



**PROPUESTA SOSTENIBLE PARA LA MITIGACIÓN DEL RIESGO DE  
INUNDACIÓN EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO COMBEIMA MUNICIPIO DE  
IBAGUÉ, TOLIMA.**

**Juan Sebastian Leal Cárdenas  
Maria Liseth Triana Pulido**

Universidad El Bosque  
Facultad de Ingeniería  
Programa Ingeniería Ambiental  
Bogotá, Colombia 2022

**PROPUESTA SOSTENIBLE PARA LA MITIGACIÓN DEL RIESGO DE  
INUNDACIÓN EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO COMBEIMA MUNICIPIO DE  
IBAGUÉ, TOLIMA.**

**Juan Sebastian Leal Cárdenas  
Maria Liseth Triana Pulido**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero Ambiental**

Director:  
Gonzalo Alberto Forero Buitrago

Línea de Investigación:  
Infraestructura Sustentable

Universidad El Bosque  
Facultad de Ingeniería  
Programa Ingeniería Ambiental  
Bogotá, Colombia

2022



UNIVERSIDAD EL BOSQUE

Por una cultura de la vida, su calidad y su sentido

## SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

ACTA No: 1314

En las instalaciones de la Universidad El Bosque, se desarrolló la sustentación del trabajo de grado titulado **Propuesta sustentable para la mitigación del riesgo de inundación en la cuenca alta del río Combeima, municipio de Ibagué - Tolima**, con código: 2102-006, desarrollado por **María Liseth Triana Pulido** con C.C. 1000219118 y **Juan Sebastián Leal Cardenas**, con C.C. 1000942704, bajo la dirección de **Gonzalo Forero Buitrago**, con C.C. 1020721882, como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental. El trabajo fue evaluado por **Claudia Patricia Gómez Rendon** con C.C. 51768432 y **Isabel Cristina Narváez Jiménez** con C.C.57290516. Al finalizar la deliberación se concluyó que cumple con los criterios de calidad, por lo que se determina que el documento y su sustentación son **Aprobados**.

En constancia, se firma en Bogotá, D.C., el 25 de mayo de 2022.

**KENNETH OCHOA VARGAS**  
Director  
Programa de Ingeniería Ambiental

**CAREL ELIZABETH CARVAJAL ARIAS**  
Líder Comité de Trabajos de Grado  
Programa de Ingeniería Ambiental

## **Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional**

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velara por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

## ***Dedicatoria***

*Este trabajo investigativo está dedicado primeramente a Dios, a nuestros padres y hermanos, quienes por su apoyo incondicional son un pilar fundamental en nuestras vidas, gracias por formarnos con valores y virtudes para desafiar cualquier reto que se nos presente.*

## **Agradecimientos.**

Agradecemos a Dios, a nuestros padres y familiares que hicieron parte de este proceso educativo, apoyándonos con los medios necesarios para culminar con éxitos nuestros estudios.

También queremos demostrar nuestra gratitud a nuestro director de trabajo de grado, el ingeniero Gonzalo Alberto Forero Buitrago, quien con su dedicación estuvo acompañándonos en este desarrollo investigativo, gracias por brindarnos su tiempo, conocimiento y apoyo para culminar el presente proyecto.

A la Universidad El Bosque por formarnos profesionalmente en lo que más nos apasiona, gracias a cada docente que hizo parte de este proceso integral de educación como ingenieros ambientales, por último, agradecer a nuestros compañeros y amigos por las lindas experiencias y el apoyo brindado durante la carrera.

## TABLA DE CONTENIDO

Resumen.....	1
1. Introducción.....	2
2. Planteamiento del problema. ....	3
3. Pregunta de investigación.....	4
4. Justificación.....	4
5. Objetivos.....	5
5.1 Objetivo General. ....	5
5.2 Objetivos Específicos. ....	5
6. Marco de referencia.....	6
6.1 Marco geográfico y descripción del territorio.....	6
6.1.1 Macro localización - Municipio de Ibagué.....	6
6.1.2. Micro localización - Cuenca del Río Combeima.....	6
6.2 Estado del arte.....	7
6.3 Marco teórico. ....	9
6.3.1 Gestión del riesgo de desastres.....	9
6.3.2 Vulnerabilidad. ....	10
6.3.3 Inundaciones.....	12
6.4 Marco conceptual. ....	15
6.5. Marco legal y normativo.....	16
6.6. Marco institucional.....	17
7. Metodología.....	19
7.1 Enfoque.....	19
7.2 Alcance. ....	20
7.3 Método.....	20
7.4 Técnica(s).....	20
7.5 Instrumento(s). ....	20
7.6 Metodología objetivo específico 1. ....	20
7.7 Metodología objetivo específico 2. ....	22
7.8 Metodología objetivo específico 3. ....	23
7.9 Matriz metodológica.....	24

8. Aspectos Éticos.....	26
9. Resultados, análisis y discusión.....	26
9.1 Objetivo Específico 1: .....	26
9.2 Objetivo Específico 2: .....	38
9.3. Objetivo Específico 3: .....	42
9.3.1 Reforestación y siembra de cultivos en Línea Clave (Keyline). .....	44
9.3.2 Embalses - Reservorios de agua. ....	46
10.Conclusiones.....	49
11.Recomendaciones. ....	51
12.Referencias Bibliográficas. ....	51
13.Anexos.....	58

## **LISTADO DE TABLAS**

**Tabla 1.** Autores y documentos representativos.

**Tabla 2.** Clasificación de las inundaciones según su origen.

**Tabla 3.** Clasificación de las inundaciones según su duración.

**Tabla 4.** Leyes y normativas relacionadas con la investigación

**Tabla 5.** Estaciones hidrometeorológicas utilizadas

**Tabla 6.** Matriz metodológica.

## LISTADO DE FIGURAS

- Figura 1.** Ubicación de la cuenca del río Combeima.
- Figura 2.** Componentes constituyentes de la vulnerabilidad.
- Figura 3.** Distribución de lluvias en Colombia. Atlas Climatológico de Colombia.
- Figura 4.** Marco institucional del proyecto.
- Figura 5.** Metodología para el desarrollo del objetivo específico 1.
- Figura 6.** Metodología para el desarrollo del objetivo específico 2.
- Figura 7.** Metodología para el desarrollo del objetivo específico 2.
- Figura 8.** Delimitación de la cuenca del río Combeima en el municipio de Ibagué, Tolima.
- Figura 9.** Grupos texturales IGAC de la cuenca alta del río Combeima.
- Figura 10.** Mapa topográfico de la cuenca del río Combeima.
- Figura 11.** Comportamiento del caudal diario en la estación Montezuma.
- Figura 12.** Comportamiento del caudal mensual en la estación Montezuma.
- Figura 13.** Comportamiento del caudal anual en la estación Montezuma.
- Figura 14.** Precipitación (mm) de las estaciones de muestreo del río Combeima 1996 - 2021.
- Figura 15.** Precipitación (mm) multianual de cada estación analizada en el río Combeima 1996-2021.
- Figura 16.** Comportamiento de la precipitación diaria del río Combeima.
- Figura 17.** Comportamiento de la precipitación diaria mensual del río Combeima.
- Figura 18.** Comportamiento de la precipitación anual del río Combeima.
- Figura 19.** Correlación de los valores de precipitación de las estaciones analizadas en la cuenca del río Combeima.
- Figura 20.** Modelo hidrológico anual de la cuenca del río Combeima en el software WEAP 1996 - 2020.
- Figura 21.** Comportamiento del caudal mensual en la cuenca del río Combeima.
- Figura 22.** Comportamiento de la precipitación anual del río Combeima 1996-2020.
- Figura 23.** Comportamiento de la precipitación mensual del río Combeima 1996-2020.
- Figura 24.** Ubicación de las Soluciones Basadas en la Naturaleza en la cuenca alta del río Combeima.
- Figura 25.** Embalses de almacenamiento de agua y diseño en línea clave para la siembra de frailejones y árboles maderables.
- Figura 26.** Reservorio de agua y diseño en línea clave para siembra de cultivos de arroz.

## **Resumen.**

En las últimas décadas se ha presenciado como distintos fenómenos y amenazas de variabilidad climática han aumentado frecuentemente en el país, pues el incremento de las precipitaciones y la presencia de largas temporadas invernales, producen efectos negativos sobre los sistemas hidrológicos y generan un alto nivel de vulnerabilidad en las poblaciones, esto se debe a que la gran mayoría de la distribución geográfica del país, se encuentra expuesta a inundaciones, por lo que históricamente en Colombia, este fenómeno cuenta con el mayor número de eventos registrados. Así las cosas, la presente investigación tiene como objetivo plantear una propuesta sostenible para el control del riesgo por eventos de inundación a través del desarrollo de una metodología basada en la implementación de Sistemas de Información Geográfica, lenguaje python y WEAP en la cuenca alta del río Combeima, municipio de Ibagué, Tolima. Estas herramientas computacionales permitieron realizar un diagnóstico detallado de la zona de estudio y un procesamiento de datos de las series hidrometeorológicas reportadas por once estaciones del IDEAM, ubicadas en la cuenca alta del río. Así mismo, por medio del desarrollo del modelo hidrológico en WEAP se analizó el comportamiento histórico de la cuenca, lo que permitió determinar que, según las características y particularidades de la zona, la implementación de embalses y el diseño en línea clave para la reforestación con árboles maderables y cultivos de arroz, son las soluciones basadas en la naturaleza más pertinentes para reducir el riesgo de inundación en la cuenca alta del río Combeima. Donde los embalses están diseñados para almacenar aproximadamente 428.660 m<sup>3</sup> de agua y el diseño en línea clave para la reforestación permitirá plantar más de 2.100 especies entre frailejones y arboles maderables.

***Palabras clave:*** Inundación, vulnerabilidad, series hidrometeorológicas, propuesta sostenible.

## **Abstract.**

In recent decades it has been witnessed how different phenomena and threats of climate variability have increased frequently in the country, since the increase in rainfall and the presence of long winter seasons, produce negative effects on hydrological systems and generate a high level of vulnerability. in the populations, this is due to the fact that the great majority of the geographical distribution of the country is exposed to floods, so that historically in Colombia, this phenomenon has the largest number of registered events. Thus, the objective of this research is to propose a sustainable proposal to control the risk of flood events through the development of a methodology based on the implementation of Geographic Information Systems, python language and WEAP in the upper river basin. Combeima, municipality of Ibagué, Tolima. These computational tools allowed a detailed diagnosis of the study area and data processing of the hydrometeorological series reported by eleven IDEAM stations, located in the upper river basin. Likewise, through the development of the hydrological model in WEAP, the historical behavior of the basin was analyzed, which made it possible to determine that, according to the characteristics and particularities of the area, the implementation of reservoirs and the key line design for reforestation with timber trees and rice crops are the most relevant nature-based solutions to reduce flood risk in the upper Combeima river basin. Where the reservoirs are designed to store approximately 428,660 m<sup>3</sup> of water and the key line design for reforestation will allow the planting of more than 2,100 species between “frailejones” and timber trees.

***Keywords:*** Flood, vulnerability, hydrometeorological series, sustainable proposal.

## 1. Introducción.

Los eventos de inundación son propensos a ocurrir en cualquier tipo de ecosistema a nivel global, sin importar si existe o no una intervención del ser humano. Este fenómeno natural constituye un serio y creciente desafío para el desarrollo de las poblaciones, pues el fenómeno genera un alto porcentaje de devastación en cuanto a daños económicos, ambientales y sociales, como pérdidas de vidas humanas. Estos siniestros son causados por un aumento anormal del nivel del mar, fuertes deshielos y las precipitaciones excesivas, que últimamente han aumentado en intensidad y frecuencia, debido al cambio climático (González & Jurado, 2014).

En este sentido, la precipitación es un fenómeno meteorológico muy importante en materia del balance hídrico de una cuenca, esto se debe a que es un fenómeno muy inestable, que debe ser cuantificado de forma constante por estaciones hidrometeorológicas con la finalidad de establecer la cantidad, intensidad y duración de dichas precipitaciones, las cuales se relacionan directamente con el comportamiento del caudal de la cuenca, para así poder predecir eventos intensos que pueden generar procesos de inundaciones y pérdida de suelos (Canchanya, 2013).

Las cuencas hidrográficas cuentan con un papel fundamental en la labor medioambiental y humana, donde estas son utilizadas como suministro de agua en el sector doméstico, industrial o agrícola, regulando el flujo y la calidad del recurso. Además, las cuencas hidrográficas se caracterizan por ser factores influyentes en la gestión del riesgo y en la materialización de fenómenos naturales como las inundaciones, desprendimientos y movimientos en masa (GWP, 2011).

Como caso de estudio se seleccionó la cuenca del río Combeima, la cual se encuentra ubicada en el municipio de Ibagué, departamento del Tolima. Este es uno de los cuerpos hídricos más importantes del departamento, debido a que abastece aproximadamente al 80% de la población del municipio de Ibagué (Rodríguez, 2010). Se caracteriza por presentar escenarios críticos, como la aparición de fenómenos naturales tales como inundaciones, represamientos, deslizamientos y avalanchas, estos eventos se relacionan directamente con el régimen hidroclimatológico, las altas pendientes y los constantes procesos de desequilibrio presentes en esta zona. Estos fenómenos repercuten significativamente en los procesos de degradación de los ecosistemas, articulándose en el incremento de factores de vulnerabilidad de las poblaciones, amenazando su infraestructura física como servicios básicos, malla vial, escuelas, cultivos, viviendas y asentamientos (CONPES, 2009).

Es por esto, que el presente proyecto investigativo pretende realizar una propuesta sostenible que permita mitigar el riesgo de inundación en la cuenca alta del río Combeima, mediante el diagnóstico de la cuenca realizado por el procesamiento de series hidrometeorológicas con lenguaje Python en Google Colaboratory y Sistemas de Información Geográficas como QGIS Desktop, el cual es una tecnología que permite la manipulación y el análisis de los datos geográficos en los estudios medioambientales. Además de esto, se han configurado como herramientas cada vez más útiles para las tareas de planeamiento territorial (Piñero, 2018). De igual manera, el desarrollo del modelo hidrológico de humedad del suelo que simula el proceso lluvia - escorrentía en el software WEAP, nos permitió analizar el comportamiento histórico de la cuenca del río Combeima, con el fin de establecer cuáles soluciones basadas en la naturaleza son las más pertinentes para reducir el riesgo de eventos de inundación.

## 2. Planteamiento del problema.

La problemática principal del presente trabajo investigativo, radica en los altos niveles de vulnerabilidad de las poblaciones, frente a los eventos de inundación presentes en la cuenca alta del río Combeima, municipio de Ibagué, Tolima. Pues es importante resaltar que Colombia es un país que cuenta con una diversidad climática determinada por su ubicación geográfica, al encontrarse en una zona tropical recibe mayores niveles de energía emitidos por el sol. Esto se evidencia en el estado del clima, ya que nuestro territorio se encuentra influenciado por algunos fenómenos que afectan las condiciones de precipitación, dentro de estos se resalta el impacto de las vaguadas del hemisferio norte en latitudes medias, vaguadas tropicales de la troposfera superior, vientos alisios, ciclones tropicales y la presencia de ondas del Caribe oriental (González & Jurado, 2014).

En la última década, el departamento del Tolima ha lidiado con frecuentes eventos naturales, que han producido un cambio en la magnitud del relieve y, así mismo, ha registrado algunos eventos dignos de investigación, como lo son las avalanchas, procesos de deslizamientos y eventos de inundación que se han manifestado en el río Combeima y en las microcuencas que lo conforman, dejando como resultado víctimas mortales, pérdidas millonarias en cultivos, afectaciones significativas a la infraestructura y áreas de producción agrícola (Atencia, 2016).

Según los registros históricos del CONPES, las inundaciones, los deslizamientos de tierra y las avalanchas en el río Combeima han degradado significativamente la infraestructura vial, han causado la muerte de personas y daños a la propiedad en áreas densamente pobladas desde 1959. En relación con lo anterior, se indica que “además de las condiciones de riesgo existentes, el aumento de caudal en la cuenca afectará la infraestructura de abastecimiento de agua potable, principalmente los tanques de almacenamiento y la bocatoma principal del municipio de Ibagué del río Combeima” (CORTOLIMA, 2009, p.15).

De igual manera, el registro del CONPES 3570 (2009) desarrollado por oficina municipal para la prevención y tratamiento de desastres de Ibagué y el medio ambiente, representa el registro de los eventos materializados dentro de los años 1959 a 2008, donde se incluyen más de 21 inundaciones y 100 eventos distribuidos entre deslizamientos y avalanchas. Estos fenómenos dejaron algunas víctimas mortales y pérdidas significativas en cultivos agrícolas. Para el año 1981 el río Combeima sufrió avalanchas y desbordamientos, en donde, se destruyeron dieciocho residencias, ocho de las cuales formaban parte de Chapeton. En 1989, las presencias de estos mismos fenómenos dejaron más de 300 muertos y graves afectaciones a las viviendas del Centro poblado de Juntas y una parte del casco urbano de Ibagué. De igual forma, cerca del año 1991 se registraron desbordamientos y avalanchas, donde tres personas perdieron la vida y 20 viviendas fueron destruidas por completo. Así mismo, entre el periodo de los años 1994 y 1995 se produjeron algunos derrumbes, inviernos prolongados e incluso incendios forestales en zonas densamente pobladas de Tres Esquinas y Janito, registrando informes de evacuación de la zona por la destrucción de tres hectáreas de producción, dos viviendas afectadas y cuatro víctimas mortales (Fandiño, 2018).

En años actuales, la cuenca del río Combeima ha sufrido un constante deterioro ambiental, el cual es acelerado por la presencia de fenómenos torrenciales, avalanchas, movimientos en masa y procesos de degradación por erosión. Pues la frecuente materialización del riesgo de fenómenos naturales ha generado altos niveles de vulnerabilidad en la zona, generando situaciones de emergencia como pérdida

de vidas, daños materiales, pérdidas económicas y desplazamientos de las poblaciones asentada en las riberas del río (CONPES, 2009).

Por esta razón, la cuenca del río Combeima es considerada como una zona de gran susceptibilidad a fenómenos naturales catastróficos, específicamente por fenómenos de remoción en masa y eventos de inundación, esto se debe a las particularidades geológicas y geomorfológicas con las que cuenta el cañón del Combeima. Donde el porcentaje de probabilidad de ocurrencia y materialización de dichos eventos catastróficos aumenta constantemente, lo que hace necesario realizar una evaluación del riesgo frente a los mismos, es por esto que los procesos de identificación, caracterización y el planteamiento de soluciones y propuestas sostenibles, deben ser gestionados con prontitud en las zonas inestables (Atencia, 2016).

### **3. Pregunta de investigación.**

*¿Cuál es la propuesta más adecuada y efectiva para reducir los eventos de inundación en la cuenca alta del río Combeima?*

### **4. Justificación.**

En Colombia uno de los eventos que mayores consecuencias económicas, sociales y ecológicas que ha generado, son los eventos de inundación. Por parte del escenario *económico*, históricamente en los años 2010 y 2011 el golpe del fenómeno de La Niña contrajo consecuencias a 5,2 millones de personas afectadas, aproximadamente un 11,3% de la población del país para ese periodo, en al menos 1.027 municipios de la nación. Estos eventos generaron afectaciones directas a las principales actividades económicas del país, específicamente la agricultura la cual sufrió pérdidas aproximadas de 4.870 millones de USD (Sedano, Carbajal, & Avila, 2013).

De igual forma, es importante recalcar las afectaciones *sociales* que genera este fenómeno natural, pues el 52% de la distribución geográfica del país se encuentra expuesta a inundaciones, donde un 28% de esta población presenta un alto potencial de susceptibilidad, en el lapso de 1970 a 2011 estos eventos representan un 10% de pérdidas de vidas y un 43% de viviendas afectadas (Banco mundial Colombia, 2012). En los periodos de años recientes, el IDEAM en el 2019 determinó que el país cuenta con aproximadamente 190.935 km<sup>2</sup> de áreas que cuentan con condiciones favorables para los eventos de inundación, de acuerdo con lo registrado en la atención de emergencias de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres y el Inventario Histórico Nacional de Desastres, dentro del periodo comprendido del 15 de noviembre 1914 al 31 de diciembre de 2019, en el territorio nacional se han presentado 67.789 eventos de emergencias de los cuales 20.085 corresponden a eventos de inundación, lo que equivale al 30% del total de eventos, convirtiéndose en el fenómeno con mayor número de eventos registrados en Colombia.

A nivel regional, la cuenca alta del río Combeima es una de las zonas del país más susceptible a sufrir este tipo de eventos, debido a sus características geológicas, geomorfológicas y climáticas. Adicionalmente las actividades antrópicas como la deforestación que producen procesos de degradación del suelo, aumentan de manera significativa el riesgo de inundaciones, estas y más causas generan vulnerabilidad en las poblaciones aledañas a la cuenca del río, las cuales ya han sido azotadas por fenómenos naturales de este tipo, contrayendo pérdidas humanas y retrasos en el desarrollo agrícola del

municipio, afectando simultáneamente su economía, por último y no menos importante el impacto *ecológico* de las inundaciones de la cuenca alta del río Combeima, radican en la afectación directa de uno de los servicios ecosistémicos y ambientales más importantes que ofrece la cuenca, como lo es la accesibilidad al recurso hídrico y la disponibilidad del servicio de agua potable para el casco urbano de Ibagué.

De igual manera, la finalidad de este proyecto investigativo se basa en la importancia de implementar propuestas o alternativas que reduzcan el riesgo de eventos de inundación en la cuenca hidrográfica del río Combeima, en el marco del cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) 3 “Salud y bienestar” para garantizar una vida saludable y promover el bienestar de la población, 6 “Agua Limpia y saneamiento” con el fin de garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del recurso y 13 “Acción por el clima” donde se toman medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos en el ambiente.

## **5. Objetivos.**

### **5.1 Objetivo General.**

Plantear una propuesta sostenible para el control del riesgo por eventos de inundación utilizando herramientas computacionales, Sistemas de Información Geográfica, lenguaje Python y WEAP en la cuenca alta del río Combeima, municipio de Ibagué, Tolima.

### **5.2 Objetivos Específicos.**

- Diagnosticar la cuenca del río Combeima por medio de la delimitación en el Sistema de Información Geográfica QGIS y el análisis de series hidrometeorológicas con lenguaje Python en Google Colaboratory.
- Construir un modelo hidrológico a través del software de simulación WEAP con el propósito de analizar el comportamiento histórico de la cuenca del río Combeima.
- Realizar una propuesta sostenible que sea capaz de mitigar los eventos de inundación en la cuenca alta del río Combeima, a través de la información obtenida en el modelo de WEAP y el diagnóstico de la cuenca.

## **6. Marco de referencia.**

En este apartado se muestran la base teórica, conceptual, las regulaciones y/o los lineamientos expuestos por diferentes autores, con el fin de sustentar y respaldar teóricamente nuestro proyecto de investigación.

### **6.1 Marco geográfico y descripción del territorio.**

#### **6.1.1 Macro localización - Municipio de Ibagué**

La macro localización de nuestro proyecto investigativo corresponde al municipio de Ibagué, capital del departamento del Tolima. Esta ciudad es una de las más antiguas de América latina y fue fundada el 14 de octubre de 1550, por el reconocido capitán Andrés López de Galarza, procedente de España. Está situado cerca del Nevado del Tolima a 1285 m.s.n.m de altitud, sobre la Cordillera Central de los Andes, específicamente en la región hidrográfica del río Magdalena, entre las cuencas de los ríos Combeima y Coello. Este municipio se caracteriza por poseer un clima tropical con variedad significativa de lluvias durante todo el año, con precipitaciones promedio de 1976 mm y una temperatura en promedio de 21.1 ° C. Por ser la capital del Tolima, es el epicentro en aspectos políticos, industriales, comerciales, culturales, financieros y turísticos del departamento, y cuenta con la presencia de entidades públicas importantes a nivel nacional como la Asamblea Departamental, la Gobernación del Tolima y la Fiscalía General de la Nación (Álvarez & Ruíz, 2019).

