



**DISEÑO HIDROLÓGICO DE EMBALSES PARA LA CAPTACIÓN DE AGUA  
LLUVIA UTILIZANDO UN MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL EN EL  
MUNICIPIO DE YOPAL, DEPARTAMENTO CASANARE**

Universidad El Bosque  
Facultad de Ingeniería Ambiental  
Bogotá, 29 de agosto de 2018

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

**DISEÑO HIDROLÓGICO DE EMBALSES PARA LA CAPTACIÓN DE AGUA LLUVIA UTILIZANDO UN MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL EN EL MUNICIPIO DE YOPAL, DEPARTAMENTO CASANARE**

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

**Ingeniero Ambiental**

Director (a):

Línea de Investigación:  
Manejo Integrado del Recurso Hídrico

Universidad El Bosque  
Programa de Ingeniería Ambiental  
Bogotá, Colombia

2018

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

Acta de sustentación

### **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.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Resumen .....</b>	<b>1</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Planteamiento del problema .....</b>	<b>2</b>
2.1. Pregunta problema.....	2
<b>3. Objetivos .....</b>	<b>3</b>
3.1. Objetivo general .....	3
3.2. Objetivos específicos.....	3
<b>4. Justificación .....</b>	<b>3</b>
<b>5. Marco de referencia .....</b>	<b>4</b>
<b>5.1. Estado del arte.....</b>	<b>4</b>
5.1.1. Global.....	4
5.1.2. Nacional.....	4
5.1.3. Local.....	5
<b>5.2. Antecedentes .....</b>	<b>5</b>
<b>5.3. Marco Geográfico .....</b>	<b>6</b>
5.3.1. Ubicación y localización.....	6
<b>5.4. Marco teórico.....</b>	<b>7</b>
5.4.1. Sistemas urbanos de drenaje sostenibles (SUDS).....	7
5.4.2. Línea clave.....	7
<b>5.5. Marco conceptual .....</b>	<b>7</b>
5.5.1. Aprovechamiento de agua .....	7
5.5.2. Topografía .....	8
5.5.3. Elevación.....	8
5.5.4. Curvas de nivel .....	8
5.5.5. Cordilleras y cumbres.....	8
5.5.6. Laderas .....	8
5.5.7. Vertientes .....	8
5.5.8. Valles .....	9
5.5.9. Cuenca hidrográfica.....	9
5.5.10. Área de la cuenca.....	9
5.5.11. Divisoria de aguas .....	9
5.5.12. Escorrentía.....	9
5.5.13. Infiltración.....	9
5.5.14. Intensidad de lluvia .....	10
5.5.15. Tiempo de concentración.....	10
5.5.16. Coeficiente de escorrentía .....	10
5.5.17. Embalse .....	11
5.5.18. Aliviadero .....	11
5.5.19. Coeficiente de Manning.....	11

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

<b>5.6. Marco institucional.....</b>	<b>11</b>
<b>5.7. Marco legal .....</b>	<b>12</b>
<b>6. Metodología .....</b>	<b>14</b>
<b>6.1. Desarrollo metodológico.....</b>	<b>17</b>
6.1.1. Objetivo específico 1. Realizar análisis de los flujos de agua lluvia en el relieve mediante modelos de elevación digital.....	17
6.1.2. Objetivo específico 2. Evaluar potenciales áreas de captación teniendo en cuenta la interpretación de flujos en el relieve de la región.....	18
6.1.3. Objetivo específico 3. Realizar dimensionamiento hidrológico de los embalses.....	18
<b>7. Plan de trabajo.....</b>	<b>27</b>
<b>8. Resultados.....</b>	<b>28</b>
<b>8.1. Objetivo específico 1. Realizar análisis de los flujos de agua lluvia en el relieve, mediante modelos de elevación digital.....</b>	<b>28</b>
<b>8.2. Objetivo específico 2. Evaluar potenciales áreas de captación para obtener la mayor recolección de agua lluvia posible. ....</b>	<b>29</b>
<b>8.3. Objetivo específico 3. Realizar dimensionamiento hidrológico de los embalses para que estos cuenten con la capacidad necesaria con base en los cálculos previos. ....</b>	<b>33</b>
<b>9. Conclusiones.....</b>	<b>42</b>
<b>10. Recomendaciones.....</b>	<b>43</b>
<b>11. Bibliografía .....</b>	<b>44</b>

### LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Marco normativo para el dimensionamiento de embalses .....</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 2. Variables consideradas para el dimensionamiento de embalses .....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 3. Coeficiente de escorrentía de acuerdo al tipo de superficie .....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 4. Datos del promedio de precipitación diaria de la Estación El Morro en el municipio Yopal. ....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 5. Intensidades – Tiempo de duración.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 6. Promedios mensuales de lluvia del año 1974 al año 2012, municipio Yopal.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 7. Distribución anual de caudales. Río Cravo Sur, estación Puente La Cabaña.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 8. Caudal de diseño .....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 9. Diferencia entre la oferta del embalse No. 1 con la demanda de la población del municipio Yopal.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 10. Diferencia entre la oferta del embalse No. 2 con la demanda de la población del municipio Yopal.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 11. Diferencia entre la oferta del embalse No. 3 con la demanda de la población del municipio Yopal.....</i>	<i>41</i>

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Localización geográfica de Yopal</i> .....	6
<i>Figura 2. Marco institucional para el dimensionamiento hidrológico de embalses</i> .....	12
<i>Figura 3. Esquema de la metodología para el dimensionamiento de embalses</i> .....	16
<i>Figura 4. Descarga del modelo de elevación digital (DEM)</i> .....	17
<i>Figura 5. Curvas de nivel en QGIS</i> .....	18
<i>Figura 6. Localización de la estación meteorológica</i> .....	20
<i>Figura 7. Curvas IDF</i> .....	22
<i>Figura 8. Calculo de las dimensiones de los embalses Pipe Flow Advisor</i> .....	23
<i>Figura 9. Cálculo de las dimensiones de los canales Pipe Flow Advisor</i> .....	24
<i>Figura 10. Promedio de precipitación mensual durante 39 años</i> .....	25
<i>Figura 11. Flujos de agua lluvia en SAGA GIS</i> .....	28
<i>Figura 12. Flujos de agua lluvia en el municipio Yopal</i> .....	29
<i>Figura 13. Áreas potenciales de captación de agua lluvia</i> .....	30
<i>Figura 14. Área de captación No. 1</i> .....	31
<i>Figura 15. Pendiente del área de captación No.1</i> .....	31
<i>Figura 16. Áreas de captación No. 2 y 3</i> .....	32
<i>Figura 17. Pendiente del área de captación No.2</i> .....	32
<i>Figura 18. Pendiente del área de captación No.3</i> .....	33
<i>Figura 19. Dimensiones del embalse No. 1</i> .....	35
<i>Figura 20. Dimensiones del canal del embalse No.1</i> .....	35
<i>Figura 21. Dimensiones del embalse No. 2</i> .....	36
<i>Figura 22. Dimensiones del canal del embalse No. 2</i> .....	37
<i>Figura 23. Dimensiones del embalse No. 3</i> .....	37
<i>Figura 24. Dimensiones del canal del embalse No. 3</i> .....	38
<i>Figura 25. Oferta del embalse No. 1</i> .....	39
<i>Figura 26. Oferta del embalse No. 2</i> .....	40
<i>Figura 27. Oferta del embalse No. 3</i> .....	41
<i>Figura 28. Distribución anual de caudales. Río Cravo Sur, estación Puente La Cabaña</i> .....	42

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

### LISTA DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1. Tiempo de concentración</i> .....	10
<i>Ecuación 2. Método racional</i> .....	19
<i>Ecuación 3. Intensidad</i> .....	21
<i>Ecuación 4. Oferta hídrica del embalse</i> .....	25
<i>Ecuación 5. Tiempo de concentración del área de captación número uno</i> .....	33
<i>Ecuación 6. Tiempo de concentración del área de captación número dos</i> .....	34
<i>Ecuación 7. Tiempo de concentración del área de captación número tres</i> .....	34
<i>Ecuación 8. Volumen de agua del embalse No. 1</i> .....	34
<i>Ecuación 9. Volumen de agua del embalse No. 2</i> .....	36
<i>Ecuación 10. Volumen de agua del embalse No. 3</i> .....	37

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

## Resumen

Los diseños tradicionales no siempre se adaptan a las características de un territorio generando inconvenientes posteriores. Es por esta razón que, surge el concepto de *línea clave* que busca interpretar y diseñar infraestructura, de manera que se adapte al paisaje, teniendo como base el movimiento del agua sobre la superficie para lograr un diseño que maximice el aprovechamiento de agua lluvia. En el presente documento se aplica dicho concepto para proponer tres embalses como posible fuente de abastecimiento de agua a la población del municipio Yopal (Casanare), ya que no cuenta con un acueducto desde el año 2011. En consecuencia, se descargó y se procesó un modelo de elevación digital (DEM) con la finalidad de analizar dirección de flujo, tamaño de subcuencas y posible ubicación de los embalses a proponer.

Posteriormente, se procesaron los datos de precipitación de la estación del IDEAM y se utilizó el método racional, de la Norma Técnica de Servicio 085 del año 2017, con el objetivo de obtener un caudal de agua lluvia aprovechable para almacenarse en los tres embalses propuestos, utilizando el software *Pipe Flow Advisor* para dimensionar cada embalse. Como resultado, se realizó un análisis del porcentaje aportado por los embalses con respecto a la demanda de agua de la población según el RAS 2017 y la evaluación del impacto que ocasionaría la captación de los flujos de agua lluvia al río Cravo Sur.

### Palabras clave

Diseño hidrológico, DEM, Línea Clave, Aprovechamiento de agua lluvia.

## Abstract

### Key words

Traditional designs do not always adapt to the characteristics of a territory generating later inconveniences. It is the reason that the concept of key line arises that seeks to interpret and design infrastructure, so that it adapts to the landscape, based on the movement of water on the surface to achieve a design that maximizes the use of rainwater. This document applies this concept to propose three reservoirs as a possible source of water supply to the population of the municipality of Yopal (Casanare), it does not have an aqueduct since 2011. Consequently, a digital elevation model (DEM) was downloaded and processed in order to analyze flow direction, size of sub-basins and possible location of the proposed reservoirs.

Subsequently, the precipitation data from the IDEAM station was processed and the rational method of Norma Técnica de Servicio 085 of 2017 was implemented, in order to obtaining a usable flow of rainwater to be stored in the three proposed reservoirs, using the Pipe Flow Advisor software to dimension each reservoir. As a result, an analysis was made of the percentage contributed by the reservoirs with respect to the population's water demand according to RAS 2017 and the evaluation of the impact that the capture of rainwater flows to the Cravo Sur river would cause.

### Key words

Hydrological design, DEM, Key Line, Rainwater harvesting.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

## 1. Introducción

Los planes de ordenamiento territorial no se basan en el movimiento del agua sobre el terreno para obtener diseños eficientes con el propósito de planificar correctamente un asentamiento urbano. Esto ocasiona que en el tiempo se generen problemas de desabastecimiento e inundaciones, CONECTOR frecuentes hoy en día en el territorio colombiano, lo que hace que la administración tenga que incurrir en gastos para la mitigación y corrección del problema, sin lograr los resultados esperados.

Así pues, a partir del año 2011, en el municipio Yopal (Casanare), se ha venido presentando un problema de desabastecimiento de agua debido a un derrumbe que impactó la infraestructura del acueducto, encargado de suministrar agua a la población yopaleña. De ahí que, el presente documento esté orientado hacia el aprovechamiento de agua lluvia, teniendo como base fundamental el concepto de *línea clave* propuesto por Persival Alfred Yeomans en Australia. Este método interpreta y analiza el movimiento del agua desde el momento en que toca la superficie del suelo, con miras de buscar un diseño que incremente el aprovechamiento del agua para la planificación correcta de la infraestructura.

Con el fin de lograr este objetivo, en el presente documento se realizan las siguientes actividades:

Búsqueda de información topográfica del territorio, para lo cual se utiliza como herramienta de ingeniería un modelo de elevación digital (DEM) de la página del servicio geológico de Estados Unidos.

Obtención de la dirección de flujo de agua lluvia y subcuencas sobre el relieve, mediante el procesamiento del DEM con el software Q GIS y SAGA GIS.

Seleccionar las subcuencas con un área de captación mayor para maximizar la captación de agua lluvia. Paralelamente, se procesan datos de precipitación en Excel, teniendo en cuenta el método racional (NS-085/2017), y se dimensionan estructuras de almacenamiento con el software Pipe Flow Advisor. Además, que dicho software permite establecer las dimensiones que deberían tener los canales correspondientes a cada embalse.

Luego de tener las dimensiones de los embalses, se contempló la necesidad de analizar brevemente, de qué forma impactaría la utilización de los mismos como una de las fuentes de abastecimiento para la población, partiendo de la demanda de agua y el porcentaje de esa demanda que se alcanzaría a cubrir con el agua lluvia captada en los embalses. Lo que da lugar, al impacto que se podría llegar a ocasionar al río, en términos hidrológicos, ya que el río es fundamental para el desarrollo de las actividades de la población en Yopal.

Por último, los resultados obtenidos se presentan con su respectivo análisis, para una mejor comprensión de los mismos, finalizando el documento con las conclusiones de acuerdo a los objetivos específicos planteados y al desarrollo de la metodología, que nos obliga a resaltar algunos aspectos específicos de los resultados. Es así como se obtiene un diseño que aproveche el agua lluvia del territorio contriviendo al problema de desabastecimiento de agua que tiene el municipio de Yopal.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

## 2. Planteamiento del problema

Con el paso del tiempo, se han realizado esfuerzos en todo el mundo para lograr que el desarrollo vaya de la mano con la conservación del ambiente, estableciendo que las políticas deben ir orientadas hacia un desarrollo sostenible, es decir, que busquen mejorar el bienestar de las personas de una manera perdurable, pensando no sólo en el momento presente sino también en el desarrollo de las generaciones futuras.

Es así como, hoy se cuenta con instrumentos que nos ayudan a no cometer los mismos errores ambientales del pasado, como los proyectos, programas, planes y políticas; que deben fomentar una gestión y un uso racional y eficiente de los recursos, para que de esta manera los logros frente al desarrollo sean duraderos (Piñeiro, 1996).

Ahora bien, en cuanto al uso racional y eficiente de los recursos, Gras (2009) señala que los diseños tradicionales no siempre se adaptan a las características de un territorio. Lo que nos lleva a nuestro problema central.

Yopal cuenta con 149.546 habitantes (Semana, 2015) los cuales demandan un aproximado de 20.936.440 litros al día de agua, teniendo en cuenta la dotación estimada para agua potable por persona al día, según el RAS 2017; donde los datos para una población de menor altura a 1000 m.s.n.m. es de 140 litros por habitante día, que se presenta en Yopal.

Así mismo, este municipio tiene en la actualidad problemas de desabastecimiento de agua, debido a que no cuenta con acueducto desde el año 2011, después de que un derrumbe dañara la infraestructura que había en ese momento (Semana, 2015). Paralelamente a este inconveniente, se ha señalado en distintas ocasiones el riesgo que tiene esta ciudad de remoción en masa, al estar ubicada en una zona donde hay un flujo torrencial por parte del Río Cravo Sur, teniendo como antecedente una avalancha ocurrida en el año 1920 (El Tiempo, 1999).

Pese a los esfuerzos realizados por la Alcaldía de Yopal, siendo el año 2018, no se cuenta con un acueducto y las fuentes de abastecimiento utilizadas no tienen la capacidad suficiente para proveer a la población. En efecto, las obras que se han elaborado son únicamente de corrección, como diques para el cauce o la captación de agua en pozos profundos. Sin embargo, no se ha llevado a cabo un diseño que considere la prevención con respecto a la planeación del municipio de Yopal, basada en los flujos de agua como lo propone el diseño hidrológico aplicado a asentamientos urbanos y uno de sus representantes Eugenio Gras en su libro “Cosecha de agua y tierra” (Gras 2009).

Hasta el momento la Alcaldía de Yopal no ha contemplado el aprovechamiento de agua lluvia como fuente de abastecimiento, subestimando su potencial para suministrar este recurso y olvidando los posibles riesgos que conlleva no tener un control sobre los flujos de agua lluvia que se dan sobre el relieve, el cual está muy cerca del casco urbano.

### 2.1. *Pregunta problema*

¿Cómo se puede aprovechar el agua lluvia para utilizarla como fuente de abastecimiento en Yopal?

Respuesta: Mediante un diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

### **3. Objetivos**

#### *3.1. Objetivo general*

Realizar una propuesta de aprovechamiento de agua lluvia para el suministro de la población del municipio de Yopal, departamento Casanare.

#### *3.2. Objetivos específicos*

- Realizar análisis de los flujos de agua lluvia en el relieve, mediante modelos de elevación digital.
- Evaluar potenciales áreas de captación para obtener la mayor recolección de agua lluvia posible.
- Realizar dimensionamiento hidrológico de los embalses para que estos cuenten con la capacidad esperada con base en un análisis de oferta y demanda.

### **4. Justificación**

En el mundo, 500 millones de personas no tienen acceso al agua potable, dentro de 20 años serán 3 mil millones (Gras, 2009). Queriendo decir con ello que el problema demanda una respuesta inmediata para evitar un desabastecimiento de agua a nivel mundial, a causa de una inadecuada gestión del recurso hídrico.

Por su parte, Colombia ha realizado grandes inversiones con miras en mitigar los efectos del Fenómeno del Niño, ya que el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), estimó que hay una probabilidad del 70% de que este fenómeno se presente a finales del año 2018 y comienzos del 2019. Ante lo que el ministro de ambiente, Ricardo Lozano, destacó que las regiones más afectadas serían Caribe, Tolima y Huila; por consiguiente, aproximadamente 350 municipios tendrán problemas de desabastecimiento de agua (Fernández, 2018).

