

**ANÁLISIS DE INUNDACIÓN DE LA CUENCA BAJA DEL RÍO TUNJUELO  
APOYADOS EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICOS EN EL TRAMO  
ESTACIÓN AV. BOYACÁ – INTERSECCIÓN RÍO BOGOTÁ, CON EL PROGRAMA  
HEC –RAS 5.03**

**WILMER BUSTOS**

**ERIKA MEJIA**

**ERIKA PARDO**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS**

**BOGOTÁ D.C – 2017**

**ANÁLISIS DE INUNDACIÓN DE LA CUENCA BAJA DEL RÍO TUNJUELO  
APOYADOS EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICOS EN EL TRAMO  
ESTACIÓN AV. BOYACÁ – INTERSECCIÓN RÍO BOGOTÁ, CON EL PROGRAMA  
HEC –RAS 5.03**

**WILMER BUSTOS**

**ERIKA MEJIA**

**ERIKA PARDO**

**Trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos.**

**ASESOR: CARLOS DANIEL MONTES**

**INGENIERO CIVIL, MSC.**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS**

**BOGOTÁ D.C – 2017**



## Atribución-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-SA 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-SA 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

hacer un uso comercial de esta obra



### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**Compartir bajo la Misma Licencia** — Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

Nota de aceptación

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Bogotá D.C., Diciembre 02 de 2017.

## **Dedicatoria**

A Dios, por permitirnos llegar hasta este punto y habernos dado salud y sabiduría para lograr nuestros objetivos.

A nuestros padres, por su apoyo incondicional, por sus consejos, sus enseñanzas, por ser ejemplos de perseverancia, motivación constante que han hecho de nosotras personas íntegras y responsables, pero más que nada por su gran amor, paciencia y comprensión.

A la universidad Católica de Colombia por permitirnos ser parte de una generación de triunfadores, agentes de cambio necesario para nuestro país.

## **Agradecimientos**

Agradecemos a todas aquellas personas que han hecho posible el desarrollo de este proyecto, de igual forma a todos aquellos que nos acompañaron enriqueciendo nuestro conocimiento.

A cada una de nuestras familias por su apoyo, fortaleza y amor incondicional que fue indispensable para alcanzar esta meta.

A nuestro asesor, por sus consejos, por transmitirnos sus conocimientos, y guiarnos en el proceso.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>12</b>
<b>1 GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO .....</b>	<b>13</b>
1.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.....	13
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
1.2.1 Antecedentes del problema.....	14
1.2.2 Pregunta de investigación .....	16
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	16
1.4 OBJETIVOS.....	17
1.4.1 Objetivo general .....	17
1.4.2 Objetivos específicos .....	17
<b>2 MARCOS DE REFERENCIA .....</b>	<b>18</b>
2.1 MARCO TEÓRICO .....	18
2.1.1 Comportamiento espectral de la vegetación .....	18
2.1.2 Firmas espectrales.....	19
2.1.3 Pre-procesamiento y procesamiento de imágenes satelitales.....	20
2.1.4 Clasificación de las imágenes satelitales .....	21
2.1.5 Clasificación supervisada.....	21
2.1.6 Clasificación no supervisada.....	22
2.1.7 Isodata.....	22
2.1.8 Exactitud temática.....	23
2.1.9 Modelación hidráulica .....	24
2.1.10 Estimación de caudales máximos .....	24
2.1.11 Software modelo de inundación .....	25
2.2 MARCO GEOGRÁFICO.....	25
2.2.1 Cuenca alta.....	28
2.2.2 Cuenca media.....	28
2.2.3 Cuenca baja.....	29
2.3 MARCO DEMOGRÁFICO .....	30
2.4 ESTADO DEL ARTE .....	33
<b>3 METODOLOGÍA.....</b>	<b>37</b>

3.1	FASES DEL TRABAJO DE GRADO .....	37
3.1.1	<i>Análisis y verificación de la información</i> .....	38
3.1.1.1	Modelo digital del terreno y batimetría .....	38
3.1.1.2	Modelo digital de terreno integrado.....	40
3.1.1.3	Exportación de modelo a format TIFF.....	41
3.1.2	<i>Imágenes de sensores remotos</i> .....	41
3.1.2.1	Pre procesamiento.....	42
3.1.2.2	Procesamiento.....	42
3.1.2.3	Clasificación no supervisada .....	43
3.1.3	<i>Análisis de información hidrológica</i> .....	44
3.2	INSTRUMENTOS O HERRAMIENTAS UTILIZADAS .....	45
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>48</b>
4.1	CAUDALES .....	48
4.2	MANCHA DE INUNDACIÓN.....	50
4.3	POBLACIÓN AFECTADA .....	51
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>54</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1-1 INTERACCIÓN DE A RADIACIÓN SOLAR Y LA ATMOSFERA .....	19
FIGURA 2.2-1 CUENCA RÍO TUNJUELO .....	26
FIGURA 2.2-2 SECTORES DE LA CUENCA DEL RÍO TUNJUELO .....	27
FIGURA 2.2-3 ESQUEMA CURSO DEL RIO TUNJUELO .....	27
FIGURA 2.3-1 BARRIOS SOBRE EL RÍO TUNJUELO .....	31
FIGURA 3.1-3 TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS ENTRE DATUM .....	39
FIGURA 3.1-4 IMAGEN NUBE DE PUNTOS CLASIFICADA .....	40
FIGURA 3.1-5 MODELO DE SUPERFICIE INTEGRADO.....	40
FIGURA 3.1-6 IMAGEN DE SUPERFICIE DE TERRENO EN FORMATO TIFF .....	41
FIGURA 3.1-7 PROCESO PARA OBTENCIÓN DE IMAGEN SATELITAL EN REFLECTANCIA ABSOLUTA .....	42
FIGURA 3.1-8 IMAGEN SATELITAL .....	43
FIGURA 3.1-9 CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA .....	44
FIGURA 3.1-10. INTERFACE HIDROESTA CÁLCULO DE CAUDAL PARA UN $tr = 100$ AÑOS. ....	45
FIGURA 4.1-1 RESULTADOS OBTENIDOS HIDROESTA (DISTRIBUCIÓN NORMAL).....	48
FIGURA 4.1-2 CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES .....	49
FIGURA 4.2-1 MANCHA DE INUNDACIÓN .....	50

## LISTA DE TABLAS

TABLA 2.3-1 BARRIOS LOCALIZADOS EN LA RIBERA DEL RÍO TUNJUELO .....	32
TABLA 3.2-1. SOFTWARE UTILIZADO PARA EL PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN. ....	46

## RESUMEN

El deterioro de la cuenca del río Tunjuelo y los eventos invernales extremos han generado diferentes problemas por desbordamiento del mismo, de las cuales se han registrado tres grandes inundaciones en los años 1959, 1993 y 2002; la del año 2002 fue la más acentuada y generó mayores impactos sobre la población.

La Alcaldía Mayor de Bogotá, en coordinación con las alcaldías locales de Tunjuelito, Usme, Ciudad Bolívar, Kennedy, Rafael Uribe Uribe, San Cristóbal y Bosa y el comité interinstitucional conformado por diferentes entidades encargadas de la gestión del manejo de la cuenca del río Tunjuelo, han realizado diferentes estudios con el fin de plantear los proyectos necesarios para controlar estas crecientes.

En el presente documento se realiza el análisis de inundación de la cuenca baja del río Tunjuelo tramo Estación Av. Boyacá hasta su intersección con el río Bogotá, utilizando información geoespacial de alta precisión, el software HEC RAS 5.03 (análisis de datos espaciales) e HydroEsta (análisis de datos hidrológicos). Con estas herramientas se logró identificar las comunidades localizadas a las laderas del río que se pueden verse afectadas por la ocurrencia de un evento extremo.

**Palabras clave:** Inundación, río Tunjuelo, Cuenca baja HEC RAS 5.03, Geoespacial, Evento extremo.

## ABSTRACT

The deterioration of the Tunjuelo river basin and the extreme winter events have generated different problems due to overflow, of which there have been three major floods in the years 1959, 1993 and 2002; that of 2002 was the most accentuated and generated the greatest impacts on the population.

The Mayor of Bogotá, in coordination with the local mayors of Tunjuelito, Usme, Ciudad Bolívar, Kennedy, Rafael Uribe Uribe, San Cristóbal and Bosa and the inter-institutional committee formed by different entities in charge of the management of the Tunjuelo river basin. , have carried out different studies in order to propose the necessary projects to control these floods.

In this document the flood analysis of the Tunjuelo river basin section is done: Av Station, Boyacá - until its intersection with the Bogotá River, using high precision geospatial information, the HEC RAS 5.03 software (spatial data analysis) and HidroEsta (analysis of hydrological data), with which it was possible to identify the communities located on the slopes of the river that can be affected by the occurrence of an extreme event.

**Keywords:** Flood, river Tunjuelo, low basin HEC RAS 5.03, geospatial, extreme event

## INTRODUCCIÓN

Los diferentes fenómenos meteorológicos, la invasión de la ronda del río para actividades industriales, urbanísticas y extractivas, sumadas a la utilización del mismo como colector de aguas residuales domésticas e industriales, han ocasionado que el nivel del río suba y se incrementen los riesgos de inundación, como consecuencia de lluvias intensas o continuas.

El problema de las inundaciones ha pasado de eventos naturales a convertirse en riesgos cuando afectan zonas urbanizadas y a las comunidades y sus actividades. El proceso de urbanización en muchos sectores (e.g. barrios Tunjuelito y Abraham Lincoln en la localidad de Tunjuelito, entre otros) ha conducido a que muchas viviendas estén localizadas en zonas de riesgo.

El problema de inundación en la cuenca del río Tunjuelo surge principalmente porque durante los periodos de invierno el embalse La Regadera, situado en la cuenca media del río, permanece normalmente lleno y produce un efecto muy pequeño en la amortiguación de las crecientes que afectan la cuenca baja del río (Rincón ). Un ejemplo de lo anterior sucedió el 9 de junio de 2002 La Regadera presentaba rebose, por lo que empezó a verter los excesos de volumen y el nivel del río subió abruptamente, en la cantera Pozo Azul el nivel superó el borde derecho hacia el potrero dentro de la Escuela de Artillería y escurrió finalmente hacia la quebrada Chiguaza y a los barrios Tunjuelito, Abraham Lincoln y San Benito. La mayor altura de la lámina de agua alcanzó niveles de 2,5 metros sobre la carrera 14 del barrio Tunjuelito y parque del Hoyo y afectó a cientos de familias del sector.

# 1 GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO

## 1.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Hidráulica

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El río Tunjuelo se encuentra localizado en el extremo suroccidental de la ciudad de Bogotá, Colombia. Nace en el embalse de Chisacá localizado en el páramo de Sumapaz en el extremo suroriental de Bogotá, su desembocadura se encuentra en la localidad de Bosa en el río Bogotá, que a su vez es afluente del río Magdalena. El río tiene un recorrido de 73 km hasta su confluencia con el río Bogotá y drena un área de 390 Km<sup>2</sup> (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2010).

La importancia del río Tunjuelo radica en su extensión, valor paisajístico, ambiental y en razón a que este es la fuente de abastecimiento de agua en la zona sur de Bogotá. En la cuenca del río se realizan diferentes actividades, tales como extracción de materiales de construcción, minería, agricultura, ganadería y la oferta formal e informal de suelo para vivienda (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2017).

La cuenca del río Tunjuelo está dividida en tres sectores definidos por su topografía y drenaje, los cuales son: Cuenca Alta, Cuenca Media y Cuenca baja. Para efectos del presente estudio se analizará la cuenca baja. Esta inicia en la zona de canteras y termina en la desembocadura del río Bogotá; actualmente, se encuentra densamente poblada y acumula los vertimientos de más de 3.5 millones de personas (Umaña)

La cuenca baja es uno de los sectores en donde se encuentran las principales intervenciones de los componentes ambientales y ecosistémicos debido a la localización de la zona urbana y suburbana de Bogotá, donde los efectos aguas abajo de la actividad minera ha generado alteraciones principalmente en el curso del río (El espectador). Así mismo, la intervención de la

ronda hídrica de la cuenca a causa del desarrollo de las diferentes actividades económicas y ha hecho que el sistema amortiguador de los ecosistemas naturales y seminaturales se debilite y se presenten desbordamientos e inundaciones en diferentes periodos desde 1970, aproximadamente, hasta el presente año (Secretaria Distrital de Ambiente , 2013).

El problema de las inundaciones se ha venido presentando a lo largo del tiempo debido a la tipología de desarrollo urbano ya que la actividad agrícola se localizó en predios cercanos al área inundable del río de forma ilegal sin tener en cuenta la planeación ni la infraestructura sanitaria necesaria, debido a que esta zona satisfacía las necesidades económicas de una numerosa población perteneciente a los estratos socioeconómicos más carentes de la ciudad (Secretaria Distrital de Ambiente , 2013).