#### **6.1.2. Micro localización - Cuenca del Río Combeima.**

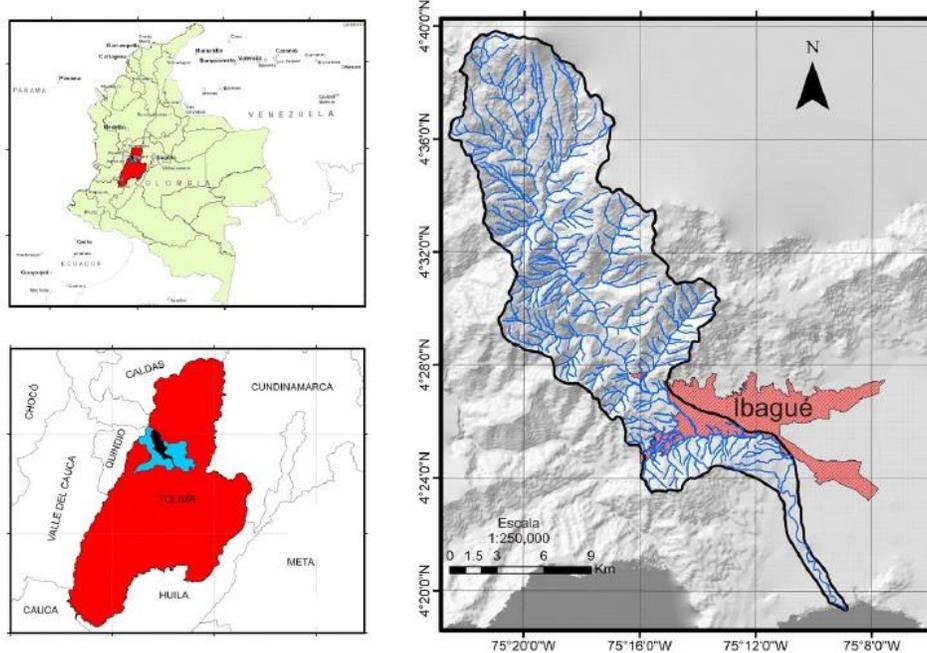
La cuenca hidrográfica del río Combeima, hace parte del municipio de Ibagué y se encuentra en las coordenadas geográficas 75°10'11'' y 75°23'23'', longitud Oeste y 04°19'30'' y 04°39'57'', latitud Norte, entre los 780 y los 5.220 m.s.n.m., en el centro-occidente de Colombia. La cuenca tiene una extensión aproximada de 27.186 ha, con un área de 271 kilómetros cuadrados y una longitud aproximada de 57.7 kilómetros en su cauce principal, desde su nacimiento en el Nevado del Tolima hasta su desembocadura en el río Coello. Además de esto, esta cuenca se convierte en un ecosistema clave para la población, ya que alimenta el acueducto de la ciudad de Ibagué con aproximadamente el 80% de agua (Leal & Ortiz, 2018).

Así mismo, la cuenca hidrográfica muestra elevaciones que parten desde los 700 hasta los 5,200 metros de altitud, 1.800 mm de precipitación media anual, con comportamiento bimodal, y temperatura media anual cercana a los 14 °C (Muñoz et al., 2015; Pérez & Bosque, 2008). Dentro de las divisorias se encuentran seis veredas y, en menor medida, la ciudad de Ibagué con una población de 529.635 habitantes para el 2018 (DANE, 2022). Esta cuenca limita con el municipio de Anzoátegui al norte; con la cuenca del río Coello al occidente; con las cuencas de los ríos La China, Alvarado y Chipalo al oriente; y con las cuencas de los ríos Opia y Coello al sur.

De igual manera, en esta cuenca hidrográfica sobre los 5000 m.s.n.m, se aprecian las nieves perpetuas y su localización en el Nevado del Tolima, el cual tuvo origen en la última glaciación registrada en el territorio colombiano, hace aproximadamente 70.000 años. Estas nieves cuentan con un papel importante dentro del rendimiento hídrico de la cuenca y por su capacidad como sensor de impactos generados por el cambio climático de la zona. Por otra parte, por encima de los 2.200 m.s.n.m, dentro del Parque Nacional Natural de los Nevados (PNNN) se encuentra la parte alta de la cuenca, con un área próxima a

las 3.457 hectáreas, las cuales se encuentran representadas a continuación en la **figura 1**, la cual corresponde a la ubicación general de la cuenca del río Combeima (Pérez & Bosque, 2008).

**Figura 1.** Ubicación de la cuenca del río Combeima.



Nota. La figura representa el marco geográfico donde se desarrolló el proyecto investigativo. Fuente: Leal Villamil, J., Pérez Gómez, U., & Ortiz Lozano, N. E. (2018).

## 6.2 Estado del arte.

Este trabajo de investigación involucra un proceso de revisión bibliográfica con una gran variedad de autores, los documentos realizados por dichos autores nos permitieron obtener parámetros y lineamientos básicos para el desarrollo investigativo y constructivo del presente proyecto. Los criterios implementados para la elección de los artículos y trabajos de grado utilizados como referentes bibliográficos, se basa en la elección de documentos publicados en años recientes, donde la temática principal de dichos documentos nos permita adquirir conocimientos en materia de la gestión del riesgo, los eventos de inundación y la vulnerabilidad de las poblaciones aledañas a la cuenca del río Combeima, como variables y pilares constituyentes del trabajo. De igual manera, es imperativo resaltar la importancia de instrumentos técnicos que posee el municipio de Ibagué, como lo son los documentos correspondientes al Plan de Ordenamiento Territorial del municipio y el Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas - POMCA.

En la **tabla 1** se establecen algunos de los autores más representativos, cuyos respectivos documentos, artículos y trabajos de grado, contribuyeron de forma notoria en la construcción de la propuesta sostenible, para la mitigación del riesgo de inundación en la cuenca alta del río Combeima municipio de Ibagué, Tolima.

**Tabla 1.** Autores y documentos representativos que aportaron en la investigación.

<b>Año de publicación</b>	<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>Aporte a nuestro proyecto de investigación</b>
2020	Corporación Autónoma Regional del Tolima	POMCA Río Coello	El Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas permite comprender la planeación del uso coordinado del suelo, de las aguas, la flora, la fauna, el manejo y la gestión sostenible de la cuenca.
2019	Álvarez Romero, J. A., & Ruíz Bedoya, L. V.	Análisis de la oferta hídrica del río Combeima durante el fenómeno de El Niño 2015-2016.	El presente documento contempla un análisis frente al comportamiento de la oferta hídrica del río Combeima, en vista al constante crecimiento poblacional. Por lo que se realizó un análisis al comportamiento hídrico de la cuenca en épocas de bajas precipitaciones. En este artículo se definieron puntos estratégicos de medición de caudal a lo largo del río Combeima, para realizar aforos durante la ocurrencia del fenómeno natural de “El Niño”, esto nos permitió correlacionar como los fenómenos hidrometeorológicos intervienen en la oferta hídrica de la cuenca del Río Combeima.
2018	López, Sanabria & Vélez.	Determinación de la vulnerabilidad de la infraestructura física frente a inundaciones en la cuenca del Río Combeima.	Este artículo nos da a conocer la vulnerabilidad que presentan las poblaciones aledañas a la cuenca alta del río Combeima por los eventos de inundación que se presentan en la zona. El documento cuenta con información específica que nutre y complementa varios de los aspectos tratados en nuestro trabajo de investigación, dentro de estos se resalta la evaluación de las características físicas de la infraestructura presente y las zonas de inundación a razón del desbordamiento del río Combeima.
2018	Herrera & Carretero	Diagnóstico de los equipamientos de atención de desastres de la zona urbana del municipio de Ibagué, Tolima.	Este documento nos ayudó a establecer cómo se relaciona la intervención antrópica con las amenazas atmosféricas y geológicas del municipio. Debido a que por estos factores se derivan amenazas hidrológicas tales como inundaciones. Lo que permitió conocer el estado de las infraestructuras, el tiempo de respuesta frente a cualquier incidente tanto en la zona urbana como en la zona rural y la relación que maneja frente a otros equipamientos el municipio de Ibagué.
2017	Vera, Jorge & Albarracín, Adriana.	Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenazas	El presente documento de Vera y Albarracín nos permitió adquirir conocimientos en cuanto a la metodología comúnmente aplicada para la gestión de amenazas como inundaciones, remoción en masa y flujos torrenciales, dicha metodología enfocada en el

			de inundación, factor de vulnerabilidad y resalta la importancia de la remoción en gestión del riesgo como componente fundamental para masa y flujos el ordenamiento territorial. torrenciales en cuencas hidrográficas.
2014	Alcaldía de Ibagué.	Plan de Ordenamiento Territorial	El Plan de Ordenamiento Territorial nos permitió analizar de forma integral la planeación física, socioeconómica y medioambiental del municipio de Ibagué.
2014	González Velandía, J. C.	La gestión del riesgo de desastres en las inundaciones de Colombia: una mirada crítica.	Este documento nos permitió entender el funcionamiento de los factores y aspectos que conforman un plan de gestión del riesgo o de contingencia frente a eventos de inundación, estableciendo los principales aspectos que describen las problemáticas que generan las inundaciones en el país y los esfuerzos que el gobierno nacional ha planteado.

Fuente: Autores.

### 6.3 Marco teórico.

A continuación, se muestra la recopilación de investigaciones previas y consideraciones teóricas necesarias para formar diferentes criterios y puntos de vistas que aportaron significativamente a la sustentación y soporte de nuestro trabajo de investigación.

#### 6.3.1 Gestión del riesgo de desastres.

El riesgo es considerado como una condición latente, la cual al no ser tratada, gestionada o mitigada por medio de la intervención antrópica o a través de un cambio significativo en las condiciones físicas y ambientales del entorno, determinando un impacto en los aspectos ecológicos, sociales y económicos. Por esta razón, el nivel del riesgo, se condiciona por medio de la magnitud de los eventos físicos y su respectivo grado o porcentaje de susceptibilidad, exposición y vulnerabilidad. También es importante reconocer que no todo riesgo, puede llegar a considerarse como riesgo de desastre, pues existen diferentes niveles y tipos de riesgo que no cuentan con una magnitud significativa de daños y pérdidas, para que sea reconocido como desastre. Para que un evento sea denominado como desastre, debe cumplir con unos estándares mínimos de daños y pérdidas que sean capaces de obstruir o interrumpir el correcto funcionamiento de la sociedad. Es por esto, que se entiende la presencia de fenómenos peligrosos como particularidades de una dinámica natural que puede ser analizada y por consiguiente debe ser tenida en cuenta para la planificación del desarrollo, por lo que la gestión del riesgo de forma general estaría enfocada en minimizar y mitigar las pérdidas asociadas con la materialización de un fenómeno natural, al mismo tiempo que se incrementan las ganancias en materia de productividad, a través del uso racional y sostenible de los recursos (Narváez, 2009).

La gestión del riesgo de desastres se origina como una medida de la nación, la cual tiene el fin de garantizar la gobernanza del territorio nacional en situaciones de fuertes emergencias, implementando acciones que tengan como propósito brindar un apoyo significativo a las poblaciones y comunidades afectadas por estos eventos catastróficos. Es importante tener en cuenta la notoria evolución de dicha gestión, la cual se basa en procesos sociales orientados a la formulación, seguimiento y evaluación de políticas, y programas para la reducción del riesgo y el manejo de desastres, con el objetivo de contribuir con la seguridad y calidad de vida a los habitantes, por lo que hace algunos años se convirtió en un tema de relevancia para el desarrollo de procesos de planificación de los territorios en el país (González, 2014).

Esta gestión es una construcción social, enfocada en el potencial de pérdidas o daños que se puedan generar en una comunidad o en los ecosistemas que la sustentan, como resultado del condicionamiento mutuo entre los conceptos de amenaza y vulnerabilidad. Es por esto, que uno de los principales objetivos y propósitos de la gestión de riesgo de desastres se centra en la disminución, prevención y mitigación de los niveles de daños (Vera, 2017). Las amenazas de origen geológico, como los eventos sísmicos o erupciones volcánicas, se consideran como invariantes en el tiempo, mientras que los eventos de inundaciones y deslizamientos en gran parte del país van en aumento, esto se debe a la intervención antrópica sobre el territorio y la notoria degradación ambiental. Enfocándonos en las ocurrencias de las afectaciones generadas por los eventos de inundación a razón del fenómeno de la Niña en los años 2010 y 2011, el gobierno nacional vio la necesidad de modificar el enfoque de prevención y atención de las emergencias, por un enfoque de gestión del riesgo de desastres, por lo cual se estipuló la Ley 1523 de 2012 en donde se establecen los procesos de Manejo de desastres, Conocimiento y Reducción del riesgo (González, 2014).

El crecimiento poblacional, produce un incremento en la necesidad de abastecimiento de bienes y recursos, los cuales en muchas ocasiones están localizadas en áreas expuestas a fenómenos hidrometeorológicos, que se traducen en factores determinantes para el aumento del riesgo. En promedio en Colombia, se inicia la construcción de aproximadamente 140 mil viviendas por año de forma formal, esta magnitud solo es capaz de suplir el 60% de la demanda por vivienda, causando el incremento de los asentamientos o urbanizaciones en zonas de alto nivel de riesgo, por lo que se afirma que la gran mayoría de poblaciones afectadas están estrechamente relacionadas con condiciones de pobreza (Narváez, 2009).

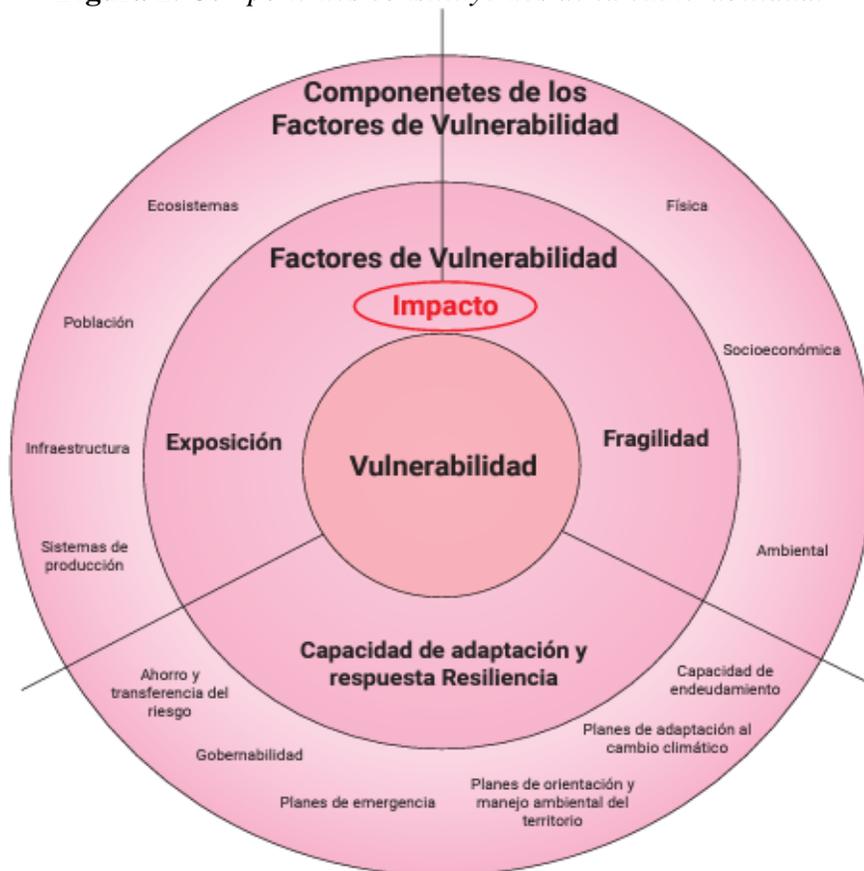
### **6.3.2 Vulnerabilidad.**

El incremento de las actividades humanas a través del tiempo, han generado una aceleración de diferentes agentes naturales y al mismo tiempo, el denominado desarrollo económico produce un aumento en el factor de la vulnerabilidad, esta ha sido definida a través de distintos elementos, como lo son; el riesgo, sensibilidad, elasticidad y susceptibilidad. Esta se encuentra estrechamente relacionada con los tipos de amenaza, siendo estos de origen físico como terremotos, sequías e inundaciones, o de origen antropogénico como accidentes, hambrunas, contaminación, entre otras. Por lo anteriormente expuesto, se puede entender que la vulnerabilidad y la amenaza se ven unidas por un puente o elemento de compatibilidad, siendo este el factor del riesgo (Vera, 2017). Por esta razón se entiende que el factor de riesgo de un elemento, o grupo de elementos expuestos a una amenaza, corresponde a su nivel de susceptibilidad o vulnerabilidad física, económica, política o social. Aspectos que se tienen en cuenta al momento de sufrir efectos adversos por la manifestación de un fenómeno de origen natural o antropogénico (Cardona, 2005).

De igual manera, es importante resaltar que una de las actividades antrópicas más comunes que incrementan la vulnerabilidad de las poblaciones, es la excesiva tala de árboles, pues frente a eventos de excesivas precipitaciones, la lluvia al caer sobre el suelo impactado y descubierto, provocan deslizamientos, inundaciones y avalanchas, dicha actividad se denomina deforestación y en muchas de las ocasiones es más rápida que la recuperación de la naturaleza, contrayendo diferentes impactos negativos sobre la sustentabilidad y sostenibilidad del ambiente. Otra actividad que genera un incremento notorio en la vulnerabilidad, es la urbanización sin planificación, pues construir infraestructura física en lugares de alto riesgo, como lo son las zonas aledañas a un río, genera una alta probabilidad de desborde del cauce del río, provocando una avenida torrencial o una inundación. Por estas razones, también existen acciones que se pueden ejecutar con el objetivo de reducir la vulnerabilidad, estas se articulan a través de la información a las comunidades con el fin de percatar a los habitantes sobre el riesgo por amenazas físicas y las medidas que se tienen que implementar para mitigar y prevenir futuras adversidades (ONU/EIRD, 2004).

La vulnerabilidad cuenta con un carácter específico que depende directamente del tipo de amenazas que influye sobre el ambiente o sistema. Su nivel está determinado por factores como la disponibilidad y fragilidad de los medios de subsistencia, el modelo de desarrollo, el ordenamiento social y territorial, y la capacidad de prevención y respuesta frente a cualquier tipo de evento (Vera, 2017). A continuación, en la **figura 4** encontramos un esquema que nos plasma los factores y correspondientes componentes que constituyen el factor de vulnerabilidad.

**Figura 2.** Componentes constituyentes de la vulnerabilidad.



Nota. La figura demuestra los diferentes factores y componentes que constituyen el concepto de vulnerabilidad. Fuente: Vera Rodríguez & Albarracín Calderón, 2017.

### 6.3.3 Inundaciones.

El proceso de inundación se caracteriza por ser un evento de origen hidrometeorológico causado por la presencia de variables y factores como la precipitación, la marea alta de una tormenta, el oleaje o la falla de alguna estructura hidráulica, como presas o embalses, las cuales son capaces de generar un incremento en el nivel de la superficie del agua de los ríos o el mar, produciendo graves afectaciones en la población, agricultura, ganadería e infraestructura (Dávila, 2016). Este fenómeno común, el cual hace parte del ciclo del agua, ha acompañado al ser humano desde su inicio como civilización, pues desde que el ser humano existe, este tiende a construir sus asentamientos cerca de alguna fuente hídrica, lo que ha generado múltiples amenazas y consecuencias por eventos de inundación a través del tiempo.

La **tabla 2** demuestra el tipo de clasificación de inundación según su origen, mientras que la **tabla 3** corresponde a la clasificación según su duración, como se evidencia a continuación:

**Tabla 2.** *Clasificación de las inundaciones según su origen.*

Clasificación	Descripción
Pluviales	Se generan por consecuencia de las altas precipitaciones, estas se materializan cuando el terreno presenta un alto nivel de saturación y el agua precipitada empieza a acumularse, permaneciendo varias horas o días.
Fluviales	Estas se generan por consecuencia del desborde de los ríos.
Lacustres	Los lacustres son un tipo de inundación que se produce por consecuencia del desborde de lagos.
Glaciares	Se presentan como consecuencia del desprendimiento de bloques de masa glaciar.
Marítimas	Se producen por el ascenso repentino del nivel medio del mar a través de las altas mareas o fenómenos naturales como tsunamis.
Por fallas de infraestructura hidráulica	Estas se producen por fallas en el diseño, instalación o mantenimiento de los sistemas hidráulicos.

Fuente: Autores.

**Tabla 3.** *Clasificación de las inundaciones según su duración.*

<b>Clasificación</b>	<b>Descripción</b>
Dinámicas o rápidas	Por lo general, este tipo de inundación se presenta en ríos o cuerpos de agua con fuertes pendientes. Donde los incrementos en los niveles del río son repentinos, generando mayores afectaciones a las poblaciones, ya que el tiempo de reacción es mínimo.
Estáticas o lentas	Regularmente, las inundaciones estáticas se materializan cuando las precipitaciones son frecuentes y generalizadas, lo que produce un inevitable aumento de los caudales, superando así la capacidad máxima de transporte de agua de los ríos.

Fuente: Autores.

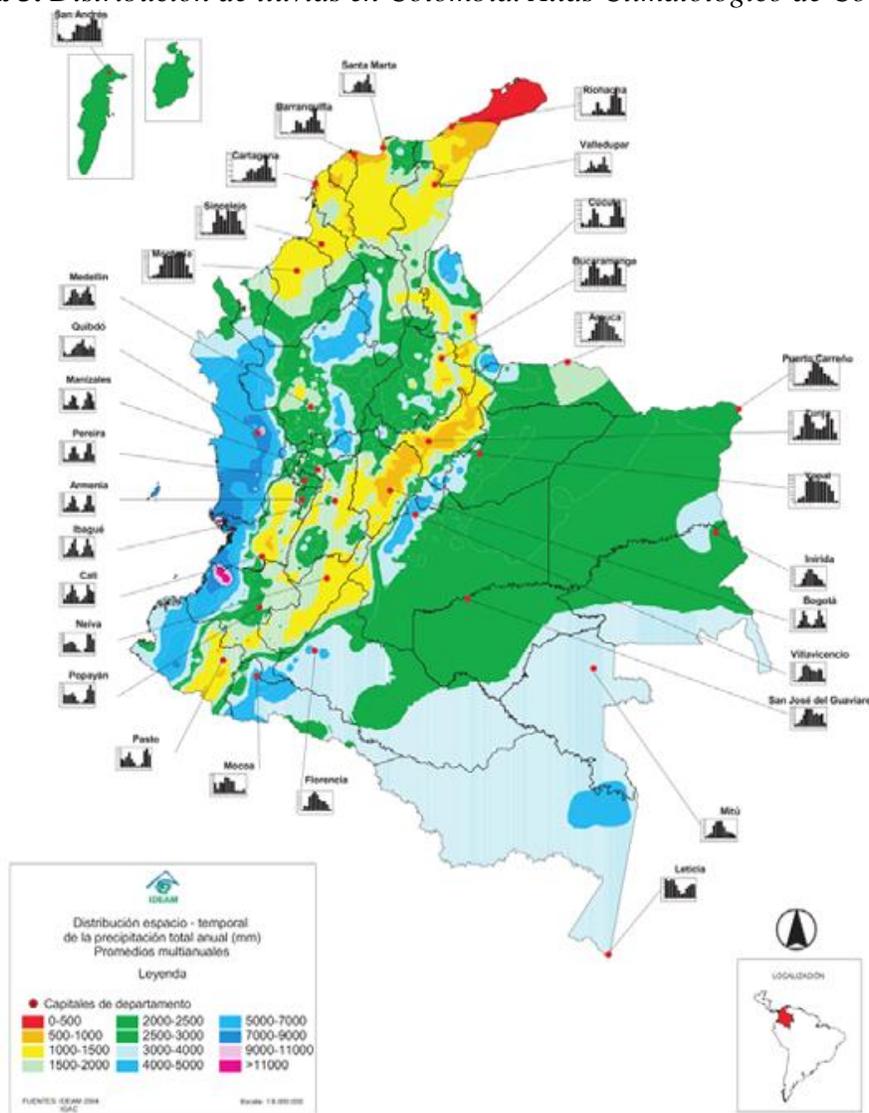
Actualmente algunos factores como la intervención antrópica, el aumento exponencial de la población y el incremento del proceso de urbanización sin planificación, aumenta drásticamente la probabilidad de que un evento de inundación tenga un mayor impacto. De igual forma, la principal causa del aumento de las inundaciones, radica en el cambio climático, pues este ha generado variaciones significativas en los periodos de sequía y de lluvias, produciendo precipitaciones más intensas y duraderas, lo que genera un incremento en el caudal de los ríos, hasta que se supera la capacidad de transporte de estos y provoca una inminente inundación. Por esta y más razones, en un estudio realizado por la Cruz Roja Internacional en el 2018, se obtuvo que en las últimas dos décadas se han registrado más de 1500 inundaciones a nivel mundial, con un incremento del 5% de ocurrencia por década, contrayendo pérdidas significativas a nivel mundial en el ámbito económico. Pues se estima que en la última década se han perdido aproximadamente 364.76 billones de dólares a razón de los desastres naturales. También es importante resaltar que, en este mismo periodo, alrededor de 734000 millones de personas han sido afectadas por eventos de inundación, por lo que este se considera uno de los fenómenos con mayor impacto a nivel mundial (International federation of red cross and red crescent societies, 2018).

