a nivel detallado en el campus de la UPB.



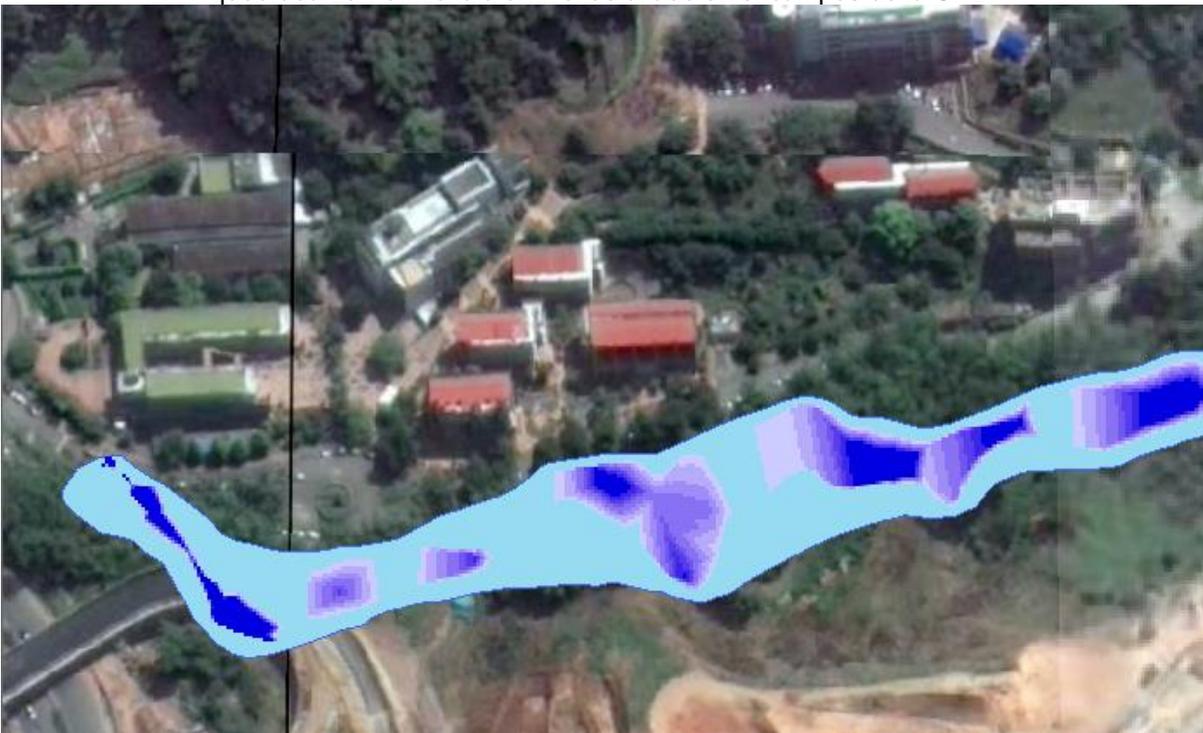
Fuente: Autor del proyecto a partir de FLO-2D.

Figura 50 Comparación de los resultados por los modelos HECGEORAS y FLO2D TR 50 años



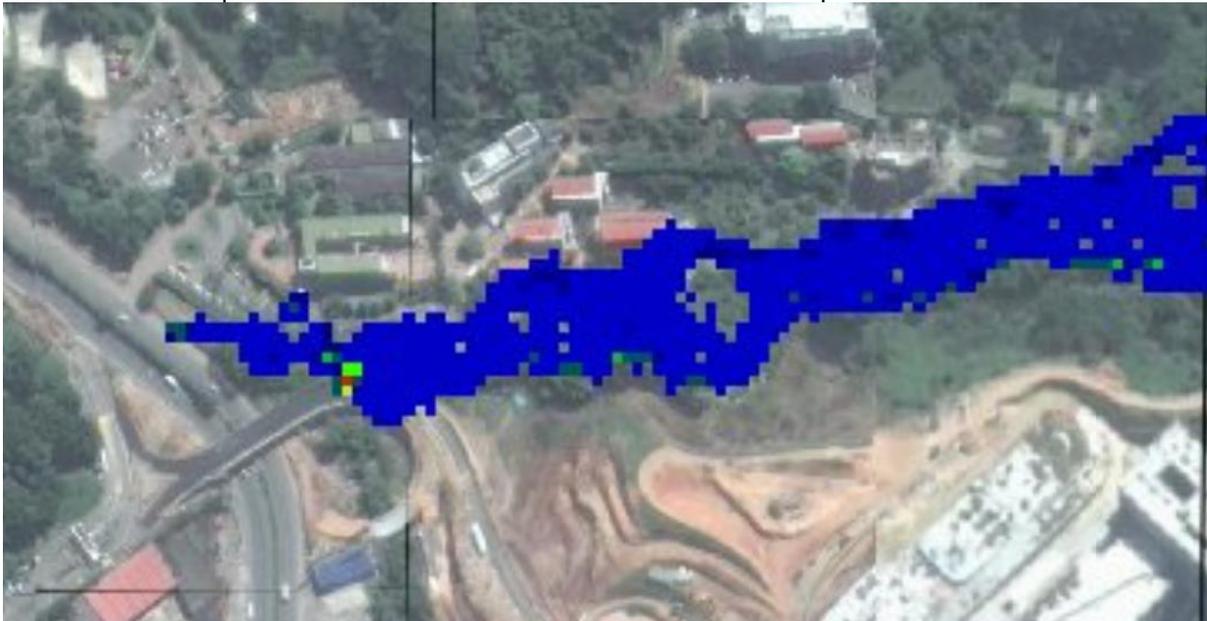
Fuente: Autor del proyecto a partir de FLO-2D.

