



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**OPTIMIZACIÓN DE LA EVACUACIÓN DE SEDIMENTOS EN UNA CAPTACIÓN
TIPO CONVENCIONAL POR MEDIO DEL DISEÑO DE UNA REJILLA DE FONDO
EN EL RÍO MAZAR**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniera Civil

AUTORAS: JEIMY ALEJANDRA ALI GUZMÁN

GABRIELA ALEXANDRA MOROCHO YARI

TUTOR: ING. ANDRÉS XAVIER MAZA MOGROVEJO, MSc.

Cuenca - Ecuador

2024

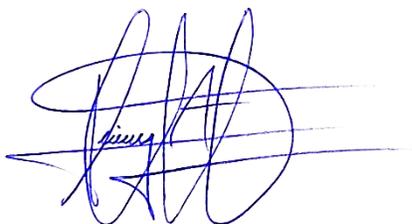
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotras, Jeimy Alejandra Ali Guzmán con documento de identificación N° 1400993703 y Gabriela Alexandra Morocho Yari con documento de identificación N° 0150745412; manifestamos que:

Somos las autoras y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 21 de febrero del 2024

Atentamente,



Jeimy Alejandra Ali Guzmán
1400993703



Gabriela Alexandra Morocho Yari
0150745412

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotras, Jeimy Alejandra Ali Guzmán con documento de identificación N° 1400993703 y Gabriela Alexandra Morocho Yari con documento de identificación N° 0150745412, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autoras del Proyecto técnico: “Optimización de la evacuación de sedimentos en una captación tipo convencional por medio del diseño de una rejilla de fondo en el río Mazar”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 21 de febrero del 2024

Atentamente,



Jeimy Alejandra Ali Guzmán

1400993703



Gabriela Alexandra Morocho Yari

0150745412

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Andrés Xavier Maza Mogrovejo con documento de identificación N° 0104827282, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: OPTIMIZACIÓN DE LA EVACUACIÓN DE SEDIMENTOS EN UNA CAPTACIÓN TIPO CONVENCIONAL POR MEDIO DEL DISEÑO DE UNA REJILLA DE FONDO EN EL RÍO MAZAR, realizado por Jeimy Alejandra Ali Guzmán con documento de identificación N° 1400993703 y Gabriela Alexandra Morocho Yari con documento de identificación N° 0150745412, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 21 de febrero del 2024

Atentamente,



Ing. Andrés Xavier Maza Mogrovejo, MSc.

0104827282

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, Claudio y Blanca, por creer en cada una de mis metas planteadas y depositar su confianza en mí, por brindarme apoyo tanto emocional como económico a lo largo de mi formación académica. A mis hermanos Guadalupe y Cristian, por estar presentes y brindarme su apoyo emocional y darme gestos de ánimo en cada paso de este largo camino. A mis amigos, quienes han sido un apoyo fundamental en cada desafío de esta larga trayectoria y brindarme su amistad tanto dentro como fuera de las aulas de clases.

Jeimy Alejandra Ali Guzmán

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de esta tesis. En primer lugar, a mi director de tesis Ing. Xavier Maza MSC, por su orientación experta, paciencia y apoyo constante a lo largo de este proceso. A la empresa CELEC EP, por dar una favorable acogida a nuestra petición y colaborar para que nuestro proyecto se haya materializado en el presente trabajo. A mis padres y hermanos por su inquebrantable apoyo y amor durante todo el proceso de realización de esta tesis. Su constante aliento, comprensión y sacrificio fueron la fuerza motriz que me impulsó a alcanzar este logro académico. Hoy, con humildad y gratitud, reconozco que este logro también es suyo, con todo mi corazón les agradezco por ser mi mayor inspiración y apoyo incondicional. A mi compañera de tesis, le agradezco por su colaboración, compromiso y amistad durante este desafiante proceso. Juntas hemos compartido momentos de aprendizaje, superación y celebración, y su presencia ha sido fundamental para enriquecer nuestro trabajo. A todos ustedes, les dedico este logro con profundo agradecimiento y reconocimiento por su inquebrantable apoyo. Sin su guía y respaldo, esta tesis no hubiera sido posible. ¡Gracias por estar siempre a mi lado!

Gabriela Alexandra Morocho Yari

DEDICATORIAS

Este proyecto va dedicado con mucho amor a mis queridos abuelos Cornelio y Raquel, quienes han sido un ejemplo de perseverancia y amor incondicional. Su fe en mí y constante apoyo han sido la inspiración que me ha impulsado a seguir adelante y poder alcanzar esta meta. Estas palabras son un pequeño tributo a su presencia en mi vida y a la gran admiración y gratitud que siento por ustedes.

Jeimy Alejandra Ali Guzmán

Este trabajo de titulación está dedicado con mucho amor y cariño en primer lugar a nuestro creador, por haber guiado este esfuerzo académico y permitir culminarlo con éxito. También a mis padres y hermanos por ser el pilar fundamental en mi vida, por brindarme siempre su apoyo y cariño incondicional.

Gabriela Alexandra Morocho Yari

RESUMEN

Existen diversas regiones del país en las que existen problemáticas en cuanto a la obstrucción de diferentes estructuras hidráulicas debido a la acumulación de sedimentos y material orgánico en épocas de lluvia. En este trabajo de titulación nos enfocamos en mejorar la eficiencia de la captación convencional ubicada en el río Mazar mediante el proyecto de investigación del diseño y la implementación de una rejilla de fondo y estructuras complementarias. Estas estructuras fueron diseñadas considerando los criterios de diseño que garantizan que los sedimentos que ingresen puedan ser arrastrados por la fuerza de la corriente del agua y sean evacuadas para evitar daños significativos en las estructuras. Siendo así, que a partir de la necesidad de optimizar la evacuación de los sedimentos de la captación se diseñaron estructuras tales como la rejilla de fondo junto con un canal colector, un desripiador y un vertedero.

ABSTRACT

There are several regions of the country where there are problems regarding the obstruction of different hydraulic structures due to the accumulation of sediments and organic material during the rainy season. In this thesis, we focused on improving the efficiency of the conventional catchment located in the Mazar River through the research project of the design and implementation of a bottom grate and complementary structures. These structures were designed considering the design criteria that guarantee that the incoming sediments can be carried away by the force of the water flow and evacuated to avoid significant damage to the structures. Thus, based on the need to optimize the evacuation of sediments from the catchment area, structures such as the bottom grate together with a collection channel, a scraper and a spillway were designed.

TABLA DE CONTENIDO

I.	Introducción	14
II.	Problema de estudio.....	15
2.1.	Antecedentes.....	15
2.2.	Importancia y alcances	15
2.3.	Delimitación	16
2.3.1.	Espacial o geográfica	16
2.3.2.	Temporal	17
2.3.3.	Sectorial o institucional.....	18
III.	Objetivos	18
3.1.	Objetivo general	18
3.2.	Objetivos específicos.....	18
IV.	Marco teórico	18
4.1.	Obras hidráulicas	18
4.2.	Embalses.....	19
4.3.	Sedimentos.....	19
4.4.	Obras de toma – convencionales	20
4.5.	Obras de toma con rejilla de fondo.....	21
4.5.1.	Desventajas de la toma de fondo.....	23
4.6.	Partes componentes de una captación	23

4.6.1	Azud de derivación	24
4.6.2	Rejillas de captación	24
4.7.	Muro de contención	33
4.7.1.	Coeficiente de seguridad	33
V.	Marco metodológico.....	33
5.1.	Propuesta de solución	33
5.2.	Características de estudios realizados por la central hidroeléctrica	34
5.2.1.	Estudios climáticos.....	34
5.2.2.	Estudios de sedimentos	35
5.3.	Criterios de diseño de la rejilla de fondo	38
5.3.1.	Dimensiones de la rejilla de fondo	39
5.4.	Diseño de la galería	42
5.5.	Diseño del desripiador	44
5.5.1.	Criterios de diseño del desripiador.....	44
5.6.	Diseño del vertedero de excesos en el desripiador	44
5.7.	Compuerta	45
5.7.1.	Coeficiente de velocidad	46
5.7.2.	Coeficiente de contracción.....	46
5.8.	Estabilidad de la presa	46
5.8.1.	Análisis de estabilidad por vuelco o volteo.....	47

5.8.2.	Análisis de estabilidad por deslizamiento	48
5.9.	Diseño estructural de un muro.....	48
VI.	Resultados.....	51
6.1.	Dimensiones de la rejilla de fondo	51
6.1.1.	Datos.....	51
6.1.2.	Cálculo	51
6.2.	Diseño de la galería	53
6.2.1.	Datos.....	53
6.2.2.	Cálculos.....	53
6.3.	Canal desripador.....	55
6.3.1.	Datos.....	55
6.3.2.	Cálculo	56
6.4.	Vertedero a conducción.....	57
6.4.1.	Datos.....	57
6.4.2.	Cálculo	57
6.5.	Compuerta	58
6.5.1.	Datos.....	58
6.6.	Estabilidad de la presa	65
6.6.1.	Datos.....	65
6.6.2.	Cálculo	65

6.7.	Diseño estructural del muro.....	70
6.7.1.	Datos.....	70
6.7.2.	Cálculos.....	70
VII.	Presupuesto referencial	74
VIII.	Conclusiones	75
IX.	Recomendaciones	76
X.	Referencias bibliográficas	77
XI.	ANEXOS.....	79
11.1.	Cronograma de actividades	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	17
Figura 2	21
Figura 3	22
Figura 4	23
Figura 5	24
Figura 6	25
Figura 7	27
Figura 8	28
Figura 9	29
Figura 10	30
Figura 11	31
Figura 12	31
Figura 13	32
Figura 14	36
Figura 15	38
Figura 16	46
Figura 17	49
Figura 18	54
Figura 19	60
Figura 20	62
Figura 21	64
Figura 22	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	41
Tabla 2	52
Tabla 3	53
Tabla 4	54
Tabla 5	55
Tabla 6	59
Tabla 7	61
Tabla 8	63
Tabla 9	66
Tabla 10	67
Tabla 11	68
Tabla 12	74
Tabla 13	80

I. Introducción

El agua ha sido el recurso más crucial para la existencia humana, y a lo largo de la historia de la civilización, los seres humanos han buscado utilizar este elemento para su progreso. La necesidad de acceder al agua ha llevado a la humanidad desde establecerse cerca de ríos hasta construir infraestructuras que permitan la conducción y aprovechamiento de los recursos hídricos de afluentes para diversas finalidades, como la agricultura, el suministro de agua a poblaciones, la regulación, y posteriormente, para proyectos energéticos.

En Ecuador, la mayoría de las captaciones superficiales han sido equipadas con rejillas convencionales. Estas rejillas tienen la tarea de retener los sedimentos transportados por el flujo del agua, pero lamentablemente, permiten el paso de grava y arena, lo que conlleva a la acumulación de sedimentos en el depósito de recolección. Esta acumulación afecta negativamente la calidad del agua, generando perjuicios en las estructuras generadoras de energía.

La evacuación eficiente de sedimentos en un embalse es de suma importancia para garantizar el funcionamiento óptimo y la vida útil prolongada de la infraestructura hidráulica. A lo largo del tiempo, los embalses acumulan sedimentos arrastrados por el agua, compuestos principalmente por partículas sólidas suspendidas. La acumulación excesiva de sedimentos puede afectar negativamente la capacidad de almacenamiento del embalse. La gestión efectiva de la sedimentación no solo optimiza el rendimiento hidráulico, sino que también contribuye a la sostenibilidad a largo plazo de los embalses y su capacidad para cumplir con diversas funciones, desde la generación de energía hasta el suministro de agua para usos múltiples.

El presente proyecto tiene la finalidad de buscar una solución para la acumulación de los sedimentos que se generan a causa de grandes crecidas en la captación ubicada en el río Mazar por medio del diseño de una rejilla de fondo. El diseño de una rejilla de fondo juega un papel crucial

en este proceso, ya que permite retener los sedimentos sólidos mientras permite el paso del agua. Esta rejilla debe ser diseñada con parámetros específicos para asegurar una eficiente retención de sedimentos garantizando la viabilidad a largo plazo del sistema.

II. Problema de estudio

2.1. Antecedentes

El tema de estudio trata de una captación de tipo convencional la cual cuenta con una rejilla lateral, respecto a la memoria técnica de diseños definitivos según CELEC (2023) nos da a entender que “debido a las fuertes lluvias en épocas de invierno esta rejilla tiende a obstruirse ya que la fuerza del agua arrastra grandes cantidades de sedimentos perdiendo así su capacidad de captar el caudal requerido hasta un 50%”.

Los sedimentos depositados en un embalse pueden ocasionar diversos problemas, según Cataño y Vélez (2021) pérdida de volumen de almacenamiento efectivo. Las pérdidas de volumen de almacenamiento efectivo reducen la capacidad de control de avenidas, la capacidad de regulación para la producción de energía eléctrica y el suministro de agua.

Según Garcia-Chevesich et al. (2021) los embalses son un tema importante en muchas partes del mundo, incluyendo América Latina y El Caribe. Los embalses creados con el uso de grandes recursos financieros pierden cada año volumen de almacenamiento, disminuyendo su vida útil y, como consecuencia, muchos embalses tienen solo unos pocos años de vida por delante, lo que se traduce en grandes inversiones en el mediano plazo. En casos extremos, habrá que construir nuevos embalses para satisfacer la creciente demanda de electricidad o de sistemas de riego, etc.

2.2. Importancia y alcances

El diseño de una rejilla de fondo para una toma convencional que se ve afectada por las intensas lluvias en épocas de invierno es de gran utilidad ya que esta retendrá el ingreso de sólidos

grandes como ramas, hojas, y otros desechos, evitando que ingresen a al sistema de captación y dañen las obras hidráulicas y componentes mecánicos del proyecto hidráulico.

Al no permitir la entrada de sedimentos, el diseño de la rejilla de fondo contribuye a la seguridad operativa al reducir la necesidad de mantenimiento frecuente y costoso, así como minimizar el riesgo de daños en equipos. La evacuación de los sedimentos que se encuentran en el fondo del embalse permitirá que la capacidad de almacenamiento que utiliza la central hidroeléctrica no disminuya ya que puede generar riesgo de apagones.

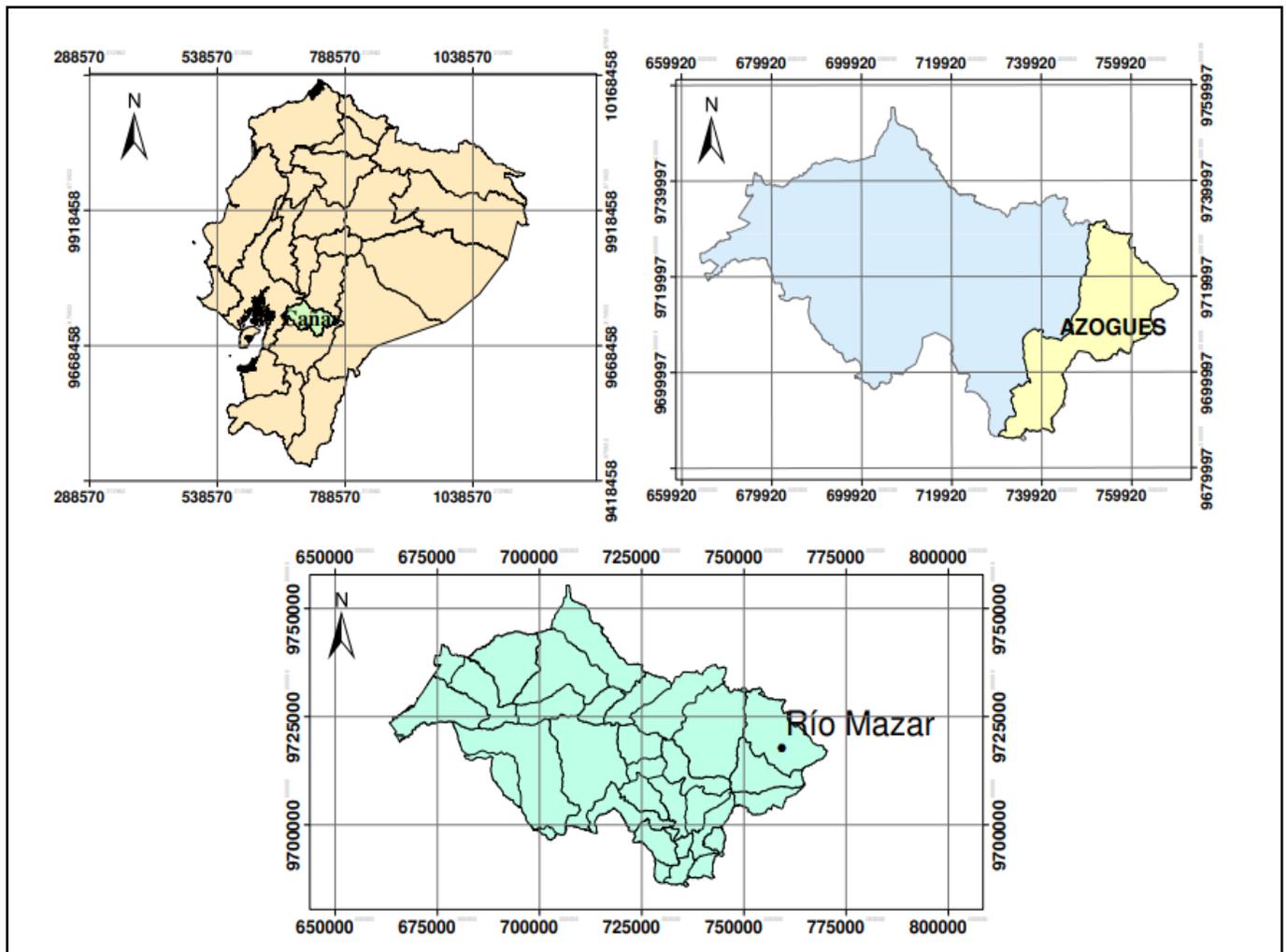
2.3.Delimitación

2.3.1. Espacial o geográfica

El estudio se desarrollará en la provincia del Cañar en el cantón Azogues, la captación se encuentra específicamente en el río Mazar, coordenadas 9717779N y 759257E tal como se puede observar en la **Figura 1**.

Figura 1

Ubicación del proyecto en el mapa del Ecuador



Fuente: Elaboración propia

2.3.2. Temporal

Este estudio de diseño de una rejilla de fondo y sus elementos complementarios en beneficio sector hidroeléctrico del Ecuador, se realizará durante el periodo académico 63, del periodo 2023-2024.

2.3.3. Sectorial o institucional

El estudio de diseño de una rejilla de fondo y sus elementos complementarios se encuentra dentro del ámbito de la ingeniería civil en la rama de estudios hidroeléctricos.

III. Objetivos

3.1. Objetivo general

Realizar el diseño de una rejilla de fondo en una captación incluyendo elementos complementarios para optimizar la evacuación de sedimentos acumulados.

3.2. Objetivos específicos

- Evaluar el estado actual que presenta la captación para identificar los problemas existentes.
- Establecer los parámetros iniciales y realizar el cálculo hidráulico para determinar la capacidad y velocidad del flujo requerida en la captación a través de la rejilla.
- Estimar un presupuesto referencial de acuerdo al requerimiento del diseño.

IV. Marco teórico

4.1. Obras hidráulicas

Las infraestructuras creadas por el ser humano relacionadas con la gestión del agua para el consumo humano, la agricultura e incluso la generación de energía hidroeléctrica abarcan una variedad de obras hidráulicas. Estas obras comprenden la manipulación de cursos de agua, la corrección de flujos y la prevención de inundaciones, e incluyen elementos como presas, diques, embalses, canales, acequias, sistemas de conducción y depósitos para el suministro de agua a las poblaciones. También involucran la implementación de plantas desalinizadoras, sistemas de captación y bombeo, redes de alcantarillado, sistemas de recolección de aguas pluviales y

residuales, junto con todas las acciones requeridas para el control y la gestión del recurso hídrico por parte de los seres humanos (Ibáñez, 2012).

