

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“MODELAMIENTO HIDRÁULICO EN IBER 2D DE UNA CAPTACIÓN
FLUVIAL PARA MONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUA DEL RÍO
RÍMAC”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL
PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÍCOLA**

PAÚL MARTIN CASTRO QUISPE

LIMA – PERÚ

2023

TSP MARTIN CASTRO

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%

INDICE DE SIMILITUD

18%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

8%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1 **kupdf.net** Fuente de Internet 2%

2 **portal.camins.upc.edu** Fuente de Internet 1%

3 **tesis.usat.edu.pe** Fuente de Internet 1%

4 **sistemamid.com.ar** Fuente de Internet 1%

5 **colposdigital.colpos.mx:8080** Fuente de Internet 1%

6 **core.ac.uk** Fuente de Internet 1%

7 **civilgeeks.com** Fuente de Internet 1%

8 **Submitted to Universidad Nacional de Trujillo** Trabajo del estudiante 1%

9 **repositorio.udh.edu.pe** Fuente de Internet 1%

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

**“MODELAMIENTO HIDRÁULICO EN IBER 2D DE UNA
CAPTACIÓN FLUVIAL PARA MONITOREO DE LA CALIDAD DE
AGUA DEL RÍO RÍMAC”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

Presentado por:

BACH. PAÚL MARTIN CASTRO QUISPE

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. EUSEBIO MERCEDES INGOL BLANCO
Presidente

Mg. Sc. TERESA OLINDA VELÁSQUEZ BEJARANO
Asesor

Mestre. JORGE LUIS DÍAZ RIMARACHIN
Miembro

Maest. JOSELITO JERSIN ROBLES SILVESTRE
Miembro

LIMA – PERÚ
2023

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PROBLEMÁTICA	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. HIDROLOGÍA.....	3
2.1.1. Cuenca hidrográfica.....	3
2.1.2. Ciclo hidrológico	4
2.1.3. Sistema hidrológico	5
2.2. HIDRÁULICA FLUVIAL.....	7
2.2.1. Morfología fluvial.....	8
2.2.2. Clasificación morfológica de ríos	8
2.2.3. Sinuosidad de ríos.....	9
2.2.4. Rugosidad	10
2.3. Sistemas de captación.....	12
2.3.1. Captaciones por gravedad o bombeo	13
2.3.2. Captaciones a diferentes niveles	14
2.3.3. Captaciones en estaciones de bombeo fijas con toma directa	15
2.3.4. Captaciones para escurrimientos con pequeños tirantes.....	16
2.4. MODELO NUMÉRICO.....	16
2.4.1. Dimensionalidad	17
2.4.2. Régimen de flujo.....	18
2.4.3. Mallas de cálculo	19
2.4.4. Método de Calculo.....	19
2.5. MODELO HIDRÁULICO IBER.....	20
2.5.1. Estructura de cálculo.....	21
2.5.2. Ecuaciones hidrodinámicas	21
2.5.3. Condiciones de contorno hidrodinámico	22

2.5.4.	Malla de cálculo con IBER.....	25
2.5.5.	Flujo de procesamiento de información	26
III.	DESARROLLO DEL TRABAJO	27
3.1.	DESCRIPCIÓN DE PROYECTO	27
3.1.1.	Ubicación.....	27
3.1.2.	Inspección de campo.....	28
3.1.3.	Características topográficas	29
3.1.4.	Rugosidad del cauce	32
3.1.5.	Estructura de Captación.....	33
3.2.	ESTUDIO HIDROLÓGICO	34
3.2.1.	Caudal medio mensual.....	35
3.2.2.	Caudal de diseño.....	36
3.3.	MODELO HIDRÁULICO	38
3.3.1.	Calibración.....	38
3.3.2.	Geometría del modelo.....	39
3.3.3.	Coefficiente de rugosidad Manning	40
3.3.4.	Importación de la geometría	41
3.3.5.	Asignación de condición de contorno.....	42
3.3.6.	Creación de malla	43
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
4.1.	ESTRUCTURA DE CAPTACIÓN.....	46
4.1.1.	Homogeneidad de la mezcla.....	46
4.1.2.	Permanencia de bombeo	48
4.1.3.	Nivel variable de impulsión.....	49
4.2.	CAUDAL DE DISEÑO	52
4.3.	MODELAMIENTO HIDRÁULICO	52
4.3.1.	Régimen de flujo.....	53
4.3.2.	Calibración del modelo.....	53
4.3.3.	Resultados.....	54
V.	CONCLUSIONES	60
5.1.	ESTRUCTURA DE CAPTACIÓN.....	60
5.2.	ESTUDIO HIDROLÓGICO	61
5.3.	MODELAMIENTO HIDRÁULICO	61
VI.	RECOMENDACIONES	62

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
VIII. ANEXOS	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Índice de sinuosidad	9
Tabla 2: Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad n, según el Soil Conservation Service	11
Tabla 3: Condiciones de contorno abierto	25
Tabla 4: Ubicación geográfica de zona de estudio	27
Tabla 5: Valores de rugosidad método de Cowan - SCS	33
Tabla 6: Coeficiente de rugosidad por tipo de cobertura de suelo	33
Tabla 7: Caudales medios mensuales (m ³ /s) del río Rímac - Estación Chosica.....	35
Tabla 8: Riesgo para diferentes periodos de retorno	36
Tabla 9: Caudales máximos extraordinarios - Escenario Base.....	37
Tabla 10: Caudales máximos extraordinarios - Escenario cambio climático.....	37
Tabla 11: Progresiva de Pantallas.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Cuenca hidrográfica	4
Figura 2: Ciclo hidrológico.....	5
Figura 3: Diagrama de Bloques del Sistema Hidrológico Global	6
Figura 4: Esquema de un sistema hidrológico simplificado.....	7
Figura 5: La cuenca como un sistema hidrológico simplificado	7
Figura 6: Morfología de ríos.....	9
Figura 7: Estimación de rugosidad según referencia de rios del paper 1849 del U.S.G.S.S.....	12
Figura 8: Sistema de captación directa por gravedad	13
Figura 9: Sistema de bombeo directo por bombeo	14
Figura 10: Sistema de captación a diferentes niveles	14
Figura 11: Sistema de captación de bombeo fijo con toma directa	15
Figura 12: Sistema de captación para escurrimiento con pequeños tirantes	16
Figura 13: Ejemplo de malla no estructurada en IBER	25
Figura 14: Ubicación satelital de zona de estudio	27
Figura 15: Inspección de campo.....	28
Figura 16: Levantamiento Topográfico con Dron Phantom.....	30
Figura 17: Geología local de zona de estudio.....	31
Figura 18: Perfiles estratigráficos.....	32
Figura 19: Calibración del modelo hidráulico - Huella hídrica.....	39
Figura 20: Calibración del modelo hidráulico – modelamiento hidráulico.....	39
Figura 21: Geometría del Modelo con Proyecto	40
Figura 22: Rugosidad según cobertura de suelo.....	41
Figura 23: Importación de geometría del modelo	42
Figura 24: Condiciones de contorno del modelo.....	43
Figura 25: Creación de malla.....	43
Figura 26: Modelo digital del terreno.....	44
Figura 27: Superficie de terreno para modelamiento	45
Figura 28: Ubicación de Pantallas estabilizadoras de rasante	46
Figura 29: Sección de pantallas estabilizadoras de rasante	47
Figura 30: Dique de encauzamiento	47

Figura 31: Transición de ingreso y salida.....	48
Figura 32: Plataforma central y laterales	49
Figura 33: Ubicación de casetas de bombeo	50
Figura 34: Sistema de captación a diferentes alturas.....	51
Figura 35: Mapa de velocidades máximas	55
Figura 36: Perfil hidráulico de pantallas.....	56
Figura 37: Perfil hidráulico en estructura central	56
Figura 38: Sección hidráulica en captación	57
Figura 39: Tirante hidráulico.....	57
Figura 40: Número de Froude	59
Figura 41: Cobertura de suelo existente en cauce río Rímac	74
Figura 42: Vista del río Rímac - Estructuras de ingreso.....	74
Figura 43: Vista río Rímac - Estructura Central.....	75
Figura 44: Vista río Rímac - Estructura de Salida.....	75

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: TABLA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES RÍO RÍMAC	65
ANEXO 2: PLANOS DE DISEÑO DE PANTALLA, DIQUE, ESTRUCTURA CENTRAL, SISTEMA DE CAPTACIÓN	66
ANEXO 3: MAPA DE MODELO HIDRÁULICO VELOCIDAD, TIRANTE Y FROUDE	70
ANEXO 4: PANEL FOTOGRÁFICO	74

RESUMEN

La investigación se centra en el desarrollo de criterios hidráulicos para un modelamiento computarizado bidimensional en el software IBER, de una estructura de captación fluvial diseñada para impulsar muestras de agua que permitan la medición de la calidad del agua del río Rímac. La información necesaria para el desarrollo del trabajo fue tomada del proyecto “Creación de Estación de Alerta río Rímac”, elaborado por el Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL). Para la investigación se involucró la evaluación de tres estudios básicos del proyecto: hidrología, geología y topografía. En el estudio hidrológico, se realizó la revisión de máximas avenidas que incluye criterios de cambio climático, para obtener los caudales de diseño. Para la selección del caudal de simulación, se usó los criterios establecidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), para la evaluación de modelos hidráulicos en áreas urbanas, considerando un período de retorno de 100 años. El estudio geológico se centró en la revisión de las características geológicas locales de la zona de estudio, proporcionando información de cobertura de suelo, riesgo geológico, contaminantes naturales, ente otros. Esta información es necesaria para un adecuado análisis de la simulación hidráulica. De manera paralela, el estudio topográfico proporcionó datos sobre la topografía del terreno, incluyendo sus características particulares que fueron verificadas en el campo. Estos datos sirvieron como base matemática sólida para el inicio de la simulación hidráulica del río. También se realizó el análisis de la estructura de captación, centrándose en la identificación y cumplimiento de las condiciones de homogenización de la mezcla, permanencia de bombeo y captación a diferentes niveles. Mediante la simulación hidráulica, se evaluó el comportamiento de la estructura de captación fluvial en condiciones extremas y se obtuvieron valores máximos de tirantes y velocidades. Los resultados obtenidos satisfacen el diseño hidráulico cumpliendo los parámetros de líneas homogéneas y rangos subcríticos del flujo, además de un nivel de agua superior a la sumergencia de bombeo.

Palabras clave: Modelamiento Hidráulico, Captación, Iber, calidad de agua.

ABSTRACT

The research focuses on the development of hydraulic criteria for a two-dimensional computerized modeling using the IBER software for a river intake structure designed to collect water samples for the measurement of the water quality of the Rímac River. The necessary information for the project was obtained from the "Creation of the Rímac River Alert Station" project, developed by the Lima Water and Sewer Service (SEDAPAL). The research involved the evaluation of three fundamental studies of the project: hydrology, geology, and topography. In the hydrological study, a review of maximum flood events, including climate change criteria, was conducted to determine the design flow rates. The criteria established by the National Water Authority (ANA) for assessing hydraulic models in urban areas, with a 100-year return period, were used to select the simulation flow rate. The geological study focused on reviewing the local geological characteristics of the study area, providing information on soil cover, geological risk, natural contaminants, among other factors. This information was necessary for a proper analysis of hydraulic simulation. Simultaneously, the topographic study provided data on the terrain's topography, including specific characteristics that were verified in the field. These data served as a solid mathematical foundation for initiating the hydraulic simulation of the river. An analysis of the intake structure was also performed, with a focus on identifying and meeting the conditions for mixing homogenization, pump continuity, and intake at different levels. Through hydraulic simulation, the behavior of the river intake structure under extreme conditions was assessed, and maximum water levels and velocities were obtained. The results obtained meet the hydraulic design requirements, including parameters for uniform flow and subcritical flow ranges, as well as maintaining a water level above the pump submergence level.

Keywords: Hydraulic Modeling, Intake, Iber, Water Quality.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. PROBLEMÁTICA

La cuenca del río Rímac es una de las más importantes del país ya que abastece de agua para el consumo humano, agrícola y energético a la Ciudad Capital, que alberga más del 30% de la población peruana, según datos del Censo Nacional del 2017 (INEI, 2017). Sin embargo, se enfrenta a desafíos significativos en términos de cantidad y calidad del líquido elemento, debido al crecimiento poblacional y las actividades humanas.

El suministro de agua potable en Lima y Callao se ha convertido en uno de los principales temas de interés del Estado; por ello, el gobierno ha invertido en diferentes proyectos de regulación hídrica y trasvase en la cuenca alta del Rímac. No obstante, los efectos de estos proyectos combinados al cambio climático generan una variabilidad hidrométrica muchas veces incierta, resultando en graves problemas de inundaciones y desbordes del cauce. Además, las actividades industriales, minero-metalúrgicas y agroindustrial, en adición a los desagües de origen doméstico, vierten sus aguas residuales al río deteriorando gravemente la calidad de este recurso hídrico.

Estas condiciones subrayan la necesidad de contar con un sistema de medición de la cantidad y la calidad de agua en sus diferentes periodos hidrológicos, favoreciendo la gestión del agua superficial y su potabilización para abastecer a Lima.

El presente trabajo de investigación analiza los estudios básicos y conceptos generales de este proyecto y desarrolla un modelo hidráulico computarizado bidimensional de sus obras hidráulicas, centrándose en la estructura de captación fluvial. La información necesaria para la ejecución del trabajo de investigación se obtuvo del Expediente Técnico del Proyecto “Creación de Estación de Alerta del río Rímac” viabilizado el 2019, elaborado por la empresa consultora HC & Asociados S.R.L bajo contrato con el Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima – SEDAPAL.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Realizar el modelamiento hidráulico computarizado aplicando el software IBER 2D de una estructura de captación fluvial.

1.2.2. Objetivos específicos

- Evaluar la ubicación y las estructuras complementarias del sistema de captación fluvial; además, seleccionar la información topográfica y geotécnica disponible en el Expediente Técnico “Creación de Estación de Alerta del Río Rímac”.
- Evaluar y determinar los caudales de diseño para el modelamiento hidráulico, disponible en el Estudio Hidrológico del Expediente Técnico “Creación de Estación de Alerta del Río Rímac.
- Realizar la simulación hidráulica computarizada en el software IBER 2D de las estructuras hidráulicas del proyecto “Creación de Estación de Alerta del río Rímac” centrándose en el funcionamiento de la captación fluvial con fines de monitoreo de la calidad del agua del río Rímac.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. HIDROLOGÍA

Para la OMM (2011), la hidrología es una ciencia que estudia la presencia y distribución del agua en la tierra en el tiempo, tanto en la superficie como debajo de ella, con énfasis en las propiedades químicas, biológicas y físicas y su relación con el ambiente. También constituye la base para evaluar y gestionar los recursos hídricos de eventos ocasionados por inundaciones, sequías, erosión, sedimentación, y contaminación de la calidad del agua.

2.1.1. Cuenca hidrográfica

Una cuenca es el espacio sobre el cual drenan las aguas hacia un único lugar o punto de descarga, pudiendo ser hidrográfica en caso de aguas superficiales provenientes de precipitaciones, deshielos, etc., o hidrológica para aguas superficiales y subterráneas como los acuíferos. Estas también se diferencian por el espacio drenado; en caso de la primera, la divisoria de aguas está definido por la geografía natural del terreno, mientras que la segunda lo define el manto rocoso o estrato impermeable (Knapp et al., 1997, citado en Mejía, 2006)

Según la Autoridad Nacional del Agua, “una cuenca hidrográfica es un territorio drenado por un único sistema de drenaje natural; es decir, que drena sus aguas al mar a través de un único río, o que vierte sus aguas a un único lago endorreico. Una cuenca hidrográfica es delimitada por la línea de las cumbres, también llamada divisoria de aguas”.

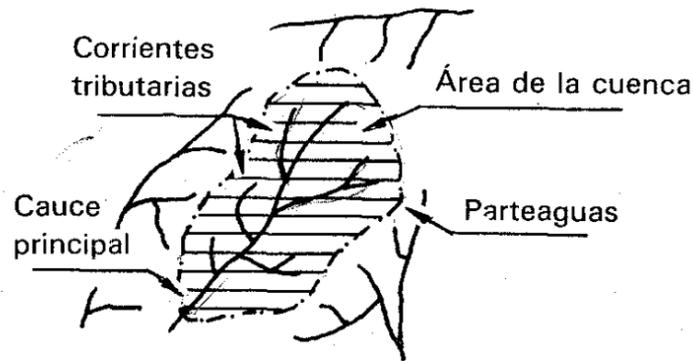


Figura 1: Cuenca hidrográfica

FUENTE: Aparicio (1992)

2.1.2. Ciclo hidrológico

Según Mejía (2006), el ciclo hidrológico es la continua y natural circulación de las moléculas de agua en cualquiera de sus formas físicas, sin que su cantidad se vea modificada. Al igual que un ciclo en constante movimiento, no posee un inicio o fin definido y su descripción puede comenzar en cualquier punto del proceso.

Para tomar una referencia, podemos mencionar que el ciclo inicia con la presencia de agua en la superficie o en su proximidad, la cual experimenta evaporación inducida por la radiación solar y el viento. Este vapor asciende y es transportado hacia la atmósfera, donde se acumula en forma de nubes hasta que se condensa y regresa a la superficie en forma de precipitación. En el trayecto, la precipitación puede evaporarse nuevamente o ser interceptada por la superficie, fluyendo sobre esta o infiltrándose. La primera recibe el nombre de escurrimiento y vierte a las grandes masas de agua como ríos, lagos, lagunas y océanos. La segunda sigue un camino más largo, ya que un porcentaje de ella es absorbido por la vegetación, para luego ser transpirada y regresada a la atmósfera; y el otro porcentaje fluye bajo la superficie (flujo subsuperficial) o se desplaza hacia capas más profundas del suelo (percolación) formando parte del agua subterránea que converge en cuerpos de agua o aflora en manantiales o ríos (Chow *et al.*, 1994).

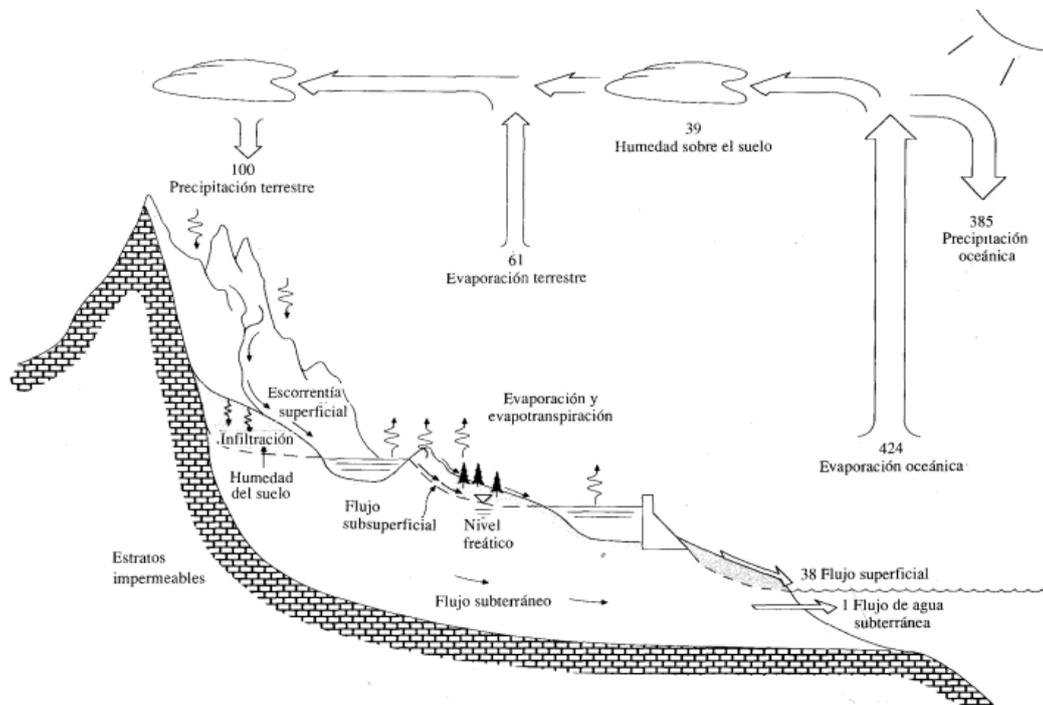


Figura 2: Ciclo hidrológico

FUENTE: Chow *et al.* (1994)

2.1.3. Sistema hidrológico

De acuerdo con Chow (1994), los fenómenos hidrológicos presentan gran complejidad, por lo que difícilmente se logra entenderlos en su totalidad; por ello, se pueden usar representaciones simplificadas basadas en el concepto de sistema, el cual puede ser definido como un conjunto de elementos interconectadas conformando un todo. En caso del ciclo hidrológico, sus componentes serían la precipitación, evaporación, escorrentía y otros del ciclo; los que pueden ser agrupados en subsistemas para un análisis global, siendo evaluados por separado y mezclados de acuerdo con su interacción.