Figura 51 Modelo de inundaciones mediante el software HEC-GeoRAS para un TR-100 años en la quebrada La Palmichala a nivel detallado en el campus de la UPB.



Fuente: Autor del proyecto a partir de HEC-GeoRAS

Figura 52 Modelo de inundaciones mediante el software FLO-2D para un TR-100 años en la quebrada La Palmichala a nivel detallado en el campus de la UPB.



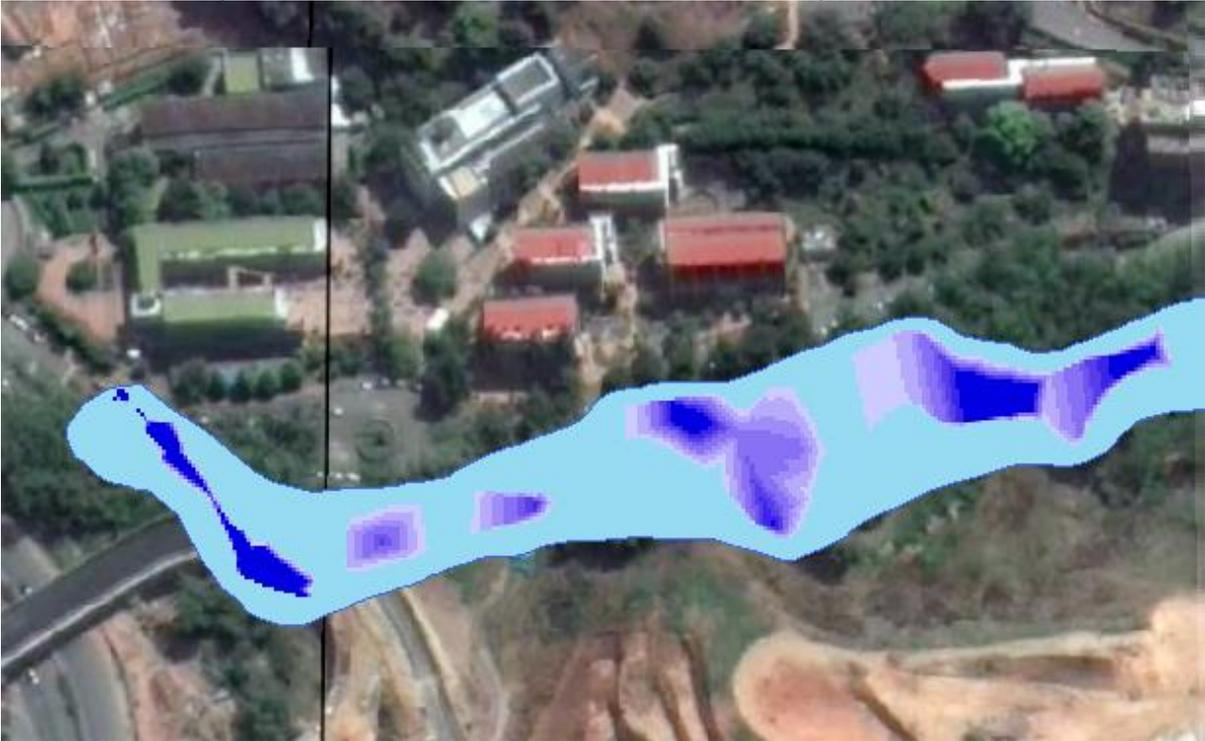
Fuente: Autor del proyecto a partir de FLO-2D.

Figura 53 Comparación de los resultados por los modelos HECGEORAS y FLO2D TR 100 años



Fuente: Autor del proyecto a partir de FLO-2D.

Figura 54 Modelo de inundaciones mediante el software HEC-GeoRAS para un TR-200 años en la quebrada La Palmichala a nivel detallado en el campus de la UPB.



Fuente: Autor del proyecto a partir de HEC-GeoRAS

Figura 55 Modelo de inundaciones mediante el software FLO-2D para un TR-200 años en la quebrada La Palmichala a nivel detallado en el campus de la UPB



Fuente: Autor del proyecto a partir de FLO-2D.

