

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA



TESIS

“DESCOLMATACIÓN INDUCIDA AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE, INCLUYENDO PARTE FUSIBLE DE LA CAPTACIÓN “RÍO PORCÓN”, VARIACIÓN DEL ÁREA DEL BOCAL Y DE LA MORFOLOGÍA DEL RÍO PORCÓN – CAJAMARCA 2025”

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO HIDRÁULICO

AUTOR:

Bach. LUIS CARLOS BARRENA AVILA

ASESOR:

Dr. Ing. JOSÉ FRANCISO HUAMÁN VIDAURRE

CAJAMARCA - PERÚ

2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. Investigador: LUIS CARLOS BARRENA AVILA
DNI: 71205712
Escuela Profesional: INGENIERÍA HIDRÁULICA
2. Asesor: Dr. Ing. JOSÉ FRANCISCO HUAMÁN VIDAURRE.
Facultad: INGENIERÍA.
3. Grado académico o título profesional
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
4. Tipo de Investigación:
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación: DESCOLMATACIÓN INDUCIDA AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE, INCLUYENDO PARTE FUSIBLE DE LA CAPTACIÓN "RÍO PORCÓN" , VARIACIÓN DEL ÁREA DEL BOCAL Y DE LA MORFOLOGÍA DEL RÍO PORCÓN-CAJAMARCA 2025
6. Fecha de evaluación: 22 de Febrero de 2026
7. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 14 %
9. Código Documento: oid:3117:559633182
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 22 de febrero del 2026.



Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148258601 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 22/02/2026 22:01:03-0500

FIRMA DEL ASESOR

Nombres y Apellidos: JOSÉ FRANCISCO HUAMÁN VIDAURRE

DNI: 26609077

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

ACTA N° 0124-2026

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca, la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, da a conocer que a los **trece días del mes de marzo de 2026**, siendo las quince horas con treinta minutos (3:30 p.m.) en la Sala de Audiovisuales (Ambiente 1A - Segundo Piso), de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca, se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Hugo Emmanuel Rodríguez Chico.
Vocal : Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez.
Secretaria : M.Cs. Ing. Frecia Seminario Cadenillas.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada *DESCOLMATACIÓN INDUCIDA AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE, INCLUYENDO PARTE FUSIBLE DE LA CAPTACIÓN "RÍO PORCÓN", VARIACIÓN DEL ÁREA DEL BOCAL Y DE LA MORFOLOGÍA DEL RÍO PORCÓN - CAJAMARCA 2025*, presentado por el Bachiller en Ingeniería Hidráulica *LUIS CARLOS BARRENA AVILA*, asesorado por el Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 04 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 11 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 18 PTS

Dieciséis. (En letras)

En consecuencia, se lo declara *APROBADO* con el calificativo de *Dieciséis* acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las *4:30 P.m.* horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

M.Cs. Ing. Hugo Emmanuel Rodríguez Chico.
Presidente

Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez.
Vocal

M.Cs. Ing. Frecia Seminario Cadenillas.
Secretaria

Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre.
Asesor

COPYRIGHT© 2025 by
LUIS CARLOS BARRENA AVILA
Todos los Derechos Reservados

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme llegar hasta aquí, por darme salud, sabiduría y fortaleza durante toda esta etapa académica.

A mi madre, la Sra. Jheny Soraya Avila Vargas por su amor inmenso, por ser mi mayor fuente de motivación en los días difíciles y por nunca rendirse conmigo motivándome a seguir adelante mejorando siempre como persona y profesional.

A mi tío, el Sr. Juan Avila Vargas por su apoyo incondicional, sus sabios consejos y por haber ocupado un lugar fundamental en mi vida, como guía y figura paterna.

Al Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre, mi asesor, por su paciencia, orientación profesional y compromiso durante la realización de esta tesis. Sus observaciones y enseñanzas fueron fundamentales para alcanzar este objetivo.

Al Ing. Francisco Gutiérrez Ucañan y a su empresa “G&S SERVICIOS DE INGENIERIA” por su apoyo con los estudios y uso de su laboratorio de mecánica de suelos.

Al Ing. Andrés Quispe y a su empresa “SIAN CONSTRUTECH” por su apoyo en la fabricación y donación de los modelos de barrages empleados en esta investigación, los cuales fueron elaborados en su taller mecánico.

Y finalmente a mis amigos y familiares, quienes fueron parte esencial en este camino por ayudarme con los trabajos de topografía, aforo de caudales, recolección del material y la construcción del modelo.

DEDICATORIA

A mi madre, quien me enseñó que para llegar lejos hay que trabajar duro y que siempre hay que estar dispuesto a ir por más. Su ejemplo, esfuerzo y constancia han sido una fuente de inspiración en mi vida.

A mis abuelas, la Sra. Rosa Betty Vargas Polo y la Sra. Ana Mercedes Polo Álvarez por haber sembrado en nuestra familia los valores fundamentales de ser siempre personas de bien y por enseñarnos que una profesión es una herramienta poderosa para salir adelante.

LUIS CARLOS BARRENA AVILA

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	III
DEDICATORIA	IV
INDICE DE TABLAS	VII
INDICE DE FIGURAS	VIII
RESUMEN XI	
ABSTRACT	XII
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.4. ALCANCES O DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.5. LIMITACIONES	4
1.6. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	6
2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN	6
2.2. BASES TEÓRICAS	9
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	46
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS	48
3.1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	48
3.2. MATERIALES, EQUIPOS Y SOFTWARES	50
3.3. PROCEDIMIENTO	51
CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN RESULTADOS	64
4.1. CAUDALES DEL RÍO PORCÓN	64
4.2. GRANULOMETRÍA SUPERFICIAL DEL RÍO PORCÓN	66
4.3. GRANULOMETRÍA SUBSUPERFICIAL DEL RÍO PORCÓN	69
4.4. CÁLCULO DEL CAUDAL DOMINANTE	70
4.5. CAPTACIÓN DERIVADORA “RÍO PORCÓN”	71
4.6. DATOS DEL PROTOTIPO	72
4.7. DISEÑO DEL MODELO FÍSICO	72

4.8.	VERIFICACIÓN DE LA SIMILITUD SEDIMENTOLÓGICA	74
4.9.	USO DE AGUA CLARA EN MODELOS DE FONDO MÓVIL Y SU EFECTO EN LA SIMILITUD SEDIMENTOLÓGICA	79
4.10.	INVARIABILIDAD DEL PESO ESPECÍFICO DEL FLUIDO AL ESCALAR UN MODELO FÍSICO	79
4.11.	CAUDALES Y TIEMPOS PARA LOS ENSAYOS	80
4.12.	CALIBRACIÓN DEL MODELO FÍSICO	82
4.13.	IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA FIJO-FUSIBLE	83
4.14.	ENSAYOS EN MODELO FÍSICO EN DISTINTAS CONDICIONES	86
	CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	100
5.1.	CONCLUSIONES	100
5.2.	RECOMENDACIONES	102
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
	ANEXOS	107

INDICE DE TABLAS

TABLA 1: FRECUENCIAS RECOMENDADAS PARA CAUDAL A CAUCE LLENO	10
TABLA 2: ESCALA GRANULOMÉTRICA DE SEDIMENTOS Y PROPIEDADES APROXIMADAS	18
TABLA 3: DISTANCIAS MÍNIMAS ENTRE VERTICALES RECOMENDADAS	23
TABLA 4: PARÁMETROS DE DISEÑO DE CAPTACIÓN DERIVADORA CON BARRAGE FIJO-FUSIBLE	32
TABLA 5: <i>PARÁMETROS DE DISEÑO DE CAPTACIÓN DERIVADORA CON BARRAGE FIJO-FUSIBLE.</i>	35
TABLA 6: <i>REGÍMENES DE TRANSPORTE SEGÚN EL PARÁMETRO DE SHIELDS.</i>	42
TABLA 7: <i>REGÍMENES DEL FLUJO ALREDEDOR DE LA PARTÍCULA SEGÚN RE*.</i>	44
TABLA 7: <i>COORDENADAS UTM, DISTANCIA, PROFUNDIDAD, RESISTENCIA Y TIPO DE SEDIMENTOS ENCONTRADOS EN LOS DISTINTOS PUNTOS DE SONDEO DEL RÍO.</i>	57
TABLA 9: <i>CONTEO GUJARROS Y CANTOS DEL RÍO PORCÓN PARA ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.</i>	67
TABLA 10: <i>DIÁMETROS EFECTIVOS DEL MATERIAL GRUESO DEL RÍO PORCÓN AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE.</i>	68
TABLA 11: <i>TAMIZADO DE LOS SEDIMENTOS DEL RÍO PORCÓN, AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE.</i>	69
TABLA 12: <i>DIÁMETROS EFECTIVOS DE ARENAS Y GRAVAS DEL RÍO PORCÓN AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE.</i>	70
TABLA 13: <i>CAUDAL DOMINANTE DEL RÍO PORCÓN.</i>	70
TABLA 14: <i>DATOS DEL PROTOTIPO TOMADOS EN CUENTA PARA DISEÑO DEL MODELO FÍSICO.</i>	72
TABLA 15: <i>DATOS PARA EL CÁLCULO DEL PARÁMETRO DE SHIELDS.</i>	75
TABLA 16: <i>COORDENADAS EN EL DIAGRAMA DE SHIELDS.</i>	77
TABLA 17: <i>CAUDALES DEL RÍO PORCÓN Y DURACIÓN PARA LOS ENSAYOS EN MODELO A ESCALA 1/15.</i>	81
TABLA 18: <i>CALIBRACIÓN DEL MODELO FÍSICO MEDIANTE COMPARACIÓN DE TIRANTES SOBRE EL BARRAGE - CAPTACIÓN RÍO PORCÓN A ESCALA 1/15.</i>	82
TABLA 19: <i>PROFUNDIDAD DE SEDIMENTOS REPRESENTADA EN METROS DEL PROTOTIPO.</i>	87
TABLA 20: <i>EFICIENCIA DE CAPTACIÓN EN ESTRUCTURA COLMATADA A ESCALA 1/15.</i>	88
TABLA 21: <i>PROFUNDIDAD DE SEDIMENTOS REPRESENTADA EN METROS DEL PROTOTIPO.</i>	93
TABLA 22: <i>TABLA DE DIFERENCIA PUNTO A PUNTO.</i>	94
TABLA 23: <i>EFICIENCIA DE CAPTACIÓN EN ESTRUCTURA DESCOLMATADA A ESCALA 1/15.</i>	95
TABLA 24: <i>PROFUNDIDAD DE SEDIMENTOS EN LA POZA DISIPADORA REPRESENTADA EN METROS DEL PROTOTIPO.</i>	97
TABLA 28: <i>PROFUNDIDAD DE SEDIMENTOS EN LA SEGUNDA CAPTACIÓN DE AGUA PARA RIEGO REPRESENTADA EN METROS DEL PROTOTIPO.</i>	98
TABLA 26: <i>PROFUNDIDAD DE SEDIMENTOS REPRESENTADA EN METROS DEL PROTOTIPO AL SEGUNDO DÍA.</i>	135
TABLA 27: <i>PROFUNDIDAD DE SEDIMENTOS REPRESENTADA EN METROS DEL PROTOTIPO AL TERCER DÍA.</i>	135
TABLA 28: <i>PROFUNDIDAD DE SEDIMENTOS REPRESENTADA EN METROS DEL PROTOTIPO AL CUARTO DÍA.</i>	136

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: <i>VISTAS TÍPICAS EN PLANTA, PERFIL Y SECCIONES TRANSVERSALES EN CAUCES ALUVIALES.</i>	12
FIGURA 2: <i>FORMAS DE FONDO EN CAUCES ALUVIALES.</i>	15
FIGURA 3: <i>PROCESO DE SEDIMENTACIÓN Y CAMBIOS MORFOLÓGICOS ASOCIADOS EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA.</i>	16
FIGURA 4: <i>PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS.</i>	17
FIGURA 5: <i>DIAGRAMA DE ZINGG. NOTA. FUENTE: ADAPTADO DE (VANONI, V. A. 1975).</i>	19
FIGURA 6: <i>CURVA GRANULOMÉTRICA ACUMULADA CONTINUA DE UN SUELO GRAVOSO-ARENOSO.</i>	20
FIGURA 7: <i>CAMBIO DE ELEVACIÓN DEL LECHO DEL RÍO POR AGRADACIÓN AGUAS ARRIBA Y DEGRADACIÓN AGUAS ABAJO DE UNA CAPTACIÓN.</i>	26
FIGURA 8: <i>CAPTACIÓN DERIVADORA CON BARRAGE FIJO-FUSIBLE</i>	27
FIGURA 9: <i>COEFICIENTE DE DESCARGA PARA BARRAGE FIJO-FUSIBLE.</i>	28
FIGURA 10: <i>PARTES DE UNA CAPTACIÓN DERIVADORA CON BARRAGE FIJO-FUSIBLE.</i>	29
FIGURA 11: <i>DIMENSIONES DEL BOCAL.</i>	30
FIGURA 12: <i>BOCAL CON ENTRADA TIPO GRADA.</i>	31
FIGURA 13: <i>DIAGRAMA DE SHIELDS.</i>	45
FIGURA 13: <i>UBICACIÓN DE LA CUENCA APORTANTE DEL RÍO PORCÓN.</i>	48
FIGURA 14: <i>VISTA SATELITAL DE LA ZONA DE ESTUDIO.</i>	49
FIGURA 15: <i>VISTA ELEVADA DE LAS PARTES DE LA CAPTACIÓN DERIVADORA DEL RÍO PORCÓN.</i>	51
FIGURA 16: <i>COLMATACIÓN AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE DE LA CAPTACIÓN DERIVADORA.</i>	52
FIGURA 17: <i>COLMATACIÓN AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE DE LA CAPTACIÓN DERIVADORA.</i>	52
FIGURA 18: <i>COLMATACIÓN AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE DE LA CAPTACIÓN DERIVADORA.</i>	53
FIGURA 19: <i>COLMATACIÓN Y SOCAVACIÓN AGUAS ABAJO DEL BARRAGE DE LA SEGUNDA CAPTACIÓN.</i>	53
FIGURA 20: <i>LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA ZONA DE ESTUDIO.</i>	54
FIGURA 21: <i>MUESTREO SUPERFICIAL DE SEDIMENTOS DEL RÍO PORCÓN CON SU RESPECTIVA NUMERACIÓN.</i>	55
FIGURA 22: <i>MUESTREO SUBSUPERFICIAL DE SEDIMENTOS DEL RÍO PORCÓN.</i>	58
FIGURA 23: <i>MUESTRA DE SEDIMENTO EXTRAÍDO DEL RÍO PORCÓN.</i>	58
FIGURA 24: <i>AFOROS REALIZADOS EN EL RÍO PORCÓN.</i>	59
FIGURA 25: <i>IDENTIFICACIÓN DE LA HUELLA DE AVENIDAS PARA ESTIMACIÓN DE CAUDAL DOMINANTE.</i>	60
FIGURA 26: <i>SECCIONES DEL RÍO PORCÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDAL DOMINANTE.</i>	61
FIGURA 28: <i>VARIACIÓN TEMPORAL DE CAUDALES AFORADOS Y CAUDAL PROMEDIO MENSUAL CON RANGO MÍN-MÁX EN EL RÍO PORCÓN (MAYO 2023 – ABRIL 2024).</i>	65
FIGURA 29: <i>DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS DE LAS 115 ROCAS DEL LECHO DEL RÍO PORCÓN, CLASIFICADAS SEGÚN LA ESCALA DE WENTWORTH (1922) EN GUIJARROS Y CANTOS).</i>	66
FIGURA 30: <i>DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LOS GUIJARROS Y CANTOS DEL RÍO PORCÓN.</i>	68
FIGURA 31: <i>DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE ARENAS Y GRAVAS DEL RÍO PORCÓN AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE.</i>	70
FIGURA 32: <i>DIAGRAMA DE SHIELDS – VERIFICACIÓN DE SIMILITUD SEDIMENTOLÓGICA.</i>	78
FIGURA 33: <i>PERFIL TRANSVERSAL DEL CIMACIO TIPO CREAGER - SECCIÓN FIJA DEL BARRAGE Y ATAGUÍA.</i>	84

FIGURA 34: <i>PERFIL TRANSVERSAL DEL BARRAGE FUSIBLE.</i>	84
FIGURA 35: <i>VISTA EN PLANTA DEL BARRAGE FIJO-FUSIBLE PROPUESTO – CAPTACIÓN RÍO PORCÓN.</i>	84
FIGURA 36: <i>VISTA DEL BOCAL DE CAPTACIÓN AMPLIADO TRAS INTERVENCIÓN POR LA EPS.</i>	89
FIGURA 37: <i>VISTA FRONTAL DEL BARRAGE FIJO-FUSIBLE A ESCALA 1/15.</i>	90
FIGURA 38: <i>DESCOLMATACIÓN EFECTIVA AGUAS ARRIBA Y COLMATACIÓN INICIAL EN POZA DISIPADORA.</i>	91
FIGURA 39: <i>PERFIL DE POZA DISIPADORA Y CAMBIO DE PENDIENTE AGUAS ABAJO.</i>	91
FIGURA 40: <i>ESTADO FINAL DE LA CAPTACIÓN TRAS DESCOLMATACIÓN INDUCIDA.</i>	92
FIGURA 41: <i>BOCAL LIBRE DE SEDIMENTO TRAS LA DESCOLMATACIÓN INDUCIDA.</i>	93
FIGURA 42: <i>ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS EN LA POZA DISIPADORA POSTERIOR A LA REMOCIÓN INDUCIDA EN LA CAPTACIÓN.</i>	96
FIGURA 43: <i>COLMATACIÓN TOTAL AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE DE LA SEGUNDA CAPTACIÓN TRAS LA DESCOLMATACIÓN INDUCIDA EN LA CAPTACIÓN SUPERIOR.</i>	96
FIGURA 44: <i>DISTRIBUCIÓN DE EJES DE MEDICIÓN EN LA POZA DISIPADORA.</i>	97
FIGURA 45: <i>SEDIMENTOS SUPERFICIALES AGUAS ARRIBA DE LA CAPTACIÓN “RÍO PORCÓN”.</i>	107
FIGURA 46: <i>MEDICIÓN DE PUNTOS TOPOGRÁFICOS AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE.</i>	107
FIGURA 47: <i>SEDIMENTOS SUPERFICIALES AGUAS ABAJO DE LA CAPTACIÓN “RÍO PORCÓN”.</i>	108
FIGURA 48: <i>BOCAL DE LA SEGUNDA CAPTACIÓN AGUAS ABAJO DE LA CAPTACIÓN “RÍO PORCÓN”.</i>	108
FIGURA 49: <i>LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE POZA DISIPADORA DE LA CAPTACIÓN “RÍO PORCÓN”.</i>	109
FIGURA 50: <i>ESTABLECIMIENTO DEL PRIMER PUNTO DE CONTROL (BM) DURANTE EL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO.</i> ..	109
FIGURA 51: <i>ESTABLECIMIENTO DEL SEGUNDO PUNTO DE CONTROL (BM) DURANTE EL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO.</i>	110
FIGURA 52: <i>LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA SEGUNDA CAPTACIÓN.</i>	110
FIGURA 53: <i>EXCAVACIÓN DE CALICATAS PARA LA EXTRACCIÓN DE SEDIMENTOS SUPERFICIALES CERCA AL BARRAGE.</i>	111
FIGURA 54: <i>EXCAVACIÓN DE CALICATAS AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE.</i>	111
FIGURA 55: <i>CONFIGURACIÓN DEL SEDIMENTO SUBSUPERFICIAL.</i>	112
FIGURA 56: <i>TRASLADO DEL MATERIAL LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS.</i>	112
FIGURA 57: <i>GRANULOMETRÍA DE LA MUESTRA M1 REALIZADA EN LABORATORIO.</i>	113
FIGURA 58: <i>GRANULOMETRÍA DE LA MUESTRA M2 REALIZADA EN LABORATORIO.</i>	114
FIGURA 59: <i>GRANULOMETRÍA DE LA MUESTRA M3 REALIZADA EN LABORATORIO.</i>	115
FIGURA 60: <i>GRANULOMETRÍA DE LA MUESTRA M4 REALIZADA EN LABORATORIO.</i>	116
FIGURA 61: <i>GRANULOMETRÍA DE LA MUESTRA M5 REALIZADA EN LABORATORIO.</i>	117
FIGURA 62: <i>GRANULOMETRÍA DE LA MUESTRA M6 REALIZADA EN LABORATORIO.</i>	118
FIGURA 63: <i>GRANULOMETRÍA DE LA MUESTRA M7 REALIZADA EN LABORATORIO.</i>	119
FIGURA 64: <i>GRANULOMETRÍA DE LA MUESTRA M8 REALIZADA EN LABORATORIO.</i>	120
FIGURA 65: <i>CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA METÁLICA DEL MODELO FÍSICO.</i>	121
FIGURA 66: <i>VERIFICACIÓN DE LA PENDIENTE DEL MODELO FÍSICO.</i>	121
FIGURA 67: <i>FABRICACIÓN DE LA POZA DE DISIPACIÓN DEL MODELO FÍSICO.</i>	122