Del mismo modo, en Yopal debido a la mala administración de los recursos, la población no ha podido contar con un servicio eficiente que le permita acceder al agua potable, afectando no sólo su calidad de vida sino también al desarrollo de sus actividades económicas. Conjuntamente, la falta de alternativas hace que la población dependa de la terminación de la construcción del acueducto, mientras se ignoran otros posibles riesgos a causa del flujo torrencial del río Cravo Sur.

De acuerdo con lo establecido por el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, el agua se considera un derecho fundamental, además de ser un servicio público. De manera que, todas las personas deberían poder acceder al agua potable mediante el servicio de acueducto, en condiciones de cantidad y calidad suficiente (sentencia T- 740, 2011). Además, todo asentamiento humano está en función del agua. Cualquier desarrollo que pretenda ser sustentable debe considerar, en primer lugar, la disponibilidad de este recurso vital (Gras, 2009).

Así pues, utilizando un modelo de elevación digital se puede realizar un análisis del contorno del paisaje para determinar el diseño y ubicación de canales de conducción y embalses, teniendo en cuenta el movimiento del agua sobre las inclinaciones del terreno desde que entra en contacto con la superficie del suelo, aprovechando la energía gravitacional y el análisis de los datos pluviométricos de la región (Gras, 2009), con el fin de analizar si es viable el uso de agua lluvia como fuente de abastecimiento para la

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

población al mismo tiempo que se mitiga el riesgo por inundación o avalancha por la creciente del río Cravo Sur.

## 5. Marco de referencia

### 5.1. Estado del arte

Se realizó una revisión bibliográfica de artículos científicos, con la intención de llevar a cabo un análisis de la importancia del tema que se aborda en este trabajo sobre la captación de agua lluvia para el abastecimiento de la comunidad, por lo que se han seleccionado varios artículos de carácter global, nacional y local.

#### 5.1.1. Global

A nivel global, el artículo seleccionado fue “*Control and utilization method for urban rain-flood*”, es decir, Método de control y utilización de las inundaciones urbanas, escrito por Jun Yan, Changyou Jiang, Sainan Chen y Ju Zhang; en el año 2011. El propósito de este proyecto es analizar el comportamiento de las inundaciones en el entorno urbano para elaborar un sistema que conduzca y almacene agua lluvia. El mecanismo de análisis de desastres urbanos por inundación, reveló que si la intensidad de lluvia-inundación es más alta que el punto límite habrá un desastre por inundación, así mismo, si la intensidad es menor se dará lugar a un desastre por sequía. De acuerdo con el análisis realizado, establecieron algunas medidas: aprovechar los techos de las casas e implementar unas tuberías que conduzcan de manera subterránea hacia un canal común, para que el agua llegue al reservorio donde se almacenaría el agua lluvia recolectada. Por otra parte, se quería mejorar el transporte del agua utilizando la tubería subterránea y haciendo subdivisiones a la misma para así, poder separar aguas domésticas, aguas negras y aguas grises. Además, proponen incluir de manera legal este tema, es decir, que se establezca una política sólida relacionada con la captación de agua lluvia para evitar las inundaciones en las áreas urbanas. Entre otras medidas para el aprovechamiento y el tratamiento del agua recolectada (Yan, Zhang, Zhang, & Yang, 2011).

#### 5.1.2. Nacional

En Colombia, el ingeniero ambiental Gonzalo Alberto Forero Buitrago, publicó el artículo *Dimensionamiento de canales y embalses para conducir y almacenar agua lluvia para abastecer la población de altos de Cazucá (Soacha-Colombia) utilizando D.E.M.* En el proyecto se busca dar solución a un problema de desabastecimiento de agua y de inundación, generado por una mala gestión de aguas residuales domésticas y por una infraestructura ineficiente para conducir tanto las aguas residuales domésticas como el agua lluvia. Debido a lo anterior, se llevó a cabo una propuesta de conducción y almacenamiento de agua lluvia por gravedad, usando la topografía satelital, la cual permite visualizar las curvas de nivel; para obtener información que permitiera el trazado de los canales. Luego, se visualizaron algunas calles por medio de Google Earth Pro, haciendo posible la conducción de agua mediante estructuras subterráneas, para finalmente ser almacenada en embalses. Paralelamente, el análisis de la intensidad de lluvia y la interpretación de los flujos de agua permitieron obtener como resultado el dimensionamiento de los embalses y la conducción del agua lluvia hacia los mismos. De ahí que, el dimensionamiento se realizará de manera que se pudiera almacenar el 70% de la totalidad de agua lluvia del mes de máxima precipitación, lo que implica que se alcanza a duplicar la demanda de agua del área de captación mientras que a su vez se mitigan los riesgos por inundación (Forero, 2017).

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

### 5.1.3. Local

Por otro lado, el autor mencionado anteriormente, Gonzalo Alberto Forero Buitrago, publicó su artículo *Dimensionamiento de embalses para fincas en Colombia usando como herramienta los modelos de elevación digital*, este proyecto fue realizado en Casanare, más específicamente en Hato Corozal en la Finca Mataredonda; con el propósito de suministrarle agua a plantas y animales de la finca en cualquier momento que se pudiera requerir en sus actividades diarias. De modo que, fue necesario descargar el modelo de elevación digital de la página NASA Reverb del satélite ASTER AST\_L1-V003, para posteriormente procesarse en QGis, sacar las curvas de nivel y por consiguiente las direcciones de los flujos del agua lluvia en el terreno. Luego, a través del método racional se calcula la tormenta de diseño para dimensionar los embalses. Finalmente, se calculó la demanda de agua de la finca y de acuerdo con la capacidad de los embalses dimensionados se concluyó que se captaría agua suficiente en los embalses para cubrir lo requerido en la finca (Forero, 2016).

### 5.2. Antecedentes

En el año 2011 un deslizamiento destruye el acueducto en Yopal. A partir de ese momento, el Gobierno Nacional ha coordinado acciones para restablecer el servicio con participación de: la Gobernación de Casanare, el municipio de Yopal; la empresa de acueducto, alcantarillado y aseo de Yopal S.A.; y el Fondo de Adaptación (Semana, 2015).

Más tarde, en abril 30 del año 2015 se plantea la construcción de la nueva planta y es adjudicada al consorcio español Albengoa JPG, mientras que se abastece a la población mediante tres opciones: perforación de una red de pozos profundos, la construcción de una planta modular de tratamiento de agua y la contratación de una flotilla de carrozanques (Semana, 2015).

Por otra parte, los yopaleños hasta el año 2015 llegaron a pagar 27 mil millones de pesos en facturas por el servicio de agua potable y hasta 118 mil millones de pesos en la compra de agua en bolsa. Paralelamente, en abril se adjudicó la construcción de un acueducto al consorcio español Abengoa JPG con la suma de 56.147 millones de pesos y con un plazo de 18 meses (Semana, 2015).

Más adelante, en marzo de 2016, se inició la construcción del acueducto a través de la Financiera del Desarrollo Territorial S.A. (Findeter). Luego, en junio del mismo año, se invirtieron 8 mil millones de pesos en la utilización de 24 vehículos tipo cisterna con sus motobombas y mangueras (El Tiempo, 2017).

Luego, En el año 2017, los habitantes de Yopal agradecen las medidas tomadas (los pozos profundos y la planta temporal). Mientras que se invierten 65 mil millones de pesos para construir la línea de aducción, desde la bocatoma hasta la planta de tratamiento y a la red de distribución, en el puente La Cabuya, lo cual implica 3.570 metros; para beneficiar a 114 mil habitantes (El Tiempo, 2017).

Sin embargo, hay una inconformidad por parte de la población al ser informada de la ubicación de la bocatoma, ya que en ese punto el río tiene mucha fuerza, pero finalmente se resolvió dejar el mismo punto con ciertas adecuaciones para mitigar el riesgo de afectación a la infraestructura (El Tiempo, 2017).

Entonces en el año 2018, se reúnen representantes del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio; el Fondo de Adaptación; Gobernación de Casanare; la Alcaldía de Yopal; con la finalidad de hacer un cierre financiero para terminar la construcción del acueducto de Yopal. De modo que, el Fondo de Adaptación aportará 17 mil millones, el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio 6000 millones, la Alcaldía de

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

Yopal 10 mil millones de pesos (para la construcción de la línea de conducción entre Puente de Cabuya y Apartamento) (LaRepublica.co, 2018).

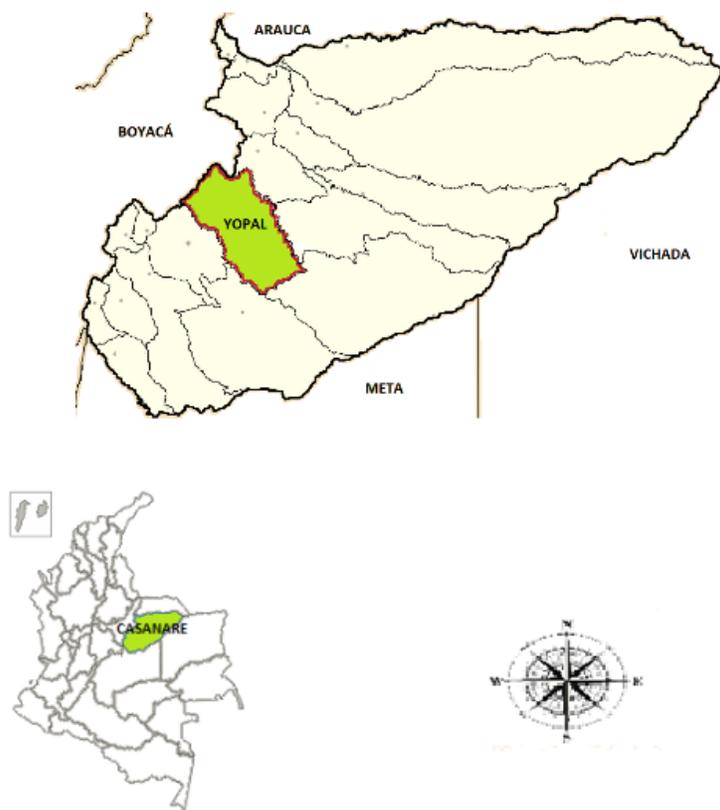
En consecuencia, hasta el 2018 Yopal continúa sin un acueducto. Se han invertido más de 230 mil millones de pesos, sin contar con el costo de la perforación de los pozos de 165 mil millones, para resolver el problema de abastecimiento de agua en la ciudad; van más de 17 meses de atraso en la obra, lo que da como resultado que la población yopaleña lleve 7 años sin un acueducto que les permita acceder a agua potable en sus hogares.

### 5.3. Marco Geográfico

#### 5.3.1. Ubicación y localización

Yopal se encuentra al noroeste del departamento Casanare, localizada entre las coordenadas  $4^{\circ} 54'$  y  $5^{\circ} 34'$  de latitud norte y entre  $72^{\circ} 35'$  y  $71^{\circ} 56'$  de longitud oeste. Su casco urbano se localiza en las coordenadas Lat. N  $5^{\circ} 21'$  y Long. W  $72^{\circ} 24'$ . En el *Figura 1*, se muestra la localización general del municipio en mención. Además, tiene una altitud que oscila entre 2000 m.s.n.m. en proximidades a la Cordillera Oriental, hasta los 150 m.s.n.m. en la planicie o llanura aluvial. Tiene una extensión superficial de alrededor de 2.771 km<sup>2</sup> (Calixto, 2017).

*Figura 1. Localización geográfica de Yopal*



(Adaptado de Sogeocol, 2018)

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

Por otra parte, las principales actividades económicas de Yopal, son la extracción de petróleo, la agricultura y la ganadería vacuna. La agricultura está conformada por cultivo de arroz, palma africana, maíz, plátano, café y yuca. Conjuntamente, el municipio percibe la mayor parte de los recursos por concepto de regalías gracias a la extracción de hidrocarburos (MinAgricultura, 2013).

Ahora bien, con relación a la geología, las formaciones en la que reposa el municipio cronológicamente se ubican desde el cretáceo hasta el cuaternario, dándose de oriente a occidente. Mientras que, la geomorfología del municipio se caracteriza por sus paisajes de montaña, piedemonte llanero, lomerío, planicies aluviales y valles. Por su parte, la hidrografía de Yopal está compuesta por drenajes dendríticos en los paisajes de montaña, en áreas de nacimiento y quebradas aparece el patrón de drenaje subparalelo y en áreas de sabana el patrón de drenaje es paralelo. En las áreas de valle las corrientes hídricas presentan un patrón de drenaje meándrico (Calixto, 2017).

En cuanto a la climatología, en el municipio de Yopal se caracteriza por tener una precipitación monomodal, entre los meses de abril-julio y un periodo seco desde el mes de diciembre-marzo. La temperatura media anual de Yopal, registra valores entre los 22°C y 30,4°C, debido a que la temperatura desciende dos grados, mientras que el periodo seco es el más caluroso (Calixto, 2017).

#### *5.4. Marco teórico*

##### *5.4.1. Sistemas urbanos de drenaje sostenibles (SUDS)*

Los SUDS son un conjunto de soluciones, que se aplican en un sistema de drenaje urbano para la retención de aguas lluvias en su punto de origen sin generar problemas de inundación, minimizando los impactos del sistema urbanístico en cuanto a la cantidad y calidad de la escorrentía, evitando así ampliaciones innecesarias en el sistema. La finalidad de los SUDS es “recrear” el ciclo hidrológico natural, previo a las actividades antrópicas realizadas en un territorio (NS -085,2009).

##### *5.4.2. Línea clave*

La línea clave es un método de análisis que estudia, analiza y modifica el movimiento del agua desde el momento en que toca la superficie del suelo, buscando un diseño que incremente el aprovechamiento del agua. Los proyectos en las líneas clave incorporan diseños que permiten la contención de las escorrentías (Gras, 2009).

#### *5.5. Marco conceptual*

##### *5.5.1. Aprovechamiento de agua*

Consiste en captar la escorrentía superficial generada dentro de un terreno en áreas contiguas a donde se quiera ser suministrada a la población para diferentes actividades (Japac, 2016).

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

### 5.5.2. Topografía

Ciencia que estudia el conjunto de principios y procedimientos que tienen por objeto la representación gráfica de la superficie de la Tierra, con sus formas y detalles, tanto naturales como artificiales. Puede darse en superficies planas, en pequeñas extensiones de terreno, utilizando la *geodesia* para áreas mayores (Gras, 2009).

### 5.5.3. Elevación

Es la distancia vertical o la altura sobre el nivel del mar de la superficie del terreno. Comúnmente se mide la elevación como la altura sobre o bajo el nivel del mar (Gras, 2009).

### 5.5.4. Curvas de nivel

También llamada isolínea o contorno, la curva de nivel es una línea imaginaria en la superficie de la tierra que conecta aquellos puntos que tienen la misma elevación con respecto al nivel del mar. Las isolíneas que se representan en un mapa son líneas, rectas o curvas, que describen la intersección de una superficie real o hipotética con uno o más planos horizontales. Vista desde arriba es la línea marcada por el agua de un charco, un estanque, un lado o la línea de agua que demarca una isla, es la curva de nivel de ese terreno a esa altura en particular (Gras, 2009).

### 5.5.5. Cordilleras y cumbres

El primer punto que toca el agua al descender de las nubes es la cumbre principal de las montañas en el horizonte, cuya cresta es el lomo que hace un terreno continuo e igual y que parece ir a cordel. Es la parte más alta del mismo, la cordillera que enlaza las crestas de todas las colinas, cerros y montañas, este punto es lo que define la cresta de cualquier elevación como una línea divisoria natural del paisaje. En las regiones montañosas o de relieve acusado, la línea divisoria se detecta muy fácilmente, ya que está marcada por las crestas y elevaciones donde se unen las últimas vertientes que enmarca una cuenca hidrográfica. En esa línea divisoria donde se asienta la *línea del parteaguas*, el agua que cae sobre esta línea parteaguas puede ser dirigida hacia un lado u otro de la cima a tan solo un centímetro de distancia (Gras, 2009).

### 5.5.6. Laderas

Ubicándose en la cima de una montaña y observando hacia ambos lados, se pueden ver laderas que bajan hacia arroyos colindantes, estas laderas se denominan *laderas primarias*. Las laderas desvían el agua a las vertientes, a un lado y otro partir de su propia línea parteaguas. La función principal de la ladera es dispersar el agua que escurre sobre la superficie del suelo durante las lluvias (Gras, 2009).

### 5.5.7. Vertientes

La unión de las laderas conforma una vertiente, la cual es un sitio por donde corre el agua. A las vertientes que se forman a cada lado de la cresta principal, se les llama vertientes primarias, y son las formas más pequeñas del paisaje. Es en las vertientes donde se encuentra la línea de agua de desagüe, marcada en el paisaje por el agua al correr su camino al mar, está dibujada por el centro de todos los riachuelos, arroyos y ríos del planeta. La función principal de la vertiente es acopiar y encauzar el agua que escurre sobre la superficie del suelo durante las lluvias (Gras, 2009).

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

#### 5.5.8. *Valles*

Son llanuras de tierra entre montes o alturas. Un valle también se forma cuando la vertiente entre dos laderas se abre, su grado de inclinación disminuye y forma un espacio amplio de menor inclinación (Gras, 2009).

#### 5.5.9. *Cuenca hidrográfica*

Espacio geográfico que contiene los escurrimientos de agua y que los conduce hacia un punto de acumulación terminal, cuando este punto es el mar se trata de una cuenca hidrográfica abierta, y de otra manera se trata de una cuenca cerrada (Gras, 2009).