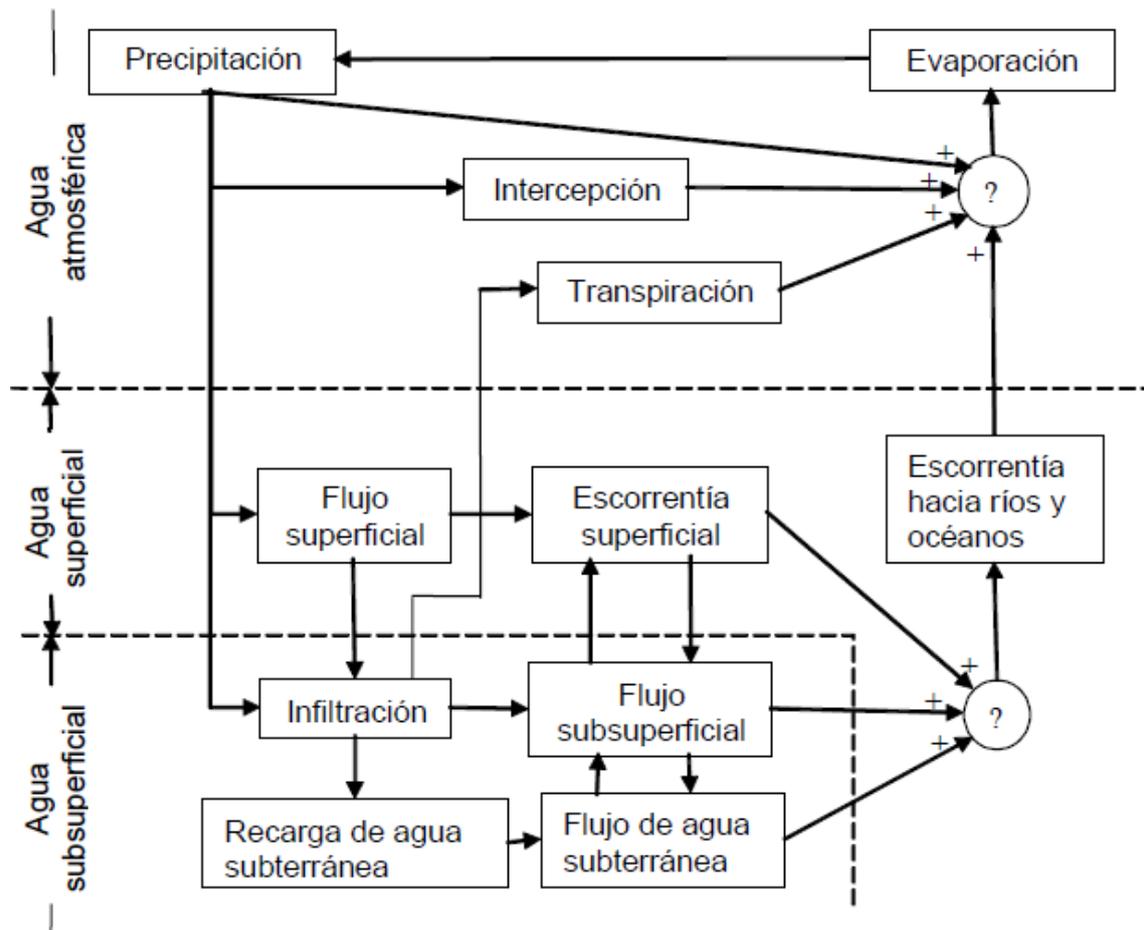


Figura 3: Diagrama de Bloques del Sistema Hidrológico Global

Nota. El ciclo hidrológico global está representado como un sistema dividido por líneas punteadas que se agrupan en tres subsistemas. El primero es el sistema de agua atmosférica, que abarca procesos de precipitación, evaporación, intercepción y transpiración; el segundo es el sistema de agua superficial, que engloba los procesos de flujo y escorrentía superficial, nacimientos de agua subsuperficial y subterránea; y por último, el sistema de agua subsuperficial, que incluye los procesos de infiltración, recarga de acuífero, flujo subsuperficial y subterráneo (Chow *et al.*, 1994).

En la mayoría de las situaciones prácticas solo se evalúan algunos de los procesos del ciclo hidrológico, considerando intervalos de tiempo definido y una pequeña superficie de evaluación. Por ello, es apropiado usar un concepto de sistema más limitado que el sistema hidrológico global, el cual parte del concepto de volumen de control, que otorga una estructura para aplicar leyes de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía.

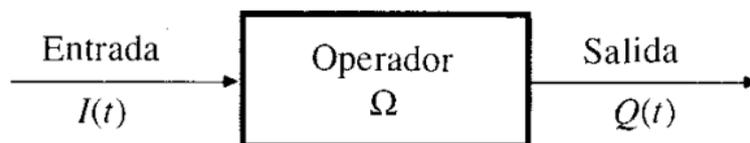


Figura 4: Esquema de un sistema hidrológico simplificado

Nota. Representación esquemática de una estructura o volumen en el espacio, rodeada por una frontera que acepta agua y otras entradas, opera internamente en ellas y las produce como salidas (Mejía Marcacuzco, 2006)

Debido a que los sistemas hidrológicos son de gran dimensión y complejidad, las leyes físicas que se aplican para resolverlos producen mayor rango de error en la aproximación de los resultados, comparado a otras ciencias como Mecánica de Fluidos. Además, la mayoría de los sistemas hidrológicos son de naturaleza aleatoria, ya que su principal entrada es la precipitación, fenómeno natural altamente variable e impredecible; por lo anterior, el análisis estadístico cumple un importante papel en el análisis hidrológico.

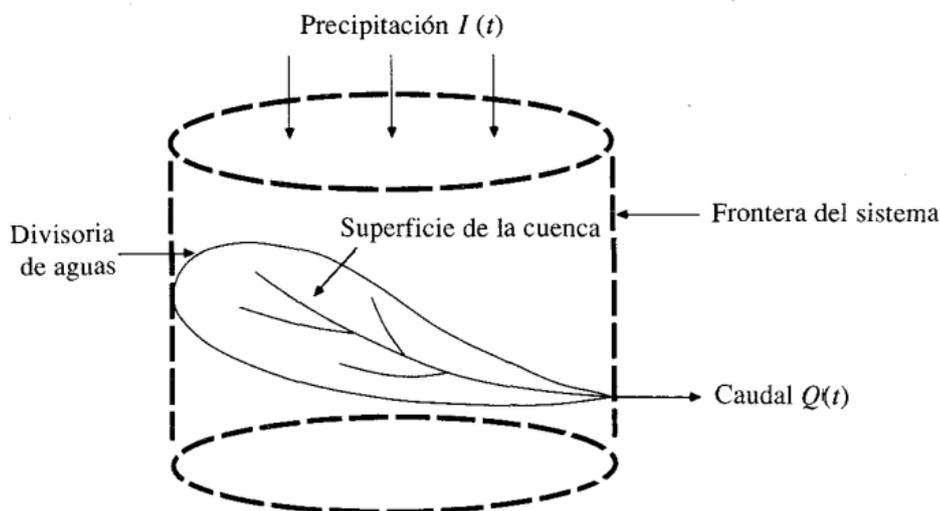


Figura 5: La cuenca como un sistema hidrológico simplificado

Nota. La entrada del sistema $I(t)$ es la precipitación, la cual se distribuye sobre la frontera del sistema y opera internamente mediante un proceso de precipitación-escorrentía produciendo la salida del sistema $Q(t)$ que representa al caudal de la cuenca (Chow *et al.*, 1994).

2.2. HIDRÁULICA FLUVIAL

Es una rama de la hidráulica que se dedica al análisis y comprensión del comportamiento del agua y los sedimentos en ríos y otras fuentes hídricas, se enfoca en el análisis de la geomorfología y la dinámica fluvial, así como en los procesos que ocurren en las cuencas

hidrográficas cuando se concentran y distribuyen los flujos de escorrentía y la carga de sedimentos. La hidráulica fluvial permite predecir como un río responderá y evolucionará en respuesta a cualquier intervención humana. Este análisis abarca aspectos que van desde las alteraciones en el cauce principal y las zonas adyacentes hasta las llanuras de inundación y las franjas ribereñas. (Rocha Felices, 1998)

2.2.1. Morfología fluvial

La morfología fluvial o fluviomorfología, es el estudio de las diversas formas que caracterizan a los ríos y quebradas. Este campo implica la investigación de los cambios que experimenta el cuerpo de agua en su recorrido longitudinal y en su sección transversal (Rocha Felices, 1998).

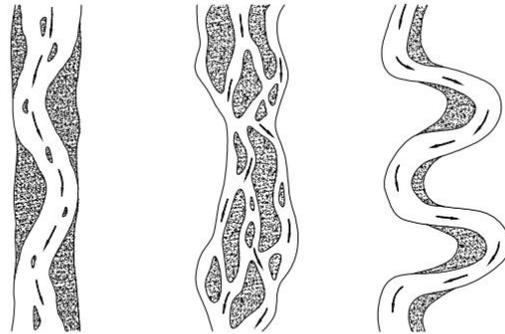
La fluviomorfología no se limita únicamente al análisis de las formas presentes en un río o quebrada, sino que se centra principalmente en explicar cómo ha adquirido su configuración actual. Además, tiene la capacidad de predecir el comportamiento futuro de estos cursos de agua.

2.2.2. Clasificación morfológica de ríos

Morfológicamente hablando, los ríos se pueden clasificar en tres grupos: rectos, entrelazados y meándricos (Huggett, 2007).

- a. Ríos rectos, son poco comunes naturalmente; por lo general, son creados por el encauzamiento de diques paralelos. Estas estructuras hacen que el cauce parezca recto en épocas de máximos caudales, ya que el flujo ocupa toda la sección transversal del río; sin embargo, en épocas de estiaje el río tiende a trazar su propia sinuosidad, lo cual puede ser perjudicial ya que el flujo podría impactar frontalmente a los diques.
- b. Ríos Entrelazados, por lo general se da en cauces anchos y de pendiente pronunciada. Estas condiciones producen flujos con grandes velocidades y tirantes pequeños, lo que deriva en la formación de varios canales entrelazados que forman islotes.
- c. Ríos Meándricos, asociados a cauces anchos y de baja pendiente con alta carga

sedimentaria. Estas características propician la formación de una secuencia de curvas sinuosas dinámicas en el curso del río.



RÍO RECTO RÍO ENTRELAZADO RÍO A MEANDROS

Figura 6: Morfología de ríos

FUENTE: Rocha (1998)

2.2.3. Sinuosidad de ríos

La sinuosidad es un índice que clasifica morfológicamente a un río, pudiendo ser recto, sinuoso, meándrico o altamente meándrico. Para describir y medir la sinuosidad de un río, se utiliza una relación entre la longitud del talweg (el punto más bajo del lecho del río) y la longitud del valle que rodea al río. Esta relación se denomina Índice de Sinuosidad o, simplemente, sinuosidad.

El Talweg es una línea que conecta los puntos más profundos de cada sección transversal de un río. La palabra "Talweg" proviene del alemán y significa literalmente "camino del valle" (Tal significa valle y Weg significa camino). En inglés, a menudo se escribe como "thalweg". En español, el término equivalente al Talweg es "vaguada", aunque es poco utilizado en el Perú. El valor mínimo de la sinuosidad es 1, lo que corresponde a un río completamente recto. El valor máximo de la sinuosidad suele rondar alrededor de 4.

Tabla 1: Índice de sinuosidad

Índice de Sinuosidad	Clasificación
1.00 – 1.05	Recto
1.05 – 1.25	Sinuoso
1.25 – 2.00	Meándrico
> 2.00	Altamente Meándrico

FUENTE: Leopold *et al.* (1995)

2.2.4. Rugosidad

Uno de los parámetros básicos para el análisis de los estudios de hidráulica fluvial es la rugosidad, y su representación más usada es el coeficiente “n” de Manning.

Existen diversos métodos para determinar dicho coeficiente, siendo los más conocidos el Método del SCS, planteado por Cowan; y el Método según el Paper 1849 del U. S. Geological Survey Water Supply, titulado Roughness Characteristics of Natural Channels, elaborado por Harry H. Barnes.

a. Cálculo del coeficiente de Manning en el cauce por el método del SCS

Para estimar el coeficiente de rugosidad de Manning en el lecho del río, se ha elegido utilizar el método del SCS, propuesto por Cowan. Este método toma en cuenta varios factores que influyen en la rugosidad, como la vegetación, la irregularidad del canal, la alineación del canal, la sedimentación y la socavación, las obstrucciones, el tamaño y la forma del canal, el nivel y el caudal del agua, las variaciones estacionales, la presencia de materiales en suspensión y la carga de sedimentos en el fondo del canal. Todos estos factores se resumen en la siguiente expresión.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_5$$

Donde:

- n₀ : es un valor básico de n para un canal recto, uniforme y liso en los materiales naturales involucrados.
- n₁ : es un valor que debe agregarse al n₀ para corregir el efecto de las rugosidades superficiales.
- n₂ : es un valor para considerar las variaciones en forma y tamaño de la sección transversal del canal.
- n₃ : es un valor para considerar las obstrucciones.
- n₄ : es un valor para considerar las la vegetación y las condiciones de flujo.
- m₅ : es un factor de corrección de los efectos por meandros en el canal.

Tabla 2: Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad n , según el Soil Conservation Service

Condiciones del cauce o canal	Valor del Coeficiente
1. Características del canal:	n_0
a. En tierra.	0.020
b. Cortados en roca.	0.025
c. En grava fina	0.024
d. En grava gruesa.	0.028
2. Grado de irregularidad:	n_1
a. Fronteras lisas. Lo mejor que se obtiene para los materiales que se utilizan.	0
b. Irregularidades menores. Por ejemplo, canal bien dragado o excavado, o ligeramente socavado en las orillas, o canales de drenaje.	0.005
c. Irregularidades moderadas. Canal mal dragado o excavado. Ligera socavación en las márgenes.	0.010
d. Muy irregular. Salientes o entrantes continuas del mismo orden de magnitud que el tirante. Erosiones muy irregulares en las márgenes.	0.020
3. Variaciones de la sección transversal en forma y tamaño:	n_2
a. Graduales.	0
b. Secciones grandes y pequeñas alternadas ocasionalmente. Se alternan secciones amplias y estrechas por cambio de forma o del ancho de la plantilla, causando desviación ocasional desde el cauce principal a ambos lados.	0.005
c. Secciones grandes y pequeñas alternadas frecuentemente o bien cambios de forma que causan desviación ocasional desde el cauce principal a ambos lados.	0.010 a 0.015
4. Obstrucciones al área hidráulica debidas a grandes rocas troncos, depósitos de desperdicios o de rocas (conviene hacer mediciones directas en tramos representativos):	n_3
a. Sin obstrucción.	0
b. Menores.	0.010 a 0.015
c. Apreciables.	0.020 a 0.030
d. Severas.	0.040 a 0.060
5. Cantidad y tipo de vegetación (conviene hacer mediciones directas):	n_4
a. Poca densidad. Márgenes cubiertas de pasto o hierbas. Tirante 2 a 3 veces mayor que la altura de la vegetación.	0.005 a 0.100
b. Moderada. Matorral o pastos. El tirante de agua es de 2 a 3 veces mayor que la altura media de la vegetación. Troncos delgados sin hojas.	0.010 a 0.250
c. Densa. Igual a la anterior, pero con tirantes similares a la altura de la vegetación. Arbustos.	0.025 a 0.050
d. Muy densa. Los tirantes son del orden de la mitad de la altura de la vegetación.	0.05 a 0.1
6. Grado de sinuosidad. Se define como el cociente s de la distancia entre dos puntos siguiendo el eje del cauce y la distancia en la línea recta entre los mismos puntos. Puede ser:	m_5
a. Menor, si $s < 1.2$;	1.0
b. Apreciable, si $1.2 \leq s \leq 1.5$;	1.15
c. Severo, si $s \geq 1.5$.	1.3

FUENTE: Chow (1994)

Estimación del coeficiente de Manning según Paper 1849 de U.S. Geological Survey Water Supply

El libro Roughness Characteristics of Natural Channels, es una guía fotográfica y descriptiva de 50 ríos de Estados Unidos, con características diferentes tales como ancho del cauce, caudal, composición del cauce, pendiente, etc. que calcula la rugosidad para

cada uno y sirve de guía comparativa para estimar valores de rugosidad en otros cauces con características similares a las presentadas en dicho tratado.

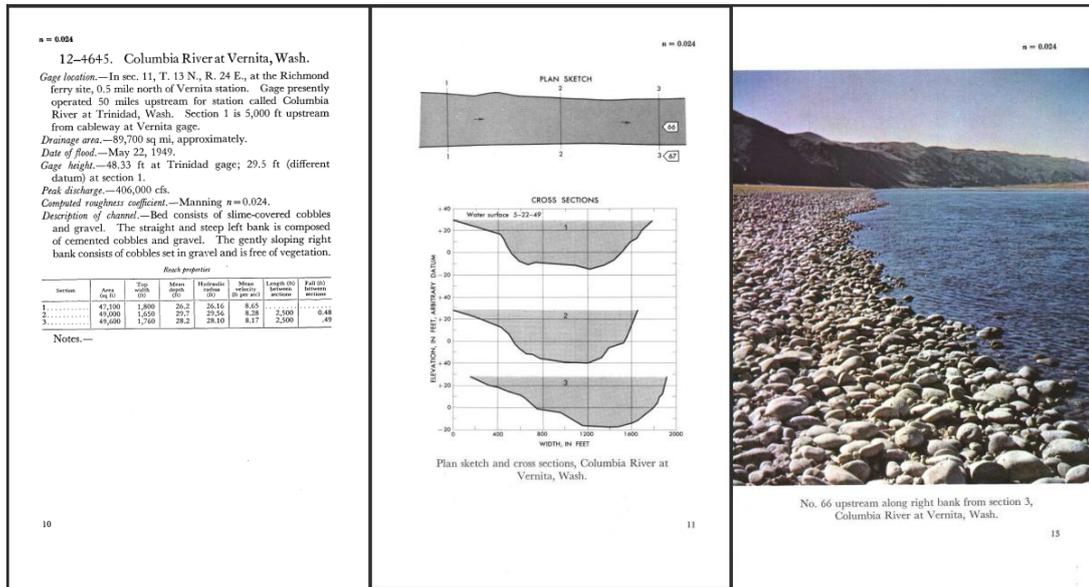


Figura 7: Estimación de rugosidad según referencia de ríos del paper 1849 del U.S.G.S.S

FUENTE: Chow (1994)

2.3. Sistemas de captación

Un sistema de captación en ríos es una instalación diseñada para dirigir, controlar y gestionar el flujo de agua en un río con el propósito de captar agua para diversos usos, como el riego agrícola, el abastecimiento de agua potable, la generación de energía hidroeléctrica u otros fines. Estas estructuras pueden incluir represas, presas derivadoras, diques y otras construcciones que modifican el flujo natural del agua en un río.

En general, una adecuada captación superficial deberá ser de fácil operación, contar con una ubicación que garantice cierta calidad mínima de agua y limite la entrada de materiales flotantes. El diseño de este tipo de estructuras depende, entre otros, de los siguientes factores:

- Tipo de captación, abastecimiento mediante sistema de bombeo o gravitacional,
- Dimensión de operación, control total de la corriente hídrica o una parte de ella,
- Magnitud de captación, volumen del caudal que se capta,
- Permanencia de operación, permanente o estacional de acuerdo al nivel de agua,

- Cantidad de sedimentos, volumen aceptable de captación de sedimentación.

De acuerdo a las características hidrológicas de la corriente, las estructuras de captación superficiales se agrupan en los siguientes tipos:

2.3.1. Captaciones por gravedad o bombeo

Un sistema típico de captación directa por gravedad se da cuando el agua de un río está relativamente libre de sedimentos. Este tipo de sistema implica dirigir la entrada del tubo de manera que no esté directamente alineada con la dirección de la corriente del río y, en muchas ocasiones, se protege con una malla metálica para evitar el paso de objetos flotantes.

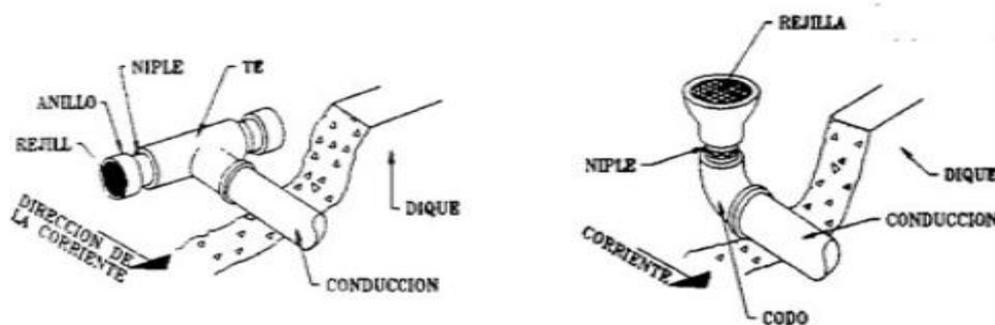


Figura 8: Sistema de captación directa por gravedad

FUENTE: CivilGeeks (2023)

Cuando la topografía no permite la captación por gravedad, la alternativa es recurrir a la captación mediante bombeo. Este método de captación ofrece la ventaja de poder ubicar la estación de bombeo en un lugar más adecuado para aspectos como la cimentación, el acceso y la protección. Sin embargo, su principal desventaja radica en que la altura de succión está limitada por el equipo de bombeo, y el desnivel máximo permitido entre la bomba y el nivel de bombeo es relativamente pequeño.

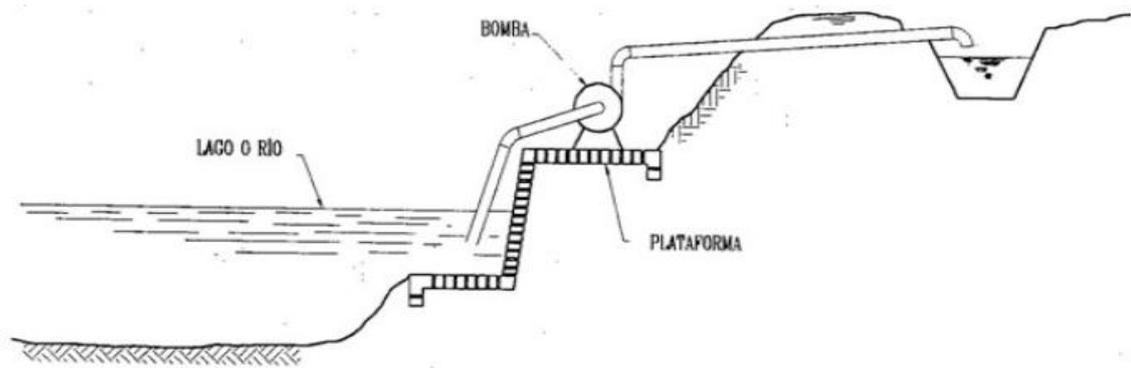


Figura 9: Sistema de bombeo directo por bombeo

FUENTE: CivilGeeks (2023)

2.3.2. Captaciones a diferentes niveles

Son las estructuras de captación, construidas para captar el agua a diferentes niveles, en las márgenes o en lo más profundo de un río, lago o embalse.