FIGURA 68: <i>APLICACIÓN DE SELLADOR EN HUECOS Y FISURAS DE LA ESTRUCTURA METÁLICA DEL MODELO HIDRÁULICO.</i>	122
FIGURA 69: <i>REVESTIMIENTO DE LAS PAREDES LATERALES DEL MODELO FÍSICO CON MEZCLA DE CONCRETO.</i>	123
FIGURA 70: <i>TRABAJOS DE PINTURA Y ACABADO SUPERFICIAL DEL MODELO FÍSICO PREVIO A PRUEBAS HIDRÁULICAS.</i>	123
FIGURA 71: <i>FABRICACIÓN DE LOS BARRAGES A ESCALA PARA EL MODELO FÍSICO.</i>	124
FIGURA 72: <i>TRABAJOS DE PINTURA Y ACABADO SUPERFICIAL DE LOS BARRAGES A ESCALA.</i>	124
FIGURA 73: <i>PREPARACIÓN Y SEPARACIÓN DE FRACCIONES DE SEDIMENTOS PARA SU USO EN EL MODELO FÍSICO.</i>	125
FIGURA 74: <i>CARACTERIZACIÓN DE LA COLMATACIÓN AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE.</i>	125
FIGURA 75: <i>MEDICIÓN DE TIRANTES SOBRE LA CORONA DEL BARRAGE PARA CALIBRAR EL MODELO.</i>	126
FIGURA 76: <i>AFORO DEL BOCAL EN CONDICIÓN DE COLMATACIÓN.</i>	126
FIGURA 77: <i>APERTURA DEL 20% DEL BARRAGE FUSIBLE.</i>	127
FIGURA 78: <i>EFECTOS NEGATIVOS EN LA SEGUNDA CAPTACIÓN DURANTE LA DESCOLMATACIÓN INDUCIDA.</i>	127
FIGURA 79: <i>BOCAL LIBRE DE SEDIMENTOS DURANTE LA MITAD DE ENSAYOS DE DESCOLMATACIÓN.</i>	128
FIGURA 80: <i>SITUACIÓN MORFOLÓGICA FINAL DESPUÉS DE LOS ENSAYOS DE DESCOLMATACIÓN.</i>	128
FIGURA 81: <i>AFORO DEL BOCAL LIBRE DE SEDIMENTOS.</i>	129
FIGURA 82: <i>VISTA DE LA CAPTACIÓN PARA RIEGO COMPLETAMENTE OBSTRUIDA POR SEDIMENTOS ARRASTRADOS DESDE EL BARRAGE DESCOLMATADO.</i>	130
FIGURA 83: <i>AFORO DE CAUDALES EN EL MODELO.</i>	130
FIGURA 84: <i>MEDICIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE SEDIMENTOS DESPUÉS DE LA DESCOLMATACIÓN.</i>	131
FIGURA 85: <i>ISOMÉTRICO DE LAS ESTRUCTURAS QUE DERIVAN EL AGUA CAPTADA HACIA LA PTAP “EL MILAGRO”.</i>	132
FIGURA 86: <i>VISTA EN PLANTA Y CORTES DE LA ZONA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA DE LA CAPTACIÓN “RÍO PORCÓN”. NOTA. FUENTE: ADAPTADO DE EPS SEDACAJ.</i>	133
FIGURA 87: <i>ISOMÉTRICO DE LA CAPTACIÓN “RÍO PORCÓN”.</i>	134

RESUMEN

La investigación aborda la problemática de la colmatación en la Captación Río Porcón, ubicada en Cajamarca, Perú, una infraestructura hidráulica que deriva agua para consumo y riego en un río de alta montaña caracterizado por fuertes pendientes y elevada carga sedimentaria. La acumulación de sedimentos en el bocal y en el cauce aguas arriba reduce significativamente la eficiencia de captación y la vida útil de la estructura. Este estudio evaluó la eficacia de un sistema de barrage fijo-fusible con extremos laterales colapsables para inducir la descolmatación mediante avenidas naturales. El objetivo principal fue determinar la recuperación del área hidráulica efectiva del bocal y cuantificar los cambios morfológicos generados mediante la técnica de descolmatación inducida por un sistema de barrage fijo-fusible. La metodología fue experimental, utilizando un modelo físico a escala 1/15 para evaluar la condición colmatada original y la descolmatación inducida mediante la apertura del 20% de los extremos laterales bajo caudales de avenida. Los resultados demostraron una restauración total de la capacidad hidráulica, garantizando el 100% de la eficiencia de captación requerida y logrando derivar un caudal excedente que superó en más del doble el volumen de diseño original. Se logró la remoción de 568 m³ de sedimentos (67% del volumen acumulado). No obstante, se evidenció la transferencia del problema hacia una captación secundaria aguas abajo. Se concluye que la técnica es altamente eficiente para la estructura principal, pero exige un manejo integral de sedimentos a nivel de cuenca para evitar impactos negativos en infraestructuras subsiguientes. La investigación validó plenamente la hipótesis planteada al demostrar que la apertura de los costados del barrage y la erosión ocasionada por el flujo durante meses lluviosos inducen efectivamente la descolmatación aguas arriba, aumentando significativamente la eficiencia de captación y alterando positivamente la morfología del río Porcón, pero también evidenció la importancia crítica de considerar los impactos en toda la red hidráulica, ya que la gestión de sedimentos en un punto puede trasladar y agravar problemas en estructuras aguas abajo. En términos prácticos, los resultados de esta investigación ofrecen un aporte científico y técnico relevante para diseñar y operar captaciones más resilientes frente a la sedimentación, con aplicaciones replicables en Cajamarca y en otras regiones andinas con condiciones similares. Además, brindan herramientas de decisión para autoridades y operadores sobre la conveniencia de reemplazar la remoción mecánica constante por alternativas hidráulicas más sostenibles y económicas.

ABSTRACT

This research addresses the problem of siltation at the Porcón River Intake, located in Cajamarca, Peru, a hydraulic infrastructure that diverts water for consumption and irrigation in a high-mountain river characterized by steep slopes and a high sediment load. The accumulation of sediments in the intake window and the upstream riverbed significantly reduces the capture efficiency and the useful life of the structure. This study evaluated the efficacy of a fixed-fusible weir system with collapsible lateral ends to induce flushing through natural floods. The main objective was to determine the recovery of the effective hydraulic area of the intake window and to quantify the morphological changes generated by the induced flushing technique using a fixed-fusible weir system. The methodology was experimental, using a 1:15 scale physical model to evaluate the original silted condition and the induced flushing by opening 20% of the lateral ends under flood flow conditions. The results demonstrated a total restoration of the hydraulic capacity, guaranteeing 100% of the required capture efficiency and successfully diverting a surplus flow that more than doubled the original design volume. The removal of 568 m³ of sediments (67% of the accumulated volume) was achieved. However, the transfer of the problem to a secondary intake downstream was evidenced. It is concluded that the technique is highly efficient for the main structure but requires comprehensive sediment management at the basin level to avoid negative impacts on subsequent infrastructures. The research validated the proposed hypothesis by demonstrating that the opening of the weir's sides and the erosion caused by the flow during rainy months effectively induce upstream flushing, significantly increasing capture efficiency and positively altering the Porcón River's morphology. Nevertheless, it also highlighted the critical importance of considering impacts across the entire hydraulic network, as sediment management at one point can transfer and aggravate problems in downstream structures. In practical terms, the results of this research offer a relevant scientific and technical contribution to designing and operating intakes that are more resilient to sedimentation, with replicable applications in Cajamarca and other Andean regions with similar conditions. Furthermore, they provide decision-making tools for authorities and operators regarding the advisability of replacing constant mechanical removal with more sustainable and economical hydraulic alternatives.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

1.1.1. Contextualización

La administración del agua en ríos altoandinos siempre ha enfrentado importantes retos debido al transporte y la acumulación de sedimentos en un proceso conocido como colmatación. Las estructuras hidráulicas convencionales, como las captaciones de derivación con barraje fijo son susceptibles a este problema, lo que lleva a una disminución en su eficiencia y durabilidad. El depósito de sedimentos frente al bocal constituye un obstáculo frecuente que los métodos tradicionales de limpieza no siempre consiguen resolver de forma óptima. Ante este dilema surge la idea de emplear barrages fijo-fusibles como estrategia innovadora destinada a prevenir el deterioro de dichas obras frente a los impactos de la colmatación y la socavación (Schleiss et al., 2016).

Este tipo de estructura está compuesta por una parte fija en el centro del cauce y partes fusibles, que suele estar elaborado principalmente de rocas apiladas para elevar el nivel del agua y asegurar que fluya la cantidad suficiente hacia la entrada sin obstruirse frente al bocal directamente. La razón de utilizar este sistema radica en su capacidad de autolimpieza que se activa durante crecidas o avenidas; en esas situaciones las partes fusibles colapsan permitiendo que los sedimentos acumulados sean arrastrados por la corriente misma. Este mecanismo libera los sedimentos área crítica del bocal manteniendo así su funcionamiento adecuado y previniendo problemas de obstrucción y pérdida de eficiencia que afectan a estructuras fijas convencionales (Chuquiruna, R. 2025).

1.1.2. Descripción del problema

En Cajamarca existen captaciones derivadoras que se ubican en ríos de alta montaña, de las cuencas del Mashcón y del Chonta, tal es el caso de la captación Río Porcón que se ubica en el río Porcón y es administrada por la empresa prestadora de servicios de Saneamiento de Cajamarca S.A. (SEDACAJ), se observa una severa colmatación que afecta tanto al bocal como a un tramo del cauce aguas arriba del barrage. Sin embargo, la Captación Río Porcón no es la única estructura que utiliza el recurso hídrico del río. Aproximadamente a 40 metros aguas abajo de la captación principal, existe una captación de menor tamaño utilizada para fines de riego. El proceso de descolmatación inducida en la captación principal, al liberar y movilizar grandes volúmenes de

sedimentos acumulados aguas arriba, genera una preocupación sobre el posible impacto negativo que este material arrastrado pueda tener en la funcionalidad y operación de esta captación de riego aguas abajo. Los sedimentos liberados podrían depositarse y colmatar esta estructura menor, afectando a los usuarios de riego.

Por este motivo es necesario realizar un estudio induciendo la descolmatación con el flujo del agua del mismo río, aperturando el barrage en sus dos extremos, con apoyo de un modelo hidráulico físico a escala reducida; cuyos resultados permitirán conocer el cambio de la morfología del cauce y la eficiencia del bocal, además de brindar soporte a profesionales y autoridades para adoptar resoluciones acertadas frente a la resolución de tal problemática.

1.1.3. Formulación del problema

La Captación Río Porcón, sufre una severa colmatación debido a la originada por el depósito de sedimentos desplazados por el río. Esta situación reduce la eficiencia de captación y la vida útil de la estructura. En este sentido, se plantea investigar la viabilidad de una estrategia de descolmatación inducida mediante la apertura controlada de los extremos del barrage. Para analizar estos efectos, se propone el uso de un modelo hidráulico físico a escala reducida 1:15. Debido a esto la investigación busca resolver la siguiente incógnita:

¿De qué manera la descolmatación inducida mediante la implementación de un barrage fijo-fusible influye en la recuperación del área hidráulica efectiva del bocal y en la morfología del cauce del río Porcón?

1.2. Hipótesis de la investigación

La apertura de los costados del barrage de la captación derivadora “Río Porcón” y la erosión ocasionada por el flujo, en los meses lluviosos, inducen la descolmatación aguas arriba del barrage, lo cual aumenta la eficiencia de la captación hasta en un 100%.

1.3. Justificación e Importancia de la Investigación

1.3.1. Justificación Científica

La investigación se justifica al abordar el problema de la colmatación que afecta a la Captación Río Porcón, un fenómeno intrínseco en ríos de alta montaña caracterizados por altas pendientes y significativa carga de sólidos. Se propone estudiar la descolmatación inducida mediante la modificación del barrage fijo al incorporar secciones fusibles en sus costados. Esta acción busca facilitar el arrastre de sedimentos durante las avenidas naturales del río, una estrategia que llena un

vacío de investigación específico a nivel local y respecto a su impacto y eficacia, particularmente en estructuras inmediatamente aguas abajo. Para ello, se empleará un modelo hidráulico físico a escala reducida, una metodología que permite recrear de forma controlada los fenómenos de flujo y transporte de sedimentos, obteniendo así datos empíricos confiables. El estudio contribuirá significativamente al conocimiento científico sobre la gestión de sedimentos en captaciones de alta montaña, la validación de criterios de diseño y la comprensión del comportamiento de estructuras hidráulicas ante la alta carga sedimentaria.

1.3.2. Justificación Técnico – Práctica

Desde una perspectiva técnico-práctica, la colmatación en la Captación Río Porcón no es solo un problema teórico, sino que tiene consecuencias directas y negativas en la eficiencia operativa y la vida útil de la infraestructura principal, limitando el acceso al recurso hídrico necesario para sus distintos aprovechamientos. La implementación de la descolmatación inducida mediante la modificación del representa una potencial solución práctica y menos costosa que la remoción mecánica constante. Sin embargo, es vital evaluar el impacto práctico del sedimento que se removería hacia aguas abajo, específicamente sobre la captación de riego ubicada en ese tramo del río, una preocupación directa para los usuarios del recurso hídrico. El modelo hidráulico físico es una herramienta valiosa que proporciona información tangible, visual y precisa sobre el comportamiento del flujo y los sedimentos bajo diferentes escenarios. Estos datos nos permitirán evaluar la viabilidad de la propuesta de descolmatación y fundamentar la toma de decisiones para implementar soluciones que mitiguen la colmatación en la Captación Río Porcón y puedan ser replicadas en otras estructuras similares afectadas por problemas de sedimentación en la región.

1.3.3. Justificación Institucional

La presente investigación se vincula estrechamente con los objetivos de la Universidad Nacional de Cajamarca, que busca formar profesionales gestores de conocimiento, involucrados activamente en los aspectos sociales, económicos, ambientales y culturales con un firme compromiso ético. El diseño de una captación derivadora fusible de alta montaña responde directamente a la visión institucional de realizar investigación científica y tecnológica orientada al desarrollo sostenible, con énfasis en tema socioambiental. Esta propuesta innovadora contribuye al desarrollo hídrico regional, optimizando infraestructuras afectadas por la colmatación para las comunidades altoandinas de Cajamarca, reduciendo costos de mantenimiento y garantizando la seguridad hídrica.

1.4. Alcances o Delimitación de la Investigación

La presente investigación tiene lugar en el Río Porcón, específicamente en el tramo que rodea la Captación Río Porcón, la cual presenta un problema de colmatación debido al transporte de sedimentos. El estudio se delimita a un tramo total de 250 metros del río. De esta longitud, 180 metros se ubican aguas arriba del barrage de la captación, sección donde se manifiestan principalmente los problemas de acumulación de sedimentos. Los 70 metros restantes se extienden aguas abajo del barrage, con el punto final definido por la ubicación de la segunda captación de riego; esta delimitación es crucial para evaluar el potencial impacto del sedimento removido en estructuras posteriores. Se obtuvieron en campo las siguientes características del río: la pendiente longitudinal del cauce, el ancho del río en diferentes secciones, y la granulometría de los sedimentos presentes en el lecho. Adicionalmente, se determinó el caudal dominante del río en este tramo de estudio.

La investigación abordará, dentro de estos límites, el estudio de la descolmatación inducida mediante la modificación del barrage, utilizando un modelo físico a escala reducida, para determinar su influencia en la eficiencia de la captación y en la morfología del río aguas arriba del barrage, así como el impacto práctico de los sedimentos removidos en el tramo aguas abajo, específicamente en la mencionada captación de riego.

1.5. Limitaciones

Las limitaciones primordiales debido a la utilización de un modelo hidráulico físico a escala reducida radican ante las significativas restricciones económicas y de espacio para replicar el río a tamaño real, lo que conlleva a una similitud parcial del prototipo. Se optó por no usar el caudal dominante para los ensayos debido a estas restricciones, empleando en su lugar los caudales aforados en campo, los cuales resultaron suficientes para reproducir los procesos de transporte de fondo conforme a la verificación de similitud sedimentológica. La apertura de la parte fusible del barrage se evaluó únicamente al 20% de su longitud total, distribuido en partes iguales en ambos extremos (10% en cada lado), sin explorar otras configuraciones, aspecto que se propone para futuras investigaciones. Concerniente al transporte de sedimentos, el modelo se concentra en la carga de fondo y emplea agua clara, sin la inclusión de sedimentos en suspensión. Finalmente, la validación del modelo se sustentó en la verificación del parámetro de Shields y la calibración de tirantes sobre el barrage, conforme al enfoque aceptado internacionalmente para modelos hidráulicos de fondo móvil.

1.6. Objetivos de la Investigación

1.6.1. Objetivo General

Determinar la recuperación del área hidráulica efectiva del bocal y los cambios en la morfología del río Porcón generada por la descolmatación inducida aguas arriba del barrage fijo-fusible.

1.6.2. Objetivos Específicos

Caracterizar la captación Río Porcón y su cauce, aguas arriba del barrage y aguas abajo hasta la segunda captación derivadora, desde los puntos de vista hidráulico, morfológico, granulométrico e hidrológico.

Determinar la morfología del río Porcón en un tramo de 180 metros, comprendido entre el punto de inicio (Coordenadas UTM: 771027.200m E, 9214148.432m N) y el barrage de la captación 'Río Porcón' (Coordenadas UTM: 771183.500m E, 9214136.481m N), induciendo la erosión hídrica al aperturar los extremos del barrage en un 20% de su longitud.

Estimar el área del bocal, de la captación “Río Porcón”, al inicio y al final de la descolmatación, induciendo la erosión hídrica, con un modelo físico a escala 1/15, con caudales de los meses lluviosos.

Estimar el volumen descolmatado y el tiempo en el tramo de 180 metros (desde la coordenada UTM de inicio 771027.200m E, 9214148.432m N hasta el barrage en 771183.500m E, 9214136.481m N aguas arriba de la captación del río Porcón, por efecto de la erosión hídrica utilizando un modelo físico a escala reducida.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes teóricos de la investigación

2.1.1. Antecedentes Internacionales

En la investigación titulada: “Flushing Gate Operation in High-Sediment Rivers”, se planteó como objetivo determinar la eficiencia de descolmatación inducida mediante la apertura parcial de compuertas en vertederos de enrocado, comparando el uso de agua clara frente a agua cargada de sedimentos. La metodología implementada fue de carácter experimental, utilizando un modelo físico a escala 1:35 de un barrage fusible, en el cual se evaluaron cinco escenarios de apertura (10–100% de la longitud) bajo seis caudales distintos. Los resultados indicaron que la eficiencia de flushing con agua clara osciló entre 85–95% del volumen acumulado, mientras que con agua cargada (10 g/L) fue de 88–98%, mostrando una diferencia menor al 5% que se considera despreciable dentro del margen de incertidumbre experimental. Se concluyó que el uso de agua clara es válido para simular procesos de descolmatación inducida, ya que los mecanismos erosivos predominantes no dependen significativamente de la concentración de sedimentos en suspensión. La influencia de este antecedente en el estudio de la captación Río Porcón es crucial, pues valida metodológicamente la decisión de realizar los ensayos del modelo físico con agua clara, garantizando que los resultados de eficiencia de limpieza del bocal y recuperación del cauce son representativos y rigurosos sin la necesidad compleja de inyectar sedimentos durante la simulación (García & Lee, 2021)

En el estudio titulado: “Run-of-River Flushing Experiments”, se tuvo como objetivo analizar la influencia de la similitud sedimentológica en modelos de descolmatación inducida en captaciones, comparando ensayos con agua clara y agua cargada. La metodología consistió en el uso de dos modelos físicos a escala 1:25 con barrage fusible, simulando captaciones de alto gradiente bajo tres configuraciones de apertura. Los resultados demostraron que no existieron diferencias estadísticamente significativas en los volúmenes de sedimento evacuado entre los dos regímenes, manteniendo tasas de descolmatación del 90–100% del material almacenado. Se concluyó que, para la apertura de fusibles, la suspensión de sedimentos es irrelevante frente al mecanismo inercial-gravítico de arrastre. Este hallazgo es fundamental para la presente tesis, ya que respalda el diseño experimental adoptado para el Río Porcón, confirmando que la fuerza tractiva generada por la apertura de los fusibles es el factor determinante para la limpieza, permitiendo desestimar la variable de concentración de sólidos en suspensión sin comprometer la validez de los resultados obtenidos (Singh et al., 2022).