#### 5.5.10. *Área de la cuenca*

La extensión del territorio en donde se encuentra el cauce principal y lugar donde se recolecta las aguas conforma una cuenca y se mide en kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>) se distinguen las áreas aferentes superficiales y subterráneas, éstas se delimitan por las divisorias de agua superficial y subterránea, las cuales no suelen coincidir. De modo que, cuando se habla del área aferente, o del área de una cuenca particular, se hace referencia al área aferente superficial. La línea divisoria de aguas es la línea que une los puntos de cotas supremas en las vecindades entre cuencas. Así pues, el área de la cuenca, o área aferente de la corriente es el área acotada por la divisoria de aguas hasta un punto determinado de la corriente (CAR, 2015).

#### 5.5.11. *Divisoria de aguas*

Línea que separa dos espacios geográficos o cuencas hidrográficas. Así como los lugares bajos dentro de las grandes regiones, están conectados por la unión de cada curso de agua, corriente y río tributario al río principal. Líneas de separación que se pueden trazar entre cuencas hidrográficas o vertientes adyacentes y suelen coincidir con crestas montañosas, en las que cada lado conduce sus aguas hacia cauces, cuencas o mares distintos (Gras, 2009).

#### 5.5.12. *Escorrentía*

Es la lámina de agua que circula sobre la superficie en una cuenca de drenaje. Este flujo superficial se define como parte de la precipitación que al no infiltrarse ni evaporarse, fluye sobre la superficie del suelo y se concentra en los cauces y cuerpos del agua. La escorrentía se expresa en milímetros de lámina diaria, mensual o anual (IDEAM, 2013).

#### 5.5.13. *Infiltración*

Es el proceso por el cual el agua penetra desde la superficie del suelo hacia las capas interiores. En una primera etapa satisface la deficiencia de humedad del suelo en una zona cercana a la superficie, y posteriormente superando cierto nivel de humedad para formar parte del agua subterránea, saturando los espacios vacíos (Pérez, 2012).

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

#### 5.5.14. Intensidad de lluvia

Expresa la altura que alcanza en milímetros la lluvia caída en un metro cuadrado durante una hora ( $I = \text{mm/h}$ ) que equivale a litro por metro cuadrado por hora ( $\text{L/m}^2 \cdot \text{hora}$ ) y que también se puede expresar en litros por segundo por hectárea ( $\text{L/s} \cdot \text{Ha}$ ), que son unidad de volumen en un espacio y tiempo determinados. Más adelante en los resultados, podrá evidenciarse que para intervalos cortos la intensidad es muy superior a la registrada en los mayores. Por lo tanto, el método racional define la intensidad de lluvia como la intensidad media de la precipitación máxima, que dura igual o más que el tiempo de concentración (Biblioteca Atrium de las instalaciones: agua, 1992).

#### 5.5.15. Tiempo de concentración

Es el tiempo que tarda el agua desde que cae en el lugar más lejano de la cuenca hasta el punto de control para el dimensionamiento. De manera que, el caudal máximo de cálculo vendrá dado cuando toda la superficie de la cuenca aporte agua de escorrentía, para ello es necesario que la duración del aguacero sea superior al tiempo de concentración; en caso contrario, existirá alguna zona que no habrá contribuido cuando termine el aguacero (Biblioteca Atrium de las instalaciones: agua, 1992).

#### *Ecuación 1. Tiempo de concentración*

$$T = \left[ \frac{0,871 \times L^3}{H} \right]^{0,385}$$

Donde:

T = Tiempo de concentración (h)

L = Longitud de la corriente principal (km)

H = Diferencia de altura entre la cabecera de la cuenca y el punto de desague (m)

#### 5.5.16. Coeficiente de escorrentía

Establece la relación entre la lluvia caída y el caudal de agua que llega al punto de recolección de agua. Mediante este coeficiente se traducen las distintas permeabilidades del terreno, así, los terrenos pavimentados muy impermeables tendrán coeficientes próximos al 100% y los terrenos con mucha vegetación y suelos drenantes, escurrirán aproximadamente un 15% (Biblioteca Atrium de las instalaciones: agua, 1992).

El valor máximo se tomará cuando:

- La pendiente del terreno sea mayor del 10%, porque el agua tiene menos tiempo para infiltrarse.
- El terreno sea muy impermeable, con predominio de rocas o arcillas, o pavimentos impermeables.
- No exista vegetación o se presenten irregularidades en la superficie que retengan agua, valores inferiores al 10% del total de superficie.

El valor mínimo se tomará en las condiciones contrarias:

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

- La pendiente del terreno sea inferior al 3%
- El terreno sea permeable, gravas y arenas.
- Exista vegetación abundante y espesa, del 50 al 90% de la superficie total.

#### *5.5.17. Embalse*

Se denomina embalse a la acumulación de agua producida por la construcción de una presa sobre el lecho de un río o arroyo, la cual cierra parcial o totalmente su cauce, en este caso en particular, se acumula el agua antes de que forme parte del río (EPM, 2018).

#### *5.5.18. Aliviadero*

El vertedero o aliviadero es una estructura hidráulica construida para permitir el paso libre o controlado del agua almacenada en un embalse, cuando se alcanzan niveles altos en el mismo, generalmente durante la temporada de lluvias (EPM, 2018).

#### *5.5.19. Coeficiente de Manning*

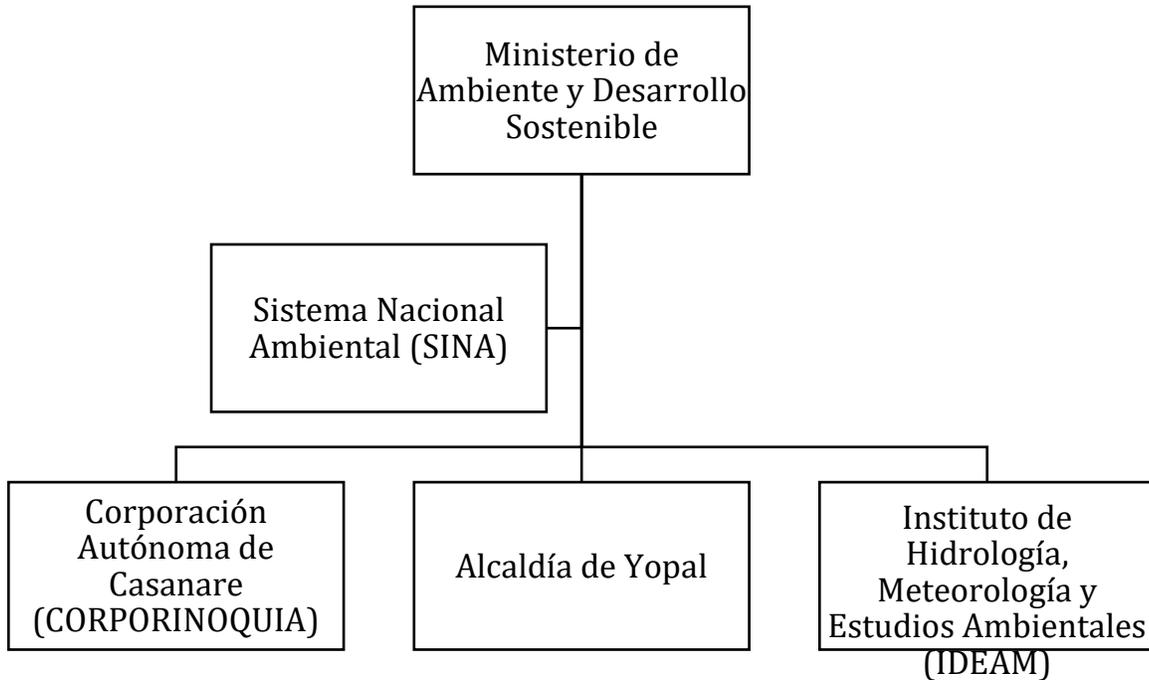
Manning consiguió definir e implementar en la hidráulica de canales la capacidad de transporte de una sección, a la cual le puso como distintivo e identificativo la letra n. (Oliveras, 2016).

### *5.6. Marco institucional*

Para la elaboración del marco institucional (*Figura 2*) se tienen en cuenta los actores, en este caso instituciones, que puedan verse involucradas en la ejecución del proyecto, bien sea porque son fuentes que poseen información para el dimensionamiento de los embalses o por las normas que expidieron como se puede evidencia más adelante en el marco legal.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

Figura 2. Marco institucional para el dimensionamiento hidrológico de embalses



(Autor, 2018)

### 5.7. Marco legal

Para la construcción del marco legal (*Tabla 1*) se tiene en cuenta la secuencia cronológica en la que surgen decretos, leyes, resoluciones y normas; con respecto a la gestión del recurso hídrico, donde también se incluye el control de la infraestructura para evitar posibles riesgos (Resolución 0154/2014). Luego la normatividad que se tiene en cuenta en la metodología, son la Resolución 0330/2017 y la Norma Técnica de Servicio 085/2017 para los cálculos correspondientes al dimensionamiento de los embalses.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

*Tabla 1. Marco normativo para el dimensionamiento de embalses*

<b>NORMA</b>	<b>ENTIDAD QUE EXPIDE</b>	<b>OBJETO</b>
<b>Decreto 2811 de 1974</b>	Presidencia de la República de Colombia Diciembre 18 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente
<b>Ley 99 de 1993</b>	Congreso de la República Diciembre 22 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA), entre otras disposiciones dictadas.
<b>Resolución 0154 de 2014</b>	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio Marzo 19 de 2014	Por la cual se adoptan los lineamientos para la formulación de los Planes de Emergencia y Contingencia para el manejo de desastres y emergencias asociados a la prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo y se dictan otras disposiciones.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

<b>Decreto 1076 de 2015</b>	Presidencia de la República de Colombia	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
<b>Resolución 0330 de 2017</b>	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio Junio 8 de 2017	Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS.
<b>Norma Técnica de Servicio NS-085/2017</b>	Acueducto de Bogotá Diciembre 6 de 2017	Define las directrices para el diseño, diagnóstico y análisis de alcantarillado pluvial y sanitario.

(Autor, 2018)

## 6. Metodología

El presente trabajo se lleva a cabo a través de una metodología cuantitativa, de tipo no experimental, con un diseño transeccional correlacional-causal. Ya que estos diseños describen relaciones entre dos o más variables en un momento determinado (Sampieri, 2014). Por un lado, se dice que es cuantitativa porque se analizan datos numéricos y se analizan así mismo los resultados obtenidos en los cálculos. De tipo no experimental, porque se está analizando los datos a partir de un fenómeno sin necesidad de provocarlo en sí.

Paralelamente, es un diseño transeccional correlacional-causal debido a que están estrechamente relacionadas las variables para utilizar el método racional que se explicará más adelante y que el resultado de los cálculos con el método racional conlleva a que se obtenga una proyección con la cual se dimensionan los embalses.

Según Sampieri (2014), el alcance de tipo correlacional además de explicar la relación entre variables, ofrece predicciones. Como podemos observar en la *Tabla 2.*, y como veremos a lo largo del desarrollo del documento, las variables a considerar se relacionan necesariamente y se requiere de predicciones que permitan calcular de manera acertada el caudal máximo que debe poder almacenarse en los embalses, así pues, se podría dar cumplimiento al objetivo general.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

Tabla 2. Variables consideradas para el dimensionamiento de embalses

Dimensión	Variable	Aspecto	Indicador	Técnica	Instrumento
Ecológica	Agua	Precipitación	Cantidad de lluvia en la zona de estudio (mm)	Recopilación y procesamiento de datos	Excel
		Caudal pico	Caudal de agua disponible para uso (L/s)	Procesamiento de datos, distribución logarítmica y método racional	Excel, NS-085
		Intensidad	Magnitud de los aguaceros por unidad de área (L/s*Ha)	Procesamiento de datos y curvas IDF	Excel
		Tiempo de concentración	Tiempo que tarda en recorrer la cuenca hasta el punto de recolección (s)	Procesamiento de datos	Excel
	Suelo	Tipo de suelo	Coefficiente de escorrentía según la pendiente del terreno y la cobertura	Revisión bibliográfica	NS-085
Área de captación		Área efectiva para el aprovechamiento de agua lluvia según la topografía del terreno	Procesamiento de DEM	SAGA GIS, Google Earth Pro	
Social	Servicios básicos	Demanda hídrica	Cantidad de agua que necesita un habitante según la normatividad vigente (L/hab*día)	Revisión bibliográfica y procesamiento de datos	RAS 2017

(Autor, 2018)

Con la intención de cumplir el objetivo específico *uno*, se descarga un modelo de elevación digital de 1 arc segundo de precisión de la página web del servicio geológico de Estados Unidos, USGS, de la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Dicho modelo, fue procesado en SAGA GIS, para poder obtener los flujos de agua en el área de estudio, para poder visualizarlos posteriormente en Google Earth Pro.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

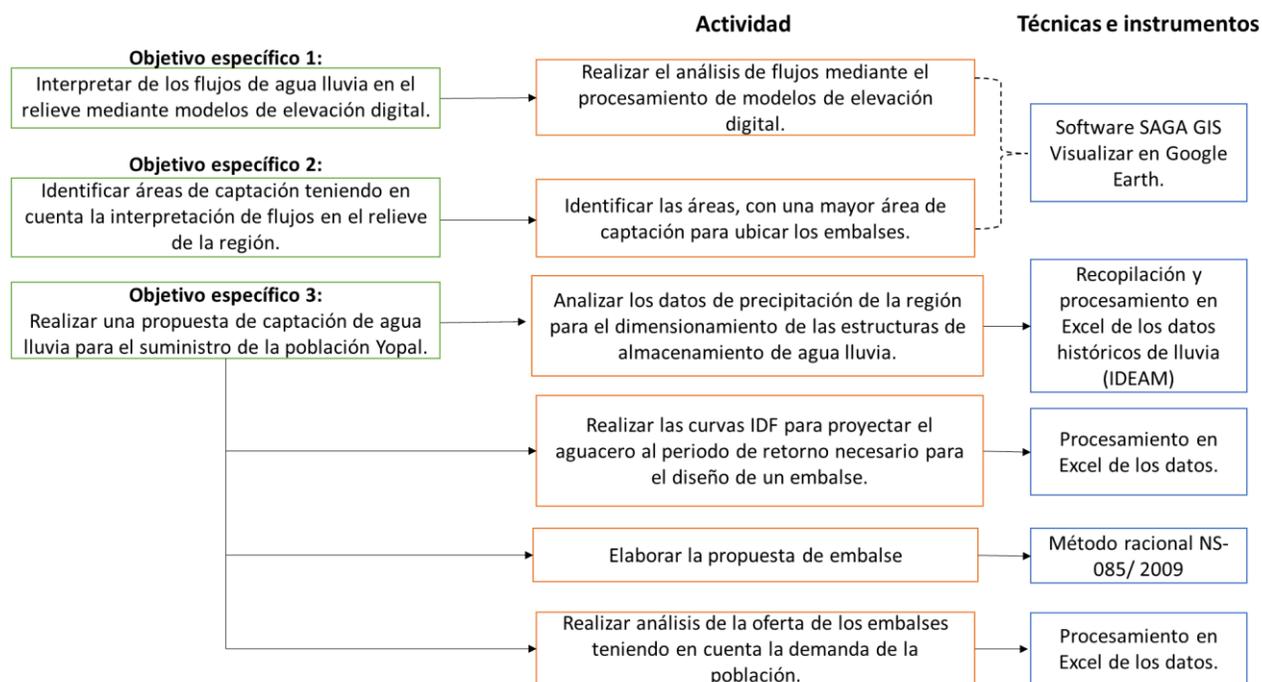
Para alcanzar el objetivo específico *dos* se obtienen las áreas de captación, considerando el mayor número de área de captación, los flujos de agua lluvia la ubicación, las elevaciones sobre el terreno y la cercanía a la ciudad y a su vez el riesgo que esté generando a la población dicho flujo sobre las laderas.

Finalmente, con respecto al objetivo específico *tres* se calcula la tormenta de diseño para el dimensionamiento de los embalses, por lo tanto, se acude al método racional (Norma Técnica de Servicio NS-085), la cual requiere:

- Área de captación previamente ubicadas y medidas en hectáreas (Ha).
- Coeficiente de escurrentía, numero adimensional que representa el porcentaje de escurrimiento de agua lluvia según el tipo de suelo y la inclinación del mismo.
- Curvas IDF, basadas en datos de precipitación máxima diaria, de la estación meteorológica más cercana del IDEAM, en este caso datos recopilados de 39 años (desde el año 1974 hasta el año 2012). Es así como se logra obtener la intensidad en unidades de L/s\*Ha para proceder a dimensionar los embalses, es decir, que cuenten con la capacidad necesaria para la recolección de agua de acuerdo a la proyección que se obtiene de las curvas IDF, para el periodo de retorno de 100 años de acuerdo a la norma (NS-085/2017).

A continuación, en la *Figura 3* se muestra un esquema del planteamiento metodológico para cada uno de los objetivos específicos, donde se visualizan las actividades y sus técnicas e instrumentos correspondientes, para proceder a una revisión bibliográfica y realizar el análisis de los resultados obtenidos.