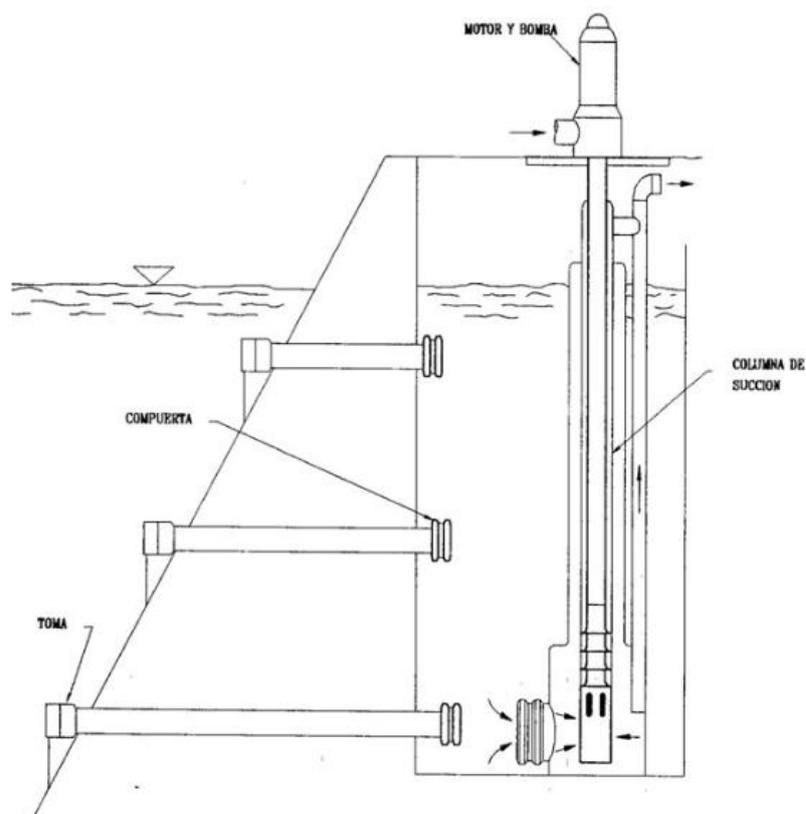


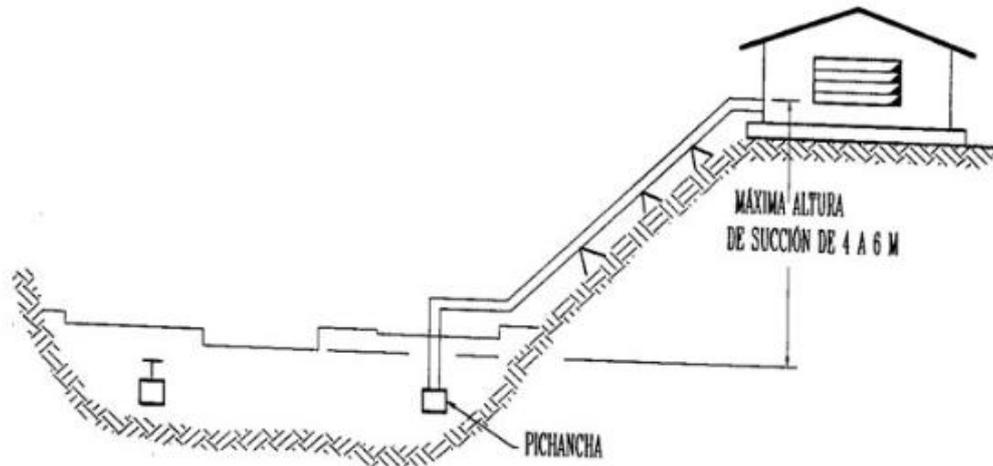
Figura 10: Sistema de captación a diferentes niveles

FUENTE: CivilGeeks (2023)

2.3.3. Captaciones en estaciones de bombeo fijas con toma directa

Son las construcciones diseñadas con un sistema fijo de bombeo directo sobre un río o cárcamo, ubicadas comúnmente en las márgenes de los ríos. Este tipo de obra incluye los sistemas de derivación hídrica, comúnmente conocidos como bocatomas.

a)



b)

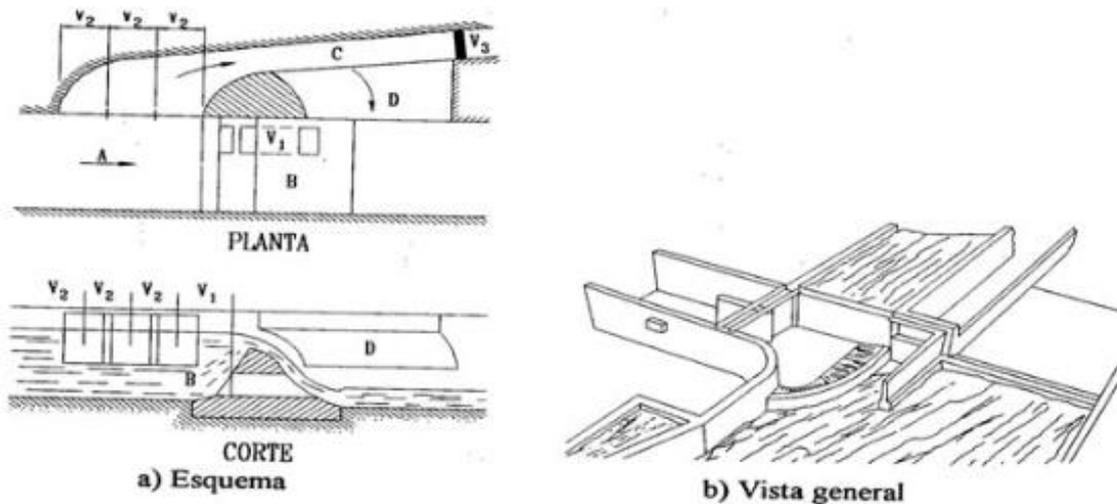


Figura 11: Sistema de captación de bombeo fijo con toma directa

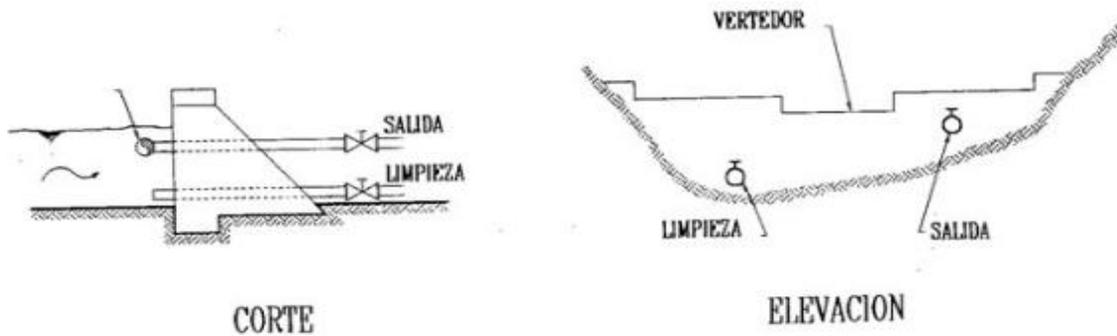
Nota. En a) se presenta un sistema de captación típica de bombeo fija para un río, y en b) un sistema de captación de derivación hídrica o comúnmente llamado bocatoma.

FUENTE: CivilGeeks (2023)

2.3.4. Captaciones para escurrimientos con pequeños tirantes

Son las estructuras dirigidas a captar un volumen controlado de caudal, las que pueden ser de toma directa o de caja y vertedor lateral.

a)



b)

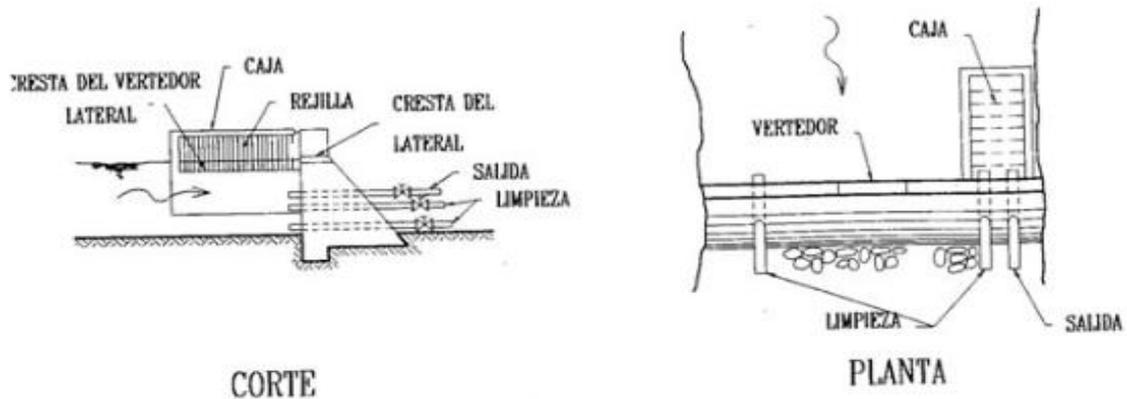


Figura 12: Sistema de captación para escurrimiento con pequeños tirantes

Nota. En a) se presenta un sistema de captación tipo muro con toma directa, y en b) un sistema de captación tipo muro vertedor con caja y vertedero lateral.

FUENTE: CivilGeeks (2023)

2.4. MODELO NUMÉRICO

Los modelos numéricos son métodos computacionales aproximados para resolver las ecuaciones que rigen los fenómenos físicos, cada modelo debe ser consistente, estable y convergente; pues para desarrollar un modelo, primero se define el problema, luego se plantea las hipótesis, se formulan la solución analítica, se genera el programa, sigue la calibración y por último se hace la simulación (Vergara, 1993).

Los primeros modelos numéricos se desarrollaron exclusivamente para resolver un problema particular, generalmente de flujo agua. Actualmente los modelos son genéricos con capacidad para resolver una gama de condiciones de flujo similares, con módulos adicionales para resolver otros fenómenos como transporte de sedimentos, dispersión de contaminantes, calidad de agua e inclusive modelación de hábitat de peces u otras criaturas acuáticas.

La capacidad de los modelos numéricos para representar fenómenos naturales ha venido evolucionando, y es que resultan de mucha importancia por la necesidad de predecir tales fenómenos para anticipar ciertas medidas preventivas y correctivas sobre la zona de influencia al paso del agua.

En la actualidad los modelos numéricos, ayudados con la capacidad de procesamiento de los ordenadores, permiten adecuarse a un esquema en dos dimensiones (2D), superando los modelos 1D, y ayudándonos a cuantificar parámetros hidráulicos; sobre todo cuando se trata de simulaciones hechas sobre grandes extensiones de terrenos afectados por el paso del agua.

2.4.1. Dimensionalidad

En los modelos unidimensionales (1D) se asume que una de las dimensiones prevalece sobre las otras dos. Esta dimensión es la longitudinal a lo largo del eje del río o canal. La información topográfica e hidráulica se introduce mediante secciones transversales, en las cuales se calculan el tirante y velocidad promedios en toda la sección transversal. Es decir, toda la sección es representada por un único valor medio de velocidad, no considerándose variaciones en la distribución de velocidades tanto horizontal como verticalmente. Asumen por defecto que el flujo es perpendicular a la sección transversal, lo cual es una de sus limitaciones. Estos modelos son aplicables en tramos de ríos y canales muy largos, generalmente mayores a 20 veces el ancho y cuando se busca principalmente determinar el máximo nivel de agua (para diseño de diques, por ejemplo).

Los modelos bidimensionales (2D) consideran las variaciones en las dos dimensiones del plano horizontal. Las variaciones de la velocidad u otra magnitud de interés en la columna

vertical de agua se promedian y se asumen como un único valor. Estos modelos son especialmente útiles en flujos muy extendidos (como estuarios, lagos, etc.) donde la variación vertical de velocidad es pequeña, por eso suelen llamarse modelos de aguas someras o poco profundas. Estrictamente no son aplicables a casos en que la variación vertical de la velocidad es apreciable, como por ejemplo el flujo sobre un vertedero o a través de un orificio sumergido; sin embargo, mediante uso de expresiones empíricas o similares pueden incorporar estas singularidades dentro de la modelación.

Los modelos tridimensionales (3D) representan el estado más avanzado de la modelación. Estos modelos son capaces de calcular las tres componentes espaciales de la velocidad, y por tanto aplicables a cualquier caso práctico.

2.4.2. Régimen de flujo

Para la ingeniería, el régimen de flujo es la clasificación y caracterización del movimiento de los fluidos, usualmente expresado a través de ecuaciones diferenciales en términos de variables como velocidad, viscosidad, profundidad, turbulencia, tiempo, etc.

En función a la temporalidad, el flujo se divide en permanentes y no permanentes o transitorios:

- **Flujo Permanente:** Estos son flujos en los que las propiedades del fluido (como la velocidad, la profundidad y la presión) no cambian con el tiempo. En otras palabras, son flujos en estado de equilibrio, donde las condiciones hidráulicas permanecen constantes a lo largo del tiempo y el espacio. Un ejemplo común de flujo estacionario es el flujo permanente en un canal o río con condiciones hidráulicas constantes.
- **Flujo No Permanente o Transitorio:** En contraste, los flujos no estacionarios, también conocidos como flujos transitorios, son aquellos en los que las condiciones hidráulicas varían con el tiempo. Estos cambios temporales pueden deberse a factores externos como variaciones en la descarga, eventos de precipitación intensa, o la operación de estructuras de control de inundaciones. Los flujos transitorios son comunes en situaciones donde se producen cambios en el sistema hidráulico, y su análisis implica considerar cómo evolucionan las condiciones del flujo en función del tiempo.

Esta clasificación basada en la temporalidad es fundamental en hidráulica y fluidos, ya que determina cómo se modelan y analizan los flujos en diferentes situaciones y aplicaciones. Los flujos estacionarios son de interés en estudios de estabilidad de canales y diseño de estructuras hidráulicas, mientras que los flujos no estacionarios son cruciales para comprender fenómenos transitorios como la propagación de inundaciones, la sedimentación y la erosión del lecho del río.

2.4.3. Mallas de cálculo

Es la discretización geométrica espacial del dominio, permite que las ecuaciones diferenciales puedan ser resueltas numéricamente, dividiendo en pequeños elementos, cuya unión y continuidad forman una malla, existiendo dos tipos de mallas:

- Mallas estructuradas: Cada elemento tiene el mismo número de vecinos y están constituidas por una matriz de celdas cuadrangulares, de manera que cada una puede identificarse por sus índices (i, j) (Robles, 2016).
- Mallas no estructuradas: Se conforman por elementos poligonales de distintos tamaños y formas; aunque generalmente se construyen con elementos triangulares, este tipo de mallas es muy útil para representar de forma más real las irregularidades del terreno (Robles, 2016).

2.4.4. Método de Calculo

El agua es un medio continuo constituido por un número casi infinito de partículas. Determinar la velocidad de cada partícula es virtualmente imposible y poco práctico; por ello este continuo se divide en elementos discretos de tamaño finito, que la memoria de una computadora es capaz de manejar.

Los métodos de cálculo principales, para resolver estos elementos son el Método de Elementos Finitos (MEF), el Método de Diferencias Finitas (MDF) y más recientemente el Método de Volúmenes Finitos (MVF). Estos métodos resuelven las ecuaciones que tienen dominio continuo mediante la solución en un número finitos de puntos discretos en dicho dominio. Cuando los valores buscados (tirante, velocidad, etc.) en dichos puntos discretos son encontrados, la solución en cualquier otro punto puede ser aproximada mediante métodos de interpolación.

Estos modelos numéricos proporcionan mucho detalle y precisión, siendo capaces de manejar condiciones de borde e iniciales complejas, para los cuales no existen en la mayoría de casos soluciones analíticas. Sin embargo, la mayoría de estos métodos requieren la solución simultánea de todos los nodos del dominio, lo que incrementa la carga computacional haciéndolos más lentos.

También pueden presentarse problemas de convergencia numérica que puede conducir a soluciones irreales, por lo que el buen criterio del ingeniero siempre debe estar presente. Cuál de los tres métodos, MDF, MEF o MVF es el mejor es aún un tema en debate. En general, para geometrías simples el MDF es una excelente de alternativas pues es muy rápido y simple; sin embargo, geometrías complejas exigen a su vez mallas complejas que se modelan mejor con el MEF o MVF.

2.5. MODELO HIDRÁULICO IBER

El software IBER es un modelo matemático para la simulación de flujo turbulento de lámina libre de régimen no permanente y de procesos medioambientales de la hidráulica fluvial. IBER está compuesto por tres módulos:

- Módulo Hidrodinámico
- Módulo de Turbulencia
- Módulo de Transporte de Sedimentos

En este trabajo de investigación se analizará el módulo hidrodinámico, el cual permite el cálculo de velocidades en 02 direcciones, tanto en “x” como en “y”, permitiendo alcanzar un espejo de agua mucho más detallado (zona de inundación) a diferencia de un modelo unidimensional; además, de la obtención de niveles de agua. Este modelo numérico está basado en aguas poco profundas que son mayormente usados en estudios de hidráulica fluvial y evaluación de zonas inundables, transporte de sedimentos y contaminantes.

Asimismo, el software IBER se basa en el método numérico de volúmenes finitos para resolver la ecuación de Saint Venant en 2D, los cuales permiten una mejor representación de la interacción entre el flujo y la superficie de ríos; este software también permite la exportación de polígonos referenciados (dxf, shapefile, entre otros) e información de

superficie para ser posteriormente trabajados dentro del software y así recrear el flujo de un río o quebrada.

2.5.1. Estructura de cálculo

Según IBER (2010), la estructura de cálculo en el programa IBER se divide en 03 etapas:

- Pre-Proceso: En esta etapa se ingresan la geometría, se asignan los parámetros de entrada como la rugosidad, se establecen las condiciones de contorno, las condiciones generales de cálculo, y se hace el mallado de la superficie en estudio, que puede ser de forma manual o automática.
- Proceso: En esta etapa se realiza el cálculo hidrodinámico.
- Postproceso: Se visualizan y se extraen los resultados obtenidos.

2.5.2. Ecuaciones hidrodinámicas

En los modelos bidimensionales la velocidad trabaja con dos direcciones en un plano horizontal promediada en profundidad, dichas componentes son:

$$U_x = \frac{1}{h} \int_{Z_b}^{Z_s} \overline{U_x} x dz$$

$$U_y = \frac{1}{h} \int_{Z_b}^{Z_s} \overline{U_y} x dz$$

Donde $h = Z_s - Z_b$, representado el calado en cada punto estudiado; Z_b es la elevación del fondo y Z_s es la elevación de la superficie libre, además $\overline{U_x}$ y $\overline{U_y}$ son las dos componentes horizontales de velocidad tridimensional, U_x y U_y son componentes de la velocidad horizontal promediada en profundidad.

Por lo tanto, en este modelo bidimensional se trabaja con un dominio bidimensional con tres componentes definidas en cada punto: el calado y las dos componentes de la velocidad horizontal; las ecuaciones que rigen el desarrollo de dichas variables se denominan ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad o ecuaciones de St. Venant bidimensionales (García, 2017). Las ecuaciones en dos direcciones horizontales de la

conservación de la masa y de momento que se desarrollan en el modelo IBER son las siguientes:

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{2 \partial x} + 2 \Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{2 \partial y} - 2 \Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s$$

Donde:

h = Tirante de agua (calado).

U_x y U_y = Velocidades horizontales promediadas en profundidad.

g = Aceleración de la gravedad.

Z_s = Elevación de la lámina libre.

τ_s = Fricción en la superficie libre debido al rozamiento por el viento.

τ_b = Fricción debido al rozamiento del fondo.

ρ = Densidad del agua.

Ω = Velocidad angular de rotación de la tierra.

λ = Latitud del punto considerado.

$\tau_{xx}^e, \tau_{xy}^e, \tau_{yy}^e$ = Tensiones tangenciales efectivas horizontales.

M_s, M_x, M_y = Son respectivamente los términos fuente/sumidero de masa y de momento, mediante los cuales se realiza la modelización de precipitación, infiltración y sumideros.

2.5.3. Condiciones de contorno hidrodinámico

Al estar en un escenario bidimensional, se deberá distinguir entre dos clases de contorno: abierto y cerrado.

- Contornos cerrados:

“La presencia del contorno tipo pared genera una fuerza de rozamiento lateral en el fluido, de manera similar a la fricción ejercida por el rozamiento del fondo” (IBER, 2010, p.11). Se consideran dos condiciones de contorno tipo pared:

- a. Condición de deslizamiento libre (tensión tangencial nula): Desprecia la tensión de rozamiento generada por los contornos sobre el fluido, debido a que la superficie de contacto con los contornos laterales es menor que la superficie de contacto de fondo.
- b. Condición de fricción de pared (funciones de pared): Cuando la dimensión horizontal y vertical son similares, es de importancia en el desarrollo del flujo tener en cuenta esta fuerza de rozamiento, aunque la influencia sea pequeña.

Si se quiere se puede considerar una condición de contorno de fricción para tener en cuenta el efecto del rozamiento lateral, que consiste en imponer una fuerza tangencial en dirección opuesta al flujo en el contorno (IBER, 2010).

- Contornos abiertos:

En este caso se pueden considerar diferentes tipos de condiciones contorno, para las ecuaciones bidimensionales el número de condiciones a imponer en los contornos abiertos está en función si se trata del caso de un contorno de entrada o de salida de flujo, así como del tipo de régimen en el contorno si es rápido o lento (IBER, 2010).

En un contorno de entrada se imponen 3 condiciones de contorno si pertenece al régimen supercrítico, pero en cambio si pertenecen al régimen subcrítico solo se imponen 2 condiciones; en el caso del contorno de salida solo basta con imponer una sola condición si el régimen es subcrítico, mientras que si se trata de un régimen supercrítico ya no es necesario imponer ninguna condición (IBER, 2010). Las condiciones de contorno a imponer se muestran en la Tabla 3.

En el contorno aguas arriba generalmente se impone el caudal total de entrada (m^3/s) y la dirección del flujo, realizando una distribución del caudal unitario, según la expresión de la ecuación siguiente; sin embargo, cuando existe la falta de precisión en los datos se considera perpendicular al contorno de entrada; también se opta por introducir la velocidad o el caudal específico aguas arriba (IBER, 2010).

$$q_n = \frac{h^{5/3}}{\int h^{5/3} \cdot dy} \times Q$$

Donde:

q_n = caudal específico expresado en (m² /s) en cada punto del contorno de entrada

Q = caudal total de entrada y la integral se extiende a lo largo de todo el contorno considerado. En el contorno de salida se considera el calado, además también se podría introducir condiciones de contorno tipo vertedero y tipo curva de gasto.