Además de la reducción de la ronda hídrica en la cuenca baja, las características hidráulicas del río varían drásticamente debido a su baja pendiente en comparación con la cuenca alta, por lo que la capacidad del cauce en este trayecto es insuficiente para evacuar las crecientes generadas, presentándose por consiguiente periódicas inundaciones que afectan a barrios como San Benito, Meissen y otros, lo que genera desplazamiento de cientos de familias que habitan estos barrios.

### **1.2.1 Antecedentes del problema**

Respecto a las inundaciones generadas en el río Tunjuelo se identifican eventos que datan desde 1995 por lo que este fenómeno aunque ha contado con diferentes obras y planes de manejo para la amenaza de inundación, lleva más de 20 años repitiéndose. Lo mencionado se debe según la bibliografía presentada anteriormente: 1) Los excesos de los embalses La Regadera y Chisacá son manejados por el río Tunjuelo ocasionando un aumento en el caudal del río. 2) Aguas abajo del embalse de Chisacá el río recibe la descarga de las aguas residuales de una población aproximada de 300.000 habitantes, y el caudal sanitario de Doña Juana (Fundación de asesorías para el sector rural).

El sector urbano de la cuenca baja se ha caracterizado por inundaciones en época invernal debido que las aguas del río Chiguaza se desbordan. Los barrios que suelen ser afectados por este evento de riesgo son: Abraham Lincoln, Tunjuelito, Meissen y San Benito. Como ya se mencionó anteriormente, esta es una problemática que se ha venido presentando a lo largo del tiempo y que ha afectado a las comunidades que se han ubicado en su ribera, las cuales presentan condiciones altas de vulnerabilidad y pertenecen a los estratos socioeconómicos más bajos de la ciudad. Sin embargo, los eventos de inundaciones se han presentado repetidamente y respecto a los cuales ninguna autoridad competente ha realizado algún tipo de gestión duradera en el tiempo permitiendo su repetición constante.

Algunos de los eventos más agresivos por las inundaciones del río son:

Desbordamientos del Río ocurridos en junio de 2002: el caudal del río Tunjuelo creció 150 veces, rebosó los sistemas de contención de Usme y se desbordó en la cuenca media, en la zona de explotación minera de Tunjuelito, y tapó hasta tres metros de altura. Afectó 600 casas de 22 manzanas (Gutiérrez Roa, 2008). En este evento se inundaron 5 cárcavas de extracción de agregados para construcción, dichas cárcavas acumularon un volumen aproximado de 12'000.000 de m<sup>3</sup> de aguas en proceso de descomposición, que generaron una emergencia sanitaria por la generación de olores molestos y la proliferación de insectos y demás vectores que este tipo de contaminación conlleva.

En junio del 2014 los desbordamientos del río afectaron a los residentes del barrio Nuevo Muzú; se estima que cerca de 15 cuadras de la zona resultaron afectadas por la inundación, que logró alcanzar viviendas, un parque y vías (Redacción Bogotá, 2014).

En abril del 2016 la inundación en el barrio Tunjuelito encendió las alarmas cuando el agua alcanzó los 40 centímetros y hubo 331 personas afectadas (Redacción Bogotá, 2016).

### **1.2.2 Pregunta de investigación**

¿Qué barrios localizados en cercanías del río Tunjuelo se ven afectados por inundación, debido a eventos extremos de precipitación?

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Manejar los temas del recurso hídrico debería ser considerado una línea fundamental, debido a los volúmenes de agua dulce existentes en el país. Los eventos climatológicos extremos, las malas prácticas en los sectores económicos y la falta de planeación territorial hace que cada año se presenten en las mismos sectores problemas de inundación que dejan como resultando pérdidas humanas, económicas y paisajísticas en el país; aun cuando estos eventos son conocidos por los institutos de investigación y cada vez son más las inversiones que se realizan para potenciar estudios enfocados en investigación para reducir el riesgo a nivel técnico y desde lo jurisprudencial.

Lograr un resultado académico exitoso con este estudio en el cual se cumplan los objetivos y se disponga de un mapa de la mancha de inundación a partir de variables que permitan realizar un análisis predictivo en la zona afectada, el cual servirá para ser replicado en otras zonas del país en las cuales se presente esta misma problemática. Contribuyendo a la reducción de la vulnerabilidad del país frente a las consecuencias por ocurrencia de eventos; ya que en el país se actúa solo en manejo del desastre una vez este se presenta, entendiendo que en la mayoría de los casos pueden ser previsibles técnicamente.

Una de las soluciones debido a la presencia de comunidades en las zonas de ronda del río Tunjuelo es el diseño de estructuras para contención de inundaciones, las cuales tienen una fuerte repercusión en la calidad de vida y desarrollo económico de la zona. Para el diseño y el análisis de las inundaciones es necesario realizar el estudio de los registros históricos anuales y determinar los caudales máximos que se pueden presentar, con el fin de realizar aproximaciones de la realidad sin quedar sobredimensionadas, ni generando incremento en sus costos.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo general**

Realizar el análisis de inundación de la cuenca baja del río Tunjuelo tramo estación Av. Boyacá – intersección río Bogotá, con el programa HEC –RAS 5.03 por medio del análisis de información geoespacial.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Determinar el caudal presente para un periodo de retorno de 100 años en el tramo definido.
- Identificar las zonas con mayor probabilidad de inundación y sus posibles efectos sobre las zonas urbanas aledañas.
- Realizar un mapa de mancha de inundación para un periodo de retorno de 100 años en el que se evidencie la afectación a predios circundantes dentro del tramo definido de la cuenca baja del río Tunjuelo.

## 2 MARCOS DE REFERENCIA

### 2.1 MARCO TEÓRICO

#### 2.1.1 Comportamiento espectral de la vegetación

La radiación electromagnética al tener contacto con el blanco, puede ser absorbida, transmitida y reflejada. En el caso específico de la vegetación, la interacción con la radiación ocurre distintamente para cada longitud de onda del espectro (Sa, García, & Alonso, 1999), mientras en la región visible, los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la radiación solar que reciben, en el infrarrojo cercano estas sustancias son bastante transparentes. Por esta razón, la vegetación sana ofrece baja reflectancia en la banda roja del espectro (entre 600 y 700 nm), y alta en el infrarrojo próximo (entre 800 y 1000 nm), de manera que cuanto mayor sea el “vigor” que presenta la vegetación, mayor será el contraste entre los valores de reflectancia captados en ambas bandas. Bajos valores de reflectancia en el infrarrojo próximo pueden indicar una vegetación enferma o con una falta importante de humedad, en la región del visible (entre 400 y 700 nm), la respuesta espectral de la vegetación está caracterizada por el papel fundamental que desempeñan los pigmentos de la hoja en la absorción de la energía (Sa, García, & Alonso, 1999).

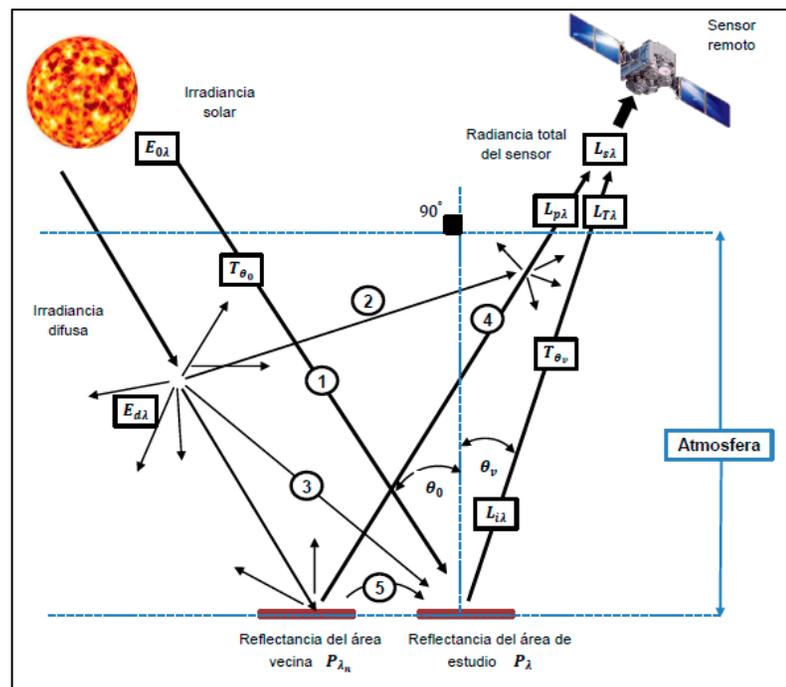
Mientras que las propiedades de la superficie de la hoja son, en parte, responsables de la reflectancia en dicha superficie, la absorción está ligada principalmente por la estructura interna, esto es, composición, concentración y distribución de los pigmentos (la clorofila, el caroteno y la xantofila). De ellos, el más importante es la clorofila, que es responsable de dos bandas de absorción, una en el azul y otra en el rojo. Esto se traduce en un máximo de reflectancia en torno a los 550 nm. En esta región del espectro se produce la fotosíntesis, proceso que implica la absorción de energía. En síntesis, esta región se caracteriza por una escasa reflectancia (<20%) y una fuerte absorción debida a los pigmentos foliares (Alonso, Moreno, & Rodríguez, 1999).

La respuesta espectral de una hoja vegetal, donde se observa un pico de absorción en la región del azul (450 nm) y otro en la región del rojo (650 nm), ambos debidos a la presencia de

pigmentos en el interior del cloroplasto, tales como: clorofila, xantofila, carotenos y otros. La absorción de la energía solar que ocurre en estas longitudes de onda depende principalmente de la concentración de la clorofila (Hoffer, 1982).

### 2.1.2 Firmas espectrales

Cada objeto tiene una única forma de interactuar con la energía solar, la cantidad de energía reflejada por los objetos en la superficie terrestre es captada por los sensores remotos, esta energía es captada de acuerdo a las longitudes de onda o a las bandas espectrales que estén capacitados en captar. La Figura 2.1-1 ilustra la interacción de la radiación solar y la atmósfera. Se muestran las cinco rutas posibles que puede tener la radiación solar para ser registrada por el sensor.



**Figura 2.1-1 Interacción de a radiación solar y la atmosfera.**

$E_0 =$  Irradiancia solar antes de la atmosfera

$E_{0\lambda} =$  Irradiancia espectral solar en la parte superior de la atmosfera

$E_d =$  Irradiancia difusa del cielo

$E_g =$  Irradiancia global incidente en la superficie

$T_\theta =$  Transmitancia atmosférica en un ángulo  $\theta$  del zenit

$\theta_0 =$  Ángulo solar al cenital

### **2.1.3 Pre-procesamiento y procesamiento de imágenes satelitales**

Las imágenes satelitales captadas por los sensores remotos contienen valiosa información referente a la cobertura terrestre. La información que refleja superficie terrestre es recolectada por los sensores satelitales en forma matricial. Este tipo de información facilita el estudio de muchas disciplinas convirtiéndose en apoyo y complemento las técnicas convencionales de muchos estudios actuales y futuros.

Para utilizar adecuadamente las imágenes satelitales se deben realizar unos procesos que se describen a continuación: primero se realiza la adquisición por los catálogos de cada programa satelital. Segundo se efectúa el proceso de pre-procesamiento de las imágenes que tiene como objetivo maximizar la confiabilidad de los resultados obtenidos por el sensor. La señal recibida por los sensores se codifica en los diferentes valores de Niveles Digitales (ND) de acuerdo a la reflexión de la radiación electromagnética de las cubiertas. El proceso inverso, conversión de los ND a reflectancia, se realiza en dos fases: primero pasar los ND a valores de radiancia, a partir de los coeficientes de calibración (radiancia en el sensor), y luego estimar los valores de reflectancia aparente (también llamada reflectancia en el tope de la atmósfera) conociendo la irradiancia solar, fecha de adquisición solar, entre otros. Posteriormente se obtiene la reflectancia de superficie a partir de la implementación de modelos de corrección atmosférica (corrección absoluta), este tipo de imagen satelital es la reflejada por la superficie terrestre sin contacto con la atmósfera, ni ruidos adicionales.

#### **2.1.4 Clasificación de las imágenes satelitales**

La clasificación dentro del contexto de teledetección es un proceso en el cual a cada pixel de la imagen le es asignada una clase mediante diferentes procesos como áreas de entrenamiento definidas por el usuario o por similitud entre las características de los pixeles a clasificar agrupadas de acuerdo a características espectrales similares (Arango , Branch, & Botero).

Los pixeles de la imagen son ordenados en un número finito de clases individuales basados en los niveles digitales de cada pixel. Para que un pixel pertenezca a una clase debe satisfacer un conjunto de criterios que corresponden a dicha clase. El proceso de clasificación consta de dos etapas: entrenamiento y clasificación. La primera necesita que el software sea entrenado para reconocer patrones en los datos mediante un método supervisado o no supervisado y el segundo que usa una regla de decisión (Arango , Branch, & Botero).