*Figura 3. Esquema de la metodología para el dimensionamiento de embalses*



(Autor, 2018)

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

### 6.1. Desarrollo metodológico

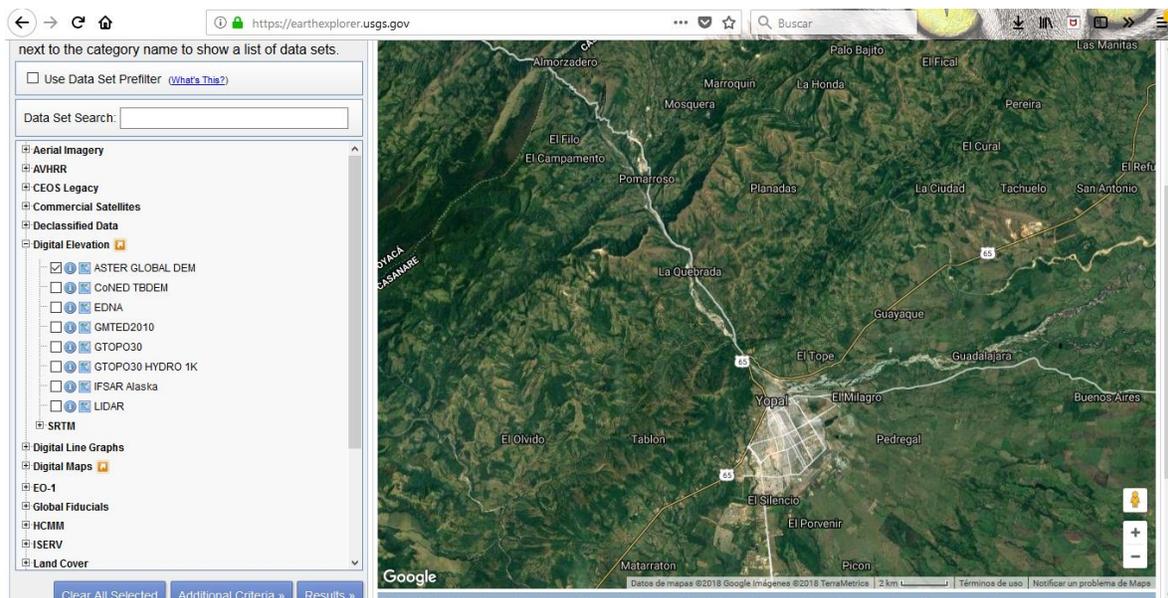
Considerando el esquema anterior, se presenta el desarrollo metodológico para cada uno de los objetivos específicos:

#### 6.1.1. Objetivo específico 1. Realizar análisis de los flujos de agua lluvia en el relieve mediante modelos de elevación digital.

##### 6.1.1.1. Descarga del modelo de elevación digital (DEM)

En primer lugar, para cumplir con el primer objetivo, se descargó el DEM de la página de USGS (*Earth explorer*), específicamente en la opción de *Data sets*, se encuentra *digital elevation* (Figura 4). Se ubicó el lugar de estudio, es decir, el municipio Yopal en el departamento de Casanare.

Figura 4. Descarga del modelo de elevación digital (DEM)



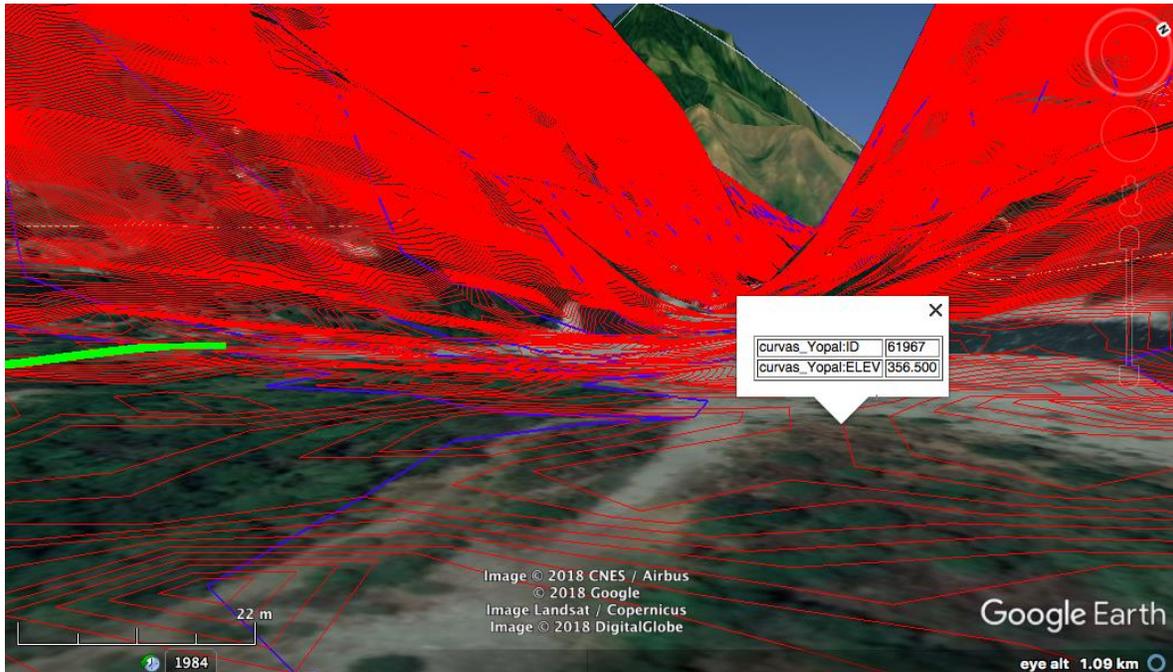
(Autor, 2018)

##### 6.1.1.2. Curvas de nivel de la zona de estudio

Luego, se abrió el archivo descargado en QGIS, para realizar el corte de la zona que se necesita y posteriormente se utilizó una herramienta del programa para extraer las curvas de nivel visualizadas en Google Earth Pro, como se aprecia en la Figura 5.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

Figura 5. Curvas de nivel en QGIS



6.1.2. *Objetivo específico 2. Evaluar potenciales áreas de captación teniendo en cuenta la interpretación de flujos en el relieve de la región.*

6.1.2.1. *Ubicación de las áreas de captación*

Se utilizó el software SAGA GIS, el cual permitió obtener las cuencas, se evaluaron según su capacidad y cercanía al municipio de Yopal, y se visualizó con los flujos de agua en Google Earth Pro. De forma tal que, se consideraron las cuencas con área de captación para la ubicación de los embalses y los posibles riesgos que pudieran llegar a ocasionar a la población. Es decir que, a través de Google Earth Pro se pudo observar la manera en como escurre el agua lluvia en el relieve.

Después, se midió el área de las cuencas seleccionadas mediante Google Earth Pro para realizar el dimensionamiento de embalses por el método racional en el objetivo específico *tres* (NS 085, 2017).

6.1.3. *Objetivo específico 3. Realizar dimensionamiento hidrológico de los embalses*

6.1.3.1. *Método racional*

El método racional, de acuerdo con su fórmula:

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

*Ecuación 2. Método racional*

$$Q = C \times I \times A$$

Donde:

*Q es el caudal de diseño (L/s\*Ha)*

*C es el coeficiente de escorrentía*

*I es la intensidad (L/s)*

*A es el área de captación (Ha)*

Requiere del área de captación, el cual se obtuvo en el *objetivo específico 2*; el coeficiente de escorrentía, tomado de la *Tabla 3*. En consecuencia, de acuerdo a las pendientes obtenidas en Google Earth Pro y a que se encuentra en zonas verdes, se eligió el valor de *0,40*.

*Tabla 3. Coeficiente de escorrentía de acuerdo al tipo de superficie*

Tipo de superficie	C
<b>ZONAS URBANIZADAS (Áreas residenciales, comerciales, industriales, vías, andenes, etc...)</b>	
Cubiertas	0,85
Superficies en asfalto	0,80
Superficies en concreto	0,85
Superficies adoquinadas	0,75
Vías no pavimentadas y superficies con suelos compactados	0,60
<b>ZONAS VERDES (Jardines, parques, etc...)</b>	
Terreno plano (Pendiente menor al 2%)	0,25
Terreno promedio (Pendiente entre el 2% y el 7%)	0,35
Terreno de alta pendiente (Pendiente superior al 7%)	0,40

(Norma Técnica de Servicio NS-085/2017)

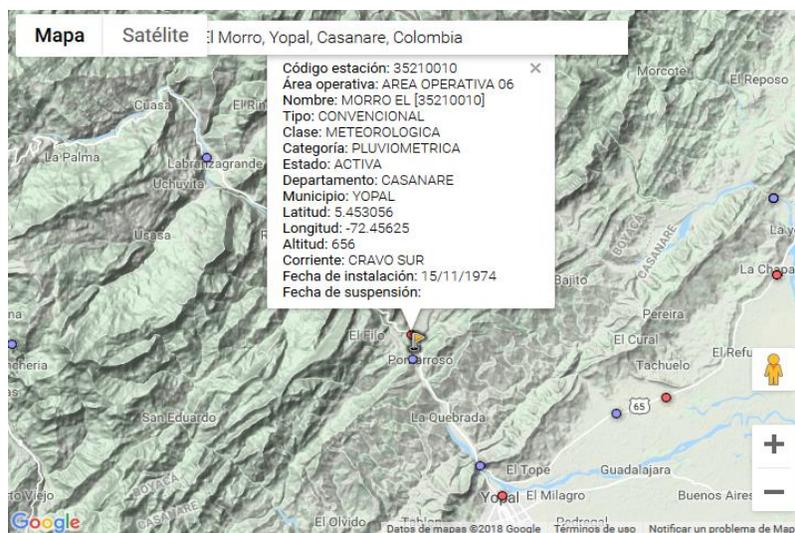
*6.1.3.2. Curvas Intensidad Duración y Frecuencia (IDF)*

Paralelamente, el valor de la intensidad de la ecuación anterior (*Ecuación 3*) se obtuvo de las curvas IDF. Lo anterior, gracias al desarrollo de un grupo de hidrólogos de una hoja de cálculo en Excel dispuesta en la plataforma *Hidrojing*, donde se encuentran distintos softwares de hidráulica e hidrología, entre otros aplicativos como la hoja de cálculo. Es así como, sólo requiere contar con datos históricos de al menos 20 años de la precipitación máxima diaria.

En este caso se obtuvieron datos de lluvia máxima en 24 horas, de 39 años, del IDEAM, de la estación más cercana (*Figura 6*) que cuenta con los datos necesarios. En la estación El Morro (Cod.35210010) se encuentra la información necesaria, la cual se organizó para obtener los promedios mensuales, de manera que se pudieran disponer en la hoja de cálculo de Excel (*Tabla 4*).

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

Figura 6. Localización de la estación meteorológica



(Autor, 2018)

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

Tabla 4. Datos del promedio de precipitación diaria de la Estación El Morro en el municipio Yopal

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1974	0	2,8	12,6	14,4	21,1	15,4	19,8	14,8	8,1	11,5	9,2	0,2
1975	0	0	10,2	18,41	18,87	65	19,73	14,13	19,73	11,56	7,57	6,54
1976	0,16	2,24	1,61	15,3	150,4 3	13,3	14,03	7,58	10,8	7,45	8,1	50
1977	0 3	0	2,09	62,0 3	11,06	17,2	16,41	15,74		14,9	10,6	0
1978	0,29	0,32	40,0 3	19,43	10,0 3	7,0 3	6,0 3	100,0 3	56,4	57,4 3	45,6	18,8
1979	5,2	0	72,2 3	107,4 3	120,2 3	45,2 3	24,6 3	91,6 3	92,6 3	96,2	114,0 1	2,5
1980	4	0 3	45,2 1	52,1 1	138,3 1	4	19,12	18	105	135,0 3	77,5 3	23,6
1981	0	77,2	80,8	87,3	123,9	104,8	112,9	51	103	62,81	25	45
1982	0	1,5	53	117,7	98,3 3	102	31,2	75,6	71,4 3	10,12	1,92	3,19
1983	1,0 3	74,5	41,4	91,8	38,5	53,7	111,3	77,2	95	78,5	25,2 3	15,5 3
1984	5,6	2,43	1,16	7,99	7,61	18,5	20,02	87,0 3	100	19	137	0
1985	0	0,03	1,5	7,53	13,89	22,76	14,76	48,2	28,01	60,5	89	0
1986	0	0	44,7	31,5	110,4	96,7	68,6	34,1	108,81	40,5	61	27,7
1987	18,9	24,3	24	77,4	68,4	112,2	13,7	36,2	28,4	62,6	57,9 1	23,01
1988	0	2,1	15,7	77,5	93	60,5 1	64,3 1	78,5	77,6	105,6	60	10,4
1989	37,2	38	11	40	87,8	91,2	37,7	58	60	67	67,5	0
1990	3	1,71	43	14,55	72,5 3	44,5 3	60	100,5	90,5	74	50	1
1991	3,2	10	5,22	7,83	74,7	33,4	89	49	63	64,0 3	30	0
1992	0	0	35	42,0 3	11,96	16,27	47,5	50	67	49,4	49	0
1993	11	13	23	74	77	47,6	46,5	39	65,7	50	35	0
1994	0	45,5	25,1 1	70,9	75	94,1	42	20,16	15,83	15	3,3	0,87
1995	2,8	8	9,1	15,9	16,4	11	14,8	11,1	45	136	24	11,7
1996	21,5	19,5	11,7	19,1	87,5	122	21,1	29	62	146,8	60,1	37
1997	0	46,7	47,5	72,5	89,5	53	46	106,6	72,1 1	47,5	42,7	0,3
1998	31	17	35,1	72	50,8	67	82	16	54,5	84,8	16,6	0,6
1999	3,3	67,8	9,8	13,8	18,4	47,2	55,7	80,2	64,1	46	22,6	0,5
2000	21,7	11	102,7 3	63	85,7	32,1	79,5	113	115,8	64,6	92,5	32,3
2001	0	1,1	22,3	35,7	88,6	58,7	53,8	32,7	87,5	106	98,2	60,4
2002	2,1	0	120,8	115,3	47,5	77,8	62,8	74,4	84,7	19,4	27,6	49,6
2003	0	3,3	41,8	80	130	62,9	39,3	78,9	170,2	93,8	50,3	27,8
2004	0	52,7	71,7 3	75,1	54	54,7	72,4	95,2	68,2	16,2	20	16,3
2005	2,3	68,8	38,6	49,6	130,1	96,8	72,8	73,6	53	72,2	38,3	1,8
2006	25,4 3	0	76,4	27,9	92,6	72	67,9	72,8	61,5	107,8	131,9	1,2
2007	0	33,2	110,4	46,9 3	95,2	55,7	47	39,8	55,8	56	27,8	2,8 3
2008	0,1	7,1	14,5	128,8	66,2	66	67	51,8	69,4 3	56,1	48,9	1,3
2009	22,4	12,9	29	13,1	54,8	124,9	49,8	69,5	56,1	38,6	54,4	8,8
2010	0	25,6	39,1	91,7	58,1	39	95,4	32,8	39,3	50,6 3	44,6	32,6
2011	6,8	39,3	8,8	70,8	274,6	46,6	59,5	46,1	53,2	115,7	59	70,2
2012	0	9,5	87,9 3	129,5	76	89,2	139,4	56,4 3	31,5	79,5	36	56,9
<b>PROMEDIO</b>	5,6264	18,924	31,903	54,334	71,188	59,564	53,069	51,749	64,639375	60,612647	45,294	16,6416667

(Autor, 2018)

Luego, de disponer los datos en la tabla, la hoja de cálculo nos dispuso la siguiente ecuación:

*Ecuación 3. Intensidad*

$$I = \frac{(8,5857 \times T)^{0,499749}}{t^{0,61885}}$$

Donde:

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

$I$  es la intensidad (mm/hr)

$T$  es el periodo de retorno (años)

$t$  es el tiempo de la duración de la precipitación (minutos)

Luego, a partir de la Ecuación 3, se obtuvo la Tabla 5, que a su vez nos permitió elaborar las curvas IDF que se presentan seguidamente de la tabla:

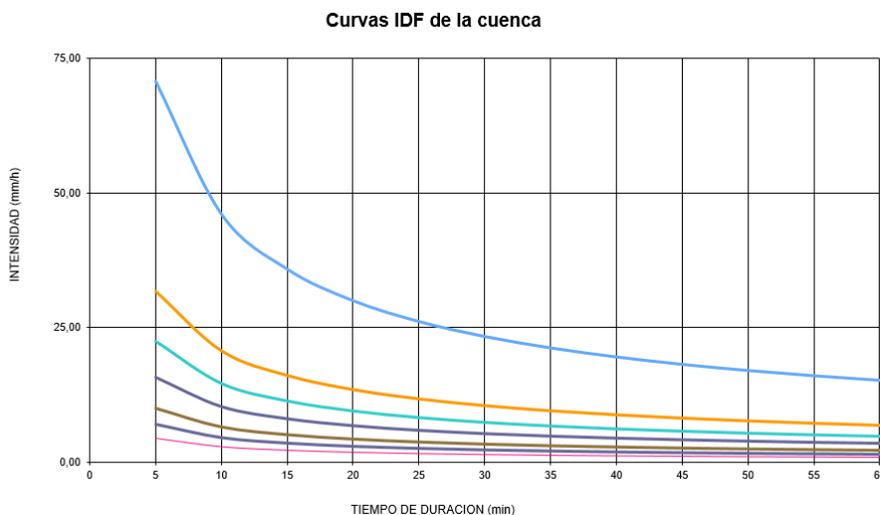
Tabla 5. Intensidades – Tiempo de duración

Tabla de intensidades - Tiempo de duración												
Frecuencia años	Duración en minutos											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	4.48	2.92	2.27	1.90	1.66	1.48	1.34	1.24	1.15	1.08	1.02	0.96
5	7.09	4.62	3.59	3.01	2.62	2.34	2.13	1.96	1.82	1.70	1.61	1.52
10	10.02	6.53	5.08	4.25	3.70	3.31	3.01	2.77	2.57	2.41	2.27	2.15
25	15.84	10.32	8.03	6.72	5.85	5.23	4.75	4.37	4.07	3.81	3.59	3.40
50	22.40	14.59	11.35	9.50	8.27	7.39	6.72	6.19	5.75	5.39	5.08	4.81
100	31.68	20.63	16.05	13.43	11.70	10.45	9.50	8.75	8.13	7.62	7.18	6.81
500	70.80	46.10	35.87	30.02	26.15	23.36	21.23	19.55	18.18	17.03	16.05	15.21

(Autor, 2018)

La Figura 7, obtenida a partir de la tabla anterior, mostró el comportamiento de la lluvia a medida que pasa el tiempo, es así como se tiene en cuenta la intensidad de lluvia que haya según el área de captación determinado, para poder calcular el caudal máximo que se deba almacenar en el embalse correspondiente.