Siendo la expresión indicada en la ecuación que se muestra a continuación, para la condición de contorno tipo vertedero:

$$q = C_d(Z_s - Z_w)^{1.5}$$

Donde:

C_d = coeficiente de descarga del vertedero.

Z_s = cota de la lámina libre.

Z_w = cota superior del vertedero.

El usuario debe introducir como datos el valor del coeficiente de descarga y la cota superior del vertedero.

En la condición de contorno tipo curva de gasto establece una relación general entre el caudal de salida y la cota de la lámina de agua en cada punto del contorno, donde dicha relación es introducida por el usuario en forma de una tabla en la que se definen pares de valores de caudal específico y cota de la lámina de agua (IBER, 2010).

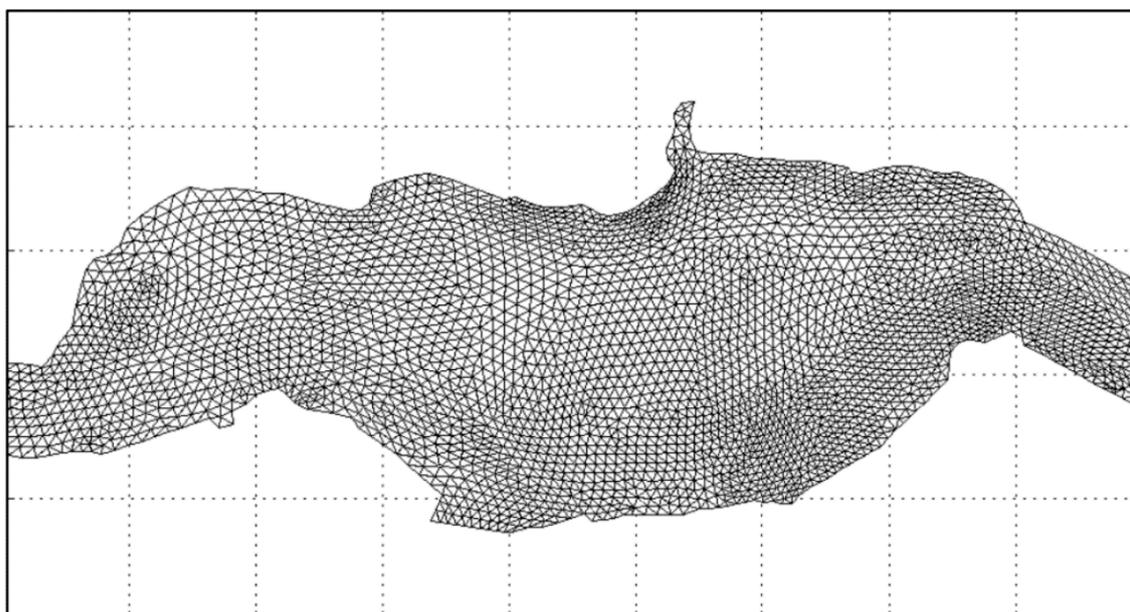
Tabla 3: Condiciones de contorno abierto

CONTORNO	RÉGIMEN	CONDICIONES IMPUESTAS
Caudal Total	Subcrítico / Crítico	Caudal total en dirección normal al contorno.
	Supercrítico	Caudal total en dirección normal al contorno y velocidad media
Entrada	Subcrítico / Crítico	Caudal específico en dirección normal al contorno
	Supercrítico	a) Caudal específico en dirección normal al contorno y calado. b) Caudal específico en dirección normal al contorno y cota de agua.
Salida	Subcrítico	a) Calado b) Cota de agua c) Vertedero (cota y coeficiente de descarga) d) Curva de gasto
	Supercrítico / Crítico	No es necesario imponer ninguna condición

FUENTE: IBER (2010)

2.5.4. Malla de cálculo con IBER

Las ecuaciones diferenciales se resuelven mediante la discretización espacial del dominio en estudio, dividiéndose en pequeñas celdas denominadas mallas de cálculo; pues el Software IBER trabaja con mallas no estructuradas constituidas por elementos de 3 o 4 lados; la facilidad de adaptación a cualquier geometría es la ventaja por la que se emplea este tipo de malla (IBER, 2010).

**Figura 13: Ejemplo de malla no estructurada en IBER**

FUENTE: IBER (2010)

2.5.5. Flujo de procesamiento de información

Los datos necesarios para la modelización bidimensional, se ingresan dentro del mismo software. El primer paso es configurar los parámetros del sistema de unidades a usar (sistema métrico internacional) y definir el nombre del proyecto y la ruta de carpetas donde se almacenará la información.

El flujo de procesamiento de información que emplea IBER 2D es el siguiente:

- Generación de geometría de la zona: importación del MDT en formato ráster o ASCII.
- Asignación de rugosidad, coeficiente de Manning de acuerdo a las coberturas del suelo.
- Condiciones de contorno, definición de fronteras hidrodinámicas, contornos cerrados (tipo pared) y/o abiertos donde entra y sale el agua del dominio de cálculo.

III. DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1. DESCRIPCIÓN DE PROYECTO

3.1.1. Ubicación

La obra de captación para monitoreo de parámetros físico químicos se emplaza sobre el río Rímac, aproximadamente a 650 m del puente Morón o Girasoles, en el distrito de Lurigancho – Chosica, provincia de Lima.

La estructura se encuentra entre las coordenadas UTM, Datum WGS84 que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4: Ubicación geográfica de zona de estudio

	Este (m)	Norte (m)	Zona
Inicio	305536.33	8675311.18	18 S
Fin	304736.12	8675180.70	18 S

En la siguiente figura se muestra la imagen satelital del tramo del río Rimac donde se emplazará la captación.



Figura 14: Ubicación satelital de zona de estudio

FUENTE. Google Earth

3.1.2. Inspección de campo

Se realizó visita a la zona del proyecto para evaluar las características del cauce, como fluviomorfología, vegetación, cobertura de ribera, construcciones, y otros necesarios de insumos al modelo hidráulico.

De la inspección, se observa lo siguiente:

- a. Presencia de vegetación, preponderante en margen derecha.
- b. Depósitos antrópicos en la ribera izquierda.
- c. Presencia de islotes.
- d. Pendiente del flujo gradual y natural.
- e. Sección del cauce estable.
- f. No se observa huellas hídricas producto de desbordamiento o inundación.
- g. No se observa construcciones que pudiesen afectar el comportamiento del flujo en la zona de captación.

A continuación, se muestran algunas figuras obtenidas de la inspección:



Figura 15: Inspección de campo

3.1.3. Características topográficas

El área de estudio se sitúa dentro de la zona urbana de los distritos de Lurigancho y Chaclacayo, específicamente en la proximidad del tanque elevado R-3 y el pozo 820 de SEDAPAL. La topografía de esta región se caracteriza por terrenos mayormente planos a lo largo de ambas márgenes, con taludes que definen el cauce del río y alcanzan alturas de hasta 5 metros. En el margen izquierdo, se observan acumulaciones de desechos de origen antropogénico cerca del río, mientras que a cierta distancia se aprecia la presencia de vegetación, principalmente de carácter ornamental. Por otro lado, en el margen derecho, el talud del cauce presenta una altura de 3 metros, formando un nivel elevado que se incrementa en otros 3 metros en una especie de barranco.

Los datos del levantamiento topográfico utilizados corresponden al proyecto “Creación de Estación de Alerta del río Rímac, distrito de Lurigancho - Chosica” elaborado SEDAPAL. El cual se ejecutó mediante una metodología mixta convencional y vuelo fotogramétrico con resolución de curvas cada 1m.

El levantamiento convencional se realizó con equipos de estación total y GPS diferencial, tomando como puntos de control la monumentación de 02 hitos de orden “C” y una poligonal cerrada de 04 vértices. Del mismo modo, el control vertical o nivelación geométrica se realizó desde el BM oficial IGN X-50, ubicado a 10 km al este de la zona de estudio, manteniendo una tolerancia aceptable de 6mm/km.

El levantamiento fotogramétrico se realizó mediante el vuelo de un dron a una altura de 120m y un GSD promedio de 4cm, con traslape frontal y lateral del 70%. Los hitos de control o fotocontrol se establecieron mediante un levantamiento diferencial RTK distribuidos sobre la zona de vuelo.

Con la nube de puntos obtenidos del levantamiento, se procesó y generó un modelo digital del terreno (MDT). Posteriormente, se empleó el software Civil 3D para crear secciones de control que permitieron verificar el cauce en diferentes ubicaciones.



Figura 16: Levantamiento Topográfico con Dron Phantom

Nota. Se muestra algunas imágenes tomadas con dron marca phantom en el Levantamiento Topográfico de la zona de estudio.

FUENTE: SEDAPAL (2019)

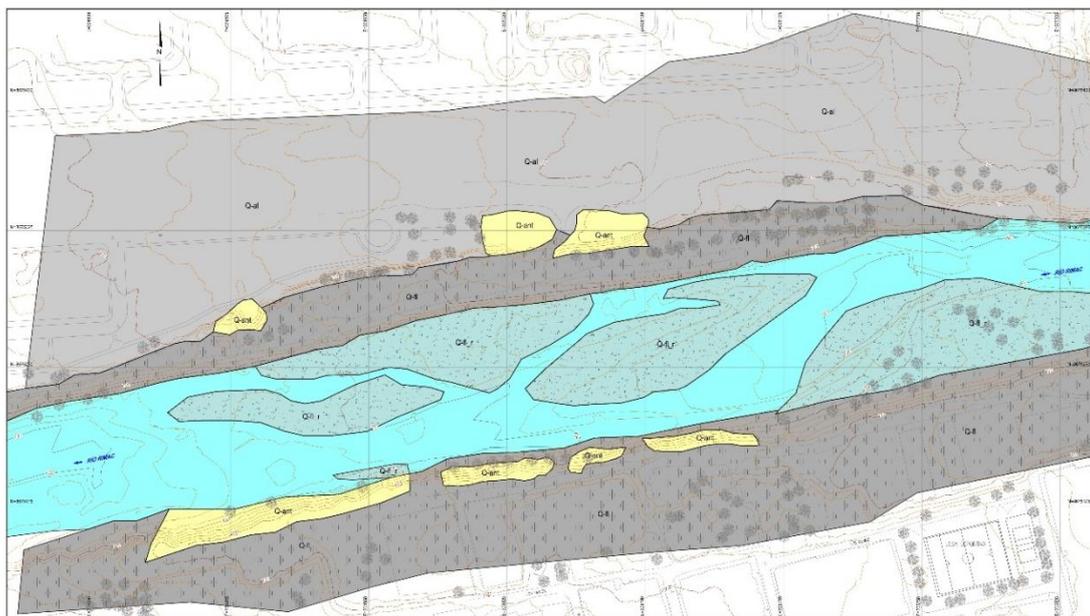
Características geológicas

La información geológica utilizada proviene del Proyecto “Creación de Estación de Alerta del río Rímac” (2019), que señala en su marco geológico local que la geomorfología en la zona de estudio está predominada por depósitos aluviales, estacionales que dependen del caudal del río y conformados por gravas, cantos y bolos englobados en una matriz arenosa; y terrazas fluviales, estructuras de depósitos cuaternarios de bajo ángulo que se encuentran en las márgenes del río. Además, se han diferenciado hasta 3 unidades litoestratigráficas en la zona de estudio, las cuales son:

- a. Depósitos antrópicos, desechos de naturaleza variada que se han depositado en la ribera del río Rímac, entre ellos se encuentran restos orgánicos, polietileno, vidrios,

papel, cartones, plásticos, muebles y desmonte.

- b. Depósitos fluviales, constituidos por una mezcla heterogénea de gravas, cantos y bolos, redondeados y subredondeados, teniendo como matriz arenas limosas en porcentajes variables.
- c. Depósitos aluviales, material conformado por arcillas y limos de alta plasticidad estas se encuentra en el margen izquierdo del río Rímac y está sobre depósitos del cuaternario distribuidos de forma irregular en la terraza fluvial.



LEYENDA				
ERAT.	SISTEMA	SERIE	UNIDADES ESTATIGRÁFICAS	DESCRIPCIÓN
CENOZOICO	CUATERNARIO		<div style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: yellow; border: 1px solid black;"></div> Q-ant Depósitos antrópico	Depósito realizado por el hombre en las laderas de río.
			<div style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: lightblue; border: 1px solid black;"></div> Q-fl_r Depósitos fluviales reciente	Agregado de gravas, cantos, cantos y bolos redondeados a subredondeados. de granulometría variada englobandos por una matriz arenolimos
			<div style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: darkblue; border: 1px solid black;"></div> Q-fl Depósito fluvial	Depósito de gravas,cantos, bolos subredondeados de granulometría variada
			<div style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: grey; border: 1px solid black;"></div> Q-al Depósito aluvial	Depósito de aluvial; semiconsolidado, conformado por cantos y algunos bolos subredondeados de granulometría variada, seguido en su topo por suelo residual conformado por arcillas y limos

Figura 17: Geología local de zona de estudio

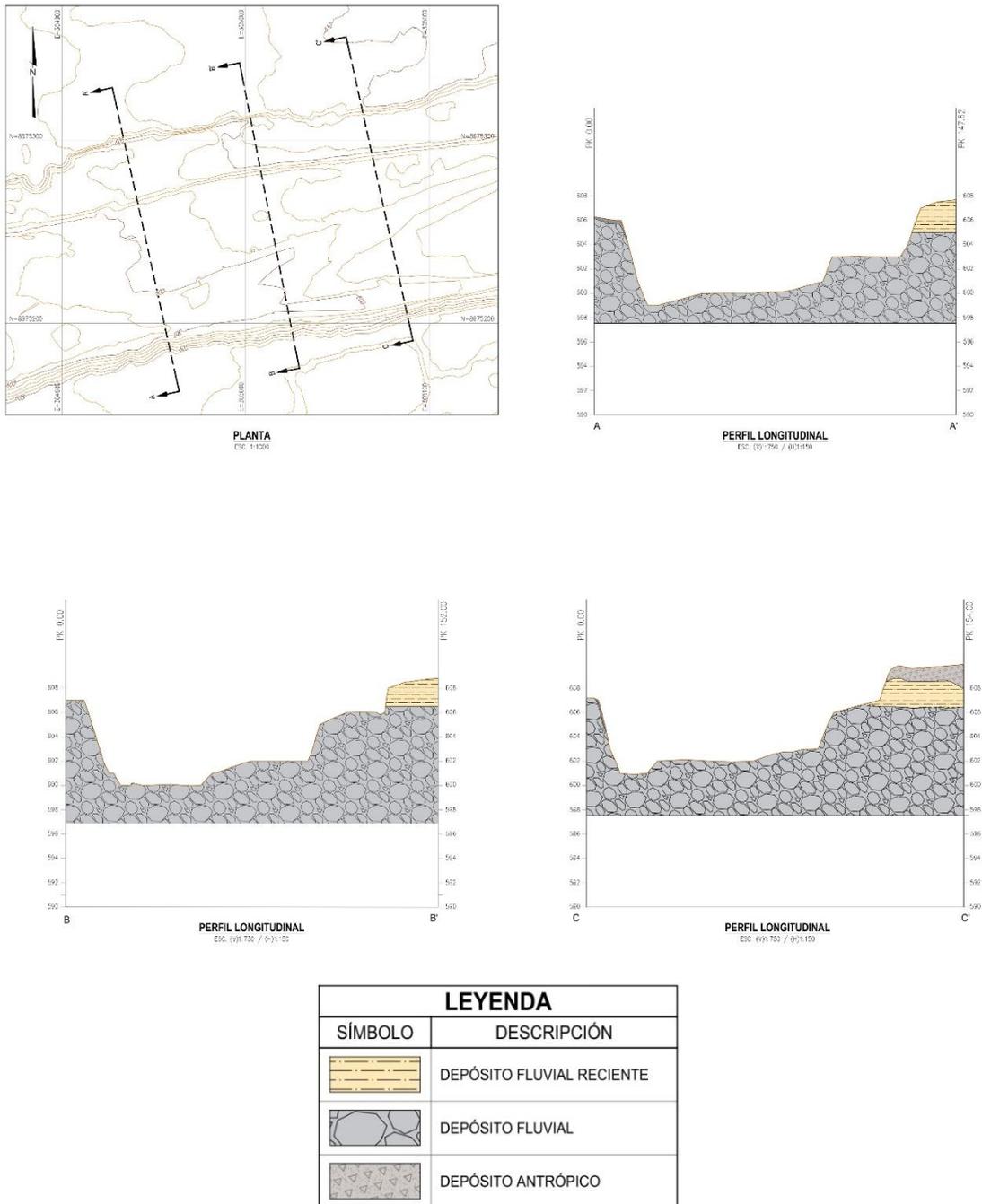


Figura 18: Perfiles estratigráficos

3.1.4. Rugosidad del cauce

Se estimó la rugosidad mediante el método de Cowan, descrito en el ítem 2.2.4 del presente estudio, considerando los valores de la Tabla 2, la visita de campo y las características topográficas y geológicas.

Tabla 5: Valores de rugosidad método de Cowan - SCS

CONDICIONES DEL CANAL		VALORES	
Material Involucrado	Grava Gruesa	n0	0.028
Grado de Irregularidad	Menor	n1	0.005
Variaciones de la Sección Transversal	Gradual	n2	0.000
Efecto Relativo de las Obstrucciones	Insignificante	n3	0.000
Vegetación	Baja	n4	0.007
Grado de los Efectos por Meandro	Menor	m5	1.000

Calculando la rugosidad:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_5$$

$$n = 0.040$$

Del mismo modo, para las obras complementarias al proyecto se utilizaron valores de rugosidad propuestos por Chow (1994), los cuales se presentan a continuación:

Tabla 6: Coeficiente de rugosidad por tipo de cobertura de suelo

Cobertura del suelo	Coeficiente de rugosidad
Enrocado de protección	0.025
Obras de concreto	0.014
Material propio del cauce	0.040

3.1.5. Estructura de Captación

El proyecto Estación Alerta río Rímac fue concebido para medir la calidad del agua en tiempo real; para ello, contempla la construcción de una captación fluvial por bombeo que impulsa muestras de agua hacia un centro de monitoreo automatizado. Esta captación debe asegurar que el flujo a impulsar cumpla las siguientes condiciones para asegurar la precisión en la medición:

a. Homogeneidad de la mezcla

La estabilidad y homogeneidad del caudal fluvial son imperativos para garantizar que las muestras tomadas reflejen de manera precisa y consistente los niveles de calidad a lo largo del tiempo. Esto implica que el flujo del río debe mantener una uniformidad en sus características hidráulicas, evitando fluctuaciones significativas que puedan distorsionar la

representatividad de las muestras en términos de calidad.

b. Permanencia de bombeo

El sistema requiere un bombeo continuo para minimizar la desviación de las mediciones, lo que implica un funcionamiento constante tanto en épocas de avenidas como durante el estiaje. Durante los periodos de caudal mínimo, es importante tener en cuenta el nivel de agua con el fin de prevenir problemas de sumergencia en el proceso de bombeo.

c. Nivel variable de impulsión

Para realizar el monitoreo de los parámetros de calidad, es necesario que el sistema obtenga muestras de agua a diferentes niveles de la superficie. Esto se debe a las particularidades de los contaminantes o parámetros que se están evaluando; por ejemplo, los hidrocarburos que tienden a concentrarse en la capa superficial del flujo.

Para cumplir estas condiciones, el estudio propone la implementación de las siguientes construcciones en el cauce:

- Construcción de Pantallas Estabilizadoras de Rasante
- Construcción de Diques de Encauzamiento
- Construcción de una Transición de Ingreso y de Salida
- Construcción de Muros de Contención
- Construcción una Plataforma Central y dos Plataformas Laterales
- Construcción de un Puente Pasarela y Casetas de Bombeo (estructura de captación).

3.2. ESTUDIO HIDROLÓGICO

La información recopilada y empleada para el análisis hidrológico proviene del Estudio de Perfil del Proyecto “Creación de Estación de Alerta del río Rímac” (2019), el cual usa el método del Hidrograma Unitario para determinar los caudales producidos por una determinada precipitación en la cuenca Hidrográfica y así lograr los caudales de diseño para el presente proyecto. Los valores de precipitación fueron ingresados al software HEC – HMS, que utiliza este y otros modelos hidrológicos para simular el hidrograma de salida en un punto de drenaje de la cuenca.

3.2.1. Caudal medio mensual

La información hidrométrica recopilada en el análisis hidrológico del estudio de referencia, proviene de la estación Chosica, la cual es administrada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI. En el presente estudio, el escenario más crítico para el diseño corresponde al escurrido en época de estiaje, dado que produce los niveles mínimos de nivel de agua o tirante hidráulico en la sección de captación proyectada. Por lo anterior, en el siguiente cuadro se analiza los valores de caudales reportados en el periodo 2000-2021, apreciando que el mínimo corresponde a 16.8 m³/s; naturalizando dicho caudal, tomando como referencia el volumen adicional generado por el túnel trasandino (aprox. 4-5 m³/s) según la ANA, se tendría un caudal mínimo en el orden de los 15 m³/s.