#### **2.1.5 Clasificación supervisada**

La clasificación supervisada es un proceso en el que pixeles de identidad conocida, ubicados dentro de las áreas de entrenamiento; se utilizan para clasificar pixeles de identidad desconocida.

Esta clasificación involucra las etapas de entrenamiento, selección y aplicación del algoritmo de clasificación (k vecinos más cercanos (k-NN Nearest Neighbour). En la etapa de entrenamiento el analista selecciona áreas de identidad conocida de la cubierta terrestre de interés (cultivos, cuerpos de agua, suelos, etc.) delineándolas sobre la imagen digital bajo formas de rectángulos o polígonos cuyos datos numéricos quedan archivados en la computadora como regiones de interés constituyendo los “datos de entrenamiento”. Para realizar la selección el analista debe tener un conocimiento previo del área de estudio, sea por reconocimientos de campo o sea por consulta de mapas, fotografías aéreas, etc. (Ordoñez & Serna, 2015).

Una vez que se dispone de un conjunto de estos datos de entrenamiento debe tratarse de adjudicar cada uno de los píxeles de la escena a alguna clase. Entre los algoritmos clásicos para estos fines están los métodos paramétricos y no paramétricos (Ordoñez & Serna, 2015).

### **2.1.6 Clasificación no supervisada**

El método no supervisado crea agrupamientos espectrales (clusters), donde el analista debe intentar asociar una clase temática a cada uno de dichos grupos. Se han propuesto numerosos algoritmos para crear estos clusters. Como ejemplo se citará el método Isodata (Interactive Self-Organizing Data Analysis Technique (Algorithm)) .

### **2.1.7 Isodata**

En este tipo de clasificación solo es necesario la escena o la imagen que se quiere clasificar y algunos parámetros que limiten el número de clases. El método Isodata utiliza la distancia mínima espectral para asignar un clúster a cada píxel. El proceso comienza con la media de un número determinado de clusters arbitrarios o la media de la firma existente y luego realiza un proceso iterativo para que las medias se desplacen a las medias de los clusters de los datos. Para usar este método existen unos parámetros de agrupación:

- $N$ : el número máximo de grupos a ser considerado. Dado que cada cluster es la base para una clase, este número se convierte en el número máximo de clases para ser formado. Se comienza por determinar  $N$  medias de clusters arbitrarios. Algunos grupos con muy pocos píxeles se pueden eliminar dejando menos  $N$  clusters.
- $T$ : un umbral de convergencia que corresponde al porcentaje máximo de píxeles cuyos valores de las clases se les permite estar sin cambio entre iteraciones.
- $M$ : el número máximo de iteraciones a realizar.

En la primera iteración del algoritmo Isodata las medias de los grupos  $N$  pueden estar determinadas arbitrariamente. Luego de cada iteración se calcula una nueva media para cada cluster, basado en la actual posición espectral del pixel en el cluster, en vez del cálculo arbitrario inicial. Entonces estas nuevas medias se utilizan para definir las agrupaciones en la siguiente iteración. El proceso continua hasta que exista poco cambio entre iteraciones.

El análisis de los pixeles sobre la imagen se analiza a partir de la esquina superior izquierda bloque por bloque desplazándose de izquierda a derecha. Se calcula la distancia espectral entre el pixel candidato y cada media del cluster. El pixel es asignado al cluster cuya media sea la más cercana. La función Isodata crea un archivo de imagen de salida con una capa temática de trama y un archivo de firma (ERDAS Inc., 1990).

### **2.1.8 Exactitud temática**

La exactitud temática es el conjunto de técnicas para determinar la calidad de un mapa en particular. Las técnicas incluyen la evaluación de la exactitud de un mapa basado en observaciones tales como matriz de confusión, exactitud del usuario, del productor y total y los errores de omisión y comisión por cada cobertura.

En la matriz de confusión se compara la clasificación de la imagen con la verdad de terreno. A través de la matriz de confusión se evalúa la exactitud de la clasificación, situando en las filas las clases o categorías del mapa y en las columnas las mismas clases para la verdad de terreno o campo. Esta matriz presenta una visión general de las asignaciones, tanto de las clasificaciones correctas (elementos de la diagonal) como de las migraciones o fugas (elementos fuera de la diagonal), así mismo recoge los errores de omisión y de comisión (Errores de comisión: elementos que no perteneciendo a una clase aparecen en ella y errores de omisión: elementos que perteneciendo a esa clase no aparecen en ella por estar erróneamente incluidos en otra) (Sa, García, & Alonso, 1999).

La exactitud total se calcula dividiendo el número total de píxeles correctamente clasificados por el número total de píxeles de referencia y expresándolo como porcentaje. Este índice es global y no indica cómo la exactitud se reparte entre las diversas categorías individuales. Muchas veces las categorías individuales presentan exactitudes drásticamente diferentes pero se combinan de modo que esto no se refleja en la exactitud global.

### **2.1.9 Modelación hidráulica**

La modelación es una herramienta de gran importancia para el estudio de crecientes que se ha extendido por todo el mundo, fundamentalmente en países desarrollados. En la actualidad, con el empleo de estos modelos, se realiza el análisis y la prevención de las inundaciones; además, es posible manejar hipótesis suficientemente realistas o previsibles que ofrezcan un cierto grado de confianza para la toma de decisiones, ya sea en la ordenación del territorio en torno a los ríos o para exigir criterios de diseño de obras e infraestructuras capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de emergencia. Incluso, alertar a los servicios de protección civil y establecer protocolos de actuación ante posibles situaciones de peligro por intensas lluvias (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, s.f.)

### **2.1.10 Estimación de caudales máximos**

Para el análisis de la información hidrológica se utilizó el programa HIDROESTA (Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2004), el cual es un software que permite el cálculo de los parámetros estadísticos, cálculos de regresión lineal, no lineal, simple y múltiple, así como regresión polinomial. Igualmente permite evaluar si una serie de datos se ajustan a una serie de distribuciones, calcular a partir de la curva de variación estacional o la curva de duración, eventos de diseño con determinada probabilidad de ocurrencia, realizar el análisis de una tormenta y calcular intensidades máximas, a partir de datos de pluviogramas, los cálculos de aforos realizados con correntómetros o molinetes, el cálculo de caudales máximos, con

métodos empíricos y estadísticos, cálculos de la evapotranspiración y cálculo del balance hídrico (Villón Bejar).

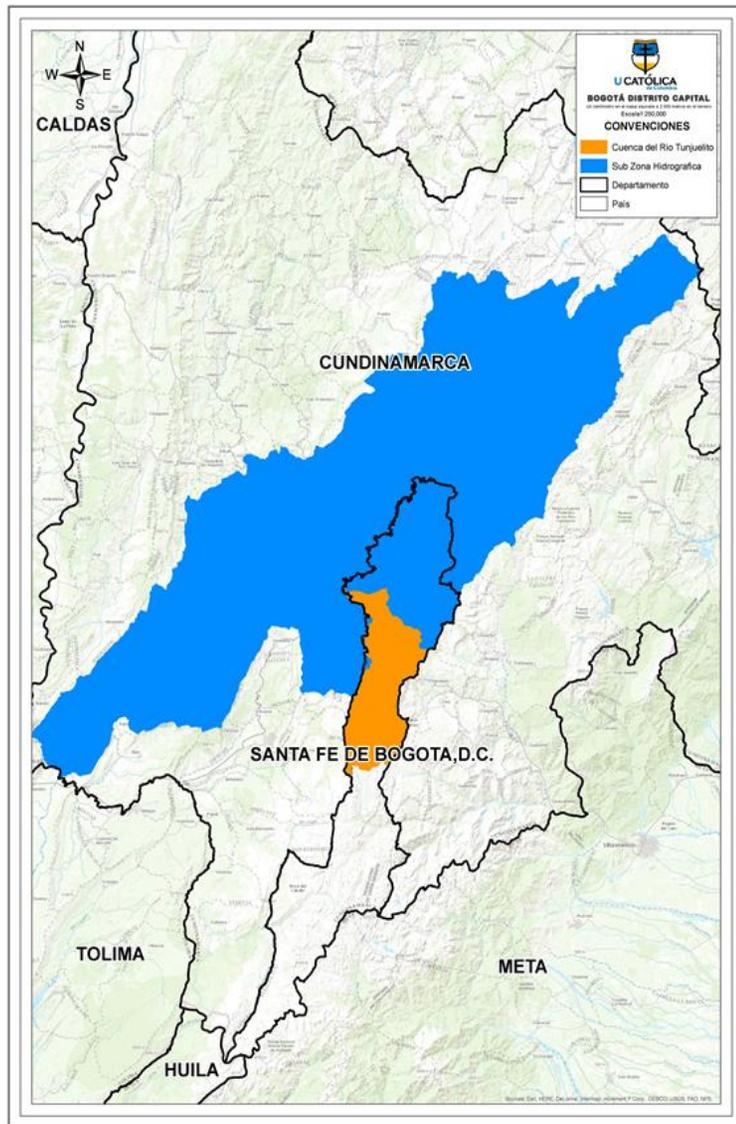
### **2.1.11 Software modelo de inundación**

El Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC), una organización dentro del Instituto de Recursos Hídricos , es el centro de referencia oficial para el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU. en las áreas técnicas de hidrología superficial y subterránea, hidráulica fluvial y el transporte de sedimentos, estadísticas hidrológicas y el riesgo, análisis de sistema de depósito, la planificación de análisis, la gestión en tiempo real de control de agua y una serie de otros temas técnicos estrechamente relacionados. HEC apoya las oficinas del cuerpo de campo, oficinas y laboratorios, proporcionando métodos técnicos y de orientación, modelos de recursos hídricos y los servicios asociados, capacitación y talleres, realizando investigación y desarrollo, y la realización de la asistencia técnica y los proyectos especiales (US Army Corps of Engineers , s.f.).

## **2.2 MARCO GEOGRÁFICO**

La zona de estudio comprende 388 km<sup>2</sup> en la cuenca del río Tunjuelo, la cual se encuentra ubicada en el centro del país, sobre la cordillera Oriental, en el departamento de Cundinamarca, sobre la subzona hidrográfica del río Bogotá, en el municipio de Bogotá (Figura 2.2-1).

La cota más alta de la cuenca, de acuerdo con el sistema de referenciarían del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), se localiza a 3.850 msnm, en tanto que la cota más baja se localiza a 2.530 msnm.



**Figura 2.2-1 Cuenca río Tunjuelo**

A partir de los cauces de los ríos Chisacá, Mugroso y Curubital se forma el Río Tunjuelo, que tiene una longitud total de 73 km hasta su desembocadura en el río Bogotá; su caudal medio multianual cerca de su desembocadura corresponde a  $4.35 \text{ m}^3/\text{s}$ .; sin embargo, en temporadas de invierno registra caudales superiores a los  $70 \text{ m}^3/\text{s}$  (Torres & Velásquez, 2009).

La cuenca se caracteriza por tener tres sectores denominados Cuenca alta, Cuenca media y Cuenca baja, las cuales se describen a continuación (Figura 2.2-2):

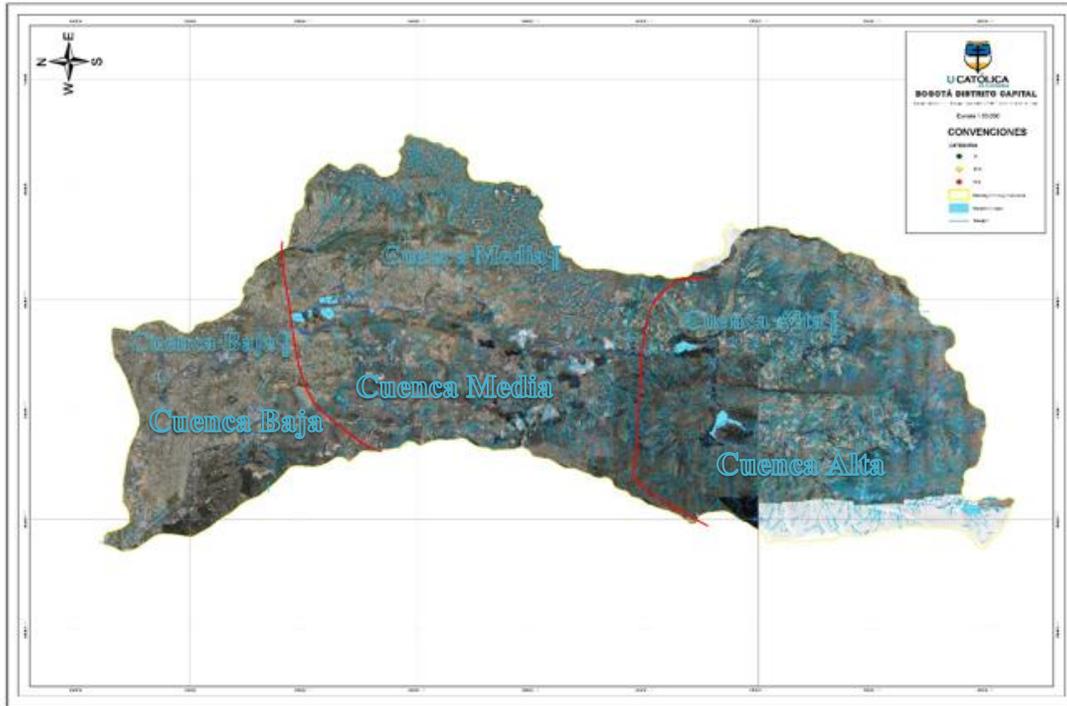


Figura 2.2-2 Sectores de la cuenca del río Tunjuelo



Figura 2.2-3 Esquema curso del río Tunjuelo

### **2.2.1 Cuenca alta**

Hace aproximadamente una década este sector se caracterizaba por un entorno eminentemente rural; sin embargo, en los últimos años su desarrollo ha tomado un giro considerable a punto que se identifica en la actualidad en el contexto de un sector sub-urbano, en el que convergen condiciones de asentamientos representativos a partir de la población de Usme (Umaña A. ).