Figura 7. Curvas IDF



(Autor, 2018)

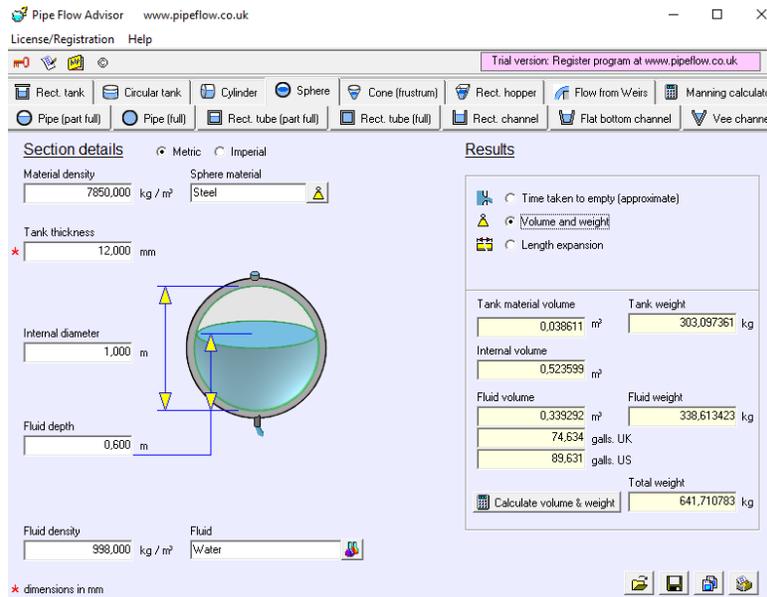
### 6.1.3.3. Dimensiones de embalses

Para conocer las dimensiones de cada uno de los embalses se utilizó el programa *Pipe Flow Advisor* en versión de prueba (Figura 8), se seleccionó la forma en la que se deseaba que fuera el embalse y posteriormente se fijaron los valores de diámetro (*internal diameter*) y la profundidad (*fluid depth*). Luego, teniendo en cuenta el volumen máximo de agua que necesita captarse, en la columna derecha, se

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

seleccionó la opción volumen y peso (*Volume and weight*); y finalmente la opción calcular. El programa mostró entonces, el volumen del fluido que se va a captar, de manera que, según dicho cálculo se empezaron a ajustar los valores de diámetro y profundidad hasta alcanzar el volumen deseado.

Figura 8. *Calculo de las dimensiones de los embalses Pipe Flow Advisor*



(Autor, 2018)

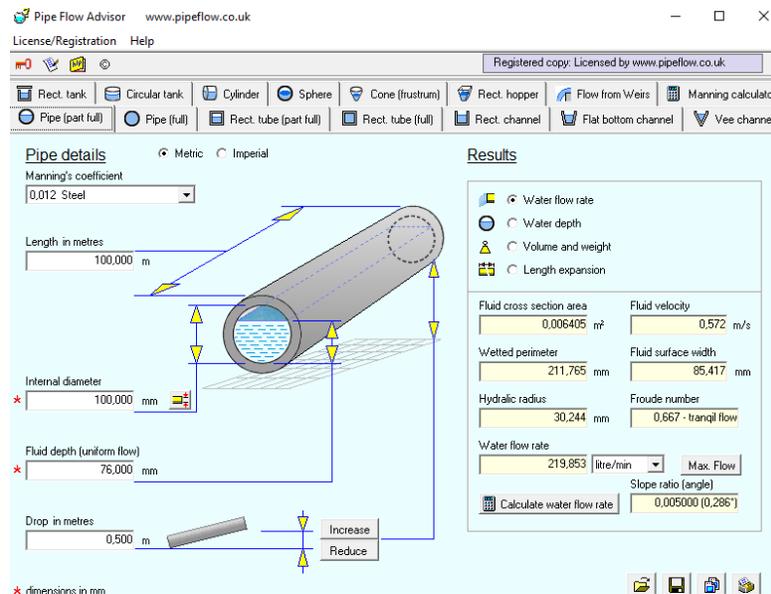
#### 6.1.3.4. Dimensiones de los canales

Paralelamente, en el mismo programa se calcularon las dimensiones de los canales de acuerdo al mayor caudal, es decir, el caudal correspondiente al período de retorno de 100 años, dependiendo del área de captación. De ahí que, se pudieran obtener los canales para los tres embalses sugeridos ya que poseen caudales diferentes.

Se considera el coeficiente de Manning, de acuerdo al tipo de material que se desee utilizar, la longitud del canal, el diámetro interno, la profundidad del fluido y la pendiente en que se va a disponer el canal.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

Figura 9. Cálculo de las dimensiones de los canales Pipe Flow Advisor



(Autor, 2018)

#### 6.1.3.5. Análisis oferta vs. Demanda

Adicional al dimensionamiento de los embalses, se quiso observar que impacto podría llegar a tener este en cuanto a la demanda del municipio que se busca satisfacer por parte de los actores involucrados.

Para realizar el análisis de la oferta que proveen los tres embalses y ser comparada con la demanda de agua que requiere el municipio de Yopal, se parte de un promedio mensual, obtenido a partir de los datos suministrados por la *Tabla 4*. De manera que, se obtuvo la *Tabla 6*, la cual muestra el comportamiento de la precipitación durante 39 años.

Lo anterior, para calcular el porcentaje que se alcanza a cubrir de la demanda mensual total con la utilización de los embalses.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

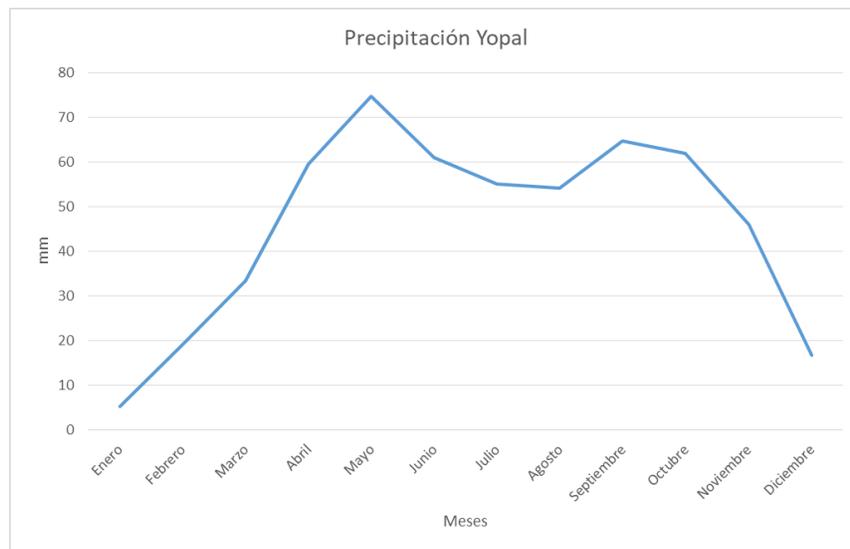
Tabla 6. Promedios mensuales de lluvia del año 1974 al año 2012, municipio Yopal

Meses	mm
Enero	5,24264706
Febrero	19,2119444
Marzo	33,336
Abril	59,5146667
Mayo	74,6577419
Junio	60,9920588
Julio	55,1344118
Agosto	54,0639394
Septiembre	64,639375
Octubre	61,9584848
Noviembre	46,0379412
Diciembre	16,7970588

(Autor, 2018)

La Figura 10, se obtuvo a partir de la tabla anterior, es así como además se pudieron observar los picos en donde se obtiene una mayor cantidad de lluvia, el primero de ellos en mayo y el segundo en septiembre respectivamente.

Figura 10. Promedio de precipitación mensual durante 39 años



(Autor, 2018)

Para obtener la oferta de cada uno de los embalses se realiza la siguiente operación:

*Ecuación 4. Oferta hídrica del embalse*

$$O = mm \times C \times A$$

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

Donde:

$O$  es la oferta (L/mes)

$Mm$  son los milímetros de lluvia al mes ( $L/m^2$ )

$C$  es el coeficiente de escorrentía

$A$  es el área de captación ( $m^2$ )

De modo que, posteriormente se realizó una comparación con los caudales mínimos del río Cravo Sur, con miras a demostrar el efecto que podría ocasionarse en el río al captar los flujos de agua lluvia en embalses. Es decir, si se generaba un impacto negativo sobre el río, por ejemplo, en el caso en que se disminuyera considerablemente su caudal.

Así pues, la *Tabla 10* se encontraba en  $m^3/s$  por lo que para poder realizar la comparación entre lo que se va a captar de los flujos de agua lluvia y el caudal del río Cravo Sur, se realizó la conversión a litros/mes (L/mes).

*Tabla 7. Distribución anual de caudales. Río Cravo Sur, estación Puente La Cabaña*

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Máximos	81,103,680,000	152,357,760,000	225,348,480,000	538,617,600,000	747,014,400,000	936,748,800,000
Medios	56,064,960,000	53,421,120,000	56,894,400,000	109,149,120,000	206,400,960,000	263,606,400,000
Mínimos	34,551,360,000	31,000,320,000	26,101,440,000	44,426,880,000	98,366,400,000	128,252,160,000
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Máximos	937,008,000,000	827,625,600,000	772,416,000,000	673,401,600,000	515,289,600,000	233,046,720,000
Medios	319,593,600,000	259,459,200,000	234,601,920,000	208,500,480,000	149,973,120,000	79,392,960,000
Mínimos	145,774,080,000	148,703,040,000	131,440,320,000	113,063,040,000	85,328,640,000	37,428,480,000

(Corpoboyacá, 2015)

Más adelante, en el *Capítulo 7*, donde se presenta una tabla resumen de como fue el *Plan de trabajo*, de acuerdo al objetivo general que se logró a partir de los objetivos específicos planteados, los cuales tenían sus actividades correspondientes y los resultados esperados con la ejecución de estas. Finalmente, con la finalidad de que el lector tenga una mejor comprensión de los resultados obtenidos, se decidió presentar los resultados con su respectivo análisis, como se verá más adelante,

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

## 7. Plan de trabajo

OBJETIVO GENERAL	Realizar una propuesta de aprovechamiento de agua lluvia para el suministro de la población del municipio de Yopal, departamento Casanare.			
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDADES	METODOLOGÍA		RESULTADOS ESPERADOS
		TÉCNICAS	INSTRUMENTOS	
Realizar análisis de los flujos de agua lluvia en el relieve mediante modelos de elevación digital	Descargar del modelo de elevación digital	Recopilación de datos	Página web USGS/earth.explorer	Obtener los flujos de agua lluvia en el área de estudio
	Extraer curvas de nivel de la zona de estudio	Procesamiento de DEM	QGIS 2.18.16	
	Extraer los flujos de agua de la zona de estudio	Procesamiento de DEM	SAGA GIS 2.3.2	
Evaluar potenciales áreas de captación teniendo en cuenta la interpretación de flujos en el relieve de la región	Ubicar las áreas de captación	Procesamiento de DEM	SAGA GIS 2.3.2 Google Earth Pro	Obtener las áreas de captación de agua lluvia con mayor potencial
	Extraer pendientes de las áreas de captación	Procesamiento de DEM	Google Earth Pro	
Realizar dimensionamiento hidrológico de los embalses	Analizar los datos de precipitación de la región para el dimensionamiento de la estructuras de almacenamiento de agua lluvia	Recopilación y procesamiento de datos históricos de precipitación	IDEAM Excel	Obtener las dimensiones con que deban contar los embalses que almacenen el agua lluvia
	Realizar Curvas de Intensidad Frecuencia y Duración (IDF)	Recopilación y procesamiento de datos	Base de datos del IDEAM, Excel	
	Aplicar método racional	Revisión bibliográfica y procesamiento de datos	Norma Técnica de Servicio NS-085, Excel, Pipe Flow Advisor	
	Realizar análisis de la oferta de los embalses teniendo en cuenta la demanda de la población	Recopilación y procesamiento de datos	Base de datos del IDEAM, Excel	

(Autor, 2018)

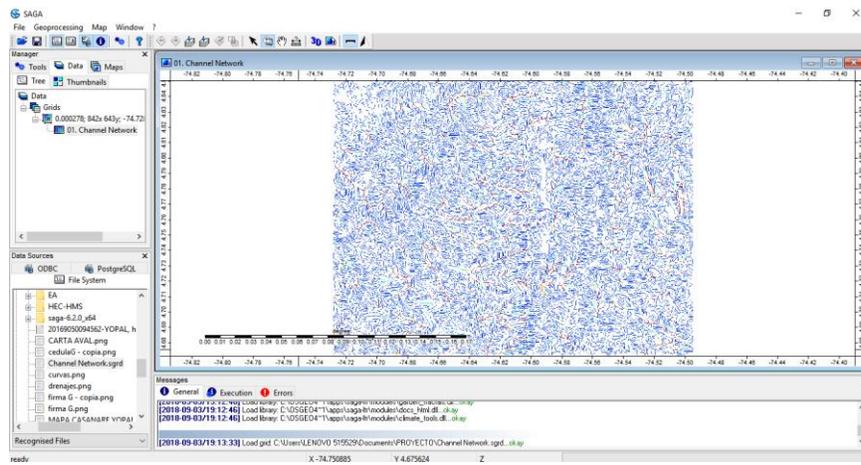
Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

## 8. Resultados

### 8.1. Objetivo específico 1. Realizar análisis de los flujos de agua lluvia en el relieve, mediante modelos de elevación digital.

Primeramente, se abrió el recorte realizado de QGIS en SAGA GIS, para poder utilizar la herramienta *Channel network*, la cual procesa las curvas de nivel y nos permite visualizar los flujos de agua lluvia, como se muestra en la *Figura 11*.

*Figura 11. Flujos de agua lluvia en SAGA GIS*



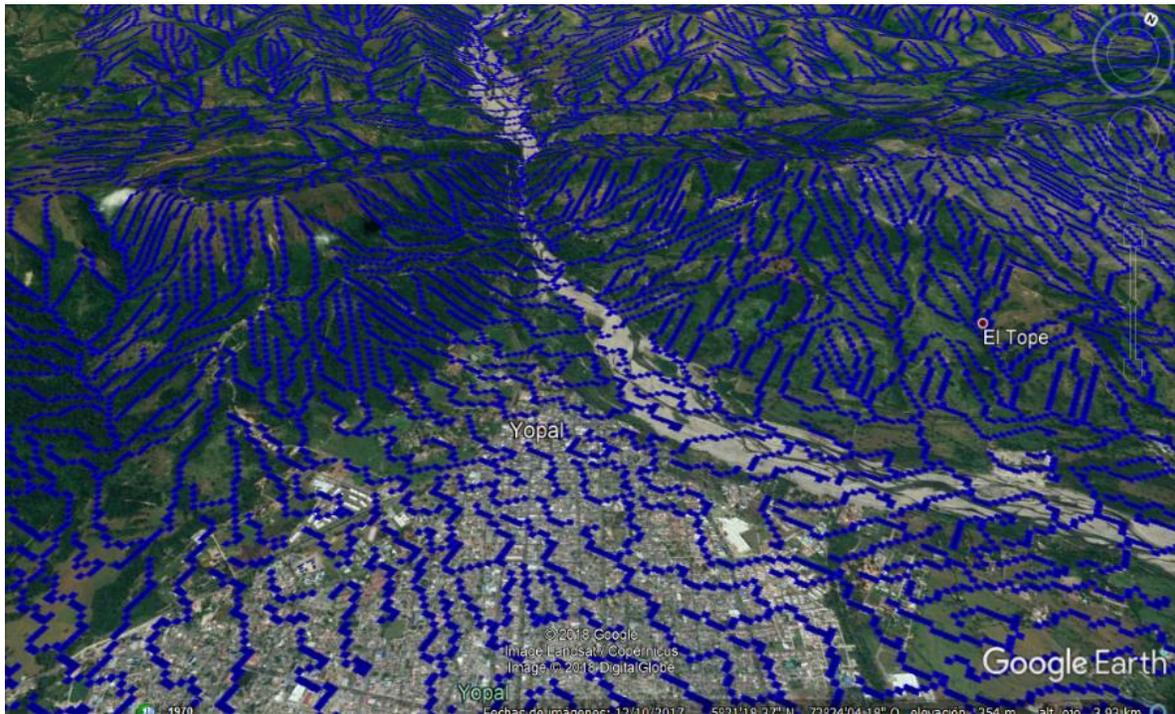
(Autor, 2018)

Es así como, gracias al procesamiento del DEM se pudieron observar en Google Earth Pro los flujos de agua lluvia en la zona de estudio, como se observa en la *Figura 12*. Además, se evidencia claramente la disponibilidad de una fuente de agua, que se da en los periodos húmedos en Yopal.

