

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Diseño de una hidroeléctrica en el río Toabunche, Valle Intag.

Esteban Andrés Garzón Rendón
Ingeniería Civil

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniería Civil

Quito, 20 de diciembre de 2023

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

Diseño de una hidroeléctrica en el río Toabunche, Valle Intag

Esteban Andrés Garzón Rendón

Nombre del profesor, Título académico

Sixto Andrés Durán-Ballén Ochoa, PhD

Quito, 20 de diciembre de 2023

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Esteban Andrés Garzón Rendón

Código: 00209822

Cédula de identidad: 1723887533

Lugar y fecha: Quito, 20 de diciembre de 2023

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

En el presente proyecto se determinó los diseños civiles para una nueva hidroeléctrica de 8.5MW de potencia instalada ubicada en la provincia de Imbabura, en el cantón Cotacachi. Entre los diseños civiles se encuentra la caracterización hidrológica por medio de datos medios diarios de la estación H0176 y el diseño de estructuras hidráulicas como captación y conducción. Se realizó un análisis financiero con los principales indicadores económicos donde se obtuvo un VAN de \$12,112,083.57 USD, una tasa interna de retorno TIR de 16.99% y un ROI de 18.34%.

Palabras clave: Hidroeléctrica, Consultoría, Potencial Hidroeléctrico de Ecuador, Hidrología.

ABSTRACT

In the current project, civil designs were determined for a new hydroelectric power plant with an installed capacity of 8.5MW located in the province of Imbabura, in the Cotacachi canton. Among the civil designs are the hydrological characterization using daily mean data from station H0176 and the design of hydraulic structures such as intake and conduits. A financial analysis was conducted with key economic indicators, resulting in a Net Present Value (NPV) of \$12,112,083.57 USD, an Internal Rate of Return (IRR) of 16.99%, and a Return on Investment (ROI) of 18.34%.

Keywords: Hydroelectric, Consultancy, Hydroelectric Potential of Ecuador, Hydrology.

Índice de contenidos

Capítulo 1	10
Introducción.....	10
1.2. Objetivo general	10
1.3. Objetivos específicos.....	10
1.4. Metodología/Actividades	11
1.5. Resumen de estructura de capítulos	11
Capítulo 2	12
Características del proyecto	12
2.1. Localización del proyecto	12
2.2. Cuenca hidrográfica	13
Capítulo 3	18
Análisis hidrológico.....	18
3.1. Datos existentes.....	18
1.6. Curva de duración:.....	22
1.7. Caudal óptimo	25
1.8. Curvas IDF	27
1.9. Caudal de máxima crecida	29
Capítulo 4	35
Diseño de obras hidráulicas	35
4.1. Captación.....	35
1.10. Azud	37
1.11. Conducción.....	37
Capítulo 5	45
Análisis económico.....	45
2.1. Costo referencial	45
2.2. Producción energética.....	45
2.3. Indicadores económicos.....	47
Capítulo 6	50
3.1. Conclusiones.....	50
3.2. Recomendaciones.....	52
3.3. Limitaciones	53
Bibliografía.....	54

Índice de Figuras

Figura 1: Localización del proyecto	12
Figura 2: Topografía del proyecto.....	13
Figura 3: modelo de elevación digital o DEM	14
Figura 4: Dirección de Flujo	15
Figura 5: Acumulación de flujo	16
Figura 6: Cuenca hidrográfica del proyecto.....	17
Figura 7: Localización estación hidrológica H0176.....	18
Figura 8: Curva de duración.....	24
Figura 9: Energía generada vs Caudal necesario	27
Figura 10: Curvas IDF.....	29
Figura 11: Cobertura vegetal de la zona.....	30
Figura 12: Tipo de suelo de la zona	30
Figura 13: Obtención de Curva número	31
Figura 14: Mapa de pendientes de la zona	32
Figura 15: Datos estadísticos del mapa de pendientes	32
Figura 16: Obtención del caudal de máxima crecida	33
Figura 17: Orificio rectangular donde se realizará la captación del caudal de diseño.	36
Figura 18: Compuertas para cerrar o admitir el flujo hacia la captación	36
Figura 19: Perfil Creager para Azud.	37
Figura 20: Trazado de conducción	39
Figura 21: Perfil vertical de conducción.....	39
Figura 22: Acercamiento a cotas en perfil vertical	40
Figura 23: Acercamiento a captación	41
Figura 24: Vista general de la captación	42
Figura 25: Vista en planta de la captación.....	42
Figura 26: Vista posterior de la captación	43
Figura 27: Vista frontal de la estructura.	44
Figura 28: Saldos en el tiempo.....	48
Figura 29: Saldos en el tiempo con estrategia económica	48

Índice de Tablas

Tabla 1: Caudales mensuales de la estación H176 en metros cúbicos por segundo.....	19
Tabla 2: Proyección de datos faltantes, metros cúbicos por segundo.....	21
Tabla 3: Resultado de proyección de datos faltantes	22
Tabla 4: Datos necesarios para curva de duración.....	22
Tabla 5: Resultado de curva de duración	23
Tabla 6: Probabilidad de ocurrencia y Datos mensuales	24
Tabla 8: Relación entre Energía producida y Caudal.....	26
Tabla 9: Precipitación máxima en 24 horas en milímetros.....	28
Tabla 10: Relación entre intensidad y tiempo de duración.....	28
Tabla 11: Resultado numérico de la curva número	31
Tabla 12: Resultados de iteración para determinar el diámetro de tubería	39
Tabla 13: Producción energética	46
Tabla 14: Ingresos en el tiempo para determinar tiempo de retorno de inversión	47
Tabla 15: Ingresos en el tiempo considerando estrategia económica.....	48
Tabla 16: Tasa interna de retorno y valor actual neto	49

Capítulo 1

Introducción

La generación de energía eléctrica dentro de Ecuador es un componente fundamental para el desarrollo de la parte económica y social del país. Esto se debe principalmente a que la venta de energía eléctrica y el consumo de esta tiene relación con la economía del país, ya que este se convirtió en una necesidad básica, tanto para personas, como para empresas y fábricas que mueven la economía ecuatoriana puesto que ninguna industria puede funcionar sin electricidad, solamente el sector energético corresponde al 3.21% del PIB. Actualmente la situación energética del país es preocupante, con la pronta decaída de la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, se genera un gran déficit energético que no es conveniente tanto para la economía como para la producción y sus relacionados.

1.2. Objetivo general

En este contexto, el estudio de prefactibilidad de una central hidroeléctrica resulta ser una opción atractiva y sostenible para compensar dicho déficit. La energía hidroeléctrica aprovecha la energía potencial producida en turbinas Pelton por el agua para transformarla en energía mecánica y consecuentemente en eléctrica, esta genera un impacto ambiental relativamente bajo con un correcto diseño.

1.3. Objetivos específicos

El presente estudio, tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnica y económica de un proyecto de central hidroeléctrica dentro del Valle Intag, aprovechando las características hidráulicas el Río Toabunche, con el fin de

determinar si la inversión necesaria para hacer realidad el proyecto tiene el potencial de retornar suficiente utilidad.

1.4. Metodología/Actividades

A través de un estudio exhaustivo y multidisciplinario se buscará explorar los aspectos clave relacionados con el área civil que determinan la viabilidad del proyecto, tales como, estudio hidrológico y meteorológico, estudio topográfico y cartográfico, estudio económico, estudio de obra civil hidráulica, y estudio de capacidad de generación.

1.5. Resumen de estructura de capítulos

Con el fin de cumplir todos los objetivos planteados previamente, se decidió utilizar la siguiente bibliografía:

- Pequeñas centrales hidroeléctricas: Este libro escrito por Ramiro Ortiz Flores, servirá como referencia general del contenido de cada estudio.
- Estructuras hidráulicas: Este libro escrito por Novak y Nalluri será la base del diseño de estructuras hidráulicas.
- Clima, hidrología y meteorología: Será la base para los estudios hidrológicos y meteorológicos.
- Gerencia de la construcción guía para profesionales: Será la base del estudio económico.
- Topografía: Escrito por García Martín Antonio, que será la base para los estudios topográficos.

Capítulo 2

Características del proyecto

2.1. Localización del proyecto

A continuación se puede observar la localización del proyecto, este se encuentra ubicado en la provincia de Imbabura, en el cantón Cotacachi, sobre el río Toabunche. Sobre las Coordenadas UTM:

777713.040121; 39058.856

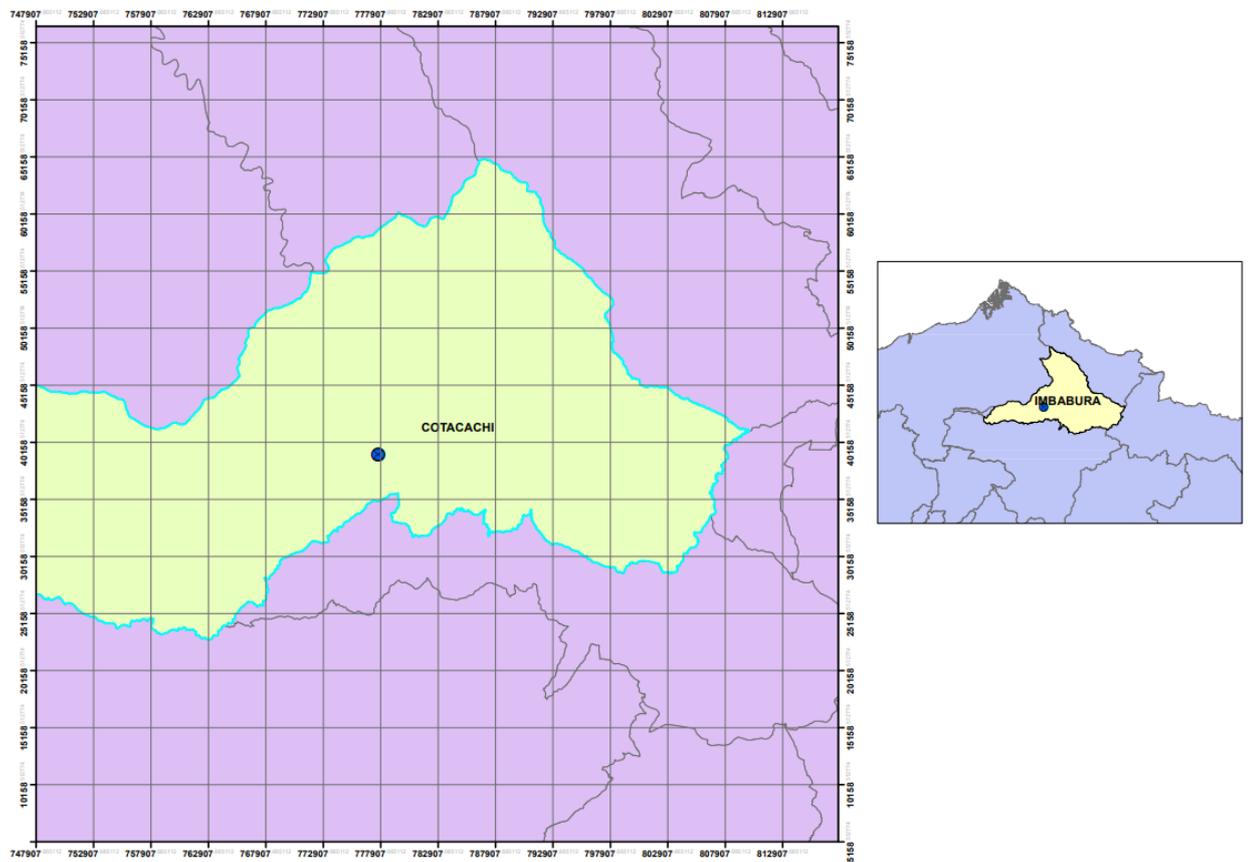


Figura 1: Localización del proyecto

2.2. Cuenca hidrográfica

Para la presente sección se realizó en primera instancia la topografía del lugar de interés, utilizando los mapas topográficos disponibles en el geoportal, pertenecientes a las cartas topográficas de Imantag y Apuela.

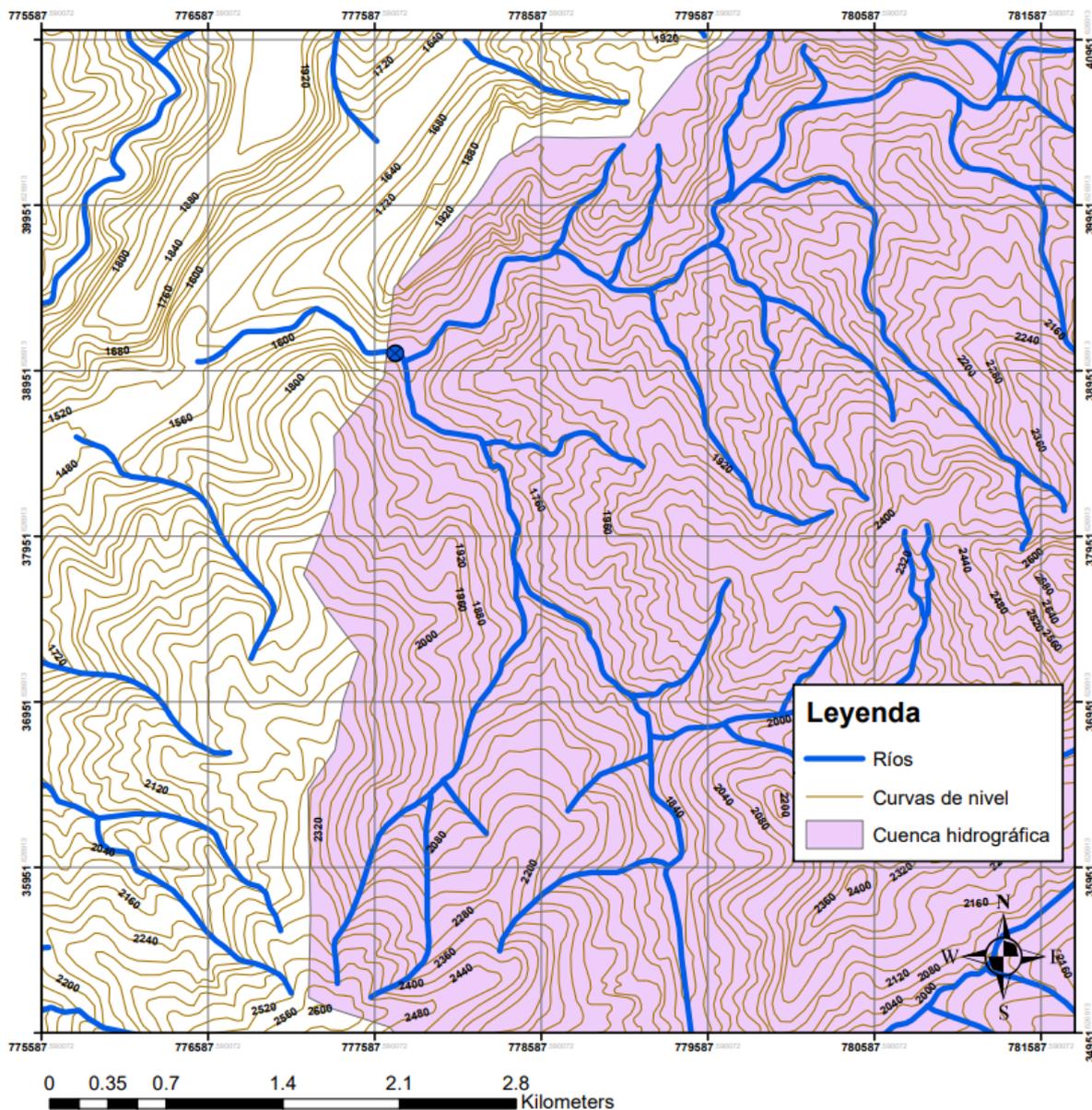


Figura 2: Topografía del proyecto

Posterior a la obtención de la topografía del área, se procedió a realizar el análisis de cuencas hidrográficas con el programa ArcGis, donde con el mismo se obtuvo el proceso:

Primero, se obtuvo el DEM:

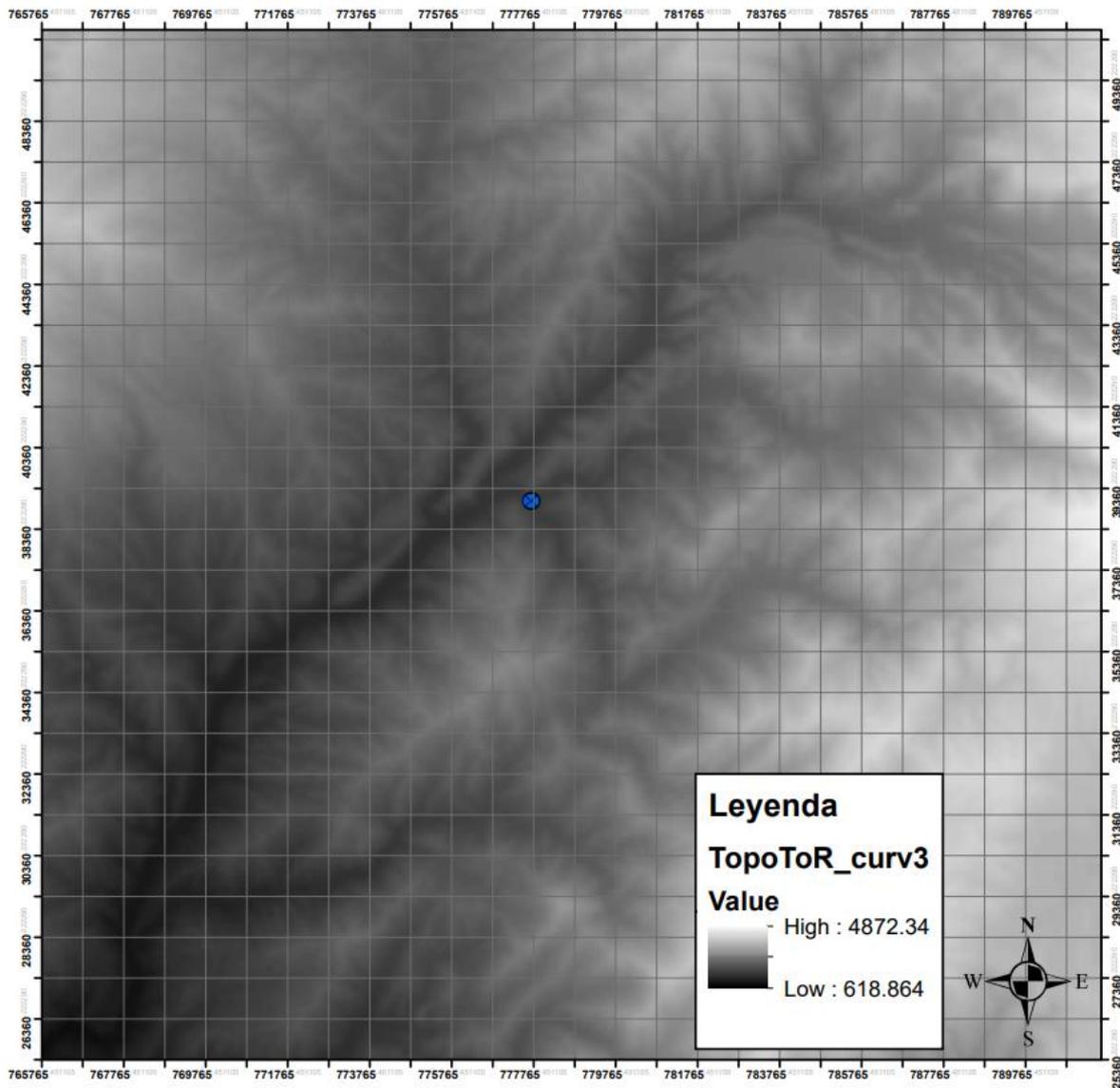


Figura 3: modelo de elevación digital o DEM

Es importante mencionar que el DEM o Digital Elevation Model, es una representación de las elevaciones en una imagen de dos dimensiones por la diferencia de colores, este no necesariamente debe ser a escala de grises, también

puede corresponder a cualquier escala de colores. Cada color en específico representa un nivel de elevación. Si bien esta puede variar, es verdad que el contraste directo de dicho color corresponde a una diferencia de elevaciones.

Posteriormente se obtuvo la dirección de flujo:

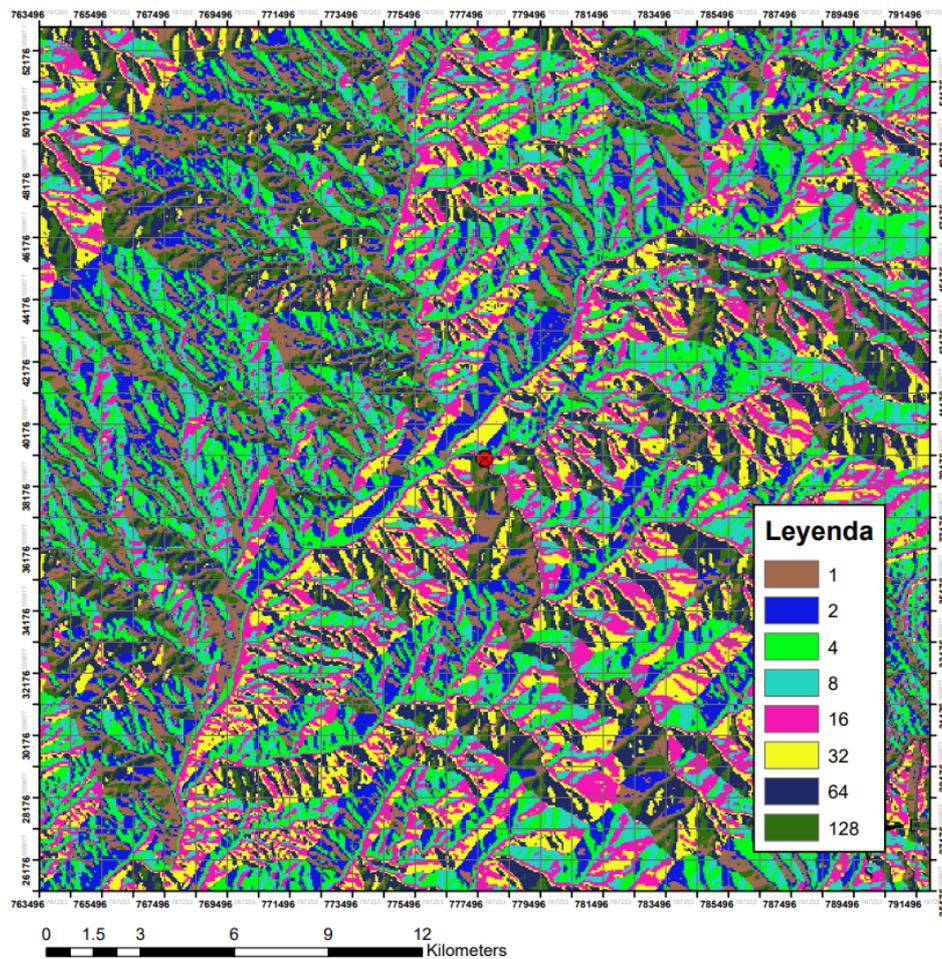


Figura 4: Dirección de Flujo

La dirección de flujo es una representación de la dirección en que fluye una partícula del tamaño de un pixel, esta toma un sistema de comparación donde se localiza un pixel y se analiza el lugar donde se movería, que es la dirección con mayor pendiente cuesta abajo.

A continuación se obtuvo la acumulación de flujo:

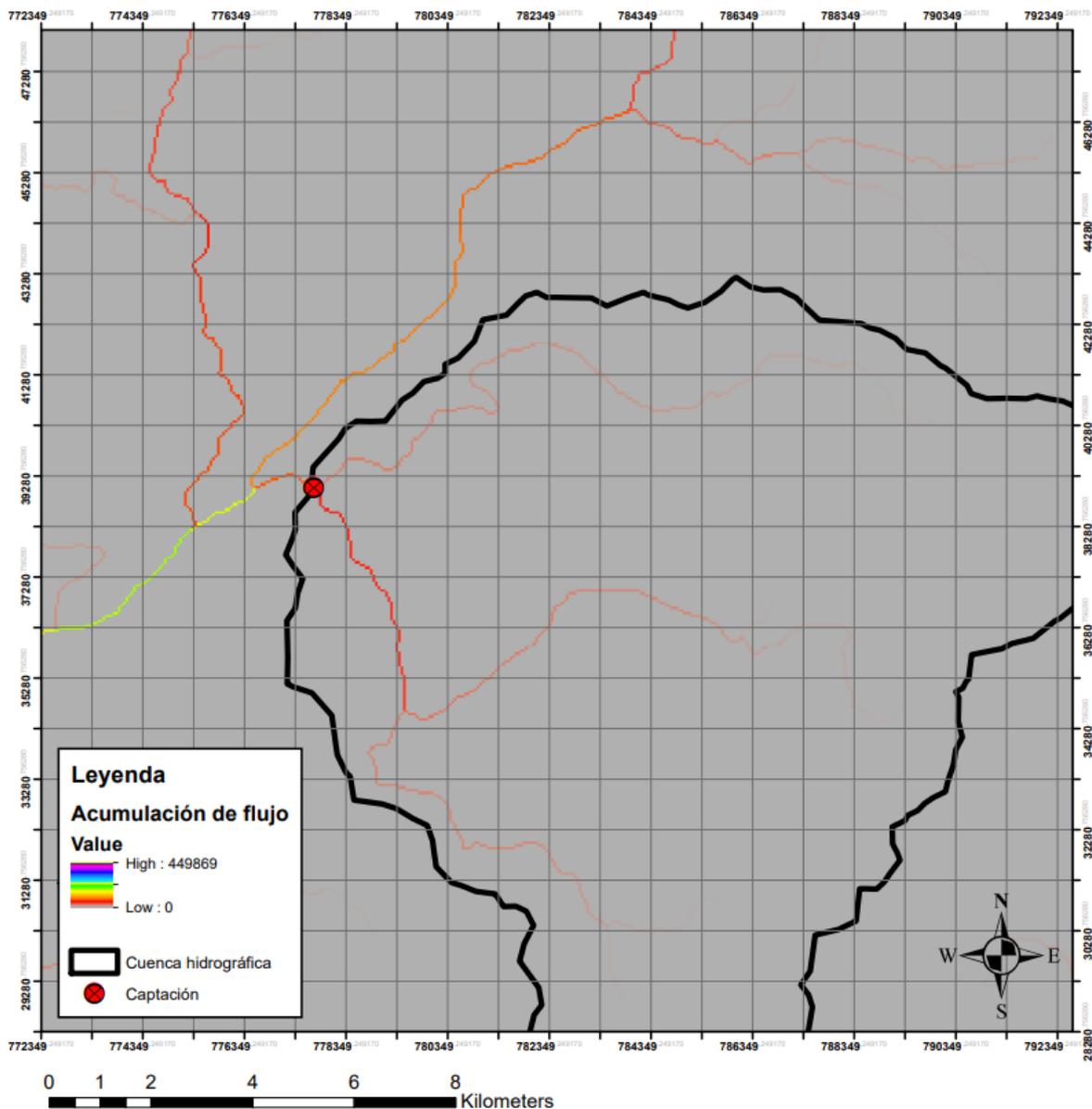


Figura 5: Acumulación de flujo

Tal como indica el nombre, la acumulación de flujo pone partículas y permite su movimiento con el fin de determinar la posición común entre varias partículas, es decir, su acumulación, donde este sería un cuerpo de agua o un drenaje natural es decir, un río, una quebrada, un lago, etc.