De igual manera, las obras hidráulicas se clasifican por grupos que son divididos dependiendo sus propósitos, estos son:

- Obras de captación
- Obras de conducción
- Obras de regulación, y
- Obras de protección

Para el aprovechamiento de los recursos hídricos superficiales tales como lagos o ríos, en su mayoría trabajan o funcionan principalmente a gravedad.

4.2.Embalses

Los embalses se definen como obras de infraestructura que transforman el régimen de caudales superficiales de una cuenca a través de la obstrucción de su cauce. Su construcción es considerada como un tipo de gestión y regulación de los recursos hídricos para la satisfacción de las diversas demandas y presiones que se generan sobre los mismos. En este sentido, los embalses son cuerpos de agua superficiales en los cuales se concentra parte de la oferta hídrica superficial, de manera que estos, como unidades ecológicas, están relacionados directamente con su cuenca colectora u hoya tributaria (Montoya Restrepo et al., 2019).

4.3.Sedimentos

El desprendimiento, transporte y almacenamiento de sedimentos, según Weber y Pasternack (2017) son procesos resultantes de la erosión de suelos, afectan los ecosistemas fluviales y pueden transportar contaminantes con un importante impacto en diversas partes de las cuencas. A nivel de las Américas, si bien algunos territorios poseen instrumentos para controlar

las emisiones, éstos no han dado amplios resultados positivos. Algunos países incluso no presentan normativas en el tema. La problemática de los sedimentos es poco conocida por la población global y también por los tomadores de decisiones. Ello se demuestra en que no existe mayor conciencia acerca de la importancia de los procesos de erosión y los sedimentos, y sus impactos sobre el ambiente físico y humano.

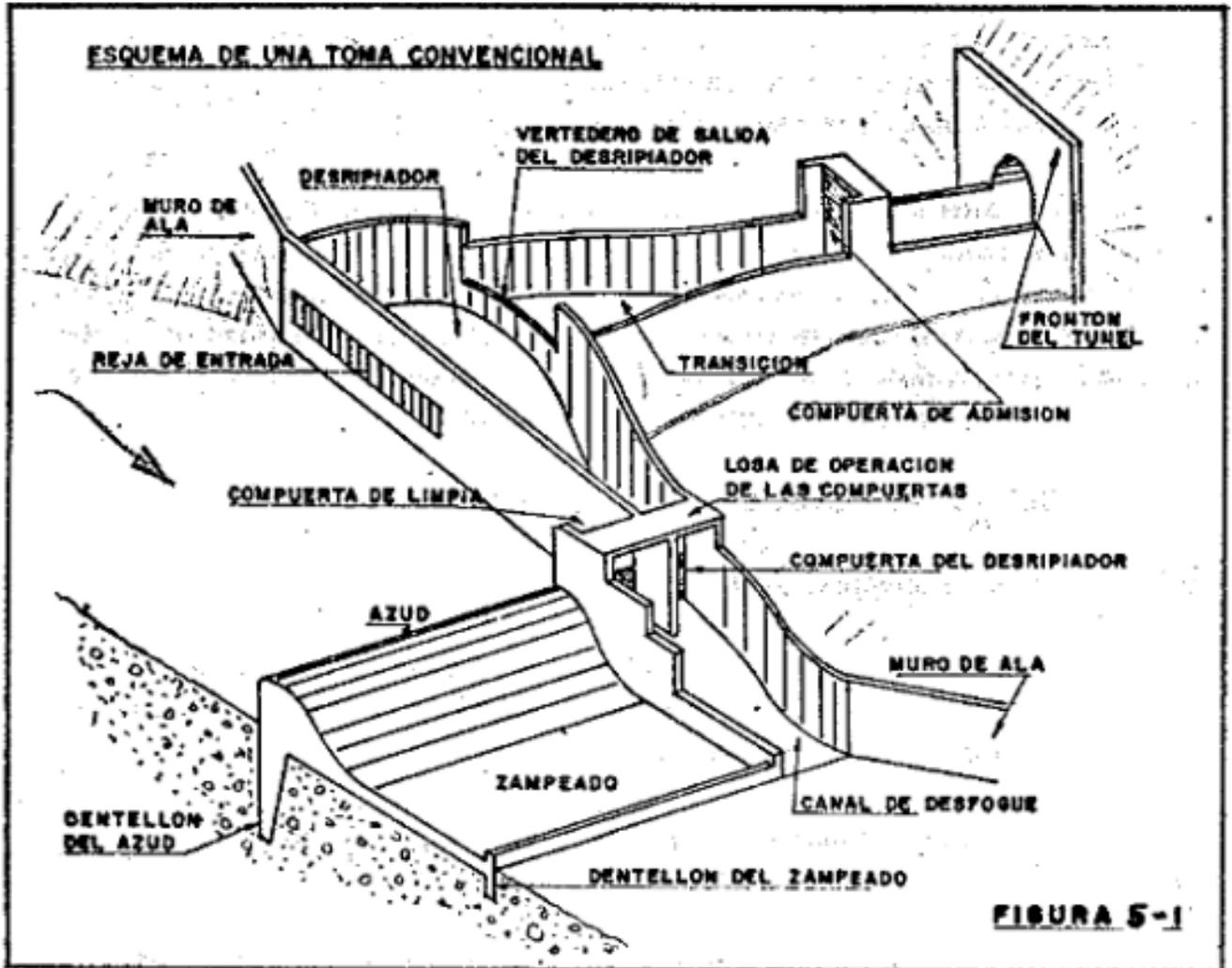
Para disminuir la acumulación de sedimentos es apto colocar la obra de toma en la parte cóncava del río. Por ello es necesario disponer un sitio que sea relativamente plano donde se pueda colocar la transición y el desripador. Es necesario recalcar que la obstrucción del cauce debido al azud modificará las condiciones de flujo y del transporte de los sedimentos (Krochin, 1986).

4.4.Obras de toma – convencionales

Según Mansen (2010) se trata de una toma que capta directamente mediante un canal lateral ubicado en un muro del ala de la estructura, que por lo general es un brazo fijo del río que permite discurrir un caudal mayor que el que se va a captar derivándolo hacia las estructuras de limpieza y control. Su mayor ventaja es que no se necesita construir un barraje o azud que por lo general constituye una de las partes de mayor costo. Sin embargo; tiene desventaja de ser obstruida fácilmente en época de crecidas, además permite el ingreso de sedimentos hacia el canal de derivación, no obstante, la captación a optimizar en este proyecto consta de un azud que contiene un colchón de hormigón y un enrocado. La captación es a través de una rejilla. El agua captada es transportada hacia un sedimentador de dos cámaras las cuales terminan en un vertedero (Mansen, 2010).

Figura 2

Esquema de una toma convencional



Fuente: (Krochin, 1986).

4.5. Obras de toma con rejilla de fondo

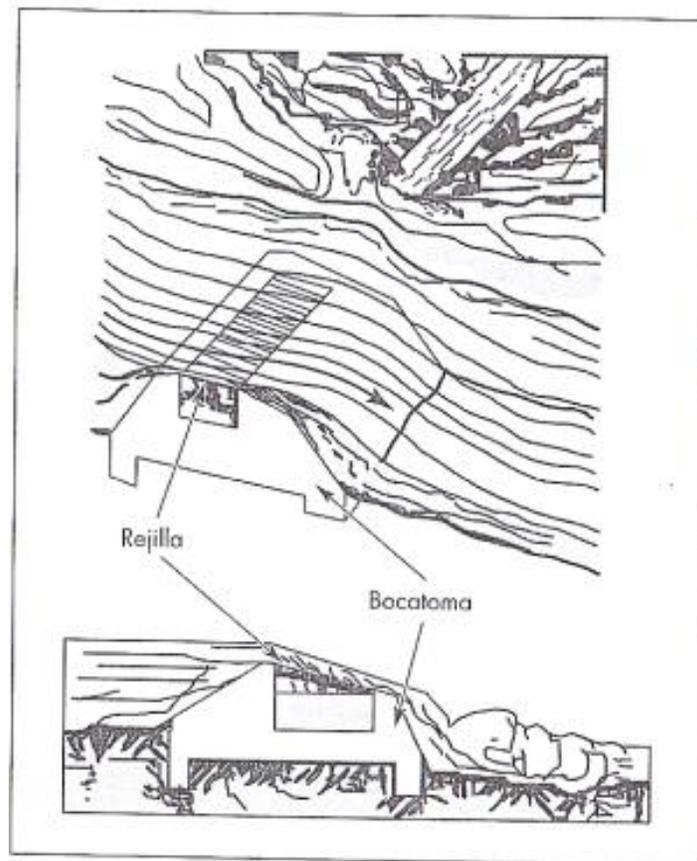
La captación de fondo conocida también como caucasiana hace uso de una reja en la parte baja del azud donde podrá captar el caudal necesario. La rejilla impide el paso de los sedimentos hacia el canal recolector.

Para que sea eficiente esta obra de toma se deben tener en cuenta las siguientes generalidades que poseen los ríos que serán aprovechados:

- a) Pendientes longitudinales fuertes que pueden llegar al 10%.
- b) Crecientes súbitas causadas por aguaceros de corta duración y que llevan gran cantidad de piedras.
- c) Grandes variaciones diarias de caudal cuando provienen de nevados.
- d) Pequeño contenido de sedimentos finos y agua relativamente limpia en estiaje.

Figura 3

Esquema general de toma de fondo



Fuente: (Ortiz, 2011)

4.5.1. Desventajas de la toma de fondo

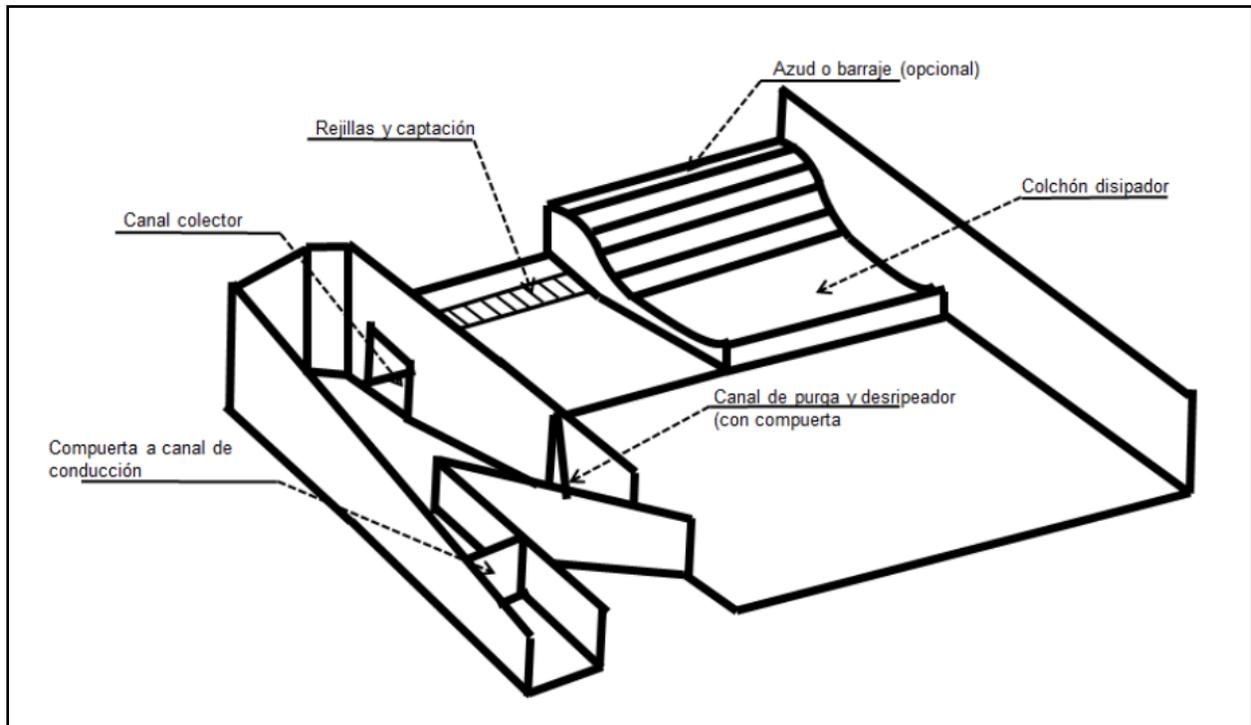
- a) El azud debe estar levantado a cierta altura sobre el fondo del río para poder captar el agua, y como consecuencia son necesarias obras de disipación de energía.
- b) La compuerta de purga tiene una eficiencia baja y siempre algunas piedras quedan frente a la reja. Si no hay mantenimiento constante cuidadoso, los sedimentos comienzan a tapar la reja con los consiguientes perjuicios para la captación (Krochin, 1986).

4.6. Partes componentes de una captación

Todas las captaciones están compuestas por diferentes estructuras, estas tienen el propósito de controlar la velocidad del flujo del caudal captado, limpiar los sólidos que se encuentren suspendidos en el caudal, etc. Estos elementos son los siguientes:

Figura 4

Partes que componen una captación caucasiana o de fondo



Fuente: (Francis G et al., 2016)

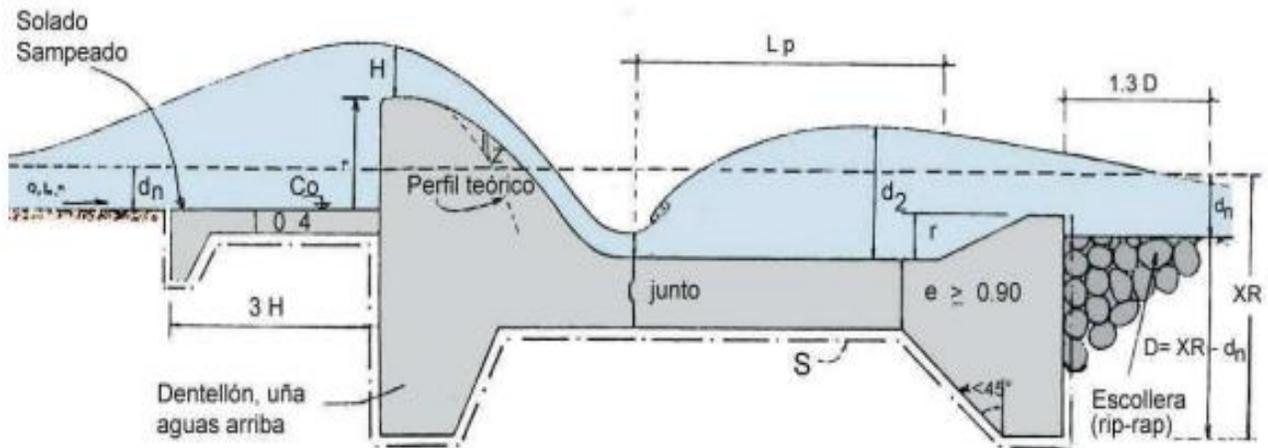
4.6.1 Azud de derivación

El azud es la estructura encargada de cerrar el cauce natural del río, dejando así que el agua se ubique al nivel de la cresta del azud, y así, por medio de la rejilla lograr captar el caudal y conducirlo hacia el canal o cámara de limpieza, cuando existen crecidas el azud tiene la funcionalidad de un vertedero (Krochin, 1986).

Seguido del azud se encuentra el zampeado o cuenco disipador, aquí se aprovecha el resalto hidráulico para poder disipar la energía con la que cae el agua desde el azud en épocas de crecida, al disipar esta energía se evita la erosión aguas debajo de la captación (Krochin, 1986).

Figura 5

Perfil del azud



Fuente: (Mansen, 2010)

4.6.2. Rejillas de captación

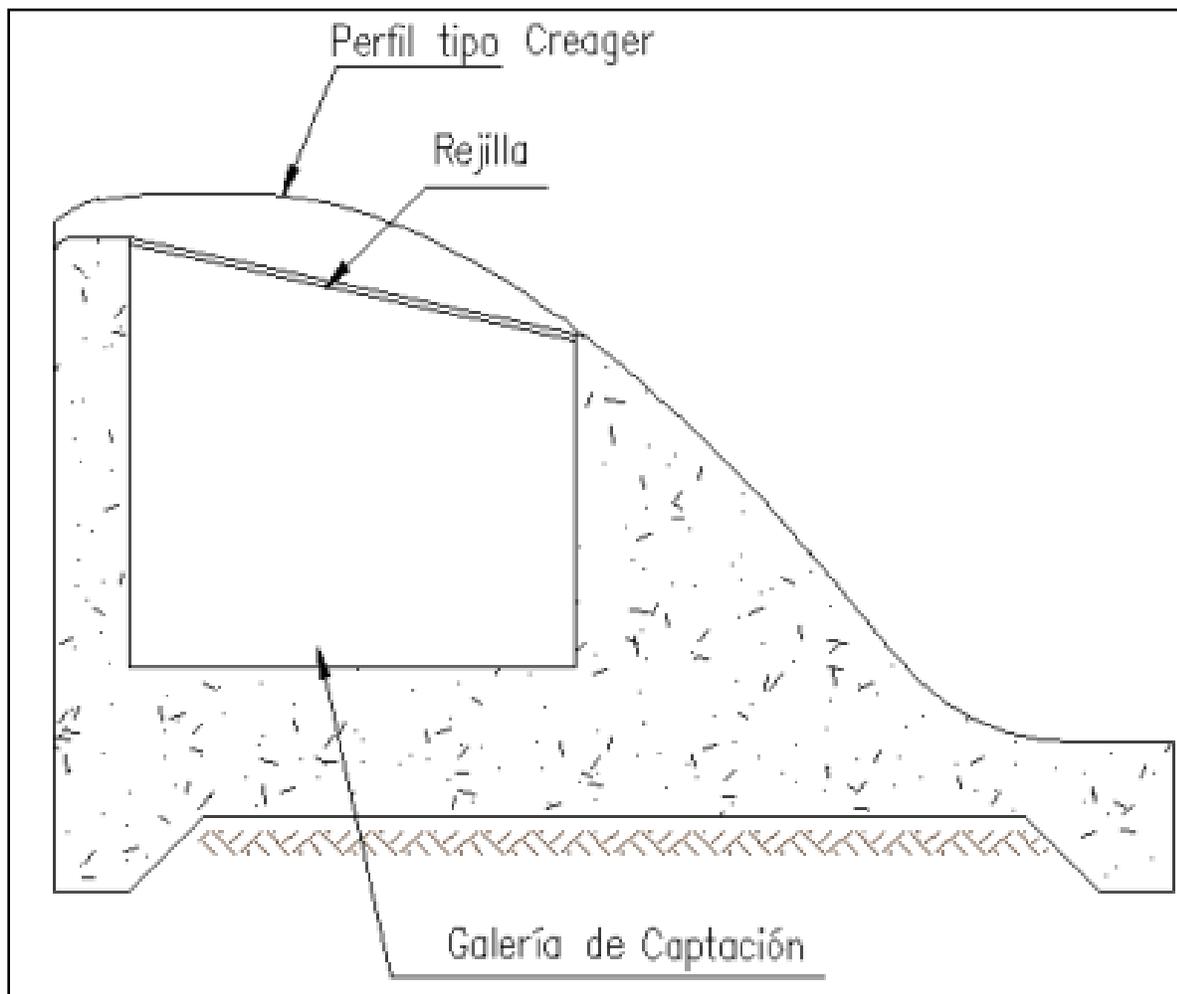
Está conformada por barrotes que son colocadas sobre el canal de aducción que se encuentra dentro de la presa. La longitud de la rejilla, y por lo tanto la del canal de aducción, puede ser menor que la longitud de la presa o el ancho de la garganta, según las necesidades del caudal

que se ha de captar. Los barrotes y el marco pueden ser de hierro, con separación entre barrotes de 5 a 10 centímetros (López, 2000).