Figura 56 Comparación de los resultados por los modelos HECGEORAS y FLO2D TR 200 años



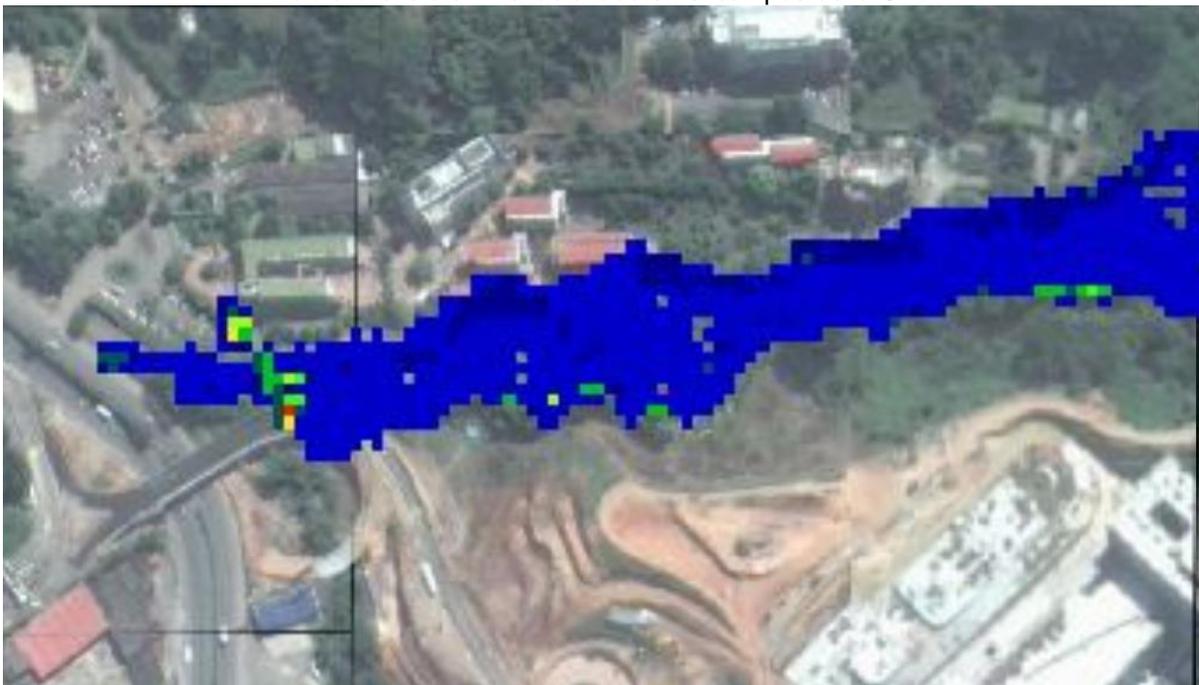
Fuente: Autor del proyecto.

Figura 57 Modelo de inundaciones mediante el software HEC-GeoRAS para un TR-500 años en la quebrada La Palmichala a nivel detallado en el campus de la UPB.



Fuente: Autor del proyecto a partir de HEC-GeoRAS

Figura 58 Modelo de inundaciones mediante el software FLO2D para un TR-500 años en la quebrada La Palmichala a nivel detallado en el campus de la UPB



Fuente: Autor del proyecto a partir de FLO-2D.

Figura 59 Comparación de los resultados por los modelos HECGEORAS y FLO2D TR 500 años