2.1.2. Antecedentes Nacionales

En la tesis titulada: “*Estimación y comparación de los métodos utilizados para el cálculo de sedimentos-erosión hídrica aplicados a la cuenca del río Zaña*”, de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo (UNPRG), se tuvo como objetivo estimar la producción de sedimentos y la erosión hídrica en la cuenca del río Zaña, comparando la efectividad de diversos métodos de cálculo. La metodología implicó la aplicación y comparación de modelos empíricos y computacionales para valorar la pérdida de suelo y la consecuente producción de sedimentos a nivel de cuenca. La relevancia de este antecedente para la investigación sobre la descolmatación inducida por un barrage fijo-fusible en la captación "Río Porcón" reside en que aborda el origen del problema: la producción de sedimentos en la cuenca hidrográfica. Comprender y cuantificar la magnitud de los sedimentos que ingresan al sistema fluvial es crucial para el diseño y la evaluación de la sostenibilidad a largo plazo de cualquier estructura de captación o embalse, así como para dimensionar las estrategias de manejo de sedimentos, como la que se propone con el barrage fijo-fusible (Revilla Cruzado, J. G., & Uriarte Meléndrez, H. 2024).

En la tesis titulada: “*Efecto de la descolmatación del río Chicama aguas arriba del puente Punta Moreno*”, de la Universidad Privada Antenor Orrego (UPAO), se tuvo como objetivo determinar las variaciones hidráulicas y morfológicas generadas por la descolmatación del cauce y la conformación de diques. La metodología empleada fue de enfoque cuantitativo con diseño no experimental, utilizando simulaciones hidráulicas para comparar el comportamiento del flujo bajo distintos escenarios. Los resultados fueron contundentes al cuantificar el incremento de la capacidad erosiva tras la descolmatación, registrándose profundidades de socavación total de 3.79 m para un caudal de 1052.42 m³/s (período de retorno de 50 años) y hasta 4.07 m para eventos de mayor magnitud. La relevancia de este antecedente para la investigación reside en que proporciona el sustento teórico y cuantitativo para explicar los efectos colaterales observados aguas abajo, validando que la alteración de la sección transversal intensifica la energía del flujo y la movilización de material, lo cual justifica la colmatación súbita en la segunda captación derivadora (Sánchez, 2021).

2.1.3. Antecedentes Locales

En la tesis titulada: “*Comportamiento hidráulico del barrage fijo – fusible de la captación Tres Molinos – Cajamarca, a nivel de modelo físico*”, se propuso como objetivo principal analizar el comportamiento hidráulico de un barrage fijo-fusible y su capacidad para el acarreo de sedimentos en la captación Tres Molinos. La metodología empleada consistió en el desarrollo y la operación de un modelo físico a escala para simular y evaluar el funcionamiento de la estructura bajo diferentes regímenes de flujo, incluyendo su interacción con los sedimentos. La relevancia de este antecedente para la investigación sobre la descolmatación inducida por un barrage fijo-fusible en la captación "Río Porcón" es muy alta, ya que no solo estudia el mismo tipo de obra hidráulica en la misma región, sino que también se enfoca directamente en la problemática del manejo y acarreo de sedimentos, aspecto central del presente estudio. Sus conclusiones sobre la eficiencia en la movilización de material sedimentario y el comportamiento hidráulico general son directamente aplicables para el diseño y la evaluación de la propuesta en el Río Porcón (Cáceres, K. 2024).

En la tesis titulada: “*Determinación de la influencia de la descolmatación inducida por un barrage fusible central en la eficiencia de captación y en la morfología del río Mashcón aguas arriba de la captación Huacariz*”, se tuvo como objetivo general determinar la influencia de la descolmatación inducida por un barrage fusible central en la eficiencia de captación y en la morfología del río Mashcón, aguas arriba de la captación Huacariz. La metodología se centró en la construcción de un modelo hidráulico físico a escala reducida 1/20, mediante el cual se caracterizó el río y la captación, se diseñó la estructura con el barrage fusible central y se estimó la eficiencia de captación antes y después del proceso. Los resultados demostraron que la descolmatación inducida, al reemplazar la parte central del barrage fijo por una sección fusible que colapsa durante las avenidas, permite el paso de sedimentos, influyendo en la morfología del río y logrando un incremento en la eficiencia de captación. Se concluyó que el uso de un barrage fusible (central, en este caso) es una solución viable para evitar la colmatación en este tipo de captaciones (Castañeda, F. 2025).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Fluviomorfología en ríos de alta montaña

La fluviomorfología, o morfología fluvial, se define como el estudio de las diversas formas que caracterizan a los ríos y busca explicar cómo ha llegado a tener esa forma actual. Esto incluye el análisis de los cambios en su pendiente y en sus secciones transversales (lecho y márgenes). Las formas y el comportamiento de un río están definidos por la interacción de sus características geométricas, hidráulicas, las propiedades del sedimento y factores externos (Rocha A. 2006).

En el contexto específico de los ríos de alta montaña, que nacen en zonas elevadas, la fluviomorfología aborda un sistema particularmente dinámico e inestable. Estos ríos se caracterizan por tener fuertes pendientes, altas velocidades y elevado esfuerzo cortante, lo que resulta en intensa erosión. Eventos de alta impacto, como crecidas extremas, deslizamientos o huaicos, pueden causar pérdida violenta de suelos y cambios rápidos y drásticos en la morfología del cauce, depositando o removiendo grandes volúmenes de material (Novak 2001).

La influencia de factores naturales como la temperatura y precipitación, la geología, la topografía, y la vegetación es determinante. El clima influye en los procesos geomórficos y la vegetación ayuda a la fijación del cauce, mientras su ausencia contribuye a la inestabilidad. En ríos de alta montaña, la precipitación es un componente hidrológico crucial ya que su irregularidad de las descargas contribuye a la gran movilidad y los cambios en los ríos (Rocha A. 2006).

Asimismo, la acción humana tiene un impacto profundo en la fluviomorfología de estos ríos que está directamente relacionado con la construcción de estructuras hidráulicas como presas o captaciones que alteran significativamente el escurrimiento, causando desequilibrio sedimentológico, agradación aguas arriba y degradación aguas abajo. La urbanización reduce la infiltración, aumenta la escorrentía y los caudales máximos. Otras actividades como la agricultura, ganadería y minería pueden afectar la calidad del agua y la dinámica de sedimentos. Los ríos, al ser sistemas con un equilibrio precario e inestable, pueden reaccionar violentamente a estas intervenciones (Fattorelli, S., & Fernández, P. C. 2011).

2.2.2. Caudal dominante

El Caudal Dominante, también conocido como caudal formativo o estado de cauce lleno, se define como la descarga que ejerce la mayor influencia modeladora sobre el lecho fluvial, según se infiere de su capacidad para movilizar el mayor volumen de sedimentos anualmente (Martín, J. 2001).

El estado de cauce lleno se describe como el nivel máximo de crecida que un río logra retener dentro de su cauce sin desbordarse hacia la llanura de inundación (Nixon, M. 1959).

En el contexto de los ríos de alta montaña, este caudal está ligado a eventos de crecida, ya que estos ríos están ubicados en zonas elevadas y poseen fuertes pendientes debido a esto tienen una gran capacidad de transporte de sedimentos.

Se estima que este caudal ocurre en promedio dos veces al año, o con un período de retorno de 1.4 años según algunos criterios. Otros criterios lo sitúan con un período de retorno efectivo entre 1.5 y 7 años. Los eventos de crecida en ríos de alta montaña pueden ser muy rápidos y drásticos debido a las características de la cuenca (Eagle et al., 2021).

A continuación, se detallan algunas frecuencias para el caudal formativo según algunos investigadores:

Tabla 1: Frecuencias Recomendadas para Caudal a Cauce Lleno

Frecuencia de Caudal	Recomendado por
1 a 5 años	Wolman y Leopold (1957)
1.5 años	Leopold et al. (1964); Hey (1975); Leopold (1994)
1.58 años	Dury (1973, 1976); Riley (1976)
1.02 a 2.69 años	Woodyer (1968)
1.01 a 32 años	Williams (1978)
1.18 a 3.26 años	Andrews (1980)
1 a 10 años	USACE (1994)
2 años	Bray (1973, 1982)

Nota. Fuente: Adaptado de (Soar, 2000)

La estimación del caudal dominante se puede realizar mediante:

Registros de caudal y curvas de gasto (curvas altura-gasto), sin embargo, su validez depende de aforos periódicos debido a la inestabilidad del lecho.

Aforos directos frecuentes, cubriendo el rango de niveles, especialmente durante las crecidas.

Análisis de la geometría hidráulica del río, a menudo basándose en levantamientos topográficos del cauce. Esto puede incluir la identificación de la "huella hídrica" o marcas dejadas por crecidas máximas históricas.

Uso de fórmulas empíricas que se adapten a las condiciones del río (Xu et al., 2024).

Para la presente investigación el caudal de cauce lleno se estimará mediante el uso de la fórmula de Manning donde todos los datos necesarios para calcularlo se obtendrán de la sección caracterizada del río Porcón.

$$Q = \frac{A * R^{2/3} * S^{1/2}}{n} \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

Q: Caudal, en m³/s.

R: Radio hidráulico, en m

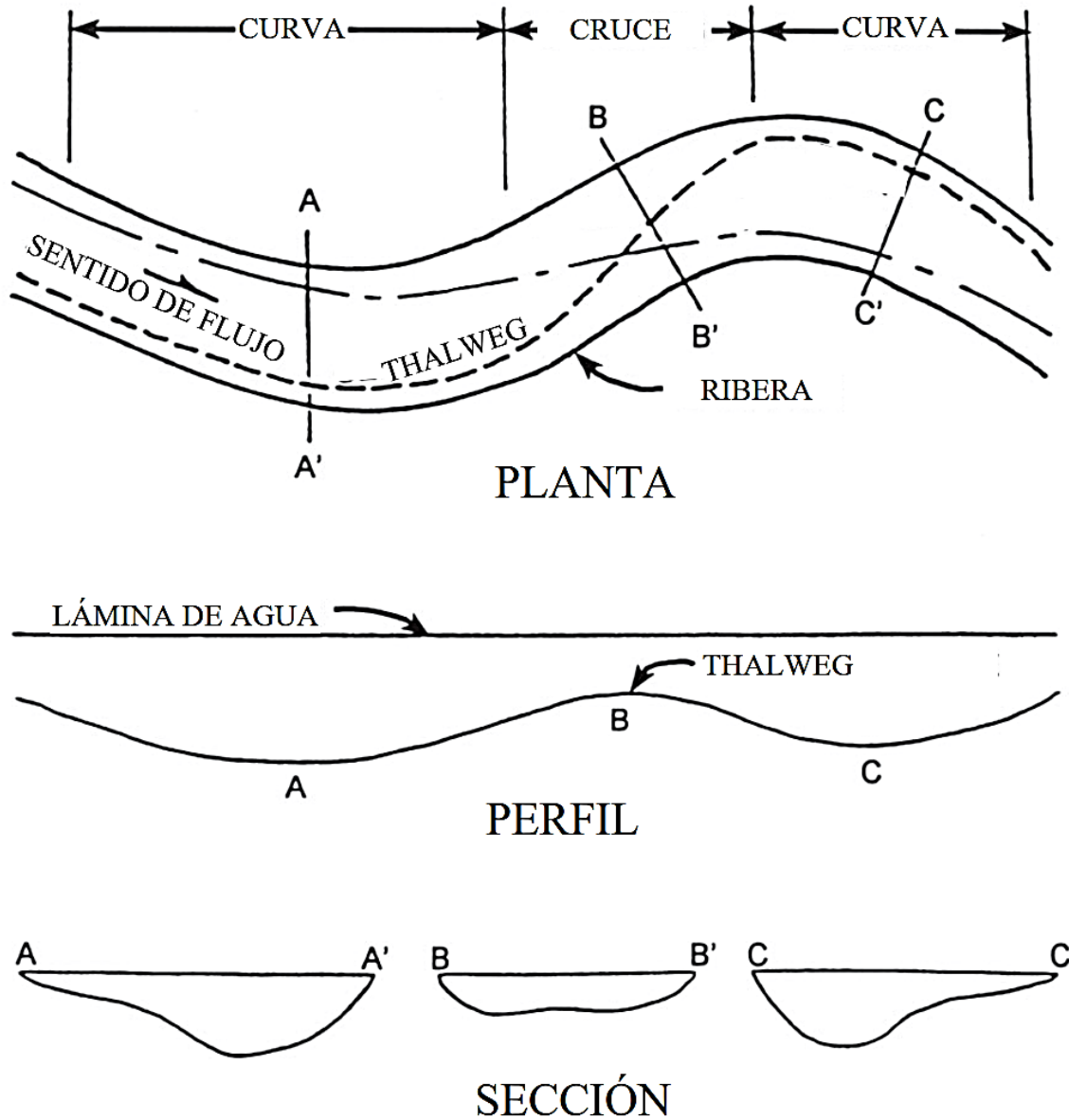
A: Área de la sección, en m²

S: Pendiente del río, en m/m

n: Coeficiente de rugosidad de Manning, adimensional

Y para el análisis de la de la geometría hidráulica del río se escogerá 3 secciones en un tramo libre que no cuente con la presencia de estructuras hidráulicas o estructuras diseñadas por la mano del hombre; en resumen, no debe haber ningún agente externo al río que produzca socavación, erosión, acorazamiento y colmatación. Lo que se busca con esto es la identificación de marcas dejadas por crecidas que ocurrieron en el río (Garcia, M. H. 2008).

Figura 1: *Vistas típicas en planta, perfil y secciones transversales en cauces aluviales.*



Nota. Fuente: Adaptado de (Vanoni, V. A. 1975)

2.2.3. Rugosidad de Manning

El movimiento del agua en cauces abiertos como ríos enfrenta una oposición natural. Dicha resistencia se estima mediante el coeficiente "n" de Manning, un valor empírico que integra los efectos combinados de la fricción ejercida por el contorno del cauce (lecho y márgenes), las irregularidades de la sección transversal, la presencia de vegetación y la sinuosidad del río. (Chow, V. T. 1994).

Para la estimación de “n” de Manning en la presente investigación se utilizará la siguiente fórmula:

$$n = \frac{d_{90}^{1/6}}{26} \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

d_{90} : Diámetro de partícula tal que el 90% del material del lecho es más fino, en m

Esta fórmula responde directamente a las condiciones observadas en el río Porcón. Se trata de un río de montaña cuyo lecho muestra claramente predominancia de material grueso. Cantos rodados y bolos son evidentes y definen la textura del fondo (Strickler, A. 1923).

2.2.4. Colmatación

Los términos azolvamiento, depositación, y agradación son utilizados como sinónimos o usados también para describir aspectos de este proceso. Otros términos como atarquinamiento y aterramiento también se consideran equivalentes (Huamán, J. 2016).

La colmatación es el proceso de acumulación y depósito de sedimentos como rocas, gravas, arenas, limos y arcillas en el lecho de un río y/o de manera más específica en el contexto del aprovechamiento del recurso hídrico, dentro de un embalse o estructura hidráulica. Este proceso provoca una elevación progresiva del nivel del cauce y una disminución de su capacidad; ya sea de almacenamiento en embalses o de eficiencia hidráulica en estructuras. La colmatación es un proceso que, si bien es natural en cierta medida, es inevitable en el tiempo y puede causar la pérdida de la vida útil de una estructura (Rocha A. 2006).

La acción del ser humano es un factor importante que agrava el proceso natural de erosión e influye en la colmatación. Las actividades humanas como urbanización, cambio de uso del suelo, deforestación y destrucción de vegetación, practica de agricultura, minería y la disposición de residuos pueden transformar una erosión natural en una erosión inducida, aumentando la cantidad de material susceptible de ser transportado y depositado aguas abajo (Suárez de Castro, 1980).

La construcción de estructuras hidráulicas es una de las intervenciones humanas con mayor impacto directo en la morfología fluvial, acelerando los procesos de colmatación y erosión. La construcción de estructuras como:

Presas y Embalses: Las presas construidas sobre el lecho de un río funcionan como grandes trampas de sedimentos. El material sólido queda retenido en el vaso del embalse, provocando su progresiva colmatación y la inevitable reducción de la capacidad útil de almacenamiento (Avendaño et al., 1997).

Captaciones Derivadoras: Estas obras, destinadas a elevar el nivel de agua para su derivación, crean un obstáculo en el cauce que reduce la pendiente longitudinal aguas arriba y provoca una acumulación significativa de sedimentos aguas arriba del barrage (Remonsellez & Pérez, 2012).

Pozas Disipadoras de Energía: Situadas al pie de vertederos, su función es amortiguar la energía cinética del flujo para proteger la estructura. Sin embargo, la erosión aguas abajo de estas estructuras es un problema notable y progresivo que resulta en un descenso significativo del lecho del río con el tiempo (Silva A. 2024).

2.2.5. Transporte de sedimentos

Los sedimentos corresponden a partículas originadas por la desintegración de rocas y suelos, transportadas por ríos y afluentes. Pueden tener su origen en el lecho del río, en las laderas o en la cuenca hidrográfica (Maza & García, 1996).

El transporte de sedimentos se define como el movimiento de partículas sólidas que es transportado por un flujo corriente líquida. Este fenómeno ocurre cuando el esfuerzo cortante sobre el fondo del cauce excede el esfuerzo crítico del material o cuando la velocidad media del flujo supera una velocidad crítica (Maza & García, 1996).