En Colombia, las condiciones amenazantes están asociadas con el aumento de la precipitación, la cual es muy común que incremente en periodos de invierno, que, para el caso de gran parte del país, ubicada en el centro y norte del territorio, cuenta con un comportamiento bimodal, con picos en los periodos de Abril-Mayo y Octubre-Noviembre.

En el periodo de los años 2010 y 2011, en Colombia se presencié una de las temporadas más intensas en cuanto a precipitaciones de aguas lluvias, esto a razón de la presencia del reconocido fenómeno de la Niña, en dichos años se presentó un régimen de lluvias y niveles de los ríos, sin precedentes en los registros históricos que posee la institucionalidad del país, por lo que en este periodo el país sufrió un sin número de impactos con referente a eventos de inundación, donde las poblaciones más afectadas fueron las ubicadas en el centro, occidente y norte del país (González, 2014). De igual manera, Colombia cuenta con un vasto número de ciudades y cabeceras municipales que por la notoria necesidad de abastecimiento

del recurso hídrico o por contar con un transporte fluvial, se desarrollan en una ubicación aledaña a cuerpos de agua, los cuales en algún momento puede ser un factor de riesgo por amenaza de inundación.

**Figura 3.** *Distribución de lluvias en Colombia. Atlas Climatológico de Colombia.*



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

El territorio colombiano en épocas de invierno, cuenta con un alto potencial hídrico, donde las precipitaciones son extensas e intensas, por lo que generalmente se presenta un exceso de pluviosidad que produce un alto nivel de riesgo por eventos de inundación, esto se debe a los altos porcentajes de deforestación que sufren las cuencas y el proceso de endurecimiento del suelo, producto del continuo desarrollo urbanístico de los asentamientos urbanos, lo que genera una notoria reducción en los procesos de infiltración por lo que la gran mayoría del agua precipitada en las lluvias, ingresa de forma directa al caudal de los ríos, en donde se supera la capacidad de transporte de la cuenca, generando el desbordamiento de los ríos y posteriores eventos de inundación. Por otra parte, es importante mencionar que las inundaciones no solo deben ser catalogadas como eventos nocivos o negativos, pues estos

procesos se pueden relacionar con la renovación de la humedad de los suelos, recargas de acuíferos, dispersión de la contaminación y transporte de nutrientes a zonas aluviales (González, 2014).

#### **6.4 Marco conceptual.**

En esta sección se detallaron los diferentes conceptos fundamentales para la comprensión y desarrollo del proceso de investigación.

**Alerta Temprana:** Suministro de información oportuna por parte de diferentes instituciones certificadas, que permite a las comunidades expuestas a una amenaza, tomar medidas y acciones pertinentes para evitar, mitigar y reducir el nivel del riesgo por cualquier tipo de eventualidad (ONU/EIRD, 2004).

**Amenaza:** Este concepto se logra definir como el factor de riesgo externo de uno o más elementos expuestos, expresado como el porcentaje de probabilidad de que un evento se materialice con cierta intensidad en un lugar y periodo de tiempo específico (Barrios & Olaya, 2007).

**Lenguaje Python:** Lenguaje de programación multiparadigma de alto nivel y flexible, su diseño radica en la legibilidad del código con el uso de sangría significativa. Además, es de propósito general, esto quiere decir que puede ser utilizado o implementado en cualquier tipo de actividad (Van Rossum, 2007).

**Riesgo:** Hace referencia a la consecuencia de la presencia de una amenaza oculta, ligada a la posibilidad de una fenomenología peligrosa y características societarias que predisponen a la sociedad a sufrir diversos daños o afectaciones (Barrios & Olaya, 2007).

**Plan de Ordenamiento Territorial (POT):** Según la Ley 388 de 1997, es una herramienta necesaria para el desarrollo del proceso de ordenamiento territorial a nivel municipal. Es el conjunto de objetivos, políticas, estrategias y directrices adoptadas para orientar y administrar el uso del suelo y desarrollo físico del territorio.

**Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA):** Según las disposiciones del Decreto 1640 de 2012, se determina que el POMCA es una herramienta implementada para la planificación del uso coordinado del suelo, el agua, la flora y la fauna, y la gestión de cuencas, así como la ejecución de obras y su tratamiento. Además, es una herramienta de planificación que contempla las cuencas hidrográficas como la principal unidad de análisis en un territorio.

**Precipitación:** En meteorología, se usa para referirse a todos los aspectos del agua que cae del cielo en cualquier forma, sea como lluvia, granizo, nieve, entre otras. Es una parte fundamental del ciclo del agua y un punto de entrada clave para las aplicaciones de modelación hidrológica (Zubieta, 2018). Además, es una variable crucial en los procesos relacionados con la investigación del clima, ya que su variabilidad espacial, temporal y la exposición a eventos extremos como sequías e inundaciones puede generar un impacto significativo en las actividades agrícolas y económicas de un municipio. (Ilbay-Yupa & Lavado, 2019).

**Soluciones basadas en la naturaleza:** Según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, estas soluciones se caracterizan por ser acciones que protegen, gestionan y restauran ecosistemas naturales o modificados de manera sostenible, al mismo tiempo que brindan diferentes beneficios para la biodiversidad de una zona y el bienestar humano de las comunidades.

**Susceptibilidad:** Esta hace referencia a la predisposición de que se materialice o suceda una eventualidad riesgosa en una ubicación geográfica específica (Soldano, 2008).

### 6.5. Marco legal y normativo.

El territorio colombiano se caracteriza por ser una zona geográfica susceptible a fenómenos naturales catastróficos, esto genera la necesidad de adoptar o estipular medidas legales que tengan el objetivo de reducir los impactos económicos, sociales y ambientales. Por esta razón, a continuación, se presenta la **tabla 4**, la cual enmarca la estructura normativa que abarca nuestro trabajo.

**Tabla 4.** *Leyes y normativas relacionadas con la investigación.*

<b>Normativa</b>	<b>Artículo con el que se relaciona</b>	<b>Autoridad</b>	<b>Aporte a la investigación</b>
Constitución Política de Colombia 1991	Capítulo 3 (Artículo 79 y Artículo 80)	Congreso de la República	Dispone que todas las personas en el territorio colombiano tienen derecho a gozar de un ambiente sano y se determina que el estado es el responsable de planificar el manejo y respectivo aprovechamiento de los recursos naturales.
Convención de Naciones Unidas para el Cambio Climático 1992	Todos	ONU	Se distingue la existencia y realidad de la problemática del Cambio Climático a nivel mundial.
Ley 99 de 1993	Título I, Título II, Artículos I al IX	Congreso de la República	Se reordena el Sector Público y se da origen al Ministerio del Medio Ambiente y al IDEAM. Así mismo, se dispone que las CAR son las encargadas de realizar el análisis, seguimiento, prevención y control de desastres.
Decreto 2811 de 1997	Título I, Título II y Título VI	Presidente de la República	Por el cual se dicta el Código de recursos naturales renovables y de protección al

			medio ambiente.
Decreto 1076 de 2015	Sección III y sección IV	Presidente de la República	Se expide el Decreto Único Reglamentario del sector Ambiente y se suministra los insumos y herramientas técnicas para la elaboración del POMCA.
CONPES 3700 de 2011	Todos	Departamento Nacional de Planeación (DNP)	Se determina la Estrategia Institucional para el desarrollo de políticas y acciones en materia de cambio climático en el territorio nacional.
Ley 1523 del 2012	Todos	Congreso de la República	Se acoge la política nacional de gestión del riesgo y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres.
Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico de 2010	Todos	Viceministro de Ambiente	Esta establece los diferentes objetivos, metas y estrategias para la gestión y manejo del recurso hídrico en el territorio nacional.

Fuente: Autores.

## 6.6. Marco institucional.

Para el desarrollo de este trabajo investigativo fue necesario la consideración de distintos actores de interés, los cuales dentro de sus objetivos institucionales establecen parámetros o actividades que involucran la zona de estudio, estos son:

### ***Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MINAMBIENTE):***

Está a cargo de la gestión ambiental y de los recursos naturales que son renovables, de igual manera, es responsable de dirigir y gestionar el ordenamiento ambiental en los territorios, también se encarga de definir las políticas y regulaciones relacionadas con los procesos de conservación, protección y recuperación de los recursos naturales del país (Min ambiente, 2021).

### ***Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA):***

CORTOLIMA es un ente corporativo de sector público, esta máxima autoridad ambiental fue creada a través de la ley 99 de 1993, donde establece que es la responsable de administrar el medio ambiente y los recursos naturales renovables de su jurisdicción, así como promover su desarrollo sostenible, de acuerdo con las directrices legales y de política del Ministerio del Medio Ambiente. Esta corporación basa su accionar en los valores etiológicos de su capital humano y colabora con los actores sociales, dando cumplimiento a la normativa legal vigente sobre la adecuada disposición, manejo y aprovechamiento de los recursos naturales y del ambiente (CORTOLIMA, 2020).

### ***Gobernación del Tolima:***

La Gobernación del departamento del Tolima tiene como propósito principal dentro del marco de sus funciones, planificar el desarrollo social y económico del departamento, promover la construcción social y garantizar una efectiva gestión pública. Esto por medio de la estructuración de políticas públicas, el adecuado suministro de información, y el desarrollo de inspección, control y gestión de recursos (Gobernación del Tolima, 2012).

### ***Alcaldía Municipal de Ibagué:***

La Alcaldía Municipal de Ibagué es una Entidad Pública del Orden Territorial, esta autoridad se encarga de garantizar las condiciones de los recursos económicos y humanos que son esenciales para una adecuada prestación de los servicios destinados para el desarrollo social, económico, cultural y ambiental del territorio. Esto se logra por medio del desarrollo de directrices y planes que tienen el objetivo de incentivar el adecuado ejercicio de los derechos humanos, con una administración honesta, transparente y efectiva de los recursos públicos (Alcaldía Municipal Ibagué, 2020).

### ***Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM):***

El IDEAM es una institución de carácter público, que tiene la función principal de brindar apoyo técnico y científico al Sistema Nacional Ambiental, debido a que el instituto genera conocimiento y produce información confiable sobre el estado y el comportamiento de las dinámicas ambientales y de los recursos naturales en el territorio colombiano (IDEAM, 2020).

### ***Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES):***

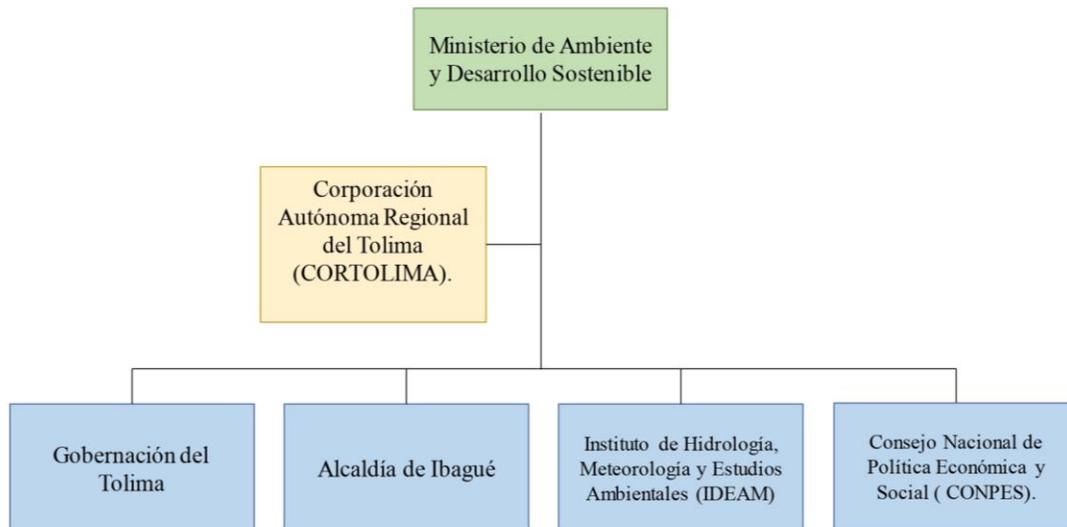
El CONPES está registrado como la máxima autoridad de coordinación de la política económica nacional de planeación y ejerce como el organismo asesor del Gobierno en temáticas que se relacionan con el desarrollo social y económico. Así mismo, es el encargado de establecer los lineamientos de las políticas enfocadas en la solución de las necesidades económicas y sociales del país (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).

Los documentos guías CONPES, se someten a un proceso de consideración por parte del Consejo Nacional de Política Económica y Social junto al Departamento de Planeación Nacional (DPN) el cual es el encargado de coordinar el proceso y las distintas estrategias de mitigación del riesgo en la cuenca del río Combeima, con el propósito de orientar una adecuada acción institucional de las entidades

y autoridades del orden regional, con el fin principal de asegurar el abastecimiento de agua del municipio de Ibagué (López & Vélez, 2018).

En la **Figura 4** se puede observar los actores institucionales que se encuentran involucrados en la ejecución del proyecto, ya sea que posean información relevante o por normas expedidas.

**Figura 4.** *Marco institucional del proyecto.*



Fuente: Autores.

## 7. Metodología.

La metodología propuesta en nuestro trabajo investigativo está dividida en dos secciones definidas. La primera está enfatizada en el enfoque, alcance, método, técnica e instrumento de la investigación y la segunda comprende nuestra matriz metodológica basada en las actividades, técnicas e instrumentos que se utilizaron para cumplir cada objetivo con el fin de obtener los resultados esperados.

### 7.1 Enfoque.

La presente investigación cuenta con un enfoque de carácter mixto, esto debido a que el trabajo cuenta con una parte exclusivamente cualitativa, que se desarrolla con el propósito de describir las diferentes cualidades, características, razones y consecuencias generadas por eventos de inundación, dicho proceso permitirá realizar el diagnóstico y correspondiente análisis del comportamiento de la cuenca alta del río Combeima, por otra parte el aspecto cuantitativo se basa en la manipulación y análisis de datos hidrometeorológicos obtenidos de diferentes estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), las cuales fueron escogidas por su cercana ubicación a la cuenca alta del río, gracias a este proceso se logra determinar el régimen de precipitaciones en el área de estudio, y como dicho régimen interviene en el comportamiento hidrológico del río Combeima (Sampieri, 2014).

## **7.2 Alcance.**

Por otra parte, el proyecto cuenta con un alcance descriptivo, ya que este cuenta con características, factores y componentes de la problemática principal a trabajar. Explicativo, porque trata de manifestar la razón del por qué ocurren y cómo se manifiestan los eventos de inundación en la cuenca alta del río Combeima. Y correlacional, porque trata de estipular de forma concisa la estrecha relación entre algunos aspectos principales como la gestión del riesgo, los eventos de inundación y la vulnerabilidad (Collado, 2014).

## **7.3 Método.**

El trabajo será desarrollado bajo un método inductivo, esto debido a que se tendrá en cuenta la indagación de sucesos individuales, con el fin de obtener un resultado general que exponga la problemática de forma holística (Sampieri, 2014).

## **7.4 Técnica(s).**

La técnica que se utiliza para nuestro proyecto, está basada en la recolección de información a nivel regional, nacional e internacional por medio de distintas bases de datos como lo son Scielo, Proquest, Science Direct, entre otras, junto con palabras claves como inundación, Gestión del Riesgo, vulnerabilidad, etc. Lo cual nos permitió realizar una revisión bibliográfica global de nuestro tema de investigación.

## **7.5 Instrumento(s).**

Los instrumentos utilizados para llevar a cabo nuestro proyecto investigativo se basan en artículos científicos, documentos representativos del municipio, monografías y proyectos investigativos relacionados, herramientas computacionales, Sistemas de Información Geográfica, QGIS, Google Earth, Google Colaboratory, WEAP y bases de datos hidrometeorológicos.

## **7.6 Metodología objetivo específico 1.**

Para llevar a cabo el diagnóstico de la cuenca del río Combeima, inicialmente se definió como área de estudio la cuenca alta del río Combeima, donde por medio del Sistema de Información Geográfica QGIS Desktop, se delimitó el área de la cuenca y sus respectivos drenajes por medio de esta herramienta computacional y el análisis de mapas emitidos por la Alcaldía del municipio de Ibagué, en el Plan de Ordenamiento Territorial, se fue posible representar y analizar, las características de los tipos texturales de suelo y los aspectos topográficos de la parte alta del cañón del Combeima, estableciendo de esta manera, las posibles zonas para la implementación de las soluciones basadas en la naturaleza.

Posteriormente, se implementó el Sistema de Información de datos Hidrológicos y Meteorológicos - DHIME, donde se seleccionaron las diferentes estaciones hidrometeorológicas ubicadas en zonas

aledañas a la cuenca principal del río, para esto se utilizó el Catálogo Nacional de Estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, y se determinó trabajar con los datos reportados desde el año 1996 al 2021, de 11 estaciones del Área Operativa 10 del IDEAM, donde 10 son estaciones meteorológicas y una hidrológica, estas estaciones se detallan a continuación:

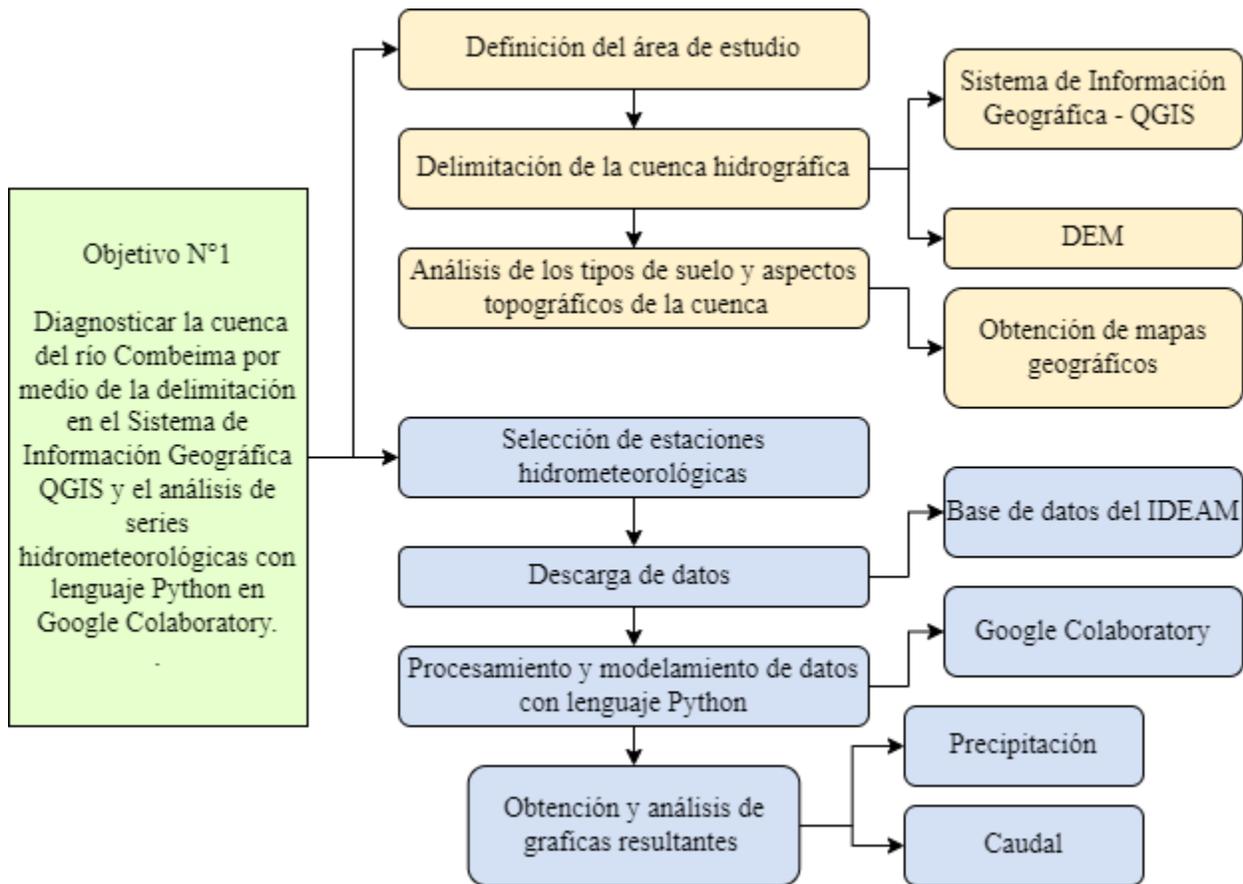
**Tabla 5.** Estaciones hidrometeorológicas utilizadas.

<b>Nombre de la estación</b>	<b>Código</b>	<b>Categoría</b>
CRUZ ROJA	21210230	Pluviométrica (Convencional)
INTERLAKEN	21210240	Pluviométrica (Convencional)
PERALES HATO OPIA	21245010	Climática Ordinaria (Convencional)
PASTALES	21210030	Pluviográfica (Convencional)
EL SILENCIO	21210260	Pluviográfica (Convencional)
LAS JUNTAS	21210020	Pluviográfica (Convencional)
EL PALMAR	21210220	Pluviográfica (Convencional)
EL PLACER	21210110	Pluviográfica (Convencional)
EL SECRETO	21210080	Pluviográfica (Convencional)
LA ESMERALDA	21210120	Pluviográfica (Convencional)
MONTEZUMA	21217180	Limnigráfica (Convencional)

Fuente: Autores.

Para el procesamiento de las series hidrológicas, fue necesaria la implementación de la herramienta computacional Google Colaboratory, la cual permite ejecutar scripts de Python a través de los servidores de Google, con la aplicación de códigos computacionales se procedió a modelar los diferentes datos hidrometeorológicos reportados por las estaciones. Lo que permitió la obtención de resultados gráficos que fueron utilizados con el propósito de analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca alta del río Combeima en materia de variables como precipitación y caudal.