Finalmente con la Subaplicación de Watershed de Arcgis, se obtuvo el área de la cuenca de interés:

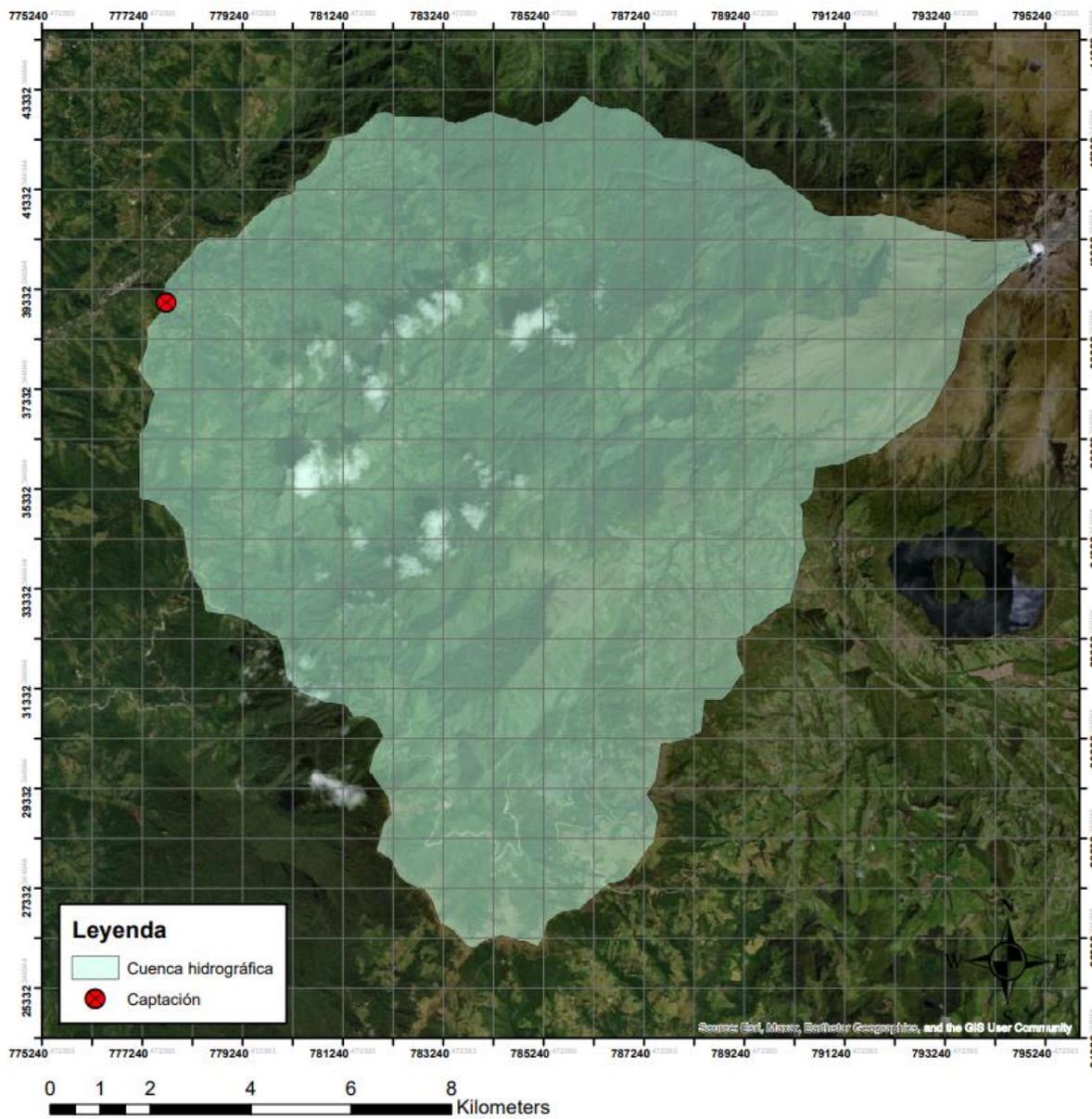


Figura 6: Cuenca hidrográfica del proyecto

Capítulo 3

Análisis hidrológico

3.1. Datos existentes

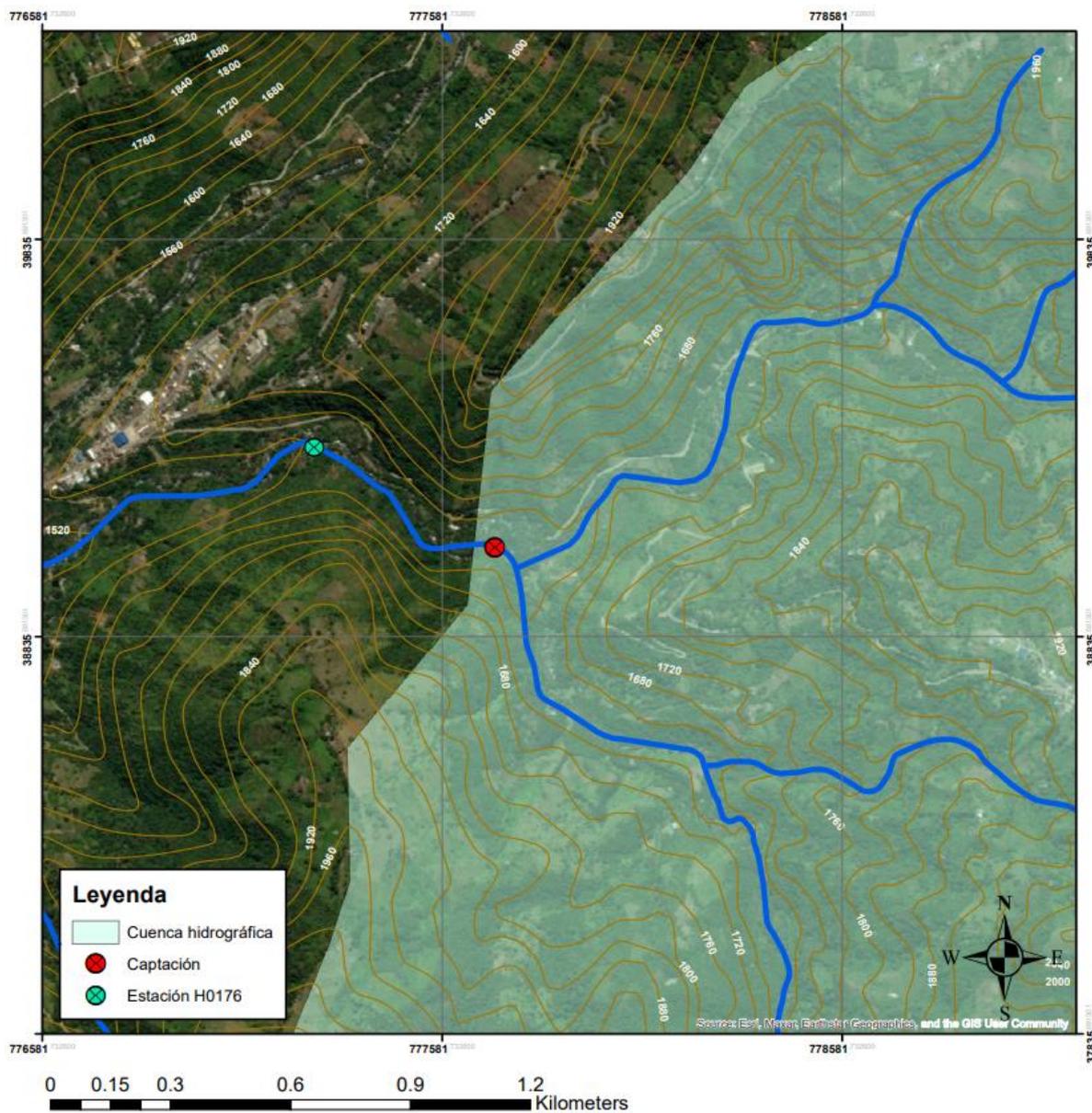


Figura 7: Localización estación hidrológica H0176

Se puede observar que el punto de ubicación de la estación se encuentra muy cerca al punto de captación, mismo por lo que se establece que no hará falta realizar la transposición de datos.

Para el análisis hidrológico se tomó los siguientes datos proporcionados por el INAMHI para la estación H176, en sus anuarios hidrológicos, públicos en su página web:

Tabla de caudales mensuales en la estación H0176												
Caudal en m ³ /s												
Años	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1963									4.05	3.77	5.46	7.8
1964	5.33	7.8	6.04	13.9	9.59	8.09	6.62	5.18	4.05	4.89	10.5	13.9
1965	16.42	15.47	11.42	19.62	18.97	8.09	6.62	4.89	4.05	5.18	15.78	10.5
1966	12.34	11.11	10.5	9.59	10.81	6.33	5.18	5.18	4.05	7.21	10.2	15.78
1967	12.96	27.49	16.73	9.59	11.73	8.69	4.89	2.95	1.89	2.68	2.41	3.49
1968	6.62	13.9	17.37	16.73	8.99	4.05	2.41	1.12	1.37	4.05	4.33	2.41
1969	9.59	12.96	9.89	23.52	12.65	6.04	0.41	0.88	1.37	2.15	6.91	8.99
1970	8.09	20.26	20.59	6.91	10.81	4.05	1.37	3.22	2.95		7.8	10.81
1971	23.52	29.49	25.5	16.73	15.15	7.21	4.89	4.33	5.46	8.09	11.73	8.09
1972	14.84	20.59	15.47	13.58	12.65	8.39	4.61	2.68	1.63	1.37	5.75	10.2
1973	5.18	5.18	6.04	13.9	10.5	5.46	3.49	3.22	4.89	5.75	3.22	6.04
1974	13.9	27.49	19.62		19.62	14.84	12.65	10.81	11.11	16.42	18.01	19.29
1975	21.24	28.82	22.87	14.21	11.42	7.5	10.2	6.62	6.62	6.62	7.5	10.5
1976	13.9	18.97	16.42			14.84	12.34		8.69	8.09	10.5	15.15
1977	12.96	12.96	15.15	16.73	14.52	13.27	9.29	8.09	7.8	9.29	9.59	9.29
1978	18.33	14.21	17.69	21.89	18.97	12.34	10.5	8.09	8.39			13.27
1979	15.47	12.34	23.52	20.91								
Q max	23.52	29.49	25.5	23.52	19.62	14.84	12.65	10.81	11.11	16.42	18.01	19.29
Q med	13.17	17.44	15.93	15.56	13.31	8.61	6.36	4.80	4.90	6.11	8.65	10.34
Q min	5.18	5.18	6.04	6.91	8.99	4.05	0.41	0.88	1.37	1.37	2.41	2.41

Tabla 1: Caudales mensuales de la estación H176 en metros cúbicos por segundo

Es importante mencionar que estos son los datos en bruto, sin ninguna corrección, siendo datos de caudales, en metros cúbicos por segundo.

Para poder darle uso a esta información, se necesita rellenar los datos faltantes, para lo que se utiliza el método racional deductivo, para lo que puede se procede:

En primera instancia, se eliminaron los años que tenían una cantidad pequeña de datos.

En la tabla se puede observar que se obtiene el porcentaje de cada mes dividiendo los datos existentes para el promedio de cada año. Para finalmente en la parte inferior de la tabla, promediar los valores de cada porcentaje para rellenar los datos faltantes de cada año, utilizando el promedio de porcentaje obtenido multiplicándolo por el valor promedio.

Caudales promedio mensuales y su porcentaje de incidencia en el valor total														
Caudal en m3/s e incidencia en %														
Años	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total anual	Promedio
1964	6.33	7.8	6.04	13.9	9.59	8.09	6.62	5.18	4.05	4.89	10.5	13.9	96.89	8.074167
	78.4%	96.6%	74.8%	172.2%	118.8%	100.2%	82.0%	64.2%	50.2%	60.6%	130.0%	172.2%	12	100%
1965	16.42	15.47	11.42	19.62	18.97	8.09	6.62	4.89	4.05	5.18	15.78	10.5	137.01	11.42
	143.8%	135.5%	100.0%	171.8%	166.1%	70.9%	58.0%	42.8%	35.5%	45.4%	138.2%	92.0%	12	1.00
1966	12.34	11.11	10.5	9.59	10.81	6.33	5.18	5.18	4.05	7.21	10.2	15.78	108.28	9.02
	136.8%	123.1%	116.4%	106.3%	119.8%	70.2%	57.4%	57.4%	44.9%	79.9%	113.0%	174.9%	12	1.00
1967	12.96	27.49	16.73	9.59	11.73	8.69	4.89	2.95	1.89	2.68	2.41	3.49	105.5	8.79
	147.4%	312.7%	190.3%	109.1%	133.4%	98.8%	55.6%	33.6%	21.5%	30.5%	27.4%	39.7%	12	1.00
1968	6.62	13.9	17.37	16.73	8.99	4.05	2.41	1.12	1.37	4.05	4.33	2.41	83.35	6.95
	95.3%	200.1%	250.1%	240.9%	129.4%	58.3%	34.7%	16.1%	19.7%	58.3%	62.3%	34.7%	12	1.00
1969	9.59	12.96	9.89	23.52	12.65	6.04	0.41	0.88	1.37	2.15	6.91	8.99	95.36	7.95
	120.7%	163.1%	124.5%	296.0%	159.2%	76.0%	5.2%	11.1%	17.2%	27.1%	87.0%	113.1%	12	1.00
1970	8.09	20.26	20.59	6.91	10.81	4.05	1.37	3.22	2.95	0	7.8	10.81	96.86	8.07
													0	
1971	23.52	29.49	25.5	16.73	15.15	7.21	4.89	4.33	5.46	8.09	11.73	8.09	160.19	13.35
	176.2%	220.9%	191.0%	125.3%	113.5%	54.0%	36.6%	32.4%	40.9%	60.6%	87.9%	60.6%	12	1.00
1972	14.84	20.59	15.47	13.58	12.65	8.39	4.61	2.68	1.63	1.37	5.75	10.2	111.76	9.31
	159.3%	221.1%	166.1%	145.8%	135.8%	90.1%	49.5%	28.8%	17.5%	14.7%	61.7%	109.5%	12	1.00
1973	5.18	5.18	6.04	13.9	10.5	5.46	3.49	3.22	4.89	5.75	3.22	6.04	72.87	6.07
	85.3%	85.3%	99.5%	228.9%	172.9%	89.9%	57.5%	53.0%	80.5%	94.7%	53.0%	99.5%	12	1.00
1974	13.9	27.49	19.62	0	19.62	14.84	12.65	10.81	11.11	16.42	18.01	19.29	183.76	15.31
													0	
1975	21.24	28.82	22.87	14.21	11.42	7.5	10.2	6.62	6.62	6.62	7.5	10.5	154.12	12.84
	165.4%	224.4%	178.1%	110.6%	88.9%	58.4%	79.4%	51.5%	51.5%	51.5%	58.4%	81.8%	12	1.00
1976	13.9	18.97	16.42	0	0	14.84	12.34	0	8.69	8.09	10.5	15.15	118.9	9.91
													0	
1977	12.96	12.96	15.15	16.73	14.52	13.27	9.29	8.09	7.8	9.29	9.59	9.29	138.94	11.58
	111.9%	111.9%	130.8%	144.5%	125.4%	114.6%	80.2%	69.9%	67.4%	80.2%	82.8%	80.2%	12	1.00
1978	18.33	14.21	17.69	21.89	18.97	12.34	10.5	8.09	8.39	0	0	13.27	143.68	11.97
													0	
Suma	1420.5%	1894.7%	1621.5%	1851.4%	1463.3%	881.4%	596.1%	460.8%	446.8%	603.5%	901.9%	1058.1%	13200.0%	
Promedio	129.1%	172.2%	147.4%	168.3%	133.0%	80.1%	54.2%	41.9%	40.6%	54.9%	82.0%	96.2%	1200.0%	