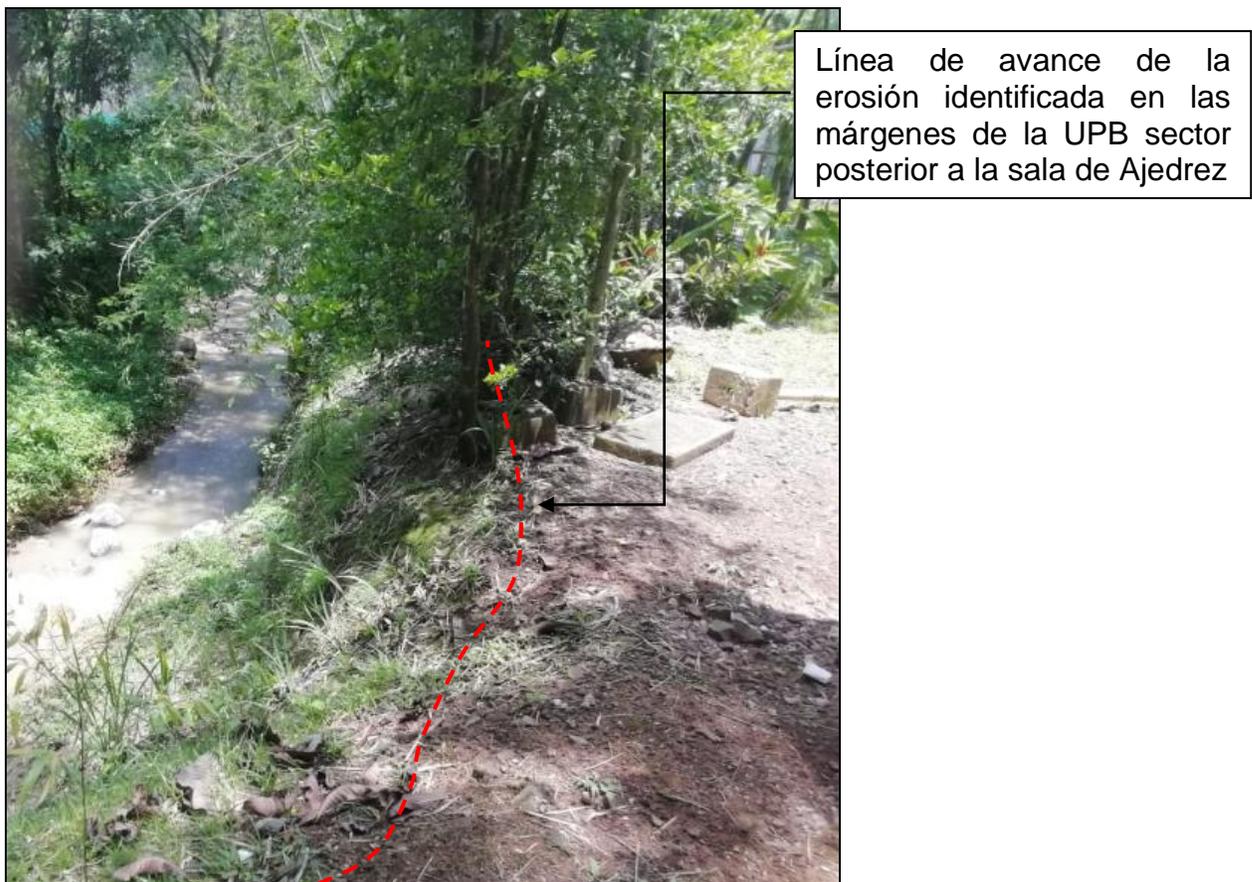


Fuente: Autor del proyecto

Como puede evidenciarse en el avance de los límites de inundación puede ser notorio que las manchas generadas por el software FLO-2D abarcan una mayor extensión superficial, también presenta que la mancha de inundación para un periodo de retorno de 500 años puede llegar a afectar los edificios G y H, mientras que con un periodo de retorno de 500 el software HEC-GeoRAS presenta un avance máximo hasta el sector peatonal y no alcanza a afectar la vía de ingreso a la Universidad.

Con el fin de realizar una aproximación que permita calibrar los modelos se realiza el recorrido a lo largo de la quebrada La Palmichala en el sector paralelo a la Universidad Pontificia Bolivariana, a partir de este recorrido se identificaron los taludes de la quebrada en estudio y los rastros de procesos de inundación que se pueden observar en ellos.

Figura 60 Evidencias de procesos de erosión en la quebrada La Palmichala localizada en el campus de la UPB



Fuente: Autor del proyecto.

Figura 61 Ancho de la quebrada La Palmichala ubicada en el campus de la UPB



Fuente: Autor del proyecto.

A partir de las imágenes es posible delimitar cartográficamente los límites visibles de erosión por pasos recientes del drenaje, estos se presentan en la siguiente figura.

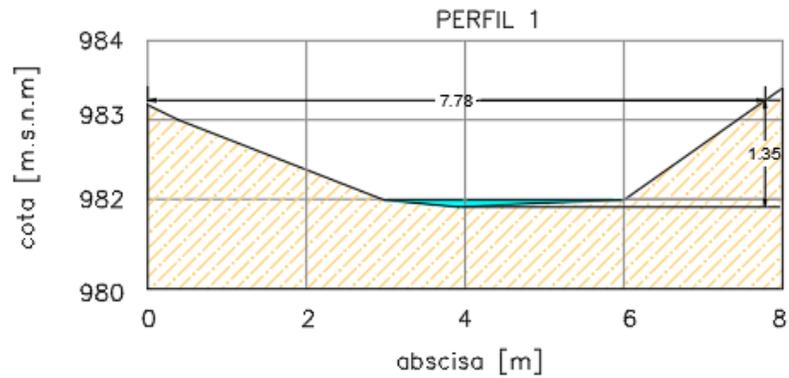
Figura 62 Límites de erosión actuales de la quebrada La Palmichala localizada en el campus de la UPB



Fuente: Autor del proyecto.

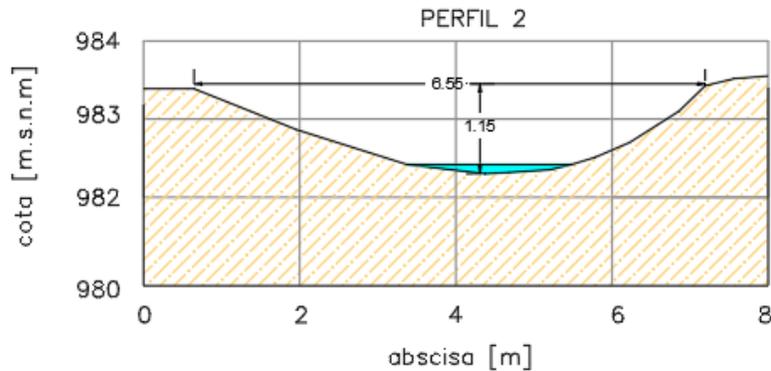
Las secciones batimétricas revisadas en la quebrada se presentan en las siguientes figuras.