Tabla 7: Caudales medios mensuales (m3/s) del río Rímac - Estación Chosica

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom
2000	59.4	73.5	80.2	60.6	37.8	26.3	22.8	21.6	21.5	23.6	23.4	29.5	40.0
2001	72.8	67.0	88.1	60.0	33.3	27.7	26.7	26.7	26.6	26.2	28.7	26.9	42.5
2002	27.6	43.6	59.1	49.4	23.5	20.6	21.0	22.2	27.1	28.3	33.0	36.5	32.7
2003	48.6	56.8	83.3	56.8	32.0	28.1	27.9	27.1	27.6	26.5	29.9	31.0	39.6
2004	25.7	44.5	37.1	31.9	22.7	22.1	22.2	21.8	22.8	23.0	29.0	40.1	28.6
2005	43.9	39.4	45.4	38.2	25.6	24.6	23.7	24.1	24.0	24.3	23.6	25.3	30.2
2006	33.5	50.0	65.4	55.4	27.5	23.4	23.3	23.3	21.3	20.9	20.4	29.2	32.8
2007	47.3	51.0	68.0	57.8	27.7	21.3	16.8	19.8	19.4	19.6	19.7	18.9	32.3
2008	34.8	46.5	45.9	27.0	18.1	23.0	22.8	23.3	21.7	22.1	22.6	26.0	27.8
2009	39.2	69.0	72.1	45.4	19.9	18.8	18.4	19.4	20.5	20.8	29.5	38.9	34.3
2010	53.7	49.7	64.2	42.5	26.4	24.2	23.8	23.2	24.3	22.8	23.1	30.6	34.1
2011	40.0	53.5	55.6	58.6	32.6	27.4	24.8	24.9	23.8	23.8	26.2	32.0	35.3
2012	34.0	70.4	68.7	67.5	35.5	26.6	26.7	24.9	23.3	25.4	36.7	37.6	39.8
2013	44.4	71.2	92.4	41.9	22.6	24.3	23.9	23.0	23.3	23.9	25.2	30.3	37.2
2014	35.1	41.8	84.6	33.3	24.6	19.7	21.1	20.9	21.7	22.1	25.3	26.8	31.4
2015	37.8	40.1	66.0	44.0	28.6	22.8	23.5	22.1	22.0	23.3	20.7	29.0	31.7
2016	22.2	38.1	46.2	32.2	21.1	20.4	22.3	19.7	21.5	20.7	21.5	18.7	25.4
2017	46.3	63.2	96.9	65.7	39.6	24.4	21.3	25.2	23.9	24.7	25.3	24.5	40.1
2018	29.6	32.1	52.8	41.0	29.1	21.6	21.8	21.4	21.0	21.6	21.5	22.4	28.0
2019	32.2	43.7	46.0	25.5	20.2	21.6	22.8	23.4	21.4	21.8	23.3	34.2	28.0
2020	33.1	45.9	42.7	33.0	26.0	20.0	20.7	20.6	20.1	21.3	22.1	43.9	29.1
2021	65.7	42.0	57.4	66.6	S/D								
Promedio	41.2	51.5	64.5	47.0	27.4	23.3	22.8	22.8	22.8	23.2	25.3	30.1	33.4
Des. Est.	12.9	12.3	17.4	13.5	6.0	2.8	2.6	2.2	2.2	2.2	4.4	6.7	4.9
Máximo	72.8	73.5	96.9	67.5	39.6	28.1	27.9	27.1	27.6	28.3	36.7	43.9	42.5
Mínimo	22.2	32.1	37.1	25.5	18.1	18.8	16.8	19.4	19.4	19.6	19.7	18.7	25.4
Nº Datos	22	22	22	22	21	21	21	21	21	21	21	21	21

S/D: Sin Dato

FUENTE. SENAMHI

3.2.2. Caudal de diseño

El caudal de diseño se extrae del análisis de máximas avenidas del estudio de Hidrología de referencia. Estos valores son calculados a partir de un modelo de precipitación – escorrentía, disponible en el software HEC-HMS, y para diferentes periodos de retorno.

El periodo de retorno (T), es el intervalo de tiempo promedio dentro del cual un evento de magnitud x, puede ser igualado o excedido por lo menos una vez en promedio. La probabilidad de ocurrencia (P) es la inversa del periodo de retorno:

$$P = \frac{1}{T}$$

La probabilidad de que el evento, ocurra al menos una vez en “n” años sucesivos, es conocida como Riesgo o Falta (R) y se presenta por:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$$

Donde:

T= Periodo de retorno

N= Vida Útil de la estructura

Con el parámetro riesgo o falta es posible determinar cuáles son las implicaciones, de seleccionar un periodo de retorno dado de una obra, que tienen una vida útil de “n” años.

Tabla 8: Riesgo para diferentes periodos de retorno

Vida útil de la estructura (n)	Periodo de retorno (T)	Probabilidad de ocurrencia (P)	Riesgo (R)
50	5	20.00%	100.00%
	20	5.00%	92.31%
	50	2.00%	63.58%
	100	1.00%	39.50%
	200	0.50%	22.17%
	500	0.20%	9.53%
	1000	0.10%	4.88%

Tomando en consideración lo establecido por la Autoridad Nacional del Agua – ANA en su RJ N°153-2016, al ser una obra ubicada en zona urbana, se tomará el periodo de retorno T=100 años, con lo cual existe la probabilidad (P) del 1.00% de exceder la magnitud “x” y

un riesgo con una probabilidad del 39.50% de que la obra falle durante su vida útil.

Para el cálculo de los caudales de diseño, se usó la metodología del Hidrograma Unitario Sintético de Clark, con lo cual se obtuvo los siguientes valores:

Tabla 9: Caudales máximos extraordinarios - Escenario Base

Período de retorno (años)	Caudales (m ³ /s)	
	Chosica	Captación
10	155.4	156.3
25	194.1	198.3
50	228.3	236.8
100	265.3	273.4
200	309.7	335.3
500	374.3	420.4
1000	432.8	501.3

Para calcular las precipitaciones extremas en el clima futuro o bajo influencia del cambio climático, se utilizó la técnica de factor de cambio o delta aditivo. Para la obtención del factor de cambio (Δ) en la precipitación máxima se calculó como el resultado de la división entre los promedios de la serie anual máxima de precipitación futura e histórica, esta relación se encuentra expresado de la siguiente forma:

$$\text{Factor de cambio } (\Delta) = \frac{\text{Serie anual máxima } PP_{\text{máx}} \text{ diaria futura}}{\text{Serie anual máxima } PP_{\text{máx}} \text{ diaria histórica}}$$

Para el presente proyecto, se usa un delta de cambio conservador de 5% a la precipitación de ingreso, con ello se obtiene resultados del modelo para los diferentes periodos de retorno, logrando los valores:

Tabla 10: Caudales máximos extraordinarios - Escenario cambio climático

Período de retorno (años)	Caudales (m ³ /s)	
	Chosica	Captación
10	168.3	169.4
25	211.8	216.5
50	248.0	257.1
100	290.7	299.3
200	337.2	365.0
500	408.1	458.1
1000	473.2	546.8

3.3. MODELO HIDRÁULICO

3.3.1. Calibración

La calibración del modelo hidráulico se realizó mediante una verificación del coeficiente de rugosidad, para ello, primero se tomó como base el análisis realizado en el apartado 3.1.5, el valor de “n” usado de 0.04 fue obtenido a partir del cálculo de la rugosidad para el cauce mediante el método de Cowan y de la definición de rugosidades para los márgenes del río mediante el reconocimiento de campo y el levantamiento fotogramétrico. Luego, para verificar el valor de la rugosidad se optó por comparar los resultados de los niveles de agua alcanzados en la máxima avenida ordinaria registrados en imágenes en alta resolución (simplificación del método de huella máxima, definido por ANA según RJ N°153-2016-ANA), con los resultados obtenidos de un modelamiento hidráulico en las mismas condiciones y periodo de análisis.

El proceso de calibración siguió los siguientes pasos:

1. Se diferenció las huellas del flujo de agua en el cauce del río Rímac, a través de la ortofoto obtenida del levantamiento fotogramétrico la cual se realizó en época de estiaje.
2. En el software IBER, se realizó un modelamiento hidráulico para un caudal medio de estiaje, que corresponde a un caudal de 22 m³/s.
3. Se comparó las huellas del flujo de agua en el cauce del río Rímac de la ortofoto con el modelo, obteniendo los siguientes resultados:

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

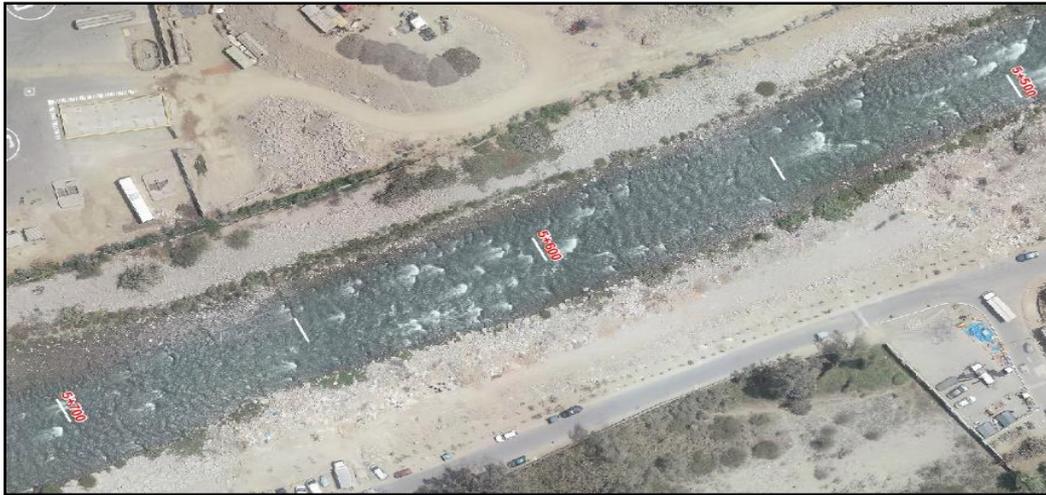


Figura 19: Calibración del modelo hidráulico - Huella hídrica

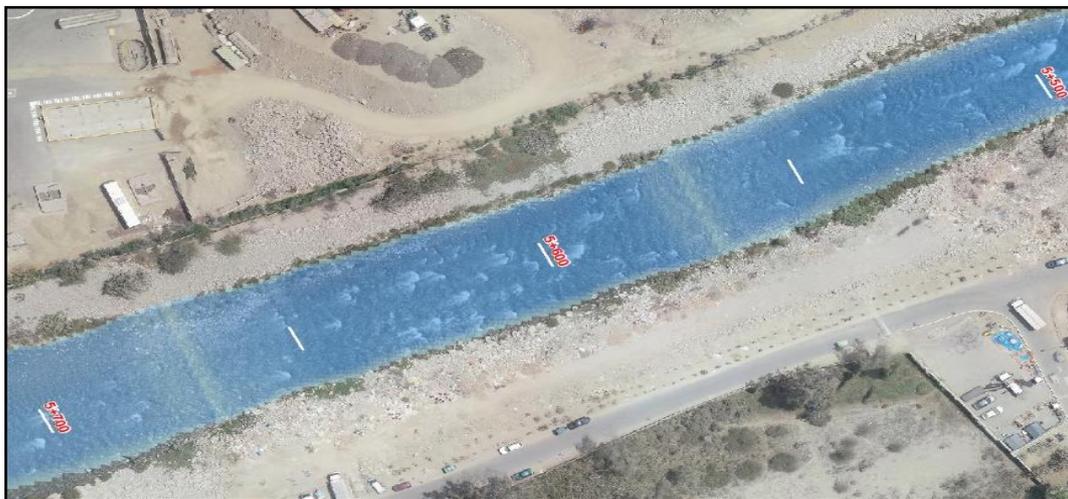


Figura 20: Calibración del modelo hidráulico – modelamiento hidráulico

Como se observa, las huellas del flujo de agua del modelo hidráulico y de la ortofoto en época de estiaje son semejantes, por lo que se puede afirmar que el modelo representa el comportamiento hidrodinámico del flujo bajo las condiciones establecidas en esta investigación.

3.3.2. Geometría del modelo

La geometría del modelo se basó en la información disponible del modelo hidráulico y en las observaciones realizadas en campo. Este proceso se llevó a cabo utilizando el software Civil 3D.

Es importante destacar que la delimitación del dominio computacional del modelo se ha circunscrito al área definida por la información topográfica disponible. Para llevar a cabo esta delimitación, se han seguido los siguientes procedimientos:

- a. En el entorno del software Civil 3D, se delineó el dominio computacional trazando polígonos que demarcan áreas según el tipo y la cobertura del suelo. El archivo resultante se guardó con la extensión *.dxf*.
- b. Dentro del mismo archivo, se dibujó la estructura de captación, considerando las dimensiones correspondientes al estudio de diseño hidráulico del proyecto Estación Alerta. La geometría isométrica de la captación se guardó en formato *.dxf* con el propósito de ser posteriormente importada al modelo IBER 2D. Esto permitió la generación de superficies de análisis en dicho entorno de simulación.

También se debe mencionar que, debido a las restricciones inherentes al modelo computacional, cualquier pared vertical que no estuviera asociada a una condición interna se configuró con una pendiente mínima. Esto se hizo con el fin de prevenir posibles errores de procesamiento. La geometría ingresada en IBER 2D se muestra en la siguiente figura adjunta.

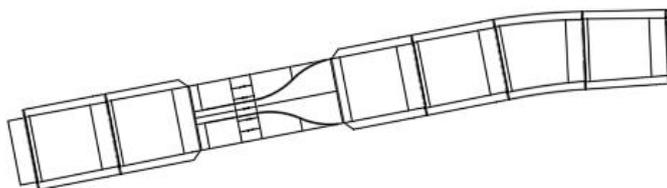


Figura 21: Geometría del Modelo con Proyecto

3.3.3. Coeficiente de rugosidad Manning

Una vez definidas las condiciones de contorno, se procedió a especificar las coberturas del suelo utilizando los valores proporcionados en la tabla 11.

Con esta acción se caracteriza las propiedades del terreno y las superficies de interacción con el flujo de agua en el modelo. Al asignar las coberturas de suelo según los valores calculados y establecidos en la tabla 11, se garantiza que el modelo refleje con precisión las condiciones del terreno y la respuesta del suelo a la interacción con el agua.

La siguiente figura muestra las superficies identificadas según el tipo de cobertura de suelo, el color verde corresponde a una cobertura de material propio del cauce, el amarillo para las obras de concreto que agrupa la estructura central y las pantallas niveladoras de rasante; y por último, el azul corresponde a las superficies con enrocado.

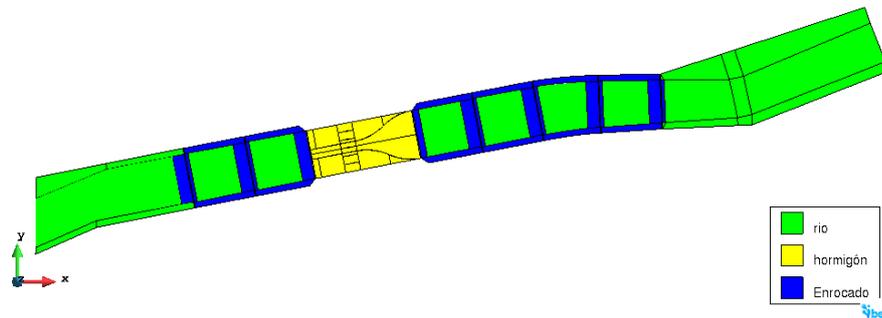


Figura 22: Rugosidad según cobertura de suelo

3.3.4. Importación de la geometría

Una vez que definida la rugosidad de las coberturas de suelo y completado el dibujo isométrico de la geometría del modelo, se da paso a la etapa de importación en el software IBER 2D, utilizando la extensión de archivo DXF.

En este proceso de importación, la geometría se adaptará y definirá las superficies de análisis necesarias. Estas superficies se configurarán de manera que puedan agruparse de acuerdo a las características específicas de la estructura que se va a modelar.

Este paso es crítico, ya que permite al software IBER 2D comprender y analizar la geometría del proyecto de manera precisa y ajustada a las condiciones reales del terreno y de la estructura hidráulica en cuestión. De esta manera, se establece una base sólida para realizar análisis hidrodinámicos y estudios relacionados con el flujo de agua en el proyecto.

En la siguiente figura se muestra la superficie importada y regenerada en IBER 2D.

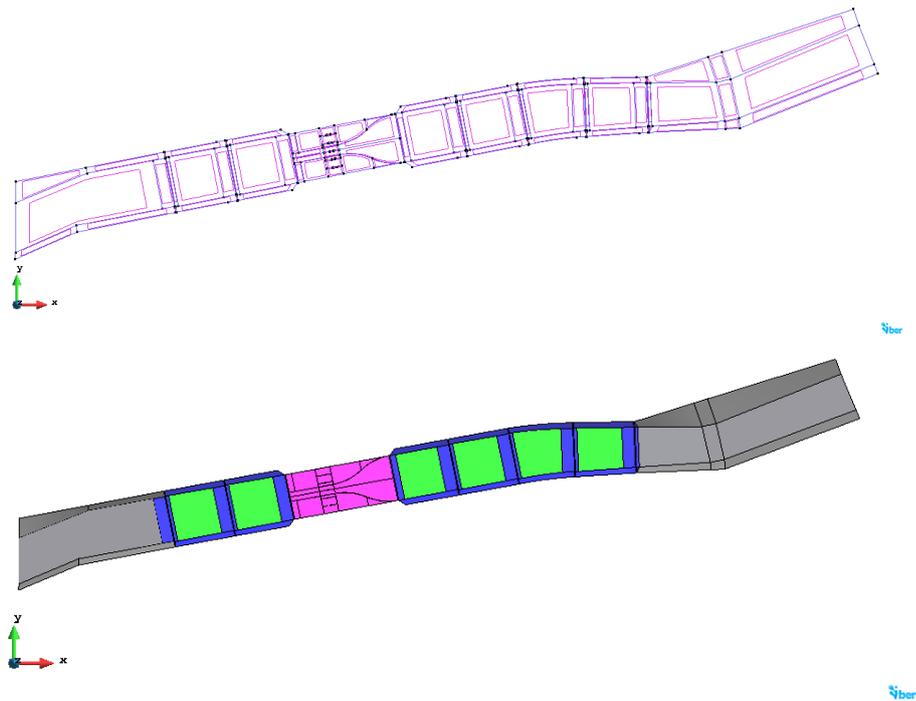


Figura 23: Importación de geometría del modelo

3.3.5. Asignación de condición de contorno

El siguiente paso involucra la definición de las condiciones de contorno para el modelo. En este procedimiento se introduce una condición de entrada específica relacionada con el caudal calibrado bajo consideraciones de cambio climático para un TR100, como se detalla en la tabla 9. Además, se configura una condición de salida que corresponde a un vertedero en flujo subcrítico al nivel del suelo.

Estas acciones son cruciales para establecer los límites y los valores iniciales del modelo hidrodinámico. La introducción de la condición de entrada asegura que el modelo esté calibrado de acuerdo con las condiciones climáticas cambiantes y los parámetros asociados al TR100. La configuración de la condición de salida mediante un vertedero en flujo subcrítico permite controlar el flujo de salida del sistema de manera efectiva. Ambas condiciones son fundamentales para lograr análisis hidráulicos precisos y la simulación del flujo de agua en el proyecto.

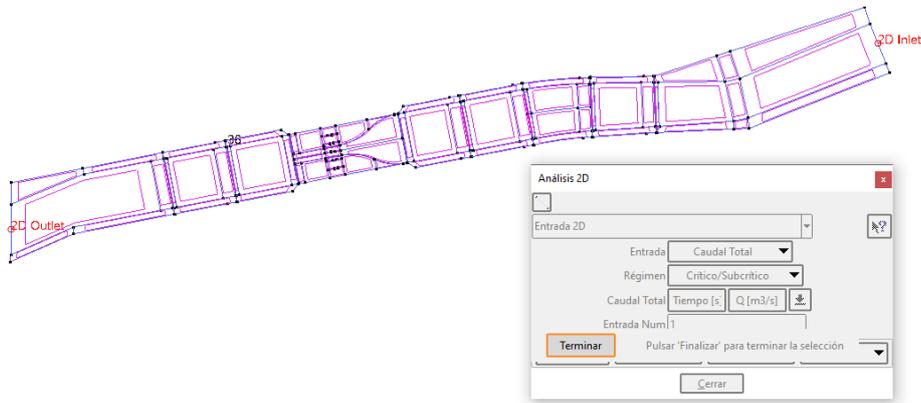


Figura 24: Condiciones de contorno del modelo

3.3.6. Creación de malla

El paso final consiste en la generación de la malla de análisis, que representa la unidad mínima de procesamiento matemático en el modelo. En este contexto, se han establecido valores de malla específicos, tales como 2.5 metros para la superficie del río natural sin intervención, 2 metros para las superficies enrocadas y explanadas, y 1 metro para las superficies de concreto.

La creación de esta malla de análisis es crítica para el modelado hidrodinámico, ya que determina la resolución espacial y la precisión de los cálculos. Estos valores de malla han sido seleccionados cuidadosamente de acuerdo con las características de las diferentes áreas del proyecto, asegurando que el modelo pueda captar con precisión la variabilidad del terreno y las condiciones de flujo.

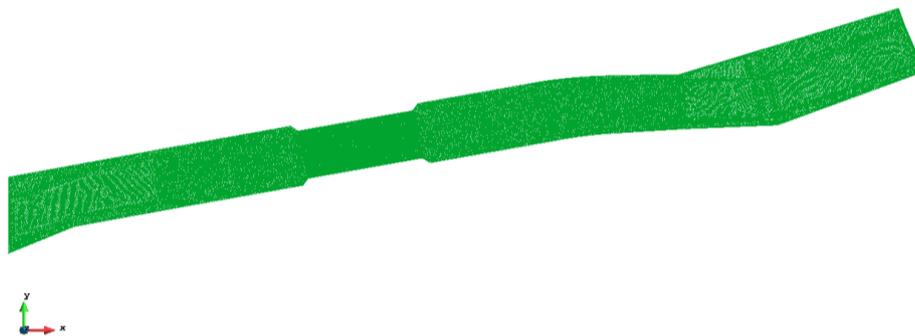


Figura 25: Creación de malla

Luego, se debe dar relieve a la malla generada; para ello, previamente se realiza un proceso de compatibilidad de la superficie generada en los trabajos topográfico con el software

IBER, el cuál siguió el siguiente procedimiento:

- a. En el software Civil 3D se convirtió la superficie tipo raster (MDT) que se obtuvo a partir del levantamiento topográfico del río. Esta superficie con extensión *xml* se transformó a una extensión tipo *dem*, aprovechando las capacidades del software para gestionar datos topográficos.
- b. Luego, en el entorno del software ArcMap 10.5, se realizó un segundo proceso de modificación del formato. En este caso, el archivo se convirtió a una extensión tipo ASCII. Esta adaptación específica se realizó utilizando las herramientas y funciones disponibles en ArcMap 10.5, garantizando así que el MDT se ajustara perfectamente al formato requerido y aceptado por el software IBER 2D.