Las rejillas son hechas con barras de hierro de sección rectangular o trapezoidal llamadas también pletina, son colocadas paralelamente a la dirección del río. Para estas rejillas no es favorable usar barras redondas ya que se obstruyen demasiado rápido con arena y piedra fina que son más difíciles de retirar (Krochin, 1986).

Figura 6

Galería de captación



Fuente: (Hidalgo X, 2013)

4.6.2.1.Rejilla autolimpiable con efecto Coanda

En las captaciones de tipo caucasiana o de fondo se han venido implementando este tipo de rejilla, en Ecuador ya se han implementado este tipo de rejillas, entre los proyectos que han implementado esta estructura se encuentran:

- Proyecto hidroeléctrico Mira
- Captación de agua potable – Archidona
- Central hidroeléctrica San José de Minas
- Central hidroeléctrica Minas San Francisco – captación río Vivar
- Sistema de filtración de vasos reguladores de Ambato - Chiquiurco

Una reja de autolimpieza es instalada en un sistema de recolección de agua con el propósito de prevenir la acumulación de sedimentos en el lecho del río aguas arriba de una compuerta de toma, y evitar la entrada de partículas sólidas en una tubería de transporte (CBS Ingeniería, s/f).

Se basa en el principio de Coanda, que establece que un fluido tiende a seguir la curvatura de una superficie curva en lugar de seguir un camino recto. En este caso, el agua fluye sobre una superficie curva en la rejilla, y debido al principio de Coanda, el agua sigue la curvatura y separa partículas y sedimentos más pesados del flujo principal. Estos materiales son llevados a un área de recolección o descarga, permitiendo que el agua más limpia continúe su camino (CBS Ingeniería, s/f).

La rejilla cóncava es una pantalla en forma de arco el cual tiene un radio de curvatura de aproximadamente 3 m, aunque se utilizan también las pantallas planas, los diseños comerciales disponibles tienen una inclinación de 60° con respecto a la horizontal en el borde aguas arriba.

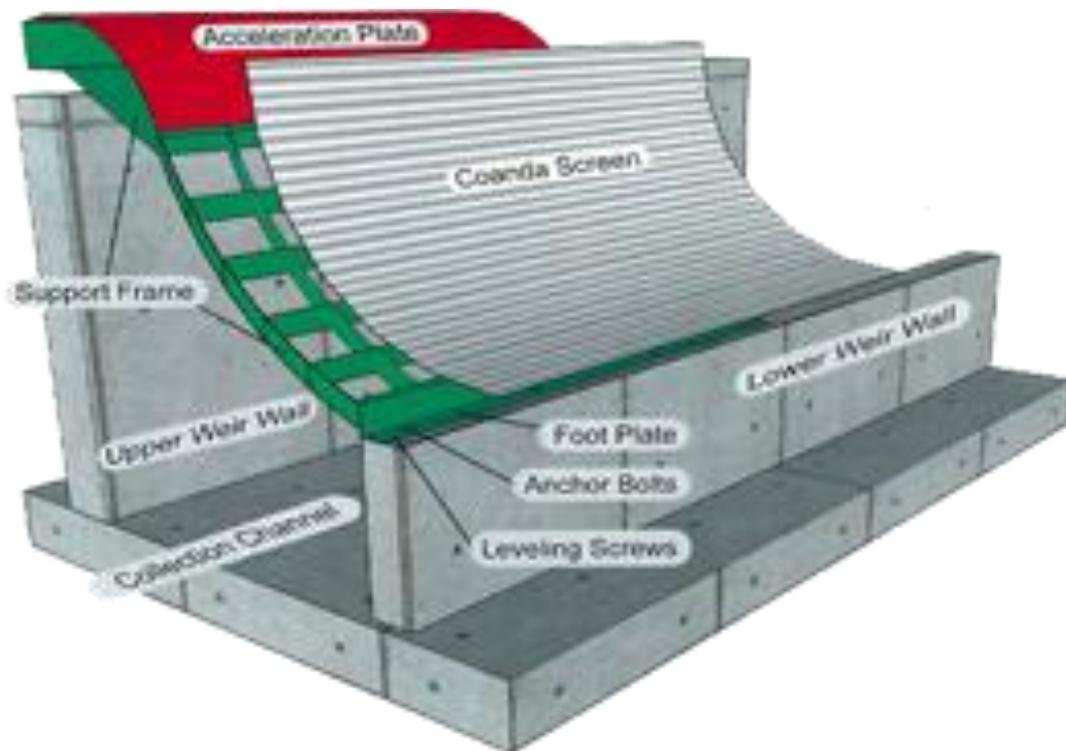
Las principales características de la rejilla Coanda es la inclinación de los alambres de la pantalla. Cada alambre del panel se inclina en dirección aguas abajo, de tal manera que el borde

delantero de cada alambre intercepta en una capa delgada del flujo que pasa a través de la pantalla, el ángulo de inclinación más común disponible en pantallas prefabricadas es de 3° y 6°.

La separación recomendada entre los alambres es de 0.5mm a 1.0 mm para que el flujo con las partículas sólidas del tamaño de las aberturas pase a través del tamiz se produzca la separación de líquidos y sólidos.

Figura 7

Malla autolimpiable Coanda tipo curvo

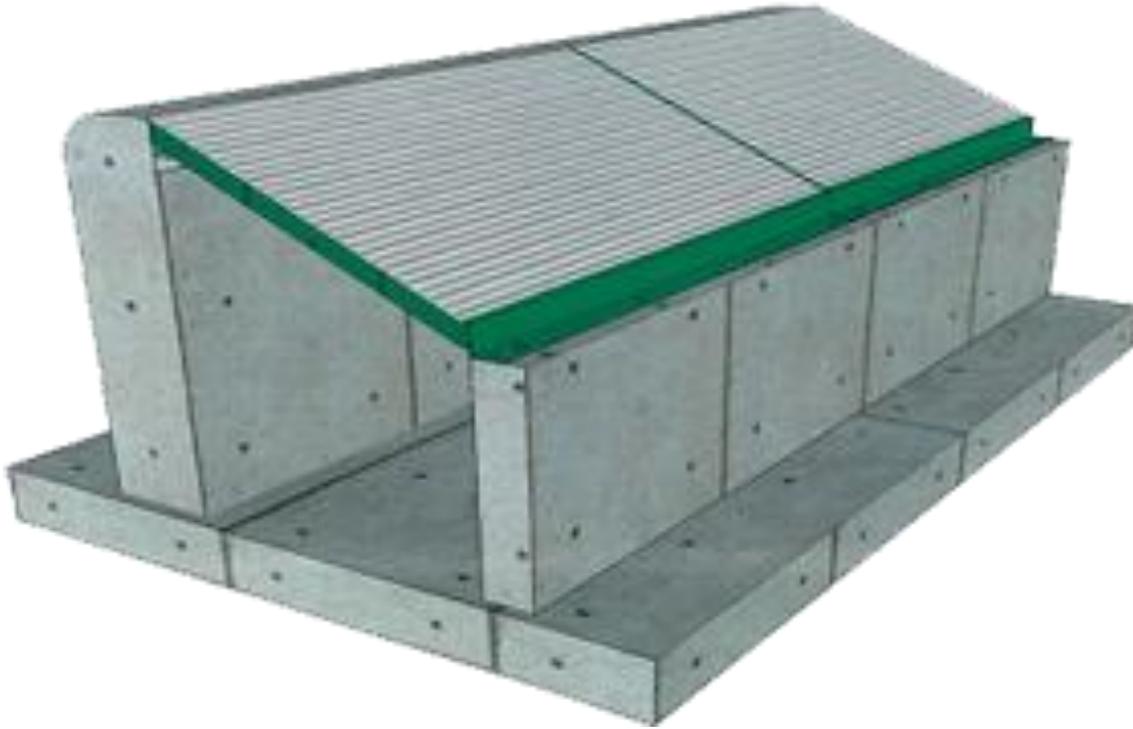


Fuente: (CBS Ingeniería, s/f)

La pantalla generalmente se instala en la cara aguas abajo de un vertedero de desbordamiento. Se han informado capacidades de cribado de 0.09 a 0.14 m³/s por metro de longitud de la presa. Las velocidades del flujo a través de la cara de la pantalla son relativamente grandes, del orden de 2 a 3 m/s en configuraciones típicas, variando en función a la altura de caída al inicio respecto a su altura de pantalla (Bureau of Reclamation, 2003).

Figura 8

Malla Autolimpiable Coanda tipo recto



Fuente: (CBS Ingeniería, s/f.)

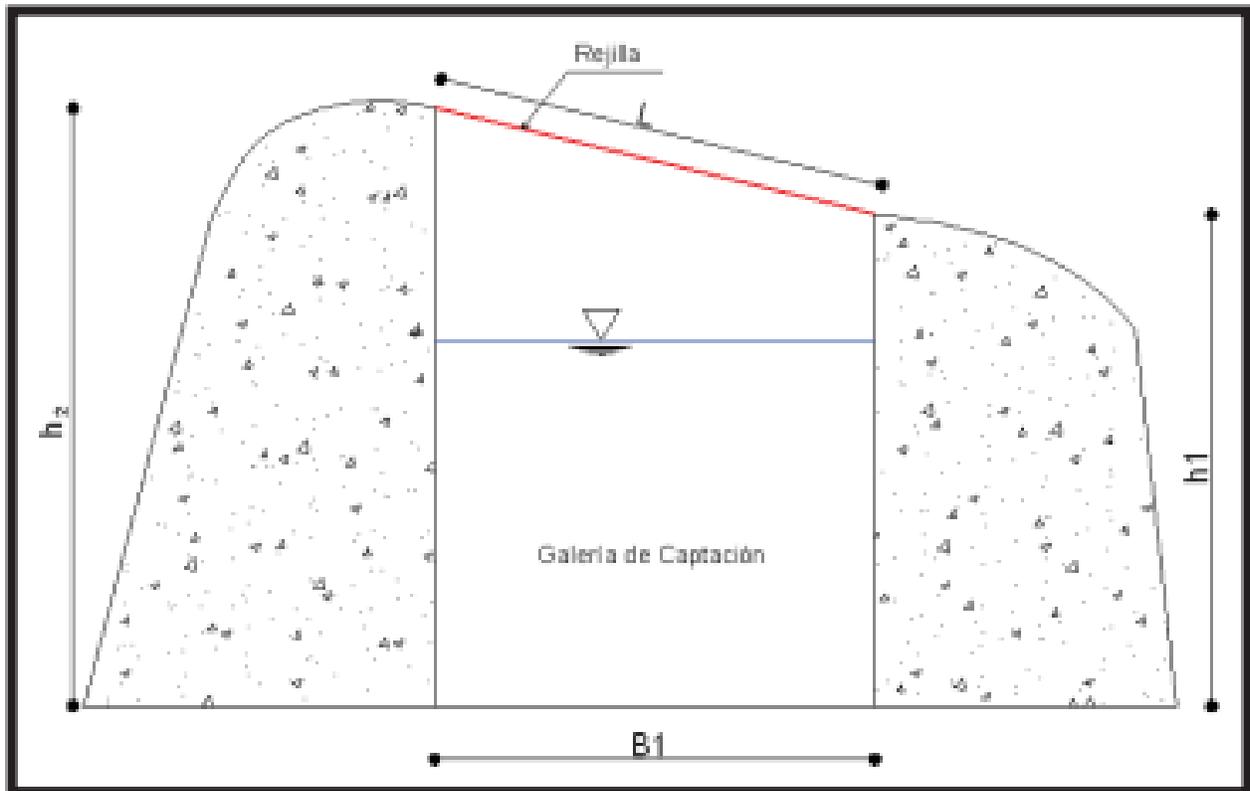
4.6.2.2. Galería de captación

Esta es una estructura que conecta la rejilla de fondo con los demás componentes de la captación, la galería de captación es un tramo hueco dentro del azud de derivación, este canal está sujeto a un proceso de diseño mediante el cual se recoge el caudal necesario captado para su aprovechamiento. La galería se tapa con una losa de hormigón armado y en la parte superior continua el perfil del azud, en caso de que la rejilla se ubique o este pegada a la orilla, ese tramo se suprime (Krochin, 1986).

La rejilla al ser la parte más baja de la presa, el caudal captado debe pasar forzosamente sobre la galería. Por esta razón la rejilla se puede situar a cualquier altura sobre el fondo, esto permite que las piedras pasen con facilidad sobre el azud (Krochin, 1986).

Figura 9

Corte transversal de la galería de captación



Fuente: (Cataño y Vélez, 2021)

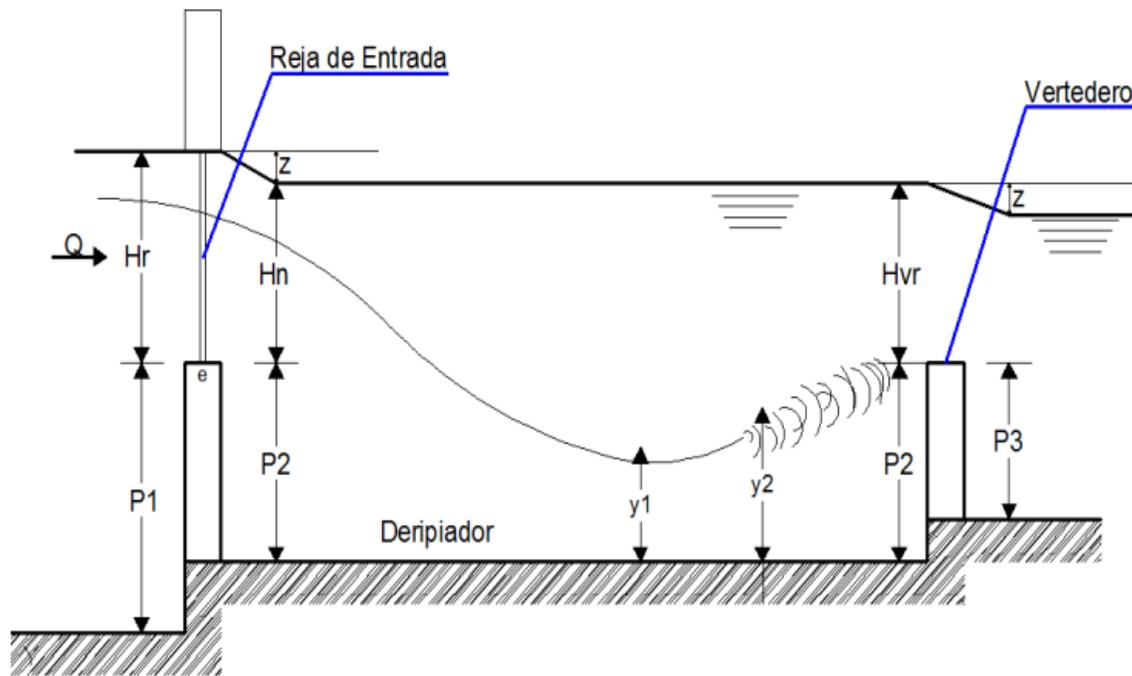
4.6.2.3.Desripiador

Después de la reja de entrada se acostumbra a dejar una cámara que se llama desripiador o sedimentador que sirve para detener las piedras o material sólido que alcanzaron a pasar por los barrotes ya que estos no deben ingresar al canal. En la cámara se depositan los materiales sólidos sobre el fondo del canal y se debe considerar una limpieza periódica.

Debido a ello la velocidad en el desripiador debe ser relativamente baja y el paso hacia el canal debe hacerse por medio de un vertedero sumergido (Krochin, 1986).

Figura 10

Corte del desripador en una toma convencional



Fuente: (Rodríguez J y Proaño V, 2012)

4.6.2.4. Canales y transición

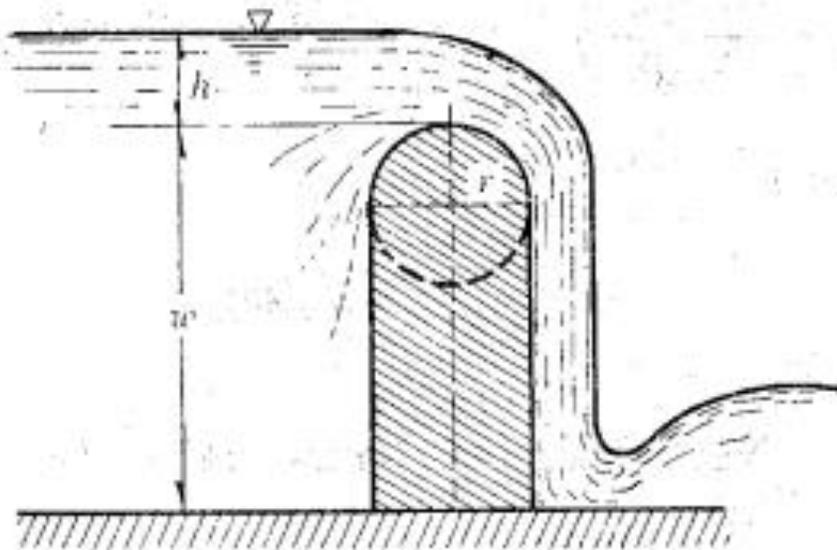
Son elementos que permiten la conexión entre los demás componentes de la captación, siendo su principal objetivo controlar el caudal captado, así también, se encarga de llevar a cada cámara hasta la siguiente estructura y llegar hacia el sistema de conducción. Las transiciones permiten que se puedan hacer cambios en la sección transversal y reducir lo más mínimo posible las pérdidas de carga debido al cambio de secciones (Krochin, 1986).

4.6.2.5. Elementos de control y limpieza

Estas estructuras hidráulicas son importantes para realizar las operaciones de limpieza, control de niveles y el paso hasta la obra de captación. Entre estos grupos se encuentran los vertederos de excesos y las compuertas de limpieza (Krochin, 1986).

Figura 11

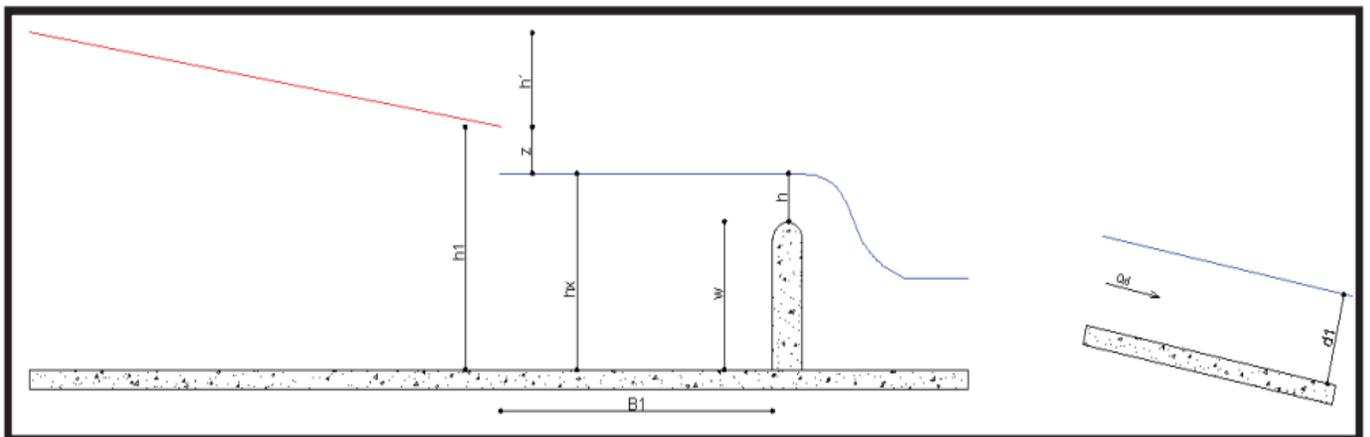
Vertedor de cresta circular y talud vertical



Fuente: (Sotelo G, 1994)

Figura 12

Canal de limpieza



Fuente: (Cabascango A y Guerrón R, 2014)

4.6.2.6. Compuerta de purga

Una compuerta de purga se ubica en un extremo del azud, al lado de la rejilla. Generalmente el río trae en creciente una gran cantidad de piedras que se acumulan aguas arriba del azud

pudiendo llegar a tapan la reja con lo cual el caudal de captación se reduce considerablemente o puede ser totalmente interrumpido. La función de la compuerta es eliminar el material grueso. Por lo general la eficiencia de la compuerta de purga es pequeña pero por lo menos se consigue mantener limpio el cauce frente a la rejilla (Krochin, 1986).