Tabla 2: Proyección de datos faltantes, metros cúbicos por segundo

Al realizar el proceso mencionado se obtiene el siguiente resultado:

Resultado de proyección de datos faltantes												
Caudal en m ³ /s												
Años	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1964	5.33	7.8	6.04	13.9	9.59	8.09	6.62	5.18	4.05	4.89	10.5	13.9
1965	16.42	15.47	11.42	19.62	18.97	8.09	6.62	4.89	4.05	5.18	15.78	10.5
1966	12.34	11.11	10.5	9.59	10.81	6.33	5.18	5.18	4.05	7.21	10.2	15.78
1967	12.96	27.49	16.73	9.59	11.73	8.69	4.89	2.95	1.89	2.68	2.41	3.49
1968	6.62	13.9	17.37	16.73	8.99	4.05	2.41	1.12	1.37	4.05	4.33	2.41
1969	9.59	12.96	9.89	23.52	12.65	6.04	0.41	0.88	1.37	2.15	6.91	8.99
1970	8.09	20.26	20.59	6.91	10.81	4.05	1.37	3.22	2.95	4.43	7.8	10.81
1971	23.52	29.49	25.5	16.73	15.15	7.21	4.89	4.33	5.46	8.09	11.73	8.09
1972	14.84	20.59	15.47	13.58	12.65	8.39	4.61	2.68	1.63	1.37	5.75	10.2
1973	5.18	5.18	6.04	13.9	10.5	5.46	3.49	3.22	4.89	5.75	3.22	6.04
1974	13.9	27.49	19.62	25.77	19.62	14.84	12.65	10.81	11.11	16.42	18.01	19.29
1975	21.24	28.82	22.87	14.21	11.42	7.5	10.2	6.62	6.62	6.62	7.5	10.5
1976	13.9	18.97	16.42	16.68	13.18	14.84	12.34	4.15	8.69	8.09	10.5	15.15
1977	12.96	12.96	15.15	16.73	14.52	13.27	9.29	8.09	7.8	9.29	9.59	9.29
1978	18.33	14.21	17.69	21.89	18.97	12.34	10.5	8.09	8.39	6.57	9.82	13.27

Tabla 3: Resultado de proyección de datos faltantes

Se puede observar los valores en rojo que son los valores rellenados por el método mencionado.

1.6. Curva de duración:

Para el desarrollo de la curva de duración se establece en primera instancia los siguientes datos:

Numero de datos	180
Caudal máximo m ³ /s	29.49
Caudal mínimo m ³ /s	0.41
Rango	29.08
Numero de clase	30
Ampliación intervalo	0.969333

Tabla 4: Datos necesarios para curva de duración

Donde con el fin de obtener una buena precisión, se utilizó 30 clases, por lo que el rango al ser 29.08, este se divide para el número de clases y se

obtiene la ampliación del intervalo, a continuación se determina el límite superior, inferior, el caudal, frecuencia, frecuencia y porcentaje acumulados:

Resultado de curva de duración						
Clase	Límite superior	Q m3/s	Límite inferior	Frecuencia	N veces	%Acumulado
1	29.49	29.01	28.52	2	2	1.1%
2	28.52	28.04	27.55	0	2	1.1%
3	27.55	27.07	26.58	2	4	2.2%
4	26.58	26.10	25.61	1	5	2.8%
5	25.61	25.13	24.64	1	6	3.3%
6	24.64	24.16	23.67	0	6	3.3%
7	23.67	23.19	22.70	3	9	5.0%
8	22.70	22.22	21.74	1	10	5.6%
9	21.74	21.25	20.77	1	11	6.1%
10	20.77	20.28	19.80	3	14	7.8%
11	19.80	19.31	18.83	7	21	11.7%
12	18.83	18.34	17.86	2	23	12.8%
13	17.86	17.37	16.89	2	25	13.9%
14	16.89	16.40	15.92	8	33	18.3%
15	15.92	15.43	14.95	7	40	22.2%
16	14.95	14.47	13.98	6	46	25.6%
17	13.98	13.50	13.01	10	56	31.1%
18	13.01	12.53	12.04	10	66	36.7%
19	12.04	11.56	11.07	6	72	40.0%
20	11.07	10.59	10.10	14	86	47.8%
21	10.10	9.62	9.13	10	96	53.3%
22	9.13	8.65	8.16	6	102	56.7%
23	8.16	7.68	7.20	15	117	65.0%
24	7.20	6.71	6.23	10	127	70.6%
25	6.23	5.74	5.26	9	136	75.6%
26	5.26	4.77	4.29	15	151	83.9%
27	4.29	3.80	3.32	9	160	88.9%
28	3.32	2.83	2.35	10	170	94.4%
29	2.35	1.86	1.38	3	173	96.1%
30	1.38	0.89	0.41	7	180	100.0%

Tabla 5: Resultado de curva de duración

Para esto el límite superior es el valor de máximo caudal, mientras que el valor del límite inferior se obtuvo al restarlo del valor de la ampliación del intervalo. La frecuencia se determina por la cantidad de veces que se repite un caudal dentro del rango de límite superior e inferior. Por último el

porcentaje acumulado es la frecuencia acumulada dividida para su total, por ejemplo, se divide en el primer caso 2 para 180 y se obtiene el 1.1% y así sucesivamente hasta llegar al 100%. Dando como resultado la curva de duración:

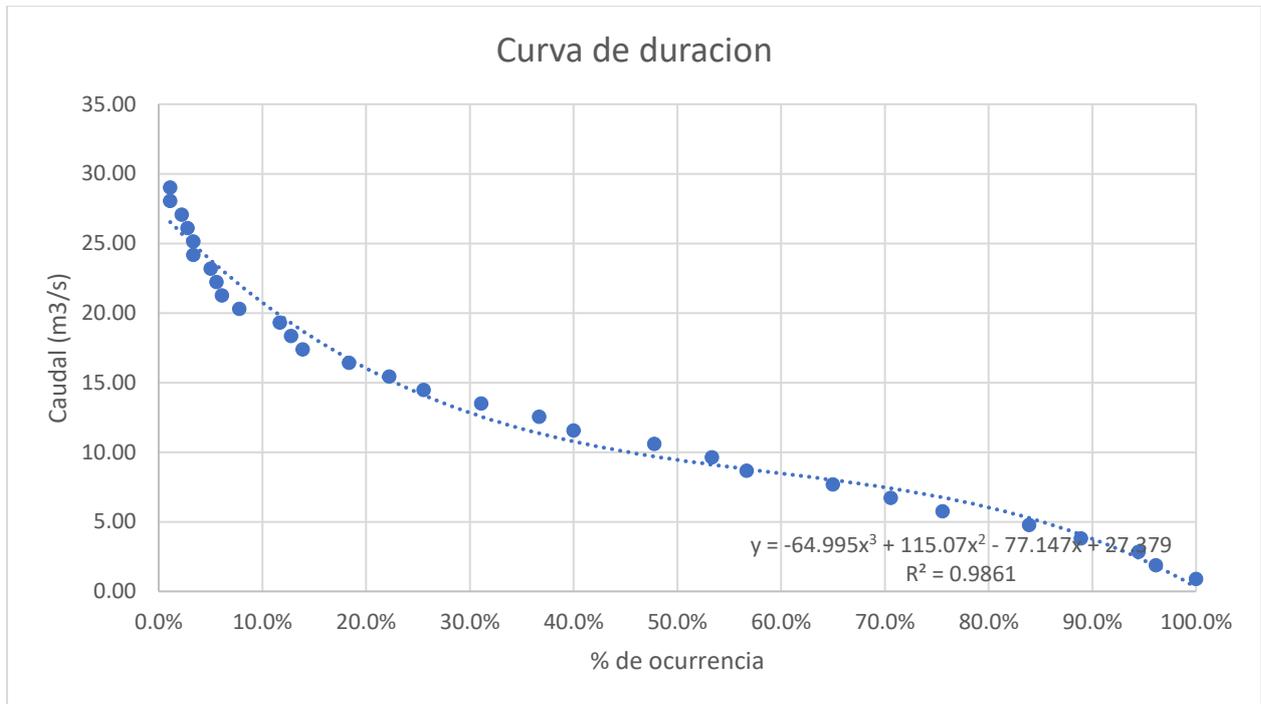


Figura 8: Curva de duración

De la misma forma se presenta los resultados interpolados de decenas:

Probabilidad de ocurrencia (%)	Caudales medios mensuales (m3/s)
90%	3.61
80%	5.22
70%	6.81
60%	8.26
50%	10.20
40%	11.56
30%	13.69
20%	15.99
10%	19.73

Tabla 6: Probabilidad de ocurrencia y Datos mensuales

1.7. Caudal óptimo

El concepto de caudal óptimo es determinar el caudal menor que produce la mayor cantidad de energía para lo que se utiliza en primera instancia los siguientes datos:

Altura (m)	135
Eficiencia turbina	0.9
Eficiencia generador	0.92

Tabla 7: Datos necesarios para determinar caudal óptimo

Para la aplicar la ecuación de potencia relativa:

$$P = Q \cdot E_t \cdot E_g \cdot h \cdot g$$

Donde:

$P =$ Potencia relativa en kw

$Q =$ Caudal en $\frac{m^3}{s}$

$E_t =$ Eficincia de turbina

$E_g =$ Eficiencia generador

$h =$ Altura de caida (m)

$g =$ gravedad en $\frac{m}{s^2}$

Para así obtener la Energía:

Clase	Q m3/s	Potencia relativa KW	Duración	Energía KJ
1	29.01	31806.14	1.11%	3095798
2	28.04	30743.20	1.11%	2992339
3	27.07	29680.27	2.22%	5777760
4	26.10	28617.33	2.78%	6963552
5	25.13	27554.40	3.33%	8045886
6	24.16	26491.47	3.33%	7735510
7	23.19	25428.53	5.00%	11137699
8	22.22	24365.60	5.56%	11857927
9	21.25	23302.6	6.11%	12474696
10	20.28	22239.73	7.78%	15152673
11	19.31	21176.80	11.67%	21642691
12	18.34	20113.86	12.78%	22514122
13	17.37	19050.93	13.89%	23178636
14	16.40	17987.99	18.33%	28888728
15	15.43	16925.06	22.22%	32947462
16	14.47	15862.13	25.56%	35510026
17	13.50	14799.19	31.11%	40332748
18	12.53	13736.26	36.67%	44120880
19	11.56	12673.33	40.00%	44407349
20	10.59	11610.39	47.78%	48593379
21	9.62	10547.46	53.33%	49277744
22	8.65	9484.52	56.67%	47081200
23	7.68	8421.59	65.00%	47952560
24	6.71	7358.66	70.56%	45481429
25	5.74	6295.72	75.56%	41669317
26	4.77	5232.79	83.89%	38454051
27	3.80	4169.85	88.89%	32469302
28	2.83	3106.92	94.44%	25704627
29	1.86	2043.99	96.11%	17209043
30	0.89	981.05	100.00%	8594062

Tabla 8: Relación entre Energía producida y Caudal

Y de forma gráfica:

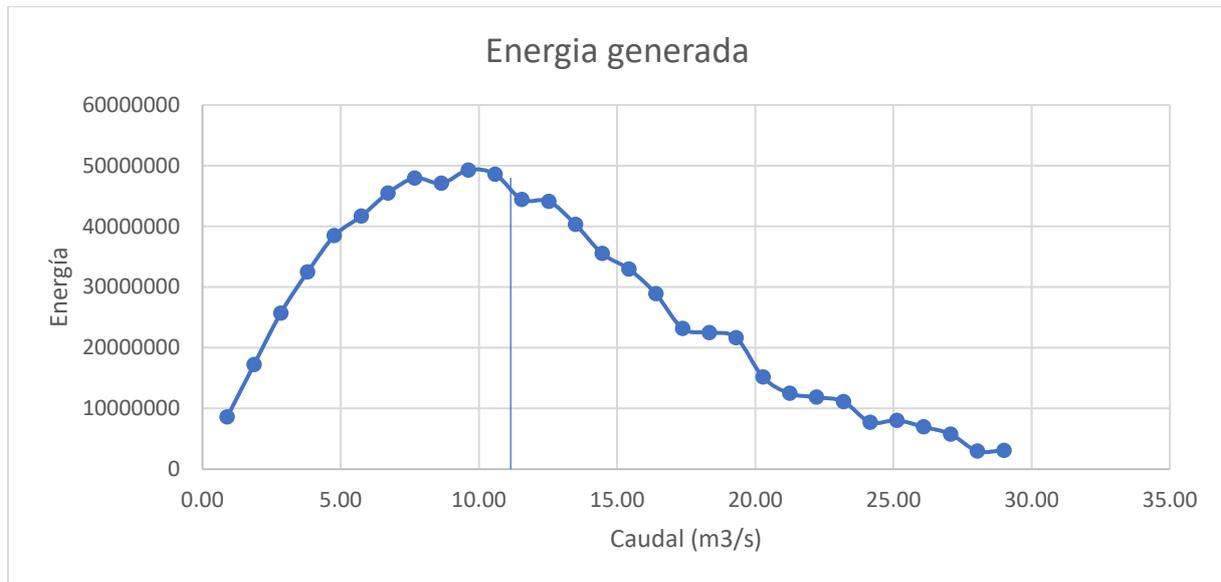


Figura 9: Energía generada vs Caudal necesario

Por lo que se establece el caudal óptimo como:

$$Q = 7.5 \frac{m^3}{s}$$

Se eligió 7.5 metros cúbicos por segundo como caudal óptimo ya que la diferencia en energía producida con los siguientes puntos que varían de 9 a 10 metros cúbicos por segundo, es mínima, por ende se tendría un rendimiento similar con un costo menor puesto que la infraestructura hidráulica será de menor tamaño que para 9 o 10 metros cúbicos

1.8. Curvas IDF

El propósito de determinar las curvas de intensidad, duración y frecuencia es el de comprender y cuantificar la magnitud de las precipitaciones extremas en la región del proyecto hidroeléctrico.

Para la generación de curvas IDF se utilizó la información de precipitación máxima en 24 horas proporcionado por INAMHI que puede ser observado en anexos.