Los riesgos de desbordamiento en este sector son mínimos, precisamente por las características torrenciales del cauce del río ante las altas pendientes. Ante la limitación en la planificación del desarrollo, el asentamiento de la población de manera subnormal genera efectos negativos entre los cuales se destacan el deterioro de las obras de contención, manejo inadecuado de residuos de todo tipo y los vertimientos incontrolado de aguas contaminadas, lo que conduce a generar vulnerabilidad en el sector (Secretaría Distrital de Ambiente , 2013).

### **2.2.2 Cuenca media**

Su extensión que va desde la Regadera hasta Cantarrana (5 km debajo de Usme), cubre el 33% del área del río, se torna en receptor de varias quebradas entre las cuales se encuentran: Pasquilla, Pozo Colorado, la Horqueta, Chuscal, Suate, Chiguaza Alta, Fucha y Yomasa. Por su limitada pendiente y velocidad en el cauce, es este el sector en el cual tradicionalmente se presentan grandes desbordamientos del río. En este sector se encuentran localizados los denominados embalses de amortiguación existentes para el control de crecientes (Narvaéz Tafur, 2007).

La cuenca media se caracteriza por ser un sector de gran desarrollo urbano donde permanentemente se han presentado asentamientos subnormales, lo que genera alta vulnerabilidad, no solo por este hecho desprovisto de planificación, sino también por cuanto en este sector se encuentra una importante explotación de canteras, cuya prolongación va hasta la parte baja (Narvaéz Tafur, 2007).

### **2.2.3 Cuenca baja**

Su extensión cubre 32% del área del río y se torna receptor del recurso hídrico de las quebradas Chiguaza, Limas, Santa Librada y Tibanica, entre otras. El cauce del río se encuentra totalmente delimitado por diques de contención en sus riberas. Los desbordamientos son poco frecuentes ya que se producen en el sector anterior y el río transita ya regulado por los embalses de amortiguación. Las condiciones de drenaje pluvial hacia el río resultan deficientes debido a que los barrios se encuentran localizados en un nivel más bajo que el propio del río (Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial).

Es este un sector con desarrollo urbano, su actividad industrial la soporta la explotación de canteras sin un adecuado proceso de planificación y compensación al medio ambiente, lo que genera problemas hidráulicos y de saneamiento, lo que hace que se tornen prioritaria la ejecución de proyectos que mitiguen riesgos mayores (Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial).

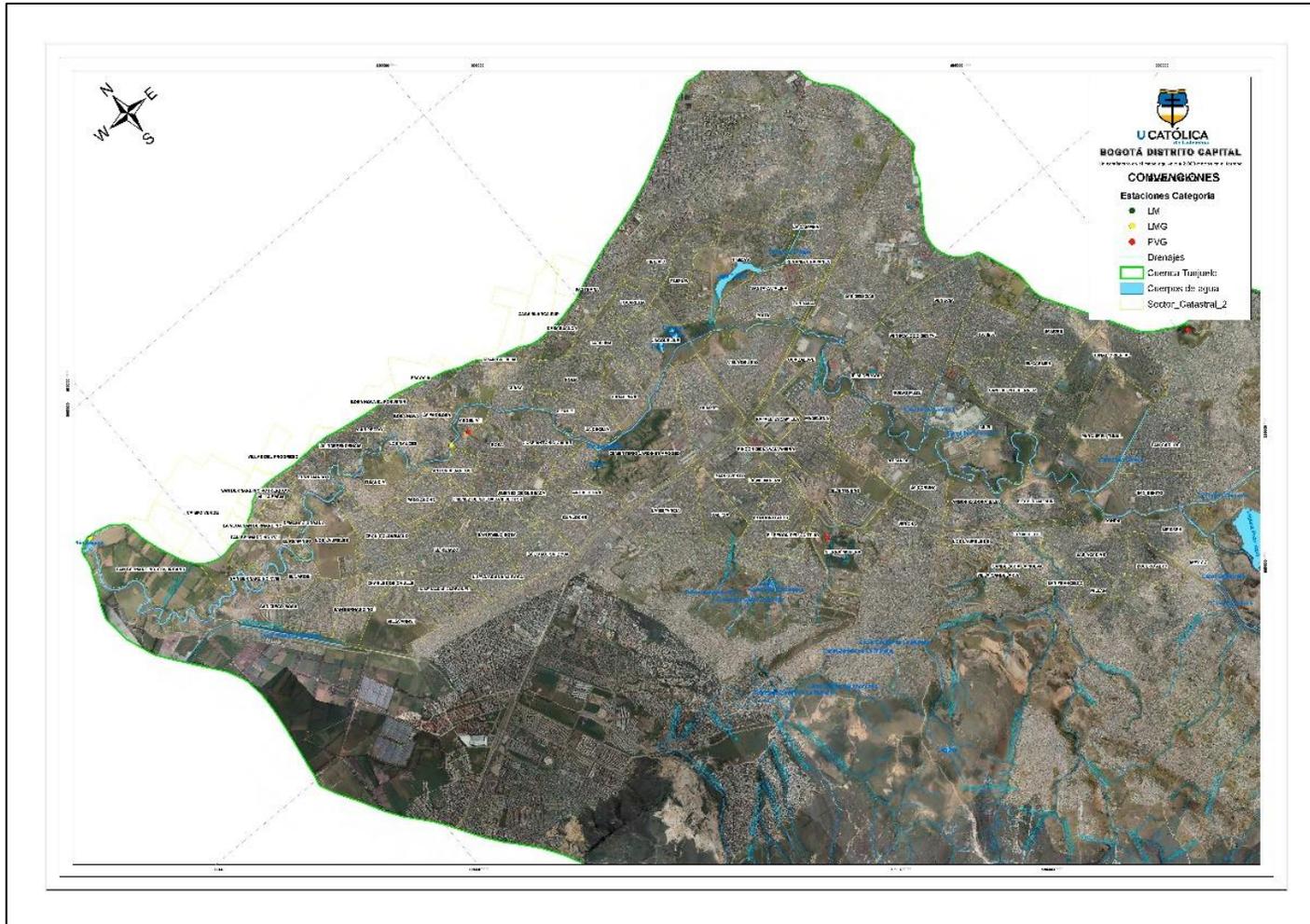
El río Tunjuelo presenta en su valle aluvial, principalmente en sus cuencas media y baja, una fuerte intervención por asentamientos humanos y la explotación minera, lo cual ocasiona que se presenten riesgos de inundación a lo largo del mismo en sus dos márgenes. Lo anterior dio origen a la construcción de los tres embalses y la construcción de jarillones en las cuencas media y baja para el control de inundaciones, obras que por la intervención de los mismos asentamientos han perdido parte de su capacidad de amortiguación para crecientes superiores a periodos de retorno mayores a los diez (10) años (Secretaria Distrital de Ambiente , 2013).

Adicionalmente el río presenta una pendiente fuerte en su cuenca media, al inicio de su recorrido por la ciudad, que se refleja en un equilibrio morfológico precario y susceptible de procesos de erosión regresiva y socavación de taludes con eventos hidrológicos extremos (Alcaldía mayor de Bogotá D.C).

En el contexto de la identificación de las cuencas ya enunciadas, la visualización de su problemática que radica esencialmente en los asentamientos, inicialmente subnormales, sin que preceda algún tipo de planeamiento aun precario, con la consiguiente ausencia de infraestructura de servicios públicos, aun cuando algunos, han ingresado paulatinamente en procesos de normalización sobre la marcha. Se constituyen severas amenazas por inundación, máxime cuando un número representativo de población se ha asentado en zonas ribereñas que en el componente ambiental, correspondería a zonas de ronda y zonas de manejo y preservación ambiental.

### **2.3 MARCO DEMOGRÁFICO**

Si bien la cuenca del río Tunjuelo abarca más de 388 km<sup>2</sup> de superficie y las variables asociadas al análisis de la población en los diversos componentes, ambientales, demográficos, hidráulicos, entre otros generan diversos frentes de atención, se analizarán principalmente las poblaciones aledañas al cauce principal de río, en donde se encuentran las localidades de Usme, Tunjuelo, ciudad bolívar, bosa y Kennedy, las cuales contienen 157 barrios (Fundación de asesorías para el sector rural). Presumiendo que no la totalidad de los barrios citados en la siguiente tabla tendrán gran impacto en el comportamiento del análisis hídrico del estudio, sí hacen parte de la población de muestreo dada su colindancia con el cauce principal del río Tunjuelo.



**Figura 2.3-1 Barrios sobre el río Tunjuelo**

**Tabla 2.3-1 Barrios localizados en la ribera del río Tunjuelo**

BARRIOS		
Villa rica	S.c. Yomasa norte	Villa nhora
La unidad	S.c. El mochuelo oriental	Urb. Clarelandia del sur
Nueva roma ultima etapa - bertha	Isla del sol	La riviera
Brazuelos sector la esmeralda	Zona industrial	Antonia santos
S.c. Las margaritas	C.r. Santa rosa - rincon de venecia	El portal de bosa
S.c. El hato	Colmotores	Xochimilco
S.c. Los arrayanes	Rincon de venecia	Argelia ii
S.c. La regadera	Nuevo muzu ii sector 2a etapa	Islandia ii
S.c. Olarte	Tunal sector ii	Islandia
Ciudadela de usme la esperanza i	Muzu	Islandia iii
S.c. Centro usme	Parque el tunal	S.c. Grancolombiano
S.c. San bernardino xxii	San benito	San eugenio
S.c. La paz bosa	S.c. Meissen	Providencia
S.c. San bernardino xxv	Escuela de artilleria	San pedro
San jose ii sector	S.c. Jaqueline	San jose a
S.c. El jardin	Olarte	San jose b
La independencia	Nuevo chile	San jose c
Monte carlo	Cementerio jardines apogeo	San jose d
Tundama	Jose antonio galan	San jose e
Boita i sector	S.c. Bosa	Rincon de san jose
S.c. Tunjuelito	La riviera ii	Villa del rio
S.c. El mochuelo ii	Villa de suaita	Rincon de nuevo muzu
Gran britalia	El sauce	Tejar de ontario
Class	Los sauces	Ciudadela el oasis
S.c. Delicias	Ntra sñra de la paz san javier	S.c. La requilina
Meissen	Ntra sñra de la paz v sector	Vereda el pedregal la lira
La playa ii	Ntra sñra de la paz san benito	El pedregal la lira
S.c. Meissen	La esmeralda	Urb. Kalamari
Las luces	Rincon santo	Acacia iii parte baja
Catalina ii	La paz san ignacio las vegas	Villa helena
Villa de los sauces	La paz	La coruña
Prados de kennedy	S.c. La paz bosa	S.c. Atlanta
Casa loma	S.c. La paz bosa	Santa rosa sur
S.c. Brazuelos occidental	S.c. Gran britalia	S.c. Santa rosa

S.c. Brazuelos occidental	S.c. Gran britalia	S.c. Santa rosa
Perpetuo socorro ii	S.c. Argelia ii	S.c. Santa barbara
Jaqueline	S.c. Islandia	S.c. Las mercedes
Sauces ii	S.c. Los laureles	S.c. Pasquillita
La paz san ignacio sector la	Getsemani	S.c. Pasquilla
S.c. Los sauces	San jose ii sector	S.c. Mochuelo alto
El rubi de kennedy	La vega	S.c. El mochuelo oriental
El rubi ii	El paradero	Mexico ii sector
El matorral	S.c. San bernardino xviii	S.c. Central de mezclas
S.c. El remanso i	Guadalupe	Urb. Preciso
S.c. El remanso	Urb. Industrial las delicias	S.c. Ronda
San bernardino	Boita ii sector	Protecho bogota ii
S.c. La union	S.c. La paz bosa	S.c. El chircal sur
S.c. Chisaca	El porvenir ii sector	Arborizadora baja
S.c. Los andes	S.c. Cementerio jardines apogeo	S.c. Arborizadora baja
La lira	Madelena	S.c. Guadalupe
Brazuelos sector el paraiso	San cayetano	S.c. El mochuelo ii
S.c. Brazuelos occidental	San diego la paz iv sector	Brazuelos
Urb. Saron	El velero	
S.c. San diego bosa	Villa del rio ii sector	

## 2.4 ESTADO DEL ARTE

El Tunjuelo es un río que, aunque tiene un caudal medio relativamente bajo en comparación con los caudales máximos registrados presenta crecientes que amenazan los asentamientos localizados en sus márgenes, en especial en el sector bajo de su cuenca. Es así como en el año 1959 se presentó una creciente extraordinaria, evaluada por la Empresa de Acueducto de Bogotá en unos 180 m<sup>3</sup>/s en la estación Cantarrana, la cual ocasionó desbordamientos muy importantes en el tramo inferior del río, causando apreciables inundaciones en fincas de agricultores que en esa época poblaban la zona.