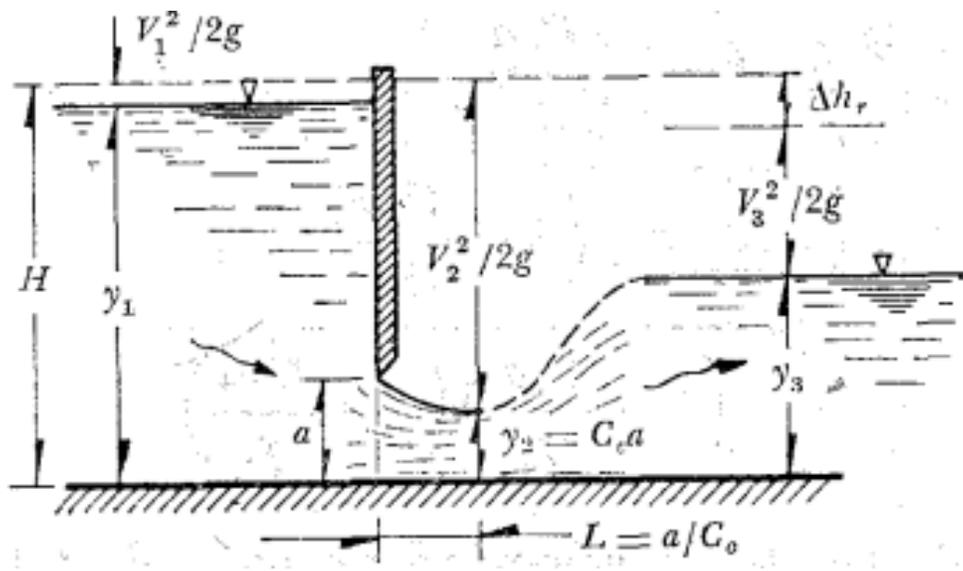
La compuerta consiste en una placa móvil, plana o curva, que cuando se levanta permite graduar la altura del orificio por el cual se controlará la descarga producida. La forma de las compuertas dependerá de su uso, de la carga estática y de la forma y tamaño de la abertura (Sotelo G, 1994).

Algunos de sus propósitos o usos son:

- Control del flujo de agua
- Plantas de tratamiento
- Control de inundaciones
- Sistema de drenajes

Figura 13

Compuerta plana



Fuente: (Sotelo G, 1994)

4.7.Muro de contención

La estabilidad en muros y presas es necesaria para asegurar que las fuerzas a las que está sometida la estructura no produzcan deslizamientos o volcamiento. Una vez conocida las dimensiones de la estructura es necesario comprobar la estabilidad del mismo. Las fuerzas que deben ser consideradas son el empuje del agua o empuje hidrostático (E), el peso propio de la estructura (W), y la subpresión (S).

4.7.1. Coeficiente de seguridad

4.7.1.1.Vuelco

Por lo general los coeficientes de seguridad contra el vuelco se encuentran en un rango de 2 a 3. Si este valor resultara ser menor a 2, se deberá modificar sus dimensiones hasta conseguir el margen de seguridad. Se deben considerar todas las fuerzas presentes en la estructura. El coeficiente de seguridad contra el deslizamiento oscila entre un valor de 1 y 1.5. La inclusión de la subpresión puede llegar a disminuir este coeficiente.

4.7.1.2.Deslizamiento

El coeficiente de deslizamiento en una estructura de hormigón con base horizontal es igual a la tangente del ángulo entre la perpendicular a la base y la resultante de la reacción de la cimentación.

V. Marco metodológico

5.1.Propuesta de solución

La solución planteada para resolver este problema está compuesta por el dimensionamiento de una rejilla de fondo sobre el azud existente que estará apoyado, un muro que será utilizado como apoyo de la rejilla y además servirá como canal recolector, y el dimensionamiento de un

canal desripador y vertederos que garantizaran que el caudal requerido llegue al canal de conducción.

Se planea utilizar las estructuras que se encuentran construidas para poder implementar las obras necesarias para el funcionamiento adecuado de la rejilla de fondo, entre ellas el canal de purga, que se propone utilizarlo como un canal desripador de igual manera la compuerta de salida conectada al desripador y junto a este construir un vertedero que transporte el agua del desripador con el canal de conducción que ya se encuentra funcionando.

5.2. Características de estudios realizados por la central hidroeléctrica

La central hidroeléctrica realizó estudios sobre climatología, hidrología y sedimentología para comprender aspectos relevantes a la ejecución del proyecto, estos estudios se realizaron mediante programas, monitoreos o diferentes herramientas según la necesidad del estudio, sin embargo en nuestro proyecto para optimizar la evacuación de sedimentos en la capacidad nos enfocamos estudios que dictaminen los sólidos suspendidos en el río Mazar ya que nos permiten contar con información base para la toma de decisiones sobre el diseño de la estructura sobre la descripción del área general de estudio.

5.2.1. Estudios climáticos

Según los estudios realizados por la central, desarrollaron y evaluaron un modelo matemático en estado estacionario, considerando el caudal correspondiente a un periodo de retorno de 100 años para la proyección de todas las medidas de protección. Además, se ha empleado un caudal con un periodo de retorno de 50 años para validar el modelo matemático. En otras palabras, examinaron y planificaron las estructuras necesarias para hacer frente a las condiciones más adversas que podría generar un evento de crecida en el tramo bajo estudio.

El área de estudio de aproximadamente 300 km² en total, corresponde al tramo centro – sur de las laderas orientales de la Cordillera Real o Central, y se localiza en su mayor parte en la provincia del Cañar, la precipitación en la zona del proyecto muestra que el periodo comprendido entre los meses de abril y septiembre es lluvioso, con pico en el mes de julio. El período de menores precipitaciones corresponde a los meses noviembre – febrero, siendo marzo y octubre los meses de transición, la humedad máxima corresponde al periodo de lluvias entre los meses de abril a septiembre, con valores mayores al 80% (CELEC, 2023).

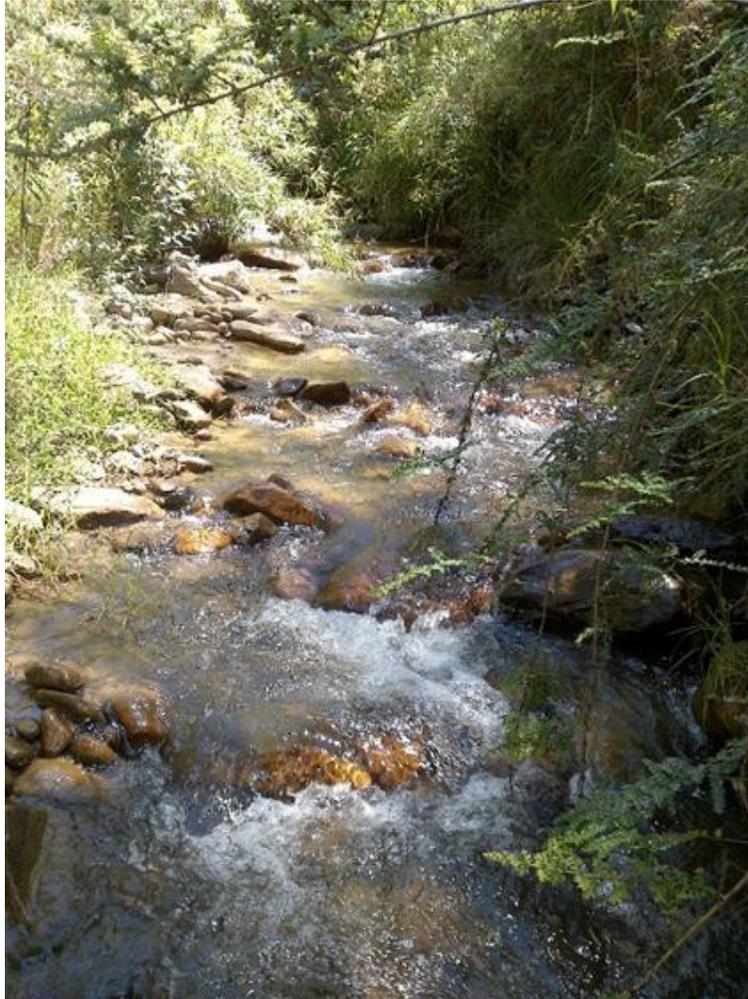
5.2.2. Estudios de sedimentos

5.2.2.1. Características del río

El río Mazar tiene características propias de un río de montaña, debido a su notable variabilidad en los caudales y por presentar pendientes pronunciadas que superan el 5 y 6%. En cuanto al lecho del río Mazar y las quebradas que desembocan en él, se observa un material típico de cursos de agua de montaña, que abarca una amplia variedad de tamaños, desde arena y grava hasta cantos rodados de considerable tamaño con diámetros mayores a 256 mm. Además, se identificaron estructuras como los step-pool, compuestas por material grueso que forma escalones (steps), presentan, después de cada escalón, una piscina con un lecho más fino. Cabe destacar que estas formaciones no solo contribuyen a la morfología del río, sino que también añaden resistencia al flujo del agua.

Figura 14

Material en el lecho del río Mazar y las quebradas



Fuente: (CELEC, 2023)

5.2.2.2. Transporte de sedimentos

Los procesos erosivos en las cuencas hidrográficas ocurren de manera natural por acción de la lluvia, el viento y la escorrentía, y se intensifican por las actividades antrópicas que se desarrollan en las cuencas hidrográficas, como la deforestación, la introducción de pastos y cultivos en laderas.

El movimiento de las partículas que arrastra el río obedece a las características propias del flujo, de la geometría del cauce y del material de fondo. La tasa de movimiento de las partículas depende de su velocidad y el tipo de material en suspensión y de fondo.

Se presenta los resultados del programa de monitoreo y las actividades de capacitación realizados entre agosto 2014 y septiembre 2015.

5.2.2.3.Sólidos suspendidos

Los sólidos suspendidos corresponden al material que se mantiene en suspensión en el agua y viajan por fuerzas advectivas en el flujo. Este material es el presente mayoritariamente en el flujo que ingresa a los sedimentadores.

El transporte de sedimentos suspendidos se relaciona con actividades humanas, vías y posibles deslizamientos, evidenciándose una mayor producción con caudales altos. Se obtiene del análisis de la información obtenido por la Fundación de Cordillera Tropical menciona que “el transporte de sedimento en el río Mazar es de 347 Ton/km² año”.

5.2.2.4.Sólidos de arrastre

Estos sólidos son aquellos que son arrastrados por la corriente mientras permanecen en contacto con el lecho. Con respecto a estos sólidos no existe gran cantidad de información, por lo que fue prioritario su monitoreo y estudio. Existen diferentes técnicas para medir los sólidos de arrastre, los cuales son localizados en el fondo del cauce, el material se queda en una malla la cual retiene un cierto tamaño de material. Para la utilización de esta técnica es necesario acompañar el registro del volumen de los sólidos atrapados con un estudio de sus características físicas.

Figura 15

Materia que se encuentra en la capa sedimentada



Fuente: (CELEC, 2023)

5.3. Criterios de diseño de la rejilla de fondo

Para poder realizar el diseño de la rejilla de fondo se deben cumplir con los siguientes criterios: (Krochin, 1986).

- La rejilla puede estar a cualquier altura sobre el fondo de manera que la altura del azud puede llegar a hacerse cero, normalmente oscila entre 20 o 50 cm. Esto permite que las piedras pasen fácilmente por encima del azud con lo cual se suprime la compuerta de purga.
- En vista de que una gran cantidad de arenas y piedras pequeñas entran por la rejilla, es imprescindible construir un desarenador eficiente a continuación de la toma.
- La rejilla tiene una inclinación con la horizontal entre 0° y 20° para facilitar el paso de las piedras pero según Bouvard podría llegar a 30° o hasta 40° .

- En las consideraciones mecánicas se aconseja una separación entre los barrotes de 2 a 6 cm o menores que 10 cm.
- Es aconsejable que el ancho de la rejilla sea menor a 1.25 m considerando los apoyos.

5.3.1. Dimensiones de la rejilla de fondo

Como primera aproximación se puede tomar la longitud efectiva:

$$Le = L * \cos \beta_{med} * K \quad (1)$$

Siendo β_{med} el ángulo de inclinación de la rejilla

El área de la rejilla por la cual entra el agua a la galería será:

$$A = b * L * \cos \beta_{med} * K \quad (2)$$

Siendo “b” el ancho de la rejilla en sentido perpendicular del río.

El coeficiente K que produce el área total en área efectiva disponible para el caso del agua está dado por:

$$K = (1 - f) \frac{s}{s + t} \quad (3)$$

Donde:

- f: porcentaje de la superficie que queda obstruida por las arenas y grava que se incrustan entre las rejas, se toma de 15 – 30%.
- s: espaciamiento entre barrotes.
- t: ancho de un barrote

entonces el caudal que entra por una longitud “x” de rejilla será:

$$Q = C * b * x * \cos \beta * K \sqrt{2g * Ho} \quad (4)$$

Siendo C el coeficiente de contracción que varía en función de la disposición de los hierros de la rejilla. Su valor depende de la inclinación α de la rejilla con la horizontal y está dado por:

$$C = Co - 0.325i \quad (5)$$

$$i = \tan \alpha \quad (6)$$

$$Co = 0.6 \text{ para } \frac{e}{s} > 4$$

$$Co = 0.5 \text{ para } \frac{e}{s} < 4$$

El ancho necesario de la rejilla sería:

$$b = \frac{0.313Q}{(C * K)^{3/2} * L^{3/2}} \quad (7)$$

Para facilitar los cálculos en la **Tabla I** se presentan los valores de $\frac{0.313}{(C*K)^{3/2}}$ para $i=0.20$ y $t=3/8"$.

Tabla 1*Tabla de espaciamiento de barrotes y porcentaje de obstrucción en la rejilla*

s	f				
	10%	15%	20%	25%	30%
1.5	2.675	2.925	3.194	3.517	3.913
2	2.301	2.484	2.722	3.01	3.33
2.5	2.073	2.252	2.484	2.722	3.01
3	1.92	2.087	2.301	2.524	2.82
3.5	1.82	1.994	2.174	2.408	2.675
4	1.768	1.909	2.101	2.301	2.566
4.5	1.701	1.863	2.032	2.236	2.484
5	1.605	1.799	1.981	2.174	2.408
5.5	1.613	1.768	1.932	2.144	2.371
6	1.589	1.739	1.909	2.101	2.319

Fuente: (Krochin, 1986)

Experimentalmente E.A. Zamarin obtuvo la siguiente expresión:

$$Q = C * K * b * L \sqrt{2g * h_m} \quad (8)$$

Siendo h_m la altura media de agua sobre la rejilla. Bakhmeteff y Boussinesq demostraron que en la entrada de agua ocurre con calado crítico.

$$C * K * b * L \sqrt{2g \frac{2}{3} H_o \frac{1}{2}} = C * K * \cos \beta * b * L \sqrt{2g * H_o} \quad (9)$$

$$\cos \beta = \sqrt{\frac{1}{3}} = 00.577$$

$$\beta = 54^\circ 46' = 54.77^\circ$$

5.4.Diseño de la galería

El flujo de agua en la galería que queda bajo la rejilla es un caso de flujo con caudal variable en ruta, para el cual no existe aún una solución exacta. Por esta razón se han creado diferentes metodologías aproximadas para definir su forma.

Procedimiento del método de Zamarin

Para tener seguridad de que todas las piedras y arenas que han ingresado por la rejilla sean arrastrada hacia el desrripador, el promedio de la velocidad en la galería debe ser alto por lo menos igual a (Krochin, 1986):

$$V_f > 3\sqrt{g * s} \quad (10)$$

Donde s es el espaciamiento entre los barroses.

Para que esto se cumpla se toma generalmente una velocidad inicial de $V_o = 1$ m/s al comienzo de la galería y de 2-3 m/s al final.

La velocidad en cada punto se determina con la formula:

$$V_x = \frac{V_f - V_o}{b} x + V_o \quad (11)$$

La relación entre el caudal y la velocidad da el área y por lo tanto el calado necesario de agua para cada punto de la galería.

El cálculo se efectúa en la siguiente formula:

$$Q_x = \frac{Q}{b} x \quad (12)$$

Siendo “x” la distancia desde el comienzo de la galería.

Determinar el calado en la galería:

$$y_x = \frac{Q_x}{V_x * L} \quad (13)$$

Fijar el área y el perímetro mojado:

$$A_x = y_x * L \quad (14)$$

$$P_x = 2y_x + L \quad (15)$$

Determinar la pendiente de fricción con Manning y la pendiente media:

$$sf = \left(\frac{Q_x * n * P_x^{2/3}}{A_x^{5/3}} \right)^2 \quad (16)$$

Calcular la perdida entre estaciones hf:

$$hf = (x_2 - x_1) \frac{S_2 - S_1}{2} \quad (17)$$

Calcular el desnivel de la galería:

$$D = y_x + \sum hf + \frac{V_x^2}{2g} \quad (18)$$

Se establece el perfil de fondo como distancia desde un eje de referencia a base de la suma del calado, carga de velocidad y perdidas.

5.5. Diseño del desripiador

5.5.1. Criterios de diseño del desripiador

El desripiador debe comprender los siguientes aspectos (Krochin, 1986):

- a) El desripiador debe retener las piedras que pasan por las rejillas y deben ser sedimentados y no pasar a la siguiente estructura.
- b) La velocidad debe ser baja
- c) Para un fácil arrastre de piedras hacia el canal se debe evitar ángulos rectos, se une con curvas suaves y así se evita que las piedras se queden en las esquinas.
- d) La velocidad en el canal debe ser mayor a 2m/s para asegurar el arrastre de las piedras.
- e) Se diseña un vertedero sumergido al final del desripiador para asegurar la cota o nivel del agua en el desarenador.

5.6. Diseño del vertedero de excesos en el desripiador

En las tomas de obra se debe considerar las crecientes que se producen muy rápido y no se puede tener control mediante el cierre de la compuerta de admisión, por ello es imprescindible que se diseñen vertederos de desfogue para regular el caudal de exceso que ingresa (Krochin, 1986).