Figura 63 Sección batimétrica Perfil 1



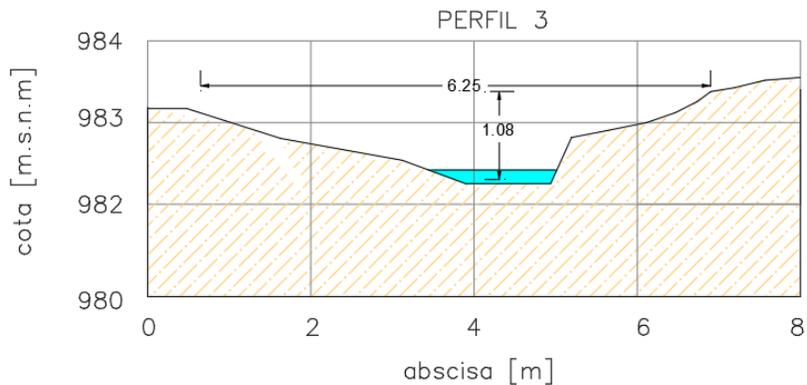
Fuente: Autor del proyecto a partir del levantamiento de campo.

Figura 64 Sección batimétrica Perfil 2



Fuente: Autor del proyecto a partir del levantamiento de campo.

Figura 65 Sección batimétrica Perfil 3



Fuente: Autor del proyecto a partir del levantamiento de campo.

Adicional a la información recolectada en la sección se determina la velocidad media para cada una de las secciones en condiciones de crecientes hasta la corona de los taludes que presentan erosión. Esta velocidad se calcula a partir de la relación de Manning, mediante la siguiente ecuación:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

Dónde:

V= Velocidad media.

N= Coeficiente de rugosidad

R= Radio hidráulico de la sección
 S= Pendiente hidráulica

Tabla 14 Análisis del caudal generado en la sección de estudio con el fin de identificar el TR correspondiente.

Perfil	Area [m ²]	T [m]	Y [m]	Radio Hidráulico	N maning	Pendiente del drenaje	Velocidad (m/s)	Caudal [m ³ /s]
1	4.98	5.53	1.35	2.6513	0.045	0.096	1.92	9.540
2	4.56	5.95	1.15	2.8626	0.045	0.096	2.02	9.193
3	5.049	4.95	1.02	2.1570	0.045	0.096	1.67	8.429
PROMEDIO DE VELOCIDADES EN LAS SECCIONES							1.87	9.054

Fuente: Autor del proyecto.

A partir de los resultados de velocidad se establece el caudal máximo para cada perfil, que al compararse con los resultados obtenidos de caudal para cada modelo se relaciona el periodo de retorno, definiéndose el periodo de retorno de 10 años para un caudal de líquidos y de 20 años para un caudal de sólidos.

De acuerdo con lo anterior, se compara las líneas máximas de inundación para cada modelo con su respectivo periodo de retorno y el límite de erosión del drenaje (Figura 66).

Figura 66 Comparación de los resultados obtenidos en el software HEC-GeoRAS y FLO-2D con respecto al límite de erosión de la quebrada La Palmichala



Fuente: Autor del proyecto.

Al realizar el análisis de los límites de inundación resultantes del software HEC-GeoRAS y FLO-2D, para el periodo de retorno de 10 años y 20 años, respectivamente se evidencia que la lámina de agua por el software HEC-GeoRAS presenta un mayor ajuste a los resultados de la calibración del modelo a partir de los límites de erosión.

Identificando que para el caso en estudio y periodos de retorno recurrentes el modelo que se aproxima a las condiciones visibles en la erosión de la quebrada corresponden a las calculadas por el software Hec-GeoRas, este hecho puede deberse a la baja concentración de sedimentos que transporta la quebrada en lluvias con periodos de retorno bajos, los cuales si bien ocupan un volumen en el fluido no corresponde a un porcentaje significativo.

Con el fin de identificar si la cuenca de la quebrada La Palmichala tiene susceptibilidad a procesos de avenidas torrenciales que puedan generar flujos hiperconcentrados, se realiza el análisis teórico de la amenaza a partir de la metodología establecida por el IDEAM a partir del IVET de la cuenta (Índice de vulnerabilidad a eventos Torrenciales), este índice depende directamente del índice Morfométrico e índice de variabilidad, a continuación, se presenta el análisis y resultado de la determinación del IVET para la cuenca La Palmichala.

Tabla 15 Parámetros para el análisis del Índice Morfométrico.