Por tal razón, esta población afectada resolvió construir diques de protección a lo largo de dicho tramo inferior. Posteriormente, en 1977, dada la importancia del problema y la preocupación de que pudieran presentarse nuevamente crecientes de gran magnitud, la Empresa de Acueducto, a través de las firmas CEI y GOMEZ CAJIAO, adelantó estudios sobre el control de crecientes, en los cuales se plantearon tres embalses amortiguadores ubicados sobre la ronda del río en su sector medio, denominados embalses 1, 2 y 3. Estos embalses han constituido en los últimos años, junto con los diques de protección, una solución parcial al problema de inundaciones en el sector bajo del río. Sin embargo, se ha venido presentando un proceso relativamente intenso de rellenos

urbanísticos en la zona de estos embalses, que ha reducido significativamente su capacidad, llegando a perderse, en conjunto, cerca del 50% de su aforo.

Por otro lado, en los últimos años los sectores medio y bajo del río han experimentado un desarrollo urbano creciente de sus áreas adyacentes. Por lo tanto, se puede señalar que en la eventualidad de presentarse un fenómeno hidrológico excepcional que supere la capacidad amortiguadora de los embalses actuales, se producirían inundaciones importantes en las márgenes del río.

Por estas razones, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, en el año de 1997, contrató con la firma CEI la prefactibilidad para el “Estudio de Saneamiento Ambiental y Control de Crecientes en la Cuenca del Río Tunjuelo”, el cual tuvo entre sus objetivos identificar de manera definitiva las mejores soluciones técnicas y económicas para resolver el problema de control de crecientes en el río Tunjuelo.

Como resultado del estudio se definió como creciente de diseño de las obras de protección, la creciente de 1/100 años, y como la mejor alternativa de protección, la construcción de una presa en el sitio denominado Cantarrana, y la ejecución de una serie de adecuaciones del cauce del bajo río Tunjuelo, consistentes en realces de diques existentes y dragados de algunos sectores del río.

En el año 2000, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá contrató con la firma INGETEC S.A. los diseños para construcción de las obras para el control de crecientes en la cuenca del río Tunjuelo, el cual finalizó a principios del año 2003. Uno de los eventos hidrológicos más relevantes ocurrido durante los meses de mayo y junio de 2002, el cual se caracterizó por su magnitud, lo que hizo de tal fenómeno un evento hidrológico extraordinario, llegando a registrarse un caudal de  $186 \text{ m}^3/\text{s}$  al final del Tunjuelo medio, el mayor caudal registrado en los sesenta y tres años de registro para esa fecha, hecho que resultaba de importancia suma para generar acciones por demás inmediatas que permitieran precaver futuros acontecimientos de magnitudes aun menores, pero significativas.

Con el fin de garantizar una gestión responsable, se hizo necesario establecer, el Decreto 316 de 2004, como un instrumento que garantizara la coordinación institucional y de participación en las acciones de la cuenca del río Tunjuelo, en cuyos propósitos se orientan a la intervención social articulada e integral para atender en forma simultánea las carencias de los grupos humanos y las necesidades de las comunidades, de allí que se hiciera necesario coordinar la intervención de las áreas sujetas riesgo de inundación y la ejecución de medidas estructurales para mitigar riesgos de desbordamiento del Río Tunjuelo.

El esquema participativo enunciado en el Decreto ya citado, debió estructurarse para hacerle frente a los eventuales riesgos que pudieran generarse; sin embargo, no se identifican a través de los informes respectivos, en lo que apunta a elementos contundentes que soporten estrategias o acciones orientadas a precaver futuros eventos que generen consecuencias lesivas.

Para el mes de octubre de 2006, se presentó un nuevo evento hidrológico de caudales significativos, sin que se contara con un adecuado plan de mitigación y amortiguación, lo que condujo a que se generaran grandes inundaciones en los sectores bajos de los ríos Fucha y Tunjuelo.

En los estudios realizados, se sostiene que, para mitigar consecuencias, han de realizarse las obras que se identifican a continuación, referidas al proyecto de la cuenca del río Tunjuelo:

1. Construcción de la Presa de Cantarrana y obras anexas, cuyo propósito es regular la creciente de la cuenca alta del río.
2. Realce de los diques existentes de manera que se logre controlar la creciente de 100 años regulada en Cantarrana, evitando desbordamientos que produzcan inundaciones.
3. Dragados en el cauce del río para incrementar la capacidad hidráulica del río y reducir así los requerimientos de realces.

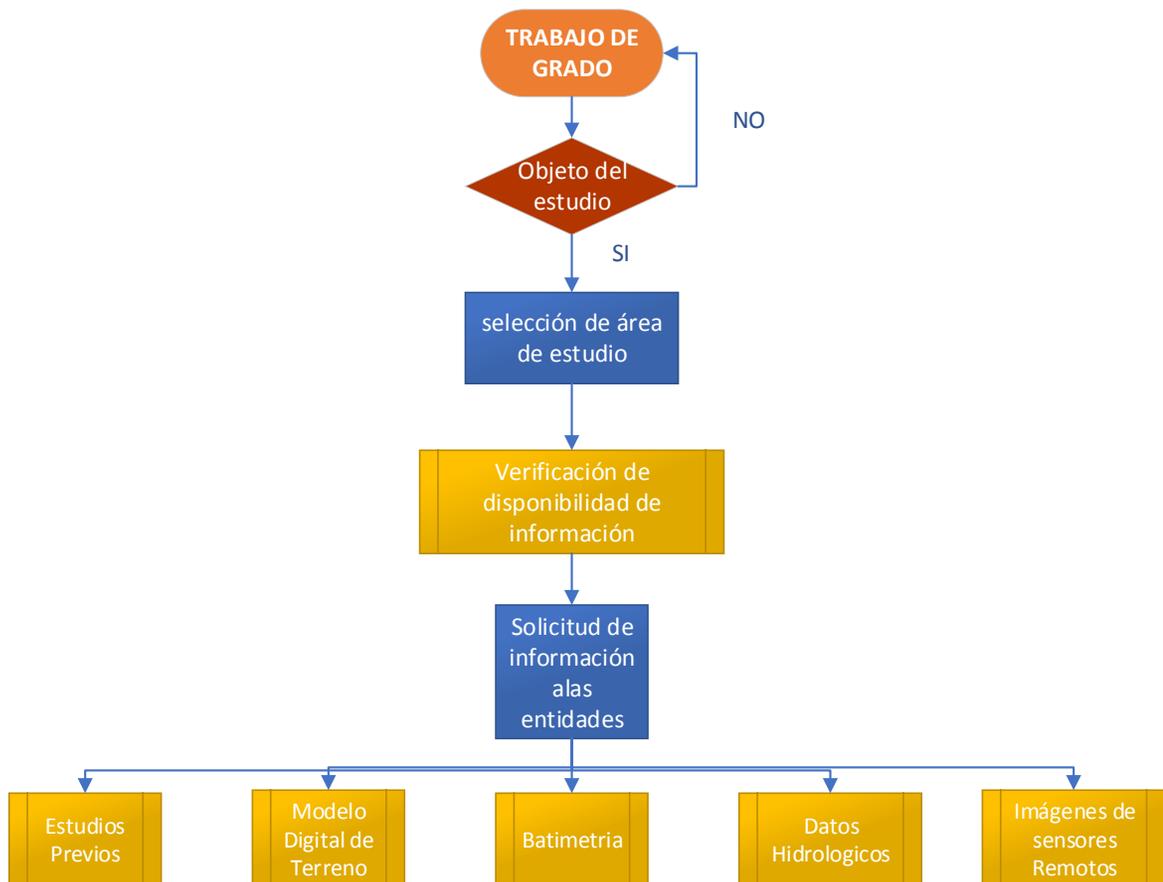
4. Obras de protección de orillas. Estas estarán colocadas en la parte externa de las curvas localizadas fuera de los embalses. El propósito de estas obras es estabilizar el cauce del río e impedir la erosión en las orillas del río, la cual es causante de inestabilidades en los taludes de los diques.
5. Nuevo rebosadero del embalse 3. Definido para reducir el riesgo que representan eventuales descargas del rebosadero actual sobre construcciones ubicadas inmediatamente aguas abajo.

### 3 METODOLOGÍA

La metodología usada para desarrollada para realizar el análisis de inundación en el tramo seleccionado de la cuenca baja del río Tunjuelo para determinar su influencia sobre los asentamientos humanos, se encuentra dividida en las siguientes fases

#### 3.1 FASES DEL TRABAJO DE GRADO

En la siguiente imagen se presentan las fases del trabajo de grado que comprenden desde la determinación del objeto de estudio hasta los tratamientos de la información para un producto final.



**Figura 3.1-1 Fases de la metodología**

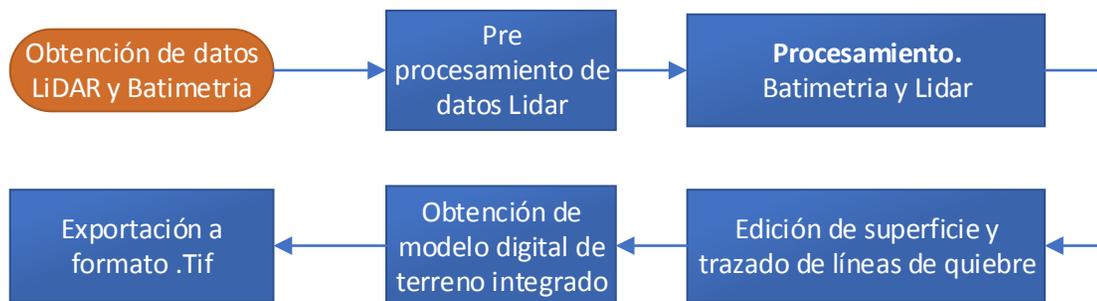
Como primera instancia la determinación de un objeto de estudio que permitiera aplicar los conceptos y conocimientos obtenidos a lo largo del estudio en la Especialización en Recursos Hídricos fue el objetivo a desarrollar, en donde se decidió enfocar la investigación en la generación de un modelo de inundación a partir del programa HEC – RAS en la cuenca baja del río Tunjuelo.

Una vez determinado el objeto de estudio se procedió a la solicitud de información a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá en relación al área objeto de investigación, la cual dispuso de varios insumos a los cuales efectuaron varios tratamiento de la información para la obtención de un modelo final, A continuación se describen con detalle las actividades realizadas para el tratamiento de la información.

### 3.1.1 Análisis y verificación de la información

#### 3.1.1.1 *Modelo digital del terreno y batimetría*

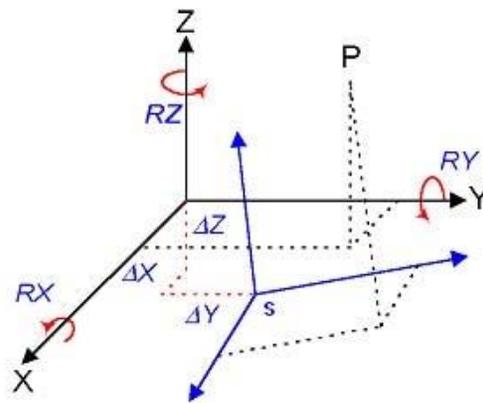
Los procesos de edición de superficie representan una parte fundamental en el desarrollo de modelos hidráulico, en donde para el caso del río Tunjuelo se aplicaron técnicas de procesamiento LiDAR (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging), todo ello con el fin de analizar la superficie de manera eficiente, con el fin de que posteriormente la superficie sobre la cual se analizará el flujo de agua sea de la mayor consistencia posible.