Según el modo de transporte, se distinguen principalmente dos mecanismos:

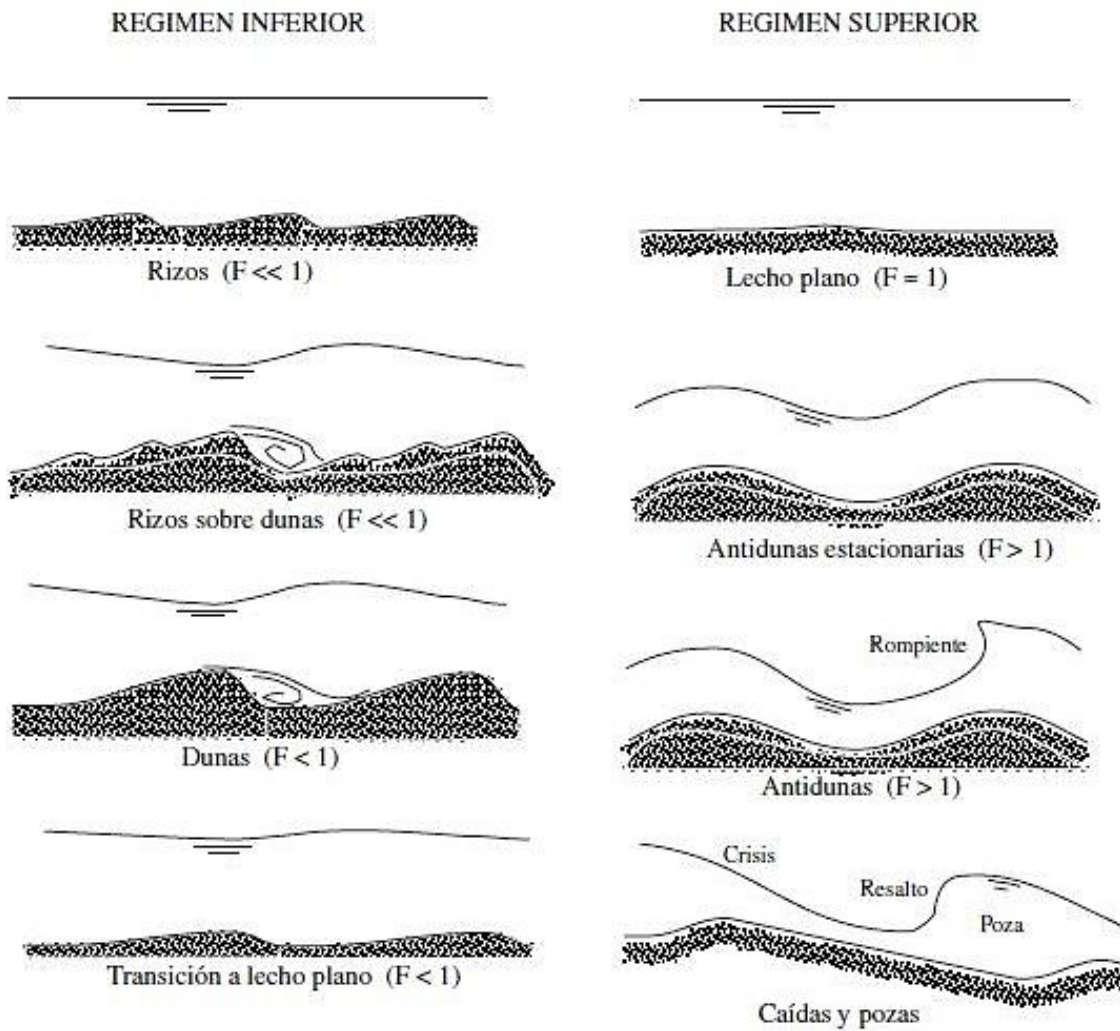
Transporte de Fondo: Incluye aquellos materiales sólidos desplazados directamente sobre el lecho fluvial. Su desplazamiento es por medio de saltos, rodamiento o deslizamiento.

Esta constituido por materiales granulares gruesos como arenas, gravas y cantos rodados.

Transporte en Suspensión: Compuesta por partículas sólidas que son transportadas dentro de la columna de agua. Este proceso está controlado por la turbulencia del agua y la velocidad de caída de cada partícula.

La interacción continua entre el flujo de agua y el material granular del lecho modela la morfología fluvial, produciendo cambios graduales en las formas del cauce. Esto da lugar a la formación de formas de fondo como rizos, dunas, y antidunas como se observa en la Figura 1.

Figura 2: *Formas de fondo en cauces aluviales.*



Nota. Fuente: Adaptado de (Ochoa, T. 2011)

2.2.5.1. Ciclo sedimentario

El ciclo sedimentario es un proceso geológico continuo que describe cómo los sedimentos de la superficie terrestre son erosionados o desgastados de su lugar de origen (como las montañas, a través de deslizamientos o en los ríos que son producidos por la erosión), luego transportados por los ríos (que también erosionan sus propias orillas y mueven transportan el sedimento) y finalmente se depositan y acumulan a lo largo del cauce (formando barras, rellenando pozas o creando abanicos aluviales) modelando así constantemente el río. El proceso del ciclo sedimentario se explica en la Figura 2.

Figura 3: *Proceso de sedimentación y cambios morfológicos asociados en una cuenca hidrográfica.*



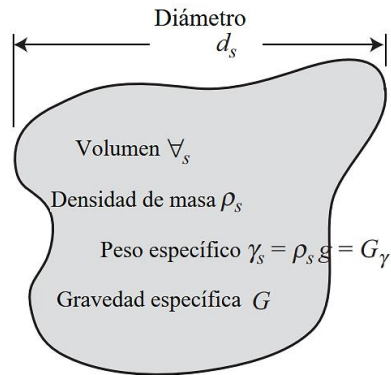
Nota. Fuente: Adaptado de (Dietrich & Gallinatti, 1991)

En los ríos de alta montaña este ciclo es dinámico, como las fuertes pendientes y las lluvias intensas provocan una erosión considerable en las cumbres. Los ríos arrastran rocas y tierra aguas abajo que al llegar a zonas más planas o al disminuir su caudal estos depositan los sedimentos creando abanicos aluviales y modificando el lecho constantemente.

2.2.5.2. Propiedades físicas de los sedimentos

Las propiedades físicas de una única partícula se detallan en la Figura 3:

Figura 4: *Propiedades físicas de los sedimentos.*



Nota. Fuente: Adaptado de (Julien, 2018)

Donde:

∇_s : Volumen de sedimento, en m^3 .

ρ_s : Densidad de masa que describe la masa del sólido por volumen del sólido, en kg/m^3 .

γ_s : Peso específico que describe el peso sólido por unidad de volumen de sólido, en N/m^3 .

G : Gravedad específica que describe la relación entre el peso específico de una partícula sólida y el peso específico del fluido a una temperatura de referencia estándar.

d_s : Propiedad más importante, se muestran a escala logarítmica, en mm.

2.2.5.3. Tamaño de los sedimentos

El tamaño del sedimento es considerado la característica primordial para su clasificación en el estudio de los ríos. A diferencia de formas geométricas simples las partículas naturales presentan formas complejas y variadas (Apaclla R. 2014).

La forma de determinar el tamaño del sedimento varía según el tipo de partícula. Los cantos rodados y guijarros por ejemplo permiten una medición directa en campo o in situ. Para las gravas y arenas la técnica común emplea mallas o tamices separando los granos según la abertura de la criba. En contraste limos y arcillas partículas mucho más finas se evalúan mediante análisis por sedimentación o el uso de un microscopio métodos distintos a los anteriores dada su diminuta escala (Rocha, 1998).

Tabla 2: Escala granulométrica de sedimentos y propiedades aproximadas.

Nombre de clase	Diámetro de partícula ds (mm)	Tamizado	Esfuerzo cortante crítico τ_c (N/m ²)	Velocidad de corte crítica u_{*c} (m/s)	Velocidad de sedimentación ω_0 (mm/s)
Bloque					
Muy grande	>2,048		1,790	1.33	5,430
Grande	>1,024		895	0.94	3,839
Mediano	>512		447	0.67	2,715
Pequeño	>256		223	0.47	1,919
Canto rodado					
Grande	>128		111	0.33	1,357
Pequeño	>64		53	0.23	959
Grava					
Muy gruesa	>32		26	0.16	678
Gruesa	>16	Pasa el tamiz 3" y es retenido por el tamiz N°4	12	0.11	479
Mediana	>8		5.7	0.074	338
Fina	>4		2.71	0.052	237
Muy fina	>2		1.26	0.036	164
Arena					
Muy gruesa	>1.000	Pasa el tamiz N°4 y es retenido por el tamiz N° 200	0.47	0.0216	109
Gruesa	>0.500		0.27	0.0164	66.4
Mediana	>0.250		0.194	0.0139	31.3
Fina	>0.125		0.145	0.012	10.1
Muy fina	>0.062		0.11	0.0105	2.66
Limo					
Grueso	>0.031	Pasa el tamiz N°200	0.083	0.0091	0.67
Medio	>0.016		0.065	0.008	0.167a
Fino	>0.008				0.042a
Muy fino	>0.004				0.010a
Arcilla					
Gruesa	>0.0020	Pasa el tamiz N°200	Material cohesivo		2.6 x 10 ^{-3a}
Media	>0.0010				6.5 x 10 ^{-4a}
Fina	>0.0005				1.63 x 10 ^{-4a}
Muy fina	>0.00024				4.1 x 10 ^{-5a}

Nota. Fuente: Adaptado de (Julien, 2018)

2.2.5.4. Granulometría de los sedimentos

La clasificación de la forma de las partículas abarca métodos como el esquema de Zingg, el cual utiliza las longitudes de los ejes a, b y c para definir la geometría; de este modo, condiciones de igualdad entre los ejes sugieren esfericidad, mientras que un eje c notablemente menor que a y b (siendo estos equivalentes) indica una forma de varilla, y si c es mucho menor que b, que a su vez es considerablemente menor que a, resulta una forma laminar (Vanoni, 2006).

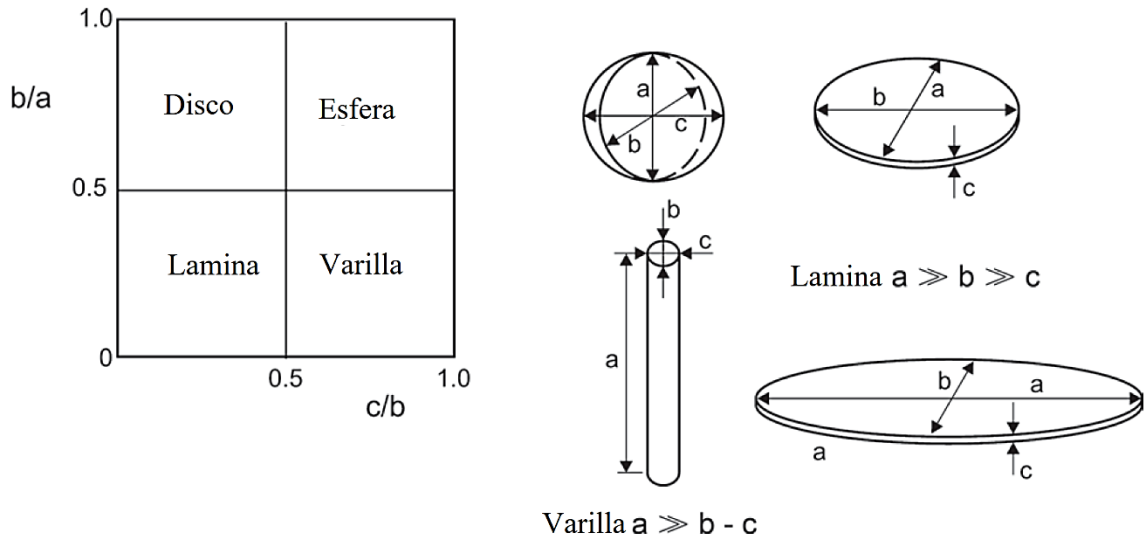
Para cuantificar esta característica, se recurre al factor de forma de Corey (SF), definido por la relación:

$$SF = \frac{c}{\sqrt{ab}} \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

- a: Distancia del eje mayor.
- b: Distancia del eje intermedio.
- c: Distancia del eje menor.

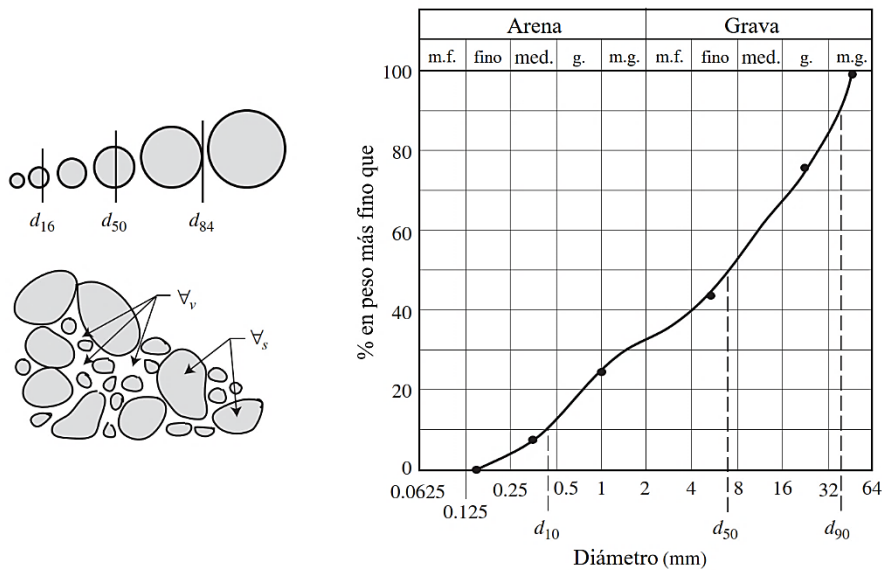
Figura 5: Diagrama de Zingg.



Nota. Fuente: Adaptado de (Vanoni, V. A. 1975)

Luego de determinar el diámetro de cada partícula, esta información se representa en una curva granulométrica. Dicha curva grafica el porcentaje acumulado del material que pasa cada tamiz frente a su diámetro, visualizando la composición granulométrica. Para su elaboración, se utiliza el tamizado para partículas mayores como gravas y arenas, en tanto el análisis por sedimentación se aplica para limos y arcillas, que son más finas.

Figura 6: Curva granulométrica acumulada continua de un suelo gravoso-arenoso.



Nota. Fuente: Adaptado de (Julien, 2018)

Esta curva granulométrica muestra la distribución porcentual de los tamaños de partícula del suelo mostrando un material compuesto en su mayoría por gravas que representan aproximadamente el 62% de la muestra junto a una fracción considerable de arena del 38% lo que permite clasificarlo esencialmente como un suelo gravo-arenoso; evidencia además que se trata de un suelo bien graduado caracterizado por una mezcla de dimensiones de partículas variadas en lugar de presentar uniformidad.

De la curva granulométrica se extraen valores clave como el D_{10} , el D_{50} (no es igual al diámetro medio), el D_{60} , y el D_{90} , este último utilizado para calcular la rugosidad del lecho. Para ríos de alta montaña, con predominio de gravas y cantos, la curva tiende a una distribución log-normal.

2.2.5.5. Coeficiente de uniformidad

El coeficiente de uniformidad (C_u) representa un parámetro esencial en la caracterización granulométrica de los sedimentos, siendo una medida numérica de la gradación o uniformidad del suelo (Hoyos, 2000).

Para cuantificar esta característica, se define por la relación:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \dots\dots\dots(4)$$

La utilidad del C_u radica en la información que proporciona sobre la distribución de tamaños de grano en una muestra de sedimento. Rocha A. (1998) destaca su aplicación en cauces naturales, donde la dispersión en el diámetro de los materiales es una característica inherente, y el C_u permite cuantificar esta variabilidad mediante la curva granulométrica. Pinto (1998) especifica los rangos de uniformidad mencionados, diferenciando entre suelos uniformes y no uniformes basándose en el valor de C_u .

2.2.5.6. Técnicas de muestreo de sedimentos

Son procedimientos para caracterizar el material granular del lecho, estas técnicas sirven para diversos propósitos. Permiten definir la granulometría efectiva o característica de un tramo de río, lo que es esencial para entender cómo el sedimento interactúa con la corriente. Además, son indispensables para establecer y calibrar modelos de transporte de sedimentos que se ajusten a las condiciones observadas en campo.

Entre las metodologías principales se distinguen dos que son el muestreo volumétrico y el muestreo por conteo de partículas.

-El muestreo volumétrico, también conocido como método másico, implica la extracción de un volumen o masa determinada de material subsuperficial del lecho del río. Este proceso inicia retirando la capa superficial del suelo, cuyo espesor es similar al de la partícula más grande observada, y luego se procede a recolectar el material profundo. Se considera este método el único no sesgado hacia materiales finos o gruesos, proporcionando un análisis granulométrico completo por peso en laboratorio mediante tamizado para gravas y arenas. Sin embargo, su implementación es poco práctica en ríos con predominio de grava y canto, ya que requiere volúmenes de muestra considerables para asegurar la representatividad. No es adecuado para muestrear capas superficiales, dado que un volumen predefinido implica un espesor que puede exceder la capa de

interés. Ochoa T. (2011) sugiere que la partícula de mayor tamaño extraída no debe superar el 1% del peso total de la muestra, incluso un 0.1% para una mayor precisión.

-El muestreo por conteo, o muestreo por transectos, fue desarrollado por Wolman en 1954 específicamente para lechos de grava. Esta técnica consiste en la medición aleatoria de sedimentos por número directamente en campo. Implica seleccionar una sección del cauce y utilizar una malla para medir el eje intermedio de las partículas susceptibles de ser removidas, desde gravas muy finas hasta cantos grandes. Para partículas embebidas o excesivamente grandes, se mide la longitud mínima de los ejes expuestos. Los valores obtenidos se agrupan por rango de tamaños para construir la curva granulométrica del material, ofreciendo una medida directa y real de los tamaños medios presentes en la corriente, útil para calcular la rugosidad y la resistencia al flujo. Aunque este método es de fácil implementación, el muestreo por área tiende a sesgarse hacia los tamaños de gravas más gruesos, debido al mayor volumen que las partículas grandes ocupan para una misma superficie (Ochoa, T. 2011).

2.2.6. Caudal de un río de alta montaña

Se define como la cantidad de agua que circula a través de un área de una sección transversal en un tiempo determinado y se expresa en metros cúbicos por segundo (m^3/s) (Chow, 1994).

La medición del caudal en estos ríos se conoce como aforo y se realiza mediante diversos métodos. Para el aforo se tiene que buscar secciones rectas y uniformes, que se encuentren alejadas de obstáculos (estructuras, cantos o bloques muy grandes) o confluencias, para asegurar que el agua fluya libremente y así tener mediciones precisas (Arboleda et al., 2018).

2.2.6.1. Método de aforo (área-velocidad)

Para el uso de este método se comienza con la selección de una sección transversal del cauce, un punto de control donde la geometría, así como el flujo propicien mediciones confiables. Luego se marcan las profundidades a lo largo de esa sección y se obtienen las velocidades medias del flujo. Para obtener una buena aproximación, se debe dividir a la sección transversal de la corriente en áreas parciales, para eso se trabaja con fajas verticales (Camargo J. & Franco V. 1993).

El caudal que circula por la sección se determina con la siguiente formula:

$$Q = \sum A_i * V_i \dots\dots\dots(5)$$

Donde:

A_i : Área parcial de la sección hidráulica “i” del río, en m².

V_i : Velocidad media en la franja “i”, en m²/s.

A continuación, se muestra las distancias entre verticales según el ancho del río:

Tabla 3: *Distancias mínimas entre verticales recomendadas.*

Ancho total mínimo del río (m)	Distancia entre verticales (m)
Menos de 2	0.2
2 – 3	0.3
3 – 4	0.4
4 – 8	0.5
8 – 15	1
15 – 25	2
25 – 35	3
35 – 45	4
45 – 80	5
80 – 160	10
160 – 350	20

Nota. Fuente: Adaptado de (Villón, M. 2002)

-Aforo con tubo de Pitot de dos ramas (dinámica y estática), se utiliza para determinar el caudal en canales y pequeñas corrientes naturales. Este instrumento, compuesto por dos mangueras transparentes que miden la presión estática y dinámica del flujo, con este instrumento es posible calcular la velocidad a diferentes profundidades. Se establecen secciones de medición y se registran las alturas, obteniendo la velocidad media en cada vertical al sesenta por ciento de la profundidad, con la siguiente ecuación:

$$V = \sqrt{2 * g * \Delta H} \dots\dots\dots(6)$$

Donde:

V: Velocidad medida a 60% de profundidad del tirante, en m/s.

g: Aceleración de la gravedad, en m/s².

ΔH : Diferencia entre nivel estático y nivel dinámico, en m.

-Aforo con flotador, surge como una solución alternativa en condiciones de alto riesgo, velocidad excesiva del agua o cuando el nivel de agua es mínimo para poder ingresar instrumentos de medición. Para el uso de este procedimiento se selecciona un tramo recto del río, cuya distancia idealmente supere treinta metros. Entonces, luego se lanzan objetos que puedan flotar en diferentes puntos de la sección, cronometrando el tiempo que tardan en recorrer dicha distancia. La velocidad superficial promedio resultante se ajusta a la velocidad media de la sección, aplicando un factor de reducción del 0.85 recomendado por la OMM. Aunque las mediciones directas de profundidad no se realizan con los flotadores, el área transversal es un dato preexistente obtenido de levantamientos topográficos (Chamorro, I. 2011).

-Aforo con correntómetro, este instrumento provisto de una hélice de rotación, permite obtener la velocidad del flujo en las verticales marcadas a lo largo de la sección del río. Las mediciones de velocidad se realizan al sesenta por ciento (60%) de la profundidad, luego la suma de los caudales parciales de cada faja, calculados como el producto del área por su velocidad media, proporciona el caudal total.