**Figura 5. Metodología para el desarrollo del objetivo específico 1.**

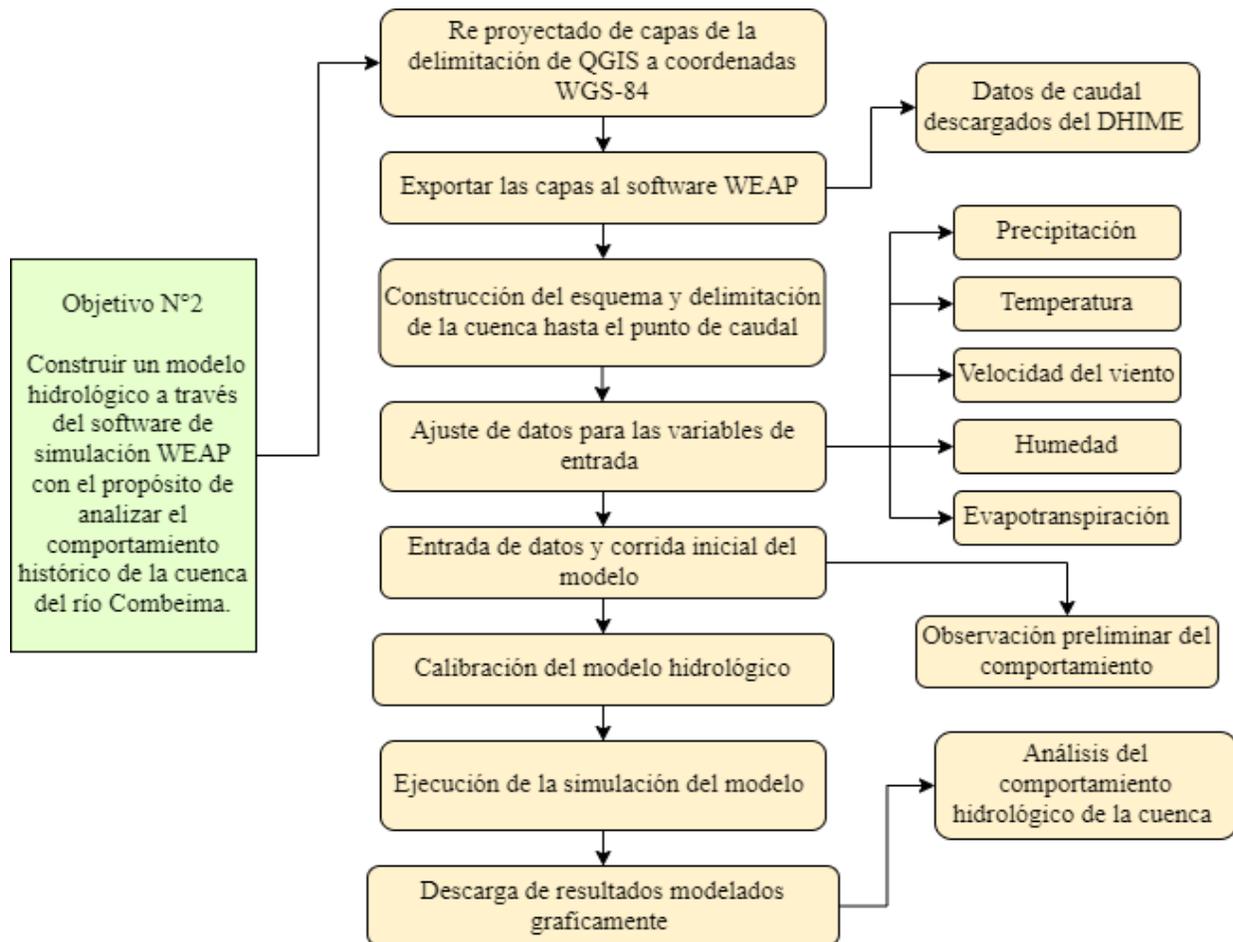


Fuente: Autores.

### 7.7 Metodología objetivo específico 2.

Para el desarrollo de este objetivo, inicialmente se ajustaron en el programa Excel, los datos de entrada para cada subcuenca, las variables utilizadas corresponden a las de precipitación, temperatura, velocidad del viento, humedad y evapotranspiración. Luego de ajustados los datos, se ingresó al software WEAP para simular el modelo hidrológico de dos tanques que permitió analizar históricamente las variables hidrometeorológicas y otros factores del recurso hídrico, así mismo, gracias a la aplicación de esta herramienta se logró emplear objetos y procedimientos a través de una interfaz gráfica que fue implementada para analizar distintos temas e incertidumbres relacionados al comportamiento climático y las condiciones de la cuenca alta del río Combeima.

**Figura 6.** Metodología para el desarrollo del objetivo específico 2.

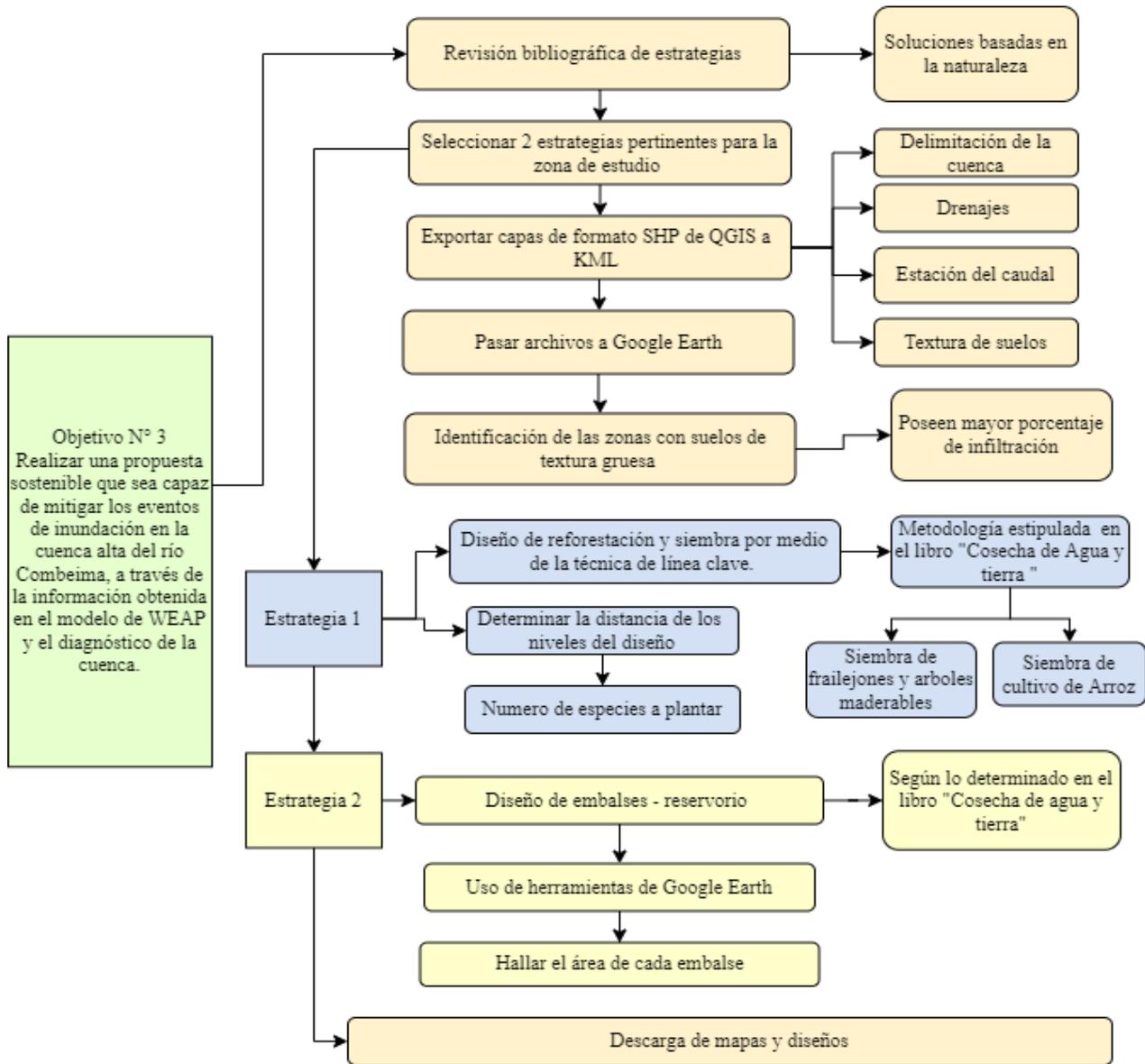


Fuente: Autores.

### 7.8 Metodología objetivo específico 3.

Luego de obtener el diagnóstico y comportamiento de la cuenca del río Combeima a través de las diferentes gráficas resultantes del modelamiento de datos en Google Colaboratory y el modelo hidrológico obtenido en software WEAP, se procedió a realizar una revisión documental minuciosa con el propósito de verificar cuáles soluciones basadas en la naturaleza, eran las más pertinentes para implementar de acuerdo a las características y particularidades de la zona de estudio. Una vez elegidas las estrategias, con ayuda del Sistema de Información Geográfica Google Earth, se desarrolló el diseño de la propuesta sostenible a implementar en la cuenca hidrográfica, donde se fue posible visualizar la cartografía de la zona, por medio de imágenes satelitales y terrenos en 3D.

**Figura 7. Metodología para el desarrollo del objetivo específico 3.**



Fuente: Autores.

### 7.9 Matriz metodológica.

En la **tabla 5**, se logra apreciar la metodología propuesta que se tuvo en cuenta para el desarrollo de nuestro trabajo investigativo, la cual está clasificada en 5 variables correlacionadas con el fin de obtener resultados efectivos.

Esta matriz parte por el objetivo general, seguido de este se desglosan nuestros tres objetivos específicos planteados inicialmente en el proyecto, a partir de estos se toman las actividades necesarias para el logro de nuestras tres metas, seguido van las técnicas que se tienen en cuenta para demostrar la manera en que

se realiza dicha actividad y por último, el instrumento el cual hace referencia a los insumos necesarios para cumplir lo anteriormente mencionado.

**Tabla 6. Matriz metodológica.**

<b>Enfoque</b>	Mixto (Sampieri, 2014).			
<b>Alcance</b>	Descriptivo, Correlacional y Explicativo (Collado, 2014).			
<b>Método</b>	Inductivo (Sampieri, 2014).			
<b>Objetivo General</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>Actividades</b>	<b>Técnica(s)</b>	<b>Instrumento(s)</b>
Plantear una propuesta sostenible para el control del riesgo por eventos de inundación utilizando herramientas computacionales, Sistemas de Información Geográfica, lenguaje Python y WEAP en la cuenca alta del río Combeima, municipio de Ibagué, Tolima.		Identificación de la problemática a trabajar.	Revisión y gestión documental.	Artículos científicos, noticias y documentos del municipio Ibagué.
	Diagnosticar la cuenca del río Combeima de la delimitación en el Sistema de Información Geográfica QGIS y el análisis de series hidrometeorológicas con lenguaje Python en Google Colaboratory.	Determinar la ubicación de estaciones hidrometeorológicas aledañas a la cuenca.	Identificación.	Plataforma DHIME del IDEAM y catálogo nacional de estaciones.
		Recopilación de información hidrometeorológica.	Recuperación de datos.	Plataforma DHIME del IDEAM y artículos científicos.
		Delimitación de la cuenca alta del río Combeima.	Diseño computacional	Sistemas de Información Geográficas - QGIS Desktop.
		Determinar los grupos texturales de suelos y las características topográficas de la cuenca.	Análisis documental y diseño computacional.	Sistemas de Información Geográfica - QGIS Desktop.
		Procesamiento de datos hidrometeorológicos.	Análisis de datos.	Herramientas computacionales - Google Colaboratory.

Construir un modelo hidrológico a través del software de simulación WEAP con el propósito de analizar el comportamiento histórico de la cuenca del río Combeima.	Procesamiento de variables de entrada al software WEAP.	Ajuste de datos cuantitativos.	Herramientas computacionales - Excel.
	Desarrollo del modelo hidrológico.	Diseño del modelo.	Herramientas computacionales - Software WEAP.
	Calibración del modelo hidrológico.	Comparación de datos.	Herramientas computacionales - Software WEAP.
	Revisión de las gráficas del comportamiento de la cuenca.	Análisis de datos.	Artículos científicos y software WEAP.
Realizar una propuesta sostenible que sea capaz de mitigar los eventos de inundación en la cuenca alta del río Combeima, a través de la información obtenida en el modelo de WEAP y el diagnóstico de la cuenca.	Revisión bibliográfica de soluciones basadas en la naturaleza.	Análisis documental.	Artículos científicos, revistas y trabajos de grado.
	Delimitación de las zonas viables para la implementación de la propuesta.	Identificación y análisis documental.	Sistemas de Información Geográfica - Google Earth.
	Desarrollo del mapa con las estrategias para el Municipio.	Diseño computacional	Sistemas de Información Geográfica - Google Earth.

Fuente: Autores.

## 8. Aspectos Éticos.

El presente trabajo investigativo se realizó por medio del análisis bibliográfico y procesamiento de datos hidrometeorológicos cuantitativos en diferentes herramientas computacionales. Ningún procedimiento desarrollado en la investigación implicó el manejo de talento humano o personal, por lo que no existe ningún tipo de aspecto ético que deba ser tenido en cuenta.

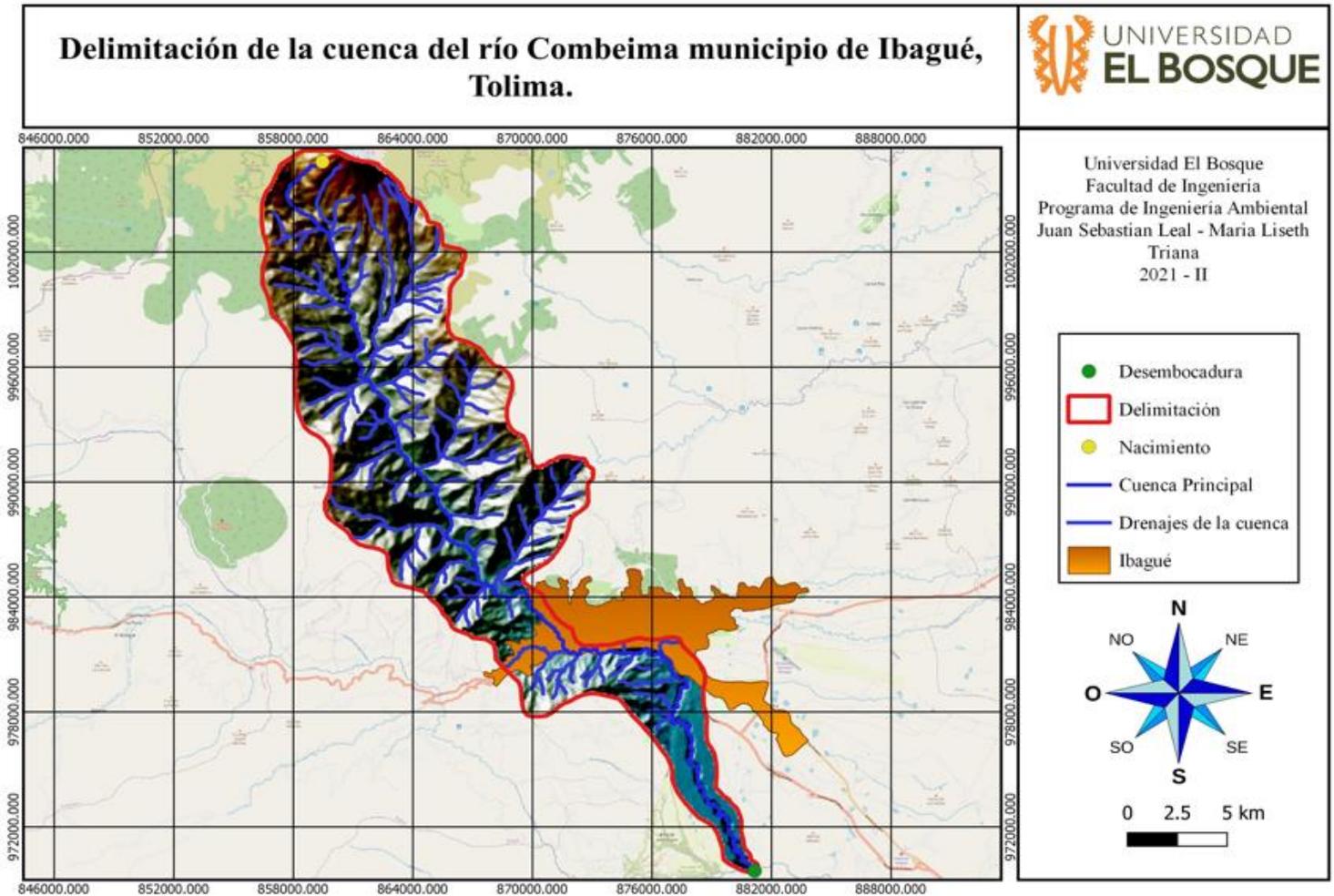
## 9. Resultados, análisis y discusión.

### 9.1 Objetivo Específico 1:

*Diagnosticar la cuenca del río Combeima por medio de la delimitación en el Sistema de Información Geográfica QGIS y el análisis de series hidrometeorológicas con lenguaje python en Google Colaboratory.*

Para llevar a cabo el diagnóstico de la cuenca del río Combeima, se utilizó una herramienta de Sistemas de Información Geográfica, conocida como QGIS Desktop, donde se obtuvo como resultado las **figuras 8, 9 y 10**, las cuales representan mapas geográficos de la cuenca en materia de características y variables como puntos geográficos fundamentales, topografía, drenajes, grupos texturales y uso del suelo, entre otros. Estos mapas de la superficie terrestre del área de interés, implementan el sistema geodésico de coordenadas geográficas (WGS 84) el cual permite localizar cualquier punto de la tierra sin necesidad de otro como referencia, asimismo los mapas correspondientes a la **figura 8 y 10** utilizan un modelo digital de alta resolución del terreno ALOS PALSAR en modo FBS (Fine Beam Single Polarisation) permitiendo observar el suelo en una resolución de 12,5 metros por píxel, sin la interrupción de nubes y con ángulos de incidencia entre los 20 y 55 grados.

**Figura 8.** Delimitación de la cuenca del río Combeima en Ibagué, Tolima.



Fuente: Autores.

Gracias a esto, en la **figura 8** se evidencia de forma clara y precisa determinados puntos geográficos como el nacimiento del río Combeima en el costado oriental de la cordillera central, exactamente en el Nevado del Tolima, la desembocadura del cuerpo hídrico en el río Coello, río que posteriormente desemboca en el río Magdalena y de igual forma se representa claramente la cuenca principal del río, sus afluentes y drenajes. Asimismo, dentro de la delimitación se es fácil de identificar como la cuenca del río Combeima transcurre dentro de los límites urbanos de Ibagué, lo que se traduce en un riesgo existente

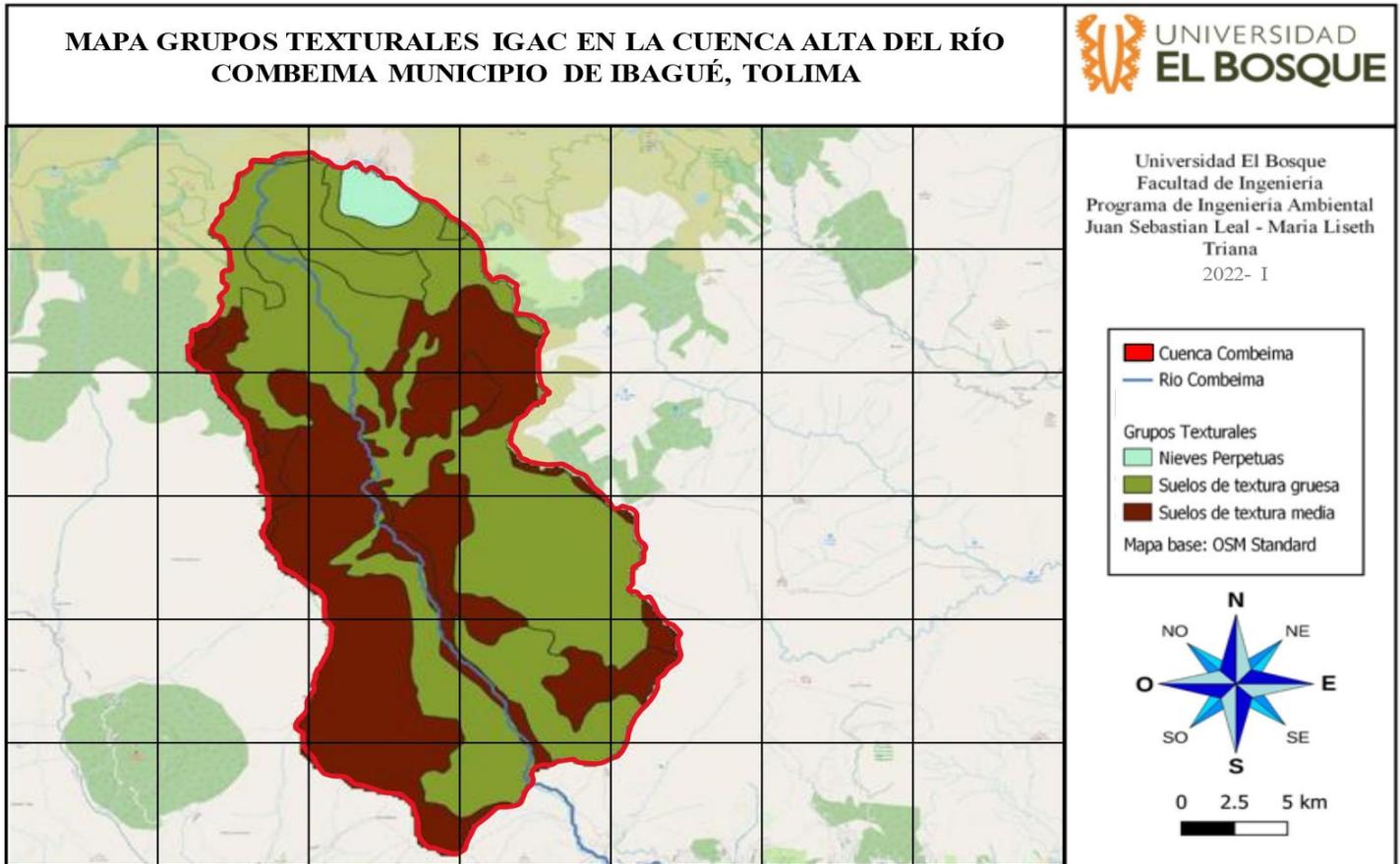
por eventos de inundación tanto en la cuenca alta del cañón del Combeima, como en el casco urbano del municipio.

Según Ortega (2018), las alteraciones de la cobertura de suelo generan un porcentaje de disminución de los aportes hídricos, esto se evidencia en la pérdida de capacidad de infiltración y recarga de acuíferos, ocasionando efectos adversos en las cuencas hidrográficas. Adicionalmente, la estructura del suelo se encuentra deteriorada por las diferentes actividades humanas presentes en la zona, esto genera procesos de degradación como la erosión, la cual incide directamente en la calidad de las aguas de la cuenca. Por otra parte, el autor Andrade (2018) expone que los suelos presentes en la cuenca se caracterizan por ser superficiales, ácidos, carecen de materia orgánica y cuentan con texturas medianas.

Las clases texturales del suelo como se observa en la **figura 9** determinan la velocidad en el que el agua pueda drenarse por el suelo saturado, estas clases dependen de la cantidad de Arena, Limo y Arcilla que posee el mismo. En el mapa expuesto a continuación se puede observar que la cuenca posee gran parte de suelo arenoso conocido como suelos de textura gruesa, los cuales tiene una mayor capacidad de infiltración del agua, mientras que los suelos arcillosos conocidos como suelos de textura fina, tienen mayor capacidad de retención de agua y aireación en comparación con el arenoso.

Esto se debe a la porosidad del suelo, la cual se representa por el porcentaje de espacios vacíos o poros presentes en el mismo y depende de la textura, la estructura y la actividad biológica. Por lo que entre más gruesos son los elementos de la textura, mayores son los huecos entre ellos, por lo que el agua se infiltra con mayor facilidad (González, 2012).

**Figura 9.** Grupos texturales IGAC de la cuenca alta del río Combeima municipio de Ibagué, Tolima.



Fuente: Autores.