Los años de información que se utilizó son:

Precipitación máxima en 24 horas													
Precipitación en mm													
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Máximo
1966	20.00	23.50	48.20	25.40	65.00	13.40	20.70	3.70	29.10	43.70	40.90	33.90	26.00
1967	27.80	29.20	47.30	20.80	30.10	14.80	22.30	1.80	9.40	49.70	11.40	40.30	25.60
1968	40.70	42.80	30.20	65.00	14.60	8.00	7.20	14.60	29.70	21.90	17.80	10.90	39.10
1969	41.00	57.60	52.40	83.80	47.40	81.00	2.90	4.70	20.50	17.70	40.80	59.10	34.30
1970	22.70	35.70	59.80	56.36	33.60	8.90	10.80	9.70	43.10	33.20	28.60	34.30	39.80
1971	44.90	45.20	54.40	36.80	55.40	30.70	1.50	7.40	24.20	33.00	13.60	44.80	36.70
1972	31.10	29.50	26.10	40.40	28.90	20.00	15.50	52.90	48.30	27.30	50.70	41.30	119.40
1973	32.00	45.70	28.20	41.90	35.00	20.50	20.40	10.00	8.90	35.40	17.30	12.80	36.90
1974	58.90	25.30	45.70	49.80	48.20	30.30	1.50	1.90	30.00	14.30	32.80	69.90	26.00
2010	26.90	27.10	39.00	29.00	13.80	15.70	7.60	18.50	42.00	17.10	57.60	26.80	40.80
2011	36.60	38.00	29.20	39.10	24.50	5.40	15.50	2.10	20.20	10.00	18.20	41.90	36.60
2012	34.50	31.90	46.10	35.30	29.00	10.20	10.40	35.30	24.30	18.00	37.60	7.00	36.70
MAX	58.90	57.60	59.80	83.80	65.00	81.00	22.30	52.90	48.30	49.70	57.60	69.90	119.40

Tabla 9: Precipitación máxima en 24 horas en milímetros

Con estos se generó las Curvas de intensidad, duración y frecuencia:

Tabla de intensidades - Tiempo de duración													
Frecuencia	Duración en minutos												
años	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
2	72.10	47.03	36.63	30.68	26.74	23.89	21.73	20.01	18.61	17.44	16.44	15.59	
5	90.09	58.77	45.77	38.34	33.41	29.86	27.15	25.01	23.26	21.79	20.55	19.48	
10	106.64	69.56	54.18	45.37	39.54	35.34	32.14	29.60	27.52	25.79	24.32	23.05	
25	133.26	86.92	67.70	56.70	49.41	44.16	40.16	36.99	34.40	32.23	30.39	28.81	
50	157.72	102.88	80.13	67.11	58.49	52.27	47.53	43.78	40.71	38.15	35.97	34.10	
100	186.68	121.77	94.84	79.43	69.23	61.87	56.26	51.81	48.19	45.16	42.58	40.36	
500	276.11	180.11	140.28	117.48	102.39	91.50	83.21	76.64	71.27	66.79	62.98	59.69	

Tabla 10: Relación entre intensidad y tiempo de duración

Con su representación gráfica:

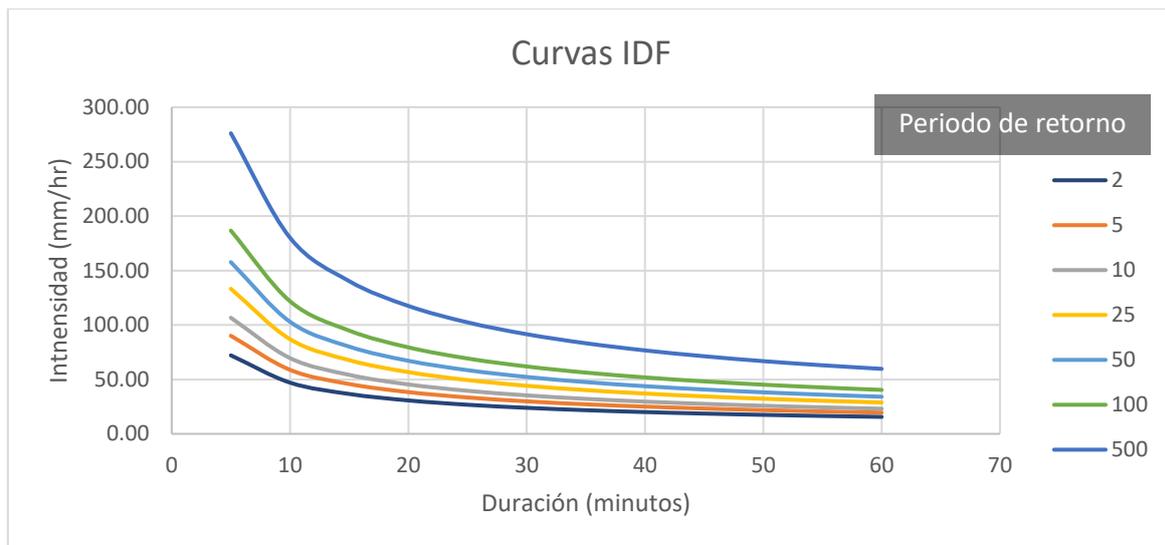


Figura 10: Curvas IDF

1.9. Caudal de máxima crecida

El caudal de máxima crecida se necesita para determinar las dimensiones de las diferentes estructuras hidráulicas, como los muros de ala. El objetivo es que en caso de que ocurra una tormenta con un periodo de retorno de 100, 50, 10 años de retorno, las estructuras se encuentren diseñadas para soportar dichos caudales generados por la precipitación.

Para esto se en primera instancia se realizó el proceso de para la obtención de Curva número:

La curva número es un método que busca simplificar un coeficiente de escorrentía que depende del uso del suelo y del tipo de suelo, este va desde 60 hasta 100. Una vez determinado para cada área, se realiza un coeficiente ponderado para todos los datos obtenidos.

Primero se determinó la cobertura vegetal de la zona:

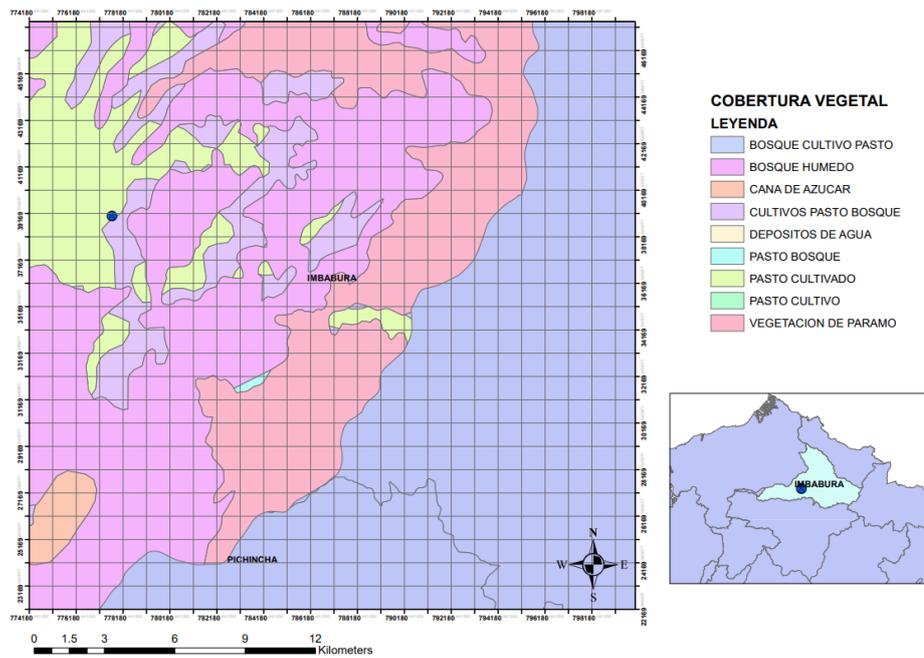


Figura 11: Cobertura vegetal de la zona

Posteriormente se hizo lo mismo pero con el tipo de suelo:

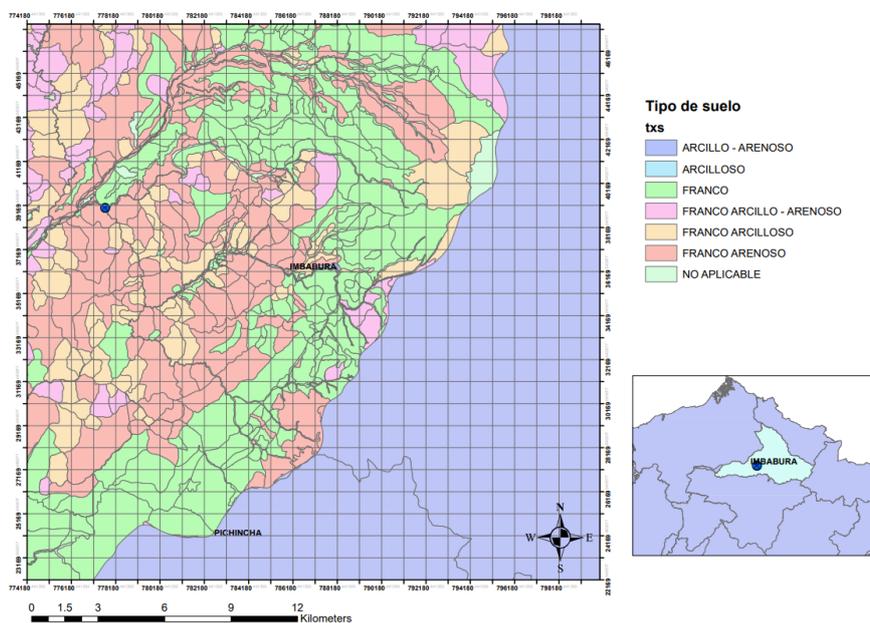


Figura 12: Tipo de suelo de la zona

Con esto se logró filtrar los valores especificados para la curva número y se procesó con el software para ArcGIS HEC-GEOHMS, con el mismo se obtuvo el siguiente resultado:

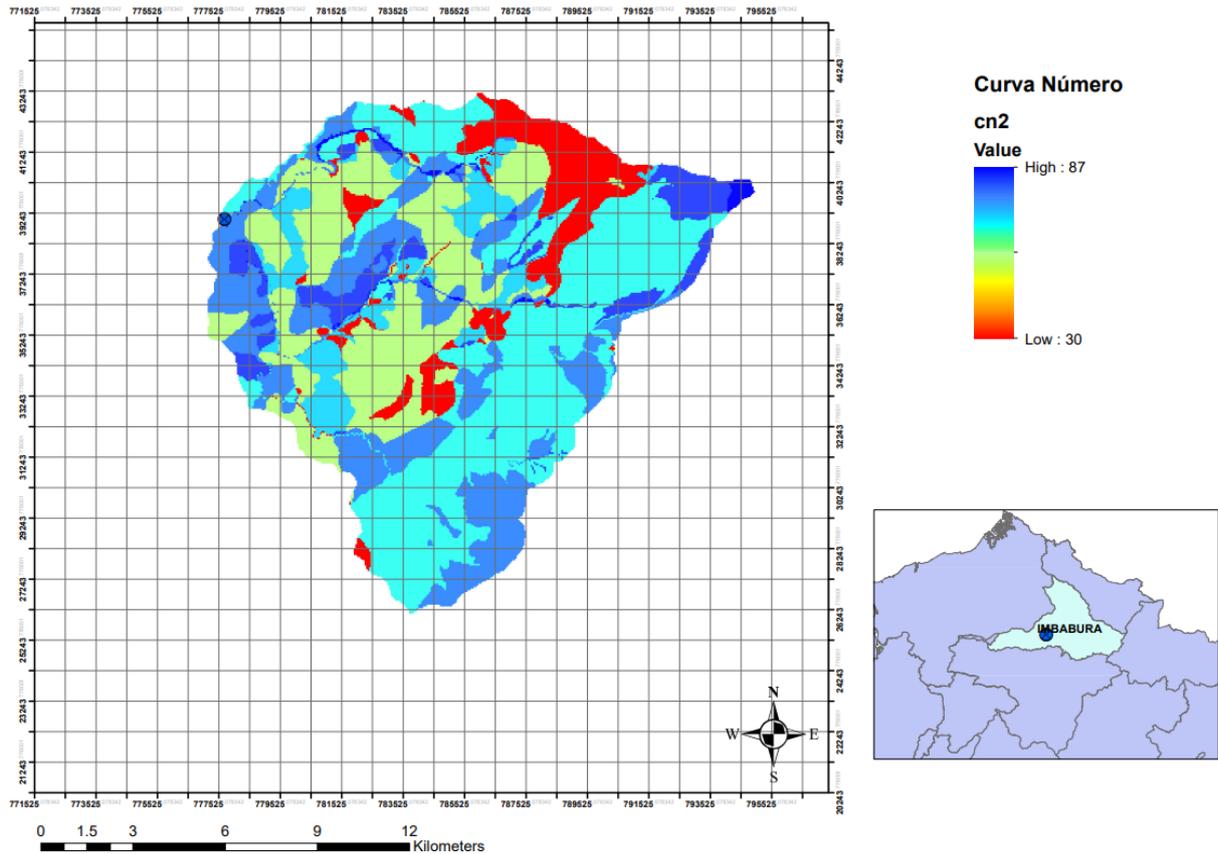


Figura 13: Obtención de Curva número

Con esto se puede realizar el proceso para obtener la curva número promedio de la zona con un promedio ponderado entre áreas y número curva

Área total m2	172197659.41
Área*CN sum	11190822081.80
CNpromedio	65.0

Tabla 11: Resultado numérico de la curva número

Como se observa, la curva número promedio es 65, esto se utiliza para el software HEC-HMS, con el que se procede a calcular el caudal de máxima crecida. Donde también previo a realizar el procedimiento, se obtuvo la pendiente promedio de la cuenca:

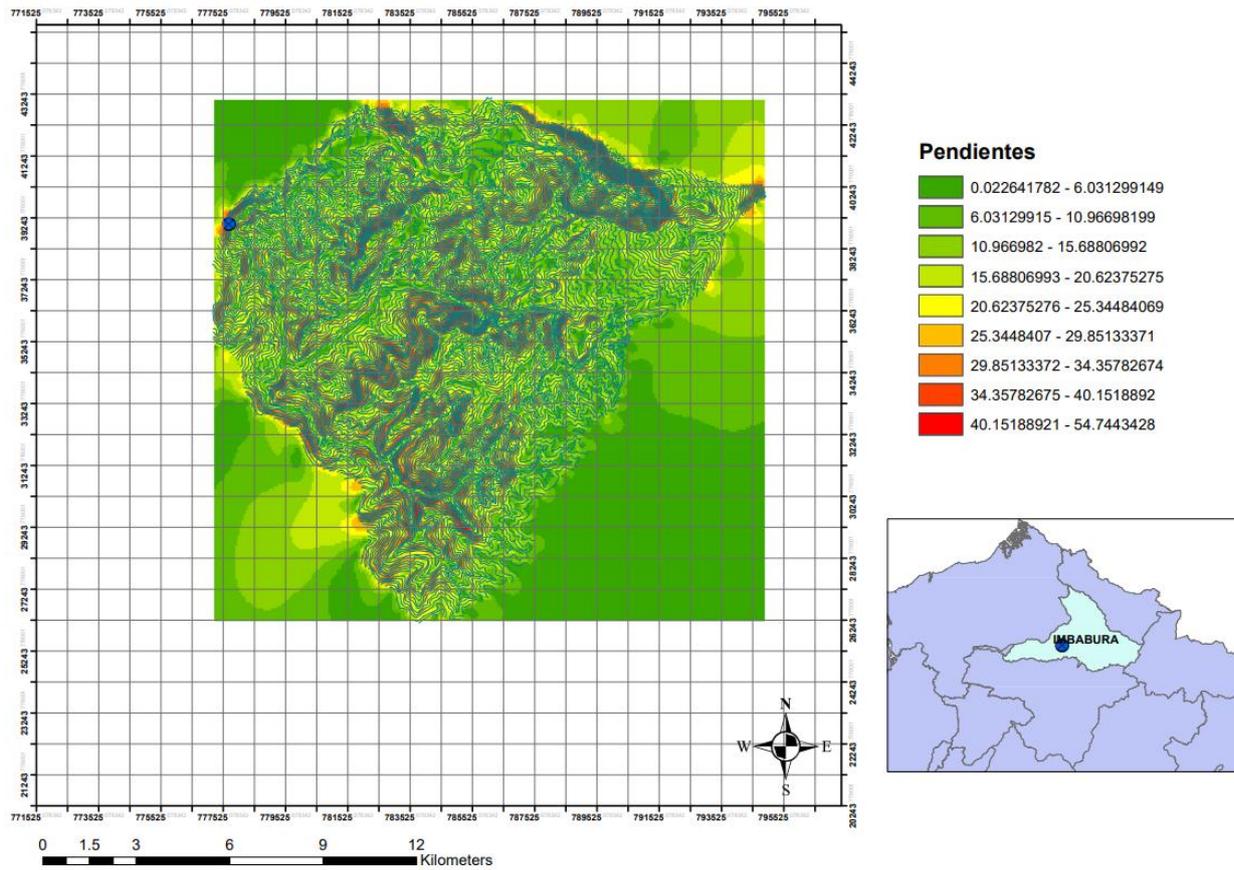


Figura 14: Mapa de pendientes de la zona

Así mismo se puede observar la información obtenida:

Rowid	ID	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM
1	1	37378	172531668.633436	0.10597	54.744343	54.638373	23.163868	9.488796	865819.043975

Figura 15: Datos estadísticos del mapa de pendientes

Donde la pendiente media es de 23.16% o 0.2316 m/m, esto se debe a que es una zona montañosa con una gran cantidad de pendientes pronunciadas.

Finalmente se coloca la información en el software mencionado:

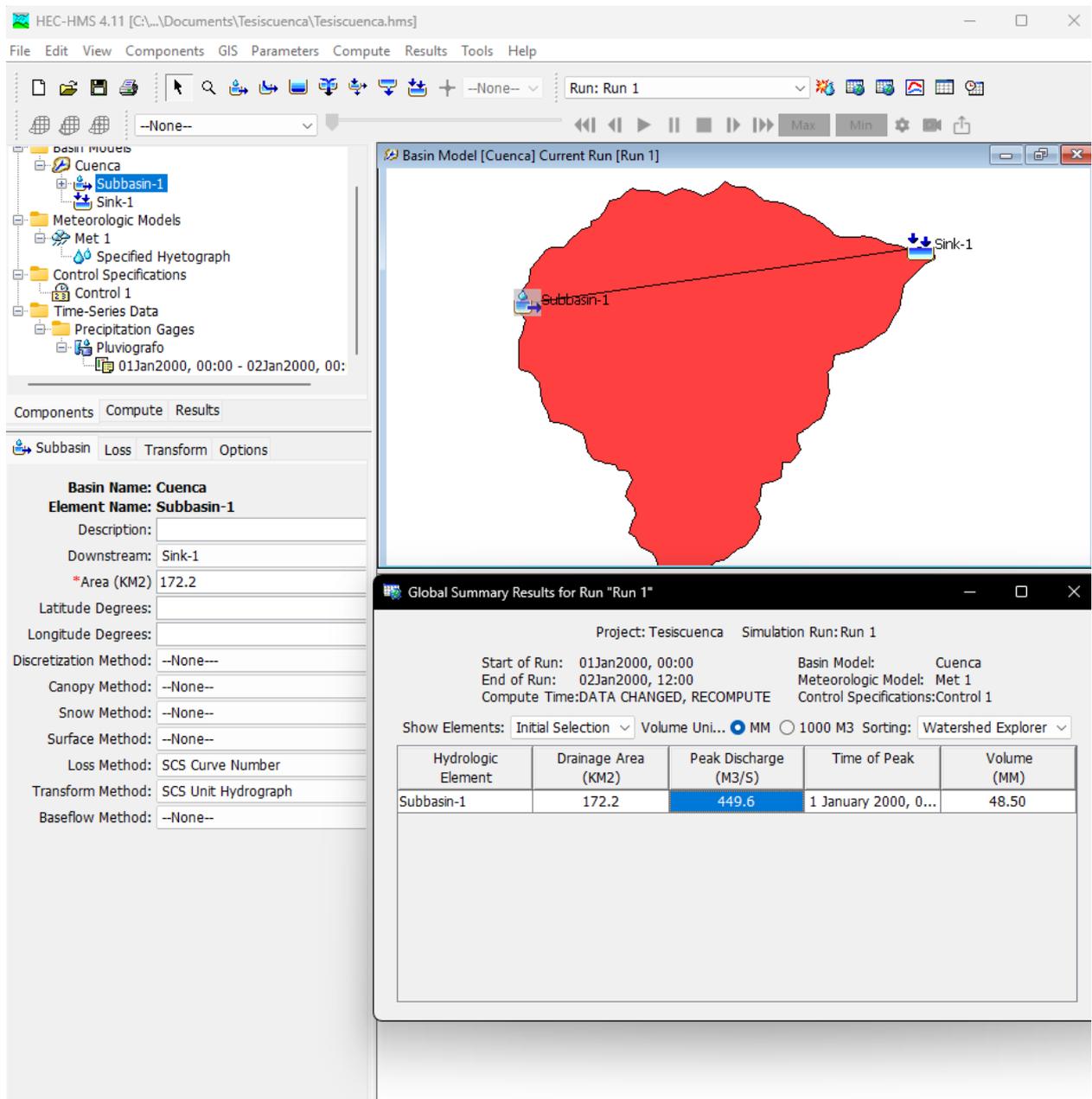


Figura 16: Obtención del caudal de máxima crecida

El software HEC-HMS es un software que fue desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército estadounidense con el objetivo de modelar el comportamiento de las cuencas hidrográficas y al mismo tiempo analizar eventos de lluvia, este se compone en primera instancia de la entrada de datos donde se ingresan datos sobre la cuenca, la topografía, uso de tierra, clima y precipitación, mismos datos que se muestra como fueron obtenidos en el presente documento. En segundo lugar se

define la cuenca de estudio, es decir el área geográfica del lugar. Los parámetros de modelado, como el modelo hidrológico. La generación de hidrogramas de lluvia, así también como el modelado de la escorrentía. La generación de hidrogramas de crecida y así mismo, el análisis de crecidas que es el resultado final esperado que se encontró como se puede observar, siendo el caudal de máxima crecida, $449 \frac{m^3}{s}$.

Con esto concluye la caracterización hidrológica de la cuenca y se procede al diseño de los elementos hidráulicos.

Capítulo 4

Diseño de obras hidráulicas

4.1. Captación

Para el diseño de obras hidráulicas se determina el uso de una compuerta lateral controlada por componentes mecánicos, por lo que esta se diseña:

$$Q = C_D \cdot A_o \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Donde:

C_D = Coeficiente de contracción

A_o = Area del orificio

h = Altura del agua hasta el centro del orificio

g = Valor de la gravedad

Se escogieron los siguientes valores para llegar al valor planteado como caudal de diseño de 7.5 metro cúbicos por segundo:

$$Q = 0.62 \cdot 3.9 \cdot \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 0.5}$$

$$Q = 7.572 \frac{m^3}{s}$$

Esto con las dimensiones del área del orificio rectangular son las siguientes:

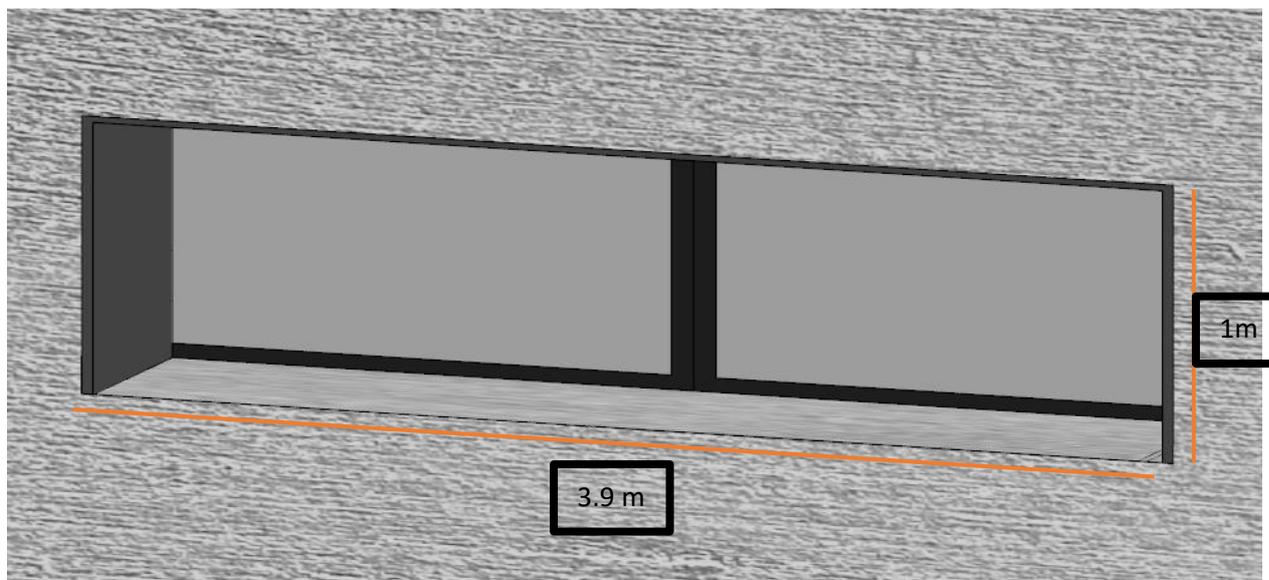


Figura 17: Orificio rectangular donde se realizará la captación del caudal de diseño. El diseño propuesto incluye compuertas con el fin de poder cerrar el flujo y realizar limpieza. El diseño de las compuertas corresponde a un estudio mecánico que se recomienda realizar para estudios definitivos.

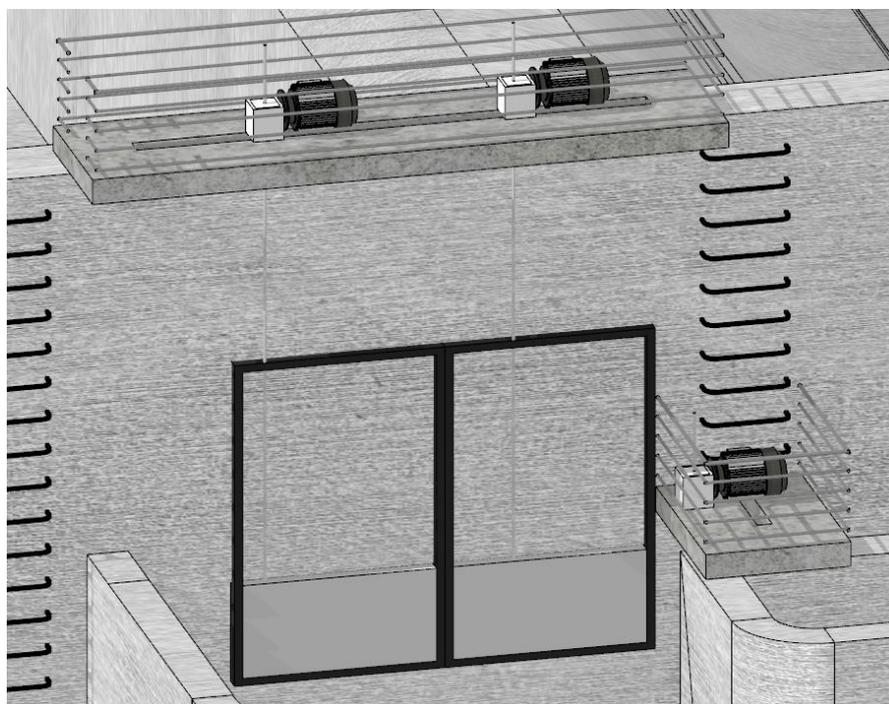


Figura 18: Compuertas para cerrar o admitir el flujo hacia la captación

1.10. Azud

Se establece la altura mínima del paramento para el caudal de máxima crecida de 449 metros cúbicos por segundo, con un ancho de canal de 34 metros, de 1.56 metros mínimo, esto se logró al iterar para obtener la altura que tendría el canal con dicho caudal. A esto, se asume la peor condición posible que es donde el río en cuestión tiene una gran cantidad de partículas flotando y de sedimentos por lo que se elige para el azud una altura de 4.6 metros, y se utilizará el perfil Creager con el fin de disminuir turbulencias y erosión de la estructura hidráulica.