Dd (Densidad de Drenaje)	1.63 km/km ²
Kc (Coeficiente de compacidad)	1.47
Pm (Pendiente media de la cuenca)	9.60%

Fuente: Autor del proyecto.

Tabla 16 Categorización de los parámetros para determinar el índice morfométrico.

ÍNDICES MORFOMÉTRICOS	CATEGORIA					
	1	2	3	4	5	6
Densidad de drenaje	<1.00	1.00-1.50	1.51-2.00	2.01-2.50	2.51-3.00	>3
	Muy baja	Baja	Moderada	Moderadamente alta	Alta	Muy Alta
Pendiente media	<12	12-20	21-35	36-50	51-75	>75
	Suave	Accidentado	Fuerte	Muy fuerte	Escarpado	Muy Escarpado
Coeficiente de compacidad	>1.625	1.501-1.625	1.376-1.500	1.251-1.375	1.126-1.250	1.00-1.125
	Oval-Oblonga a Rectangular Oblonga		Oval-Redonda a Oval-Oblonga		Casi Redonda a Oval-Redonda	

Fuente: Rivas & Soto (2009)

Tabla 17 Categorización del índice morfométrico.

		PENDIENTE										
		1	2	3	4	5	6					
DENSIDAD DE DRENAJE	1	111	121	131	141	151	161	1	COEFICIENTE DE COMPACIDAD	CLASES MORFOMÉTRICAS		
		112	122	132	142	152	162	2				
		113	123	133	143	153	163	3			Clase I	
		114	124	134	144	154	164	4				
		115	125	135	145	155	165	5				Clase II
		116	126	136	146	156	166	6				
	211	221	231	241	251	261	1	Clase III				
	212	222	232	242	252	262	2					
	213	223	233	243	253	263	3			Clase IV		
	214	224	234	244	254	264	4					
	215	225	235	245	255	265	5				Clase V	
	216	226	236	246	256	266	6					
	311	321	331	341	351	361	1	Clase VI				
	312	322	332	342	352	362	2					
	313	323	333	343	353	363	3					
	314	324	334	344	354	364	4					
	315	325	335	345	355	365	5					
	316	326	336	346	356	366	6					
	4	411	421	431	441	451	461	1				
		412	422	432	442	452	462	2				
		413	423	433	443	453	463	3				
		414	424	434	444	454	464	4				
		415	425	435	445	455	465	5				
		416	426	436	446	456	466	6				
5	511	521	531	541	551	561	1					
	512	522	532	542	552	562	2					
	513	523	533	543	553	563	3					
	514	524	534	544	554	564	4					
	515	525	535	545	555	565	5					
	516	526	536	546	556	566	6					
6	611	621	631	641	651	661	1					
	612	622	632	642	652	662	2					
	613	623	633	643	653	663	3					
	614	624	634	644	654	664	4					
	615	625	635	645	655	665	5					
	616	626	636	646	656	666	6					

Fuente: Rivas & Soto (2009)

De acuerdo a la categorización del índice morfométrico la cuenca se encuentra en Clase II, esta clase indica que de acuerdo a las características geométricas de la cuenca esta presenta baja torrencialidad; posteriormente se realiza el análisis del índice de variabilidad de la cuenca.

El índice de variabilidad muestra el comportamiento de los caudales en una determinada cuenca definiendo una torrencialidad como aquella que presenta una mayor variabilidad, es decir, donde existen diferencias grandes entre los caudales mínimos que se presentan y los valores máximos (IDEAM).

El índice de variabilidad se define a través de la siguiente ecuación

$$\text{Índice de variabilidad} = (\text{Log}(Q_i) - \text{Log}(Q_f)) / (\text{Log}(X_i) - \text{Log}(X_f))$$

Donde:

Qi: Caudal inicial

Qf: Caudal final

Xi: porcentajes de tiempo en que se exceden los caudales

A partir de la ecuación presentada anteriormente se categoriza el índice de variabilidad de las cuencas a partir de la siguiente categorización definida por el IDEAM teniendo en cuenta un periodo de retorno de 100 años (requerido por el IDEAM para la evaluación del índice de variabilidad).

Tabla 18 Determinación de los parámetros para el análisis del índice de variabilidad.

Cuenca	Qp [m3/s]	Qb [m3/s]	Xp [%]	Xb[%]	IV
Palmichala	11.50	0.0.8	47.9	62.5	10.01

Fuente: Autor del proyecto.

A partir de la ecuación presentada anteriormente se categoriza el índice de variabilidad de las cuencas a partir de la siguiente categorización definida por el

IDEAM teniendo en cuenta un periodo de retorno de 100 años (requerido por el IDEAM para la evaluación del índice de variabilidad).

Figura 67 Categorización del índice de variabilidad.