Paralelamente, la literatura brinda información más detallada de lo que se observa. En un estudio realizado se recomendó la construcción de diques para el control de erosión en quebradas con alta inestabilidad, igual que diques para retención de sedimentos y flujos torrenciales para el cauce principal, con el fin de evitar y reducir, el represamiento, por aumento del aporte de sedimentos en el cauce principal del río (Ceballos, 2018). Lo cual confirma lo mencionado en los antecedentes, con respecto al flujo torrencial que presenta el Río Cravo Sur y que conjuntamente recibe una carga de sedimentos a través de los flujos aluviales.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

*Figura 12. Flujos de agua lluvia en el municipio Yopal*



(Autor, 2018)

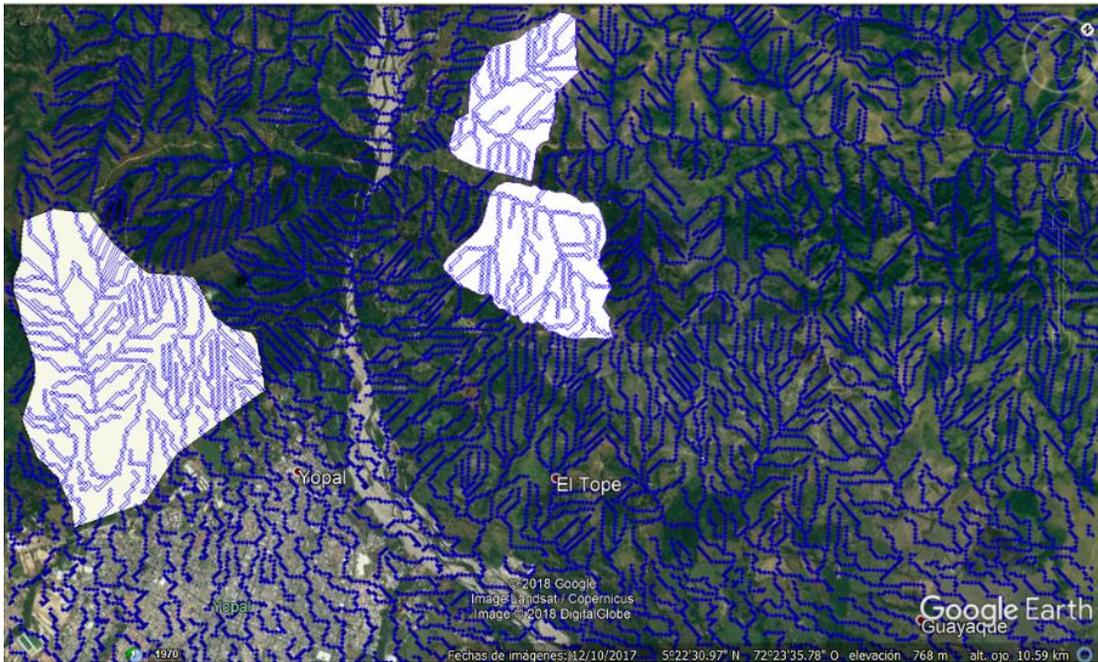
Según Yan (2011), al aprovechar el agua lluvia se podría llegar a mitigar el riesgo de inundación, sin embargo, en el caso particular del municipio Yopal, se debe resaltar que como se observa en la *Figura 12* está localizada muy cerca del río Cravo Sur. A su vez, Yan menciona que el riesgo por inundación puede ocurrir debido a las altas precipitaciones, siendo así importante poder observar la manera en cómo se forman los flujos de agua en el relieve, ya que así se puede saber cómo se va conducir el agua lluvia para hacer uso de la misma.

8.2. *Objetivo específico 2. Evaluar potenciales áreas de captación para obtener la mayor recolección de agua lluvia posible.*

Mediante el software SAGA GIS, se observaron las áreas de captación más grandes para luego ser visualizadas en Google Earth Pro, se escogió el mayor número de flujos y área de captación (*Figura 13*), ya que si se captara el agua lluvia antes de que llegue hasta el río Cravo Sur se evitarían posibles inundaciones.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

*Figura 13. Áreas potenciales de captación de agua lluvia*



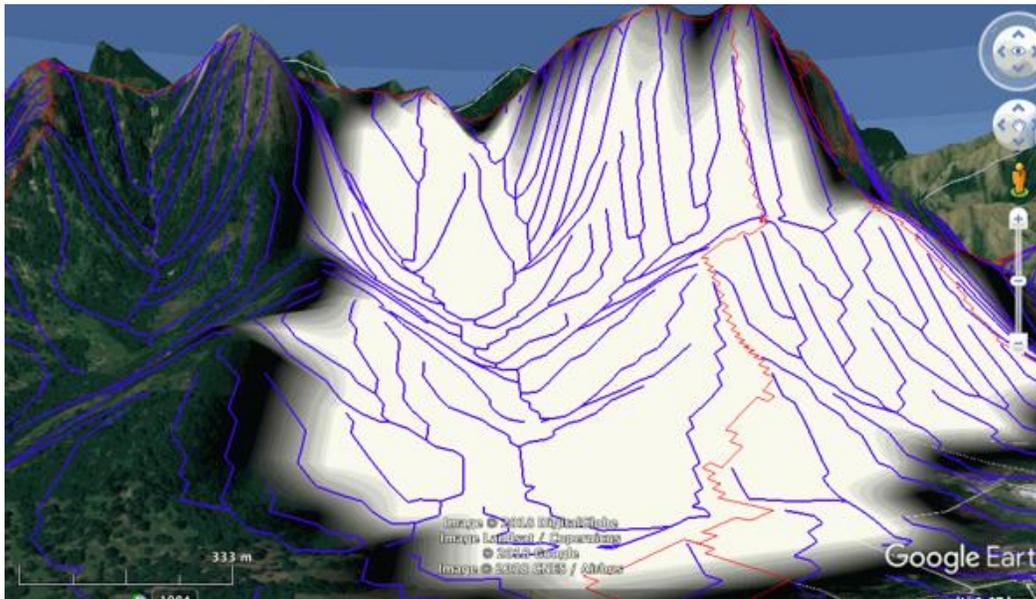
(Autor, 2018)

Google Earth Pro permite hacer un perfil de la pendiente de cada área de captación, como se observa en la *Figura 15, 17 y 18*. Información necesaria para el cálculo del tiempo de concentración en la cuenca.

En la *Figura 14* se muestra una sección de la ladera que está ubicada al norte del casco urbano de Yopal, donde se ubicó la mayor área de captación, con 522 hectáreas de extensión, y con una pendiente del 16% la que a su vez es la más cercana a la población yopaleña.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

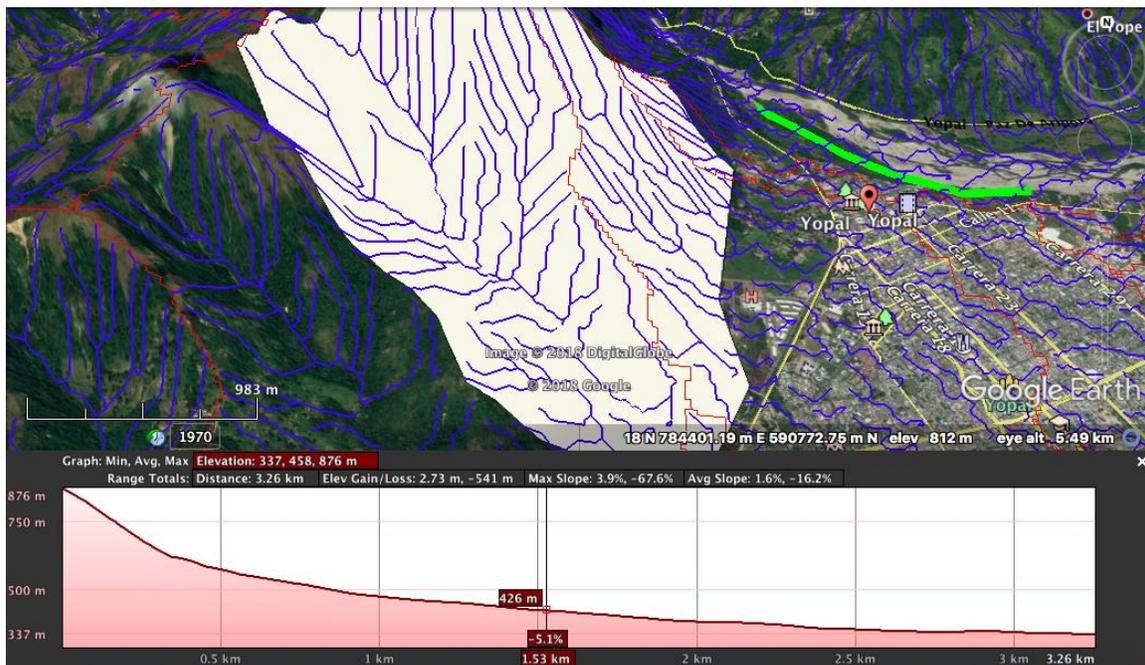
Figura 14. Área de captación No. 1



(Autor, 2018)

El área de captación No. 1 tiene una pendiente del 16%, como se observa en el perfil de la Figura 15, tiene una pendiente importante que hace que el flujo del agua por la superficie sea a grandes velocidades, generar procesos de erosión y si la infiltración no es significativa, produce crecientes rápidas del río.

Figura 15. Pendiente del área de captación No.1

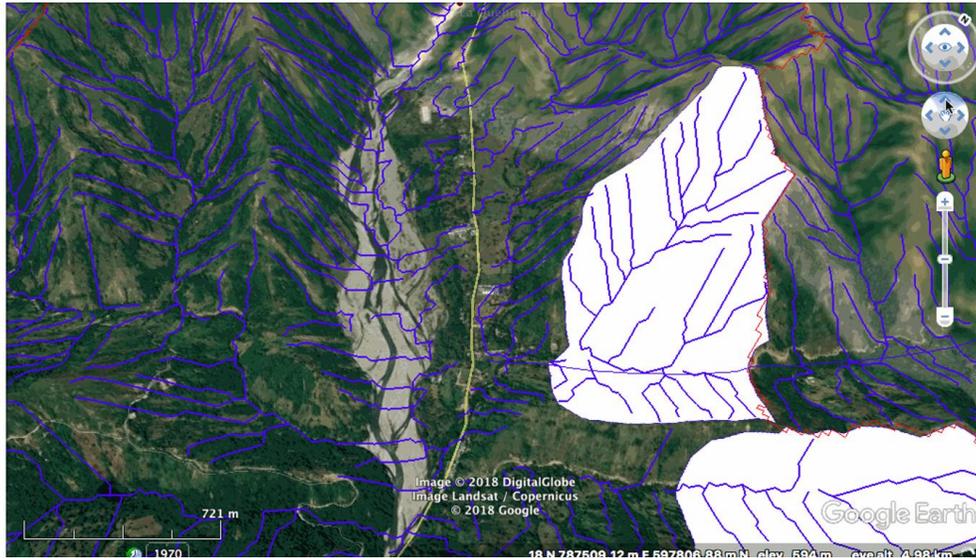


(Autor, 2018)

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

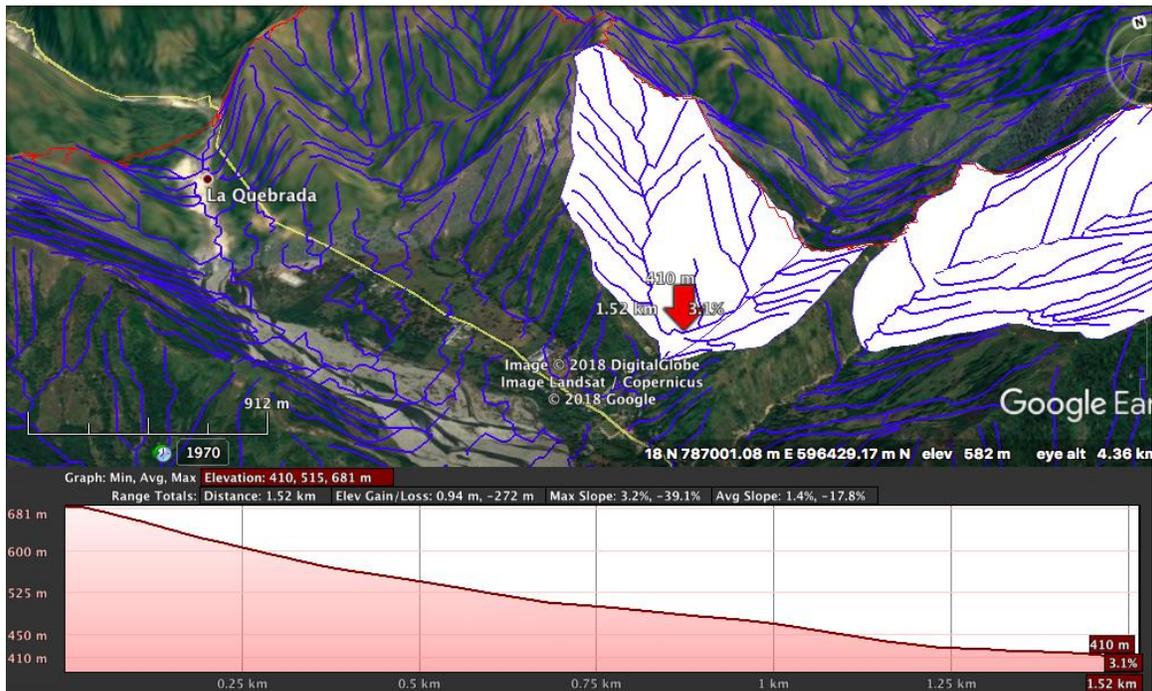
En la *Figura 16* se observa la ubicación de las otras dos áreas de captación, el área de captación *número dos*, ubicada en la ladera nororiental, tiene una extensión de 145 hectáreas, de acuerdo con Google Earth Pro, con una pendiente de 18% (*Figura 17*).

*Figura 16. Áreas de captación No. 2 y 3*



(Autor, 2018)

*Figura 17. Pendiente del área de captación No.2*

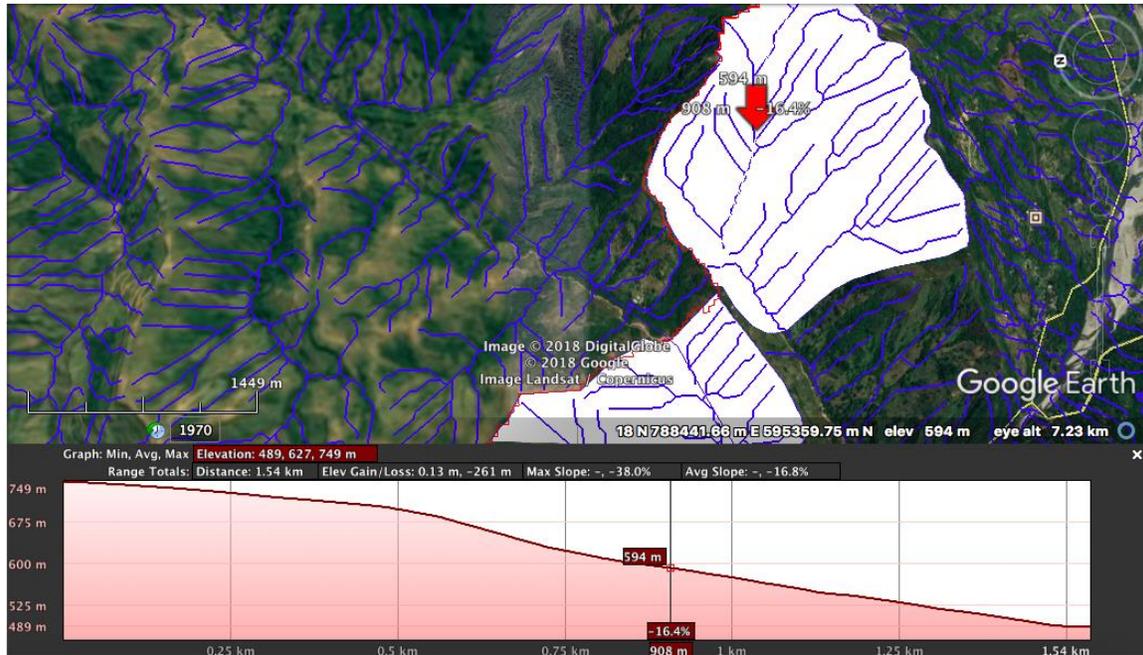


(Autor, 2018)

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

El área de captación número tres tiene una extensión de 198 hectáreas y una pendiente de 17% (Figura 18).

Figura 18. Pendiente del área de captación No.3



(Autor, 2018)

8.3. *Objetivo específico 3. Realizar dimensionamiento hidrológico de los embalses para que estos cuenten con la capacidad necesaria con base en los cálculos previos.*

Teniendo en cuenta la *Ecuación 1* del tiempo de concentración en la cuenca, se obtuvieron los minutos que tarda en llegar el agua lluvia desde el punto más alto hasta el embalse. Estos se aproximaron a los valores de duración de la *Tabla 5*, para contar con el valor de intensidad correspondiente al área de captación. Es así como se obtuvo el resultado del caudal de diseño (*Ecuación 3*), presentado en la *Tabla 8*, que permitió dimensionar los embalses, teniendo en cuenta el caudal máximo en cada uno de los embalses de acuerdo a lo sugerido en la norma. Este dimensionamiento se realiza para un período de retorno de 100 años, como lo exige la normatividad (NS 085, 2017).