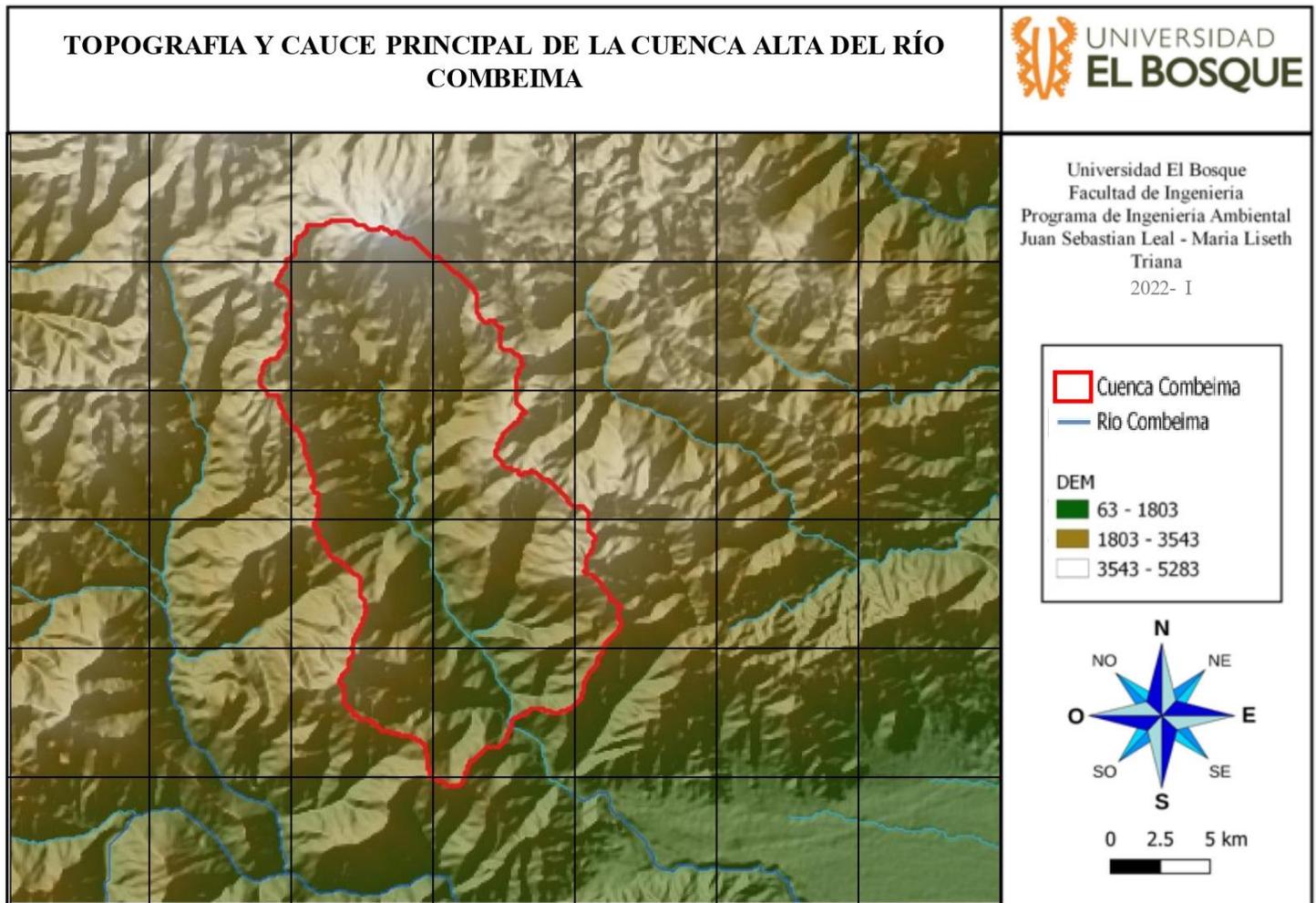
Así mismo, según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2004) y lo mencionado por Cuevas & Santa (2019), en la cuenca hidrográfica del río Combeima predominan los suelos de la unidad MGB (Grupo indiferenciado de Lithic troporthents con un 60%, Lithic hapludands con 20% y Lithic tropofolists con 20%), los cuales se encuentran localizados en relieve escarpado, en paisaje de montaña, entre los 3,200 y 3,700 m de altitud. La unidad cartográfica presenta pendientes largas y rectas, además, presenta tipos de erosión hídrica ligera en algunas zonas. Es importante señalar que los materiales geológicos dominantes son las andesitas y las tonalitas recubiertas de cenizas volcánicas, esta zona forma parte del bosque pluvial montano, y que su vegetación nativa se caracteriza por ser herbácea y arbórea en algunas áreas.

Por otra parte, existe una extensión de suelos de la unidad MKB (Consociación Alic hapludands con un 70 % e Hydric hapludands con 30%), la cual está distribuida entre los 2.000 a 3.000 m de altitud, con relieve de filas, vigas y laderas fuertemente quebradas y escarpadas con pendientes mayores de 50%. Esta unidad es predominante dentro de los perímetros que cuentan con un clima frío húmedo y una temperatura promedio entre los 12 y 18 °C. Existe erosión ligera ocasionada por el sobrepastoreo y se observa fenómenos como reptación, escurrimiento difuso y deslizamientos. En cuanto a su vegetación

esta ha sido deteriorada en gran parte y el uso del suelo de la zona está destinado a la ganadería extensiva y a la agricultura.

De acuerdo a los autores Cuevas & Santa (2019), mencionan que en la cuenca se encuentra la unidad MQC, la cual está conformada por Typic humitropepts con un 40% y Typic troprothents con 40%, con presencia de Typic eutropept en un 20%, los cuales se encuentran principalmente en la parte media de la cuenca por debajo de los 2.000 m de altitud. Estos suelos se encuentran deteriorados por erosión ligera y predominan en áreas de relieve quebrado y escarpado.

**Figura 10.** Mapa topográfico de la cuenca del río Combeima



Fuente: Autores.

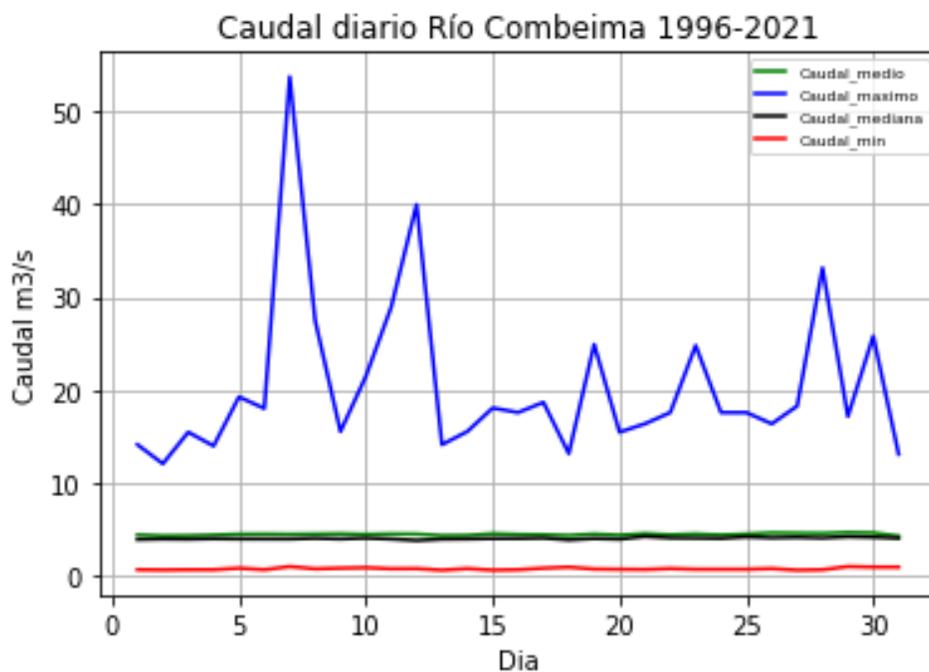
Por último, en cuanto al mapa de drenajes, pendientes y topografía de la cuenca alta del río Combeima, representado en la **figura 10**, se evidencia que el cuerpo hídrico cuenta con innumerables cascadas, afluentes y drenajes, en la cual interactúan factores físicos, biológicos y humanos, conformando un mega sistema socio-ecológico. Además, cuenta con una morfología de estrechos valles con fuertes pendientes de hasta 90 grados, asimismo presenta elevaciones que van desde los 700 hasta los 5200 m de altitud. Según Andrade (2018), esta cuenca presenta una diversidad climática desde nieves perpetuas, hasta climas cálidos en sus desembocaduras, así mismo, en la zona media del río se presencia una topografía

con pendientes onduladas a muy escarpadas. En cuanto a la geología este autor menciona que predominan esquistos duros a blandos, con características de baja estabilidad y resistencia.

La zona de la cuenca hidrográfica, como se muestra en la **figura 10**, posee áreas susceptibles por la materialización de diversos fenómenos naturales como los eventos de inundación, esto se debe a las particularidades de la zona como altas pendientes, material litológico aflorante y por el desequilibrio en el régimen hidroclimatológico.

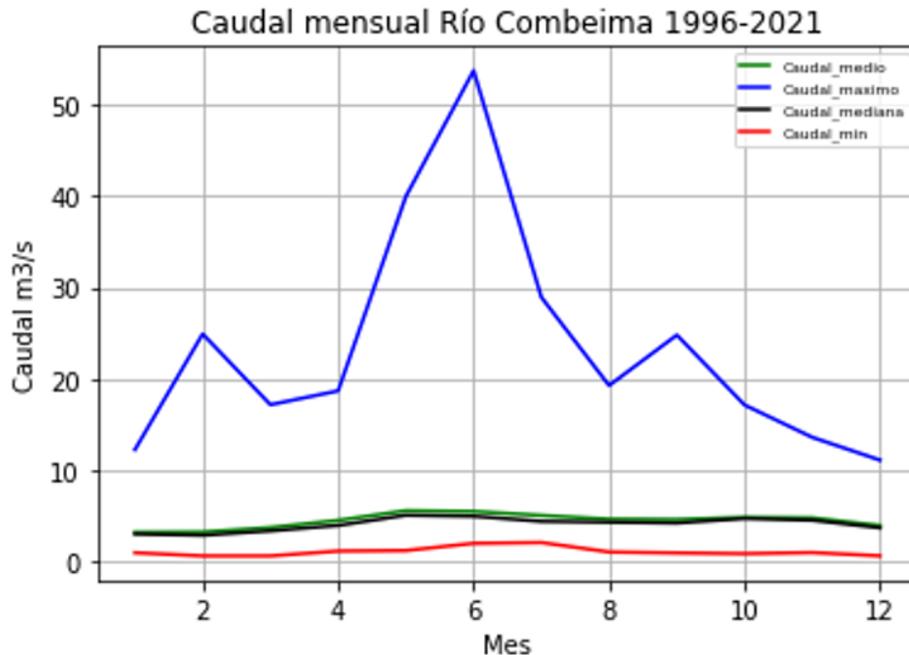
Para analizar el comportamiento de la cuenca del río Combeima, inicialmente fue necesaria la implementación de la herramienta Google Colaboratory, la cual permite ejecutar scripts de Python a través de los servidores de Google. Con la aplicación de códigos computacionales se pudieron modelar los diferentes datos hidrometeorológicos que reportaron las estaciones del IDEAM desde el año 1996 hasta el 2021, donde se logra evidenciar el comportamiento hídrico de la cuenca en materia de parámetros como la precipitación y el caudal.

**Figura 11.** *Comportamiento del caudal diario en la estación Montezuma.*



Fuente: Google Colaboratory.

**Figura 12.** Comportamiento del caudal mensual en la estación Montezuma.

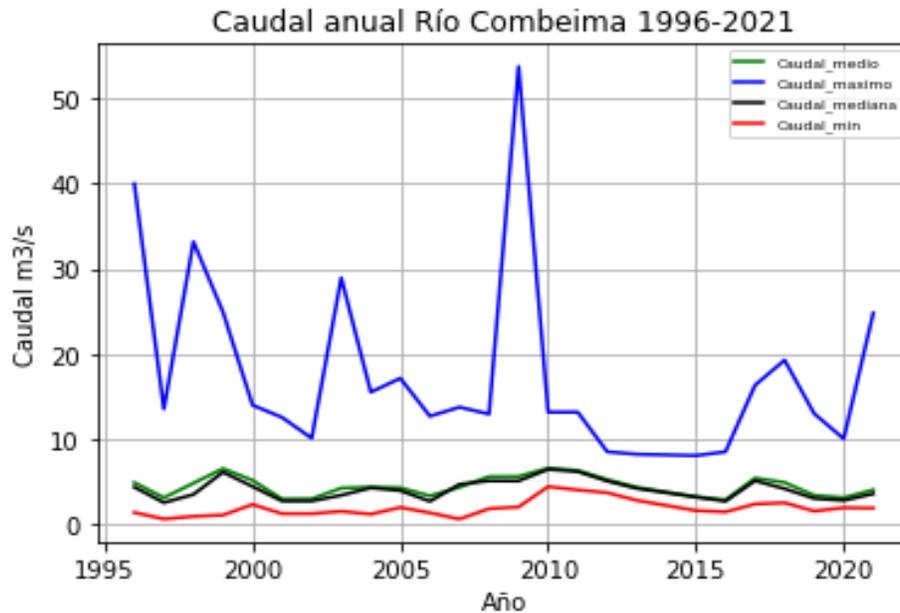


Fuente: Google Colaboratory

Gracias a la implementación de estas herramientas y procedimientos, se obtuvieron diferentes resultado efectivos al momento de analizar el comportamiento hídrico de la cuenca, pues para comenzar, en la **figura 11**, la cual corresponde a los datos obtenidos por la estación hidrológica Montezuma, ubicada cerca al cauce del cuerpo hídrico, nos permite conocer el comportamiento diario del caudal de la cuenca del río Combeima, donde se es posible afirmar que los primeros días del mes, exactamente entre los 5 y 15 días de cada mes, se registran los valores máximos del caudal, los cuales superan los 50 m<sup>3</sup>/s. Asimismo, la **figura 12** que corresponde al comportamiento mensual del caudal en la estación hidrológica MONTEZUMA [21217180], se presenta una creciente significativa si se compara el valor medio con el valor máximo del caudal, pues en el segundo cuatrimestre del año, el comportamiento promedio del caudal es de 5 m<sup>3</sup>/s, pero a razón de algunas eventualidades como el incremento de las precipitaciones, el caudal aumenta llegando a valores máximos alarmantes como el de 50 m<sup>3</sup>/s.

Además del incremento de las precipitaciones, el aumento en el volumen de agua del cauce del río, puede deberse a la topografía y grupos texturales particulares con los que cuenta el cañón del Combeima, adicionalmente la presencia de suelos de textura media, en la cuenca alta y media del río, no generan un alto porcentaje de infiltración del agua, por lo que la mayor parte del volumen de agua recae directamente en el caudal principal del río, por procesos de escorrentía.

**Figura 13.** Comportamiento del caudal anual en la estación Montezuma.



Fuente: Google Colaboratory.

Por otra parte, gracias al modelamiento de datos hidrometeorológicos realizado en la herramienta Google Colaboratory, se es posible analizar el comportamiento del caudal de la cuenca del río Combeima a lo largo de los años tomados como muestra, pues como bien se evidencia en el comportamiento de la gráfica correspondiente a la **figura 13**, el comportamiento anual del caudal de la cuenca del río, demuestra que en temporadas de altas precipitaciones puede incrementar hasta en 40 m<sup>3</sup>/s, generando un pico máximo de aproximadamente 53 m<sup>3</sup>/s entre los años 2009 - 2011, pero en los años restantes el caudal tiende a disminuir, teniendo particularidades donde aumenta su magnitud pero no en valores significativos. Esto puede deberse a que las principales actividades económicas del municipio de Ibagué giran en torno al comercio, la industria, la agricultura, la ganadería y la minería, actividades que conllevan un gran consumo de agua. Y en cuanto a la actividad minera, los elevados niveles de consumo de agua son por una mina de oro ubicada aguas arriba del río Combeima, los cuales consumen de 2 a 3 millones de litros al día, cantidad equivalente al consumo de agua de una familia durante 15 a 20 años.

De igual forma, otro de los procesos que pueden justificar la reducción del volumen de agua en el cauce del río Combeima, es el porcentaje de deterioro del suelo, pues esta incide en factores fundamentales como el ciclo hidrológico, generando variaciones en su balance hídrico, así como sedimentación y deterioro de la calidad del agua de la cuenca hidrográfica. Por esta razón, la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO), expresa que los efectos de estos fenómenos disminuyen la productividad del suelo, generan inseguridad alimentaria y degrada la biodiversidad.

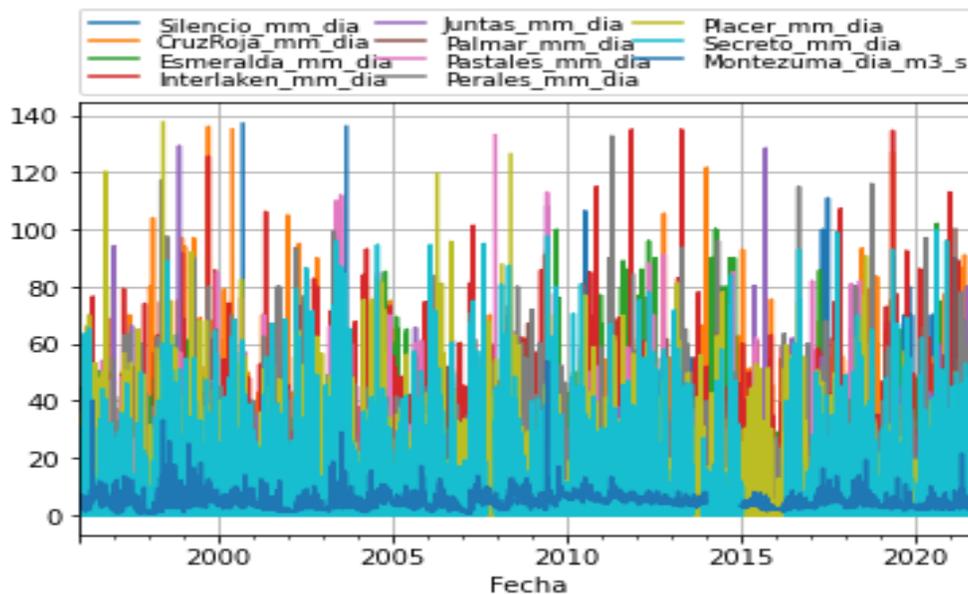
Teniendo en cuenta el análisis anterior de la **figura 13** y la **figura 22**, obtenida por medio del modelo hidrológico de WEAP, donde se demuestra la similitud en las gráficas correspondientes al comportamiento anual del caudal y la precipitación del río Combeima, en la que los años 2010 - 2011 cuentan con los valores cuantitativos más altos registrados en los últimos años en términos de estas variables. Donde la comparación entre estas figuras permite ejemplificar la correlación directa existente entre los parámetros de precipitación y caudal, pues se evidencia que cuando las precipitaciones en la

zona tienden a aumentar, el caudal del Combeima también incrementa. Esto se debe a la dinámica fluvial, la cual incluye las eventualidades climáticas que se originan en la superficie terrestre y afectan el equilibrio hídrico de la cuenca, puesto que, la mayor parte del agua precipitada circula por la superficie y por procesos de escorrentía, ingresa directamente al caudal, aumento los niveles del río.

De igual manera, las altas precipitaciones y crecientes reportadas en las gráficas resultantes, corresponden a la ola invernal asociada con el Fenómeno de La Niña del 2010 y 2011, la cual ha sido catalogada por la Organización Meteorológica Mundial, como uno de los peores desastres naturales en la historia del país, ya que ocasionó vastas pérdidas civiles, económicas y tuvo particularidades importantes en el componente atmosférico. Según lo reportado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, a nivel nacional este episodio comenzó a mediados de julio de 2010 y culminó en mayo de 2011, la ola invernal ocasionó serias afectaciones a más de dos millones de personas en 706 municipios del país, más de 300 mil viviendas fueron damnificadas y una extensa área del territorio fue afectada por deslizamientos y crecientes súbitas.

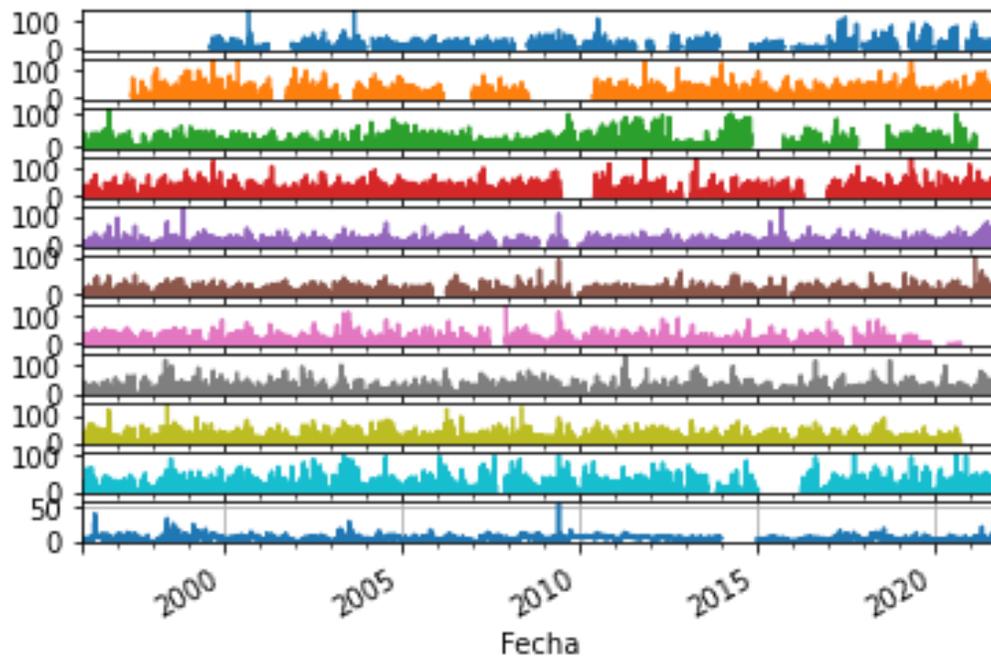
Exactamente, en la región Andina, donde se ubica el municipio de Ibagué, Tolima y el Cañón del Combeima, el primer trimestre del 2010 fue más seco de lo normal, a razón del fenómeno de El Niño presente en esa época, pero a partir del mes de abril, el efecto paulatino del enfriamiento del Pacífico tropical, produjo el inicio del fenómeno de La Niña, el cual se vio reflejado en excesivas precipitaciones desde el mes de abril a septiembre y entre noviembre y diciembre, mientras que para el 2011 los reportes de lluvias excesivas se dieron entre febrero y mayo, originando así, uno de los inviernos más fuertes de las últimas épocas de la región.

**Figura 14.** Precipitación (mm) de las estaciones de muestreo del río Combeima 1996 - 2021.



Fuente: Google Colaboratory.

**Figura 15.** Precipitación (mm) multianual de cada estación analizada en el río Combeima 1996-2021.

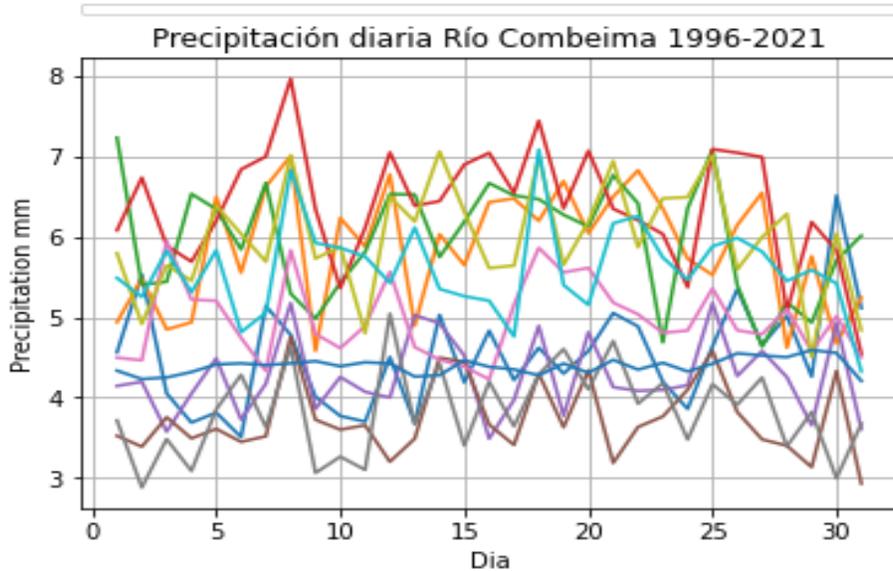


Fuente: Google Colaboratory.