Índice de variabilidad	Vulnerabilidad
< 10°	Muy baja
10.1° - 37°	Baja
37.1° - 47°	Media
47.1° - 55	Alta
>55°	Muy alta

Fuente: Rivas & Soto (2009)

De acuerdo a la categorización anteriormente presentada, el índice de variabilidad de la cuenca la Palmichala se encuentra dentro del rango bajo, lo que evidencia que de acuerdo a la variabilidad de su caudal esta genera una baja torrencialidad.

Posteriormente se realiza la evaluación del IVET a partir de la siguiente tabla donde se categoriza la calificación del mismo.

Figura 68 Determinación del IVET

Índice de variabilidad	Índice morfométrico de torrencialidad				
	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Muy baja	Baja	Baja	Media	Alta	Alta
Baja	Baja	Media	Media	Alta	Muy alta
Media	Baja	Media	Alta	Alta	Muy alta
Alta	Media	Media	Alta	Muy alta	Muy alta
Muy alta	Media	Alta	Alta	Muy alta	Muy alta

Fuente: Rivas & Soto (2009)

A partir de las categorías calculadas para el índice morfométrico y el índice de variabilidad, se identifica que la cuenca la Palmichala tiene un índice de variabilidad

MEDIO a Eventos Torrenciales a partir de un periodo de retorno de 100 años; de acuerdo a este análisis se identifica que la misma puede generar flujos hiperconcentrados cuando supere lluvias con este periodo de retorno.

Si bien históricamente para la Qda La Palmichala no se han reportado lluvias con un periodo de retorno de 100 años, es importante tener en cuenta que si existe una probabilidad de ocurrencia de crecientes súbitas en la quebrada la Palmichala razón por la cual no es posible descartar la influencia de flujos hiperconcentrados en ella.

De acuerdo al análisis realizado a partir de la aproximación de los modelos de inundación a las evidencias en campo, es posible identificar que, para periodos de retorno inferiores a 100 años, el comportamiento de la quebrada Palmichala se asemeja a un fluido Newtoniano y el modelo de cálculo que se aproxima a su comportamiento es el calculado por el software Hec-Hms, sin embargo al desarrollar el análisis de vulnerabilidad a eventos torrenciales se identificó que la cuenca tiene una probabilidad media de ocurrencia, por esto es importante tener en cuenta que a partir de un periodo de retorno de 100 años la cuenca puede presentar flujos hiperconcentrados para los cuales el modelo de cálculo más adecuado corresponde al ejecutado por Flo2d.

De acuerdo a testimonios de trabajadores de la Universidad Pontificia Bolivariana en el año 2005 se presentó una creciente súbita que generó una mancha de inundación hasta el bloque G de la universidad, si bien no se cuentan con registros de este hecho es importante tener en cuenta que si existen antecedentes de crecientes importantes dentro del Campus las cuales de acuerdo a los modelos se acercan a los modelos desarrollados por Flo2D.

9. CONCLUSIONES

- Hidrográficamente la subcuenca de la Quebrada La Palmichala se encuentra dentro de la cuenca del río Frío. Cuenta con un área total de 1.52 km², longitud de 6.75 km y pendiente media aproximada de 9.6%. De acuerdo a su forma la cuenca es de tipo oval oblonga.
- De acuerdo a las características morfométricas de la cuenca, el tiempo de concentración promedio determinado a partir de los métodos de Giandotti Kirpich, Kripich, Témez y Ven Te Chow corresponde a 44.66 minutos.
- A partir de las curvas de intensidad, duración, frecuencia y el modelo lluvia-escorrentía desarrollado en el software HEC-HMS se estimaron los caudales máximos para periodos de retorno de 10, 20, 50, 100, 200 y 500 años, obteniéndose caudales líquidos correspondientes a 7.61 m³/s, 8.61 m³/s, 10.16 m³/s, 11.5 m³/s, 13 m³/s y 15.5 m³/s, respectivamente para cada periodo de retorno.
- Los parámetros de sedimentos y caracterización del lecho de la quebrada se realizó a partir del estudio: “Comparación de pesos específicos y humedad óptima para las arenas mal gradadas de la quebrada La Palmichala desarrollado en el 2016”, con base a los resultados obtenidos en dicha investigación y los resultados del caudal líquido se estimó la magnitud del caudal de los sólidos basados en la teoría de Takahashi correspondientes a 2.23 m³/s, 2.53 m³/s, 2.98 m³/s, 3.38 m³/s, 3.8 m³/s, 4.55 m³/s ,respectivamente para cada uno de los periodos de retorno.
- Al realizar la evaluación hidráulica de la quebrada La Palmichala en el software HEC-GeoRAS y FLO-2D, se observa que los resultados de los mismos varían significativamente, siendo mayor el límite de inundación obtenido por el software FLO-2D y generando una mayor amenaza por eventos de inundación.