*Ecuación 5. Tiempo de concentración del área de captación número uno*

$$T = \left[ \frac{0,871 \times (3,26\text{km})^3}{876\text{m} - 337\text{m}} \right]^{0,385} = 0,32 \text{ horas} \times \frac{60 \text{ minutos}}{1 \text{ hora}} = 19 \text{ minutos}$$

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

*Ecuación 6. Tiempo de concentración del área de captación número dos*

$$T = \left[ \frac{0,871 \times (1,52km)^3}{681m - 410m} \right]^{0,385} = 0,17 \text{ horas} \times \frac{60 \text{ minutos}}{1 \text{ hora}} = 10,7 \text{ minutos}$$

*Ecuación 7. Tiempo de concentración del área de captación número tres*

$$T = \left[ \frac{0,871 \times (1,54km)^3}{749m - 489m} \right]^{0,385} = 0,18 \text{ horas} \times \frac{60 \text{ minutos}}{1 \text{ hora}} = 11 \text{ minutos}$$

*Tabla 8. Caudal de diseño*

Embalse	Área (Ha)	Coefficiente de escorrentía	Período de retorno (años)	Duración (minutos)	Intensidad (L/s*Ha)		Pendiente (%)
1	522	0,4	5	19	8,3377	1740,91176	16
			25		18,6144	3886,68672	
			100		37,2011	7767,58968	
2	145	0,4	5	10,7	12,7479	742,2492	18
			25		28,5864	1658,0112	
			100		57,1451	3314,4158	
3	198	0,4	5	11	12,7974	1013,5540	17
			25		28,5864	2264,0428	
			100		57,1451	4525,8919	
Total	865						

(Autor, 2018)

La siguiente ecuación permitió convertir el caudal de diseño obtenido en litros de los tres embalses, para obtener el volumen máximo que deba almacenar el embalse, de acuerdo a un período de retorno de 100 años (*Tabla 8*).

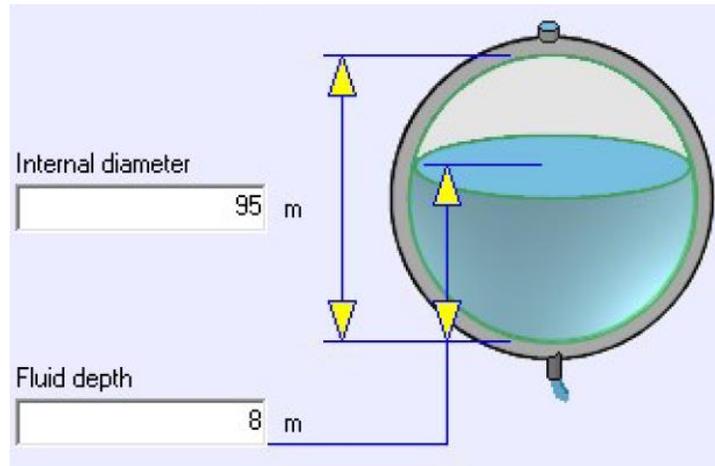
*Ecuación 8. Volumen de agua del embalse No. 1*

$$\frac{7767,58 \text{ Litros}}{\text{segundos}} \times \frac{60 \text{ segundos}}{1 \text{ minuto}} \times \frac{19 \text{ minutos}}{1} = 8.855.041,2 \text{ Litros} = 8.855 \text{ m}^3$$

Como se observa en la *Figura 19*, se propuso que los embalses tuvieran una forma esférica, con el propósito de que, al llenarse, las presiones que realice el agua sobre la estructura sean proporcionales sobre las paredes de esta. Teniendo en cuenta la tabla anterior, la capacidad máxima del embalse *número uno* debe ser de 8.855 m<sup>3</sup> (*Ecuación 8*). Sin embargo, teniendo una profundidad de ocho metros y un diámetro de 95 metros, se logra la capacidad de almacenar 9.014,27m<sup>3</sup> de agua.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

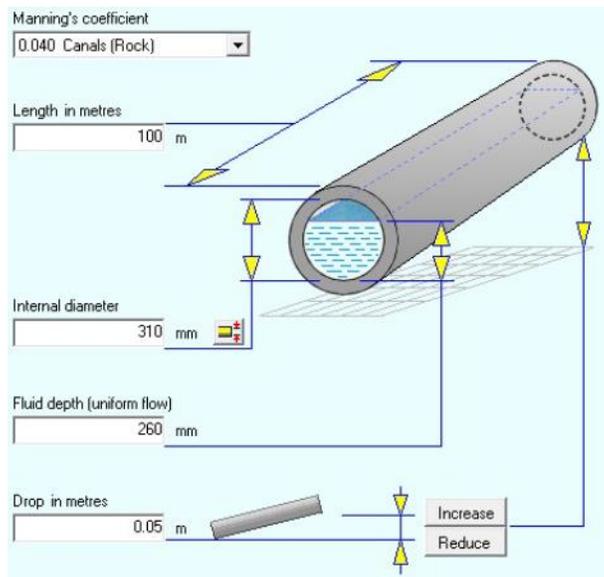
Figura 19. Dimensiones del embalse No. 1



(Autor, 2018)

La Figura 20 muestra las dimensiones de los canales del embalse número uno. Para el cálculo, se tiene en cuenta el caudal máximo que va a presentarse en este embalse, en este caso, 7.767,58 litros/segundo (Tabla 8). Para que tenga la capacidad de resistir dicho caudal, la estructura posee 100 metros de largo, 310 mm de diámetro interno, con una pendiente de 0,05 metros y teniendo en cuenta que el fluido alcanzará 260 mm de profundidad.

Figura 20. Dimensiones del canal del embalse No.1



(Autor, 2018)

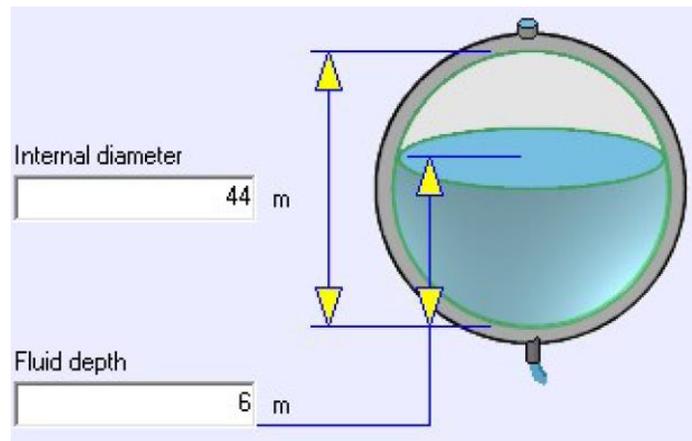
Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

*Ecuación 9. Volumen de agua del embalse No. 2*

$$\frac{3314,41 \text{ Litros}}{\text{segundos}} \times \frac{60 \text{ segundos}}{1 \text{ minuto}} \times \frac{10,7 \text{ minutos}}{1} = 2.127.851,22 \text{ Litros} = 2.127 \text{ m}^3$$

Luego, el embalse *número dos* debe tener la capacidad de almacenar 2.127 m<sup>3</sup> de agua (*Ecuación 9*), no obstante, de acuerdo a las dimensiones que se muestran en la *Figura 21* (44 metros de diámetro y seis metros de profundidad), se alcanzan a almacenar 2.261 m<sup>3</sup> de agua.

*Figura 21. Dimensiones del embalse No. 2*

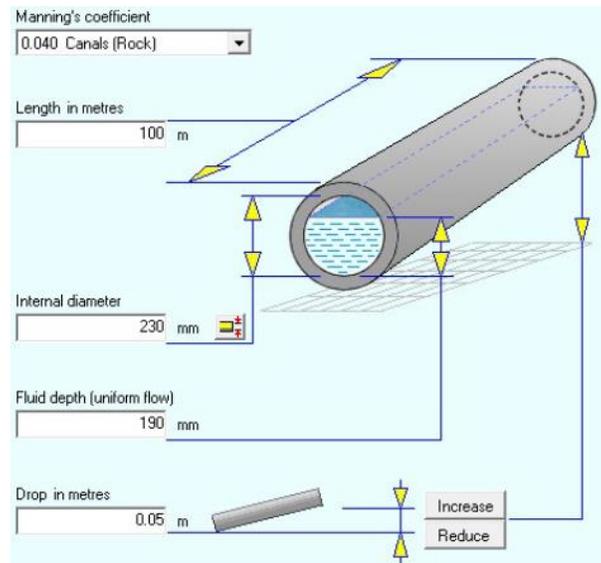


(Autor, 2018)

La *Figura 22* muestra las dimensiones de los canales del *embalse número dos*. Para el cálculo, se tiene en cuenta el caudal máximo que va a presentarse en este embalse, para un período de retorno de 100 años con un área de captación de 145 hectáreas, el caudal es de 3.314,41 litros/segundo (*Tabla 8*). Para que tenga la capacidad de transportar el caudal mencionado, la estructura posee 100 metros de largo, 230 mm de diámetro interno, con una pendiente de 0,05 metros y teniendo en cuenta que el fluido alcanzará 190 mm de profundidad.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

Figura 22. Dimensiones del canal del embalse No. 2



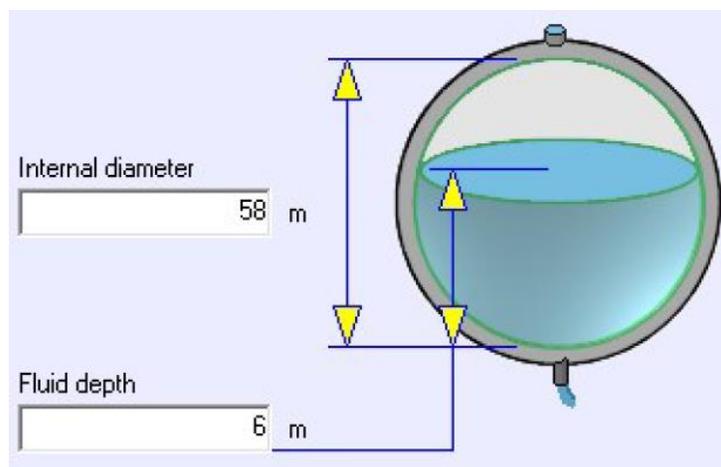
(Autor, 2018)

Ecuación 10. Volumen de agua del embalse No. 3

$$\frac{4525,89 \text{ Litros}}{\text{segundos}} \times \frac{60 \text{ segundos}}{1 \text{ minuto}} \times \frac{11 \text{ minutos}}{1} = 2.987.087,4 \text{ Litros} = 2.987 \text{ m}^3$$

Finalmente, el embalse número tres debe tener la capacidad de almacenar 2.987 m<sup>3</sup> de agua (Ecuación 10), pero de acuerdo a las dimensiones que se muestran en la Figura 23, es decir, 58 metros de diámetro y seis metros de profundidad, se alcanzan a almacenar 3053.62m<sup>3</sup>

Figura 23. Dimensiones del embalse No. 3

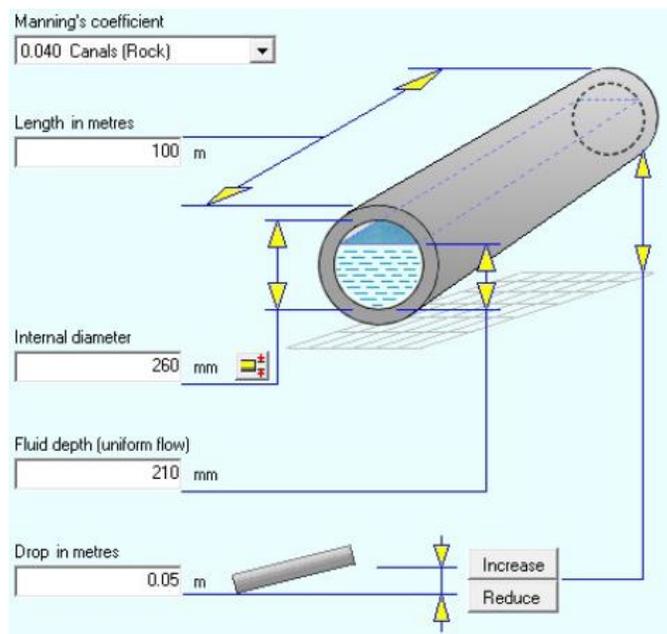


Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

(Autor, 2018)

La *Figura 24* muestra las dimensiones de los canales del *embalse número tres*. Para el cálculo, se tiene en cuenta el caudal máximo que va a presentarse en este embalse, para un período de retorno de 100 años con un área de captación de 198 hectáreas, el caudal es de 4.525,89 litros/segundo (*Tabla 8*). Para que tenga la capacidad de transportar el caudal mencionado, la estructura posee 100 metros de largo, 260 mm de diámetro interno, con una pendiente de 0,05 metros y teniendo en cuenta que el fluido alcanzará 210 mm de profundidad.

*Figura 24. Dimensiones del canal del embalse No. 3*



(Autor, 2018)

Así pues, las dimensiones de los embalses tendrían la capacidad de almacenar más volumen de agua lluvia que la calculada de acuerdo al caudal de diseño (*Tabla 8*).

Por otra parte, se analizó la diferencia que hay entre la cantidad de agua lluvia que se puede llegar a captar y la que demanda la población de Yopal, de manera que se determinó el porcentaje de agua que se aporta cada uno de los embalses.

En el embalse *número uno*, el porcentaje mínimo que se aporta con respecto a la demanda mensual de la población de Yopal corresponde al mes de enero con un 1,7%, mientras que en el mes de mayo se alcanza un aporte máximo del 24,8%, como se ve en la *Tabla 9*.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

Tabla 9. Diferencia entre la oferta del embalse No. 1 con la demanda de la población del municipio Yopal

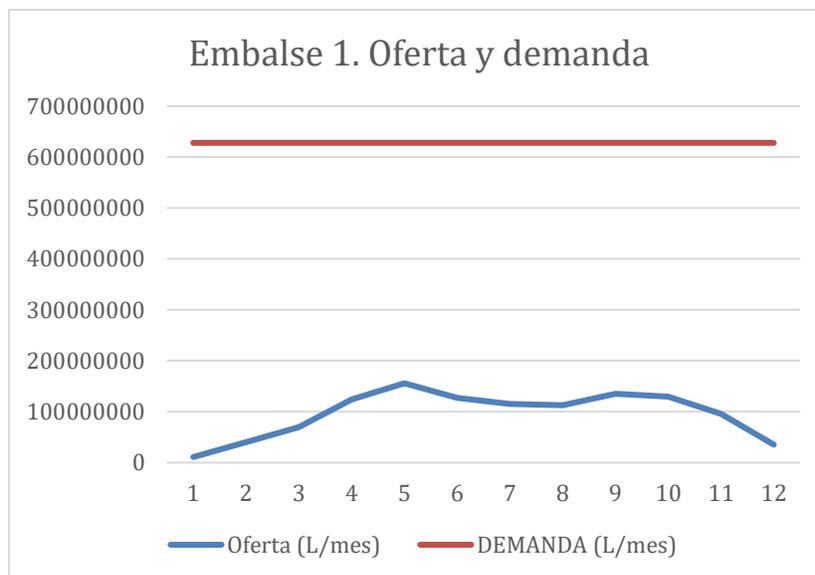
Embalse 1						
Meses	mm	C	Area de captación (m2)	Oferta (L/mes)	Demanda (L/mes)	Porcentaje (%)
Enero	5,242647059	0,4	5220000	10946647,06	628093200	1,7
Febrero	19,21194444	0,4	5220000	40114540	628093200	6,4
Marzo	33,336	0,4	5220000	69605568	628093200	11,1
Abril	59,51466667	0,4	5220000	124266624	628093200	19,8
Mayo	74,65774194	0,4	5220000	155885365,2	628093200	24,8
Junio	60,99205882	0,4	5220000	127351418,8	628093200	20,3
Julio	55,13441176	0,4	5220000	115120651,8	628093200	18,3
Agosto	54,06393939	0,4	5220000	112885505,5	628093200	18,0
Septiembre	64,639375	0,4	5220000	134967015	628093200	21,5
Octubre	61,95848485	0,4	5220000	129369316,4	628093200	20,6
Noviembre	46,03794118	0,4	5220000	96127221,18	628093200	15,3
Diciembre	16,79705882	0,4	5220000	35072258,82	628093200	5,6

(Autor, 2018)

De acuerdo a lo anterior, se observa en la *Tabla 9* que el municipio presenta una precipitación monomodal, como se pudo ver anteriormente en las gráficas de precipitación, donde la literatura constata que los períodos de lluvia se presentan mayormente a partir del mes de abril hasta el mes de octubre - noviembre aproximadamente. En consecuencia, el mes de mayo es el mes en donde se puede captar mayor cantidad de agua lluvia.

La *Figura 25* corresponde a la tabla anterior (*Tabla 9*), más precisamente a la columna de *oferta* y a la columna *demanda*, ambas dadas en litros/mes.

Figura 25. Oferta del embalse No. 1



(Autor, 2018)

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

En el embalse *número dos*, el porcentaje mínimo que se aporta con respecto a la demanda mensual de la población de Yopal corresponde al mes de enero con un 0,5%, mientras que en el mes de mayo se alcanza un aporte máximo del 6,9%, como se ve en la *Tabla 10*.