En cuanto a las **figuras 14 y 15**, que representan los valores de precipitación multianual de cada una de las 11 estaciones hidrometeorológicas del IDEAM analizadas, se demuestra un comportamiento muy variable desde el transcurso del año 1996 al 2021, donde los valores promedios oscilan entre 20 a 100 mm de precipitación. De igual forma, en estas gráficas y especialmente en la **figura 15**, se es posible evidenciar que en algunos periodos de tiempo, no se cuenta con datos o valores, esto se debe a que las 11 estaciones son convencionales, por lo que obligatoriamente tienen que contar con un observador voluntario que realice la toma de datos diariamente en cada estación, dicha toma de datos tiene que ser periódica y los observadores son quienes reportan los datos a la respectiva Área Operativa del IDEAM, allí es donde los analizan y rectifican con el propósito de verificarlos y posteriormente subirlos al banco de datos DHIME.

Pero si alguna de estas estaciones convencionales no cuenta con su respectivo observador, los datos tomados por los instrumentos de las estaciones, no serán reportados. Asimismo, si la estación sufrió algún daño estructural o no se encuentra en óptimo estado y está en proceso de mantenimiento, no reporta datos. Razón por la cual se explica que en algunos periodos de tiempo las estaciones no cuenten con valores cuantitativos reportados.

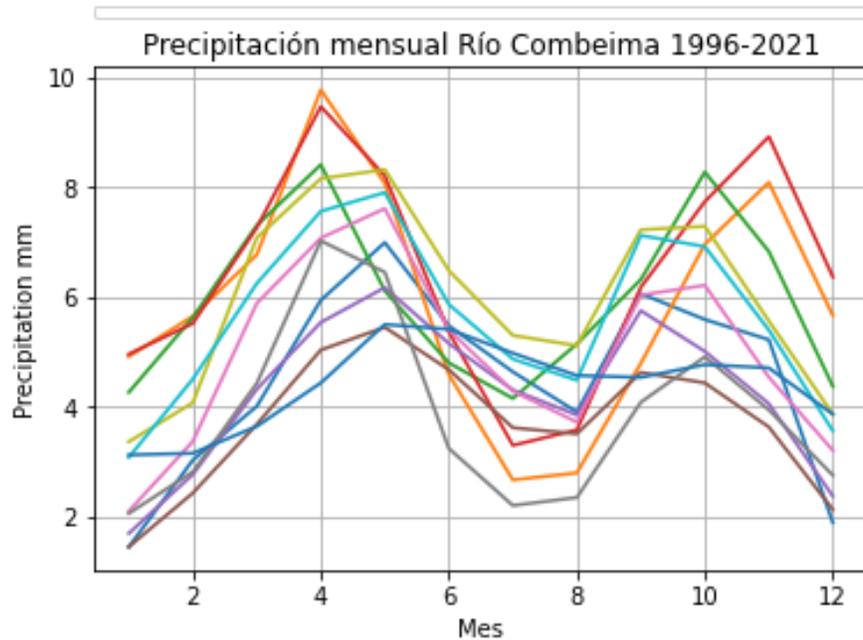
**Figura 16.** Comportamiento de la precipitación diaria del río Combeima.



Fuente: Google Colaboratory.

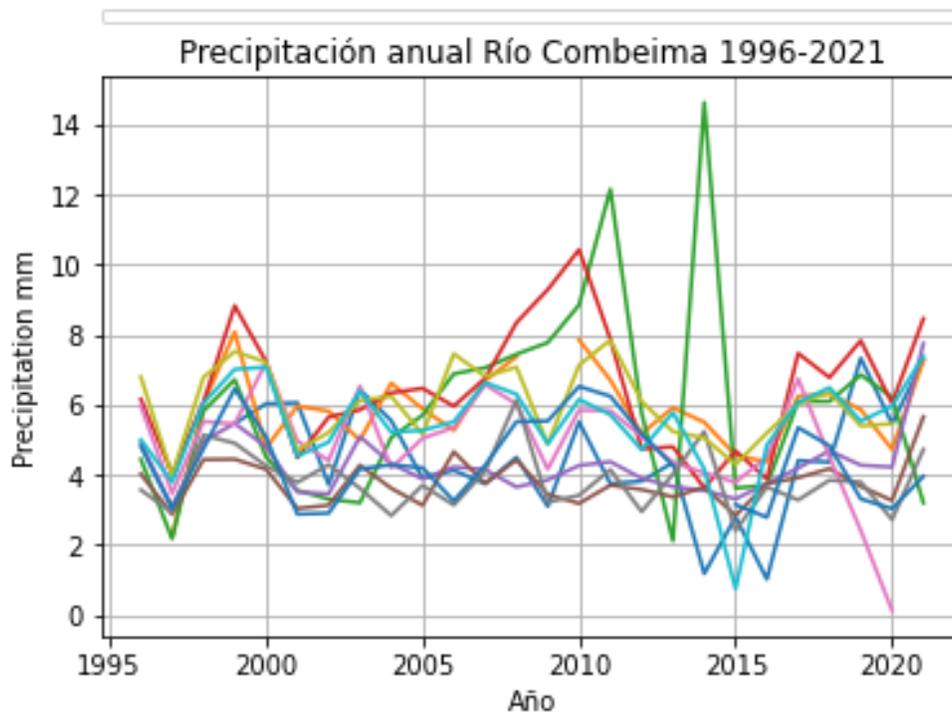
Por otra parte, teniendo en cuenta los valores modelados en la **figura 16**, correspondientes a la precipitación diaria de la cuenca, es de gran importancia tener en cuenta que el clima de Ibagué es tropical. Este municipio cuenta con una cantidad significativa de precipitaciones durante el año, donde diariamente en meses secos llueve entre 6 a 10 días, y en meses lluviosos se presentan precipitaciones en aproximadamente 20 días por mes.

**Figura 17.** Comportamiento de la precipitación diaria mensual del río Combeima.



Fuente: Google Colaboratory.

**Figura 18.** Comportamiento de la precipitación anual del río Combeima.

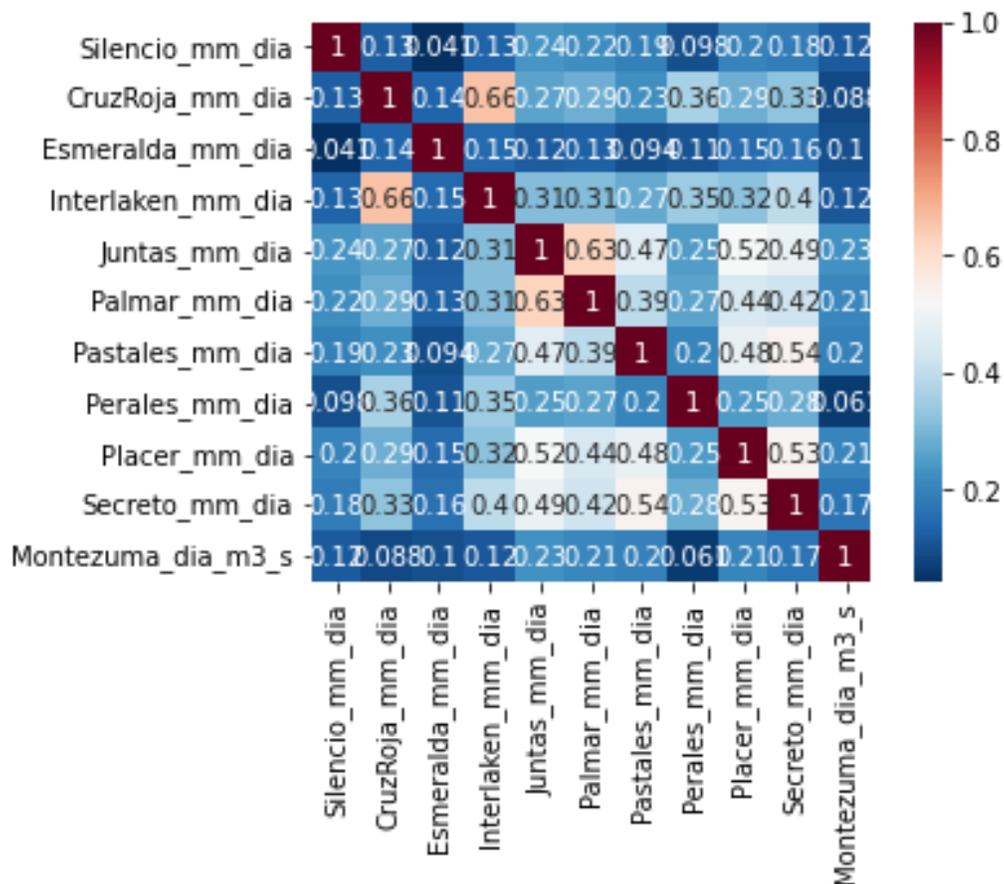


Fuente: Google Colaboratory.

La **figura 18** corresponde a una gráfica que representa el comportamiento de las series correspondientes a la precipitación anual del río Combeima para cada una de las estaciones hidrometeorológicas utilizadas en el muestreo. En esta se puede observar que para el año 2010, el valor reportado de las precipitaciones aumentó en la gran mayoría de estaciones, esto se debe a que el año 2010 fue catalogado como el año más lluvioso hasta la fecha, esto a razón del fuerte fenómeno de La Niña que se presenció en dicha época. Asimismo, teniendo en cuenta la información modelada representada en la **figura 17**, se evidencia el patrón convencional de comportamiento climático de Ibagué, el cual cuenta con dos temporadas lluviosas, las cuales se extienden desde finales de marzo hasta principios julio y desde inicios de septiembre hasta finales de diciembre, por otra parte, los meses más secos corresponden a julio y agosto.

Pero este patrón no se evidencio en el año 2010, en donde la mayoría de los meses del año, se presentaron condiciones de excesivas lluvias, algo atípico ya que en temporadas secas o de bajas precipitaciones, las lluvias no disminuyeron, lo que se traduce en un factor preponderante para que el nivel del río Combeima no disminuyera, como comúnmente sucede en julio y agosto. Pero al no suceder esto y juntarse con la segunda temporada de lluvias, se produjeron situaciones alarmantes de emergencias ambientales, sociales y económicas en el municipio.

**Figura 19.** Correlación de los valores de precipitación de las estaciones analizadas en la cuenca del río Combeima.



Fuente: Google Colaboratory.

Por parte de la **figura 19** de correlaciones, nos evidencia la relación de las variables de precipitación obtenidas por el modelamiento de datos de las estaciones, gracias a este diagrama podemos observar que la correlación más alta pertenece a las estaciones INTERLAKEN [21210240] y CRUZ ROJA [21210230], con una magnitud de 0,66 seguida por la correlación de 0,63 entre las estaciones EL PALMAR [21210220] y LAS JUNTAS [21210020]. Estos valores de correlación se deben a que las estaciones se encuentran ubicadas en áreas aledañas, por lo que reportan magnitudes similares. Mientras que la correlación más baja pertenece a las estaciones LA ESMERALDA [21210120] y EL SILENCIO [21210260], con una magnitud de 0,04 debido a que son estaciones con ubicaciones lejanas entre sí, cuentan con distintas particularidades y factores influyentes, por lo que los datos y valores que estas cuantifican son diferentes.

## 9.2 Objetivo Específico 2:

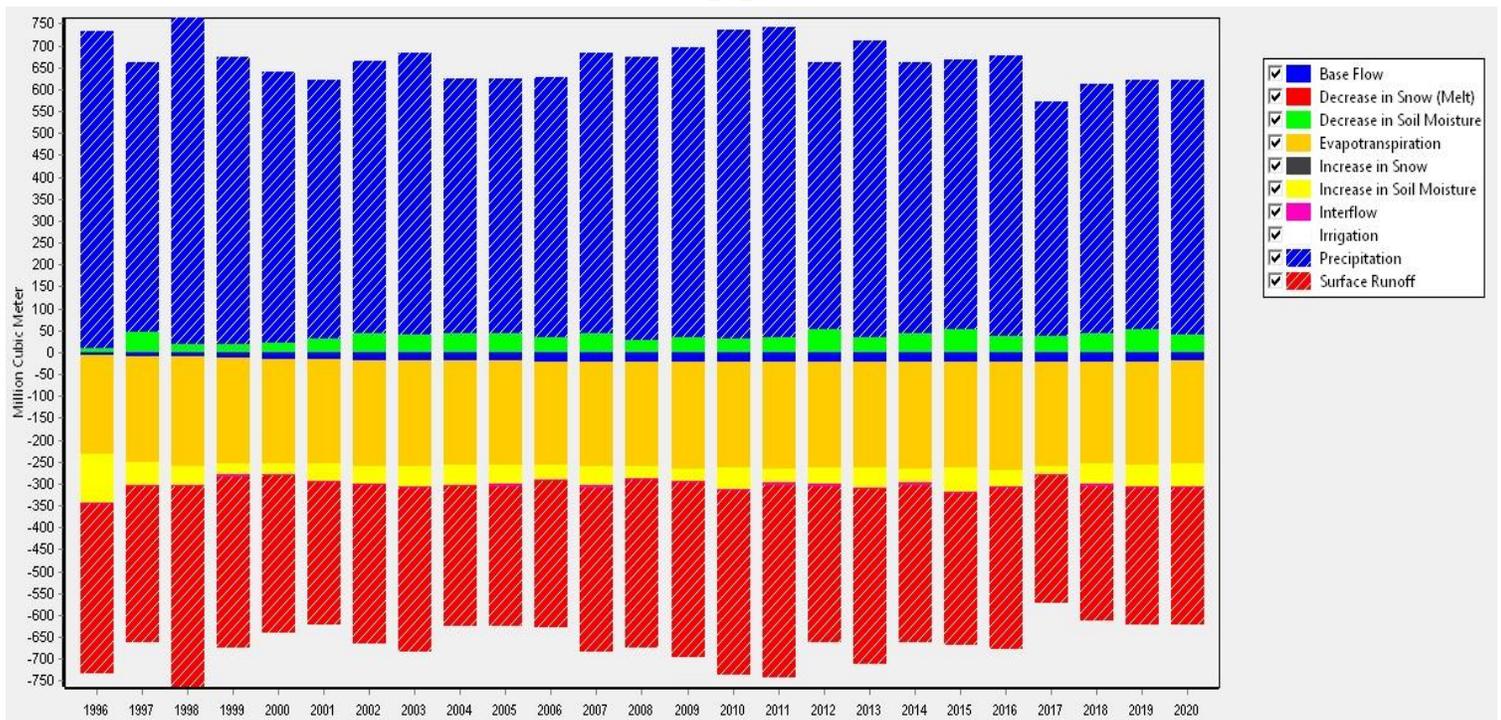
*Construir un modelo hidrológico a través del software de simulación WEAP con el propósito de analizar el comportamiento histórico de la cuenca del río Combeima.*

Posteriormente se realizó el modelo hidrológico de dos tanques en el software WEAP, esta herramienta fue útil para el análisis histórico de las variables hidrometeorológicas y otros factores del recurso hídrico. Pues las diferentes aplicaciones del WEAP nos permitieron emplear objetos y procedimientos a través de una interfaz gráfica que fue implementada para analizar distintos temas e incertidumbres relacionadas al comportamiento climático y las condiciones de la cuenca del río Combeima.

El modelo hidrológico que está integrado en el software WEAP utiliza datos espacialmente distribuidos en el área de estudio y se encuentra configurado como una serie de caudales que se relacionan y cubren la totalidad de la extensión de la cuenca del río Combeima. La serie de caudales utilizan valores de datos climáticos descargados del DHIME, el cual es un portal que almacena todos los datos que las estaciones hidrológicas y meteorológicas del IDEAM reportan diariamente. Las variables de entrada en el modelo para cada una de las subcuencas fueron las de precipitación, temperatura, velocidad del viento, humedad y evapotranspiración.

Por otro lado, los modelos de planeamiento y gestión de los recursos hídricos facilitan el manejo adaptativo de la cuenca, a través del monitoreo y la revisión continua de la situación de los recursos hídricos, cómo se representa desde la **figura 20** a la **23**, en estas se muestra los resultados obtenidos al momento de correr el modelo hidrológico, donde la herramienta WEAP calcula primero los flujos hidrológicos, que son traspasados a los ríos y acuíferos asociados, permitiendo obtener un resultado aproximado al comportamiento del recurso hídrico en variables como escorrentía superficial, flujo base, precipitación, caudal, infiltración y evaporación. Pues el modelo se realizó con base a la simulación de las condiciones históricas del río Combeima, con el fin de representar la cuenca.

**Figura 20.** Modelo hidrológico anual de la cuenca del río Combeima en el software WEAP 1996 - 2020.



Fuente: Software WEAP.

Segun Yates (2005) el modelo Water Evaluation and Planning System, representa de forma particular el recurso hídrico por medio de la interfaz gráfica, permitiendo visualizar tanto gráfica como numéricamente el comportamiento hidrológico de la cuenca, pues como se evidencia en la **figura 20**, la cual representa el comportamiento hidrológico anual de la cuenca del río Combeima en diferentes variables, a través de la implementación del modelo de humedad del suelo, que simula el proceso lluvia - escorrentía, donde según los resultados obtenidos y lo aportado por Gonzalez & Hernández (2020), el modelo utilizado para representar la hidrología de la cuenca, se sustenta por medio de dos tanques, los cuales pretenden estimar los flujos superficiales y subterráneos.

Esto quiere decir, que inicialmente entra la precipitación al tanque superior del modelo, en el cual se encuentra el interflujo que hace referencia al agua subterránea que se localiza a cierta profundidad, exactamente donde están las raíces de las plantas. En el tanque inferior, se encuentra el flujo base, el cual también se representa tabulado en la **figura 20**, donde dicho flujo base multianual de la cuenca del río Combeima, a lo largo de los años cuenta con un comportamiento lineal, con pequeños incrementos en los últimos años, lo cual es importante ya que según Gómez (2016) el flujo base además de ser aportado por los acuíferos subterráneos, son los encargados de mantener el flujo del agua en épocas de verano o sequías. Asimismo, Magdalena (2014) concuerda que las reservas de aguas subterráneas contribuyen al flujo de los ríos cuando no hay precipitaciones, amortiguando las variaciones de fenómenos naturales como el del El Niño y La Niña, además, reconoce su importante papel en el ciclo hidrológico, donde su función ambiental se basa en la contribución a manantiales, ríos, lagos, humedales y estuarios.

Por otra parte, Pereyra (2011) determina que la evapotranspiración es la combinación de evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación o sea la evaporación biológica, dentro de esta misma **figura 20** se evidencia el comportamiento multianual de la evapotranspiración en la cuenca del río Combeima, donde se demuestra un comportamiento estable desde el año 1996, sin oscilaciones significativas entre los datos reportados hasta el año 2014. Ya que, en años siguientes, hasta el 2020, los valores de evapotranspiración tienden a incrementar levemente, esto se debe a los efectos del cambio climático global, el cual según Pereyra (2011) es capaz de alterar el ciclo termo-hidrológico regional, elevando los procesos de evaporación, evapotranspiración y variabilidades en las precipitaciones, contrayendo cambios en el escurrimiento, así como en la disponibilidad y el almacenamiento de aguas subterráneas.

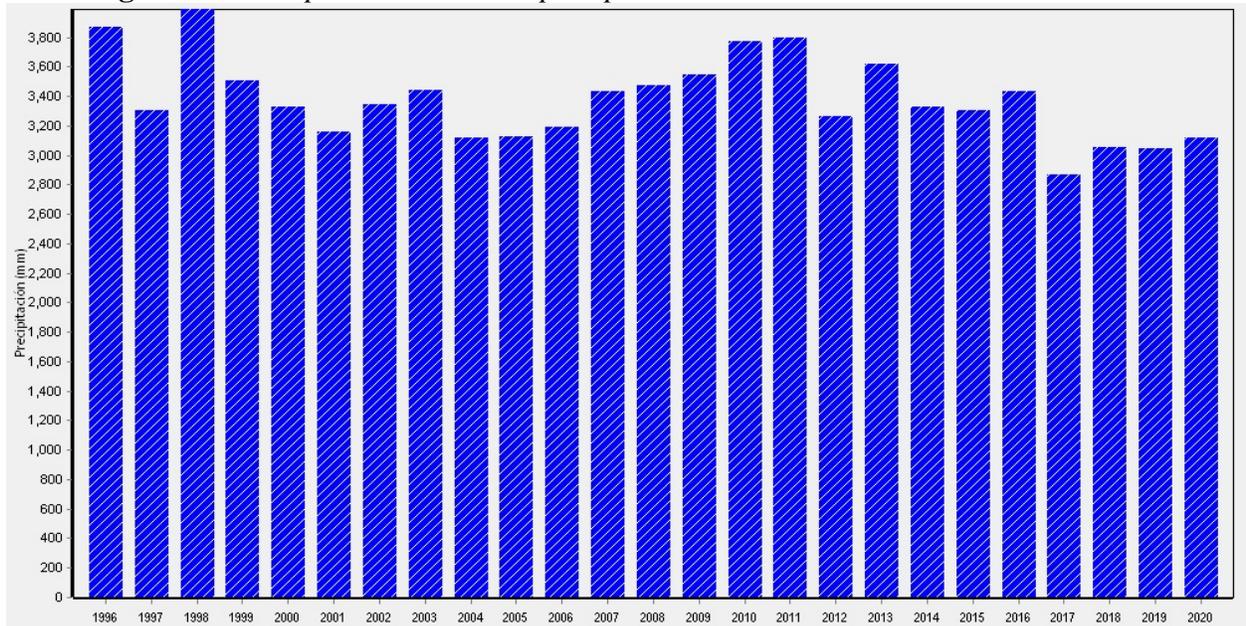
**Figura 21.** Comportamiento del caudal mensual en la cuenca del río Combeima.



Fuente: Software WEAP.

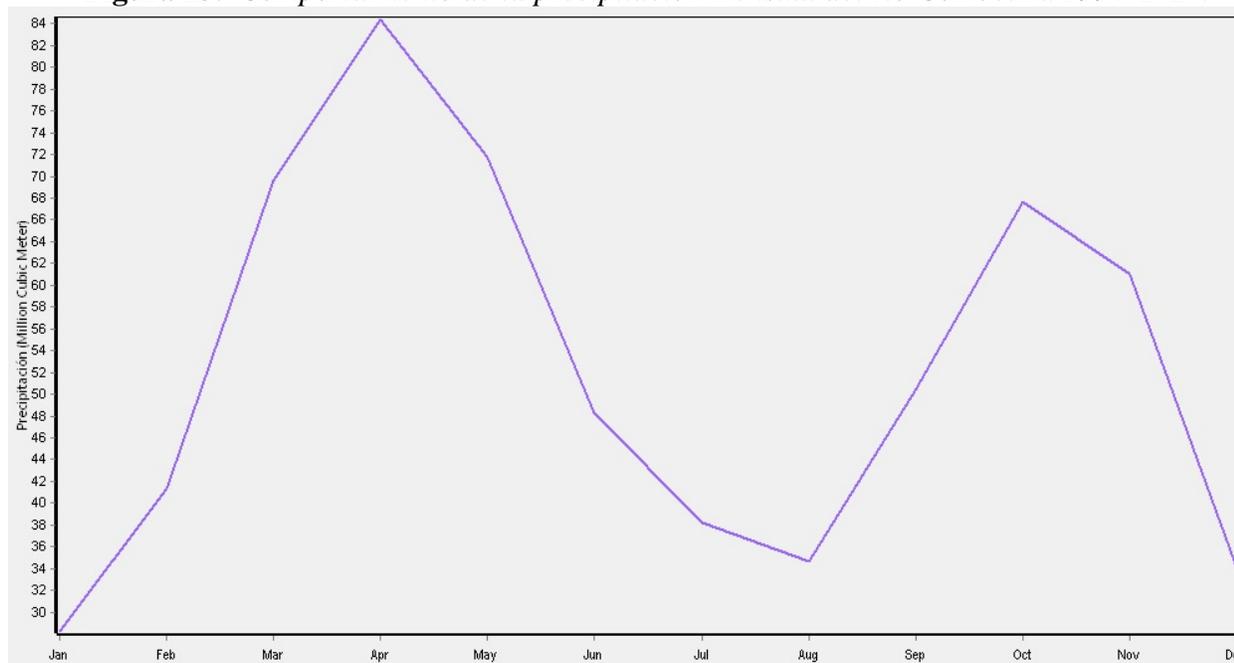
En cuanto al comportamiento del caudal mensual del río representado en la **figura 21**, se logra apreciar como el caudal va aumentando significativamente hasta el mes de abril, donde se encuentra el pico más relevante de la figura, esta tendencia no se mantiene, sino que por el contrario disminuye progresivamente hasta el mes de agosto donde se encuentra el valor mínimo y el estiaje del caudal, por lo que se espera que para esta época la cuenca del río Combeima se abastezca o cuente con aportes significativos de aguas subterráneas.