En la siguiente figura se muestra la secuencia del cambio de formato de la superficie topográfica (*xml*) al modelo digital de terreno en formato ASCII.

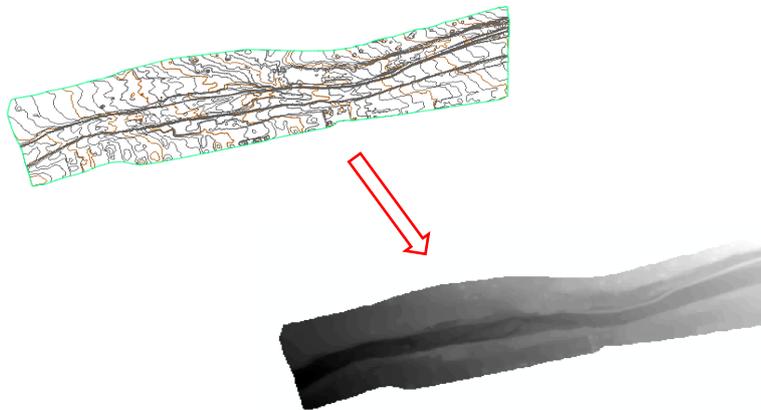


Figura 26: Modelo digital del terreno

Finalmente, se procede a cargar el Modelo Digital del Terreno (MDT) utilizando la función "Herramientas Iber > Malla > Editar > Asignar elevación desde archivo". Esta operación permite importar la elevación del terreno desde un archivo específico, preparando así una superficie que está lista para iniciar el procesamiento.

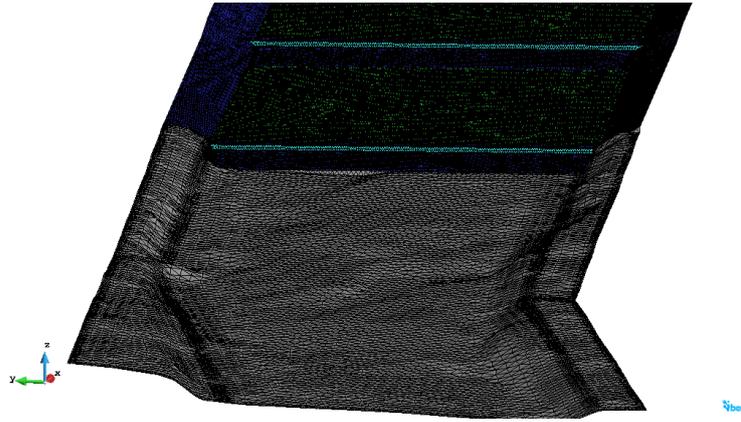


Figura 27: Superficie de terreno para modelamiento

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ESTRUCTURA DE CAPTACIÓN

Se evaluó las condiciones de captación descritas en el ítem 3.1.6, analizando y seleccionando las construcciones propuestas por el proyecto. A continuación, se presentan las obras idóneas que garantizan el cumplimiento de estas restricciones, clasificadas según condición analizada:

4.1.1. Homogeneidad de la mezcla

Esta condición se aborda mediante la estabilización del flujo en el lecho del río, asegurando que su ancho se mantenga constante y en concordancia con las características geomorfológicas específicas del río Rímac. Para ello, se propone la construcción de las siguientes estructuras:

a. Pantallas estabilizadoras de rasante (6 unidades)

Las pantallas estabilizadoras de rasante son estructuras de concreto armado diseñadas para estabilizar la pendiente del flujo antes del ingreso a la estructura central (4 und) y a la salida de la misma (2 und); además, atenuarán el impacto de material sedimentario y estabilizarán el flujo en las épocas de mayores caudales.



Figura 28: Ubicación de Pantallas estabilizadoras de rasante

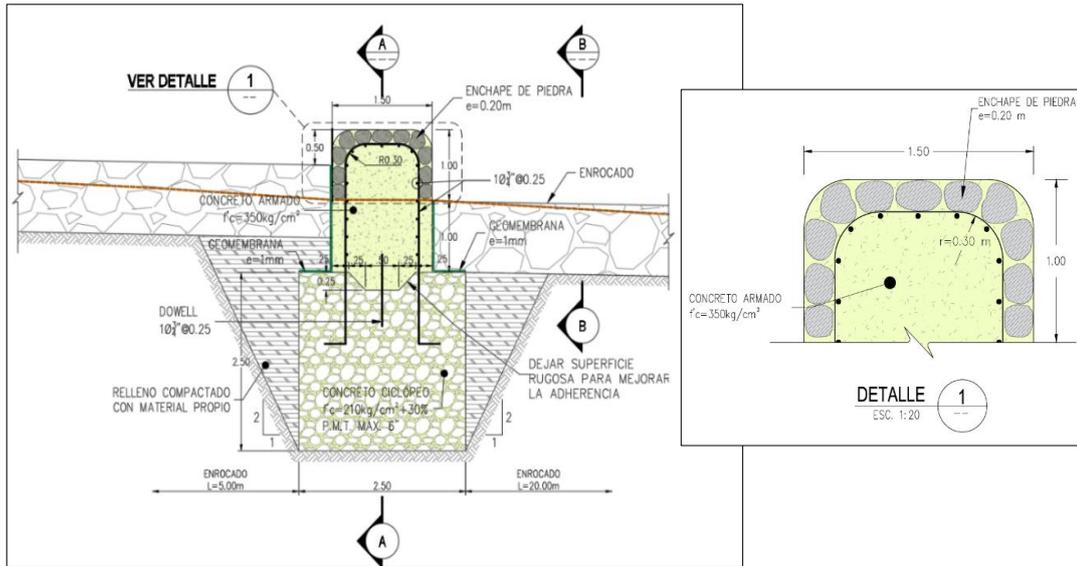


Figura 29: Sección de pantallas estabilizadoras de rasante

Las pantallas estarán emplazadas de acuerdo a la siguiente distribución y en las progresivas descritas:

Tabla 11: Progresiva de Pantallas

Pantallas	PP1	PP2	PP3	PP4	PP5	PP6
Progresiva	0+005.75	0+107.25	0+208.75	0+310.25	0+689.75	0+791.25

b. Dique de encauzamiento

Los Diques de encauzamiento son estructuras hidráulicas de enrocado acomodado con equipo y mano de obra calificada, con 70% de roca de 1.0 m de diámetro y la diferencia con roca de 0.30 m. Se ubica en ambas márgenes desde las progresivas 0+005 – 0+401 y 0+599 – 0+792, tal como se muestra en la siguiente figura.

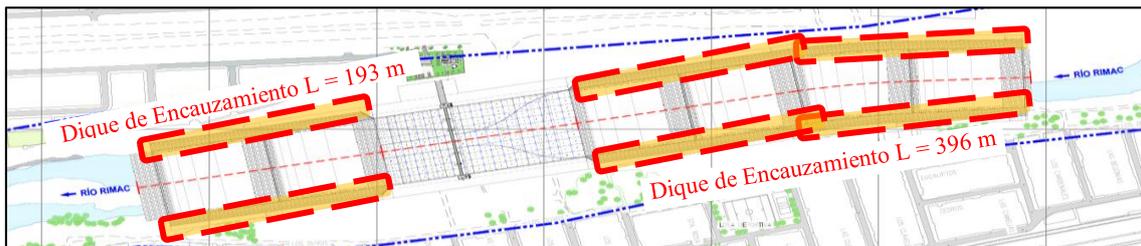


Figura 30: Dique de encauzamiento

c. Transición de ingreso y salida

Es la transición entre el río encauzado por los diques enrocados de sección trapezoidal y la estructura central con sección rectangular; inicia en la progresiva 0+401 m con una longitud de 10 m en toda la sección del cauce. Los taludes están conformados por un emboquillado de roca acomodada contenidos en la parte final de los muros de contención; la base del cauce está cubierta de enrocado acomodado con espesor de 1.0 m, similar al enrocado de protección de las pantallas estabilizadoras de rasante. La transición de salida se ubica en la progresiva 0+589 m y cuenta con un enrocado base que se extiende 20m.

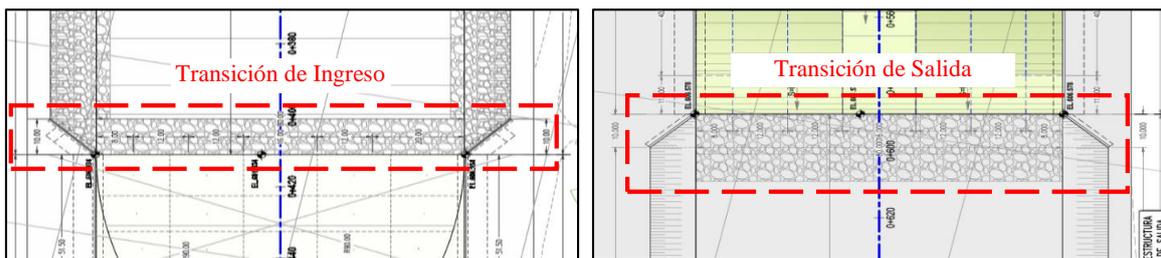


Figura 31: Transición de ingreso y salida

4.1.2. Permanencia de bombeo

El sistema requiere un bombeo continuo para minimizar la desviación estándar de las mediciones, lo que implica un funcionamiento constante tanto en épocas de avenidas como durante el estiaje. Durante los periodos de caudal mínimo, es importante tener en cuenta el nivel de agua con el fin de prevenir problemas de sumergencia en el proceso de bombeo.

Con base en los requisitos del proceso de bombeo, se identifica que la sumergencia mínima necesaria debe estar en el orden de 0.20 metros. Por lo tanto, para garantizar un funcionamiento continuo, se debe mantener un nivel de 0.5 metros. Para cumplir con este criterio durante períodos de caudales mínimos, se planifica reducir la sección hidráulica a 16 metros, lo cual se logrará mediante la implementación de una estructura central con una transición alabeada.

a. Estructura central

La estructura central está conformada por tres plataformas, dos laterales idénticas y una central, construidas en concreto armado $f'c=280$ kg/cm² con un espesor de losa de 0.30 m

y la cimentación de concreto ciclópeo $f'c=100 \text{ kg/cm}^2 + 30\% \text{ P.G.}$ con un espesor de losa de 0.70 m. Inicia en la progresiva 0+411 m y termina en la progresiva 0+589 m.

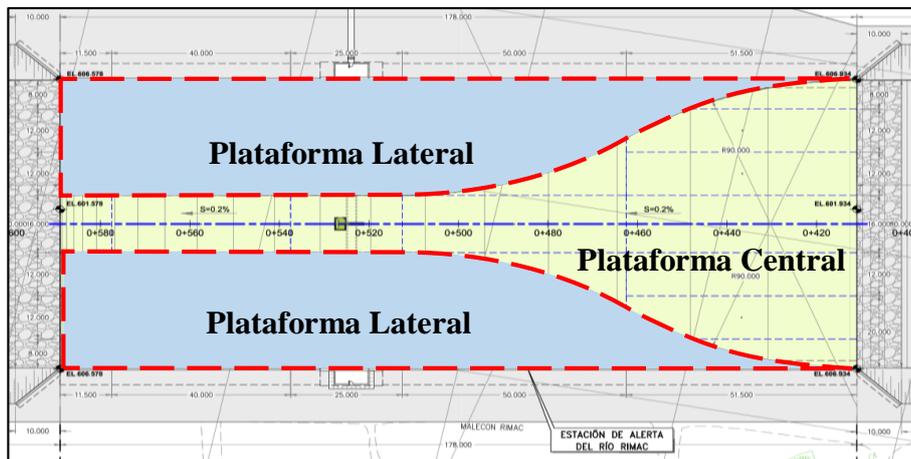


Figura 32: Plataforma central y laterales

La plataforma central está diseñada como una transición alabeada de doble radio de 90m en un tramo de 101.5m para reducir el ancho del cauce de 80m a 16m y lograr elevar el tirante hidráulico en épocas de estiaje, a un nivel suficiente que permita el bombeo de muestras de agua desde la sección de control de forma permanente.

Las plataformas laterales inician desde la progresiva 0+411 m hasta 0+512.5 m a pendiente cero y 0.5m sobre la plataforma central; a partir de allí desciende a pendiente de 0.2% por los siguientes 25m para luego encontrar la cota de la plataforma central en los siguientes 40m y finalizar a pendiente de 0.2% en un tramo de 11.5m.

4.1.3. Nivel variable de impulsión

Para realizar el monitoreo de los parámetros de calidad, es necesario que el sistema obtenga muestras de agua a diferentes niveles de la superficie. Esto se debe a las particularidades de los contaminantes o parámetros que se están evaluando; por ejemplo, los hidrocarburos que tienden a concentrarse en la capa superficial del flujo.

Esta condición se cumple al ubicar los puntos de captación a distintas alturas, como se recomienda en el ítem 2.3.2 de este documento. Es importante destacar que el sistema se encuentra instalado en las casetas de bombeo, las cuales están posicionadas sobre los

pilares de un puente pasarela.

a. Caseta de bombeo

Las casetas de bombeo son estructuras de concreto armado $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ construidas sobre los pilares 1, 3 y 5, que albergan al sistema de bombeo para la succión, toma de muestra del cauce e impulsión al centro de monitoreo automatizado.

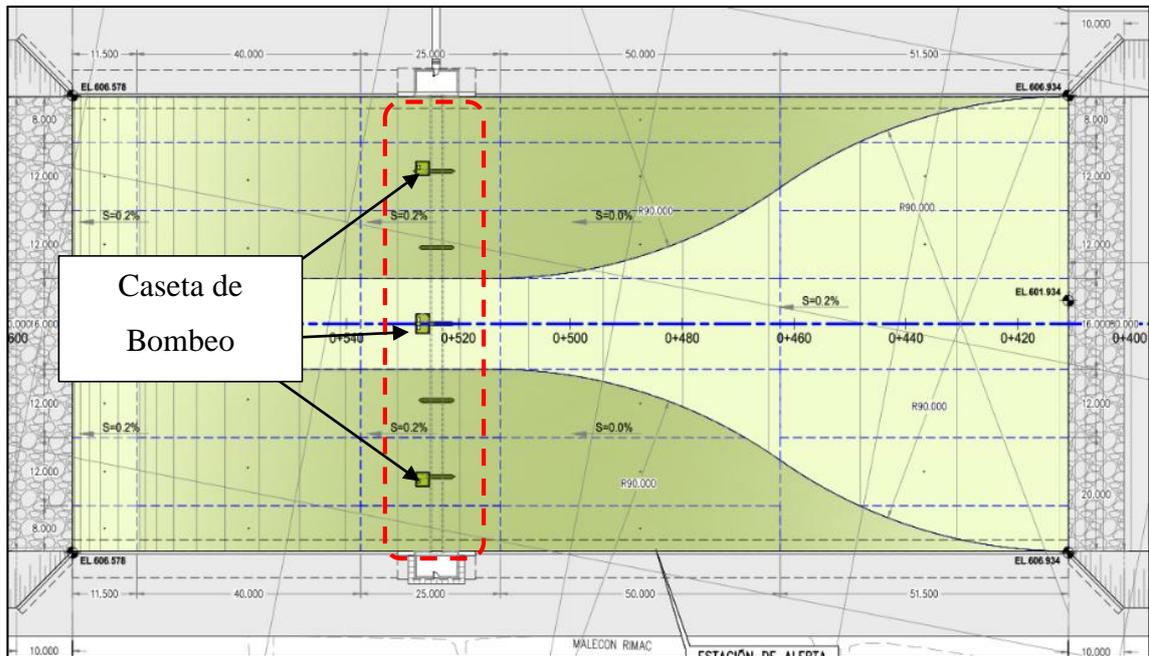


Figura 33: Ubicación de casetas de bombeo

El sistema de bombeo consta de siete tuberías de succión instaladas a diferentes alturas, cada una controlada por una electroválvula. Estas tuberías se unen en una sola conducción que dirige el flujo hacia una bomba peristáltica, encargada de impulsar la muestra hasta el centro de alerta. La apertura de las electroválvulas se controla en función del tirante hidráulico medido en el río.

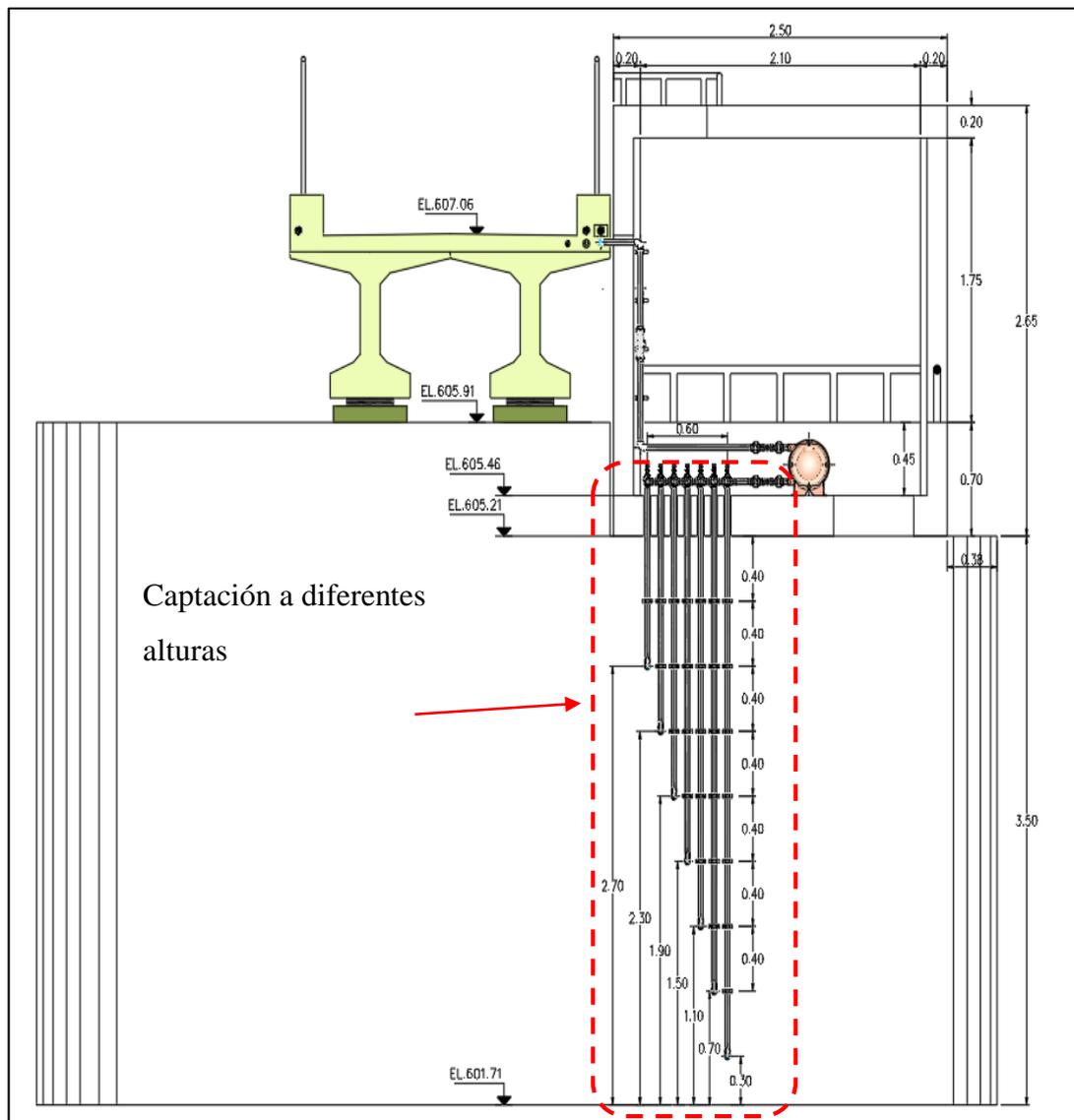


Figura 34: Sistema de captación a diferentes alturas

El bombeo funciona de forma alternada entre las casetas, siendo en caso de estiaje solo el bombeo de la caseta central que cuenta con doble sistema. El funcionamiento es continuo, pudiendo paralizarse únicamente cuando los niveles de turbidez superan los 4000 NTU.

Además, todas las tuberías de succión están protegidas por mallas de acero electrosoldadas, adosadas a la estructura del pilar del puente, encapsulando el equipamiento y resguardando de impactos de material de arrastre y de posibles actos vandálicos.

4.2. CAUDAL DE DISEÑO

Los caudales de de máximas avenidas se calcularon en el Estudio de Hidrología contenido en el Estudio de Perfil del Proyecto “Creación de Estación de Alerta del río Rímac” (2019) mediante la metodología de Hidrograma Unitario Sintético de Clark, en el software HEC-HMS. Los resultados de este modelamiento hidrológico establecieron un escenario base, sobre el cual se aplicó la metodología del Factor de Cambio, usando un delta de 5%, para establecer un escenario con cambio climático.

Sobre este último escenario, se determinó el caudal de diseño para las obras de captación, el cual se eligió siguiendo la metodología de la ANA, descrita en RJ N°153-2016, que menciona que para modelos hidráulicos realizados en zonas urbanas se debe escoger un Periodo de Retorno de 100 años.

Para la finalidad de la investigación y con la información del Estudio Hidrológico se consideró este periodo de retorno válido; sin embargo, de querer profundizar el análisis se recomienda usar un riesgo adecuado para el tipo de estructura o promedio por estructuras de similar funcionalidad.

4.3. MODELAMIENTO HIDRÁULICO

En este capítulo, se exponen los resultados del modelamiento hidráulico bidimensional efectuado en el software IBER 2D, centrándonos en la captación fluvial del río Rímac para un período de retorno de 100 años.

Los parámetros que han sido objeto de evaluación incluyen las variables hidráulicas de velocidad del flujo, el nivel del agua o calado, y el número de Froude. Estos parámetros proporcionan una comprensión del comportamiento hidrodinámico en la estructura de captación y son fundamentales para garantizar el rendimiento y la eficiencia de la infraestructura en condiciones hidrológicas extremas. Los resultados obtenidos en esta etapa de análisis contribuyen significativamente a la toma de decisiones en la gestión de este iberecurso hídrico para el proyecto.