El diseño del vertedero con descarga libre se realiza mediante la fórmula:

$$Q_{dis} = \frac{2}{3} * \sqrt{2g} * b * \mu * h^{3/2} \quad (19)$$

$$\mu = 1.02 - \frac{1.015}{\frac{h}{r} + 2.08} + \left[0.04 + \left(\frac{h}{r} + 0.19 \right)^2 + 0.0223 \right] * \frac{r}{w} \quad (20)$$

Donde:

- b : ancho del vertedero (m).
- μ : coeficiente de corrección para cresta circular según Kreamer.
- h : cara sobre el vertedero (m).
- r : radio de curvatura de la cresta (m).
- w : altura del vertedero (m)

5.7. Compuerta

Para una sección rectangular, la ecuación para el cálculo del caudal de descarga por la compuerta es la siguiente (Sotelo G, 1994):

$$Q = C_d * b * a * \sqrt{2g * y_1} \quad (21)$$

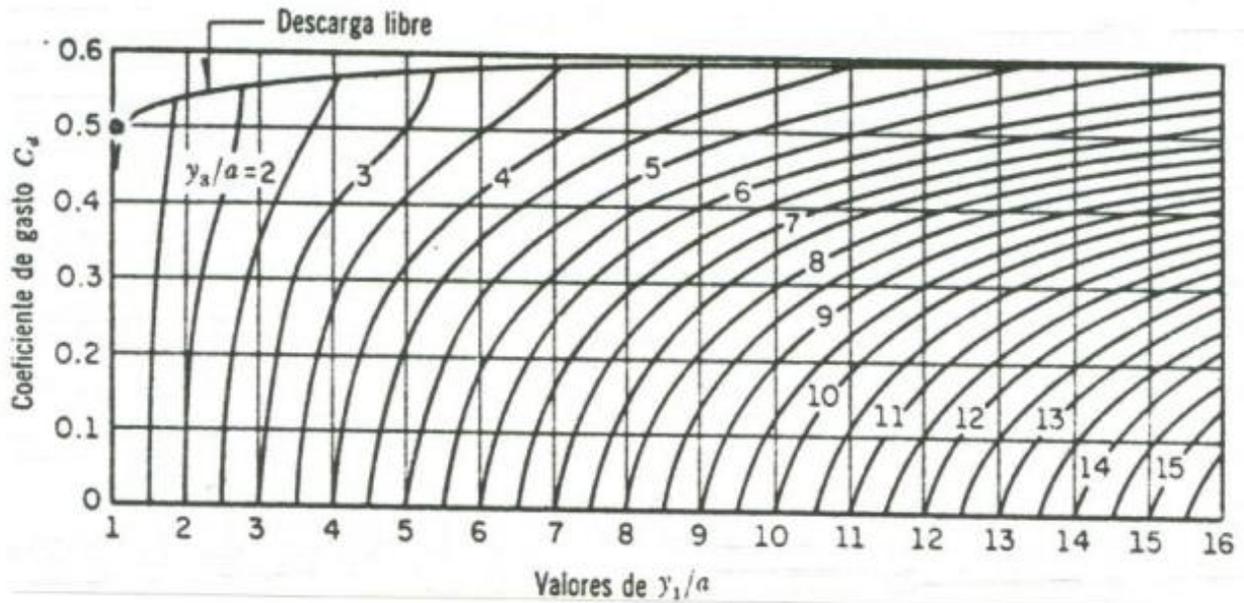
Donde:

- C_d : coeficiente de descarga.
- b : ancho del canal (m).
- a : abertura de la compuerta (m).
- y_1 : tirante de aguas arriba de la compuerta (m).

El coeficiente de descarga para compuertas planas verticales con descarga libre se obtiene de la siguiente figura:

Figura 16

Coeficiente de descarga para compuertas verticales



Fuente: (Sotelo G, 1994)

5.7.1. Coeficiente de velocidad

El investigador Knapp propone una ecuación para calcular el coeficiente de velocidad para compuertas verticales con descarga libre (Sotelo G, 1994):

$$C_v = 0.96 + 0.0979 * \frac{a}{y_1} \quad (22)$$

5.7.2. Coeficiente de contracción

Investigadores han obtenido este coeficiente experimentalmente por medio de la geometría del flujo. Este coeficiente se obtiene con la siguiente ecuación (Sotelo G, 1994):

$$C_c = \frac{1}{2} \frac{a}{y_1} \left(\frac{C_d}{C_v} \right)^2 + \sqrt{\left[\frac{1}{2} * \frac{a}{y_1} * \left(\frac{C_d}{C_v} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{C_d}{C_v} \right)^2} \quad (23)$$

5.8. Estabilidad de la presa

El peso propio se calcula multiplicando el volumen total de la presa por el peso volumétrico del concreto

$$W = \gamma_c * Vol \quad (24)$$

Cálculo del empuje hidrostático se debe

$$E = \frac{1}{2} * \gamma_a * h^2 \quad (25)$$

Donde:

- E: empuje hidrostático (Ton).
- γ_a : peso específico del agua (Ton/m³)
- h: Altura del fondo de la presa al espejo de agua (m).

Cálculo de la fuerza de subpresión

$$S = \frac{1}{2} * \gamma_a * L * h \quad (26)$$

Donde:

- S: fuerza de subpresión (Ton).
- γ_a : peso específico del agua (Ton/m³)
- h: Altura del fondo de la presa al espejo de agua (m).
- L: longitud de la base (m).

5.8.1. Análisis de estabilidad por vuelco o volteo

El coeficiente de seguridad contra el vuelco es la relación del momento que tiende a enderezar la presa al momento que tiende a volcarla alrededor del pie de la presa. Esta relación puede expresarse así:

$$FS_{Vuelco} = \frac{M_o}{EL_E * SL_S} \quad (27)$$

Donde

- M_o : momento debido al peso de la presa (Ton-m/m).
- E : empuje hidrostático (Ton).
- L_E : longitud del brazo del momento por la fuerza hidrostática (m).
- L_S : longitud del brazo del momento generado por la subpresión (m).

5.8.2. Análisis de estabilidad por deslizamiento

El coeficiente de deslizamiento en una presa de gravedad se calcula tomando en cuenta la suma de las fuerzas horizontales y verticales.

$$FS_{dest} = \frac{f \sum V}{\sum H} \quad (28)$$

Donde

- f : coeficiente de fricción del suelo.
- $\sum V$: sumatoria de fuerzas verticales (Ton).
- $\sum H$: sumatoria de fuerzas horizontales (Ton). L

5.9. Diseño estructural de un muro

Realizar el diseño estructural para una estructura de hormigón es importante ya que este influye directamente a la estabilidad de estructura.

Recubrimiento

Del libro de ACI318-14 se obtiene la siguiente figura para establecer el recubrimiento en los elementos de concreto:

Figura 17

Recubrimiento especificado para elementos de concreto contruidos en sitio no preesforzados

Exposición del concreto	Miembro	Refuerzo	Recubrimiento especificado, mm
Construido contra el suelo y permanente-mente en contacto con él	Todos	Todos	75
Expuesto a la intemperie o en contacto con el suelo	Todos	Barras No. 19 a No. 57	50
		Barra No. 16, alambre MW200 ó MD200, y menores	40
No expuesto a la intemperie ni en contacto con el suelo	Losas, viguetas y muros	Barras No. 43 y No. 57	40
		Barra No. 36 y menores	20
	Vigas, columnas, pedestales y amarres a tracción	Armadura principal, estribos, espirales y estribos cerrados para confinamiento	40

Fuente: ACI318-14 Tabla 20.6.1.3.1

Momento ultimo de diseño

$$\phi M_n \geq M_u \tag{29}$$

$$\phi T(d - \frac{a}{2}) \geq M_u \tag{30}$$

$$\phi A_s * f_y(d - \frac{a}{2}) \geq M_u \tag{31}$$

$$a = \frac{A_s * f_y}{2 * 0.85 * f'c * b} \tag{32}$$

$$M_u = \phi A_s * f_y \left(d - \frac{A_s * f_y}{2 * 0.85 * f'_c * b} \right) \quad (33)$$

Donde:

- Mn: momento nominal
- Mu: momento ultimo de diseño
- A_s : acero requerido
- f_y : acero de refuerzo
- d : peralte efectivo (b-r)
- f'_c : resistencia a la compresión del concreto
- b : ancho de la estructura

Área mínima

$$A_{s_{min}} = \frac{14}{f_y} * b * d \quad (34)$$

Cálculo de la cuantía

$$\rho_{min} = \frac{14}{f_y} \quad (35)$$

$$\rho = \frac{A_s}{b * d} \quad (36)$$

Cálculo del cortante ultimo de diseño

Para el cálculo del cortante ultimo de diseño se considera el esfuerzo ultimo generado por las cargas presentes en la estructura y su altura.

$$V_u = \sigma_u * \frac{h}{2} \quad (37)$$

Cálculo del cortante resistente al concreto

$$V_c = 0.53\lambda\sqrt{f'c} * b * d \quad (38)$$

Obtenido de ACI318-14 22.5.5.1

VI. Resultados

6.1. Dimensiones de la rejilla de fondo

La rejilla de fondo se ubica en un tramo de longitud adecuada para garantizar el ingreso del caudal de captación. La rejilla de fondo se ubica sobre el azud y admite el tránsito de material flotante así como de material sólido grueso. De igual manera, la circulación del agua durante las crecidas extraordinarias circulará por encima del dique de cierre hacia aguas abajo.

6.1.1. Datos

Qdis: 3.44 m³/s

Características de la rejilla

Factor de obstrucción	f:	15.00%
Espaciamiento	s:	0.05 m
Inclinación de la reja	i:	18% ($\approx 10^\circ$)
Ancho de los barrotes	t:	0.02 m
Espaciamiento	e:	0.03 m

6.1.2. Cálculo

$$K = (1 - f) \frac{s}{s + t}$$

$$K = (1 - 0.15) \frac{0.05}{0.05 + 0.02}$$

$$K = 0.607$$

Relación e/s: 0.06

Coefficiente Co: 0.5 para e/s > 4

Coefficiente de contracción C:

$$C = Co - 0.325i$$

$$C = 0.06 - 0.325 * 0.018$$

$$C = 0.44$$

Configuración de la rejilla

Apoyo: 3 cm

Tabla 2

Longitudes y ancho de la rejilla

#Barras	L. Inclínada	Lh	L real	b
4.00	1.50	1.48	1.42	4.58
5.00	1.20	1.18	1.12	6.51
6.00	1.00	0.98	0.92	8.69
7.00	0.86	0.84	0.78	11.13

Fuente: Elaboración propia

$$L. Inclínada = \frac{i}{\#Barras}$$

$$L. horizontal = L. Inclínada * \cos(i)$$

$$Lreal = L. horizontal - (2 * apoyo)$$

Se toma un valor donde L real sea una longitud menor a 1.25 m, siendo la longitud adoptada de 1.12 m y ancho de 6.51 m.

Ancho de la rejilla

$$b = \frac{0.313Q}{(C * K)^{3/2} * L^{3/2}}$$

$$b = \frac{0.313 * 3.44}{(0.443 * 0.607)^{3/2} * 1.12^{3/2}}$$

$$b = 6.51 \text{ m}$$

Tabla 3

Tabla de dimensiones de la rejilla

RESUMEN	
DIMENSIONES DE LA REJILLA	
t: altura o espesor de los barrotes	0.02 m
e: ancho de un barrote	0.003 m
s: separación entre los barrotes	0.08 m
b: ancho de la rejilla	1.15 m
L: longitud de la rejilla	6.51 m
Nº barrotes	129.00 U
Sección de los barrotes	PLT 20x3

Fuente: Elaboración propia

6.2. Diseño de la galería

6.2.1. Datos

V_o	1.00 m/s	Velocidad inicial
V_f (deseada):	2.10 m/s	Velocidad calculada
V_f asumida:	2.00 m/s	Velocidad asumida

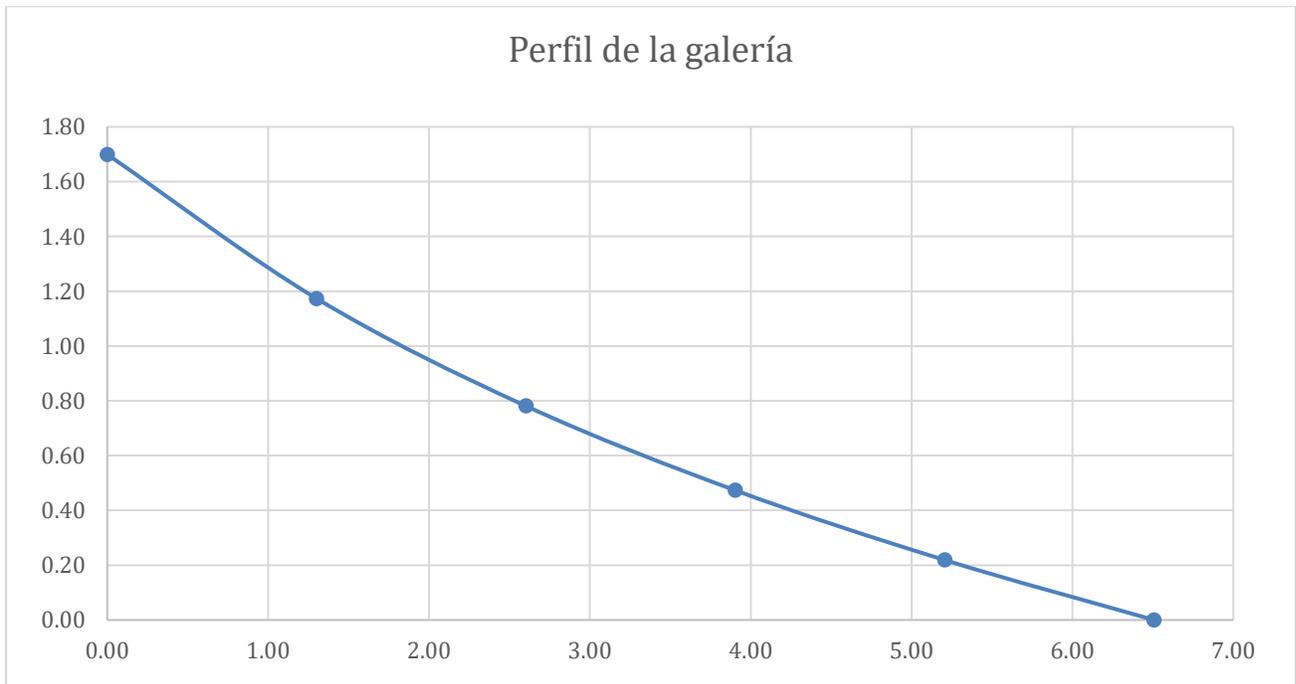
6.2.2. Cálculos

La galería está conformada por una cámara ubicada debajo de la rejilla. Para obtener las dimensiones de la galería se usa el método de Zamarin para la obtención del calado y el fondo.

Tabla 4*Cálculo de calado y altura de energía de la galería*

x	V _x	Q _x	y _x	A _x	P _x	Rh	Rh ^{2/3}	Sf	hf	Σhf	V ² /2g	Desnivel	Cota	Δz
0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00	-	-	-	0.05	0.05	1.70	0.05
1.30	1.20	0.69	0.50	0.57	2.15	0.27	0.41	0.01	0.00	0.00	0.07	0.58	1.17	0.08
2.60	1.40	1.38	0.85	0.98	2.86	0.34	0.49	0.01	0.01	0.01	0.10	0.97	0.78	0.11
3.90	1.60	2.06	1.12	1.29	3.39	0.38	0.52	0.01	0.01	0.02	0.13	1.28	0.47	0.16
5.21	1.80	2.75	1.33	1.53	3.81	0.40	0.54	0.01	0.01	0.04	0.17	1.53	0.22	0.20
6.51	2.00	3.44	1.50	1.72	4.14	0.42	0.56	0.01	0.01	0.05	0.20	1.75	0.00	0.25

Fuente: Elaboración propia

Figura 18*Profundidad de la galería*

Fuente: Elaboración propia

Para garantizar que la altura de la galería incluya el calado de la galería y un suficiente franco libre (Δz) para su funcionamiento se selecciona como altura de la primera pared un valor aproximado de “**Desnivel**”, y como valor de la segunda pared correspondiente se considera la inclinación de la rejilla adoptada (10°).

Tabla 5

Resumen de dimensiones de la galería

RESUMEN	
DIMENSIONES DE LA GALERIA	
h1: altura de la primera pared de la galería	1.75 m
b: ancho de la galería	1.15 m
L: longitud de la galería	6.51 m
h2: altura de la segunda pared de la galería	1.95 m
Cota inicial de la galería	2481.90 msnm
Cota final de la galería	2480.20 msnm

Fuente: Elaboración propia

6.3. Canal desripiador

El canal desripiador adoptará el ancho del canal de purga el cual es de 1.80 m, para el vertedero se considera una altura de 1.54 m con un radio de 25 cm.

6.3.1. Datos

Q_{dis} :	3.44	m ³ /s	Caudal de diseño
B1:	1.80	m	Ancho del canal
w:	1.40	m	Altura del vertedero
r:	0.25	m	Radio de curvatura de la cresta
h:	0.35	m	Carga sobre el vertedero
hx:	1.75	m	Altura de la pared adoptada constructivamente

6.3.2. Cálculo

Para comprobar que las medidas adoptadas son correctas se debe verificar que la relación h/r sea menor o igual a 4.2

$$\frac{h}{r} \leq 4.2$$

$$\frac{1.75 - 1.40}{0.25} \leq 4.2$$

$$1.41 < 4.2$$

Se debe calcular el coeficiente de gasto para vertederos con cresta circular y talud vertical

$$\mu = 1.02 - \frac{1.015}{\frac{h}{r} + 2.08} + \left[0.04 \left(\frac{h}{r} + 0.19 \right)^2 + 0.0223 \right] \frac{r}{w}$$

$$\mu = 1.02 - \frac{1.015}{\frac{0.35}{0.25} + 2.08} + \left[0.04 \left(\frac{0.35}{0.25} + 0.19 \right)^2 + 0.0223 \right] \frac{0.25}{1.40}$$

$$\mu = 0.75$$

El caudal excedente se calcula mediante la siguiente formula:

$$Q_{exc} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} * b * \mu * h^{\frac{3}{2}}$$

$$Q_{exc} = \frac{2}{3} \sqrt{2 * 9.81} * 1.80 * 0.75 * 0.35^{\frac{3}{2}}$$

$$Q_{exc} = 0.83 \frac{m^3}{s} \rightarrow 830 L/s$$

La longitud del vertedero se calculó mediante iteraciones, hasta alcanzar un valor aproximado del caudal de diseño

Longitud adoptada: 7.45 m

$$Q_{dis} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} * b * \mu * h^{\frac{3}{2}}$$

$$Q_{dis} = \frac{2}{3} \sqrt{2 * 9.81} * 7.45 * 0.75 * 0.35^{\frac{3}{2}}$$

$$Q_{dis} = 3.45 \text{ m}^3/\text{s}$$

6.4. Vertedero a conducción

A continuación se detalla el cálculo del canal y vertedero correspondiente para llevar el agua al canal de conducción.