En la investigación se hará uso del correntómetro de marca y modelo PASCO PASPort (PS-2130) junto con el software SPARKvue que conectado a un smartphone arroja las velocidades directamente y las grafica.

2.2.7. Topografía de un tramo de río

Para poder representar en un plano respecto a un sistema de referencia un tramo de río debemos realizar un conjunto de operaciones necesarias para capturar puntos coordenados y cotas (elevaciones) relevantes. Este trabajo incluye medir la profundidad desde la lámina de agua hasta el lecho mismo con lo cual nos permite conocer la forma y estructura del río.

2.2.7.1. Pendiente longitudinal

Se calcula dividiendo la diferencia de alturas entre los extremos de un tramo por su longitud

horizontal. Para tramos de longitudes variables como es el caso del tramo del río estudiado, el método de Taylor y Schwarz es el que mejor se adapta.

$$S = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{s_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{s_2}} + \frac{l_3}{\sqrt{s_3}} + \dots + \frac{l_n}{\sqrt{s_n}}} \right]^2 \dots\dots\dots (7)$$

Donde:

L: Longitud total del tramo, en m.

$l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$: Longitudes individuales de cada subsegmento, en m

$s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$: Pendientes correspondientes a cada subsegmento, en m/m

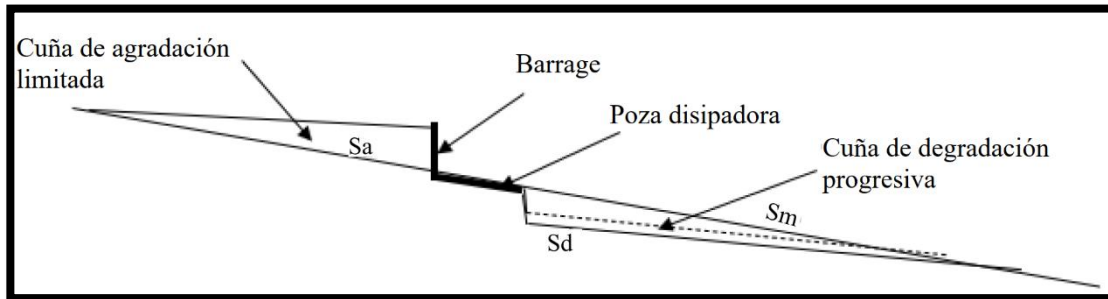
n: Cantidad total de subsegmentos en los que se divide el perfil longitudinal.

S: Valor promedio de la pendiente del cauce, en m/m

2.2.7.2. Influencia de las captaciones derivadoras en la pendiente del río

Inicialmente los ríos tenían una pendiente longitudinal media S_m . La construcción de captaciones derivadoras alteró esa pendiente natural tanto aguas arriba como aguas abajo de las estructuras. Después de instalarlas se empezó a ver un doble efecto que avanza con el tiempo: por un lado, el lecho sube antes de la barrera debido a la acumulación de sedimentos (agradación) y por otro lado el fondo se erosiona después de la poza que disipa energía (degradación) según observó López (2014). Estos cambios forman cuñas de material acumulado o de lecho excavado que crecen año tras año la cuña de sedimento aguas arriba tiene un tope, pero la zona erosionada aguas abajo se vuelve progresivamente más profunda y extensa. Incluso hay captaciones donde el sedimento ya llega hasta la parte más alta del barrage sin embargo el proceso de erosión aguas abajo no se detiene como señalan Huamán y Rodríguez (2023).

Figura 7: Cambio de elevación del lecho del río por agradación aguas arriba y degradación aguas abajo de una captación.



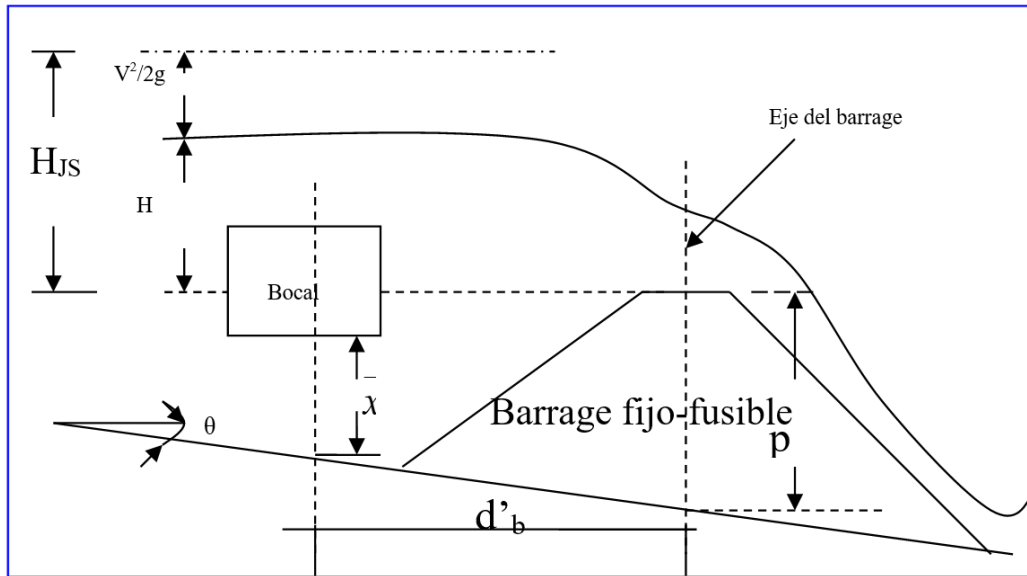
Nota. Fuente: Adaptado de (Huamán & Rodríguez, 2023)

2.2.8. Captaciones derivadoras de ríos de alta montaña con barrage fijo-fusible

Las captaciones derivadoras de ríos en zonas de alta montaña que emplean barrages fijo-fusibles tienen como finalidad principal, en primer lugar, incrementar el nivel del agua para que sea posible su desvío y, en segundo término, incorporar un sistema que prevenga la obstrucción del bocal debido al arrastre de sedimentos.

La estructura se caracteriza por una parte central fija y resistente flanqueada por secciones laterales diseñadas para ser desalojadas durante las máximas avenidas que es cuando la fuerza del agua supera la resistencia de estas partes fusibles provocando su colapso. Esta ruptura controlada permite que la propia corriente erosione y arrastre los materiales depositados aguas arriba del bocal limpiando la zona. Posteriormente solo se reconstruye las secciones manualmente para devolver a la captación su plena capacidad operativa (Huamán J. ,2016).

Figura 8: Captación derivadora con barrage fijo-fusible



Nota. Fuente: Adaptado de (Huamán, J. 2022)

El flujo que pasa por encima y atraviesa el barrage fijo-fusible, antes de evacuar la protección enrocada, se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q = C_{js} * T * H_{js}^{3/2} \dots\dots\dots(8)$$

Donde:

- Q: Volumen de agua que cruza sobre y a través del barrage fijo-fusible, en m³/s.
- C_{js} : Parámetro adimensional que representa el coeficiente de descarga para barrage fijo-fusible.
- T: Longitud total de la estructura del barrage fijo-fusible, en m.
- H_{js} : Carga hidráulica correspondiente al barrage fijo-fusible, en m.

Si se desprecia la velocidad de aproximación $H_{js} \approx H$; la altura “P” del barrage fijo- fusible está marcada por la siguiente ecuación:

$$P = \bar{x} + h_0 + d_b' Tan\theta + \Delta h \dots\dots\dots(9)$$

$$\bar{x} = d_{90} \text{ del material grueso del río } \dots\dots\dots(10)$$

Donde:

\bar{x} : Posición del bocal, en m

h_0 : Carga hidráulica en el bocal, en m.

P: Altura de la estructura de barrage, en m.

T: Ancho del cauce, en m.

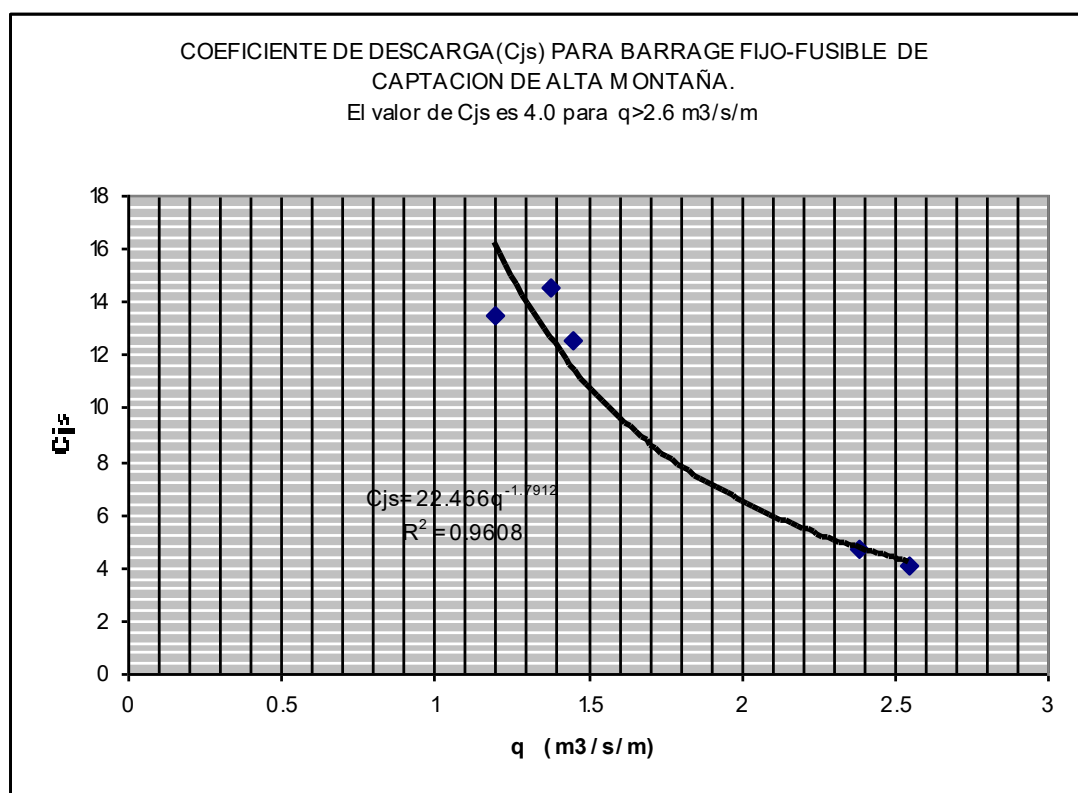
d'_b : Distancia que separa el eje del barrage del eje del bocal, en m.

θ : Ángulo formado entre la horizontal y la pendiente longitudinal del fondo del cauce.

Δh : Pérdida de energía ocasionada por la rejilla, en m.

El coeficiente de descarga C_{JS} fue determinado mediante ensayos experimentales y se ilustra en la figura 9

Figura 9: Coeficiente de descarga para barrage fijo-fusible.



Nota. Fuente: Adaptado de (Huamán, J. 2022)

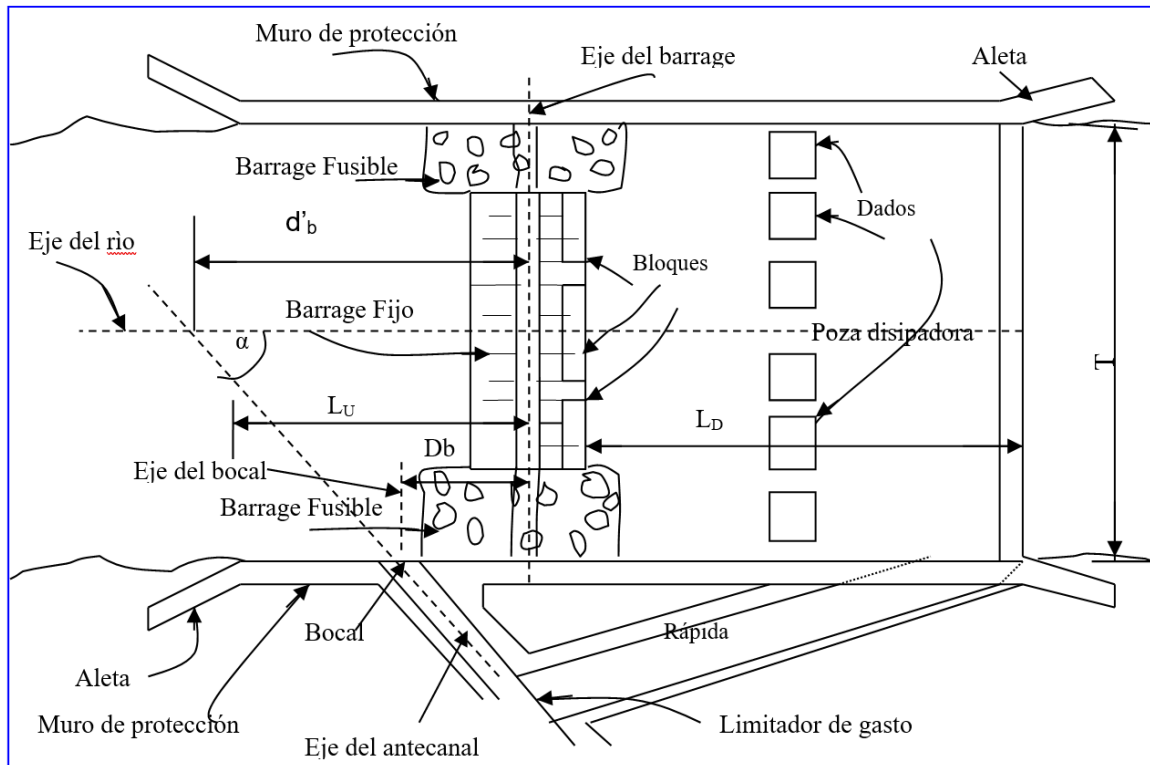
Resulta conveniente diseñar la sección fija central del barrage con una geometría trapezoidal. Las inclinaciones de sus taludes contribuyen a la estabilidad estructural. Para empezar un diseño preliminar, resulta viable implementar un talud aguas arriba con una relación 1:1(H:V) y otro aguas abajo 2.5:1(H:V).

La parte superior de la corona necesita un ancho mínimo de cuarenta centímetros (0.40m) más que nada por razones prácticas de construcción. La parte fusible que va en los extremos también tiene forma de trapecio. Sin embargo, para esta sección se sugiere usar taludes iguales de 1:1 (H:V) tanto en la dirección aguas arriba como aguas abajo.

Su ancho mínimo en la corona (A_c) se calcula con la siguiente fórmula:

$$A_c = 2(d_{90}) \dots\dots\dots(11)$$

Figura 10: Partes de una captación derivadora con barrage fijo-fusible.



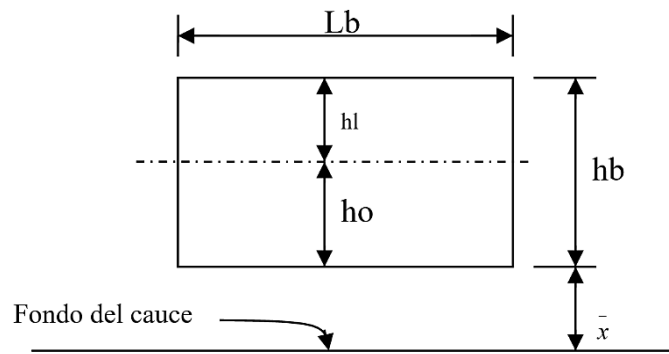
Nota. Fuente: Adaptado de (Huamán, J. 2022)

Con base en los resultados obtenidos a través de un ensayo realizado con un modelo físico a escala reducida, se determinó que la extensión del barrage fusible corresponde al 20% del ancho del río (0.20 T) y se sitúan simétricamente a ambos lados del barrage fijo (Huamán, J. 2022).

2.2.8.1. Bocal

Es la entrada de agua que permite el ingreso del caudal del río al canal, esencial para la captación. La caudal dotación (Q_o) que al ingresar por el bocal origina una carga hidráulica “ h_o ” (Huamán, J. 2022).

Figura 11: Dimensiones del bocal.



Nota. Fuente: Adaptado de (Huamán, J. 2022)

La carga hidráulica esta expresada mediante la siguiente ecuación:

$$h_o = \left(\frac{Q_o}{0.544\sqrt{g}L_b} \right)^{2/3} \dots\dots\dots(12)$$

La longitud “ L_b ” del bocal debe equivalerse al ancho “ B ” del antecanal y la altura “ h_b ” del bocal debe calcularse con las siguientes fórmulas:

$$h_b = h_o + h_l \dots\dots\dots(13)$$

$$h_l = \Delta h + 5 \text{ a } 10 \text{ cm} \dots\dots\dots(14)$$

El cálculo de las pérdidas de carga en rejillas (Δh) se realiza mediante la expresión:

$$\Delta h = K \left(\frac{e}{E} \right)^{4/3} \frac{V_1^2}{2g} \dots\dots\dots(15)$$

Donde:

h_0 : altura de carga hidráulica en el bocal, en m.

Q_0 : flujo volumétrico derivado, en m^3/s .

g : constante gravitacional terrestre, en m/s^2

Δh : pérdida por rejilla, en m. (mínimo 10 cm)

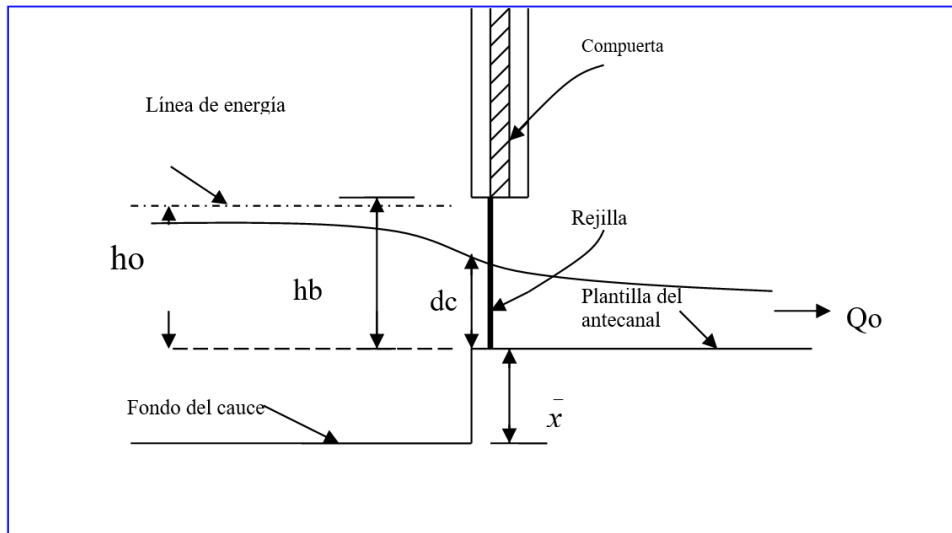
e : espesor de los barrotes, en m.

E : separación entre elementos de rejilla en metros. Para rejillas finas ($3/8''$ a $1''$) y protección de peces, el espaciamiento E oscila entre 3 cm hasta 1 cm.

K : coeficiente de forma dependiente de la geometría de la sección transversal de las barras. Los valores son: sección rectangular $K=2.42$, sección circular $K=1.79$, sección elipsoidal $K=0.76$.

V_1 : componente de velocidad del flujo con ángulo " α " respecto al eje del cauce (m/s), correspondiente a un período de retorno anual.

Figura 12: Bocal con entrada tipo grada.



Nota. Fuente: Adaptado de (Huamán, J. 2022)

El tipo de flujo que tengamos en el antecanal determina directamente la profundidad del agua justo donde empieza la grada. Si el flujo es supercrítico debido a la pendiente allí se establecerá el tirante crítico “ d_c ”. En cambio, cuando el flujo es subcrítico por una pendiente más suave se asume que el tirante inicial es igual a la carga “ h_o ” que actúa sobre el bocal.

2.2.8.2. Parámetros para el diseño de una captación derivadora con barrage fijo-fusible

Los datos necesarios se obtienen mediante estudios directos en campo de:

- Caracterización Topográfica y Morfológica del Río.
- Estudios Hidrológicos y Muestreo de Sedimentos.
- Estudios Geológicos y de Mecánica de Suelos.