A continuación se presentan los resultados del cálculo del perfil Creager:

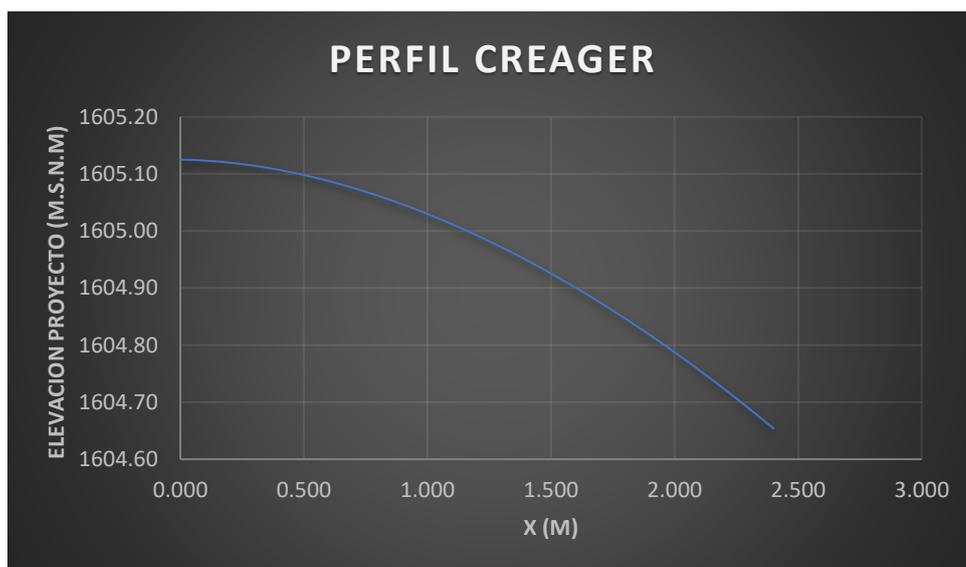


Figura 19: Perfil Creager para Azud.

1.11. Conducción

Se propone un canal cerrado de hormigón armado puesto que este es un material durable que cumple con el periodo de diseño para este, con el fin de calcular el área se determina con la ecuación de Manning, puesto que este no será presurizado, se muestran las ecuaciones que serán utilizadas:

En primera instancia se presenta la ecuación del área de un canal circular en función de su ángulo:

$$A = \frac{D}{4} \cdot \left(\frac{\pi \cdot \theta}{360} - \frac{\sin(\theta)}{2} \right)$$

Así mismo se presenta del perímetro mojado

$$PM = \left(\frac{\pi \cdot D \cdot \theta}{360} \right)$$

Y finalmente del radio hidráulico

$$R = \frac{A}{PM}$$

Estas ecuaciones serán utilizadas dentro de la ecuación de Manning.

Con esto se buscará que transporte los 7.5 metros cúbicos captados hasta el tanque de presión con una pendiente máxima de 0.001 metro sobre metro.

Es importante mencionar que la conducción tiene la pendiente mencionada con el fin de no perder caída para llegar al tanque de presión y de este realizar la caída que llegará a la casa de máquinas y transformará la energía cinética a mecánica y esta a eléctrica.

Se asume un coeficiente de Manning de 0.015, puesto que se esperan acabados aceptables de la estructura.

Por experiencia previa se puede determinar que lo óptimo es que la tubería circular esté llena al 94%, por lo que se buscará este porcentaje.

Resultado de utilizar el software de Excel con su herramienta solver, se determina que el diámetro de la tubería necesario es de 2.5 metros.

A continuación se presentan los resultados y propiedades de la tubería:

%	Alfa	theta	h	Yn	A	PM	R	Q
0.94	0.99	5.29	1.08	2.30	4.60	6.48	0.71	7.71

Tabla 12: Resultados de iteración para determinar el diámetro de tubería

A continuación se muestra el trazado de la conducción:

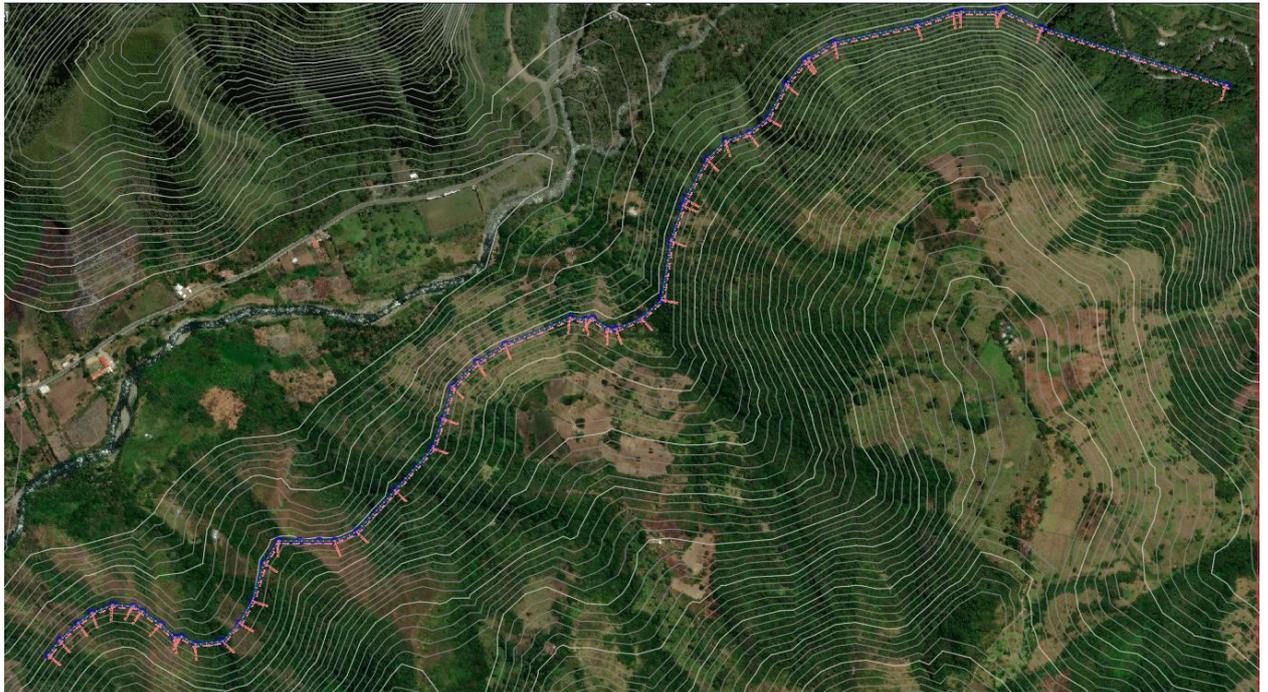


Figura 20: Trazado de conducción

Como se puede observar se intenta minimizar la pendiente de la conducción al seguir la curva de nivel específica.

Por último para la conducción se muestra el corte y relleno necesario para que esta pueda mantener su pendiente constante:



Figura 21: Perfil vertical de conducción

A detalle se puede observar que esta comienza en la cota 1616.7 m.s.n.m. y esta termina en la cota 1600 m.s.n.m. manteniendo una pendiente del 1%.

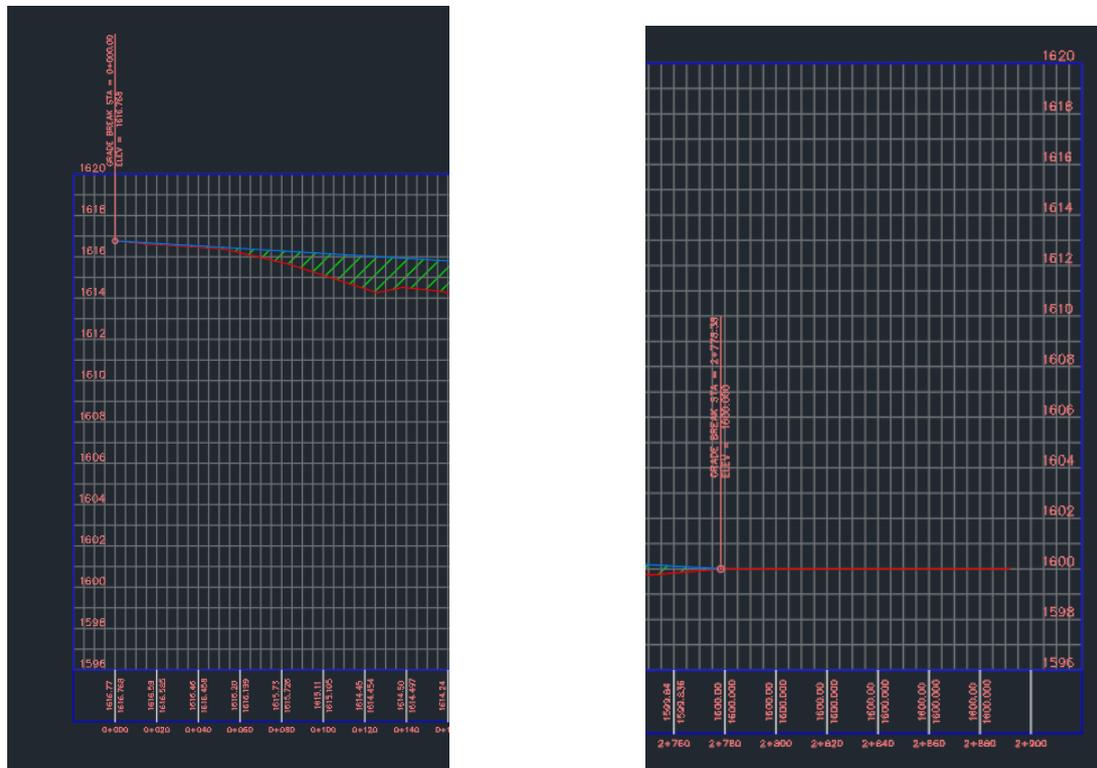


Figura 22: Acercamiento a cotas en perfil vertical

A continuación se presenta el modelo final después de considerar todas las estructuras hidráulicas y su dimensión pertinente

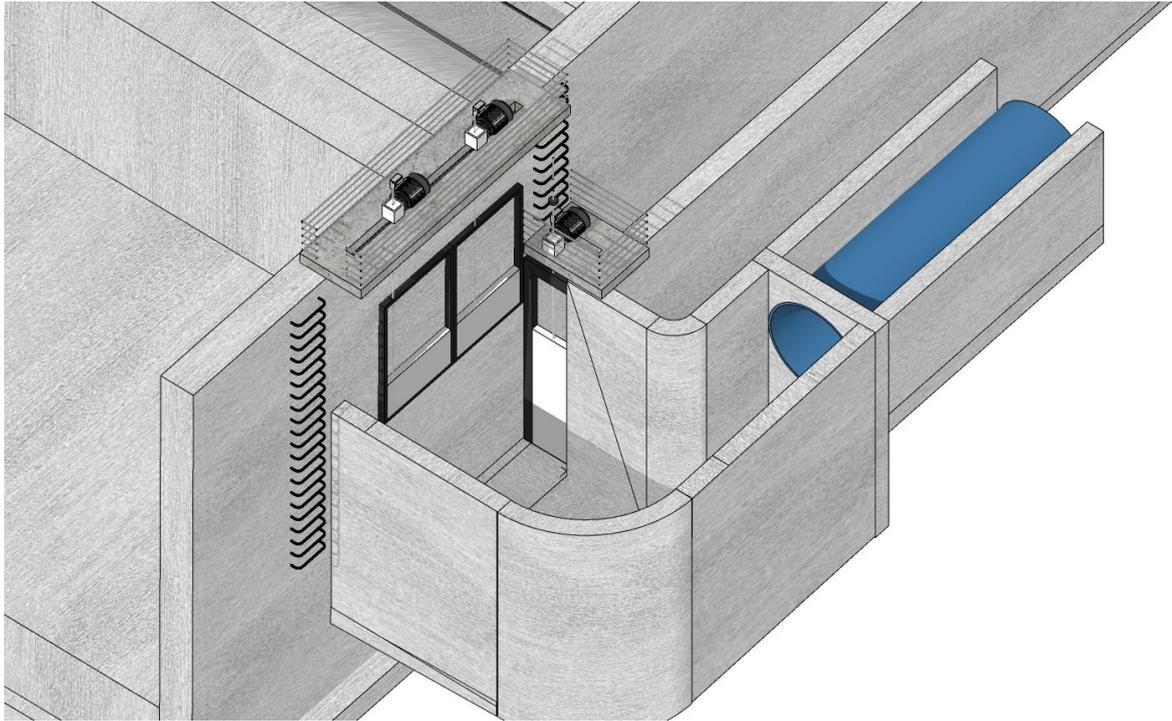


Figura 23: Acercamiento a captación

Como se puede observar en el gráfico se plantean las compuertas que dan apertura al orificio rectangular previamente planteado, así también como una compuerta mecánica de igual forma que tiene como objetivo la limpieza de la estructura. Se puede observar el inicio de la conducción de igual forma a la altura determinada.

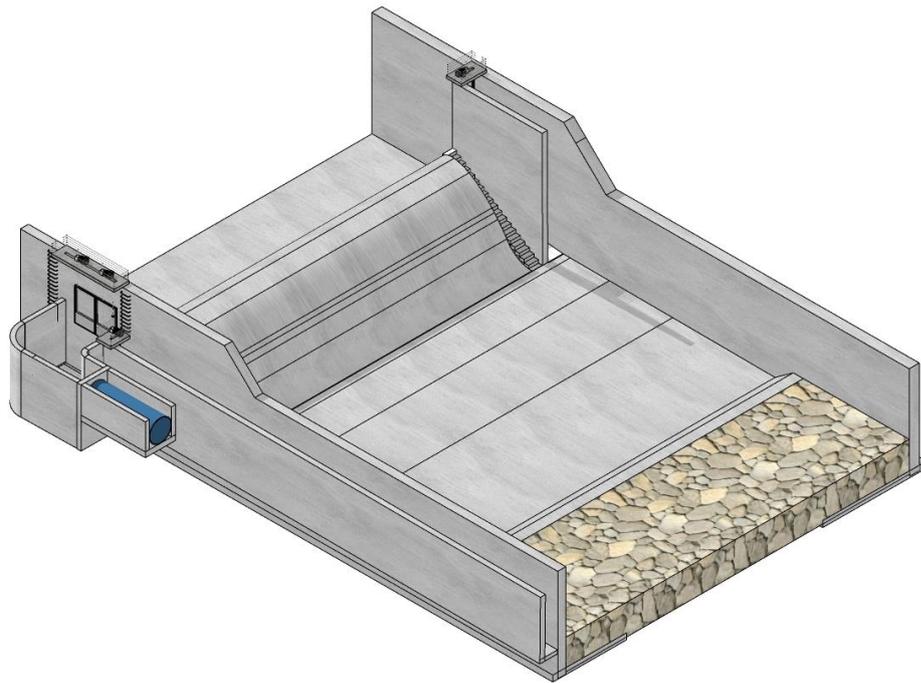


Figura 24: Vista general de la captación

Se puede observar que la captación tiene también una escalera de peces, puesto que estos tienden a subir contra corriente en ocasiones determinadas, esto asegura su libre paso por la estructura, disminuyendo el impacto ambiental de esta.