6.4.1. Datos

Q_{dis} :	3.44	m ³ /s	Caudal de diseño
B1:	1.80	m	Ancho del canal
w:	1.15	m	Altura del vertedero
r:	0.25	m	Radio de curvatura de la cresta
h:	0.25	m	Carga sobre el vertedero
hx:	1.40	m	Calado al final de la galería

6.4.2. Cálculo

Para comprobar que las medidas adoptadas son correctas se debe verificar que la relación h/r sea menor o igual a 4.2

$$\frac{h}{r} \leq 4.2$$

$$\frac{1.40 - 1.15}{0.25} \leq 4.2$$

$$1.00 < 4.2$$

Se debe calcular el coeficiente de gasto para vertederos con cresta circular y talud vertical

$$\mu = 1.02 - \frac{1.015}{\frac{h}{r} + 2.08} + \left[0.04 \left(\frac{h}{r} + 0.19 \right)^2 + 0.0223 \right] \frac{r}{w}$$

$$\mu = 1.02 - \frac{1.015}{\frac{0.25}{0.25} + 2.08} + \left[0.04 \left(\frac{0.25}{0.25} + 0.19 \right)^2 + 0.0223 \right] \frac{0.25}{1.15}$$

$$\mu = 0.71$$

El caudal excedente se calcula mediante la siguiente formula:

$$Q_{exc} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} * b * \mu * h^{\frac{3}{2}}$$

$$Q_{exc} = \frac{2}{3} \sqrt{2 * 9.81} * 1.80 * 0.71 * 0.25^{\frac{3}{2}}$$

$$Q_{exc} = 0.47 \frac{m^3}{s} \rightarrow 470 L/s$$

La longitud del vertedero se calculó mediante iteraciones, hasta alcanzar un valor aproximado del caudal de diseño

Longitud adoptada: 13.2 m

$$Q_{dis} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} * b * \mu * h^{\frac{3}{2}}$$

$$Q_{dis} = \frac{2}{3} \sqrt{2 * 9.81} * 13.25 * 0.71 * 0.25^{\frac{3}{2}}$$

$$Q_{dis} = 3.44 m^3/s$$

6.5.Compuerta

6.5.1. Datos

Caudal de diseño Q_d : 3.44 m³/s

Tirante aguas arriba y_1 : 1.40 m

Ancho del canal b : 1.8 m

Se considerarán diferentes caudales de crecida para determinar cuál es la abertura necesaria para conservar únicamente el caudal de diseño.

Abertura de la compuerta para un caudal de 5 m³/s

Tabla 6

Abertura de la compuerta para un caudal de 5 m³/s

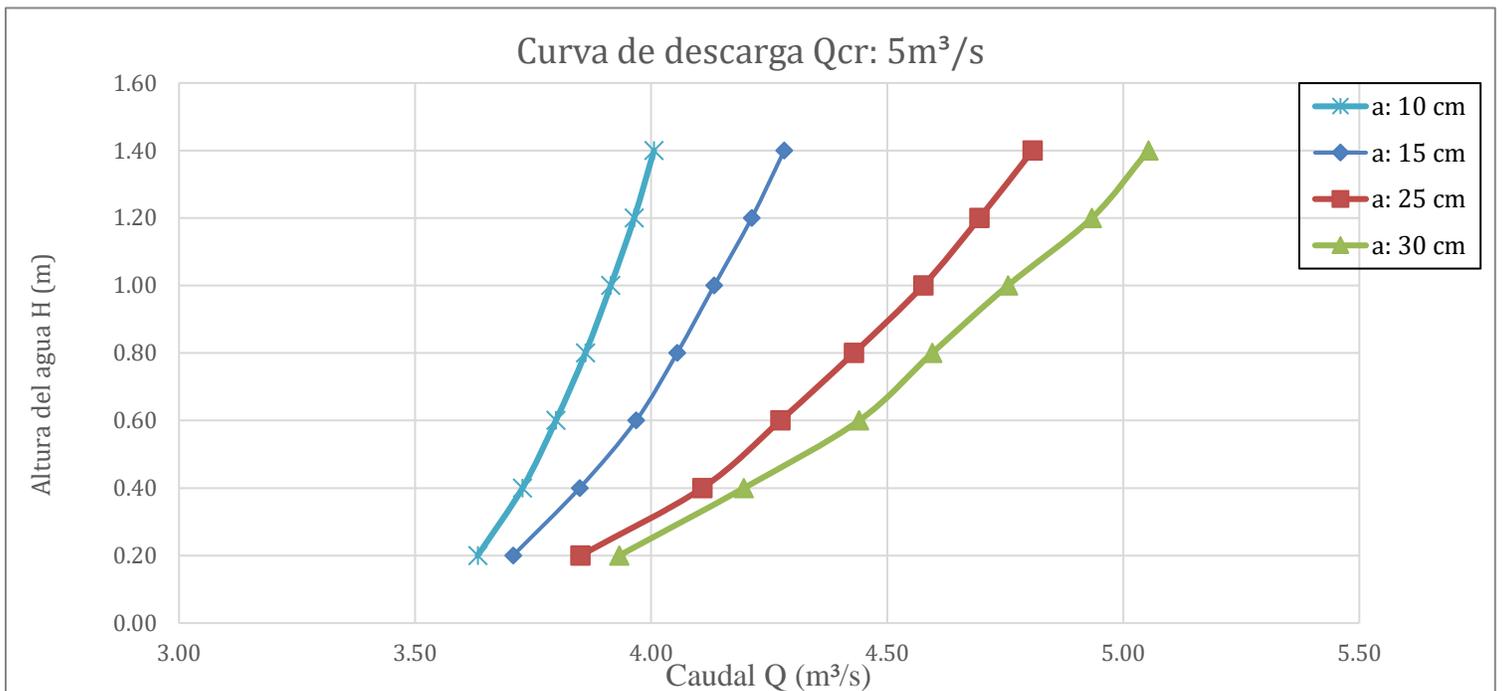
Caudal de crecida 5 m³/s							
Abertura	0.1	m					
y1	y1/a	Cd	Q gasto	Cv	Cc	y2	Caudal
0.200	2.000	0.540	0.193	1.009	0.670	0.067	3.63
0.400	4.000	0.570	0.287	0.984	0.656	0.066	3.73
0.600	6.000	0.580	0.358	0.976	0.648	0.065	3.80
0.800	8.000	0.590	0.421	0.972	0.649	0.065	3.86
1.000	10.000	0.595	0.474	0.970	0.648	0.065	3.91
1.200	12.000	0.600	0.524	0.968	0.649	0.065	3.96
1.400	14.000	0.600	0.566	0.967	0.645	0.065	4.01
Abertura	0.15	m					
y1	y1/a	Cd	Q gasto	Cv	Cc	y2	Caudal
0.200	1.333	0.500	0.267	1.033	0.655	0.098	3.71
0.400	2.667	0.540	0.408	0.997	0.645	0.097	3.85
0.600	4.000	0.570	0.528	0.984	0.656	0.098	3.97
0.800	5.333	0.575	0.615	0.978	0.647	0.097	4.06
1.000	6.667	0.580	0.694	0.975	0.644	0.097	4.13
1.200	8.000	0.590	0.773	0.972	0.649	0.097	4.21
1.400	9.333	0.595	0.842	0.970	0.649	0.097	4.28
Abertura	0.25	m					
y1	y1/a	Cd	Q gasto	Cv	Cc	y2	Caudal
0.200	0.800	0.460	0.410	1.082	0.655	0.164	3.85
0.400	1.600	0.530	0.668	1.021	0.679	0.170	4.11
0.600	2.400	0.540	0.834	1.001	0.654	0.163	4.27
0.800	3.200	0.555	0.989	0.991	0.652	0.163	4.43
1.000	4.000	0.570	1.136	0.984	0.656	0.164	4.58
1.200	4.800	0.575	1.256	0.980	0.652	0.163	4.70

1.400	5.600	0.580	1.368	0.977	0.651	0.163	4.81
Abertura	0.30	m					
y1	y1/a	Cd	Q gasto	Cv	Cc	y2	Caudal
0.200	0.690	0.460	0.476	1.102	0.675	0.196	3.92
0.400	1.379	0.500	0.731	1.031	0.651	0.189	4.17
0.600	2.069	0.540	0.967	1.007	0.667	0.193	4.41
0.800	2.759	0.540	1.117	0.995	0.643	0.186	4.56
1.000	3.448	0.550	1.272	0.988	0.640	0.186	4.71
1.200	4.138	0.570	1.444	0.984	0.654	0.190	4.88
1.400	4.828	0.570	1.559	0.980	0.646	0.187	5.00

Fuente: Elaboración propia

Figura 19

Curva de descarga para un caudal de 5 m³/s



Fuente: Elaboración propia

Para un caudal de crecida de 5 m³/s se deberá descargar un caudal de 1.56 m³/s con una abertura de 0.30 m.

Abertura de la compuerta para un caudal de 8.10 m³/s

Se realizó el cálculo de diferentes aberturas de la compuerta para cuando el caudal de crecidas sea de 8.10 m³/s.

Tabla 7

Abertura de la compuerta para un caudal de 8.10 m³/s

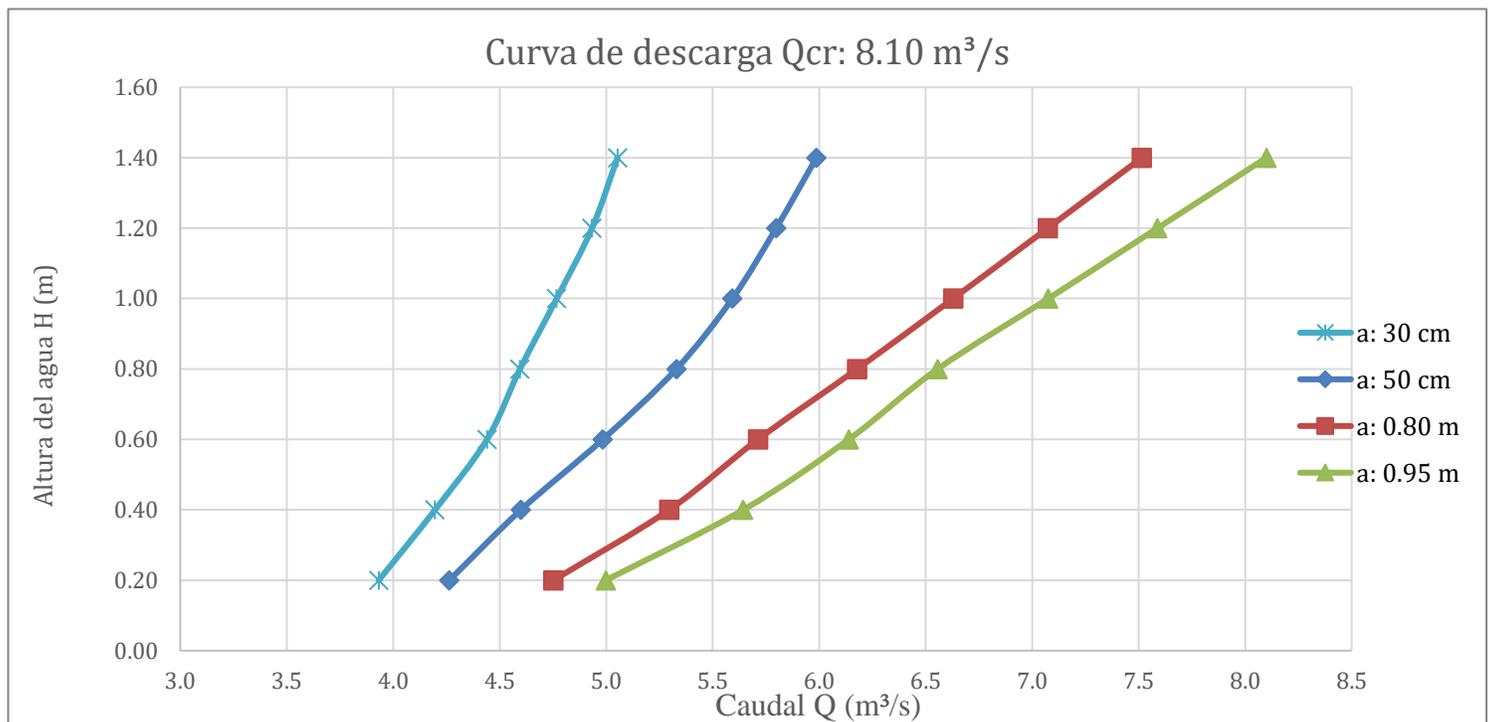
Caudal de crecida 8.10 m ³ /s							
Abertura	0.3	m					
y1	y1/a	Cd	Q gasto	Cv	Cc	y2	Caudal
0.20	0.667	0.460	0.492	1.107	0.594	0.178	3.93
0.40	1.333	0.500	0.756	1.033	0.601	0.180	4.20
0.60	2.000	0.540	1.000	1.009	0.629	0.189	4.44
0.80	2.667	0.540	1.155	0.997	0.613	0.184	4.60
1.00	3.333	0.555	1.328	0.989	0.622	0.187	4.77
1.20	4.000	0.570	1.494	0.984	0.633	0.190	4.93
1.40	4.667	0.570	1.613	0.981	0.628	0.188	5.05
Abertura	0.5	m					
y1	y1/a	Cd	Q gasto	Cv	Cc	y2	Caudal
0.20	0.400	0.46	0.824	1.205	0.759	0.380	4.26
0.40	0.800	0.46	1.160	1.082	0.655	0.327	4.60
0.60	1.200	0.50	1.544	1.042	0.667	0.334	4.98
0.80	1.600	0.53	1.890	1.021	0.679	0.339	5.33
1.00	2.000	0.54	2.153	1.009	0.670	0.335	5.59
1.20	2.400	0.54	2.358	1.001	0.654	0.327	5.80
1.40	2.800	0.54	2.547	0.995	0.642	0.321	5.99
Abertura	0.8	m					
y1	y1/a	Cd	Q gasto	Cv	Cc	y2	Caudal
0.20	0.25	0.46	1.312	1.352	0.821	0.657	4.75
0.40	0.50	0.46	1.856	1.156	0.721	0.577	5.30
0.60	0.75	0.46	2.273	1.091	0.663	0.531	5.71

0.80	1.00	0.48	2.738	1.058	0.659	0.527	6.18
1.00	1.25	0.50	3.189	1.038	0.663	0.530	6.63
1.20	1.50	0.52	3.633	1.025	0.671	0.537	7.07
1.40	1.75	0.54	4.075	1.016	0.683	0.547	7.52
Abertura	0.95	m					
y1	y1/a	Cd	Q gasto	Cv	Cc	y2	Caudal
0.20	0.211	0.46	1.558	1.425	0.841	0.252	5.00
0.40	0.421	0.46	2.204	1.193	0.747	0.224	5.64
0.60	0.632	0.46	2.699	1.115	0.687	0.206	6.14
0.80	0.842	0.46	3.116	1.076	0.648	0.194	6.56
1.00	1.053	0.48	3.636	1.053	0.652	0.196	7.08
1.20	1.263	0.50	4.149	1.038	0.661	0.198	7.59
1.40	1.474	0.52	4.660	1.026	0.673	0.202	8.10

Fuente: Elaboración propia

Figura 20

Curva de descarga para un caudal de 8.10 m³/s



Fuente: Elaboración propia

Para un caudal de crecida de 8.10 m³/s se deberá descargar un caudal de 4.66 m³/s con una abertura en la compuerta de 0.95 m.

Abertura de la compuerta para un caudal de 9.78 m³/s

Se realizó el cálculo de diferentes aberturas de la compuerta para cuando el caudal de crecidas sea de 9.78 m³/s.

Tabla 8

Abertura de la compuerta para un caudal de 9.78 m³/s

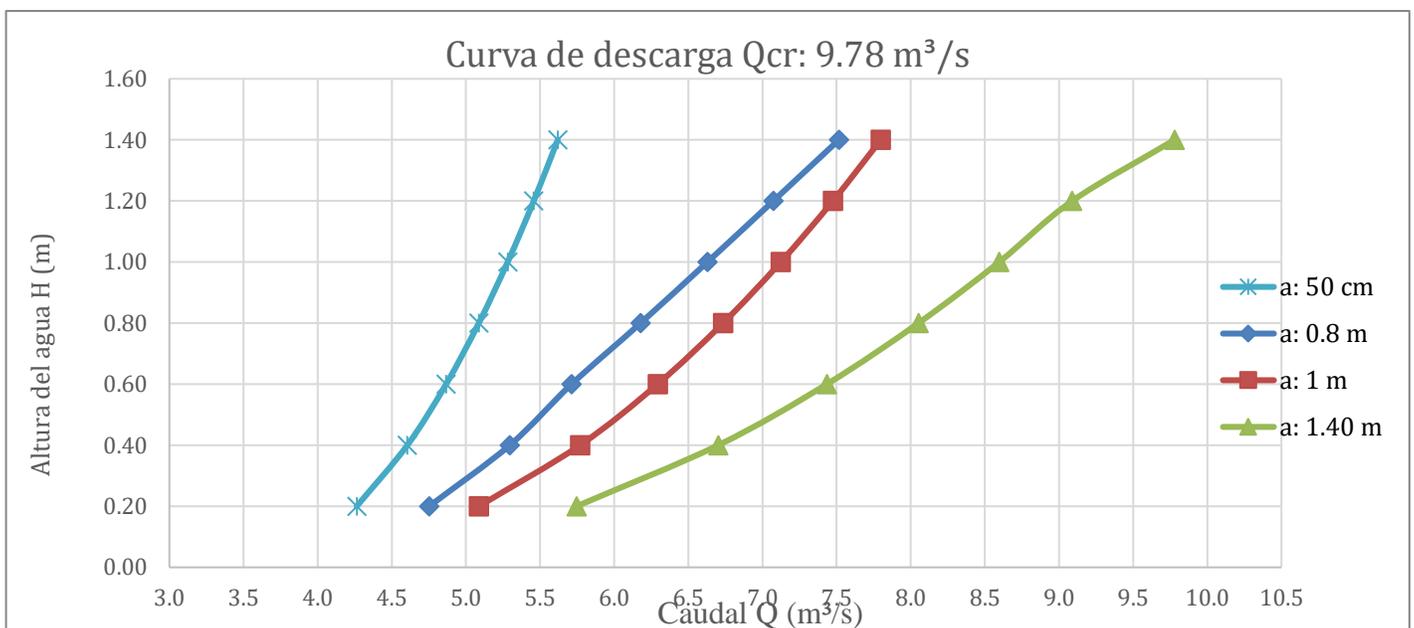
Caudal de crecida 9.78 m³/s							
Abertura	0.5	m					
y1	y1/a	Cd	Q gasto	Cv	Cc	y2	Caudal
0.200	0.400	0.46	0.824	1.205	0.613	0.306	4.26
0.400	0.800	0.46	1.165	1.082	0.567	0.283	4.60
0.600	1.200	0.46	1.427	1.042	0.544	0.272	4.87
0.800	1.600	0.46	1.647	1.021	0.530	0.265	5.09
1.000	2.000	0.46	1.842	1.009	0.522	0.261	5.28
1.200	2.400	0.46	2.018	1.001	0.516	0.258	5.46
1.400	2.800	0.46	2.179	0.995	0.511	0.256	5.62
Abertura	0.8	m					
y1	y1/a	Cd	Q gasto	Cv	Cc	y2	Caudal
0.200	0.250	0.46	1.312	1.352	0.821	0.657	4.75
0.400	0.500	0.46	1.856	1.156	0.721	0.577	5.30
0.600	0.750	0.46	2.273	1.091	0.663	0.531	5.71
0.800	1.000	0.48	2.738	1.058	0.659	0.527	6.18
1.000	1.250	0.50	3.189	1.038	0.663	0.530	6.63
1.200	1.500	0.52	3.633	1.025	0.671	0.537	7.07
1.400	1.750	0.54	4.075	1.016	0.683	0.547	7.52
Abertura	1	m					
y1	y1/a	Cd	Q gasto	Cv	Cc	y2	Caudal
0.200	0.200	0.46	1.647	1.450	0.850	0.850	5.09

0.400	0.400	0.46	2.330	1.205	0.759	0.759	5.77
0.600	0.600	0.46	2.853	1.123	0.698	0.698	6.29
0.800	0.800	0.46	3.295	1.082	0.658	0.658	6.73
1.000	1.000	0.46	3.684	1.058	0.630	0.630	7.12
1.200	1.200	0.46	4.035	1.042	0.610	0.610	7.48
1.400	1.400	0.46	4.358	1.030	0.594	0.594	7.80
Abertura	1.4	m					
y1	y1/a	Cd	Q gasto	Cv	Cc	y2	Caudal
0.200	0.143	0.46	2.306	1.645	0.872	0.261	5.75
0.400	0.286	0.46	3.262	1.303	0.808	0.242	6.70
0.600	0.429	0.46	3.995	1.188	0.749	0.225	7.43
0.800	0.571	0.46	4.613	1.131	0.705	0.212	8.05
1.000	0.714	0.46	5.157	1.097	0.673	0.202	8.60
1.200	0.857	0.46	5.649	1.074	0.649	0.195	9.09
1.400	1.000	0.48	6.340	1.058	0.659	0.198	9.78

Fuente: Elaboración propia

Figura 21

Curva de descarga para un caudal de 9.78 m³/s



Fuente: Elaboración propia

Para un caudal de crecida de $9.78 \text{ m}^3/\text{s}$ se deberá descargar un caudal de $6.34 \text{ m}^3/\text{s}$ con una abertura en la compuerta de 1.40 m .