En la tabla siguiente se presentan los indicadores específicos para el diseño de una captación derivadora enfocados particularmente en ríos de alta montaña situados entre los 2000 y 3000 metros de altitud sobre el nivel del mar.

Tabla 4: *Parámetros de diseño de captación derivadora con barrage fijo-fusible.*

Parámetro	Unidad
$X_d = d_{50}$ de guijarros y cantos (material grueso)	cm
S_0 del río	m/m
T: ancho del río	m/m
Ltb: longitud total del barrage	m
d_{90} del material grueso	cm
dm de guijarros y cantos	cm
d_{50} de arenas y gravas	cm
S pendiente del antecanal	m/m
Q_d caudal dotación	m ³ /s
Q_1 caudal del río, período de retorno de 1 año	m ³ /s
d_b : distancia entre el eje del barrage y una paralela a este que pase por el centro del bocal	m
Q: avenida para período de retorno de 30 años	m ³ /s
α : ángulo de derivación	°
Dmáx: bolo del río	m
d_{90} de arenas y gravas	cm
d_m de arenas y gravas	cm

Nota. Fuente: Adaptado de (Huamán, J. 2022)

2.2.8.3. Eficiencia de captación

Se establece como el porcentaje que representa el flujo que penetra a través del bocal en comparación con el volumen total necesario para cumplir con la demanda, siendo este flujo influenciado por el nivel del agua en el río, así como de las características y condiciones de obstrucción del propio bocal (Huaman J. 2016).

$$E_c = \frac{Q_f}{Q} \times 100 \dots\dots\dots(16)$$

Donde:

- E_c: eficiencia de captación, en porcentaje %.
- Q_f: caudal que ingresa por el bocal hacia el canal de derivación.
- Q: caudal de dotación requerido por el proyecto.

2.2.9. Modelo hidráulico físico a escala reducida

Es una representación física a menor escala de un sistema hidráulico real, como un río, un canal o una estructura hidráulica. Su objetivo principal es estudiar y simular el comportamiento del flujo y los fenómenos asociados (Rocha, A.1998).

La construcción del modelo exige una réplica geométrica escalada y precisa del prototipo, que mantenga su consistencia durante la operación y contenga estructuras para controlar y medir el caudal. Después de su construcción, el modelo debe ser calibrado y verificado, ajustando características físicas como la rugosidad de fondo, el caudal y tirantes para que reproduzca con precisión los eventos del prototipo (French, R. 1988).

La clave del funcionamiento eficiente de los modelos físicos a escala reducida es que imiten fielmente al prototipo. Esto exige el cumplimiento estricto de las leyes de similitud geométrica cinemática y dinámica. Son precisamente estas leyes las que conectan las magnitudes físicas equivalentes entre el sistema real A_p y su modelo A_m (Vergara, M. 1995).

Hay que tener en cuenta que una similitud perfecta es inalcanzable por ello se centra en reproducir aspectos clave del fenómeno mediante tres enfoques principales.

-Similitud Geométrica que exige mantener una proporción constante entre todas las dimensiones correspondientes como longitudes anchos y altos. A partir de esta relación base se derivan fácilmente las escalas para áreas y volúmenes. Sin embargo, a veces se aplica una distorsión vertical esto se hace para que las profundidades de agua en el modelo no sean tan pequeñas que dificulten las mediciones (Julien, 2018).

-Similitud Cinemática relacionada directamente con el movimiento de las partículas. Buscamos que las trayectorias y velocidades relativas sean análogas entre modelo y prototipo. (Giles, V., Evett, B., Lui, C. 2003).

-Similitud Dinámica se concentra en las fuerzas actuantes. Es fundamental que la relación entre las distintas fuerzas sea la misma en ambos sistemas. Dado que en obras hidráulicas y ríos la gravedad suele ser la fuerza dominante el Número de Froude se convierte en el parámetro adimensional crucial (Julien, 2018).

Determinar la escala correcta es un paso que responde directamente a la naturaleza del estudio requerido bien sea que necesitemos modelos con o sin distorsión o que trabajemos sobre lechos fijos o móviles. Consecuentemente para modelar sistemas hidráulicos se emplean rangos específicos de escalas lineales ajustados a la diversidad de problemas tal como lo expone Vergara (1995) en la siguiente tabla:

Tabla 5: *Parámetros de diseño de captación derivadora con barrage fijo-fusible.*

Modelo	Escalas lineales	Observaciones
Obras hidráulicas:		
Vertedores, tanques amortiguadores, rápidos, túneles	De 1:20 a 1:70	Modelos sin distorsión y de fondo fijo
Flujo alrededor de estructuras	De 1:5 a 1:25	
Flujo en ríos y canales	Ex de 1:250 a 1:1000 Ey de 1:50 a 1:100	Modelos de fondo fijo con distorsión. Distorsión máxima de 10
Erosión local por corrientes	De 1:20 a 1:60	Modelos de fondo móvil sin distorsión
Transporte de sedimentos en ríos	Ex de 1:100 a 1:500 Ey de 1:50 a 1:100	Modelos de fondo móvil, con distorsión recomendable de 5.

Nota. Fuente: Adaptado de (Vergara M. 1993).

2.2.9.1. Modelos basados en la ley de Froude

El criterio fundamental de estos modelos es que la fuerza principal que causa el movimiento del fluido, la gravedad, es la dominante. Esto implica que las fuerzas de inercia y gravedad deben relacionarse en la misma proporción entre el modelo y el prototipo (French, R. 1988).

$$F_M = F_P \dots\dots\dots(17)$$

Donde:

F: número de Froude y los subíndices M y P designan los números de Froude del modelo y del prototipo, respectivamente. La ecuación (17) puede resolverse para dar:

$$U_R = \frac{U_M}{U_P} = \left(\frac{g_M L_M}{g_P L_P} \right)^{1/2} = \sqrt{g_R L_R} \dots\dots\dots(18)$$

Donde:

R: Subíndice señala la relación de escala (modelo/prototipo) para una variable determinada

U_R: Razón de velocidad.

L_R: Razón de escala de longitud.

G_R: Razón de gravedad.

Puesto que la aceleración de gravedad es constante y no se puede manipular, la relación entre la gravedad del modelo y la del prototipo (G_R) se mantiene en 1.

y la ecuación queda como

$$U_R = \sqrt{L_R} \dots\dots\dots(19)$$

Dado que la velocidad del flujo relaciona distancia y tiempo, por lo tanto:

$$T_R = \sqrt{L_R} \dots\dots\dots(20)$$

Donde:

T_R : Escala de tiempos.

También se tiene que:

$$Q_R = L_R^{5/2} \dots\dots\dots(21)$$

Donde:

Q_R : Escala de caudales.

2.2.9.2. Modelos de fondo móvil

Estos modelos son la herramienta para investigar diversos procesos como la morfología fluvial general los cambios de pendiente la sedimentación la erosión y cómo las estructuras hidráulicas alteran el gasto y arrastre de sedimentos. El criterio esencial para estos modelos radica en que la gravedad es la fuerza principal que gobierna el movimiento del fluido. Por lo tanto, esto exige que las fuerzas de inercia y gravedad mantengan una proporción idéntica entre el modelo a escala y el prototipo real (French, R. 1988).

Es necesario que el flujo sea turbulento y preferiblemente rugoso además debe replicar la misma rugosidad relativa encontrada en el prototipo (Chanson, 2004).

$$Re_m > 5000 \dots\dots\dots(22)$$

$$(K_s)_r = L_r \dots\dots\dots(23)$$

Donde el número de Reynolds (Re) queda definido por el diámetro hidráulico, según la ecuación $Re = \rho V D H / \mu$, donde además K_s es la altura de rugosidad.

La ecuación (24) asume un fondo fijo, donde la rugosidad depende únicamente de la geometría del canal. Sin embargo, en modelos de fondo móvil con transporte de sedimentos, la rugosidad efectiva del lecho $(K_s)_r$ depende además del diámetro característico del sedimento (d_{50}) y del parámetro de Shields (θ) que controla el inicio del movimiento de las partículas (Yalin, 1971).

$$(K_s)_r = L_r * d_r \dots\dots\dots(24)$$

$$d_r = \frac{d_{50 \text{ modelo}}}{d_{50 \text{ prototipo}} \dots\dots\dots(25)$$

Donde:

d_r : Escala del diámetro del sedimento

Es importante señalar que el diámetro d_{50} a utilizar corresponde al sedimento que participa en el transporte (arenas y gravas), no al material grueso que permanece estático (bolos, guijarros y cantos), ya que este último se comporta como fondo fijo bajo las condiciones de flujo estudiadas.

2.2.9.3. Escalamiento de resistencia

Igualar geoméricamente la rugosidad no siempre basta para simular bien la resistencia al flujo. Los modelos a veces son muy lisos o muy ásperos y no capturan el comportamiento real, especialmente con escalas grandes donde la turbulencia puede ser menor. Para corregirlo, se pueden añadir elementos como mallas que aumenten la turbulencia y mejoren la fidelidad del modelo. También es fundamental escalar adecuadamente la resistencia al flujo usando factores como el de Darcy, Chézy o Manning (Huamán J. 2016).

La ecuación de momentum es clave para flujos uniformes y en equilibrio:

$$V_r = \sqrt{L_r * d_r} = \sqrt{\frac{(D_H)_r * (g)_r}{S_r}} * \sqrt{d_r} \dots\dots\dots(26)$$

$$D_H = 4 \frac{\text{Área deseccción transversal}}{\text{Perímetro}} \dots\dots\dots(27)$$

Donde:

- Vr: Escala de velocidades
- Lr: Escala de longitudes
- (DH)r = Escala de diámetros hidráulicos
- DH: Diámetro hidráulico
- dr: Escala del diámetro del sedimento
- gr: Escala de la aceleración gravitacional (gr = 1)
- Sr: E Escala de la pendiente (Sr = 1 para modelo sin distorsión)

La ecuación (27) del diámetro hidráulico permanece invariante, siendo una relación puramente geométrica.

Cuando se trabaja con un modelo sin distorsión, aplicar el criterio de similitud de Froude significa que la resistencia al flujo dentro del modelo debe ser igual a la que existe en el prototipo real (fr = 1).

En la mayoría de los casos, los flujos presentes en el prototipo se caracterizan por ser turbulentos y completamente rugosos, lo que significa que el factor de fricción de Darcy depende fundamentalmente de la rugosidad relativa.

Según la ecuación de Chézy, para los regímenes de flujo que experimentan variaciones graduales, así como para aquellos en estado de equilibrio uniforme, se conserva la relación de escalas que se indica a continuación:

$$V_r = \sqrt{L_r} = \frac{1}{(n_{mannig})_r} ((D_H)_r)^{2/3} \sqrt{(Sen\theta)} \dots\dots\dots(28)$$

Para un modelo no distorsionando, ecuación anterior se transforma en la siguiente expresión:

$$(n_{Manning})_r = L_r^{1/6} \dots\dots\dots(29)$$

La similitud completa requerida y la rugosidad mínima alcanzable (n de Manning) limitan la escala geométrica (Lr), haciendo que modelos con Lr pequeña (<40) sean poco prácticos.

2.2.9.4. Calibración y verificación del modelo a escala reducida

La calibración de un modelo físico, según Vergara, consiste en el afinamiento preciso de los aparatos de medición y los sistemas generadores, así como del propio modelo. Dicho afinamiento se basa en contrastar y equiparar los resultados del modelo con datos medidos en el prototipo original. Luego, la verificación busca ratificar que el modelo reproduce con exactitud sucesos conocidos o se alinea con resultados de experimentos análogos, lo que garantiza su fiabilidad para investigaciones posteriores (Vergara, M. 1993).

French (1988) enfoca la correspondencia entre prototipo y modelo físico en la modificación de atributos físicos concretos del modelo. Esto se traduce en manipular factores como la aspereza del lecho, el flujo de agua aplicado y/o las alturas alcanzadas por el agua dentro del sistema modelado. Este método se distingue del ajuste de coeficientes típico de los modelos numéricos. La exactitud de los datos del prototipo (como geometría, niveles de agua y velocidades) resulta fundamental para este proceso de ajuste físico (French, R. 1988).

2.2.9.5. Similitud sedimentológica

Para seleccionar el material del lecho, se debe mantener la identidad del número de Froude del grano (F*) entre el modelo y el prototipo.

$$F^* = \frac{\tau}{\Delta\rho * g * d} \dots\dots\dots(30)$$

$$F^* = \frac{\gamma * R * S}{(\gamma_s - \gamma)d} \dots\dots\dots(31)$$

Donde:

R: Radio hidráulico, en m.

S: Pendiente, en m/m.

d: Diámetro de la partícula, en m.

γ : Peso específico del agua, en kg/m³

γ_s : Peso específico del sedimento, en kg/m³

τ : Esfuerzo cortante.

ρ : Densidad, en Kg/m³

Para cumplir la identidad de Froude tenemos que: $F_m^* = F_p^*$ de tal manera:

$$\frac{\gamma * R_m * S_m}{(\gamma_s - \gamma)_m d_m} = \frac{\gamma * R_p * S_p}{(\gamma_s - \gamma)_p d_p} \dots\dots\dots(32)$$

Al asumir la construcción de un modelo que no presenta distorsión de escala, se establece que las inclinaciones serán equivalentes tanto en el modelo como en el prototipo, expresado como $S_m = S_p$.

Asimismo, si se emplean sedimentos cuya fuente es la misma que la de los existentes en el prototipo, se deduce que los materiales compartirán idéntico peso específico, lo que permite concluir que:

$$\frac{R_m}{d_m} = \frac{R_p}{d_p} \dots\dots\dots(33)$$

Haciendo un arreglo se deduce que:

$$\frac{R_m}{R_p} = \frac{d_m}{d_p} \dots\dots\dots(34)$$

Es sabido que: $\frac{R_m}{R_p}$ representa la relación de longitudes (Lr) y $\frac{d_m}{d_p}$ la relación de diámetros de partículas (dr).

En resumen, la relación de escala del diámetro del grano coincidirá con la escala geométrica siempre que se desarrolle un modelo sin distorsión y, adicionalmente, cuando los sedimentos utilizados en el modelo provengan de la misma fuente natural que los del prototipo.

2.2.9.6. Parámetro de Shields y número de Froude del grano

La ecuación (34) establece que, en condiciones ideales, la escala del diámetro del sedimento debería coincidir con la escala geométrica ($L_r = d_r$). Sin embargo, en la práctica esta condición rara vez se cumple exactamente debido a la disponibilidad de materiales granulares con las características requeridas. Por ello, es necesario verificar la similitud sedimentológica mediante el parámetro de Shields (θ), también denominado número de Froude del grano (F^*) (Shields, 1936; Yalin, 1971).

El parámetro de Shields es un número adimensional que relaciona el esfuerzo cortante ejercido por el flujo sobre el lecho con el peso sumergido de las partículas de sedimento. Este parámetro determina las condiciones bajo las cuales las partículas inician su movimiento y el régimen de transporte predominante (Buffington & Montgomery, 1997).

El parámetro de Shields se define como:

$$\theta = \frac{\tau_0}{[(\rho_s - \rho) * g * d_{50}]} \dots\dots\dots(35)$$

Donde τ_0 es el esfuerzo cortante en el lecho se expresa como:

$$\theta = \frac{\gamma * R * S}{[(\gamma_s - \gamma) * d_{50}]} \dots\dots\dots(36)$$

Donde:

- θ : Parámetro de Shields (adimensional)
- R: Radio hidráulico, en m
- S: Pendiente del canal, en m/m
- d_{50} : Diámetro medio del sedimento, en m
- γ : Peso específico del agua, en N/m³
- γ_s : Peso específico del sedimento, en N/m³

El valor del parámetro de Shields determina el régimen de transporte de sedimentos en el canal. Shields (1936) estableció originalmente el concepto de esfuerzo cortante crítico, que representa el umbral a partir del cual las partículas inician su movimiento. (Van Rijn, 1984; Buffington & Montgomery, 1997).

Los regímenes de transporte de sedimentos según el parámetro de Shields se clasifican de la siguiente manera:

Tabla 6: Regímenes de transporte según el parámetro de Shields.

Régimen de transporte	Rango de θ	Características
Sin movimiento	$\theta < 0.03$	Lecho estático
Inicio de movimiento (crítico)	$0.03 \leq \theta < 0.06$	Movimiento incipiente
Transporte de fondo	$0.06 \leq \theta < 2.5$	Arrastre por el fondo
Transporte en suspensión	$\theta \geq 2.5$	Partículas suspendidas

Nota. Fuente: Adaptado de Shields (1936), Van Rijn (1984) y Buffington & Montgomery (1997).

2.2.9.7. Criterio de similitud sedimentológica

Para cumplir la similitud sedimentológica entre modelo y prototipo, se requiere que el parámetro de Shields sea igual en ambos casos:

$$\theta_m = \theta_p \quad \dots\dots\dots(37)$$

Sin embargo, según Yalin (1971) y Pugh & Dodge (1991), La similitud exacta del parámetro de Shields es prácticamente imposible de alcanzar en modelos físicos debido a las restricciones en la disponibilidad de materiales y a los efectos de escala inherentes. Por esta razón, estos autores establecen un criterio de similitud relajado (Yalin ,1971; Pugh & Dodge, 1991)

$$Régimen(\theta_m) = Régimen(\theta_p) \quad \dots\dots\dots(38)$$

Este criterio establece que la similitud sedimentológica se considera satisfactoria cuando modelo y prototipo operan dentro del mismo régimen de transporte, aunque los valores numéricos del parámetro de Shields no sean exactamente iguales. Esta aproximación es ampliamente aceptada en la práctica de modelación física (Chanson, 2004; ASCE Manual No. 110, 2008).

Según Chanson (2004) en "Hydraulics of Open Channel Flow": "La similitud completa en modelos de fondo móvil es prácticamente imposible de alcanzar. Se considera aceptable cuando el modelo reproduce cualitativamente el comportamiento del prototipo, verificándose mediante la correspondencia de regímenes de transporte".

En el caso de lechos mixtos con presencia de material grueso y material fino, se debe considerar únicamente el d_{50} de arenas y gravas, ya que el material grueso permanece estático bajo las condiciones de flujo típicas y se comporta como fondo fijo. El material grueso solo se moviliza durante eventos extremos con esfuerzos cortantes muy superiores a los normales de operación (Parker, 2008).

Si la condición de la ecuación (38) se cumple, la similitud sedimentológica se considera satisfactoria y el modelo es válido para representar los fenómenos de transporte de sedimentos del prototipo.

2.2.9.8. Diagrama de Shields

El diagrama de Shields es un gráfico en escala logarítmica que relaciona dos parámetros adimensionales: el parámetro de Shields (θ) en el eje vertical, y el número de Reynolds del grano (Re^*) en el eje horizontal. La curva principal del diagrama, denominada curva crítica de Shields, separa la zona de estabilidad del lecho (sin movimiento) de la zona donde se produce transporte de sedimentos (Shields, 1936; Buffington & Montgomery, 1997).

El parámetro de Shields representa la relación entre la fuerza de arrastre del flujo sobre las partículas y el peso sumergido de las mismas. Se define mediante las ecuaciones (35) y (36) presentadas anteriormente.

El número de Reynolds del grano cuantifica la relación entre fuerzas inerciales y viscosas alrededor de la partícula individual:

$$Re^* = \frac{u^* * d_{50}}{\nu} \dots\dots\dots(39)$$

Donde:

u^* : $\sqrt{g * R * S}$ es la velocidad de corte.

ν : viscosidad cinemática del agua, en m^2/s .

El diagrama de Shields funciona de la siguiente manera; para una condición hidráulica y sedimentológica dada, se calculan los valores de θ y Re^* , y se ubica el punto correspondiente en el diagrama. La posición de este punto respecto a la curva crítica determina si existe transporte de sedimentos o no:

- Por debajo de la curva crítica ($\theta < \theta_c$): El esfuerzo cortante del flujo es insuficiente para mover las partículas. El lecho permanece estático.
- Sobre la curva crítica ($\theta = \theta_c$): Condición de inicio de movimiento incipiente. Las partículas más expuestas comienzan a desplazarse.
- Por encima de la curva crítica ($\theta > \theta_c$): Existe transporte de sedimentos activo. Cuanto mayor sea la distancia por encima de la curva, más intenso será el transporte.