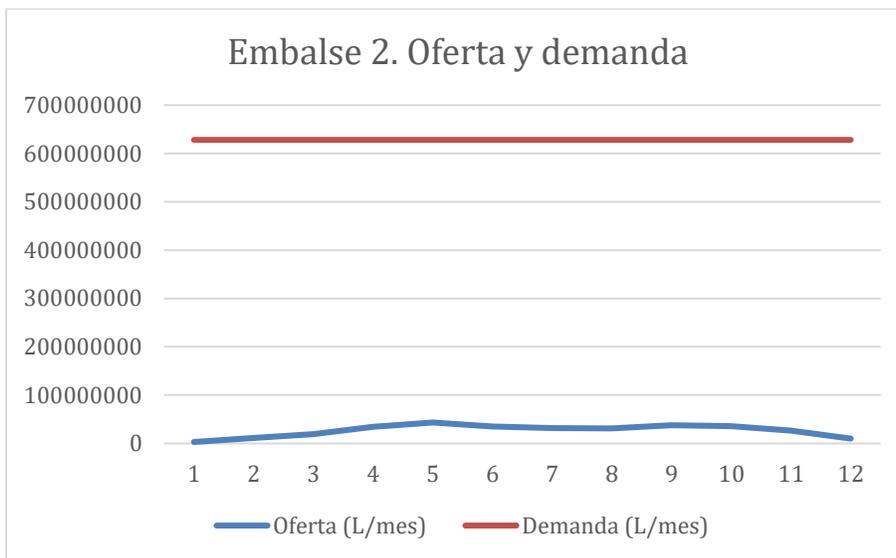
*Tabla 10. Diferencia entre la oferta del embalse No. 2 con la demanda de la población del municipio Yopal*

Embalse 2						
Meses	mm	C	Area de captación (m2)	Oferta (L/mes)	Demanda (L/mes)	Porcentaje (%)
Enero	5,242647059	0,4	1450000	3040735,294	628093200	0,5
Febrero	19,21194444	0,4	1450000	11142927,78	628093200	1,8
Marzo	33,336	0,4	1450000	19334880	628093200	3,1
Abril	59,51466667	0,4	1450000	34518506,67	628093200	5,5
Mayo	74,65774194	0,4	1450000	43301490,32	628093200	6,9
Junio	60,99205882	0,4	1450000	35375394,12	628093200	5,6
Julio	55,13441176	0,4	1450000	31977958,82	628093200	5,1
Agosto	54,06393939	0,4	1450000	31357084,85	628093200	5,0
Septiembre	64,639375	0,4	1450000	37490837,5	628093200	6,0
Octubre	61,95848485	0,4	1450000	35935921,21	628093200	5,7
Noviembre	46,03794118	0,4	1450000	26702005,88	628093200	4,3
Diciembre	16,79705882	0,4	1450000	9742294,118	628093200	1,6

(Autor, 2018)

La *Figura 26* corresponde a la tabla anterior (*Tabla 10*).

*Figura 26. Oferta del embalse No. 2*



(Autor, 2018)

En el embalse *número dos*, el porcentaje mínimo que se aporta con respecto a la demanda mensual de la población de Yopal corresponde al mes de enero con un 0,7%, mientras que en el mes de mayo se alcanza un aporte máximo del 9,4%, como se ve en la *Tabla 11*.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

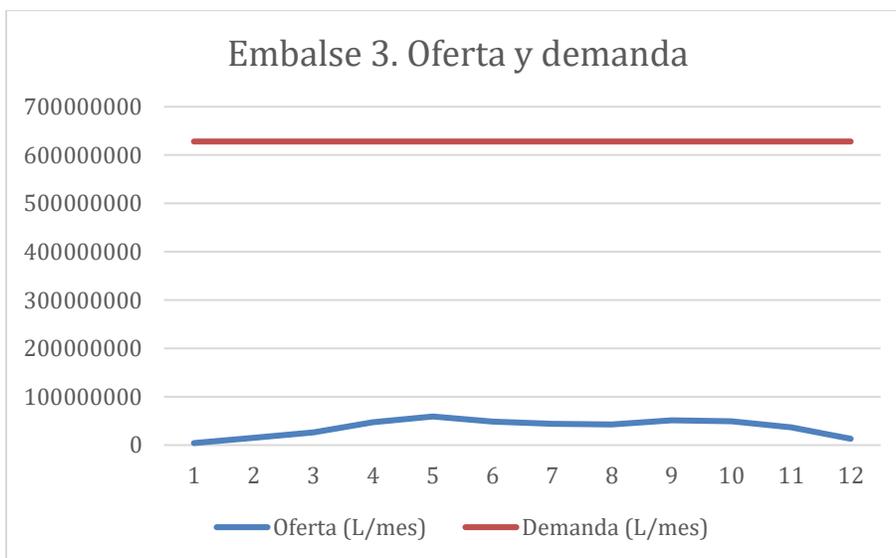
Tabla 11. Diferencia entre la oferta del embalse No. 3 con la demanda de la población del municipio Yopal

Embalse 3						
Meses	mm	C	Area de captación (m2)	Oferta (L/mes)	Demanda (L/mes)	Porcentaje (%)
Enero	5,242647059	0,4	1980000	4152176,471	628093200	0,7
Febrero	19,21194444	0,4	1980000	15215860	628093200	2,4
Marzo	33,336	0,4	1980000	26402112	628093200	4,2
Abril	59,51466667	0,4	1980000	47135616	628093200	7,5
Mayo	74,65774194	0,4	1980000	59128931,61	628093200	9,4
Junio	60,99205882	0,4	1980000	48305710,59	628093200	7,7
Julio	55,13441176	0,4	1980000	43666454,12	628093200	7,0
Agosto	54,06393939	0,4	1980000	42818640	628093200	6,8
Septiembre	64,639375	0,4	1980000	51194385	628093200	8,2
Octubre	61,95848485	0,4	1980000	49071120	628093200	7,8
Noviembre	46,03794118	0,4	1980000	36462049,41	628093200	5,8
Diciembre	16,79705882	0,4	1980000	13303270,59	628093200	2,1

(Autor, 2018)

La Figura 27 corresponde a la tabla anterior (Tabla 11).

Figura 27. Oferta del embalse No. 3



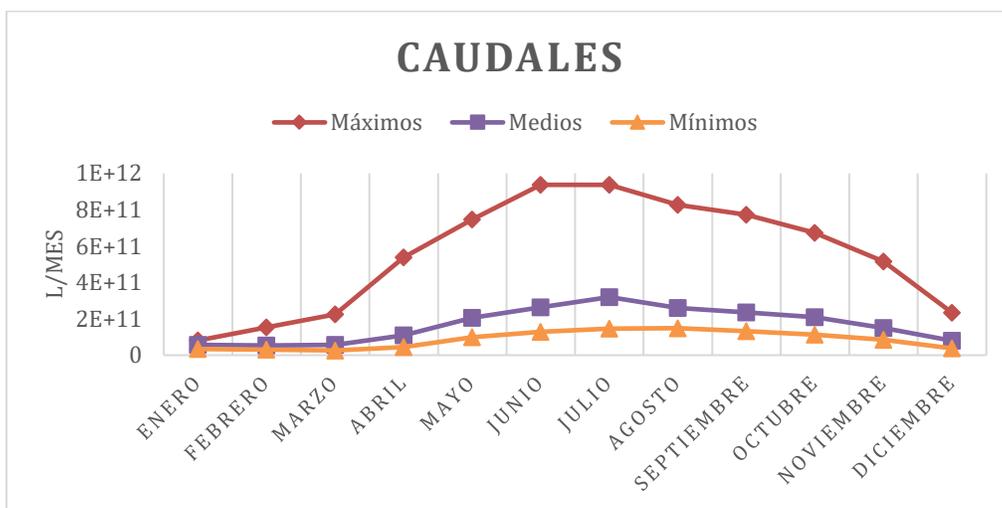
(Autor, 2018)

El valor mínimo que se encuentra entre los caudales mínimos del río Cravo Sur, se presenta en el mes de marzo con un valor de 26.101.440.000 litros. Mientras que, lo máximo que se puede captar de acuerdo al diseño hidrológico planteado, es de 155.885.365 litros en el mes de mayo (Tabla 9). Así pues, se determinó que el grado de afectación que se causaría al río por la captación del agua lluvia que escurre es de un 0,59%, es decir, que ni si quiera cuando el río presente un caudal mínimo, este se verá afectado por el proyecto.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

La *Figura 28*, nos muestra el comportamiento de los caudales máximos, medios y mínimos del río Cravo Sur, así pues, a diferencia de las gráficas anteriores en donde se analiza la oferta que proveen los embalses, se puede apreciar que el mes en donde hay un mayor caudal, es en el mes de *junio* con un valor de 936.748.800.000 litros (*Tabla 7*).

*Figura 28. Distribución anual de caudales. Río Cravo Sur, estación Puente La Cabaña*



(Autor, 2018)

## 9. Conclusiones

Se obtuvieron los flujos de agua lluvia en el municipio de Yopal, de manera que, se observe la disponibilidad de otra fuente de abastecimiento de agua para la población. Además, al observar los flujos de agua en el relieve se puede saber la dirección en la que se va a dirigir el agua para su posterior conducción y almacenamiento.

Se lograron obtener tres áreas de captación que reunieran la mayor cantidad de flujos de agua lluvia posible. El área de captación del embalse *número uno* es de 522 hectáreas, el del embalse *número dos* es de 145 hectáreas y es de 198 hectáreas. Paralelamente, gracias a las pendientes obtenidas de cada una de las áreas y a la imagen satelital de estas, se determinó el coeficiente de escorrentía.

Mediante el método racional se obtuvo el caudal de diseño, el cual permitió conocer el volumen que se necesitaría almacenar en los tres embalses. Por consiguiente, se consiguieron las dimensiones y dado a que su estructura se sugirió de forma esférica, se calcularon los diámetros y profundidades requeridas para el almacenamiento del volumen de agua calculado.

Sólo se aprovecha un 40% del agua lluvia, ya que, de acuerdo a las características de la superficie, el porcentaje restante se infiltra en el suelo. Por lo tanto, no puede ser captado el 60% de agua lluvia restante para que llegue a los embalses.

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

El embalse *número uno* tiene un porcentaje de oferta mayor, con respecto a la oferta del embalse *dos y tres*, la cual se presenta el mes de mayo con un 24,8%, debido a que la extensión de su área permite reunir mayor cantidad de flujos de agua lluvia en comparación con los embalses *dos y tres*. Sin embargo, con la captación de agua de los otros dos embalses se obtiene el 41,1% de la cantidad de agua que demanda la población al mes.

No obstante, para alcanzar el a cubrir el 100% de la demanda (628.093.200 L/mes) se debería contar con 158.158 hectáreas de más para captar los 47.220.835 L que hacen falta, tomando como ejemplo el área de captación *número uno* en el mes de mayo, donde se presenta una mayor precipitación (74,65 mm).

El porcentaje de afectación al río Cravo Sur es de 0.59%, debido a que su caudal mínimo sigue siendo muy superior (26.101.440.000 litros/mes) si se compara con lo máximo que se podría llegar a captar (155.885.365 litros/mes).

La aplicación de los modelos de elevación digital facilita acceder a información además de permitir que esta, al ser procesada, pueda visualizarse y ser utilizada posteriormente en proyectos de ingeniería. Cabe mencionar, que otra de sus ventajas es que para la realización de este proyecto no fue necesaria la salida a campo.

## 10. Recomendaciones

En cuanto a la estructura de los embalses, preferiblemente no deberían tener una profundidad mayor a diez metros para facilitar su mantenimiento. Además de que se sugiere su forma esférica para evitar que la presión del agua llegue a fisurar las esquinas del fondo de la estructura, en caso de que esta fuera cúbica.

Implementar nuevos softwares o programas que faciliten el procesamiento de los datos, ya que esto permite realizar análisis de información que sean útiles para los proyectos de ingeniería, como se pudo evidenciar en este documento.

El trabajo puede complementarse con un estudio de gestión del riesgo, así pues, se podrían ubicar áreas de captación y en consecuencia embalses que no sólo sean utilizados como fuente de abastecimiento, sino que además contribuya en la mitigación de riesgo por avalanchas o inundaciones.

Además de señalar los costos de la infraestructura, cálculos estructurales, estudios de suelos y estudios geo-eléctricos que permitan ubicar pozos profundos para abastecer estos embalses, de manera que, se supla la demanda que hace falta, teniendo en cuenta a su vez la construcción de sistemas de desarenado y tratamiento de agua para asegurar su calidad al salir a suministro.

Adicional a lo anterior, se podría disponer de un sistema de bombeo que tenga la capacidad de llevar el agua almacenada en los embalses *dos y tres*, hasta el embalse *número uno*, para que posteriormente se traslade hacia la planta de tratamiento.

Si se buscara aprovechar el 100% del agua lluvia que cae, se necesitaría bombear el agua subterránea hacia los embalses. Por lo anteriormente mencionado, se debería complementar el trabajo con estudios de purificación de agua, aguas subterráneas y sistemas de bombeo; de manera que, se llegue a suministrar

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

agua apta para el consumo humano y sea una fuente a considerar si se quiere cubrir la totalidad de la demanda de agua del municipio.

Verificar la información encontrada a través de estudios por parte de las entidades públicas del municipio, de modo que, las proyecciones realizadas sean las pertinentes en caso de que se busque implementar la propuesta planteada en el proyecto.

Es necesario que los planes de ordenamiento territorial se basen en el movimiento del agua sobre el terreno para obtener diseños eficientes desde la planificación, para la expansión de una población, lo cual evita problemas de desabastecimiento o de inundaciones frecuentes hoy en día, que luego la administración tendría que incurrir en gastos para su corrección sin lograr los resultados esperados.

## 11. Bibliografía

Biblioteca Atrium de las instalaciones: agua. (1992). Barcelona, Spain: Oceano, pp.24-27.

CAR. (2015). Recuperado 1 agosto, 2018, de <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac68dc032d94.pdf>

Ceballos Fandiño, J. (2018). *Análisis de la dinámica hídrica, en la cuenca del río Cravo Sur entre Labranzagrande y Yopal, mediante técnicas de teledetección*. [online] Universidad de Manizales. Available at: [http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/3311/Ceballos\\_Jenny\\_Andrea\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/3311/Ceballos_Jenny_Andrea_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y) [Accessed 19 Sep. 2018].

Corte Constitucional (2011). *REPÚBLICA DE COLOMBIA*. [online] Available at: <http://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2011/T-740-11.htm> [Accessed 12 Jun. 2018].

El Tiempo. (1999, 9 febrero). Recuperado 2 agosto, 2018, de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-895809>

El Tiempo (2017). *Acueducto de Yopal estaría listo a finales de este año*. [online] El Tiempo. Available at: <http://www.eltiempo.com/economia/sectores/construccion-de-acueducto-de-yopal-47595> [Accessed 12 Jun. 2018].

EPM. (2018). [online] Available at: <https://www.epm.com.co/site/Portals/0/Como%20funcionan%20los%20embalses.docx> [Accessed 11 Oct. 2018].

Fernández, R. (2018). El Niño aún no llega, pero asusta a 350 municipios. [online] El Colombiano. Available at: <http://www.elcolombiano.com/colombia/el-nino-aun-no-llega-pero-asusta-a-350-municipios-BX9374407> [Accessed 23 Oct. 2018].

Fluidos.eia.edu. (2018). *DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD EN HIDROLOGÍA*. [online] Available at: <http://fluidos.eia.edu.co/hidrologiai/probabilidad/probabilidad.htm> [Accessed 23 Aug. 2018].

Forero, G. (2016). Dimensionamiento de embalses para fincas en Colombia usando como herramienta los modelos de elevación digital. *Revista de Tecnología*, [online] 15(1), pp.129-138. Available at: <http://revistas.unbosque.edu.co/RevTec/article/view/2044/1553> [Accessed 23 Aug. 2018].

Diseño hidrológico de embalses para la captación de agua lluvia utilizando un modelo de elevación digital en el municipio de Yopal, departamento Casanare.

Forero, G. (2017). Dimensionamiento de canales y embalses para conducir y almacenar agua lluvia para abastecer la población de altos de cazucá (Soacha-Colombia) utilizando D.E.M. *Revista de Tecnología*, [online] 16(1), pp. 113-128. Available at: <http://revistas.unbosque.edu.co/RevTec/article/view/2320/1752> [Accessed 23 Aug. 2018].

Gras, E. (2009). *Cosecha de agua y tierra*. 1 st ed. Olba, Teruel; COAS, p.6, 55.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. and Pilar Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill.

IDEAM. (2013). *Lineamientos Conceptuales y Metodológicos para la Evaluación Regional del Agua ERAS*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM, Bogotá.

IDEAM. (2014). Recuperado 1 agosto, 2018, de <http://www.ideam.gov.co/curvas-idf>.

Japac. (2016). Aprovechamiento del agua lluvia | JAPAC – Agua y Salud para todos. [online] Available at: <http://japac.gob.mx/2016/08/11/aprovechamiento-del-agua-lluvia/> [Accessed 4 Oct. 2018].

Larepublica.co. (2018). *Minvivienda invertirá \$6.000 millones más en planta de tratamiento de agua potable en Yopal*. [online] Available at: <https://www.larepublica.co/infraestructura/minvivienda-invertira-6000-millones-mas-en-planta-de-tratamiento-de-agua-potable-en-yopal-2607854> [Accessed 12 Jun. 2018].

Norma Técnica de Servicio NS- 085. (2017, 13 noviembre). Acueducto Sistec. [online] Available at: <https://es.scribd.com/document/286096234/NS-085-Diseno-Alcantarillados>.

Oliveras, J. (2016). *Como seleccionar el coeficiente de rugosidad de Manning en cauces naturales*. [online] Hidrojing. Available at: <http://www.hidrojing.com/como-seleccionar-el-coeficiente-de-rugosidad-de-manning-en-cauces-naturales/> [Accessed 17 Oct. 2018].

Sentencia T-740 (2011). Corte Constitucional. [online] Available at: <http://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2011/T-740-11.htm>

Sogeocol. (2018). *Sociedad Geográfica de Colombia*. [online] Available at: <https://sogeocol.edu.co/casanare.htm> [Accessed 11 Oct. 2018].

Yan, J., Jiang, C., Chen, S. and Zhang, J. (2011). Control and Utilization Method for Urban Rain-Flood. *Applied Mechanics and Materials*, 50-51, pp.910-914.

Yopal, cuatro años sin agua. (2015). *Yopal, cuatro años sin agua*. [online] Available at: <https://www.semana.com/nacion/articulo/yopal-cuatro-anos-sin-agua/428891-3> [Accessed 12 Jun. 2018].