6.6.Estabilidad de la presa

En el presente proyecto se realizó la dimensión de un muro que será colocado detrás del azud sobre el cual se colocará la rejilla y que funcione además como la galería.

6.6.1. Datos

Características del hormigón

Para el análisis de la presa que incluye el muro se han considerado las siguientes características:

Características físicas del hormigón son las siguientes:

Peso volumétrico	W:	2.4 Ton/m ³
Resistencia a la compresión a los 28 días	f _c :	280 kg/cm ²
Módulo de elasticidad	E:	210000 kg/cm ²
Relación de Poisson	u:	0.3

Características físicas del material circundante

Peso volumétrico	W:	1.73 Ton/m ³
Cohesión	c:	0 kPa
Ángulo de fricción	α:	30 °
Coefficiente de fricción	f:	0.4

6.6.2. Cálculo

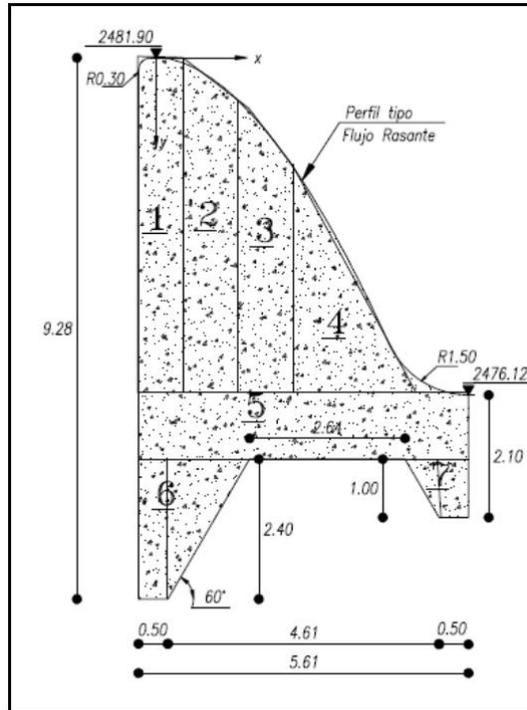
6.6.2.1.Estabilidad de la presa actual

A continuación se presentará el análisis de estabilidad de la presa sin considerar el muro el mismo que fue facilitado por parte de la central hidroeléctrica.

Cálculo de las fuerzas y momento generado por el peso propio de la presa:

Figura 22

Azud de derivación



Fuente: (CELEC, 2023)

Tabla 9

Momento generado por el peso propio del azud

Elemento	B (m)	H (m)	PESO (Ton)	BRAZO (m)	Mo (Ton-m/m)
1	0.60	5.78	8.32	5.31	44.20
2	1.00	5.39	12.94	4.52	58.47
3	1.00	4.50	10.80	3.53	38.12
4Δ	2.10	3.90	9.83	2.31	22.70
5	5.61	1.10	14.81	2.81	41.62
6	0.50	2.30	2.76	5.36	14.79
6Δ	1.39	2.40	4.00	4.65	18.61
7	0.50	1.02	1.22	0.25	0.31
7Δ	0.59	1.02	0.72	0.70	0.51
ΣP/Mo			65.41		239.33

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10*Factores de estabilidad del azud*

Fuerza 1 generada por el agua	$F_{agua\ 1}$:	1.805	Ton/m-m
Fuerza 2 generada por el agua	$F_{agua\ 2}$:	9.462	Ton/m-m
Fuerza total del agua	F_{tagua} :	11.267	Ton/m-m
Momento de vuelco	M_{vuelco} :	33.692	Ton-m/m
Fuerza activa del suelo	F_{as} :	30.102	Ton/m-m
Momento de vuelco	M_{vuelco} :	59.97	Ton-m/m
Momento total de vuelco	$M_{tvuelco}$	83.663	Ton-m/m
Factor de seguridad al vuelco	FS_V :	2.86	Ok
Factor de seguridad al deslizamiento	FS_D :	1.55	Ok

Fuente: Elaboración propia

6.6.2.2. Estabilidad de la presa considerando el muro

Al volumen de hormigón de la presa existente se considerará el muro que será el soporte de la rejilla y además funcionará como canal recolector.

6.6.2.2.1 Características de la presa

Área del hormigón	Ac:	34.48 m ²
Base del muro	b:	7.06 m
Área sumergida	As:	11.30 m ²
Peso específico del agua	γ_a :	1 Ton/m ³
Altura de la presa	H:	9.48 m
Altura del nivel de agua	h:	5.10 m

6.6.2.2.2 Cálculo de cargas**Peso propio**

Se dividirá en secciones la presa para poder calcular la fuerza ejercida por el peso propio y el momento generado al pie del azud.

Tabla 11*Momento generado por la estructura considerando el muro*

Elemento	B (m)	H (m)	PESO (Ton)	BRAZO (m)	Mo (Ton- m/m)
1	0.60	5.78	8.32	5.31	44.20
2	1.00	5.39	12.94	4.52	58.47
3	1.00	4.50	10.80	3.53	38.12
4Δ	2.10	3.90	9.83	2.31	22.70
5	5.61	1.10	14.81	2.81	41.62
6	0.50	2.30	2.76	5.36	14.79
6Δ	1.39	2.40	4.00	4.65	18.61
7	0.50	1.02	1.22	0.25	0.31
7Δ	0.59	1.02	0.72	0.70	0.51
8	1.15	4.16	11.48	6.19	71.07
9	0.30	6.10	4.39	6.91	30.35
ΣP/Mo			81.28		340.75

Fuente: Elaboración propia

Empuje hidrostático

El empuje hidrostático es la fuerza que el agua estará ejerciendo sobre la pantalla del azud

$$E = \frac{1}{2} * \gamma_a * h^2$$

$$E = \frac{1}{2} * 1 * 5.10^2$$

$$E = 13.01 \text{ Ton}$$

Ubicación de la fuerza de empuje hidrostático

Es la distancia desde el fondo donde se ejercerá la mayor fuerza del empuje hidrostático

$$L_E = \frac{h}{3}$$

$$L_E = \frac{5.10}{3}$$

$$L_E = 1.70 \text{ m}$$

Subpresión

Esta fuerza es la presión que es ejercida por debajo de la presa o en la base

$$S = \frac{1}{2} * \gamma_a * L * h$$

$$S = \frac{1}{2} * 1 * 7.06 * 5.10$$

$$S = 18.00 \text{ Ton}$$

Ubicación de la fuerza de subpresión

Esta distancia se ubica a dos tercios de la base desde el pie del azud

$$L_S = \frac{2 * b}{3}$$

$$L_S = \frac{2 * 7.06}{3}$$

$$L_S = 4.71 \text{ m}$$

6.6.2.2.3 Factor de seguridad al vuelco

$$FS_{Vuelco} = \frac{M_o}{EL_E * SL_S}$$

$$FS_{Vuelco} = \frac{340.75}{13.01 * 1.70 + 18.00 * 4.71}$$

$$FS_{Vuelco} = 3.19$$

$$FS_{Vuelco} = 3.19 > 2 \rightarrow \text{Cumple}$$

6.6.2.2.4 Factor de seguridad al deslizamiento

$$FS_{desl} = \frac{f \sum V}{\sum H}$$

$$FS_{desl} = \frac{0.4 * (81.28 - 18.00)}{13.01}$$

$$FS_{desl} = 1.95$$

$$FS_{desl} = 1.95 > 1.5 \rightarrow \text{Cumple}$$

6.7. Diseño estructural del muro

Para el cálculo del acero del muro se consideró únicamente el empuje hidrostático, además, considerando que la sección crítica sería cuando el muro

6.7.1. Datos

Resistencia a la compresión a los 28 días	f'c:	280 kg/cm ²
Acero de refuerzo	f _y :	4200 kg/cm ²
Peso volumétrico del agua	γ _a :	1 Ton/m ³
Altura del muro	h:	6.10 m

6.7.2. Cálculos

Recubrimiento	r:	5 cm
Diámetro de varillas	φ:	2 cm
Área del acero	A _s :	3.14 cm ²
Peralte efectivo	d:	140 cm
Ancho del muro	b:	100 cm

Esfuerzo último

$$\sigma_u = \gamma_a * h$$

$$\sigma_u = 1 * 6.1$$

$$\sigma_u = 6.1 \text{ Ton/m}^2 = 6100 \text{ kgf/m}^2$$

Momento nominal

$$M_n = \gamma_a * \frac{h^2}{2}$$

$$M_n = 1 * \frac{6.1^2}{2}$$

$$M_n = 18.605 \text{ Tom} - m = 1860500 \text{ kgf} - \text{cm}$$

Momento ultimo de diseño (1 m de concreto)

$$\phi M_n \geq M_u$$

$$M_u = \phi A_s * f_y \left(d - \frac{A_s * f_y}{2 * 0.85 * f'_c * b} \right)$$

Cantidad de acero requerido calculado con solver: 3.52 cm².

$$M_n = 2067222.22 \text{ kgf} - \text{cm}$$

Φ para el momento último es 0.9

$$0.9 * 2067222.22 \geq 1860500$$

$$1860500 = 1860500 \rightarrow \text{Cumple}$$

Cálculo de la cantidad de acero mínimo

$$A_{smin} = \frac{14}{f_y} * b * d$$

$$A_{smin} = \frac{14}{4200} * 100 * 140$$

$$A_{smin} = 46.67 \text{ cm}^2$$

Se usará el mayor valor de acero: 46.67 cm²

Cálculo de cuantías

$$\rho_{min} \leq \rho \leq \rho_{max}$$

Cuantía mínima

$$\rho_{min} = \frac{14}{f_y}$$

$$\rho_{min} = \frac{14}{4200} = 0.0033$$

Cuantía máxima: 0.024

Cuantía calculada

$$\rho = \frac{A_s}{b * d}$$

$$\rho = \frac{46.67}{140 * 100}$$

$$\rho = 0.0033$$

$$0.0033 \leq 0.0033 \leq 0.024 \rightarrow \text{Cumple}$$

Cantidad de varillas por metro de concreto

$$\#Varillas = \frac{A_{smin}}{A_s}$$

$$\#Varillas = \frac{46.67}{3.14}$$

$$\#Varillas = 15$$

Espaciamiento entre varillas

$$S = \frac{b - 2r}{\#Varillas - 1}$$

Espaciamiento entre varillas para un metro de ancho del muro (vertical)

$$S = \frac{100 - 2(5)}{15 - 1}$$

$$S = 6.43 \text{ cm}$$

Espaciamiento entre varillas para un metro de ancho del muro (horizontal)

$$S = \frac{145 - 2(5)}{15 - 1}$$

$$S = 9.64 \text{ cm}$$

Cortante ultimo

$$V_u = \sigma_u * \frac{h}{2}$$

$$V_u = 6100 * \frac{6.1}{2}$$

$$V_u = 18605 \text{ kgf} * m$$

Cortante resistente al concreto

$$V_c = 0.53\lambda\sqrt{f'_c} * b * d$$

Concreto de peso normal $\lambda = 1$

$$V_c = 0.53 * 1 * \sqrt{280} * 100 * 140$$

$$V_c = 124160.35 \text{ kgf} * m$$

$$\phi V_c \geq V_u$$

$$\phi \text{ para corte} = 0.75$$

$$0.75 * 124160.35 \geq 18605$$

$$93120.26 > 18605 \rightarrow \text{Cumple}$$

VII. Presupuesto referencial

Para llevar a cabo la ejecución del proyecto se estimaron los costos que se encuentran asociados con las estructuras diseñadas. Esto permitirá realizar una planificación para su debida ejecución.

Tabla 12

Presupuesto referencial del diseño de la rejilla y estructuras complementarias

PRESUPUESTO					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P.Unitario	P.Total
1	Excavación de tierra				108.00
1.1	Excavación con retroexcavadora	m3	11.60	9.31	108.00
2	Desalojo de material				65.08
2.1	Transporte de escombros, cargado a mano y desalojo de material	m3	11.60	5.61	65.08
3	Armado de aceros de refuerzo				22,286.62
3.1	Acero de refuerzo 20 mm fy=4200 kg/cm2	kg	6,404.20	3.48	22,286.62
3.2	Platinas PTL 20X3 mm de acero inoxidable	U	129.00	3.48	448.92
4	Encofrado y hormigonado				11,078.10
4.1	Encofrado recto	m2	64.37	13.58	874.14
4.2	Hormigón de 240 kg/cm2	m3	83.04	122.88	10,203.96
SUBTOTAL					33,986.72
IVA				12 %	4,078.41
TOTAL					38,065.13

Son:

TREINTA Y OCHO MIL SESENTA Y CINCO CON 13/100 DÓLARES DE LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

Fuente: Elaboración propia

VIII. Conclusiones

- En el presente trabajo se realizó el diseño de una rejilla de fondo, un muro que funcionará como una galería, un canal desrpiador que consta con una compuerta de purga por donde se regulará el caudal de ingreso en casos de crecida y para evacuar los sedimentos que ingresen por la rejilla, también se diseñó un vertedero que llevará el caudal hacia el canal de conducción.
- Se optó por diseñar un muro en la parte posterior del azud para evitar romper las estructuras que ya se encuentran construidas, además, el muro tiene 20 cm por encima de la cota del azud debido a que la profundidad de la galería no debe superar la cota del canal de conducción.
- Se tuvo en consideración las características de las estructuras existentes para poder adaptar las que se construirán. Se prevé usar canal de limpieza o de purga como un canal desrpiador manteniendo el mismo ancho. Además, se ajustará la longitud del canal de limpieza para garantizar el funcionamiento del desrpiador.
- En el presente estudio se propuso el diseño mediante la implementación de una rejilla autolimpiable Coanda para un funcionamiento óptimo de la captación, sin embargo las características de esta innovadora rejilla requerían de un ángulo de inclinación de 50° para su debido funcionamiento, el cual sobrepasaba las cotas establecidas de las obras ya realizadas.
- Los planos elaborados en el diseño ofrecen una visión integral y detallada de la estructura propuesta, hemos logrado plasmar con precisión cada aspecto del proyecto, desde las dimensiones primordiales hasta los detalles respectivos para su adecuada implementación.

IX. Recomendaciones

- Es importante revisar la información geológica de la zona donde se construirá la captación ya que esto permitirá conocer el comportamiento de los sedimentos y como podrían afectar estos a las estructuras.
- Se debe verificar que las estructuras diseñadas tengan las pendientes y longitudes de tal manera que no puedan superar los niveles o cotas de las estructuras que ya se encuentran en funcionamiento.
- Es esencial calcular la estabilidad del muro para que este pueda resistir la fuerza ejercida por el agua.
- Para la galería y desripador se recomienda un ángulo de inclinación de 3% para garantizar que los sedimentos sean arrastrados por la fuerza del agua.
- Se requiere disponer de un presupuesto que permita realizar la construcción de las estructuras diseñadas ya que estas garantizaran un mejor funcionamiento en la central hidroeléctrica.
- La captación cuenta con una escalera de peces la cual debido a la modificación se recomienda colocar sobre la galería en forma de puente para la conservación y correcta evacuación de la especie.

X. Referencias bibliográficas

- Bureau of Reclamation. (2003). *Design Guidance for Coanda-Effect Screens* (First Edition).
- Cabascango A, & Guerrón R. (2014). *Guía de diseño para optimización de sistema de riego en zonas andinas. Caso de estudio provincia del Chimborazo.*
- Cataño, S., & Vélez, I. (2021). *Modelo de HidroGeomorfología Fluvial (FHGM): abastecimiento lateral aluvial y morfodinámica en ríos compuestos de grava.*
- CBS Ingeniería. (s/f). *Coanda para la Construcción de Hidroeléctricas en Ecuador.*
- CBS Ingeniería. (s/f). *Malla Coanda.* Retrieved October 25, 2023, from <https://www.mallacoanda.com/informacion-del-producto/>.
- CELEC. (2023). *Informe sobre la pertinencia para el trabajo de titulación sobre la captación de la central hidroeléctrica.*
- Francis G, Cabello O, Oscar J, Vallejos S, Guevara P, & Ayros Ch. (2016). *Análisis comparativo de los parámetros de diseño de una toma tipo tirolesa y una convencional.*
- García-Chevesich, P., Pizarro, R., Lehmann, C., & Martínez, G. (Eds.). (2021). *Perspectivas de la gestión actual de sedimentos en nueve países de las Américas.* UNESCO.
- Hidalgo X. (2013). *Rehabilitación, optimización y ampliación de sistemas de riego existentes en la provincia de Chimborazo.*
- Ibáñez, W. (2012). *Manual de costos y presupuestos de obras hidráulicas y de saneamiento* (Primera, Vol. 1). MACRO.
- Krochin, S. (1986). *Diseño hidráulico* (3 Ed.).
- López, R. (2000). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados.*
- Mansen, A. (2010). *Diseño de bocatomas.*

Montoya Restrepo, N., Ríos-Gallego, S. Y., & Hincapié-Pérez, J. G. (2019). Planificación de áreas de influencia de embalses. Propuesta desde la Capacidad de Acogida. *Bitácora*

Urbano Territorial, 29(2), 99–108. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v29n2.72178>

Rodríguez J, & Proaño V. (2012). *Diseño de captación convencional*.

Sotelo G. (1994). *Hidráulica general - fundamentos* (Vol. 1).