El eje horizontal del diagrama (Re^*) define tres regímenes del flujo alrededor de la partícula, cada uno con características distintas del transporte sedimentario (Yalin, 1971; ASCE Manual No. 110, 2008):

Tabla 7: Regímenes del flujo alrededor de la partícula según Re^* .

Régimen	Rango de Re^*	Características	θ_c aproximado
Viscoso (liso)	$Re^* < 5$	Subcapa viscosa cubre la partícula	θ_c decrece con Re^*
Transición	$5 \leq Re^* < 70$	Efectos viscosos e inerciales coexisten	θ_c tiene un mínimo (~ 0.03)
Turbulento rugoso	$Re^* \geq 70$	Fuerzas inerciales dominan	$\theta_c \approx 0.06$ (constante)

En la zona de turbulento rugoso ($Re^* > 70$), el valor crítico del parámetro de Shields se vuelve prácticamente constante en $\theta_c \approx 0.06$, lo que significa que el inicio del movimiento es independiente de la viscosidad y depende únicamente de la relación entre el esfuerzo cortante y el peso sumergido de las partículas (Shields, 1936; Yalin, 1971).

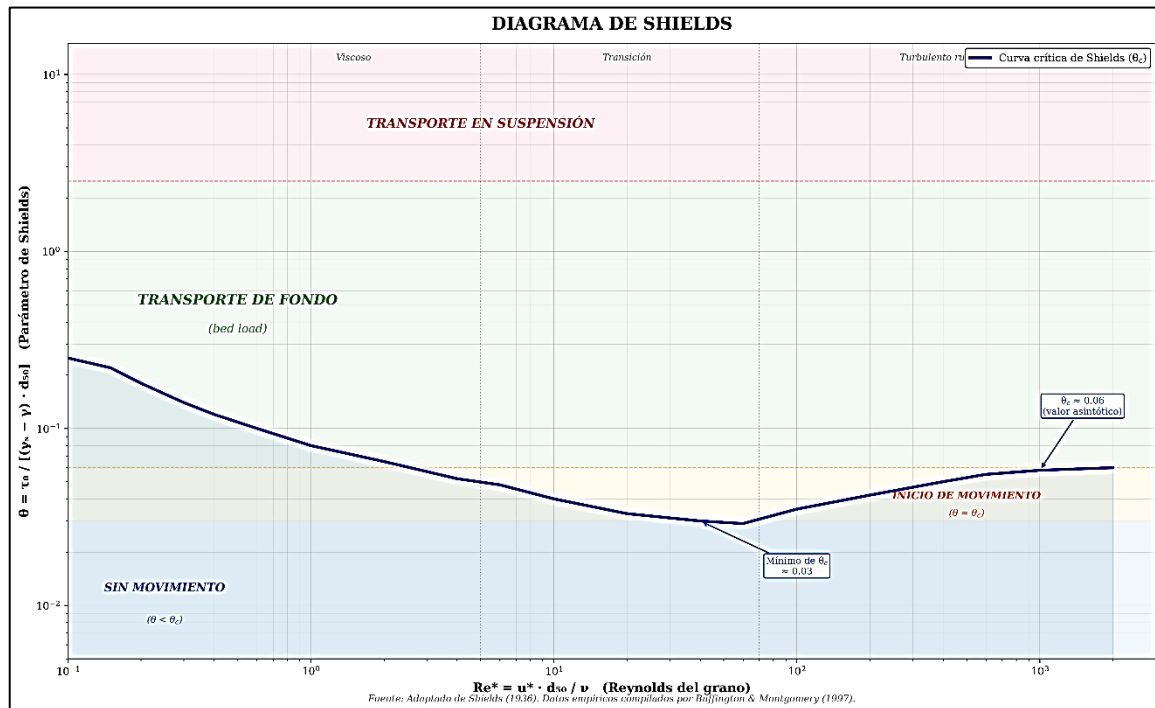
Es deseable que el Reynolds del grano en el modelo supere el valor de $Re^* \approx 70$ para asegurar que el flujo alrededor de las partículas sea completamente turbulento y el transporte sea independiente de efectos viscosos. En la práctica, esta condición no siempre se cumple en modelos a escala reducida debido a que el diámetro del sedimento disminuye con la escala (Yalin, 1971; ASCE Manual No. 110, 2008).

Sin embargo, cuando ambos valores de θ (modelo y prototipo) se ubican claramente por encima de la curva crítica y en el mismo régimen de transporte, la similitud se considera válida aun cuando Re^* del modelo se encuentre en la zona de transición. Esto se debe a que con $\theta > \theta_c$, el transporte de sedimentos está gobernado principalmente por la magnitud del esfuerzo cortante relativo, no por los efectos viscosos locales alrededor del grano (Parker, 2008; ASCE Manual No. 110, 2008).

Adicionalmente, se requiere que el número de Reynolds del flujo en el modelo sea mayor a 5000 para garantizar que el flujo sea turbulento a nivel macroscópico (Chanson, 2004).

La Tabla 6 presentada anteriormente clasifica los regímenes de transporte según el valor del parámetro de Shields. Esta clasificación, junto con el diagrama, permite identificar en qué zona opera cada sistema.

Figura 13: Diagrama de Shields.



Nota. Fuente: Adaptado de (Buffington & Montgomery, 1997).

2.3. Definición de términos básicos

Captación derivadora: son estructuras hidráulicas fluviales, construidas para elevar el nivel del agua y desviar un caudal específico hacia canales de riego o abastecimiento. A menudo enfrentan colmatación por sedimentos (Mansen, A. 2015).

Barrage fijo-fusible: es una estructura hidráulica con una parte central fija y secciones laterales colapsables. Eleva el nivel del agua para la captación y, durante avenidas, sus partes fusibles colapsan para arrastrar sedimentos acumulados aguas arriba del bocal, limpiando la zona. Se reconstruyen manualmente (Huamán J. 2016).

Eficiencia de captación: es un indicador de desempeño que mide la capacidad de una estructura para desviar el caudal requerido. Se calcula como la relación porcentual entre el caudal que ingresa por el bocal y el caudal de dotación (Huamán J. 2016).

Modelo hidráulico físico a escala reducida: es una representación física a menor escala de un prototipo, como un río o una estructura. Permite simular y estudiar el flujo y fenómenos asociados tridimensionalmente. Su funcionamiento exige similitud geométrica, cinemática y dinámica (French, R. 1988).

Aforo de caudal: comprende técnicas para cuantificar el volumen de agua que fluye por una sección transversal de un río en unidad de tiempo. Métodos comunes incluyen área-velocidad con correntómetro o tubo de Pitot, y el uso de flotadores (Arboleda et al., 2018).

Colmatación: es un proceso geomorfológico de acumulación de sedimentos (rocas, gravas, arenas, limos, arcillas) en el lecho fluvial o dentro de estructuras hidráulicas. Es un proceso inevitable que, aunque natural, es agravado por la acción humana (Rocha A. 2006).

Caudal Dominante o Caudal Formativo del Río: es la descarga de cauce lleno que ejerce la mayor acción modeladora sobre la morfología fluvial. Genera el mayor transporte anual de sedimentos. Se estima ocurre con un periodo de retorno de 1.4 a 7 años. (Eagle et al., 2021).

Descolmatación inducida: es la remoción de sedimentos lograda mediante técnicas específicas que aprovechan la acción erosiva del flujo de agua. Implica la apertura controlada de secciones de un barrage, mejorando así la eficiencia de captación y alterando la morfología fluvial (Huamán J. 2016).

Rugosidad de Manning: es un coeficiente empírico "n" que cuantifica la resistencia natural al flujo de agua en cauces abiertos. Un "n" mayor significa más impedimento al flujo. (Strickler, A. (1923).

Caudal de un río: es la cantidad de agua que circula por una sección transversal en un tiempo determinado, expresada en m³/s. Su variación es notable y estacional. Durante avenidas, el caudal y la velocidad aumentan significativamente, incrementando el transporte de sedimentos y modelando el cauce (Arboleda et al., 2018).

Ancho estable de un río: es la dimensión transversal que un sistema fluvial tiende a configurar bajo un régimen hidrológico y sedimentario específico. Representa un equilibrio dinámico donde la capacidad de transporte de sedimento del flujo se ajusta a la carga y resistencia del lecho. Las estructuras hidráulicas alteran este equilibrio, pudiendo ensanchar el cauce aguas arriba (Simons & Sentürk, 1992).

Bocal: es la ventana de entrada principal por donde el agua del río ingresa al canal de derivación de una captación. Su objetivo es captar el caudal requerido. Funciona como orificio de fondo en meses lluviosos. Es vulnerable a la colmatación por sedimentos, lo cual reduce su capacidad (Huamán J. 2016).

Erosión hídrica: es el proceso de remoción de partículas sólidas del lecho fluvial por la acción del agua en movimiento. Inicia cuando el esfuerzo cortante del flujo supera la resistencia del material (Novak 2001).

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización del área de estudio

El presente estudio se desarrolla en la captación derivadora de agua denominada “Río Porcón”, estructura fundamental para el abastecimiento hídrico que se ubica directamente sobre el cauce del río Porcón dentro del caserío de Huambocancha Alta; esta localidad pertenece al distrito, provincia y departamento de Cajamarca y la captación misma se sitúa a aproximadamente 1.30 kilómetros aguas arriba respecto a la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) “El Milagro”, además de encontrarse adyacente a la vía que conecta Cajamarca con Bambamarca. Las coordenadas geográficas del punto de captación, referenciadas al sistema UTM (Universal Transversal de Mercator) zona 17 y al datum WGS 84, son:

Norte: 9214138.0470

Este: 771180.1450

Elevación: 2848.2380 (tomada en la corona del barrage)

Figura 14: *Ubicación de la cuenca aportante del río Porcón.*

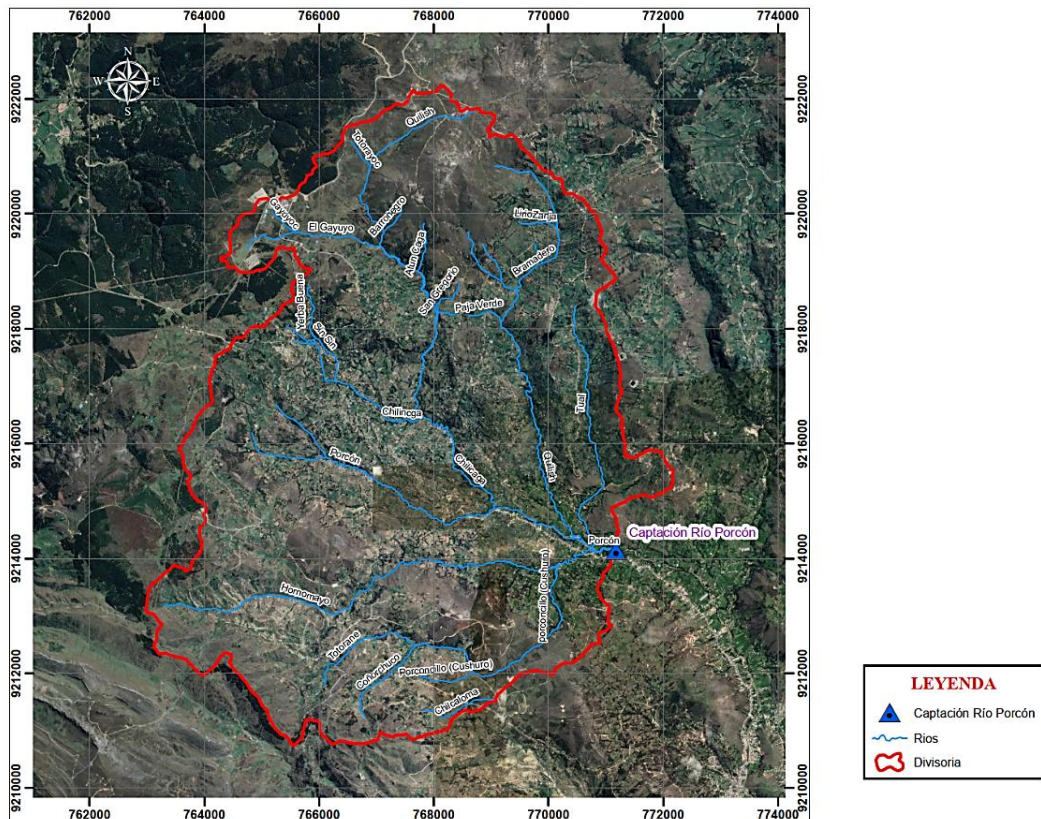


Figura 15: Vista satelital de la zona de estudio.



2.3.1. Ubicación temporal de la investigación

El desarrollo de esta investigación abarcó el periodo comprendido entre octubre de 2023 y junio de 2025, lapso durante el cual se concentraron las labores de campo esenciales como la ejecución de aforos, levantamientos topográficos y la recopilación de datos directamente in situ (recolección del material del lecho del río); toda esta información primaria fue posteriormente sometida a un procesamiento y análisis en gabinete, etapa que ayudo con la construcción del modelo hidráulico y el inicio de la fase de experimentación proyectada.

3.2. Materiales, Equipos y Softwares

3.2.1. Materiales

- Cordel de nylon
- Estacas de madera
- Regla de madera graduada (1.50m de largo)
- Libreta de campo
- Planchas de acero de 3mm de espesor
- Tubo estructural cuadrado
- Costales de polipropileno
- Materiales de escritorio
- Material extraído del río
- Tubos y accesorios de PVC

3.2.2. Equipos

- Estación Total (Trimble S9)
- Motobomba
- Computadora portátil (laptop)
- Cámara fotográfica
- Correntómetro PASCO PASPort (PS-2130)
- Tubo de Pitot
- Baldes graduados
- GPS navegador
- Palanas
- Picos
- Barretas

- Amoladora
- Máquina de soldar

3.2.3. Softwares

- AutoCAD Civil 3D 2023
- Google Earth Pro

3.3. Procedimiento

3.3.1. Caracterización hidráulica del río Porcón

El presente análisis aborda la caracterización hidráulica del río Porcón, un curso de agua cuyo régimen ha sido modificado por la captación derivadora para la planta "El Milagro". Esta estructura diseñada para desviar un caudal promedio de 100 l/s, pero su verdadero impacto se manifiesta durante las temporadas de sequías ya que esta extracción mezclada con el consumo rural aguas arriba provoca que el caudal del río disminuya a niveles críticos, a veces cercanos a cero. En las siguientes fotografías se ilustra el estado actual de esta infraestructura y revelan las condiciones que definen el comportamiento del agua en este tramo del río.

La captación derivadora del río Porcón está compuesta por un barrage, un desarenador, un canal de captación, una caja de reunión de agua cruda y una canaleta con medidor Parshall como se observa en la Figura 15.

Figura 16: Vista elevada de las partes de la captación derivadora del río Porcón.



Se observa la gran acumulación de sedimentos en la captación provocando colmatación, estos llegan hasta la corona del barrage.

Figura 17: *Colmatación aguas arriba del barrage de la captación derivadora.*



A 35 metros aguas arriba de la captación se aprecia que el tramo del río contiene taludes estables con vegetación que evita el desprendimiento del suelo ocasionado por la erosión.

Figura 18: *Colmatación aguas arriba del barrage de la captación derivadora.*



A 90 metros aproximadamente aguas arriba de la captación se aprecia que el tramo del río se mantiene recto y con un ancho estable.

Figura 19: *Colmatación aguas arriba del barrage de la captación derivadora.*



Aguas abajo de la captación de estudio aproximadamente 40 metros existe una segunda captación usada para captar agua para regadío y está se encuentra colmatada, y a la salida de la misma observa socavación. La derivación de agua mediante esta segunda captación es de 2 a 6 pm así indican los pobladores que viven en esa zona.

Figura 20: *Colmatación y socavación aguas abajo del barrage de la segunda captación.*



3.3.2. Caracterización del impacto morfológico de una estructura de captación en el río Porcón y Análisis de la agradación y alteración de la pendiente longitudinal

El presente trabajo se centró en evaluar la alteración morfológica del río Porcón causada por la implementación de obras hidráulicas.

Para ello, se ejecutó un levantamiento topográfico que consistió en el seccionamiento del río cada 5 metros y en cada sección se marcó el talweg correspondiente; el alcance del levantamiento es de un tramo de 200 metros aguas arriba y 180 metros aguas abajo de la estructura de captación principal, incluyendo también la segunda captación derivadora para riego situada a 40 metros de distancia aguas abajo.

El trabajo de gabinete es el procesamiento de estos datos para la elaboración de planos topográficos con curvas de nivel menores a 1 metro y mayores a 5 metros, en los cuales se representó la superficie levantada y los componentes de ambas captaciones.

El análisis final se enfocó en la estimación y comparación de las pendientes longitudinales del cauce, cuantificando la diferencia entre la pendiente original del río, previa a la construcción, y la pendiente actual, la cual ha sido modificada por el evidente proceso de agradación o colmatación del lecho ocurrido aguas arriba como consecuencia directa de la estructura.

Figura 21: *Levantamiento topográfico de la zona de estudio.*



3.3.3. Caracterización granulométrica superficial y subsuperficial de los sedimentos

El **muestreo de sedimentos superficiales** del río Porcón está relacionado con la condición de iniciación de movimiento, por ello se hizo un análisis de ciento veinticinco (125) muestras de rocas de diámetro mayor a 1.5 pulgadas a lo largo del cauce del río en un tramo de 300 metros aguas arriba del barrage en distintos puntos del río de forma aleatoria haciendo uso del método por conteo para su muestreo.

Figura 22: *Muestreo superficial de sedimentos del río Porcón con su respectiva numeración.*



Se realizó un muestreo inicial contabilizando 125 muestras superficiales. No obstante, durante el procesamiento de datos se descartaron aquellas superiores a 1.00 m, al identificarse como material alóctono introducido por agentes externos y ajenos a la dinámica natural de transporte del río. En consecuencia, se optó por trabajar exclusivamente con el rango de sedimentos superficiales restante, garantizando así que la curva granulométrica represente fielmente la rugosidad y la capacidad de transporte hidráulico del cauce.

Para el **muestreo de sedimentos subsuperficiales** del río Porcón se hizo un recorrido aproximadamente de 110 metros pasando la curva para reconocer los sitios más adecuados para realizar las calicatas.

Se realizaron calicatas aguas arriba de la captación, el tiempo utilizado fue de tres horas aproximadamente; las distancias y profundidades de cada calicata varia, se midió la profundidad mediante una barreta que se introdujo a golpes en el lecho del río hasta encontrar una capa de mayor resistencia que era el lecho original del cauce y la longitud de la barra introducida fue tomada como la medida de profundidad en ese punto.

Los limos, arenas y gravas se obtuvieron de ocho (08) puntos del río realizando calicatas de 0.60x0.60 metros utilizando pico, barreta y palana para extraer el material subsuperficial hasta profundidades desde 0.51 hasta 1.05 metros.

Como se detalla en la Tabla 8, los puntos de muestreo de sedimentos se ubicaron en ocho lugares diferentes aguas arriba del barrage; el punto más cercano se encuentra a 1.30 m con una profundidad de 1.05m, mientras que el más alejado se ubica a 60 m con una profundidad de 0.76 m.

El sedimento que se encuentra cerca del barrage (puntos de sondeo 1, 2, 7 y 8) está conformado principalmente arenas muy gruesas, mientras que los más alejados (puntos de sondeo 3, 4 y 5) están conformados principalmente por gravas, pero también por pequeños cantos.

La colmatación en el cauce del río Porcón aguas arriba del barrage está constituida por material fino, arenas (fina y gruesa), gravas y cantos rodados con una distribución heterogénea. El sedimento que se encuentra cerca del barrage (puntos de sondeo 1, 2, 7 y 8) está conformado principalmente arenas muy gruesas, mientras que los más alejados (puntos de sondeo 3, 4 y 5) están conformados principalmente por gravas, pero también por guijarros y pequeños cantos.