**Figura 3.1-2 Obtención de datos LiDAR y batimetría**

## Pre procesamiento de los datos LiDAR

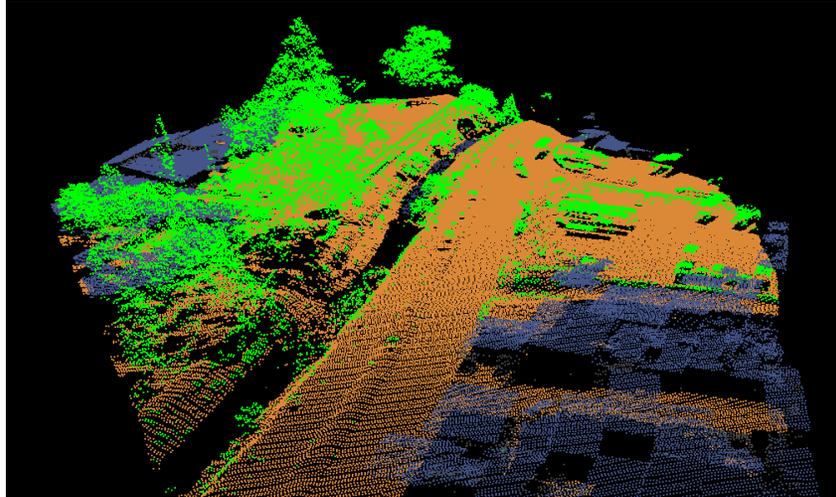
Dado que los datos suministrados presentaban proyecciones de Datum diferentes (superficies de referencia) para el caso de los datos de nubes de puntos LiDAR coordenadas de origen Magna Colombia origen Bogotá 1.000.000; 1.000.000 y los datos de batimetría Magna Ciudad de Bogotá 100.000; 100.000 se hizo necesario realizar transformación de coordenadas entre Datum.



**Figura 3.1-3 Transformación de coordenadas entre Datum**

## Procesamiento batimetría y LiDAR

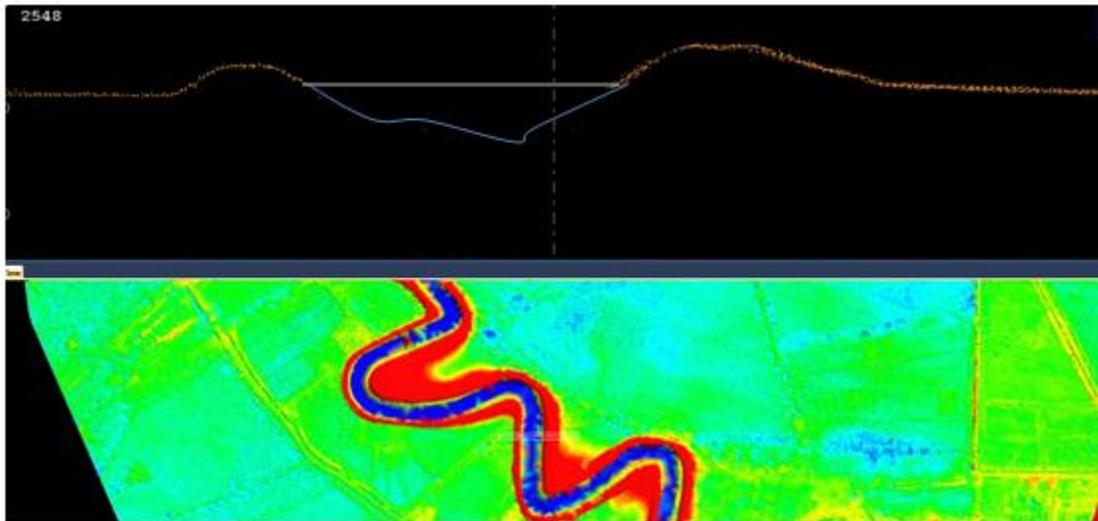
Dado que las nubes de punto LiDAR que describen la superficie presentaban elementos propios de las superficies de terreno como casa, arboles, líneas de alta tensión entre otros, se procedió a realizar un filtrado automático con el fin de asignar niveles de clasificación mínimos a los datos LiDAR con el fin de extraer la información adicional a la superficie que no resultaba de mayor interés, como el caso, de mobiliario urbanos, construcciones, entre otros, para dejar como resultado solo la superficie terrestre, que se integró con la batimetría para la obtención de un modelo continuo.



**Figura 3.1-4 Imagen nube de puntos clasificada**

### **3.1.1.2 *Modelo digital de terreno integrado***

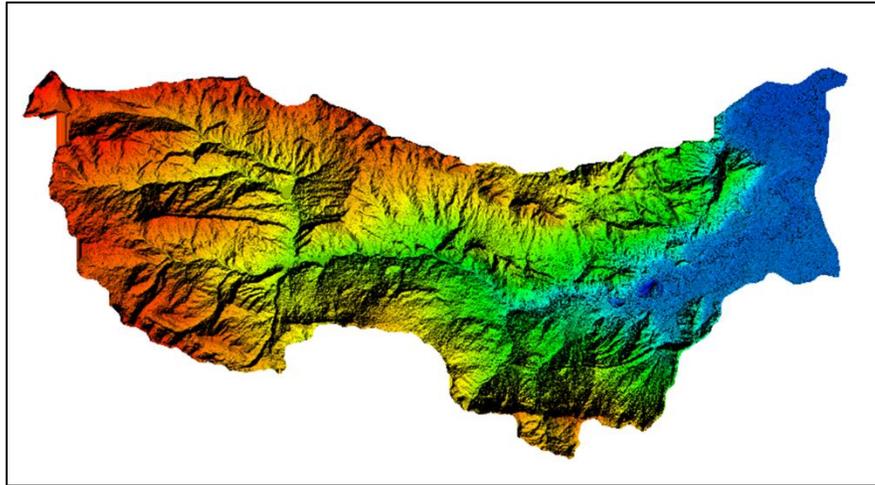
Una vez extraídos los datos de superficie se realizó la integración de la batimetría para la obtención de un modelo continuo que describirá posteriormente la superficie sobre la que se analizará el comportamiento hidráulico de las crecientes sobre el río Tunjuelo



**Figura 3.1-5 Modelo de superficie integrado**

### 3.1.1.3 *Exportación de modelo a formato TIFF*

Dado que HEC-RAS es un programa de funcionamiento principalmente hidráulico, posee restricciones para la lectura de formatos en 3D, por lo tanto se emplea el formato TIFF (Tagged Image File Format), que sirve para asociar a las alturas de la superficie en un formato bidimensional totalmente compatible con el software.



**Figura 3.1-6 Imagen de superficie de terreno en formato TIFF**

### 3.1.2 **Imágenes de sensores remotos**

A continuación, se presentan los procesos fundamentales que se realizaron para obtener una imagen satelital en reflectancia absoluta. Estos procesos constan desde la selección y adquisición de las imágenes que comprenden la zona de estudio hasta los procesos de correcciones atmosféricas y topográficas con diferentes modelos para la obtención de coberturas por clasificación no supervisada que permitieran determinar un  $n$  de Manning para el modelo hidráulico.



**Figura 3.1-7 Proceso para obtención de imagen satelital en reflectancia absoluta**

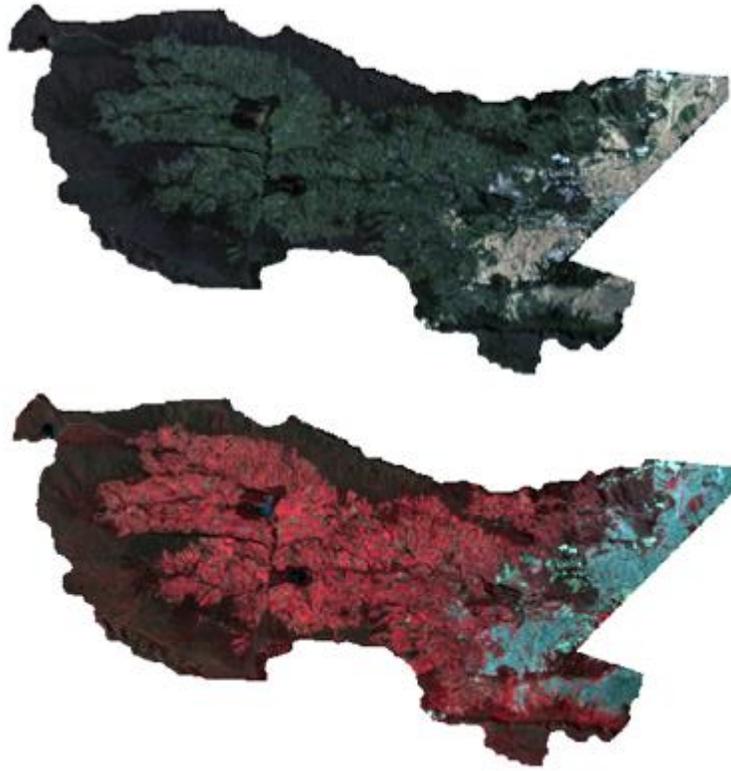
### **3.1.2.1 Pre procesamiento**

A partir de la obtención de las imágenes en formato nativo se hace necesario realizar la construcción de imágenes piramidales para el manejo más ágil de la información y el montaje de un bloque fotogramétrico para la fusión de las diferentes escenas de la imagen que posteriormente conformarán una fotografía única con radiometría espectral escalada a 16 bits.

### **3.1.2.2 Procesamiento**

En las actividades de procesamiento se buscó obtener valores más puros de la reflectancia, realizando correcciones radiométrica y geométrica, que se encuentran asociadas a la corrección de distorsiones que se tiene en las imágenes por la inclinación en la toma del sensor y a las correcciones de valores de información producto de los elementos que se encuentran en la atmosfera, pues este tipo de correcciones permiten realizar una correcta interpretación de coberturas sobre el área de estudio

Una vez realizados los procesos previos se obtiene una imagen satelital como la que se muestra a continuación:

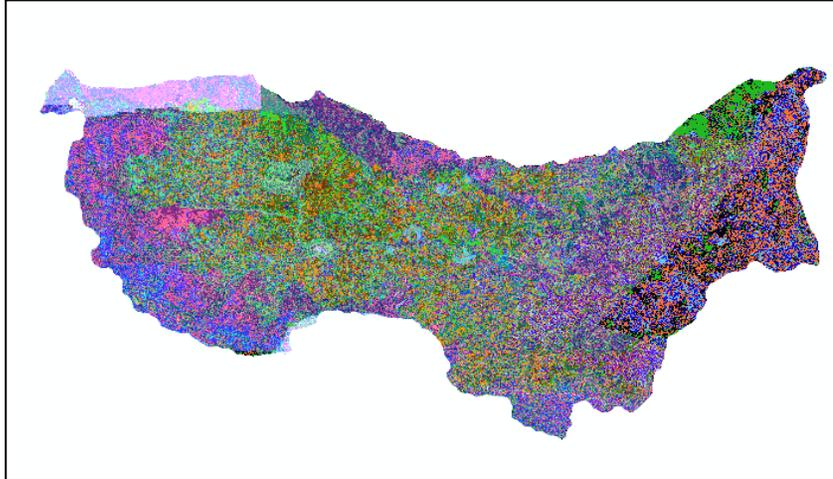


**Figura 3.1-8 Imagen satelital**

Con los procesos realizados sobre la imagen, esta ya es un producto apto para la realización de clasificaciones supervisadas y no supervisadas, así como la obtención de índices y otros elementos que permiten determinar las coberturas presentes en el área y asignar un valor de  $n$  de Manning más detallado al modelo.

### **3.1.2.3 Clasificación no supervisada**

La clasificación no supervisada permite explorar diferentes tipos de atributos o clases por medio del análisis estadístico multivariado, este proceso identifica los valores de cada píxel de una o varias bandas de una imagen ráster, crea y evalúa las clases o clúster (firmas), finalmente reclasifica de acuerdo a las probabilidades de cada clase, presente sobre la información, donde el resultado se le asignaron los respectivos  $n$  de Manning.