Weber, M. D., & Pasternack, G. B. (2017). Valley-scale morphology drives differences in fluvial sediment budgets and incision rates during contrasting flow regimes. *Geomorphology*, 288, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.03.018>

XI. ANEXOS

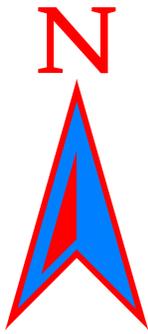
11.1. Cronograma de actividades

Tabla 13

Cronograma de actividades del trabajo de titulación

Tiempo	Actividad	Mes 1				Mes 2				Mes 3				Horas
		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	
Evaluar el estado actual que presenta la captación para identificar los problemas existentes.	Identificar la zona de estudio	x												6
	Analizar información y estudios del proyecto	x	x											24
	Redactar el documento	x	x	x	x									32
	Revisión tutor				x									3
Establecer los parámetros iniciales y realizar el cálculo hidráulico para determinar la capacidad y velocidad del flujo requerida en la captación a través de la rejilla	Plantear parámetros iniciales para los cálculos				x	x	x							12
	Investigar sobre la rejilla COANDA				x	x	x							24
	Cálculos hidráulicos de la rejilla fondo y sus elementos					x	x	x						45
	Diseñar la rejilla de fondo y elaborar planos respectivos					x	x	x	x					30
	Revisión Tutor								x					3
Estimar un presupuesto referencial de acuerdo al requerimiento del diseño.	Investigar información sobre costo y mantenimientos del uso de la rejilla								x	x	x			20
	Elaborar presupuesto para llevar a cabo el proyecto							x	x	x				18
	Redacción del documento					x	x	x	x	x	x			20
	Revisión y correcciones con el tutor del informe de investigación											x	x	3
Informe final														240

Fuente: Elaboración propia



759250 E

759300 E

9717800 N

RIO MAZAR

Muro Protección de Crecidas

2480

2484.13

2490

2485

Cuneta Tipo 1

Muro Protección de Crecidas

2490

2485

2484.13

Perfil tipo Creager

Rejilla

Escalera de Peces

Umbral

2477.00

Enrocado

Rejilla

Stop Lock Compuertas

Compuertas

Gradas de Acceso

Relleno

Pie de relleno

2477.00

2481.90

2482.1

2484.13

2484.13

2481.88

2481.44

2484.13

2480.00

2480.13

2478.33

2480.13

2480.13

2480.13

2480.13

Condu

Vía de Acceso

Vertedero a conducción

2480.00

Compuerta de limpieza

DESRIPIADOR

Drenajes

2476.12

2480.24

2476.20

2480.24

2476.09

2480.24

2481.55

2481.30

2481.30

2481.30

2481.30

2481.30

2481.30

2481.30

UNIVERSIDAD "POLITÉCNICA SALESIANA"

PROYECTO: DISEÑO REJILLA DE FONDO SECTO RIO MAZAR AZOGUES - CAÑAR

CONTENIDO: IMPLANTACIÓN DEL DISEÑO EN PLANTA

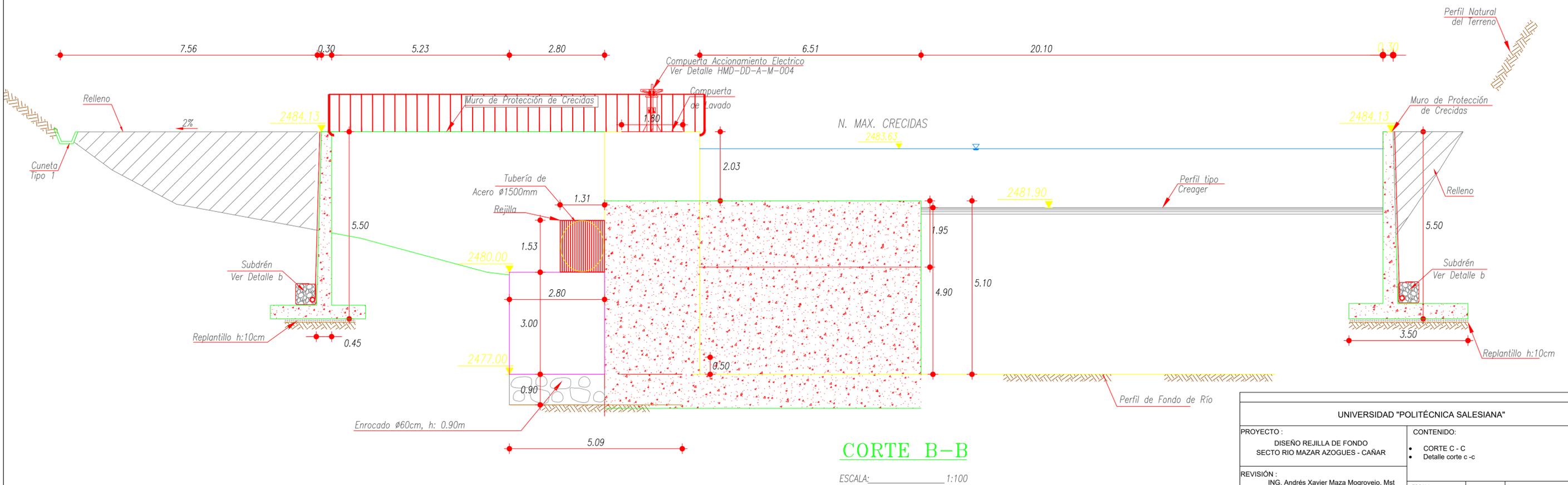
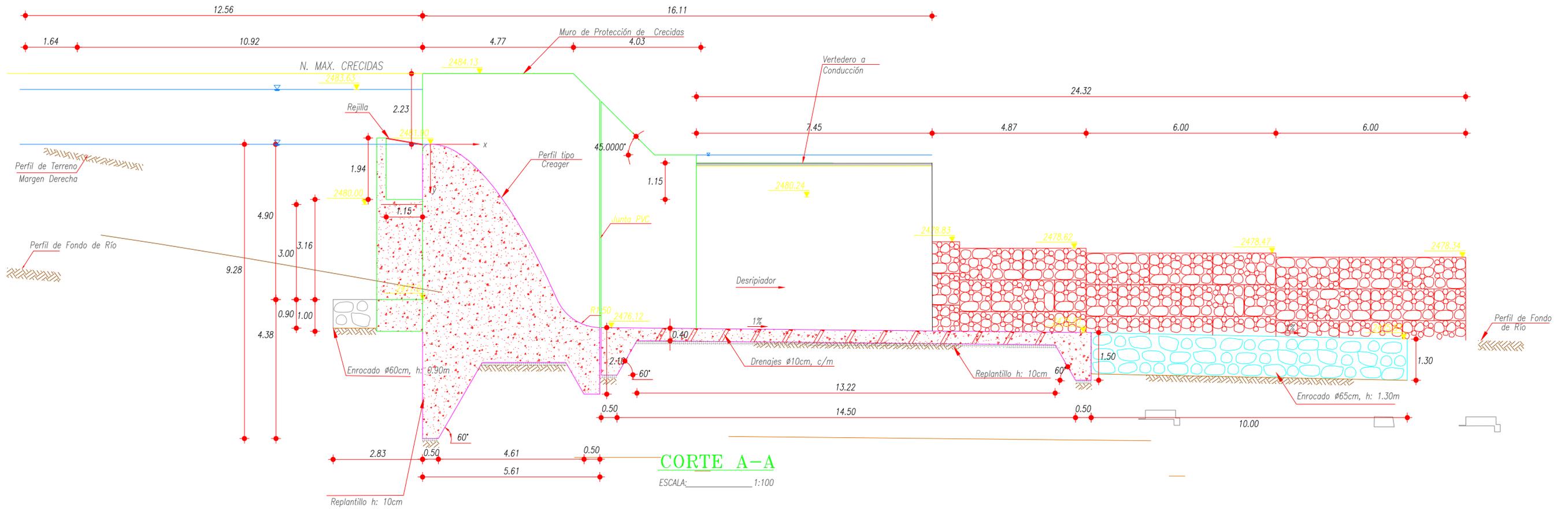
REVISIÓN: ING. Andrés Xavier Maza Mogrovejo, Mst

ESCALA: HOJA:

DISEÑO: Jeimy Alejandra Ali Guzman Gabriela Alexandra Morochó Yari

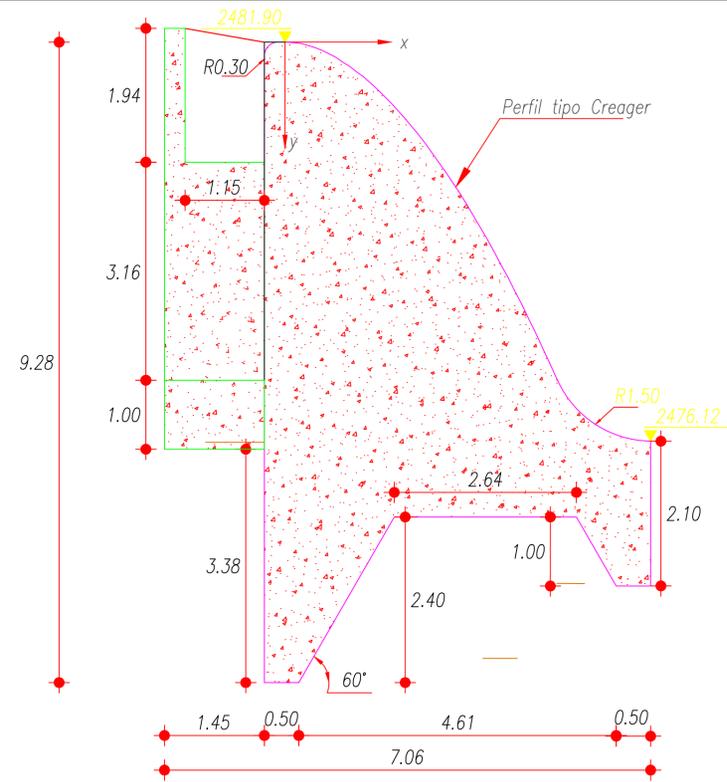
FECHA: 1/5





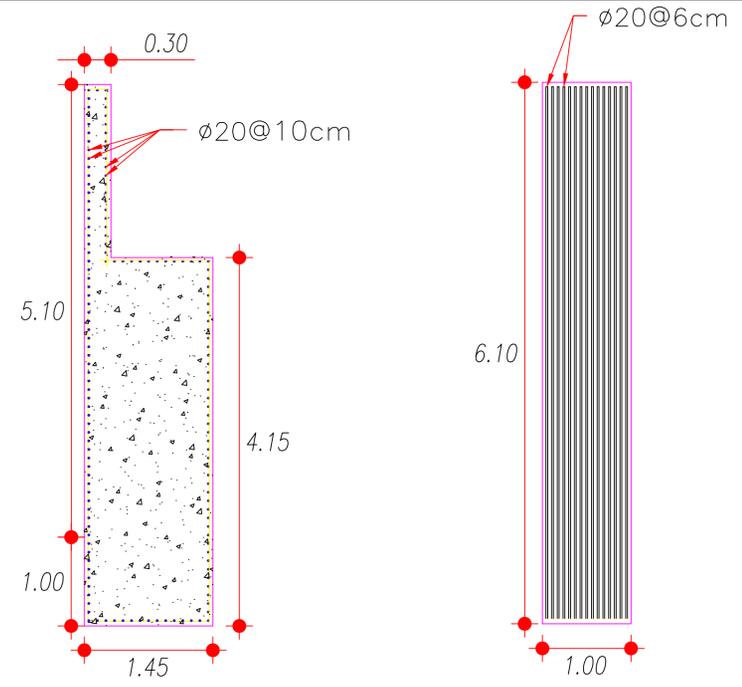
UNIVERSIDAD "POLITÉCNICA SALESIANA"			
PROYECTO : DISEÑO REJILLA DE FONDO SECTO RIO MAZAR AZOGUES - CAÑAR		CONTENIDO: • CORTE C - C • Detalle corte c - c	
REVISIÓN : ING. Andrés Xavier Maza Mogrovejo, Mst		ESCALA :	HOJA :
DISEÑO : Jeimy Alejandra Ali Guzman Gabriela Alexandra Morochó Yari		FECHA :	2/5





DETALLE 1
AZUD

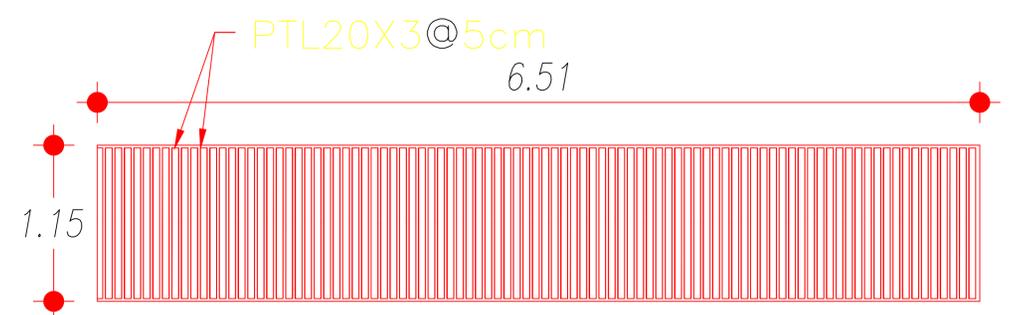
ESCALA: 1:100



Armado realizado para 1m de concreto

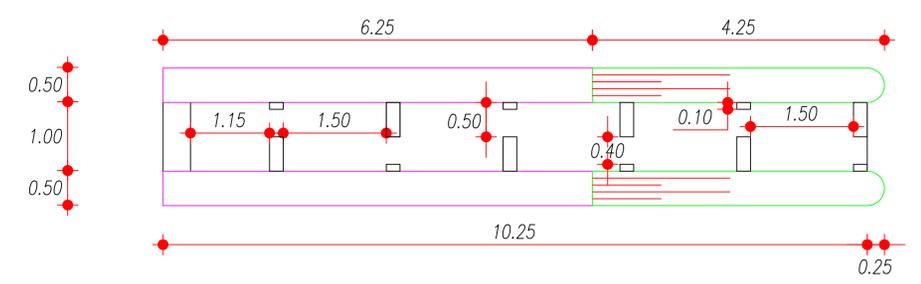
DETALLE 3 MURO
ESTRUCTURAL

ESCALA: 1:100



DETALLE 2
REJILLA

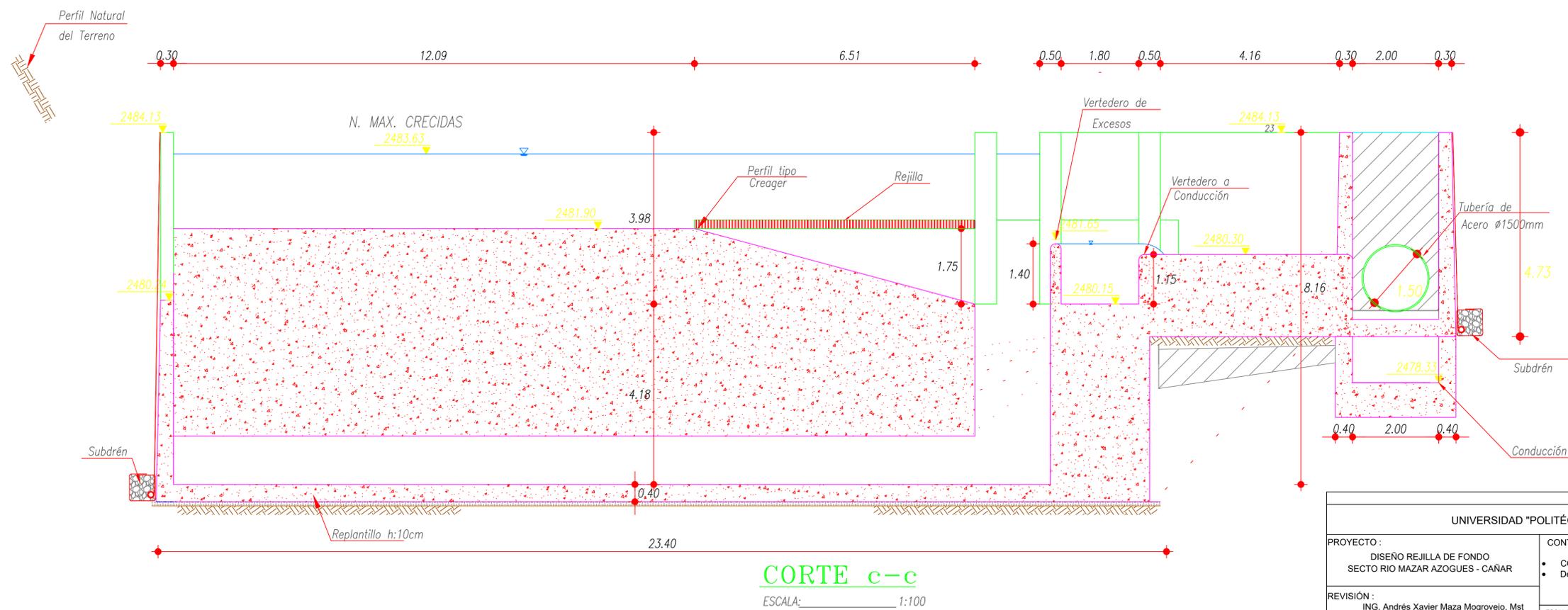
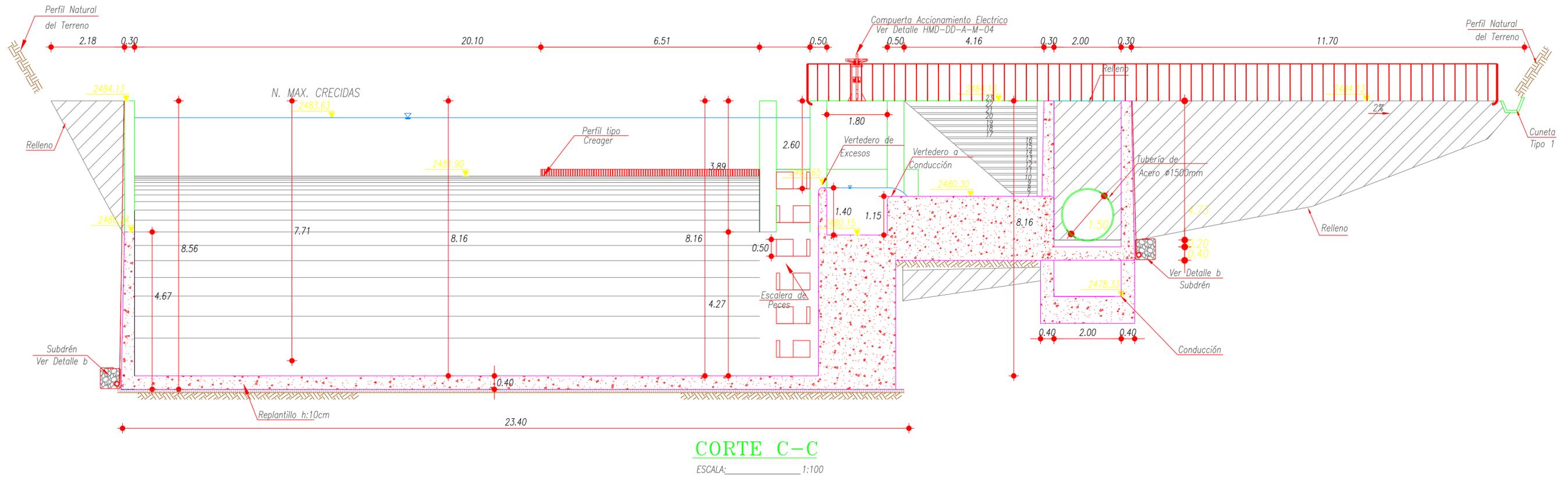
ESCALA: 1:100



DETALLE 4
DETALLE ESCALERA DE PECES

ESCALA: 1:100

UNIVERSIDAD "POLITÉCNICA SALESIANA"			
PROYECTO: DISEÑO REJILLA DE FONDO SECTO RIO MAZAR AZOGUES - CAÑAR	CONTENIDO: • Detalle de azud, muro, rejilla y escalera de peces	ESCALA:	HOJA:
REVISIÓN: ING. Andrés Xavier Maza Mogrovejo, Mst		FECHA:	3/5
DISEÑO: Jeimy Alejandra Ali Guzman Gabriela Alexandra Morochó Yari			



UNIVERSIDAD "POLITÉCNICA SALESIANA"			
PROYECTO: DISEÑO REJILLA DE FONDO SECTO RIO MAZAR AZOGUES - CAÑAR	CONTENIDO: • CORTE C - C • Detalle corte c - c	ESCALA: HOJA:	
REVISIÓN: ING. Andrés Xavier Maza Mogrojevo, Mst	FECHA:	4/5	
DISEÑO: Jeimy Alejandra Ali Guzman Gabriela Alexandra Morocho Yari			