4.3.1. Régimen de flujo

Como se menciona en el ítem 2.4.2 los regímenes de flujo usado en los modelamientos pueden ser permanentes o no permanentes, esto dependerá de las situaciones y aplicaciones que se busquen simular.

El objeto de la simulación en la presente investigación fue verificar los máximos niveles alcanzados por un caudal centenario en el cauce del Rímac, y su influencia a las estructuras propuestas para verificar el cumplimiento de las condiciones de captación aún en estas condiciones extremas.

De acuerdo a la finalidad de esta investigación, el tiempo de ejecución del estudio y los gastos computacionales, se definió usar la metodología de régimen permanente. Sin embargo, de querer profundizar con mayor detalle en la investigación se puede realizar un modelo a régimen no permanente, que incluye muchas nuevas variables al estudio y eleva el nivel de complejidad, obteniendo resultados más cercanos a la realidad.

4.3.2. Calibración del modelo

La calibración del modelo hidráulico es un paso fundamental en la simulación hidráulica, ya que ajusta los parámetros para tener una mejor representación de los fenómenos reales que busca simular.

Por lo general, la calibración en un modelo hidráulico se realiza en campo mediante aforos diferenciales y en una sección típica del tramo estudiado. Las variables estimadas son comparadas con las calculadas hasta encontrar el punto de equilibrio, definiendo las reales características del flujo en la sección o tramo de análisis.

Por las condiciones del presente estudio, la metodología de calibración usada fue la simplificación del método de huella máxima, definido por ANA según RJ N°153-2016, que consiste en comparar imágenes satelitales de fechas específicas con los caudales diarios reportados por ANA, en la estación más cercana (Chosica). Si bien este método es poco preciso, ayuda a verificar el comportamiento del flujo en el tramo de análisis en condiciones reales y simuladas, calibrando de esta manera el modelo hidráulico.

4.3.3. Resultados

a. Velocidades

El análisis del mapa de velocidades revela patrones interesantes en el comportamiento de la velocidad del flujo de agua en las estructuras hidráulicas.

Primero, se observa que el valor más alto de velocidad es del orden de 6.3 m/s y se ubica en el resalto de la primera pantalla, con inclinación a la margen izquierda del cauce. Este valor se puede justificar por la gran carga hidráulica que trae el río y rompe al impacto del primer obstáculo, produciendo la disipación de la energía a través de grandes velocidades. También existe incidencia de la geomorfología natural del cauce, que dispone al flujo cursar la margen izquierda debido a una ligera curvatura del río y, probablemente, por la presencia de los pilares del puente Morón. Luego, se observan valores homogéneos en el orden de 5.3 m/s en los resaltos de las siguientes pantallas, lo cual evidencia el efecto regulador de esta estructura.

Por otro lado, al ingreso de la Estructura Central se observan velocidades que varían gradualmente desde 1.5 m/s, al ingreso a la estructura, 3 m/s en la zona de captación y 4.5 m/s a la salida de esta estructura. Este cambio en las velocidades se origina debido al remanso hidráulico que se genera al producirse una modificación en la pendiente y la transición alabeada de la plataforma central, al inicio de la estructura. Luego, en la zona de captación, se da un proceso de estandarización del flujo que facilita la toma de muestras homogéneas del agua del río Rímac. Posteriormente, se introduce un segundo cambio en la pendiente con el propósito de inducir un efecto autolimpiante en la estructura, con el fin de evitar la acumulación de sedimentos que pudiera alterar el comportamiento del flujo, al mismo tiempo que se reduce la necesidad de mantenimiento.

En la siguiente figura se muestra los valores de las velocidades máximas encontradas, resultado del modelamiento.

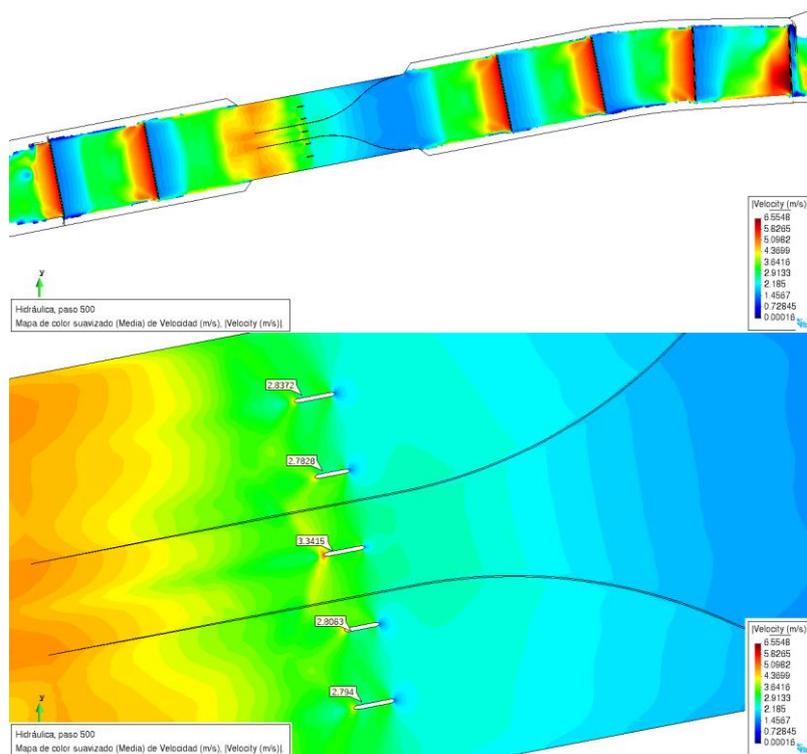


Figura 35: Mapa de velocidades máximas

b. Tirantes hidráulicos

Los resultados del tirante hidráulico o calado, proporcionan una valiosa visión del comportamiento del flujo de agua a lo largo de las estructuras de ingreso, central y salida. En las estructuras de ingreso y salida, las pantallas niveladoras de rasante funcionan como pequeñas represas, generando micro acumulaciones de agua y, en consecuencia, dando forma a una suerte de "escalera hídrica". Este fenómeno es el resultado de una secuencia de procesos hidráulicos que comienzan desde la caída vertical inicial de la primera pantalla, la cual origina un resalto hidráulico, luego de una transición y finalmente un efecto de remanso antes de continuar hacia la siguiente pantalla y repetir el ciclo. Esta secuencia de eventos se ilustra en el perfil hidráulico adjunto, donde la línea azul representa el flujo de agua y la línea roja refleja la topografía que incluye las pantallas niveladoras.

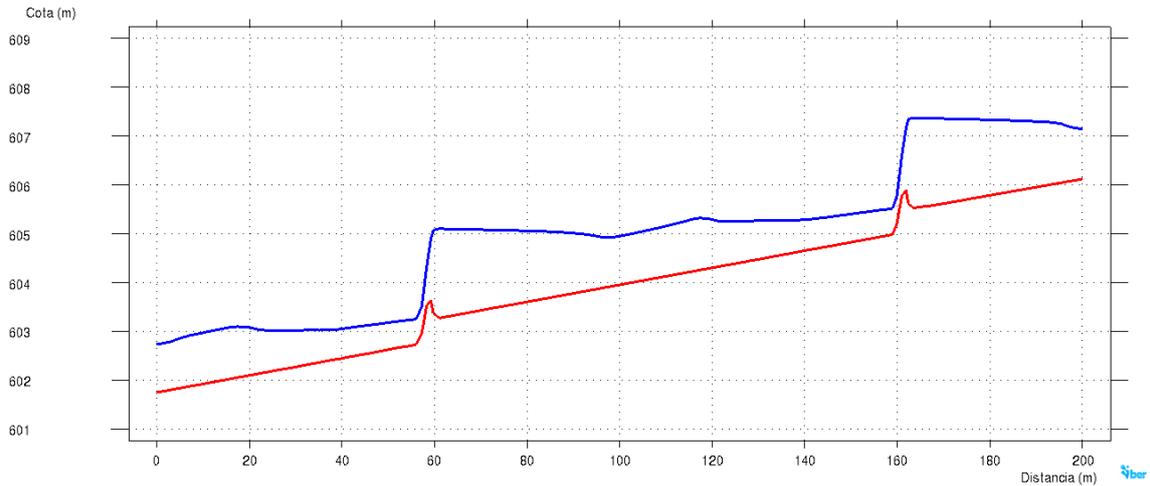


Figura 36: Perfil hidráulico de pantallas

En la estructura central, se observa la formación de un remanso que se origina en gran medida como resultado del cambio de pendiente y la transición abovedada de la plataforma central. Posteriormente, esta transición conduce a una caída hidráulica, que establece un sistema autolimpiante en la sección de control. Cabe señalar que este punto de deflexión es particularmente susceptible a procesos erosivos debido a las elevadas velocidades que se generan en esta región, como se puede verificar en la Figura 35.

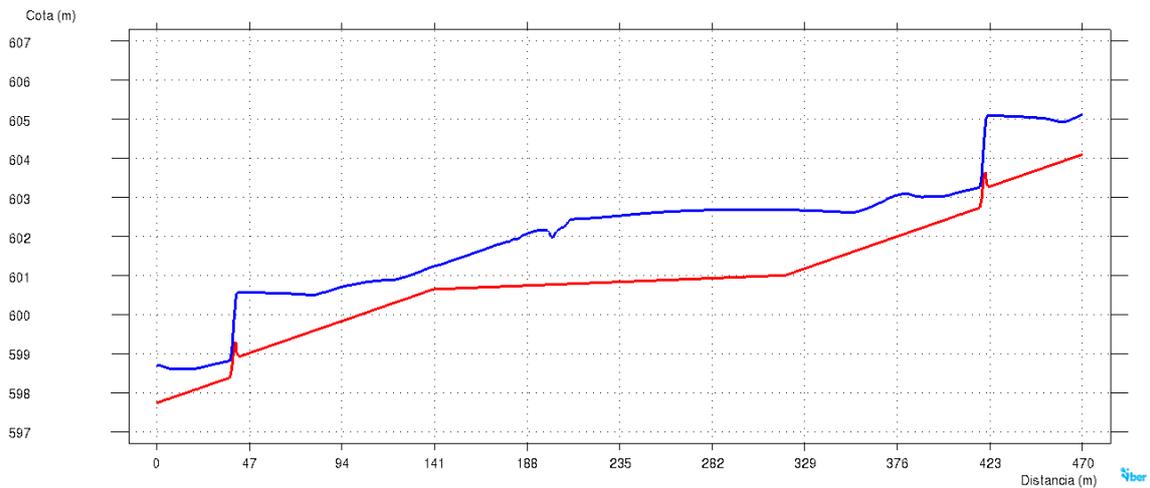


Figura 37: Perfil hidráulico en estructura central

Dentro de la sección de captación, se registra un tirante hidráulico en el rango de 1.0 metro en las plataformas laterales, mientras que en la plataforma central alcanza alrededor de 1.7 metros. Este comportamiento es ilustrado en la figura adjunta, donde se aprecia que el

canal central mantiene el nivel de agua más alto, garantizando así la permanencia del flujo en esta área específica.

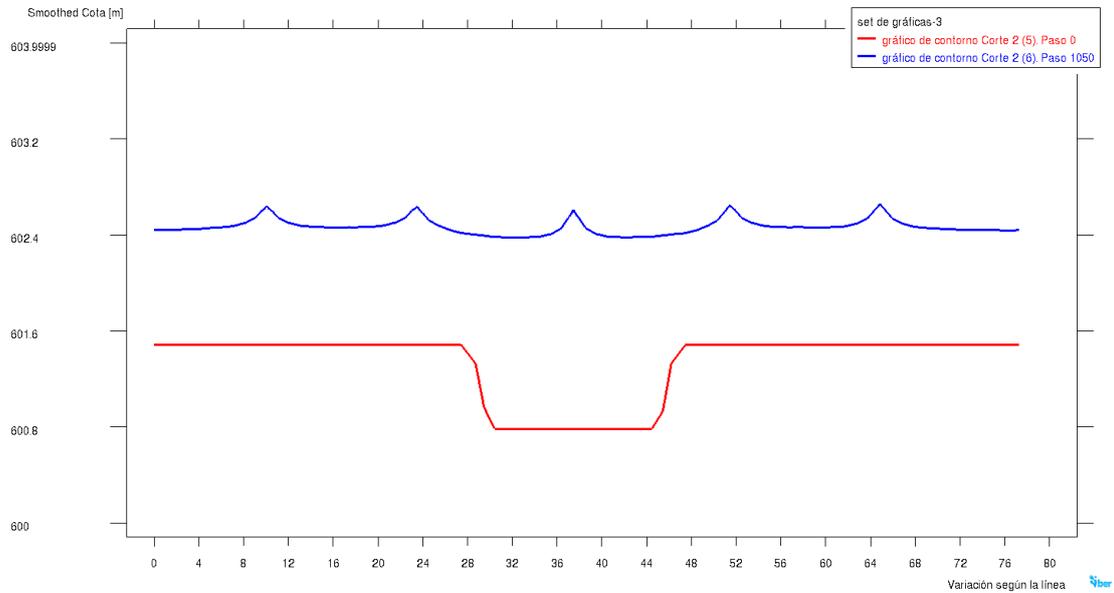


Figura 38: Sección hidráulica en captación

A continuación, se presentan los resultados del tirante hidráulico obtenidos a partir del modelamiento.

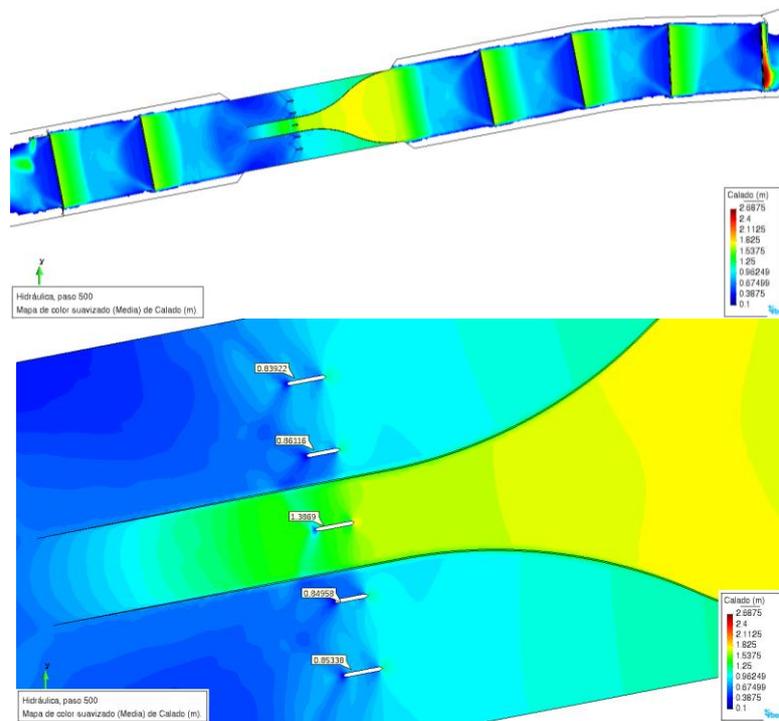


Figura 39: Tirante hidráulico

c. Número de Froude

Para un adecuado análisis del número de Froude, se tiene en cuenta las siguientes condiciones en el contexto de la captación:

- a. Flujo subcrítico ($Fr < 1$): En esta condición, la velocidad del flujo es menor que la velocidad de las ondas de gravedad. El flujo es típicamente lento y estable, lo que lo hace adecuado para la captación de agua, ya que es más fácil de controlar y manipular.
- b. Flujo crítico ($Fr = 1$): Cuando el número de Froude es igual a 1, el flujo se considera crítico. En esta condición, la velocidad del flujo es igual a la velocidad de las ondas de gravedad. El flujo crítico es importante en la teoría de diseño de canales y estructuras hidráulicas.
- c. Flujo supercrítico ($Fr > 1$): En esta condición, la velocidad del flujo es mayor que la velocidad de las ondas de gravedad. El flujo es rápido y a menudo turbulento. El flujo supercrítico puede ser más difícil de controlar y capturar para la toma de agua, y puede tener efectos erosivos significativos.

De acuerdo a los resultados del mapa del número de Froude, se observa que en la mayoría del tramo de intervención del proyecto el flujo se mantiene en condiciones subcríticas; sin embargo, se registran valores de flujos supercríticos en dos áreas específicas: aguas abajo de las pantallas y al final de la estructura central. Estos resultados son congruentes con lo representado en las figuras 35 y 39, lo que puede atribuirse a fenómenos hidráulicos como el resalto y la caída hidráulica.

En la sección de captación, se destaca la uniformidad de los valores del número de Froude, que se mantienen en torno a 0.9. Esta consistencia se traduce en una indicación positiva, insinuando que las condiciones hidráulicas de captación son estables y fácilmente controlables.

A continuación, se muestran los mapas de número de Froude, que muestran una perspectiva adicional sobre el comportamiento del flujo de agua en el sistema.

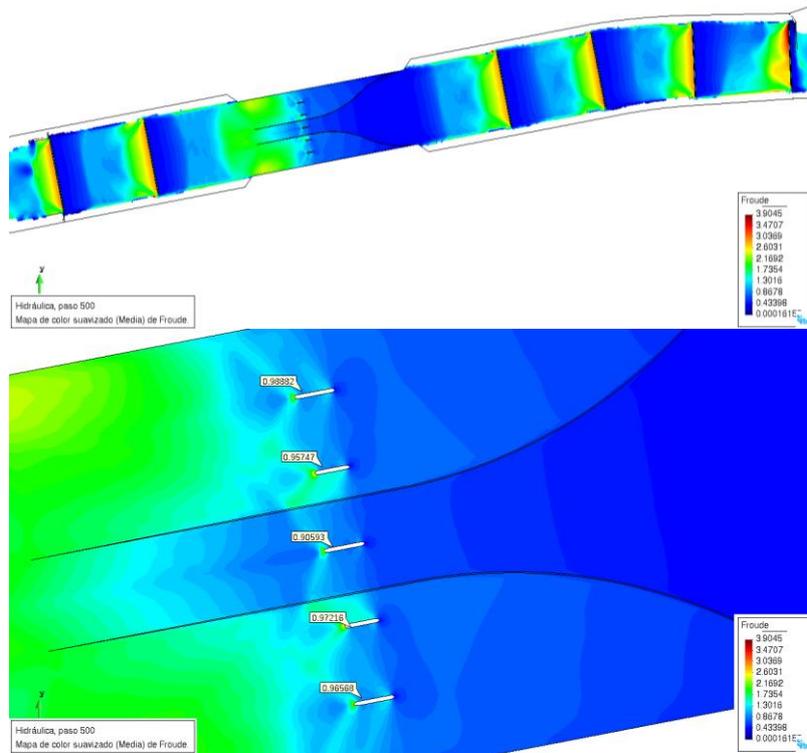


Figura 40: Número de Froude

V. CONCLUSIONES

5.1. ESTRUCTURA DE CAPTACIÓN

- Se evaluó la ubicación y disposición de las estructuras complementarias del sistema de captación, que incluye 6 pantallas niveladoras de rasante (4 al inicio y 2 al final), diques de encauzamiento enrocado en ambas márgenes y una estructura central que alberga la captación.
- Los resultados de la simulación mostraron una reducción de hasta un 20% en la velocidad del río desde de la primera pantalla al eje de medición, manteniendo el flujo en estado subcrítico (Froude en 0.90).
- Se destaca el impacto de las pantallas niveladoras de rasante sobre la modificación del comportamiento hidráulico del río, sin que su influencia resalte en épocas de máximos caudales. Este comportamiento garantiza los efectos de la estructura en la estabilización del cauce.
- Se confirma que la disposición y ubicación de estas estructuras del sistema garantizan el cumplimiento de los objetivos de la captación.
- Se evaluó y seleccionó la información topográfica disponible, así como el sistema de levantamiento y las medidas de control. Para el control horizontal se dispuso la monumentación de 2 hitos de orden C y el establecimiento de una poligonal cerrada de 4 vértices; en caso del control vertical, se realizó mediante la nivelación desde un BM oficial establecido por el IGN con una tolerancia de 6mm/km. Con la información recopilada y el software Civil 3D se generó una superficie tipo ráster en extensión *xml*.
- Del mismo modo, se evaluó la información del estudio de geología del proyecto Estación Alerta, destacando el análisis geológico local que describe las siguientes unidades estratigráficas encontradas en la zona del proyecto: depósitos fluviales (Q-fl), depósitos fluviales recientes (Q-fl_r), depósitos antrópicos (Q-ant) y depósitos aluviales (Q-al). Con esta información, se evaluó las coberturas de suelo y sus características en el análisis de rugosidades en el modelamiento hidráulico.

5.2. ESTUDIO HIDROLÓGICO

- Se evaluó la información hidrológica disponible del proyecto Estación Alerta, destacando que los valores de caudales máximos extraordinarios estimados a nivel de captación, para un escenario base, con los siguientes periodos de retorno de 10, 50, 100, 500 y 1000 años se encuentran en el orden de 156.3, 236.8, 273.4, 420.4 y 501.3 m³/s, respectivamente.

Además, para un escenario con cambio climático, estos caudales en los mismos periodos de retorno se encuentran en el orden de 169.4, 257.1, 299.3, 458.1 y 546.8 m³/s, respectivamente.

- Tomando como referencia la R.J. N°153-2016-ANA, se eligió el caudal generado por un período de retorno de 100 años (TR100), lo cual coincide con el periodo de vida útil de la estructura (50 años) y la probabilidad de ocurrencia (1%)

5.3. MODELAMIENTO HIDRÁULICO

- Se realizó el modelamiento hidráulico computarizado de la captación fluvial del proyecto Estación Alerta, en el software IBER 2D. Confirmando que se ha satisfecho las condiciones de homogenización de la mezcla, permanencia en el bombeo y captación a diferentes niveles. Como resultado se puede afirmar que la captación garantiza que las muestras de agua impulsadas son adecuadas y consistentes para el monitoreo de la calidad del río Rímac, asegurando un suministro permanente y continuo.
- Se seleccionó un régimen de flujo permanente para la simulación hidráulica, debido a las condiciones y nivel de detalle esperado.
- La calibración se realizó mediante simplificación de metodología ANA de Huella Máxima, que compara imágenes satelitales y caudales específicos con resultados de modelamiento con similares condiciones.
- Se obtuvieron resultados de mayores tirantes promedio aguas arriba de las pantallas, lo que se justifica con un fenómeno de remanso producto del cambio de condiciones supercríticas (resalto hidráulico aguas debajo de pantallas) a subcríticas (impacto con las siguientes pantallas). El mismo evento ocurre en la estructura central, que canaliza el flujo a través de la plataforma central y reduce el ancho del cauce de 80 a 16 m. Por otro lado, las mayores velocidades promedio y número de Froude se registran aguas abajo de las pantallas, posiblemente por la formación de resalto hidráulico.