**Figura 22.** Comportamiento de la precipitación anual del río Combeima 1996-2020.



Fuente: Software WEAP.

**Figura 23.** Comportamiento de la precipitación mensual del río Combeima 1996-2020.



Fuente: Software WEAP.

Ahora bien, teniendo en cuenta las **figuras 22** y **23**, que corresponden a la representación gráfica de forma anual y mensual de la variable de precipitación obtenida en WEAP, se evidencia que el comportamiento temporal de la precipitación es bimodal, con un comportamiento típico de la zona central del país y de la región Andina.

Si se comparan estas últimas figuras correspondientes al modelo hidrológico realizado en WEAP con la **figura 12** que corresponde al modelamiento de datos del caudal reportados por la estación MONTEZUMA [21217180] y el análisis de los datos hidrometeorológicos de precipitación de las **figuras 17** y **18**, se afirma que al contar con resultados similares frente a las variables de caudal y precipitación, el modelo hidrológico representa de forma adecuada el comportamiento de la cuenca alta del río Combeima.

### **9.3. Objetivo Específico 3:**

*Realizar una propuesta sostenible que sea capaz de mitigar los eventos de inundación en la cuenca alta del río Combeima, a través de la información obtenida en el modelo de WEAP y el diagnóstico de la cuenca.*

Con el propósito mitigar el riesgo por eventos de inundación en la cuenca alta del río Combeima, se desarrolló una propuesta sostenible que consta de dos estrategias enfocadas en las soluciones basadas en la naturaleza (Nature based solutions), las cuales tienen como objetivo abarcar todas las acciones en el marco de los ecosistemas y los servicios que estos proveen, para de esta forma atacar problemáticas socioambientales. Según Guevara (2018) las soluciones basadas en la naturaleza son capaces de brindar la oportunidad de integrar de forma efectiva, las agendas de la acción climática, la conservación de la

biodiversidad, la seguridad alimentaria y del agua, la salud humana y la reducción del riesgo de desastres bajo un enfoque coherente y holístico.

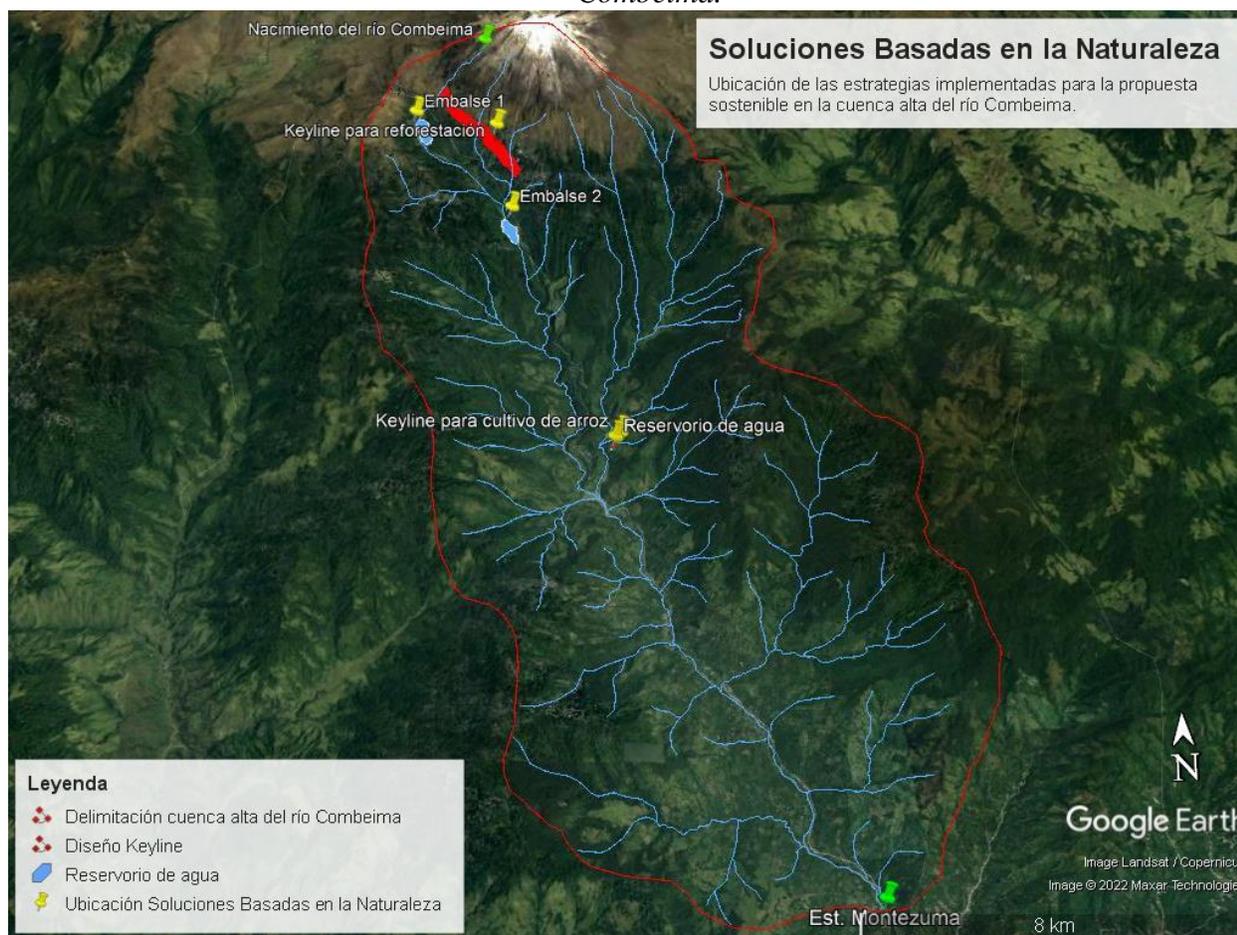
Estas soluciones, implementadas en el contexto de reducción del riesgo de desastres y la adaptación al cambio climático, conforman una estrategia eficaz para la gestión integral del territorio, los recursos naturales y la biodiversidad. Fundamentalmente estas soluciones priorizan la conservación del ambiente y las prácticas de uso sostenible del territorio. Donde según la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA, 2018) las soluciones basadas en la naturaleza son tomadas como una oportunidad para la innovación y son promovidas como una forma rentable de crear una economía más verde, sostenible y competitiva.

La necesidad de la implementación de soluciones basadas en la naturaleza en materia hídrica en Colombia, se desprenden a razón de que los escenarios climáticos tanto en el país como específicamente en la región Andina, reflejan un aumento en la frecuencia de fuertes precipitaciones, especialmente en latitudes altas y zonas tropicales como la cuenca alta del río Combeima. Asimismo, la degradación ambiental, la planificación inadecuada del uso del suelo y el cambio climático condicionan en parte el nivel de riesgo de inundación en esta zona, produciendo altos niveles de vulnerabilidad física, especialmente en áreas de urbanización no planificadas (Guevara, 2018). Lo que se evidencia en la cuenca alta del Combeima, donde se encuentran ubicados cuatro centros poblados principales denominados, Las Juntas, Villa Restrepo, Pico de Oro y Pasteles, los cuales no cuentan con un proceso adecuado de planificación, lo que genera un aumento en la susceptibilidad a inundaciones y deslizamientos de tierra.

Algo semejante ocurre con la pérdida del hábitat y la degradación del suelo, problemáticas que siguen afectando y convirtiéndose en un desafío para la región, pues la deforestación en ecosistemas forestales, la reducción de pastizales y biomas de montaña en el municipio, se traducen en un factor determinante que influye en el incremento del riesgo de desastres en la cuenca alta del río Combeima.

Es por estas razones, desde el marco de la gestión sostenible de los recursos naturales, el cual es un proceso de gran importancia, que en general involucra la toma de decisiones frente al método más adecuado para el aprovechamiento y cuidado de los mismos. Se plantean las siguientes estrategias que conforman la propuesta para la reducción del riesgo por eventos de inundación y su implementación sostenible en la cuenca alta del río Combeima.

**Figura 24.** *Ubicación de las Soluciones Basadas en la Naturaleza en la cuenca alta del río Combeima.*



Fuente: Autores.

La **figura 24**, corresponde al mapa geográfico realizado en la herramienta computacional Google Earth Pro, donde se pueden evidenciar las ubicaciones exactas de las soluciones basadas en la naturaleza implementadas como estrategias de la propuesta sostenible en la cuenca alta del río Combeima. En las que se encuentran los embalses y reservorios de agua para el almacenamiento de agua, y los diseños en línea clave (keyline) para la siembra de frailejones, árboles maderables y cultivos de arroz.

### 9.3.1 Reforestación y siembra de cultivos en Línea Clave (Keyline).

La deforestación es un problema cada vez más marcado en las cuencas hidrográficas, esta tala de árboles reduce la capacidad de conservación de la humedad en la tierra en los diferentes pisos climáticos, donde se provoca en los suelos una aceleración de la erosión destruyendo recursos ecológicos. Es por esto que se quiere realizar una estrategia de reforestación en la cuenca del río Combeima con el fin de proteger y conservar el ecosistema estratégico que posee el municipio de Ibagué.

Según Adarme (2015) la reforestación busca poblar o repoblar zonas que estaban cubiertas de bosques y que pudieron desaparecer debido a múltiples causas como la explotación de maderas para fines

industriales, la ampliación de la frontera para agricultura o ganadería, este proceso se realiza con especies arbóreas o arbustivas, mediante plantación, regeneración manejada o siembra en línea clave. La presencia de estos árboles y bosques añaden una importancia en nuestro medio, ya que protegen los suelos contra la erosión, purifican el aire, son el hábitat para muchas especies animales, ayudan a conservar el ciclo del agua y nos proporcionan alimento.

Es por esto que, los árboles maderables pueden ser utilizados como una estrategia para disminuir la vulnerabilidad de la zona, donde las medidas de restauración de cobertura forestal en vertientes tienen como objetivo incrementar la protección en calidad y cantidad de las fuentes de agua para consumo humano, apuntando a una mejora de la calidad de vida de la población y el recurso hídrico. Además, como menciona Buitrago (2016) por medio de la reforestación se puede recuperar especies maderables colombianas, proveer hábitat para especies y enfriar las capas subterráneas cercanas al río, esto último quiere decir que el agua se mueva a diferencia de temperaturas, del calor al frío, con el fin de recargar el manto freático de la rivera en época lluviosa y almacenar agua para suplir el río en tiempos de sequía.

Por otro lado, este autor menciona que la siembra de la madera se realiza con el fin de ayudar a la preservación del agua por medio de la infiltración en el suelo, recargando los acuíferos. Además de esto, la madera al tener una evapotranspiración mayor a otros tipos de árboles, hace de refrigerador del suelo al enfriarlo todo, incluyendo sus raíces, esto hace que el agua subterránea tienda a aumentar en los eventos de precipitación. Gracias a este flujo subterráneo se logra regular el ciclo hidrológico que se pierde naturalmente en las cuencas hidrográficas y además se controla la inundación y la sequía.

Por estas razones, la siembra de maderables en la cuenca alta del río Combeima se debe desarrollar por medio de una agricultura regenerativa donde el suelo se logre fortalecer, para esto es apropiado que se realice por medio del método australiano en línea clave o Keyline Design para permitir el uso adecuado del agua. Esta técnica fue originada por el ingeniero de minas P.A. Yeomans en los años 50, la cual consiste en implementar un laboreo especial utilizando la topografía del paisaje para que el agua sea transportada por gravedad de zonas de acumulación y moverla a zonas más secas siguiendo el contorno del relieve (Ruiz, 2013). Con esto se busca dejar las raíces dentro del suelo para que ayuden a conservar carbono orgánico en el suelo, además se maximiza la infiltración en este, disminuyendo la compactación y el desperdicio del agua por riego en tiempos de verano.

De igual manera, es importante mencionar que la técnica de línea clave puede ser implementada en una escala menor, para la plantación de cultivos, pues según Weyland (2008) esta constituye una técnica de control del recurso hídrico y de la degradación del suelo, muy difundida en regiones tropicales con alta presencia de precipitaciones. Asimismo, el autor determina que el control del recurso hídrico y de la erosión por medio de esta técnica, no afecta la riqueza total de las márgenes del río y si aumenta la del cultivo. Lo que respalda lo mencionado por Pérez Sánchez (2013), autor que considera que esta técnica además de controlar la erosión, proporciona fertilidad al suelo sin la necesidad de emplear fertilizantes químicos, y afirma que este método representa un sistema de riego sostenible y efectivo en paisajes montañosos y laderas.

### **9.3.2 Embalses - Reservorios de agua.**

Una vez analizado el comportamiento de la cuenca alta del río Combeima se propone como última estrategia el almacenamiento de agua a través de la construcción de embalses en la cuenca alta. El embalse (también conocido como reservorio de agua, represa, jagüey, bordo, dependiendo la región), es un talud de tierra que sirve para almacenar agua en las épocas de lluvia con el fin de tenerla disponible para los tiempos de sequía, es la manera más económica de almacenar volúmenes grandes en los terrenos. Según Gras (2010) los embalses poseen usos potenciales en la parte alta de la cuenca como lo es el almacenaje (sin animales), absorción de nutrientes, hábitat de vida silvestre, disminución de la erosión transformación del microclima y control de plagas.

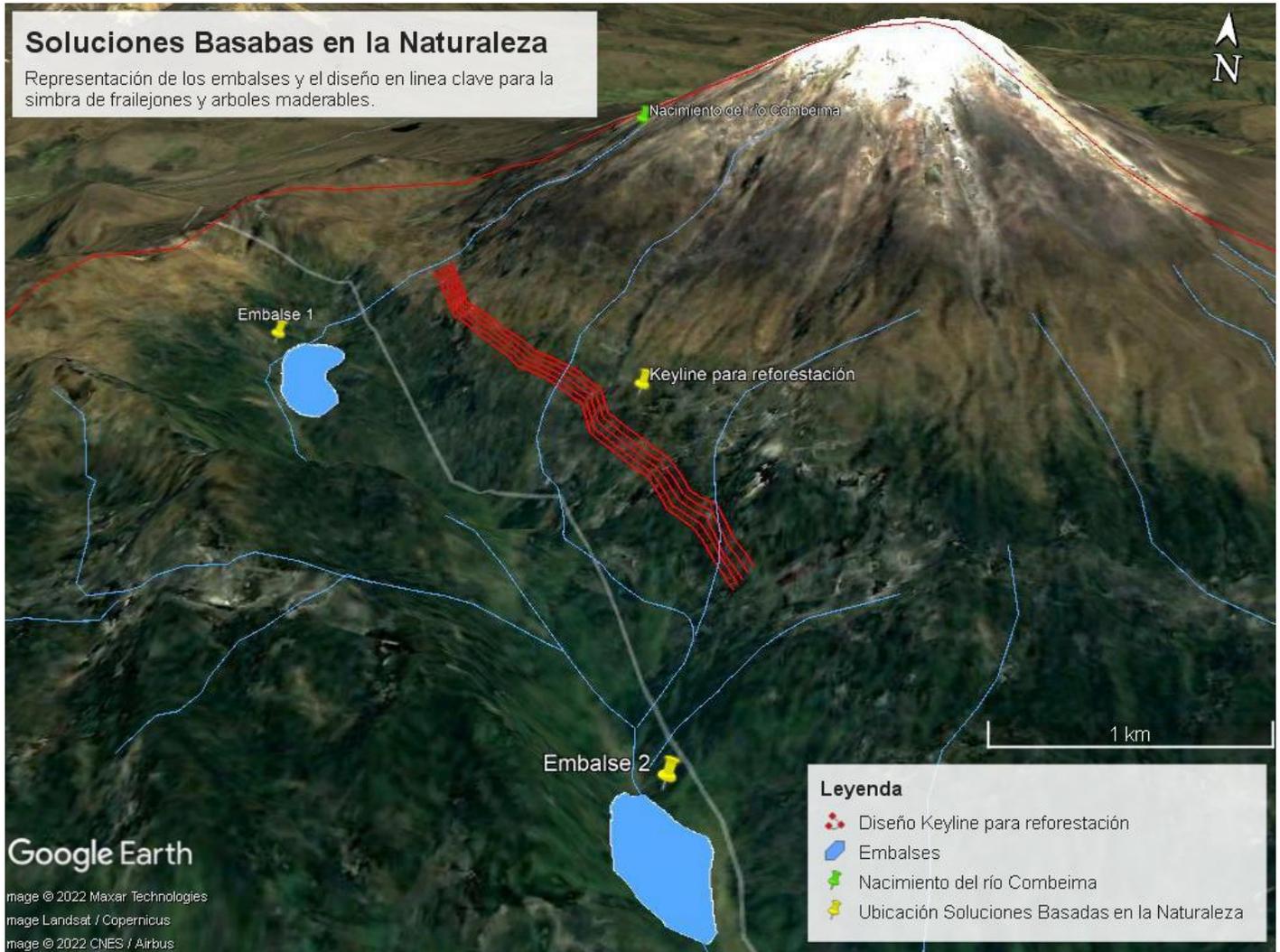
La construcción de estos reservorios nace desde mediados de la década de los 80 y una de sus funciones principales es ayudar en la regulación de crecientes presentes en los cuerpos hídricos, esto quiere decir que, en las temporadas húmedas o lluviosas, ingresa a los embalses bastos volúmenes de agua para ser almacenada y posteriormente utilizada en diversas actividades productivas (San Miguel, 2006).

Es por esto que, el autor Romero (2021) en su reciente artículo menciona que el control del caudal resultado del manejo de los embalses permite moderar el comportamiento del caudal aguas abajo. Es decir que la magnitud de los picos del caudal, se disminuyen significativamente por los embalses. Sin embargo, el autor recalca que, el efecto en los caudales depende de la capacidad de almacenamiento con respecto al volumen de caudal río. Pues si los reservorios cuentan con una capacidad de almacenamiento mayor con respecto a la escorrentía anual, pueden ejercer un control casi completo del hidrograma anual del río.

Por parte de las alteraciones en los acuíferos, aguas arriba del embalse, se observa un aumento en la disponibilidad del recurso hídrico gracias a la cantidad de agua que entra, mientras que aguas abajo se muestra diferentes cambios en el caudal, los cuales generan efectos en las aguas subterráneas de la zona. Esto quiere decir que, una disminución en la inundación aguas abajo puede reducir notablemente la recarga de acuíferos del área.

Por otro lado, como lo menciona Romero (2021) estos reservorios cumplen con el papel de trampa de sedimentos, donde quedan atrapados más del 90% de los materiales más gruesos después de recorrer el embalse. A su vez menciona que, el adecuado manejo de los embalses trae diferentes impactos positivos, como la utilización del recurso que fue almacenado para asegurar la disponibilidad del agua potable en el municipio, siendo este fundamental para la población que fue estudiada en esta investigación.

**Figura 25.** Embalses de almacenamiento de agua y diseño en línea clave para la siembra de frailejones y árboles maderables.



Fuente: Autores.

Con la implementación de las soluciones basadas en la naturaleza, se busca el aumento de la cobertura para impulsar la recuperación de servicios ambientales y la conservación de especies forestales y fauna con una inclusión de la comunidad aledaña a la cuenca del río Combeima, con el fin de sensibilizar el uso adecuado del recurso hídrico.

En cuanto a la **figura 25**, se logra representar el diseño en línea clave para la reforestación de la zona, la elección de plantar cualquier tipo de planta o de árbol maderable nativo, depende de la altitud a la que se encuentre el diseño, que para este caso específico va desde los 2.800 a 4.000 metros sobre el nivel del mar. Por lo que se propone realizar la siembra de frailejones y árboles maderables como la Palma de Cera quindiuense, Cedro negro *Juglans neotropica* y árboles de Chocho, las cuales son especies que son capaces de crecer en estos rangos de altitud. Pues la Palma de Cera quindiuense crece por encima de los 2.000 msnm, el Cedro negro *Juglans neotropica* se puede encontrar entre los entre 1.600 y 3.000 msnm, y por último los árboles de Chocho, los cuales son capaces de crecer en altitudes entre 20 a 3.000 msnm

(Forero, 2018). Así mismo, el diseño en línea clave consta de cinco niveles que tienen una longitud aproximada de 3 kilómetros, teniendo en cuenta que cada árbol necesita aproximadamente entre 5 a 7 metros para ser sembrado, por lo que se determina que, por cada nivel en el diseño, se plantarán alrededor de 429 especies entre frailejones y arboles maderable, para un total de 2.145 especial sembradas para la reforestación.

Además, en cuanto a las necesidades de la población como el uso de riego, menciona Navarro (2010) que con una buena gestión de los embalses se logra garantizar la calidad y disponibilidad del agua. Es por esto que, los embalses contribuyen de manera positiva a la calidad de vida, ya que estos permiten generar condiciones de seguridad a la población localizadas aguas abajo de los embalses, debido a que se reduce o se evita la frecuencia y magnitud de las inundaciones en los predios aledaños a la cuenca. De esta misma forma, las comunidades se benefician de estos reservorios aprovechando el recurso para abastecerse y en tiempos de sequía ser utilizada para sus actividades económicas. Es por esto, que en la **figura 25**, se evidencia el diseño de los embalses que tienen como objetivo cumplir los fines anteriormente mencionados, para el caso del embalse número uno, este cuenta con un área de 182.786 m<sup>2</sup>, un perímetro de 1.854 metros y una profundidad aproximada de 2 metros, por lo que el volumen de agua que logra almacenar es de aproximadamente 183.323 metros cúbicos. Para el embalse número dos, este cuenta con un área de 211.274 m<sup>2</sup>, un perímetro de 2.142 metros y una profundidad de 2 metros, por lo que el volumen de agua que logra almacenar es de aproximadamente 244.702 metros cúbicos.

**Figura 26.** Reservorio de agua y diseño en línea clave para siembra de cultivos de arroz.



Fuente: Autores.

En cuanto a la **figura 26**, la cual representa el complemento entre las estrategias del reservorio de agua y el diseño en línea clave para cultivo de arroz, donde el propósito principal se basa en que el diseño en línea clave del cultivo, sea capaz de redirigir el agua que transcurre de la vertiente a la ladera, distribuyendo el agua en todo el terreno y disminuyendo el porcentaje de agua que por procesos de escorrentía recae en la vertiente o en el cauce principal del río. Esta agua es aprovechada por el suelo y por el cultivo de arroz, el cual es uno de los cultivos que más requiere volúmenes de agua, pero para épocas invernales el agua precipitada sobrante de dicho proceso, es almacenada en el reservorio de agua, para luego ser reutilizada.

El diseño en línea clave para la siembra del cultivo de arroz, consta de siete niveles que se separan cada 3 m y tienen una longitud de 175 metros, por lo que el área dispuesta para el cultivo es de aproximadamente 3.675 metros cuadrados, lo que corresponde a 0,37 hectáreas. De igual manera, el reservorio de agua cuenta con un área de 1.011 m<sup>2</sup>, un perímetro de 126 metros y una profundidad de 1,5 metros, por lo que se logra determinar que el reservorio sería capaz de almacenar aproximadamente 635 metros cúbicos de agua.

Por último, se plantea a la comunidad de los centros poblados Las Juntas, Villa Restrepo, Pico de Oro y Pasteles, ubicados en la cuenca alta del río Combeima, a la Corporación Autónoma Regional y a la alcaldía del municipio de Ibagué, implementar esta solución basada en la naturaleza, como técnica agrícola en terrenos montañosos con altas pendientes, a través de la siembra en línea clave de cultivos de arroz y árboles maderables. Con el fin de minimizar la pendiente del terreno e incrementar el porcentaje de infiltración del agua en estas zonas, proporcionando una distribución homogénea y uniforme del recurso, lo que permite reducir el volumen de agua que llega al río Combeima por escorrentía, mitigando la probabilidad de eventos de inundación en las áreas cauce abajo, y de esta manera además de potenciar uno de los cultivos predominantes del municipio de Ibagué, como lo es el cultivo de arroz, también se incrementará el porcentaje de zonas de reforestación en la cual alta del río Combeima.