Figura 25: Vista en planta de la captación

Como se observa, esta tiene un dissipador de energía al final, esto con el fin de disminuir la velocidad consecuente del azud.



Figura 26: Vista posterior de la captación

En esta vista se puede apreciar ciertos detalles que agilizan el uso de la misma, tales como escaleras, grúas hidráulicas para las compuertas, entre otros.

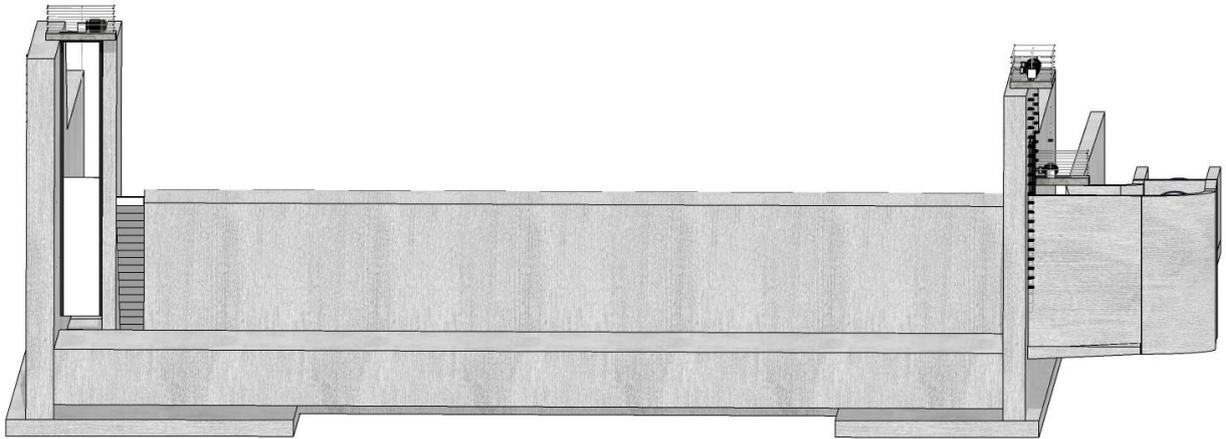


Figura 27: Vista frontal de la estructura.

En esta figura se puede apreciar la altura del talud y de los muros de ala que fueron diseñados en base al caudal de máxima crecida.

Capítulo 5

Análisis económico

2.1. Costo referencial

Para determinar un costo de construcción de la hidroeléctrica se da uso de la investigación de Costo comparativo por kilovatio de los últimos proyectos hidroeléctricos en Ecuador, realizada por Sebastián Naranjo, Diego Punina y Javier Álvarez. Donde se analiza los diferentes proyectos hidroeléctricos que ya han sido construidos en Ecuador, con su respectiva potencia instalada (Naranjo et al, 2022)

En la tabla del documento mencionado se puede observar la comparación entre las hidroeléctricas, Coca Codo Sinclair, Sopladora, Minas San Francisco, Delsintagua y Manduriacu. Dando un costo por kilowatt de 2018 $\frac{USD}{kW}$ (Naranjo et al, P.30, 2022)

Considerando que la hidroeléctrica tendrá una potencia instalada de 8.5MW o 8500kW realizamos la siguiente operación:

$$Costo = 2018 \frac{USD}{kW} \cdot 8500kW = 17'153,000USD$$

Se eligió determinar de esta forma el costo ya que al tener únicamente los volúmenes de obra de las estructuras hidráulicas, sin tomar en cuenta valores ambientales, electromecánicos, eléctricos, topográficos, entre otros, es la mejor forma de aproximar al valor real del costo de construcción de la hidroeléctrica en cuestión.

2.2. Producción energética

A continuación se muestra la producción energética para un año típico. Esto se logra primero determinando los caudales promedios mensuales para cada mes de cada

año analizado. Posteriormente se realiza un promedio del mes y se obtiene un promedio anual para cada mes. A partir de esto se obtiene una potencia relativa en MW.

La potencia relativa en MW se define por la ecuación definida previamente que se muestra a continuación nuevamente:

$$P = Q \cdot E_t \cdot E_g \cdot h \cdot g$$

Se puede revisar los términos de esta ecuación en el capítulo 1.

El objetivo de obtener la potencia relativa para cada caudal promedio mensual es compararlo con la potencia instalada, ya que la potencia instalada sería el máximo posible para producción, mientras que la potencia relativa en caso de ser menor que la potencia instalada registrará la producción.

Años	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre		
1964	5.33	7.80	6.04	13.90	9.59	8.09	6.62	5.18	4.05	4.89	10.50	13.90		
1965	16.42	15.47	11.42	19.62	18.97	8.09	6.62	4.89	4.05	5.18	15.78	10.50		
1966	12.34	11.11	10.50	9.59	10.81	6.33	5.18	5.18	4.05	7.21	10.20	15.78		
1967	12.96	27.49	16.73	9.59	11.73	8.69	4.89	2.95	1.89	2.68	2.41	3.49		
1968	6.62	13.90	17.37	16.73	8.99	4.05	2.41	1.12	1.37	4.05	4.33	2.41		
1969	9.59	12.96	9.89	23.52	12.65	6.04	0.41	0.88	1.37	2.15	6.91	8.99		
1970	8.09	20.26	20.59	6.91	10.81	4.05	1.37	3.22	2.95	4.43	7.80	10.81		
1971	23.52	29.49	25.50	16.73	15.15	7.21	4.89	4.33	5.46	8.09	11.73	8.09		
1972	14.84	20.59	15.47	13.58	12.65	8.39	4.61	2.68	1.63	1.37	5.75	10.20		
1973	5.18	5.18	6.04	13.90	10.50	5.46	3.49	3.22	4.89	5.75	3.22	6.04		
1974	13.90	27.49	19.62	25.77	19.62	14.84	12.65	10.81	11.11	16.42	18.01	19.29		
1975	21.24	28.82	22.87	14.21	11.42	7.50	10.20	6.62	6.62	6.62	7.50	10.50		
1976	13.90	18.97	16.42	16.68	13.18	14.84	12.34	4.15	8.69	8.09	10.50	15.15		
1977	12.96	12.96	15.15	16.73	14.52	13.27	9.29	8.09	7.80	9.29	9.59	9.29		
1978	18.33	14.21	17.69	21.89	18.97	12.34	10.50	8.09	8.39	6.57	9.82	13.27		
Promedio	13.01	17.78	15.42	15.96	13.30	8.61	6.36	4.76	4.95	6.19	8.94	10.51		
Potencia relativa MW	13.96	19.07	16.54	17.12	14.27	9.24	6.83	5.11	5.31	6.64	9.59	11.28		
Potencia instalada MW	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50		
Energía MWh	6324.00	5712.00	6324.00	6120.00	6324.00	6120.00	4915.82	3799.55	3826.79	4936.92	6120.00	6324.00	66.85	Valor ANUAL GWh
Ingresos USD	\$ 411,060.00	\$ 371,280.00	\$ 411,060.00	\$ 397,800.00	\$ 411,060.00	\$ 397,800.00	\$ 319,528.29	\$ 246,971.01	\$ 248,741.41	\$ 320,899.49	\$ 397,800.00	\$ 411,060.00	\$ 4,345,060.20	Valor ANUAL USD

Tabla 13: Producción energética

Como se puede observar en la tabla, los valores marcados de color rojo pertenecen a aquellos meses donde la producción será menor a la esperada que habría con la potencia instalada, en dichos casos, se puede observar que la producción disminuye.

Al considerar los ingresos, se toma en cuenta un valor de venta de 6.5 centavos por kilovatio hora. Para el cálculo simplemente se multiplica los 6.5 centavos con la cantidad de energía producida por mes, y finalmente se suman dichos valores para determinar el valor anual de ingresos.

2.3. Indicadores económicos

En primera instancia se define el tiempo de retorno de la inversión:

	2024	2025	2026	2027	2028
Ingresos	\$ 4,345,060.20	\$ 4,345,060.20	\$ 4,345,060.20	\$ 4,345,060.20	\$ 4,345,060.20
Ingresos acumulados	\$ 4,345,060.20	\$ 8,690,120.39	\$ 13,035,180.59	\$ 17,380,240.78	\$ 21,725,300.98

Tabla 14: Ingresos en el tiempo para determinar tiempo de retorno de inversión

Se puede determinar que el tiempo de retorno para la inversión es de 4 años 1 mes, mismo que se puede observar en el siguiente gráfico:



Figura 28: Saldos en el tiempo

Evidentemente para una inversión se busca tener ganancias constantes desde el primer año de operación, por lo que se propone que la deuda se pague durante 10 años, para tener la siguiente ganancia anual:

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Ingresos	\$ 4,345,060.20	\$ 4,345,060.20	\$ 4,345,060.20	\$ 4,345,060.20	\$ 4,345,060.20	\$ 4,345,060.20	\$ 4,345,060.20	\$ 4,345,060.20	\$ 4,345,060.20	\$ 4,345,060.20
Ingresos acumulados	\$ 4,345,060.20	\$ 8,690,120.39	\$ 13,035,180.59	\$ 17,380,240.78	\$ 21,725,300.98	\$ 26,070,361.18	\$ 30,415,421.37	\$ 34,760,481.57	\$ 39,105,541.76	\$ 43,450,601.96
Egresos	\$ 1,715,300.00	\$ 1,715,300.00	\$ 1,715,300.00	\$ 1,715,300.00	\$ 1,715,300.00	\$ 1,715,300.00	\$ 1,715,300.00	\$ 1,715,300.00	\$ 1,715,300.00	\$ 1,715,300.00

Tabla 15: Ingresos en el tiempo considerando estrategia económica

Así mismo se presenta esto de forma gráfica:



Figura 29: Saldos en el tiempo con estrategia económica

Al distribuir el pago de la construcción en los primeros 10 años se puede tener una ganancia constante de \$2,629,760.20 USD en los primeros 10 años y los siguientes sería de \$4,345,060.20.

Al determinar esta estrategia se puede obtener el valor actual neto y la tasa interna de retorno:

TIR	16.99%
------------	--------

VAN	\$ 12,112,083.57
------------	------------------

Tabla 16: Tasa interna de retorno y valor actual neto

Al tener una tasa interna de retorno mayor a 0, se puede determinar que el proyecto es viable. Es importante mencionar que el análisis se realizó para 25 años.

Por último se determina el rendimiento anualizado sobre la inversión:

$$ROI = \frac{4.59}{25} \cdot 100\% = 18.34\%$$

Capítulo 6

6.1. Conclusiones

- Se determinó el caudal de diseño de 7.5 metros cúbicos por segundo puesto que las opciones de 9 a 10 metros cúbicos por segundo producían una cantidad de energía muy similar a la seleccionada por lo que el incremento mínimo no justificaba el costo de una mayor infraestructura para dichos caudales.
- Se determinó la potencia de la central hidroeléctrica de 8.5MW de potencia instalada. Mismo que se utilizará a su máxima capacidad durante 8 meses al año.
- El caudal de máxima crecida es de 449 metros cúbicos por segundo, mismo que fue considerado dentro del diseño de la captación para permitir el paso de dicho caudal por el canal que ocurrirá con un periodo de retorno de 100 años para el cual fue diseñado.
- El costo aproximado de construcción de la hidroeléctrica es de: 17'153.000,00 USD. Con un costo por kilovatio de 2008 dólares.
- Los indicadores económicos para el proyecto son:
 - Tiempo de retorno de inversión sin estrategia económica: 4 años 1 mes.
 - Tiempo de retorno de inversión con estrategia económica: 10 años manteniendo utilidad.
 - Ingreso mensual promedio: \$4,345,060.20
 - VAN: \$12,112,083.57 USD
 - TIR: 16.99%

- ROI:18.34%
- El proyecto se considera económica y técnicamente viable a nivel de prefactibilidad debido a los indicadores económicos y a los estudios presentados.

6.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar un estudio a profundidad para etapa de factibilidad y estudios definitivos, así como también se recomienda analizar las áreas faltantes como Ambiental, Eléctrico, Mecánico, Estructural, Geológico y geotécnico con el fin de determinar una factibilidad técnica hacia el proyecto.
- Se recomienda realizar campañas de aforos en el sitio de captación mientras se desarrollan los estudios de las diferentes áreas con el fin de confirmar y ajustar los caudales característicos obtenidos de la estación hidrológica H0176.

6.3. Limitaciones

- La principal limitación del presente estudio fueron los datos proporcionados de Inamhi, si bien estos pertenecen a una gran cantidad de datos, la realidad climática era diferente para el tiempo en el que funcionaba la estación H0176, debido a que salió de operación antes de los 90s, así mismo se puede poner en duda la precisión de la tecnología en aquel entonces.
- Por la razón mencionada, este estudio se considera válido a nivel de prefactibilidad, y este no debería ser usado con un nivel avanzado, puesto que para nivel de factibilidad y diseño definitivo se necesitan datos más confiables y actuales.

Bibliografía

- Naranjo-Silva, S., Punina Guerrero, D. J. ., & Álvarez del Castillo, J. (2022).
Costo comparativo por kilovatio de los últimos proyectos hidroeléctricos en
Ecuador. *Revista InGenio*, 5(1), 22–34.
<https://doi.org/10.18779/ingenio.v5i1.473>
- Novak, Moffat, A. I. ., & Nalluri, C. (2001). *Estructuras hidráulicas* (2a. ed.).
McGraw-Hill Interamericana.
- Martín, A. G., Campoy, M. R., & Vázquez, F. E. S. (1994). *Topografía básica para
ingenieros* (Vol. 42). EDITUM.
- Ortiz Flórez, Ramiro. *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. Bogotá: Ediciones de
la U, 2011. Print.
- Rojas López, Rúa Machado, C. A., & Ceballos Rodríguez, E. A. (2008). *Gerencia
de la construcción guía para profesionales*. Ecoe Ediciones.
- William Antonio. (2018). *Clima, hidrología y meteorología: Para ciencias
ambientales e ingeniería* (1st ed.). Universidad Piloto de Colombia.