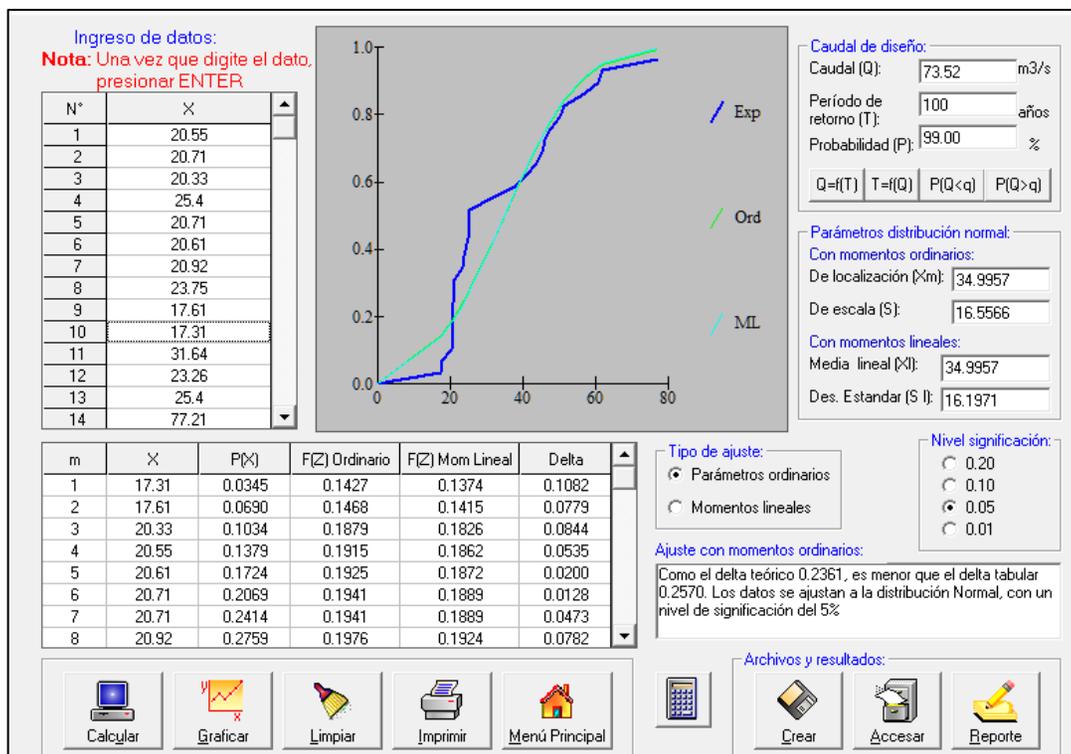


**Figura 3.1-9 Clasificación no supervisada**

### **3.1.3 Análisis de información hidrológica**

Para la obtención del caudal que debía ser introducido en el software empleado para realizar modelo de inundación, fueron utilizados los datos de caudales máximos anuales de la estación Av. Boyacá Río Tunjuelo, propiedad de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, entre los años 1991-2014. Para los cálculos estadísticos se hizo uso del software HidroEsta, el cual a partir de datos de caudal calcula el valor de caudal correspondiente al periodo de retorno deseado, en este caso fue utilizado un periodo de retorno de 100 años como se muestra en la Figura 3.1-10.

El software presenta varias distribuciones para el ajuste de los datos, dentro de las que se encuentra la distribución normal, LogNormal 2 parámetros, LogNormal 3 parámetros, Gamma 2 parámetros, Gamma 3 parámetros, LogPearson tipo III, Gumbel y LogGumbel. Para obtener el valor de caudal, se realizó un ajuste con todas las distribuciones con el fin de determinar con cual se obtenía un menor error y a cual distribución se ajustaban mejor los datos.



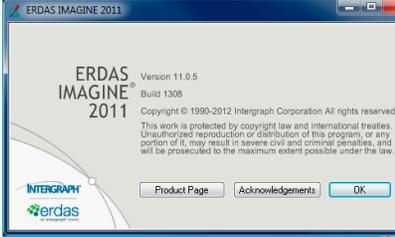
**Figura 3.1-10. Interface HidroEsta cálculo de caudal para un  $tr = 100$  años.**

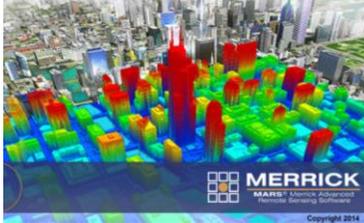
Después de realizar los cálculos estadísticos el programa realiza la prueba de bondad de ajuste con el método de Smirnov-Kolmogorov para ver si los datos de la serie se ajustan a la distribución.

### 3.2 INSTRUMENTOS O HERRAMIENTAS UTILIZADAS

A continuación en la Tabla 3.2-1 se presentan los softwares utilizados para el procesamiento de información geoespacial.

**Tabla 3.2-1. Software utilizado para el procesamiento de información.**

SOFTWARE	DESCRIPCIÓN	INTERFACE
<p><b>Erdas Imagine 201</b></p>	<p>Se empleó para la clasificación de imágenes satelitales en la metodología propuesta y en la no convencional.</p>	
<p><b>ArcGis10.1</b></p>	<p>Se empleó para obtener los mapas finales obtenidos a partir de la clasificación por medio del software Erdas Imagine 2011.</p>	
<p><b>ENVI 4.6</b></p>	<p>El software ENVI se utilizó como complemento del Erdas Imagine para la realización de la clasificación de las imágenes satelitales</p>	

SOFTWARE	DESCRIPCIÓN	INTERFACE
<p><b>Mars LiDAR 8.01</b></p>	<p>Este Software fue empleado para la edición de datos tanto de nubes de puntos LiDAR como datos topográficos por correlación de pixel y levantamientos batimétricos</p>	
<p><b>Hec Ras 5.03</b></p>	<p>Este software se empleó para el procesamiento del análisis hidráulico en 2D</p>	

## 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 CAUDALES

Después de realizar el análisis estadístico con el software HidroEsta, por medio del cual se realizó el ajuste de los datos a todas a las distribuciones disponibles con el fin de identificar el menor error y conocer la distribución que se ajustaba a los datos, se obtuvo como resultado que estos se ajustan a la distribución normal, ya que el delta teórico (0.2361) es menor al delta tabular (0.2570), y el caudal de diseño para un periodo de retorno de 100 años, es **73.52 m<sup>3</sup>/s**.

Cálculos del ajuste Smirnov Kolmogorov:					
m	X	P(X)	F(Z) Ordinario	F(Z) Mom Lineal	Delta
1	17.31	0.0345	0.1427	0.1374	0.1082
2	17.61	0.0690	0.1468	0.1415	0.0779
3	20.33	0.1034	0.1879	0.1826	0.0844
4	20.55	0.1379	0.1915	0.1862	0.0535
5	20.61	0.1724	0.1925	0.1872	0.0200
6	20.71	0.2069	0.1941	0.1889	0.0128
7	20.71	0.2414	0.1941	0.1889	0.0473
8	20.92	0.2759	0.1976	0.1924	0.0782
9	21.02	0.3103	0.1993	0.1941	0.1110
10	23.26	0.3448	0.2392	0.2344	0.1056
11	23.75	0.3793	0.2485	0.2437	0.1308
12	24.48	0.4138	0.2627	0.2581	0.1511
13	25.4	0.4483	0.2811	0.2768	0.1672
14	25.4	0.4828	0.2811	0.2768	0.2017
15	25.4	0.5172	0.2811	0.2768	0.2361
16	31.64	0.5517	0.4197	0.4179	0.1320
17	37.82	0.5862	0.5677	0.5692	0.0185
18	41.09	0.6207	0.6436	0.6466	0.0229
19	43.89	0.6552	0.7044	0.7085	0.0493
20	45.16	0.6897	0.7304	0.7348	0.0407
21	46.17	0.7241	0.7501	0.7549	0.0260
22	47.64	0.7586	0.7775	0.7825	0.0189
23	50.21	0.7931	0.8209	0.8262	0.0278
24	51.53	0.8276	0.8410	0.8463	0.0134
25	57.07	0.8621	0.9088	0.9135	0.0467
26	60.9	0.8966	0.9412	0.9451	0.0446
27	62.09	0.9310	0.9491	0.9528	0.0181
28	77.21	0.9655	0.9946	0.9954	0.0291

Parámetros de la distribución normal:

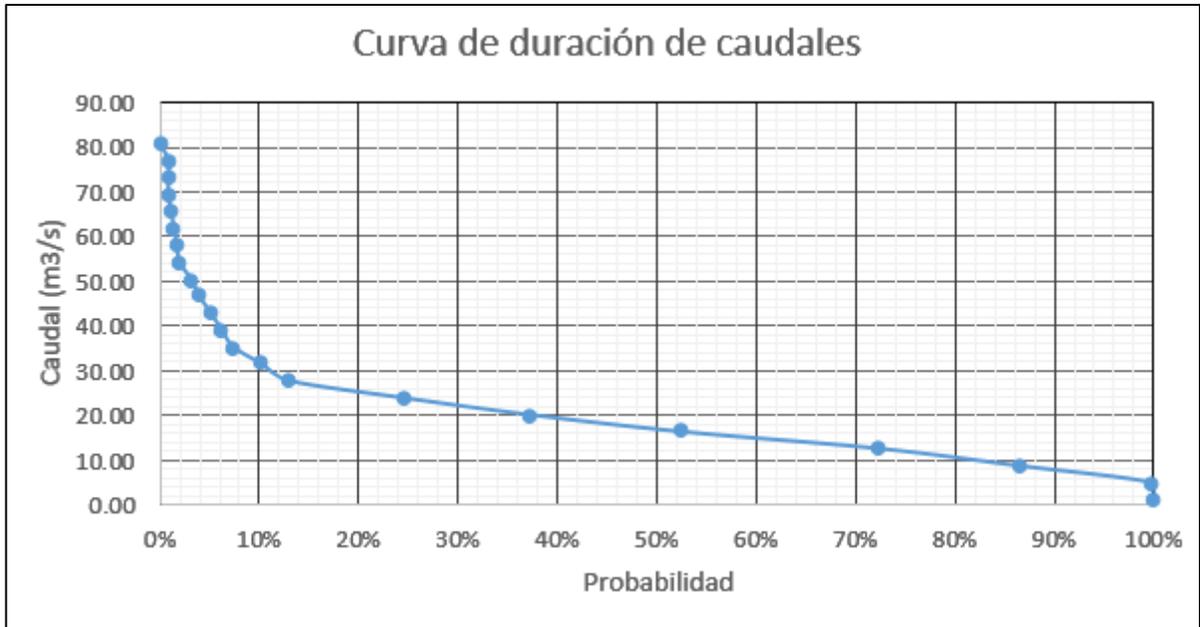
Con momentos ordinarios:

Parámetro de localización (Xm)= 34.9957

Parámetro de escala (S)= 16.5566

**Figura 4.1-1 Resultados obtenidos Hidroesta (Distribución normal)**

Adicionalmente, se realizó el análisis de frecuencias de caudales a través de la curva de duración.



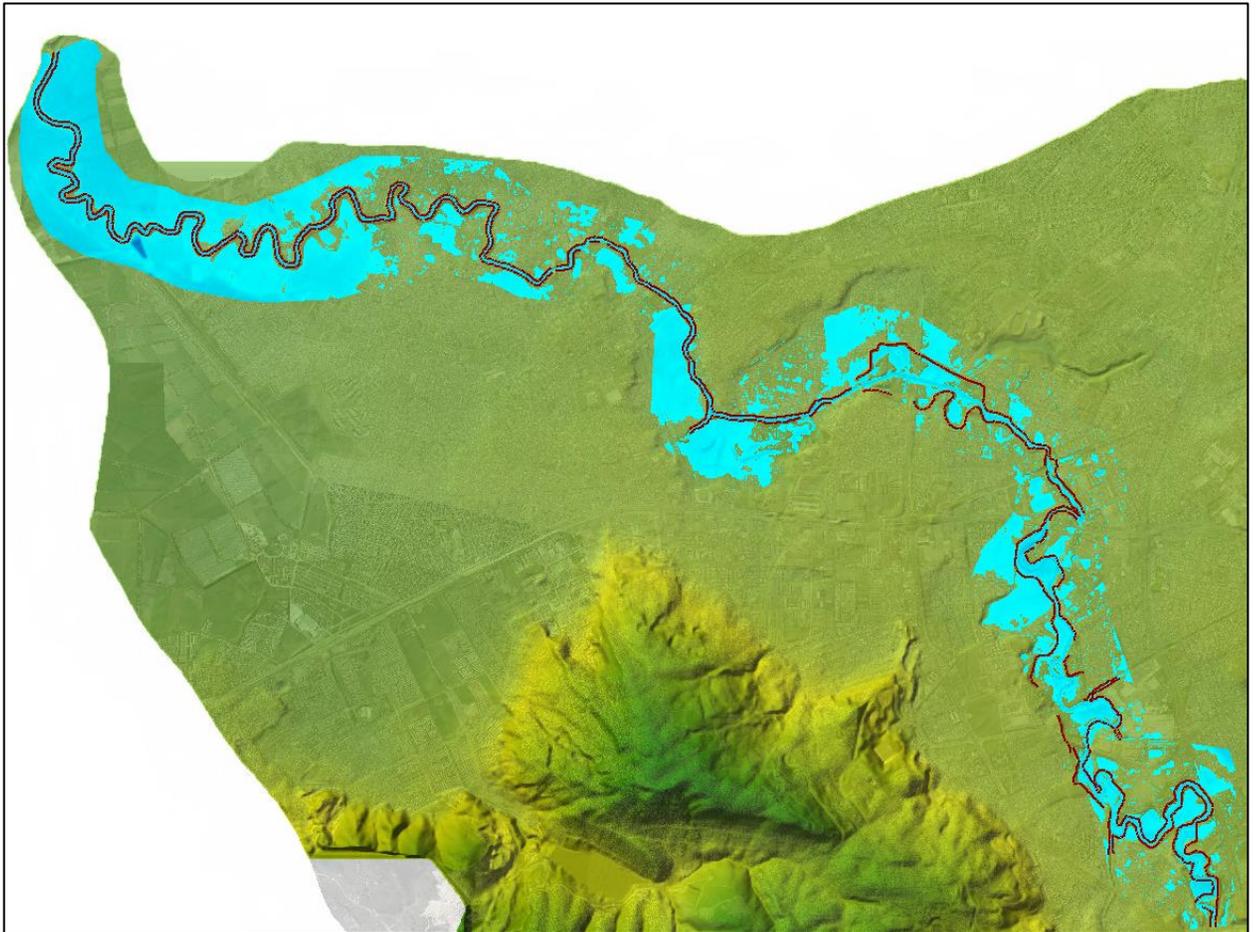
**Figura 4.1-2 Curva de duración de caudales**

La forma indica que los caudales altos se presentan en bajo porcentaje de tiempo, el caudal tiende a permanecer cercano a un valor medio. Lo que es acorde con las características de la cuenca, que se encuentra en su mayor parte en zona de llanura.