## **10. Conclusiones.**

El territorio colombiano se caracteriza por tener un alto potencial hídrico que para épocas de invierno, donde las precipitaciones son extensas e intensas, se produce un exceso de pluviosidad que se traduce en un alto riesgo por eventos de inundación, para el caso puntual de la cuenca del río Combeima, esto se debe a que el caudal precipitado, dada la deforestación de las cuencas y el proceso de endurecimiento del suelo, se genera una notoria reducción en los procesos de infiltración por lo que la gran mayoría del agua precipitada en las intensas lluvias, por medio de escorrentía, ingresa de forma directa al cauce del río Combeima, incrementando sus niveles y el caudal, superando así la capacidad de transporte de la cuenca, produciendo el desbordamiento del río y posteriores eventos de inundación.

Por medio del diagnóstico y análisis de la cuenca del río Combeima, realizado por medio de la delimitación en el Sistema de Información Geográfica QGIS Desktop y el modelamiento de datos hidrometeorológicos reportados por las estaciones del IDEAM desde el año 1996 hasta el 2021 con lenguaje Python en Google Colaboratory, se determina que la cuenca del río presenta las condiciones climáticas típicas del municipio de Ibagué, donde se cuenta con un comportamiento bimodal anual de la precipitación, con picos significativos en los periodos de marzo-mayo y agosto-noviembre. Así mismo, dentro de estos mismos periodos de tiempo, pero para los años 2009 - 2011, se registraron los

valores máximos anuales del caudal en la estación hidrológica Montezuma [21217180], siendo el pico máximo de 53 m<sup>3</sup>/s. Esto se debe al incremento paulatino de las precipitaciones causadas por la ola invernal asociada al fenómeno de La Niña que azotó al país en los años 2010 - 2011, la cual, por sus altos niveles de afectación, fue catalogada como uno de los peores desastres naturales del país.

Además del incremento de las precipitaciones, el aumento en el volumen de agua del cauce del río Combeima, puede deberse a la topografía y grupos texturales particulares con los que cuenta el cañón del Combeima, adicionalmente la presencia de suelos de textura media, en la cuenca alta y media del río, no generan un alto porcentaje de infiltración del agua, por lo que la mayor parte del volumen de agua precipitada, por efectos de gravedad y por procesos de escorrentía, recae directamente en el cauce principal del río, aumentando sus niveles.

Por otra parte, se logra identificar la disminución en los valores de caudales máximos y mínimos, esto se debe a la intervención antrópica y la sobreexplotación en la parte alta de la cuenca, lo que genera un desequilibrio en la regulación y el ciclo hídrico del río. Esta situación en particular, produce condiciones descontroladas del ambiente, ocasionando una reducción significativa de la oferta hídrica en épocas secas y en temporadas invernales se incrementan las inundaciones y los movimientos en masa.

De igual manera, el desarrollo del modelo hidrológico de humedad del suelo que simula el proceso lluvia - escorrentía en el software WEAP, nos permitió analizar el comportamiento histórico de la cuenca del río Combeima tanto gráfica como numéricamente, donde se logró estimar los flujos superficiales y subterráneos del río. Determinando factores que favorecen el equilibrio ambiental de la cuenca, pues en los últimos años el incremento del flujo base así no sea tan significativo, genera servicios ambientales importantes, pues el flujo base además de ser aportado por los acuíferos subterráneos, es el encargado de mantener el flujo del agua en épocas de verano o sequías, amortiguando las variaciones de fenómenos naturales como el del El Niño y La Niña.

Es posible que vuelva a presentarse un fenómeno climático como el de La Niña con intensas precipitaciones o un déficit de lluvias similares a los reportados históricamente y la región no está preparada en infraestructura sostenible, ni abastecimiento de agua subterránea para este tipo de situaciones. Es por esto que desde el marco de la ingeniería ambiental se buscó resolver, mitigar y/o prevenir el impacto ambiental de las actividades humanas, así mismo, esta rama de la ingeniería está enfocada en la gestión de los recursos naturales y la reducción del riesgo, por lo que el desarrollo de esta investigación permitió concluir que el ecosistema tiene la capacidad de proporcionar beneficios para la reducción del riesgo por eventos de inundación en la cuenca alta del río Combeima. En este orden de ideas, las soluciones basadas en la naturaleza implementadas como estrategias de la propuesta sostenible, son capaces de brindar la oportunidad de integrar de una manera más eficiente las agendas de la acción climática, la reducción del riesgo de desastres y la conservación del ecosistema bajo un enfoque holístico.

Gracias a esto, se demuestra que las estrategias preventivas siempre serán mejores que las correctivas, pues si las comunidades de los centros poblados aledaños a la cuenca, implementan la construcción de reservorios de agua y el diseño en línea clave para la siembra de cultivos y la plantación de árboles maderables, se disminuirá significativamente la velocidad del agua precipitada y será almacenada, siendo retenida en beneficio del ambiente y podrá ser utilizada en praderas, cultivos y árboles, el resto del agua se puede almacenar en embalses o reservorios.

Pues específicamente con la propuesta planteada en esta investigación, los embalses están diseñados para almacenar aproximadamente 428.660 m<sup>3</sup> de agua y el diseño en línea clave para la reforestación permitirá plantar más de 2.100 especies entre frailejones y arboles maderables. Lo que incrementa la preservación del agua por medio de la infiltración en el suelo, recargando los acuíferos subterráneos y regulando el ciclo hidrológico, permitiendo el abastecimiento del río en temporadas secas y la reducción de los eventos de inundación en la cual alta del río Combeima en épocas de intensas precipitaciones.

## **11. Recomendaciones.**

Para el proceso del diagnóstico de la cuenca, es imperativo utilizar series hidrometeorológicas reportadas por estaciones ubicadas en zonas aledañas a la cuenca principal del río Combeima, así mismo, entre mayor sea el número de estaciones, mayor será la información procesada y analizada, lo que permite un mejor acercamiento al comportamiento histórico del río. Así mismo, es recomendable revisar de forma minuciosa los datos hidrometeorológicos descargados de la base de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, esto debido a que los datos descargados pueden presentar inconsistencias y falta de periodos de tiempo sin reporte de estos, puesto que las estaciones hidrometeorológicas ubicadas en el área operativa 11 del instituto pueden contar con falta de observadores, daños en la estructura, falta de mantenimiento o falta de telemetría en la zona.

En cuanto a la simulación del río Combeima realizada en WEAP, esta puede mejorarse implementando las valoraciones de más estaciones hidrológicas aledañas a la cuenca del río para optimizar la calibración del modelo y complementar con fuentes de información satelital con el propósito de obtener una mejor estimación de la variable de evapotranspiración.

En este documento no se muestra especificaciones del proceso de siembra, pero si se justifica por qué la estrategia es la más viable para disminuir la vulnerabilidad de las comunidades aledañas a la zona de estudio, por ende, es recomendable que la autoridad competente de la zona se encargue de educar y guiar a la población cercana a la cuenca para la implementación de esta metodología.

Para próximas investigaciones o estudios alineados con la presente propuesta sostenible, se recomienda realizar un análisis completo y detallado del área de interés, pues cada terreno tiene sus particularidades y es necesario realizar las modificaciones pertinentes para que cada estrategia logre su mayor potencial y desarrollo.

## **12. Referencias Bibliográficas.**

Adarme Ordoñez, J., Córdoba Delgado, F. E., Ordoñez Ordoñez, C., & Yela Gomez, A. (2015). La reforestación de la micro cuenca “calandayma”, vereda la esmeralda, una estrategia pedagógica con los estudiantes de cuarto grado de la institución educativa Fátima, municipio el tablón de Gómez Nariño.

Alcaldía Municipal Ibagué. (2020). Misión y visión municipal.

Álvarez Romero, J. A., & Ruíz Bedoya, L. V. (2019). Análisis de la oferta hídrica del río Combeima durante el fenómeno de El Niño 2015.2016.

- Andrade Castañeda, H. J., Segura Madrigal, M. A., & Sierra Ramírez, E. (2018). Servicios ecosistémicos aportados por sistemas de producción en laderas de la cuenca media del río Combeima (departamento del Tolima, Colombia): Un aporte a la gestión del recurso hídrico. Ibagué: Sello Editorial Universidad del Tolima, 2018.
- Atencia, Y. H., & Arcila, H. R. (2016). Evaluación del riesgo asociado a vulnerabilidad física por taludes y laderas inestables en la microcuenca Cay, Ibagué, Tolima, Colombia. *Ciencia e ingeniería neogranadina*, 26(2), 111-128.
- Banco Mundial Colombia. (2012). Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas. Sistema Nacional de Información Para La Gestión Del Riesgo de Desastres, 438.
- Barrios, M., & Olaya, J. (2007). Evaluación integral del riesgo por avenidas torrenciales, caso villa Restrepo, Ibagué-Tolima (Doctoral dissertation, Tesis de maestría). Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima, Ibagué).
- Buitrago, G. A. F. (2016). La madera Colombiana, oportunidad de regeneración del flujo de los ríos mediante una producción sostenible y competitiva. *Revista de Tecnología*, 15(2).
- Cadena, A. F. L., Zúñiga, J. M., & Romero, J. (2016). Desarrollo de un modelo para la planificación integral del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del Río Aipe, Huila, Colombia. *Ingeniería y Región*, (15), 23-35.
- Campos Garcia, A., Holm-Nielsen, N., Diaz G, C., Rubiano Vargas, D. M., Costa P, C. R., Ramirez Cortes, F., & Dickson, E. (2011). Analysis of disaster risk management in Colombia: a contribution to the creation of public policies.
- Canchanya Melchor, J., Chafloque Gavilan, R. C., Fernandez Velasquez, E., Flores Calderon, E. H., Gutierrez Vivas, B. (2013). Análisis de Precipitación de Una Cuenca. Lima: Editorial Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Cardona, O. (2005). Indicadores de Vulnerabilidad y Riesgo.
- Conama, F. (2018). SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA.
- Congreso de Colombia. (1997). Ley 388 de 1997.
- CONPES. (2009). ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO

## COMBEIMA PARA GARANTIZAR EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA CIUDAD DE IBAGUÉ.

CORTOLIMA. (2020). La corporación. Recuperado de: <https://www.cortolima.gov.co>

Cuevas, J.P. Santa, G.A (2019). CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE DESLIZAMIENTOS PRESENTADOS EN LA CUENCA DEL RÍO COMBEIMA (IBAGUÉ-TOLIMA, COLOMBIA).

Dávila, D. (2016). Sistemas de alerta temprana ante inundaciones en América Latina.

Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE). (2022). Resultados del Censo general del 2018. Recuperado de: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>.

De la Cueva González-Cotera, J. (2018). La importancia del código fuente. In Derecho digital: Retos y cuestiones actuales (pp. 109-127). Aranzadi.

Escobar, M., & Vicuña, S. (2009). Guía metodológica: modelación hidrológica y de recursos hídricos con el modelo WEAP. A joint publication of Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile and Stockholm Environment Institute.

Fandiño López, Y. V., Góngora Montoya, M. A., & Suárez Suárez, L. X. (2018). Paisajes ocultos: estudio de paisajes en la Cuenca alta del río Combeima en Ibagué.

Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario. (2017). Arroz - Riego. Marco de Referencia Agroeconomico.

Font, P. G. (2016). SOBRE LA DATACIÓN Y LÍMITES DE LAS TERRAZAS DE CULTIVO. ALGUNAS OBSERVACIONES DE CAMPO. In Paisaje, cultura territorial y vivencia de la geografía: Libro homenaje al profesor Alfredo Morales Gil (pp. 111-124). Instituto Interuniversitario de Geografía.

García, E. D. V., Buitrago, G. A. F., & Angarita, G. P. G. (2020). Simulación hidrológica para sistemas de drenaje sostenible aplicada en jardines verticales en el humedal La Vaca, Bogotá DC. INVENTUM, 15(28), 88-103.

Gobernación del Tolima. (2012). Objetivos y funciones. Recuperado de <https://www.tolima.gov.co/publicaciones/729/objetivos-y-funciones/>

- Gómez-Isidro, S., & Gómez-Ríos, V. L. (2016). Análisis de flujo base usando curvas maestras de recesión y algoritmos numéricos en cuencas de montaña: Cuenca del río Suratá y cuenca del Río de Oro (Santander, Colombia). *Dyna*, 83(196), 213-222.
- Gonzalez, A., & Hernández Alonso, M. L. (2020). Implementación del modelo WEAP (Water Evaluation and Planning System) a la cuenca del río Apulo para la determinación de la disponibilidad hídrica de la cuenca bajo escenarios de cambios en usos del suelo.
- González, J. P., & Jurado, M. C. (2014). Evaluación de la utilidad de estimaciones satelitales de precipitación para la modelación de inundaciones en sistemas de la alerta temprana de cuencas de relieve complejo: Caso de estudio en la cuenca del río Bogotá (Tesis de pregrado). Universidad El Bosque, Bogotá D.C.
- González-Barrios, J. L., González-Cervantes, G., & Chávez-Ramírez, E. (2012). Porosidad del suelo en tres superficies típicas de la cuenca alta del río Nazas. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(1), 21-32.
- González-Velandia, J. C. (2014). La gestión del riesgo de desastres en las inundaciones de Colombia: una mirada crítica.
- Gras, E. (2010). Cosecha de agua y tierra (No. 333.79/G767). Carmina Editores.
- Guevara, O., Rodríguez, A. V., van Breda, A., Ilieva, L., Cordero, D., Podvin, K., ... & McQuistan, C. (2018). Adoptando soluciones basadas en la naturaleza para la reducción del riesgo de inundación en América Latina.
- GWP (2011). Manejo de una cuenca hidrográfica. Recuperado de [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/varios/cuenca\\_hidrologica.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf).
- HERRERA, N. A. D., CASTELLANOS, J. M. R., & CARRETERO, J. S. T. (2018). DIAGNÓSTICO DE LOS EQUIPAMIENTOS DE ATENCIÓN DE DESASTRES DE LA ZONA URBANA DEL MUNICIPIO DE IBAGUÉ, DEPARTAMENTO DEL TOLIMA, APOYADOS EN LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.
- Hervis-Granda, G., Geler-Roffe, T. G. R., Díaz-García, R., Amestoy, I., & Cretaz, E. (2018). El modelo WEAP: una herramienta para la planificación hidrológica en la adaptación al cambio climático. *Revista Ingeniería Agrícola*, 8(3), 40-47.
- Ilbay-Yupa, M., Zubieta Barragán, R., & Lavado-Casimiro, W. (2019). Regionalización de la precipitación, su agresividad y concentración en la cuenca del río Guayas, Ecuador. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 30(2), 57-76.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. (2020). Entidad. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/entidad/normatividad>.
- International federation of red cross and red crescent societies. (2018). Report World Disasters.
- Leal Villamil, J., Pérez Gómez, U., & Ortiz Lozano, N. E. (2018). Distribución espacial y temporal de deslizamientos (1999-2015) en la cuenca del río Combeima, Colombia.
- López Vargas, R. A., Sanabria Guzmán, C. A., & Vélez Trujillo, C. E. (2018). Determinación de la vulnerabilidad de la infraestructura física frente a las inundaciones en la cuenca del río Combeima.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). Normativa. Recuperado de: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/normativa/conpes>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Funciones y objetivos. Recuperado de: <https://www.minambiente.gov.co/ministerio/objetivos-y-funciones>.
- Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial. CORTOLIMA. (2009). Conpes. Concejo Nacional de política económica y social. Ibagué, Tolima: CORTOLIMA
- Molina, J. A. M., & Gil, A. M. (1995). Terrazas de cultivo abandonadas en el sureste peninsular: aspectos evolutivos. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, (13), 81-90.
- Morales Calderón, C. M. (2014). Determinación del comportamiento del flujo base y su relación con variables de estado hidrológicas en la cuenca del río Diguillín, región del BíoBío, Chile.
- Motoya, L., Silva, S., & Gonzales, J. (2009). EVALUACIÓN DE ZONAS DE AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES UTILIZANDO METODOLOGÍAS CUALITATIVAS. CASO DE APLICACIÓN A LA QUEBRADA DOÑA MARÍA, (30), 11-29.
- Muñoz-Barreto, C. P. (2015). Identificación de áreas estratégicas para la conservación del recurso hídrico a partir de SIG en la cuenca del Río Combeima.
- Narváez, L., Lavell, A., & Pérez, G. (2009). *La gestión del riesgo de desastres*. Secretaría General de la Comunidad Andina.
- Navarro, E., García-Berthou, E., & Armengol, J. (2010). La calidad ecológica de los embalses.
- ONU/EIRD, 2004. Vivir con el riesgo: Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. (2004). ¿Qué significa vulnerabilidad?

Ortega, D. J. P., Ortega, J. A. S., Moncayo, P. C. C., Vargas, I. A. D., & Pompêo, M. L. M. (2018). Uso del suelo y su influencia en la presión y degradación de los recursos hídricos en cuencas hidrográficas. *RIAA*, 9(1), 1.

Ospina Zúñiga, O. E. (2015). Análisis de la contaminación microbiológica en el río Combeima, municipio de Ibagué (Tolima, Colombia). *Producción Limpia*, 10(2), 92-103.

Pacateque Cardona, A. F. (2013). Parque inundable para mitigar los riesgos de desbordamiento en la cuenca alta del Río Bogotá (Bachelor's thesis, Universidad Piloto de Colombia).

Pereyra Díaz, D., Cruz Torres, D. G., & Pérez Sesma, J. A. A. (2011). La Evapotranspiración Real (ETR) en la cuenca del río La Antigua, Veracruz: estado actual y ante escenarios de cambio climático. *Investigaciones geográficas*, (75), 37-50.

Pérez-Sánchez, J. M., & Juan-Pérez, J. I. (2013). Caracterización y análisis de los sistemas de terrazas agrícolas en el Valle de Toluca, México. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 10(4), 397-418.

Pérez, U., & Bosque, J. (2008). Transiciones de la cobertura y uso de la tierra en el periodo 1991-2005 en la cuenca del río Combeima, Colombia,

Piñeiro, F. J. G. (2018). Los sistemas de información geográfica: su importancia y su utilidad en los estudios medioambientales. *Vasconia. Cuadernos de Historia-Geografía*, (20).

Presidente de la República (2012). Decreto 1640 de 2012.

Sampieri, R. H. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw Hill México.

Rodriguez, M. A., Romero, M. F. L., Henríquez, L. M. T., & Buitrago, G. A. F. (2021). Modelo de aprendizaje automático como herramienta para la toma de decisiones en la cuenca del río Ariporo. *INVENTUM*, 16(31), 15-23.

Rodriguez, J. M. V. (2010). LA CUENCA DEL RÍO COMBEIMA Y EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN IBAGUÉ AMENAZADAS POR LA MEGAMINERÍA.

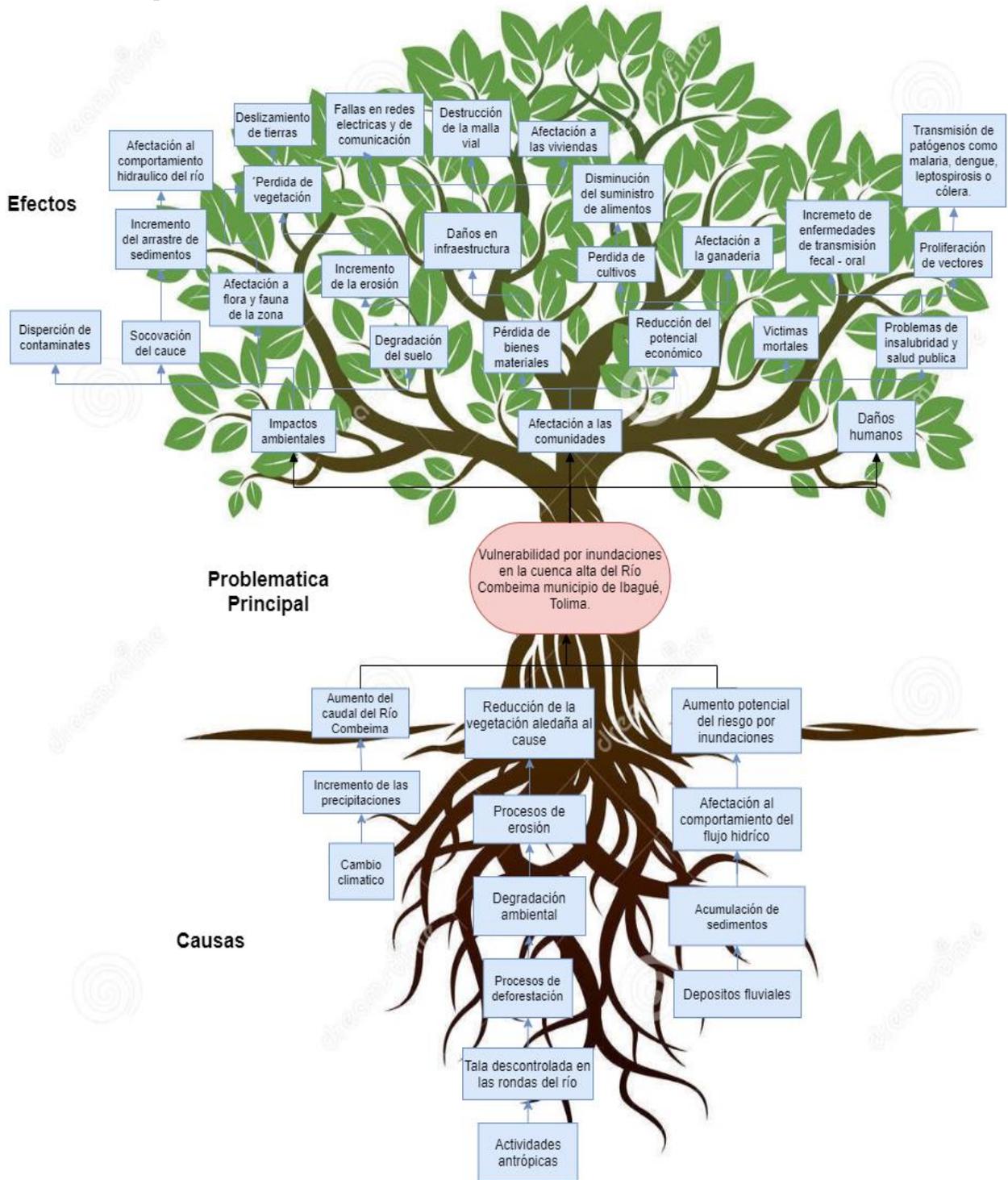
Romero Gil, I. (2021). Efectos ambientales de presas y embalses.

Ruiz, J. (2013). Diseñar y cultivar usando línea clave. *Rev. Agroecol. Divulg*, 12, 50-51.

- San Miguel, S. E., Alvez, C. E., & Zamanillo, E. A. (2006). Modelo de simulación de embalses para análisis de riesgo. In VIII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación.
- Sedano, K., Carbajal, J., & Ávila, A. (2013). ANÁLISIS DE ASPECTOS QUE INCREMENTAN EL RIESGO DE INUNDACIONES EN COLOMBIA, (November), 219–238.
- Soldano, A. (2008). Conceptos sobre riesgo. Síntesis temática realizada para el foro virtual de la RIMD creado para la capacitación en teledetección aplicada a la reducción del riesgo por inundaciones.
- Van Rossum, G. (2007, June). Python Programming language. In USENIX annual technical conference (Vol. 41, No. 1, pp. 1-36).
- Vera Rodríguez, J. M., & Albarracín Calderón, A. P. (2017). Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales en cuencas hidrográficas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 109-136.
- Weyland, F., & Zaccagnini, M. E. (2008). Efecto de las terrazas sobre la diversidad de artrópodos caminadores en cultivos de soja. *Ecología austral*, 18(3), 357-366.
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21 - A demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Panning Model. *Water International*, 30(4), 487-500.
- Zubieta, R., Laqui, W., & Lavado, W. (2018). Modelación hidrológica de la cuenca del río Ilave a partir de datos de precipitación observada y de satélite, periodo 2011-2015, Puno, Perú. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(5), 85-105.

### 13. Anexos.

Anexo 1. *Árbol de problemas.*



## Anexo 2. Árbol de objetivos.