VI. RECOMENDACIONES

- Debido a que el proyecto propone la implementaran pantallas niveladoras de rasante transversales al flujo del río, que tienen como efecto reducir la velocidad del agua y estabilizar el cauce, es necesario saber el comportamiento de los sólidos suspendidos y de fondo presentes en el cauce, por lo cual, se recomienda elaborar un modelo de transporte de sedimentos para caudales medios de avenidas y estiaje, que ayude a identificar las zonas donde se presenten estos fenómenos con mayor recurrencia, siendo necesarios también para poder planificar los trabajos de operación y mantenimiento del sistema.
- Para la conservación de las características hidro geomorfológicas y de las obras proyectadas se debe proyectar mantenimientos anuales del cauce mediante limpieza del mismo y de los taludes, explanaciones, eliminación de material excedente y maleza; consiguiendo así una nivelación en todo el ancho del río y manteniendo el funcionamiento de las estructuras de ingreso y salida en su labor de estabilización y homogenización del flujo.
- En una siguiente etapa del estudio, se recomienda realizar un modelamiento de calidad de aguas, con la finalidad de obtener resultados del movimiento de estos contaminantes y verificar variables adicionales a las analizadas en este estudio que puedan optimizar las condiciones de la captación.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbot, M. (1976). Computational hydraulics: A short pathology. *Journal of Hydraulic Research*, 14(4).
- Aparicio Mijares, F.J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México: Editorial Limusa.
- Autoridad Nacional del Agua. (2010). *Evaluación de los recursos hídricos en la cuenca del río Rimac: Estudio hidrológico y ubicación de la red de estaciones hidrométricas*. ANA. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12543/5>
- Autoridad Nacional del Agua. (2016). *Reglamento para la Delimitación y Mantenimiento de Fajas Marginales en Cursos Fluviales y Cuerpos Naturales y Artificiales*. ANA: https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/r.j._153-2016-ana.pdf
- Autoridad Nacional del Agua. (s.f.). *Cuenca*. Observatorio del Agua: Chillón, Rimac, Lurin: <https://portal.ana.gob.pe/glosario/cuenca>
- Autoridad Nacional del Agua. (2016). *Reglamento para la delimitación y mantenimiento de fajas marginales en cursos fluviales y cuerpos naturales y artificiales*. ANA.
- Barnes, H.H. (1967). *Roughness characteristics of natural channels*. USGS Publications Warehouse. <https://doi.org/10.3133/wsp1849>
- Castellet, E.B., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., . . . Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1-10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Chow, V.T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. (J.G. Saldarriaga, Trad.) McGraw-Hill.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W. (1994). *Hidrología Aplicada*. (J. G. Saldarriaga, Trad.) McGraw-Hill.
- CivilGeeks. (1 de Setiembre de 2023). Obras de captación - Sistema de Agua Potable. Recuperado de <https://civilgeeks.com/2010/10/08/obras-de-captacion-sistema-de-agua-potable/>
- Huggett, R.J. (2007). *Fundamentals of Geomorphology* (2th ed.). Routledge.

- Iber. (2010). *Manual de Referencia hidráulico*. España.
- Mejía Marcacuzco, J.A. (2006). *Hidrología Aplicada*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2012). *Manual de Hidrología y Drenaje*. http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_2950.pdf
- Organización Meteorológica Mundial. (2011). *Guía de prácticas hidrológicas: Volumen II Gestión de recursos hídricos* (6ta ed.). https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10038
- Ponce, V. & Lugo, A. (2001). Modeling looped ratings in Muskingum-Cunge routing. *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, 6(2), 119-124.
- Robles, T. (2016). *Tesis grado: Implementación de modelos unidimensionales para la simulación del funcionamiento hidráulico de sistemas de lagunas y canales*. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rocha Felices, A. (1998). *Introducción a la Hidráulica Fluvial* (Primera ed.). Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Servicio de Agua Potable para Lima y Callao. (2019). *Creación de Estación de Alerta del río Rímac, distrito de Lurigancho - Chosica, Lima*. SEDAPAL.
- Trujillo Leiva, I. (2022). *Modelación hidráulica bidimensional de la bocatoma del río Lullán, distrito de Caráz, provincia Huaylas, región Acash*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12996/5729>
- Vergara Sanchez, M. (1993). *Técnicas de modelación en hidráulica*. Ciudad de México, México: Alfaomega.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: TABLA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES RÍO RÍMAC

Registro Histórico Estación Chosica

Estación : Chosica - 202906 **Longitud :** -76.69 "W" **Dpto.:** Lima
Parámetro : Precipitación (mm) **Latitud :** -11.93 "S" **Prov.:** Lima
Altitud : 867 m.s.n.m. **Dist.:** Lurigancho

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom
2000	59.4	73.5	80.2	60.6	37.8	26.3	22.8	21.6	21.5	23.6	23.4	29.5	40.0
2001	72.8	67.0	88.1	60.0	33.3	27.7	26.7	26.7	26.6	26.2	28.7	26.9	42.5
2002	27.6	43.6	59.1	49.4	23.5	20.6	21.0	22.2	27.1	28.3	33.0	36.5	32.7
2003	48.6	56.8	83.3	56.8	32.0	28.1	27.9	27.1	27.6	26.5	29.9	31.0	39.6
2004	25.7	44.5	37.1	31.9	22.7	22.1	22.2	21.8	22.8	23.0	29.0	40.1	28.6
2005	43.9	39.4	45.4	38.2	25.6	24.6	23.7	24.1	24.0	24.3	23.6	25.3	30.2
2006	33.5	50.0	65.4	55.4	27.5	23.4	23.3	23.3	21.3	20.9	20.4	29.2	32.8
2007	47.3	51.0	68.0	57.8	27.7	21.3	16.8	19.8	19.4	19.6	19.7	18.9	32.3
2008	34.8	46.5	45.9	27.0	18.1	23.0	22.8	23.3	21.7	22.1	22.6	26.0	27.8
2009	39.2	69.0	72.1	45.4	19.9	18.8	18.4	19.4	20.5	20.8	29.5	38.9	34.3
2010	53.7	49.7	64.2	42.5	26.4	24.2	23.8	23.2	24.3	22.8	23.1	30.6	34.1
2011	40.0	53.5	55.6	58.6	32.6	27.4	24.8	24.9	23.8	23.8	26.2	32.0	35.3
2012	34.0	70.4	68.7	67.5	35.5	26.6	26.7	24.9	23.3	25.4	36.7	37.6	39.8
2013	44.4	71.2	92.4	41.9	22.6	24.3	23.9	23.0	23.3	23.9	25.2	30.3	37.2
2014	35.1	41.8	84.6	33.3	24.6	19.7	21.1	20.9	21.7	22.1	25.3	26.8	31.4
2015	37.8	40.1	66.0	44.0	28.6	22.8	23.5	22.1	22.0	23.3	20.7	29.0	31.7
2016	22.2	38.1	46.2	32.2	21.1	20.4	22.3	19.7	21.5	20.7	21.5	18.7	25.4
2017	46.3	63.2	96.9	65.7	39.6	24.4	21.3	25.2	23.9	24.7	25.3	24.5	40.1
2018	29.6	32.1	52.8	41.0	29.1	21.6	21.8	21.4	21.0	21.6	21.5	22.4	28.0
2019	32.2	43.7	46.0	25.5	20.2	21.6	22.8	23.4	21.4	21.8	23.3	34.2	28.0
2020	33.1	45.9	42.7	33.0	26.0	20.0	20.7	20.6	20.1	21.3	22.1	43.9	29.1
2021	65.7	42.0	57.4	66.6	S/D								
Promedio	41.2	51.5	64.5	47.0	27.4	23.3	22.8	22.8	22.8	23.2	25.3	30.1	33.4
Des. Est.	12.9	12.3	17.4	13.5	6.0	2.8	2.6	2.2	2.2	2.2	4.4	6.7	4.9
Máximo	72.8	73.5	96.9	67.5	39.6	28.1	27.9	27.1	27.6	28.3	36.7	43.9	42.5
Mínimo	22.2	32.1	37.1	25.5	18.1	18.8	16.8	19.4	19.4	19.6	19.7	18.7	25.4
Nº Datos	22	22	22	22	21	21	21	21	21	21	21	21	21

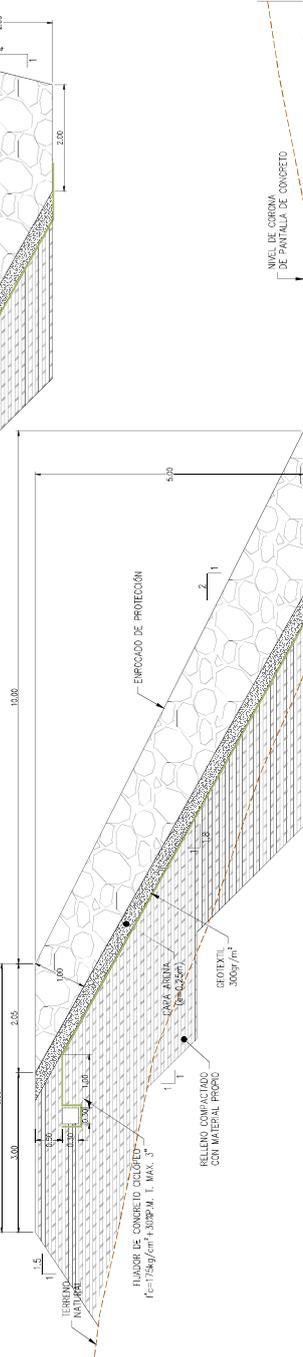
S/D: Sin Dato

FUENTE: SENAMHI

**ANEXO 2: PLANOS DE DISEÑO DE PANTALLA, DIQUE, ESTRUCTURA
CENTRAL, SISTEMA DE CAPTACIÓN**

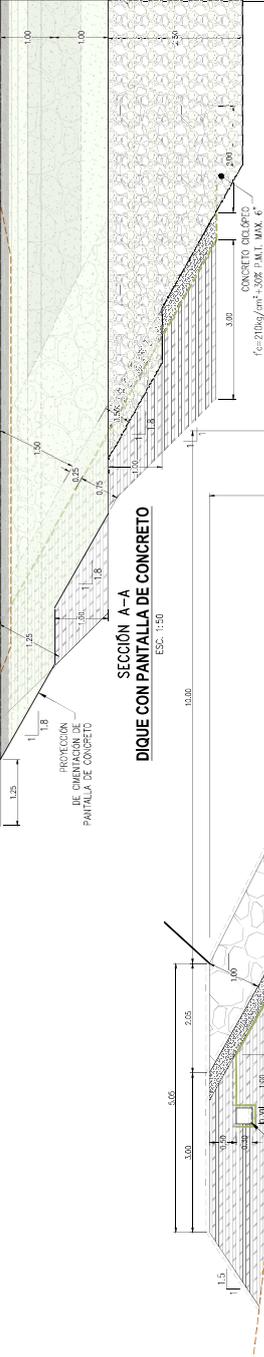


SECCIÓN TÍPICA - DIQUE
ESC. 1:50

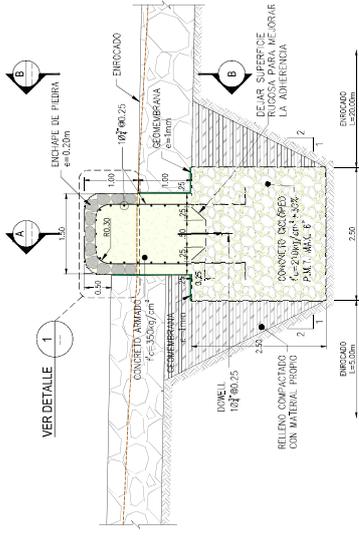
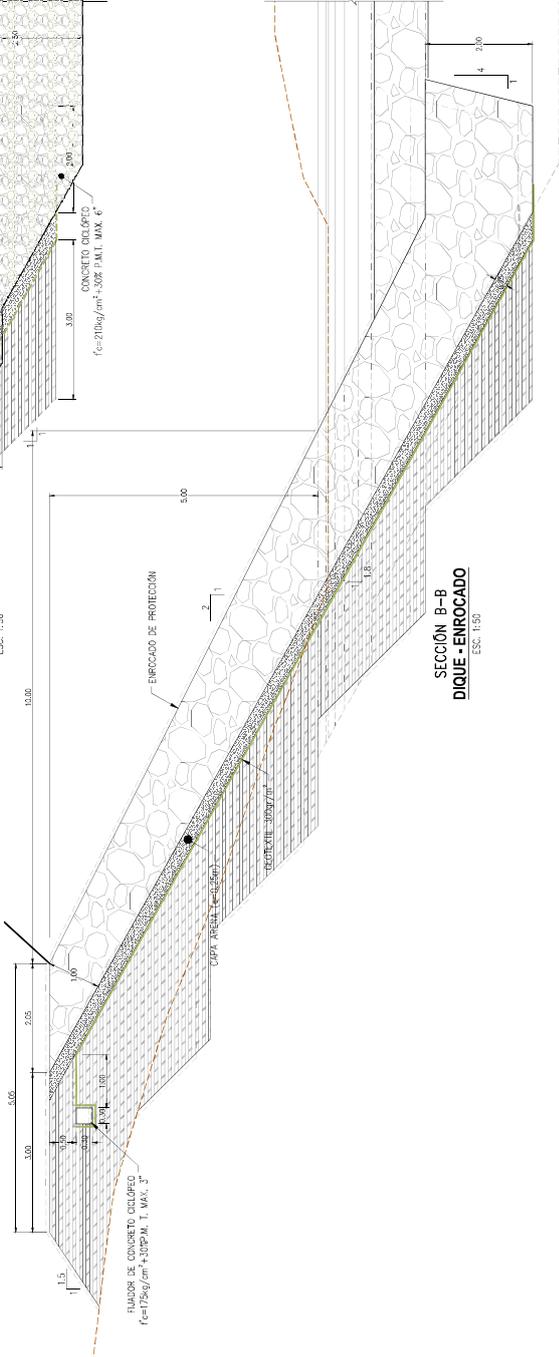


SECCIÓN TÍPICA - PANTALLA DE CONCRETO
ESC. 1:50

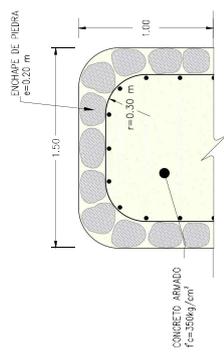
SECCIÓN A-A
DIQUE CON PANTALLA DE CONCRETO
ESC. 1:50



SECCIÓN B-B
DIQUE - ENROCCADO
ESC. 1:50

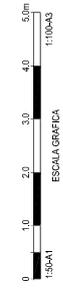


DETALLE 1
ESC. 1:20



SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
	CONCRETO ARMADO F _c =30MPa F _t =3.0MPa
	CONCRETO CICLOPEO F _c =10MPa F _t =1.0MPa
	ENROCCADO P.T. MÁX. 300gr/m ²
	GEOTEXTIL 300gr/m ²
	CAPA ARENA (e=0.20m)

NOTA:
- EL ENROCCADO DE PIEDRA
CON APOYO DE MANO DE OBRA CALIFICADA
TAMANO MÁX. 1.00m x 0.30m x 0.30m
TAMANO MÍN. 0.30m x 0.30m x 0.30m



SERVICIO DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE LIMA

CONGRESO PÚBLICO N° 009-2021 - SEDAPAL

SERVICIO DE CONSULTORÍA DE OBRA PARA LA ELABORACIÓN DEL ESTUDIO DERIVATIVO Y EXPEDIENTE TÉCNICO DEL PROYECTO DE CREACIÓN DE ALBERTA DEL RÍO RÍMAC, CIUDAD DEL DISTRITO DE LUNARIGUANO - PROVINCIA DE LIMA - DEPARTAMENTO DE LIMA

PLANO N°: 321.002-04R

PROYECTO: DISEÑO HIDRÁULICO
PANTALLA ESTABILIZADORA DE RASANTE
ESTACIÓN DE ALBERTA DEL RÍO RÍMAC

FECHA: 1 de 1
ING. ALBERTO CHEVARIA
ING. ARQUIMEDES SANCHEZ
REVISOR: ENTREGABLE 5
APROBADO: DEPARTAMENTO
ING. HIRSH CAMPUZANO E. ANA. DIRECCIÓN M. MARZO 2023. REVISOR: REV. D.

**ANEXO 3: MAPA DE MODELO HIDRÁULICO VELOCIDAD, TIRANTE Y
FROUDE**

304800

305100

305400



8675400

8675400

8675200

8675200

8675000

8675000

Pozo 820

Estructura Central

Pantallas Niveladoras de Rasante

Pantallas Niveladoras de Rasante



ESCALA GRAFICA
 SISTEMA DE COORDENADAS: WGS 1984 UTM ZONA 18S
 DATUM: WGS84 PERU

0 0.025 0.05 0.1 Km

SERVICIO DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE LIMA

CONCURSO PÚBLICO N° 0008-2021 - SEDAPAL

SERVICIO DE CONSULTORÍA DE OBRA PARA LA ELABORACIÓN DEL ESTUDIO DEFINITIVO Y EXPEDIENTE TÉCNICO DEL PROYECTO: CREACIÓN ESTACIÓN DE ALERTA DEL RÍO RÍMAC, CHOSICA DEL DISTRITO DE LURIGANCHO - PROVINCIA DE LIMA - DEPARTAMENTO DE LIMA

PLANO DE DISEÑO HIDRÁULICO	321.002 - EAR		
TIRANTE TR=100 años CP			
MODELAMIENTO HIDRÁULICO	MH-121		
1 de 1			
DISEÑO: A. CHEVARRIA C.	DIRECCIÓN: A. SANCHEZ CH.	ESCALA: 1:1,100	FORMA: ENTREGABLE 3
APROBADO: H. CAMPUZANO E.	DESARROLLADO: A. OREJON M.	FECHA: FEB. 2022	VERSIÓN: Rev. D

304800

305100

305400

304800

305100

305400



8675400

8675400

8675200

8675200

8675000

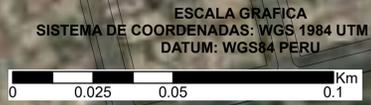
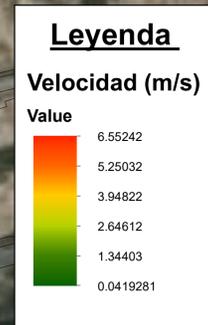
8675000

Pozo 820

Estructura Central

Pantallas Niveladoras de Rasante

Pantallas Niveladoras de Rasante



SERVICIO DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE LIMA

CONCURSO PÚBLICO N° 0008-2021 - SEDAPAL

SERVICIO DE CONSULTORÍA DE OBRA PARA LA ELABORACIÓN DEL ESTUDIO DEFINITIVO Y EXPEDIENTE TÉCNICO DEL PROYECTO: CREACIÓN ESTACIÓN DE ALERTA DEL RÍO RÍMAC, CHOSICA DEL DISTRITO DE LURIGANCHO - PROVINCIA DE LIMA - DEPARTAMENTO DE LIMA

PLANO DE DISEÑO HIDRÁULICO	321.002 - EAR		
VELOCIDAD TR=100 años CP	MH-121		
MODELAMIENTO HIDRÁULICO	1 de 1		
DISEÑO: A. CHEVARRIA C.	DIRECCIÓN: A. SANCHEZ CH.	ESCALA: 1:1,100	FORMA: ENTREGABLE 3
APROBADO: H. CAMPUZANO E.	DESARROLLADO: A. OREJON M.	FECHA: FEB. 2022	VERSIÓN: Rev. D

304800

305100

305400

304800

305100

305400



8675400

8675400

8675200

8675200

8675000

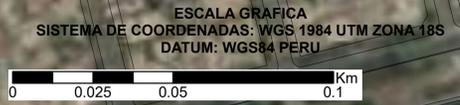
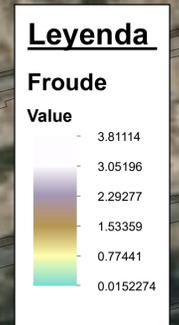
8675000

Pozo 820

Estructura Central

Pantallas Niveladoras de Rasante

Pantallas Niveladoras de Rasante



SERVICIO DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE LIMA

CONCURSO PÚBLICO N° 0008-2021 - SEDAPAL

SERVICIO DE CONSULTORÍA DE OBRA PARA LA ELABORACIÓN DEL ESTUDIO DEFINITIVO Y EXPEDIENTE TÉCNICO DEL PROYECTO: CREACIÓN ESTACIÓN DE ALERTA DEL RÍO RÍMAC, CHOSICA DEL DISTRITO DE LURIGANCHO - PROVINCIA DE LIMA - DEPARTAMENTO DE LIMA

PLANO DE DISEÑO HIDRÁULICO		321.002 - EAR
FROUDE TR=100 años CP		MH-121
MODELAMIENTO HIDRÁULICO		1 de 1
DISEÑO A. CHEVARRIA C.	DIRECCIÓN A. SANCHEZ CH.	ESCALA 1:1,100
APROBADO H. CAMPUZANO E.	DESARROLLADO A. OREJÓN M.	FECHA FEB. 2022
		REVISIÓN ENTREGABLE 3 Rev. D

304800

305100

305400

ANEXO 4: PANEL FOTOGRÁFICO



Figura 41: Cobertura de suelo existente en cauce río Rímac



Figura 42: Vista del río Rímac - Estructuras de ingreso



Figura 43: Vista río Rímac - Estructura Central



Figura 44: Vista río Rímac - Estructura de Salida