- De acuerdo a la comparación de los resultados obtenidos con las evidencias registradas en los taludes de un sector de la quebrada Palmichala se identificó que para un periodo de retorno de 10 años el comportamiento de la quebrada presenta una mayor aproximación a un fluido Newtoniano, donde sus límites se aproximan a los determinados por el software Hec-GeoRas, sin embargo, este hecho aplica únicamente al periodo de retorno definido y en base a la erosión visible.
- Al realizar la evaluación del IVET “Índice de Variabilidad a Eventos Torrenciales” se identificó que la quebrada La Palmichala presenta una vulnerabilidad MEDIA a eventos Torrenciales a partir de un periodo de retorno equivalente a 100 años, a partir de este resultado se identifica que si bien el comportamiento habitual de la quebrada corresponde a Fluido Newtoniano, existe la probabilidad de ocurrencia de flujos hiperconcentrados al superar un periodo de retorno de 100 años, razón por la cual se hace necesario tener en cuenta los límites de inundación identificados en Flo2d, el cual si considera las dos fases del fluido dentro de su análisis.
- En base al análisis realizado dentro de la investigación, se identifica que en la delimitación de las rondas hídrica es importante tener en cuenta la posible ocurrencia de eventos torrenciales ya que la diferencia de los resultados en el área de influencia para cada uno de los análisis es significativo; por esto se recomienda dentro de las metodologías para la delimitación de las rondas hídricas incorporar el análisis de ocurrencia a eventos torrenciales y si esta tiene una categoría media o alta definir los límites de inundación a partir de el de un fluido no newtoniano, evitando así posibles emergencias.
- A partir del estudio, se identifica que los modelos en FLO2D se asemejan con mayor rigor a las inundaciones que se presenta en el país , siendo estas compuestas principalmente por flujos hiperconcentrados compuestos por todo tipo de sedimentos y material de arrastre.

- Se hace necesario mejorar los monitoreos en los distintos cuerpos de agua del país en especial en los que existen desarrollo urbano, con el fin de calibrar y mejorar la investigación de los fenómenos de inundación y avenidas torrenciales

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Mexico: Grupo Noriega Editores.
- Balanta, R. (2007). *Modelación matemática de avalanchas y verificación en el caso de la Quebrada La Negra en útica-Cundinamarca*. Útica, Cundinamarca.
- Castillo, L. (2006). *Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en Perú*. Perú.
- CDMB. (2009). *Normas técnicas para el control de erosión y para la realización de estudios geológicos geotécnicos e hidrológicos*. Bucaramanga.
- Cetina, M. (2006). *Numerical Simulation of Debris flow below Stoze Slovenia*.
- DALLOS LEON, I. D. (2011). *Descripcion Preliminar de Parametros Geomorfologicos y de Conformacion de la Cuenca de la Quebrada Palmichala con Fines de Molelamiento*. Bucaramanga.
- Fread, M. J. (Agosto 1999). *1D Modeling of Mud/Debris unsteady flows," Journal of Hydraulic Engineering* .
- Gámez, J. (1996). *Simulación de eventos de avalanchas*.
- Garcia. (2006). *Concentraciones equivalentes de flujos hiperconcentrados*.
- GEMMA. (2017).
- Hsu, S. (2010). *Application of simulation technique on debris-flow hazard zone delineation: A case study in Hualien Country, Taiwan*. Hualien, Taiwan.: Nat Hazards Earth Syst.
- IDEAM. (2011). *MODELACIÓN HIDROLÓGICA-AMENAZAS INUNDACIÓN*. Bogotá.
- IDEAM. (2017). *Guía metodológica para la elaboración de mapas de Inundación*. Bogotá D.C.
- Ingeniería, I. F.-C. (2014). *Modelación numérica de inundaciones fluviales*. CATALUNYA.
- INVIAS. (2008). *Manual de drenajes para carreteras*. Bogotá, Colombia.
- INVIAS. (2018). *Manual de drenajes para carreteras*. Bogotá.
- LEVENSPIEL. (2011). *Mec_Fluid_CBS*.
- LIN, P.-S. (2011). *An application of the FLO-2D model to debris-flow simulation, a case study os Song-Her District in Taiwan*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment.
- O'Brien. (1988). *Clasificación de flujos hiperconcentrados*.
- Pedraza, J. P. (2016). *Modelación matemática de flujos de avalanchas*. Bogotá D.C: Universidad de los Andes.
- Piau, C. y. (1994). *Flujos Hiperconcentrados*.
- Piña, V. J. (2015). *Comparación de los criterios de engrosamiento del Flujo para la simulación de avalanchas en casos Colombianos de estudio*. Bogotá: UNIVERSIDAD JAVERIANA.
- Sendra, P. (2002). *INVESTIGACIÓN CUANTITATIVA DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Simons, D. B. (1963). *Studies of flow in Alluvial Channels, some Effects of fine Sediment on Flow Phenomena*. USGS Water Supply Paper, 1498-G, 46.
- SUAREZ, J. (2009). *Deslizamientos en zonas tropicales capítulo 5*. Bucaramanga.
- Tippens, P. E. (2007). *Física, conceptos y aplicaciones*. Mexico: McGraw-Hill.
- Zhao, Y. &. (1983). *Resistencia del flujo no newtoniano*.