A partir de la curva de duración se calculó el  $Q_{1.5}=61.82 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{50}=15.69 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{95}=6.56 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 4.2 MANCHA DE INUNDACIÓN

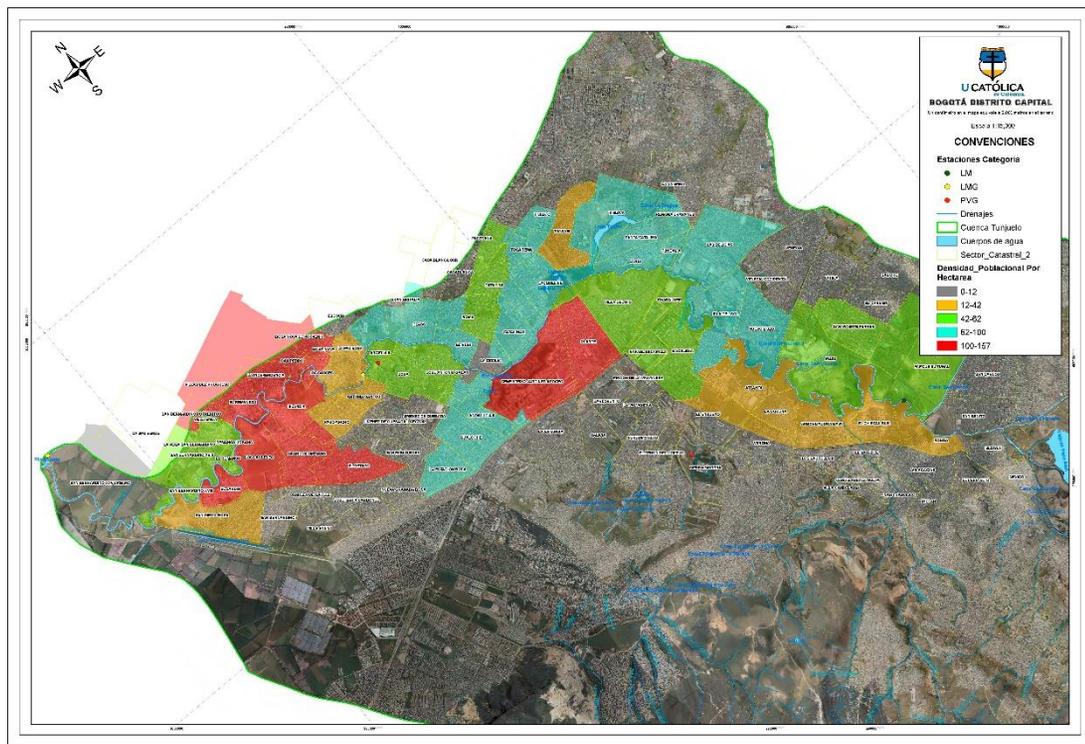
Como se presenta a continuación en la Figura 4.2-1 analizado en el modelo 2D mediante la solución de las ecuaciones de Saint Venant, mediante algoritmos de volumen finitos, se tiene como resultado que para la cuenca baja del río Tunjuelo en el tramo seleccionado, en una simulación de lluvia con periodo de retorno de 100 años, se presentan varios desbordamientos, en especial hacia la parte baja de la cuenca como se muestra a continuación.



**Figura 4.2-1 Mancha de inundación**

### 4.3 Población Afectada

De acuerdo a los estudios de densificación poblacional facilitados por la EAAB – ESP del año 2009, con proyección poblacional hasta el año 2020, se calculó que la población afectada en caso de presentarse una creciente con período de retorno de 100 años sería de 574.862 habitantes aproximadamente. Se ha de tener en cuenta que sectores como Bosa, Galicia y La Estancia presentan altos índices de población lo cual intensifica el riesgo frente a otros sectores como los cercanos al río Tunjuelo, donde las densidades poblacionales son mucho menores, como se aprecia en la Figura 4.3-1 a continuación

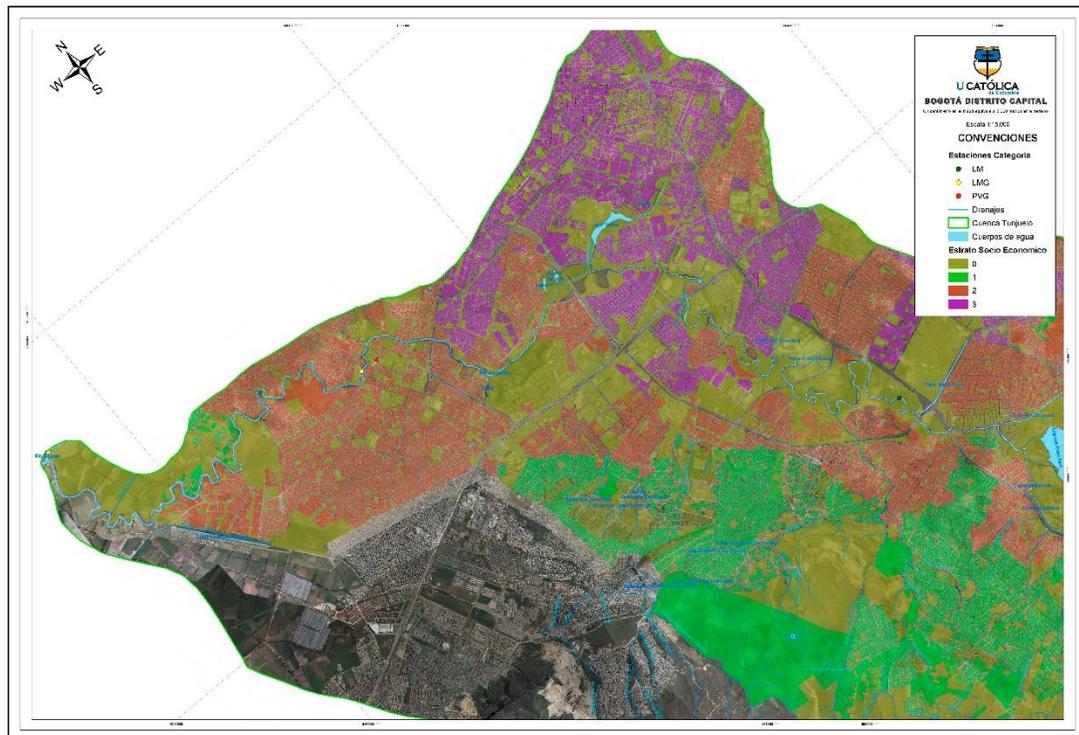


**Figura 4.3-1 Mapa de densidades Poblacionales sobre la cuenca baja del río Tunjuelo**

Por otra parte la vulnerabilidad de las poblaciones asociadas a la estratificación socio económica de la zona se encuentra asociada estratos 1 hasta el 3, con mayor incidencia sobre las laderas del río, lo cual aumenta el riesgo dadas las características sociales y el tipo de

urbanizaciones desarrolladas, cuyas estructuras se encuentran mayormente expuestas y con bajas características de edificación.

A continuación se presenta un mapa con la estratificación socio económico del área en la Figura 4.3-2



**Figura 4.3-2 Mapa de Estratificación socio económica sobre la cuenca baja del río Tunjuelo**

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En razón de la fiabilidad del software HidroEsta y el análisis de los datos de caudales máximos registrados en la estación Av. Boyacá desde donde inicia el tramo seleccionado se pudo determinar el caudal para un periodo de retorno de 100 años, el cual fue introducido dentro del modelo para realizar la mancha de inundación.

El uso de los algoritmos para el procesamiento de la información geoespacial recopilada permitió realizar el análisis de la topografía presente en el tramo seleccionado y la obtención del mapa de la macha de inundación.

La población afectada en caso de presentarse una creciente con período de retorno de 100 años sería de 574.862 habitantes aproximadamente de acuerdo con las proyecciones de población presentadas por la Empres de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Se ha de tener en cuenta que sectores como Bosa, Galicia y La Estancia presentan altos índices de población lo cual intensifica el riesgo frente a otros sectores como los cercanos al río Tunjuelo, donde las densidades poblacionales son mucho menores.

## 6 REFERENCIAS

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2010). *Secretaría de Salud*. Obtenido de <http://www.saludcapital.gov.co/sitios/VigilanciaSaludPublica/Diagnosticos%20Locales/06-TUNJUELITO.pdf>

Alcaldía mayor de Bogotá D.C. (s.f.). *Observatorio Ambiental de Bogotá*. Obtenido de [file:///C:/Users/Asus/Downloads/diagnostico\\_pomca\\_tunjuelo%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Asus/Downloads/diagnostico_pomca_tunjuelo%20(1).pdf)

Alonso, C., Moreno, V., & Rodríguez, E. (1999). *Determinación experimental de la firma espectral de la vegetación*.

Arango, M., Branch, J., & Botero, V. (s.f.). *Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes satelitales de sensores remotos*. Medellín.

El espectador. (s.f.). Razones para salvar un río.

Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2017). Obtenido de [http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/portal!/ut/p/c4/04\\_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3gLw2DfYHMPIwN\\_cyMXA09HV1cLM2MTJ5MgE\\_2CbEdFAO5fkY!/?WCM\\_PORTLET=PC\\_7\\_81SMS7H20072D0IAEE8634B4N0\\_WCM&WCM\\_GLOBA L\\_CONTEXT=/wps/wcm/connect/eaabv6/sacueducto/aambiental/aambs](http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/portal!/ut/p/c4/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3gLw2DfYHMPIwN_cyMXA09HV1cLM2MTJ5MgE_2CbEdFAO5fkY!/?WCM_PORTLET=PC_7_81SMS7H20072D0IAEE8634B4N0_WCM&WCM_GLOBA L_CONTEXT=/wps/wcm/connect/eaabv6/sacueducto/aambiental/aambs)

ERDAS Inc. (1990). *ERDAS Field Guide*.

Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica. (2004). *HidroEsta*. Cartago.

Fundación de asesorías para el sector rural. (s.f.). *Manejo de aguas residuales domésticas del río Tunjuelo*.

Gutiérrez Roa, É. (2008). Tunjuelito sigue inundado. *El Espectador*.

Hoffer. (1982).

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (s.f.). Recuperado el 2017, de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica>

Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (s.f.). Cuenca del río Tunjuelito. *Cartilla de educación en materia ambiental*. Obtenido de <http://biblovirtual.minambiente.gov.co:3000/DOCS/MEMORIA/MAVDT-0019%20V1/MAVDT-0019%20V1.pdf>

Narvaéz Tafur, G. (2007). Asentamientos humanos, agua y territorio. En el proceso de expansión del sur de Bogotá. Universidad Nacional de Colombia.

Ordoñez, A., & Serna, J. (2015). *ANÁLISIS SUPERFICIAL Y MULTITEMPORAL DE IMÁGENES LANDSAT 7 ETM+ Y LANDSAT 8 OLI TIRS EN EL PROYECTO CARBONÍFERO LA LUNA*. Manizales.

Redacción Bogotá. (2014). Se desbordó el río Tunjuelito en el sur de Bogotá. *El Espectador*.

Redacción Bogotá. (2016). Emergencia en Tunjuelito por inundaciones. *El Tiempo*.

Rincón, M. A. (s.f.). Control de inundaciones del Río Tunjuelito. *Revista de topografía AZIMUT*

Sa, I. B., García, R., & Alonso, J. (1999). *Integración de información ambiental mediante teledetección y sistemas de información geográfica para la identificación de procesos de desertificación*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Secretaria Distrital de Ambiente . (2013). *Documento técnico de soporte - Importancia ambiental de la cuenca media y baja del río Tunjuelo y afectación por los polígonos de minería*. Bogotá.

Torres , E., & Velásquez, M. (2009). Análisis hidrológico para el embalse de la Regadera. *Avances - investigación en Ingeniería*.

Umaña, A. (s.f.). *Problemática Socio-ecosistémica de la cuenca del río Tunjuelo*. Bogotá.

Umaña, A. (s.f.). PROBLEMÁTICA SOCIO-ECOSISTÉMICA DE LA CUENCA DEL RÍO TUNJUELO.

US Army Corps of Engineers . (s.f.). Recuperado el 2017, de <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

Villón Bejar, M. (s.f.). HidroEsta, software para cálculos hidrológicos. *Tecnología en marcha*, 18(2), 67-75. Obtenido de <file:///C:/Users/Asus/Downloads/Dialnet-HidroEstaSoftwareParaCalculosHidrologicos-4835599.pdf>