Tabla 8: *Coordenadas UTM, distancia, profundidad, resistencia y tipo de sedimentos encontrados en los distintos puntos de sondeo del río.*

Punto Sondeo	E	N	Distancia del Barrage (m)	Profundidad (m)	Resistencia durante el sondeo	Tipo de sedimento encontrado
C1	771181.16	9214141.65	1.30	1.05	Mediana Resistencia	Finos, arena (fina y gruesa) y grava
C2	771177.82	9214143.52	6.50	0.90	Mediana Resistencia	Finos, arena (fina y gruesa) y grava
C3	771165.78	9214145.70	20.00	0.70	Mediana Resistencia	Finos, arena (fina y gruesa) y grava
C4	771160.68	9214150.11	25.00	0.60	Alta Resistencia	Finos, arena (fina y gruesa) y grava
C5	771138.21	9214173.97	55.00	0.63	Alta Resistencia	Finos, arena (fina y gruesa) y grava
C6	771134.99	9214178.90	60.00	0.76	Alta Resistencia	Finos, arena (fina y gruesa) y grava
C7	771178.22	9214140.64	6.10	1.00	Mediana Resistencia	Finos, arena (fina y gruesa) y grava
C8	771174.71	9214143.08	10.20	0.51	Alta Resistencia	Finos, arena (fina y gruesa) y grava

Figura 23: *Muestreo subsuperficial de sedimentos del río Porcón.*



El sedimento recolectado se secó para su posterior análisis en el laboratorio de mecánica de suelos. Allí, se determinó su curva granulométrica empleando un juego de tamices y una balanza electrónica, de acuerdo con la norma NTP 339.128 (ASTM 422).

Figura 24: *Muestra de sedimento extraído del río Porcón.*



3.3.4. Caracterización del régimen hídrico del río Porcón (aforos y caudal dominante)

Se llevaron a cabo mediciones de aforos en dos secciones del río, ubicadas a 250 y 288 metros aguas abajo del barrage de la captación Río Porcón.

Esta elección de ubicaciones se fundamentó en la imposibilidad de realizar mediciones precisas en las secciones aguas arriba del barrage, debido a las condiciones del lecho del río, caracterizado por la presencia de grandes cantos rodados y bolos. Estos elementos interfieren con la medición del caudal, ya que generan turbulencias que afectan la precisión de los datos obtenidos.

En las secciones seleccionadas, las profundidades del agua fueron medidas directamente con una varilla graduada en unidades de metros, centímetros y milímetros. Para la subdivisión del tramo en franjas verticales, se utilizó un cordel a intervalos de un metro. Las mediciones de velocidad se realizaron en el eje de cada franja, a una profundidad equivalente al 60% del tirante del agua.

Inicialmente, las velocidades fueron obtenidas mediante un tubo de Pitot; sin embargo, debido a la fuerte turbulencia en el flujo, que dificultaba la obtención de datos precisos, se optó por la utilización de un correntómetro. En situaciones de caudales elevados o durante los períodos de estiaje, cuando las mediciones con instrumentos resultaron inviables, se empleó el método del flotador para registrar las velocidades superficiales. El tubo de Pitot permitió registrar la altura del menisco con una precisión de milímetros, mientras que el correntómetro proporcionó las mediciones de velocidad con una exactitud de décimas de metro por segundo.

Figura 25: Aforos realizados en el río Porcón.



Para el cálculo del caudal dominante inicia con la identificación de tres secciones representativas de la huella de avenidas en el cauce del río. Para la medición de la profundidad de estas huellas, se emplearon instrumentos de medición que son una wincha de 20 metros y la estación total.

Estas herramientas fueron fundamentales para determinar la altura de las huellas en los márgenes del río. La medición se efectuó en un tramo de 100 metros, aguas arriba de la captación, asegurando que dicho tramo no estuviera afectado por procesos de colmatación. Las mediciones se tomaron a intervalos de 20 metros a lo largo del recorrido.

En cuanto a la identificación de la huella de avenidas en el río Porcón, se llevó a cabo un procedimiento metodológico que incluyó las siguientes etapas:

- Se determinó el nivel máximo alcanzado por el agua durante la avenida ordinaria, basado en observaciones directas de campo.
- Se elaboró un croquis detallado en el cual se marcaron los puntos específicos donde se realizarían las mediciones de la huella.
- Se identificó la huella máxima en cada sección y en ambos márgenes del río, específicamente la marca dejada por el agua durante el período de máxima creciente.
- Finalmente, haciendo uso de la estación total se hizo el levantamiento de cada una de las secciones para garantizar la precisión de los datos y la trazabilidad de la información.

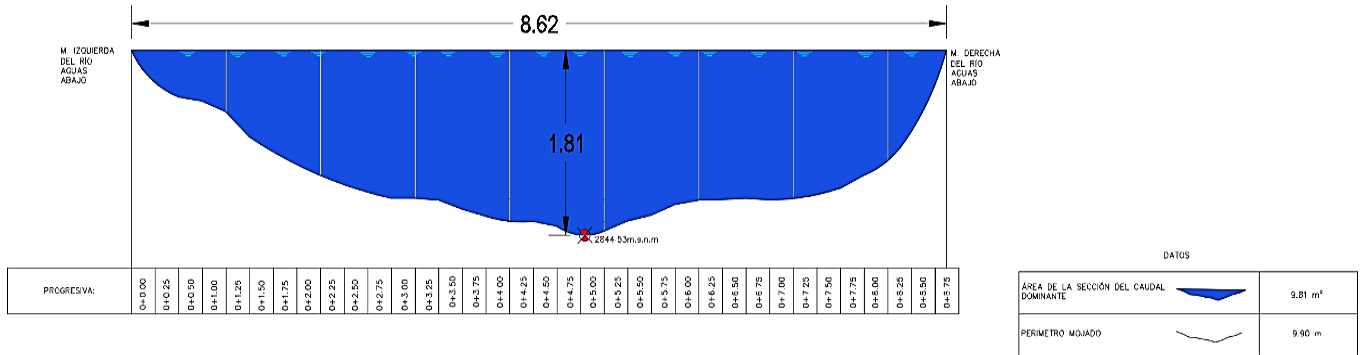
Este enfoque metodológico permitió una caracterización precisa de las huellas de avenidas en el río Porcón, fundamental para la determinación del caudal dominante en este contexto fluvial.

Figura 26: *Identificación de la huella de avenidas para estimación de caudal dominante.*

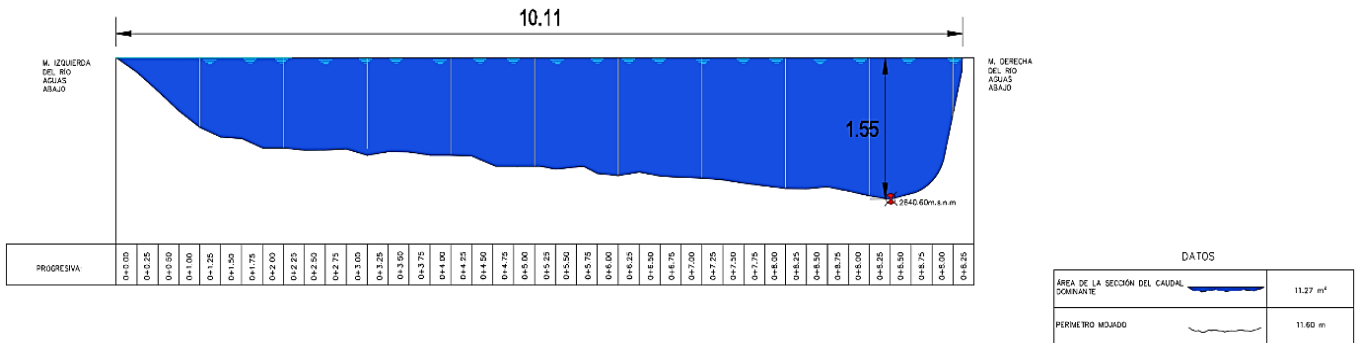


[Figura 27: Secciones del río Porcón para la estimación de caudal dominante.

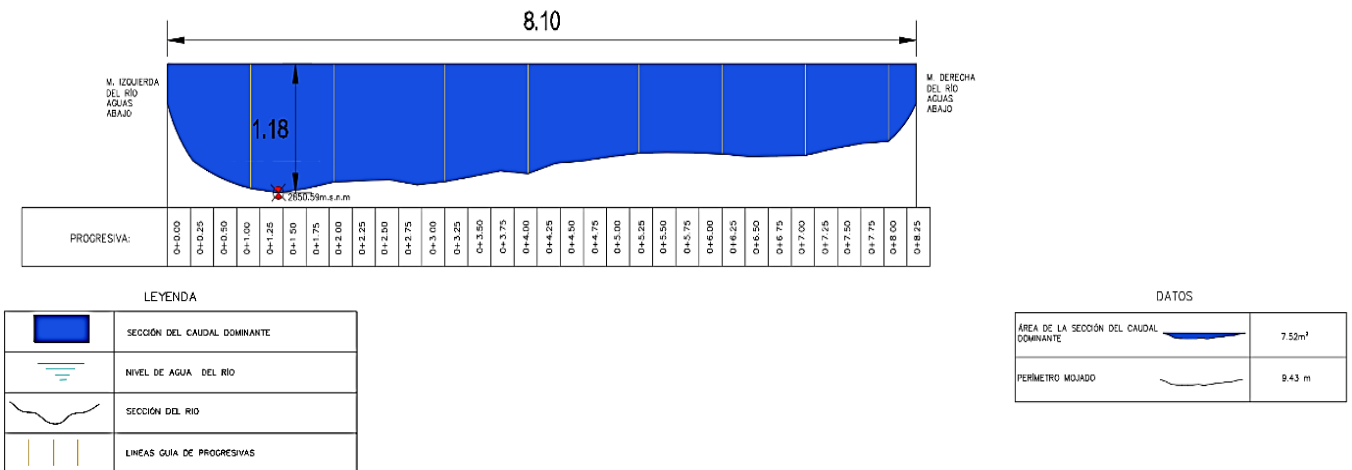
SECCIÓN N°1: RIO PORCÓN- CAUDAL DOMINANTE



SECCIÓN N°2: RIO PORCÓN- CAUDAL DOMINANTE



SECCIÓN N°3: RIO PORCÓN- CAUDAL DOMINANTE



3.3.5. Diseño de captación derivadora con barrage fijo-fusible

El nuevo diseño de la captación derivadora del río Porcón parte de la dinámica actual del cauce y, por esa razón, introduce ajustes al diseño original; la estructura modificó la pendiente inmediata aguas abajo con el paso de los años y ese cambio obliga a replantear cada elemento.

Ahora bien, la agradación causa acumulación de sedimentos que pueden llegar hasta corona del barrage, mientras la degradación que progresa a la salida de la poza disipadora rebaja el lecho de manera paulatina y reduce la pendiente longitudinal; este juego de depósitos y erosiones termina por modificar tanto la obra de toma como la forma misma del río.

Dentro del replanteo figura el barrage fijo – fusible: su altura se obtuvo con la fórmula 10; el tramo fijo conserva un ancho mínimo de cuarenta centímetros; el ancho de la sección fusible se calculó mediante la fórmula 12 y su longitud es del 20% del ancho del río; además, se diseñó el bocal de entrada y los muros de protección para garantizar la estabilidad hidráulica.

3.3.6. Modelamiento hidráulico y ensayo de descolmatación inducida

La investigación emplea un modelo físico construido a escala 1/15 como herramienta principal para la recolección de datos. Este enfoque metodológico inicia con el cálculo de parámetros fundamentales que posteriormente guían el diseño del prototipo experimental siguiendo la ley de Froude sin distorsión además de la elaboración e impresión de planos técnicos que facilitan la construcción del modelo. La fase de calibración constituye un proceso donde se verifican tirantes y caudales mientras se miden profundidades de sedimentos para garantizar la correspondencia entre el modelo reducido y el prototipo.

El protocolo experimental reproduce las condiciones de colmatación existentes mediante la incorporación estratégica de materiales sedimentarios donde el material fino se ubica próximo a la estructura de captación mientras que el material grueso ocupa zonas más distantes reflejando así las características del prototipo original. Una vez establecida esta configuración inicial se procede a la apertura del barrage fusible permitiendo la circulación secuencial de caudales equivalentes a los registrados en el río durante el período comprendido entre abril de 2023 y mayo de 2024 efectuándose primero ensayos con el barrage actual aperturado en sus costados en un 20% de la longitud total para luego sustituirlo por la nueva estructura propuesta documentándose las mediciones de flujo en el bocal junto con las variaciones en la profundidad de sedimentos conforme avanza el proceso de descolmatación.

La fase final del estudio contempla la instalación de un barrage modificado que incorpora una sección fija central complementada con elementos fusibles en ambos extremos cuya longitud representa el 20% del ancho total de la estructura permitiendo así evaluar el comportamiento hidráulico bajo las condiciones de flujo correspondientes al período de aforos establecido. Durante estos ensayos se registran volumétricamente los caudales tanto en el bocal como en el cauce principal mientras se documentan las profundidades de descolmatación alcanzadas al término de la temporada lluviosa de mayo 2024 concluyendo el proceso con la reconstrucción del barrage fusible y la medición final de caudales en el bocal lo cual proporciona datos esenciales para el análisis integral de los resultados obtenidos durante la investigación experimental.

3.3.7. Tipo, nivel, diseño y método de investigación

Según el método de la investigación es inductivo-deductivo, puesto que en base de las observaciones de la morfología del río aguas arriba y las variables del fenómeno se determina el efecto que tiene la descolmatación inducida en la eficiencia del bocal.

Según la fuente de información la investigación será de campo debido a que se tomaran y recolectaran datos en campo (levantamiento topográfico, realización de calicatas aguas arriba de la captación y aforos del río).

Según los objetivos de estudio será descriptivo ya que se explicará a la población la causa y efecto positivo de la descolmatación inducida que ayuda en el funcionamiento de la captación Río Porcón aumentando su capacidad de retención de flujo y vida útil.

Según el grado de manipulación de variables será casi experimental debido a que la investigación será desarrollada en campo y laboratorio, las condiciones de los acontecimientos son naturales en el terreno y además se hará uso de un ambiente simulado para la recreación de fenómenos.

3.3.8. Análisis e interpretación de datos

El procesamiento de información topográfica requirió la implementación de herramientas computacionales donde Excel facilitó el análisis preliminar de datos mientras que AutoCAD Civil 3D 2023 permitió la generación de representaciones cartográficas detalladas del sistema estructural y el tramo fluvial de estudio. El uso de estas herramientas posibilitó la transformación de mediciones de campo en documentación técnica precisa mediante planos que capturan las características morfológicas esenciales del área de estudio.

CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN RESULTADOS

En el presente capítulo se analizan e interpretan los resultados obtenidos durante las fases de campo, laboratorio y modelación física del estudio, organizados en cuatro componentes principales: (a) la caracterización hidrológica del río Porcón mediante los caudales aforados, (b) la caracterización granulométrica del material de lecho, (c) la verificación de la similitud sedimentológica entre modelo y prototipo, y (d) los ensayos de descolmatación en el modelo hidráulico a escala 1:15.

El análisis se estructura siguiendo una secuencia lógica que parte de la comprensión del régimen hídrico del río (variable independiente fundamental) y avanza hacia la validación del modelo físico y la evaluación de la alternativa de descolmatación. Para cada componente se presentan los resultados procesados en forma de indicadores estadísticos y representaciones gráficas que facilitan la interpretación de los fenómenos observados.

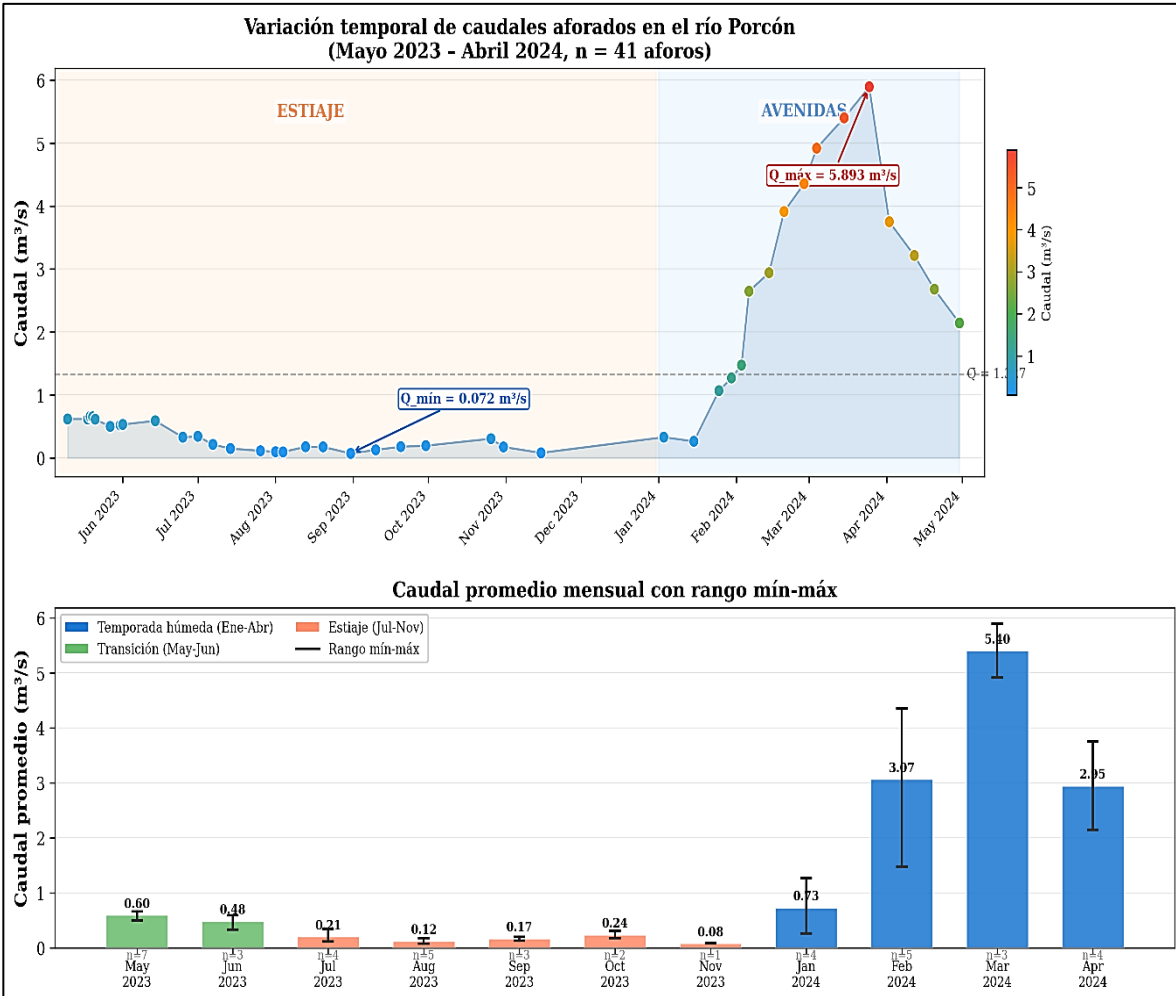
4.1. Caudales del río Porcón

Se realizaron 41 aforos volumétricos en el río Porcón, a 250 metros aguas abajo de la captación Río Porcón, durante el período comprendido entre mayo de 2023 y abril de 2024. Este período de monitoreo abarca un ciclo hidrológico completo, lo que permite caracterizar tanto la temporada de estiaje (mayo a noviembre) como la temporada húmeda o de avenidas (período comprendido entre diciembre y abril).

4.1.1. Variación temporal de caudales

En la Figura 28 se muestra la variación temporal de los caudales aforados durante el período de estudio, diferenciando la temporada de estiaje y la temporada de avenidas mediante una escala cromática que refleja la magnitud del caudal. Se observa un patrón estacional marcado, característico de los ríos de la sierra norte del Perú.

Figura 28: Variación temporal de caudales aforados y caudal promedio mensual con rango mín-máx en el río Porcón (mayo 2023 – abril 2024).



Durante la temporada de estiaje (mayo a noviembre de 2023), los caudales se mantuvieron consistentemente por debajo de $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$, alcanzando el valor mínimo de $Q = 0.072 \text{ m}^3/\text{s}$ el 31 de agosto de 2023. Este período concentra el 61% de los aforos realizados con un caudal promedio de apenas $0.326 \text{ m}^3/\text{s}$.

En contraste, la temporada húmeda (enero a abril de 2024) registró un incremento significativo de los caudales, con el pico máximo de $Q = 5.893 \text{ m}^3/\text{s}$ el 25 de marzo de 2024.

Los resultados hidrológicos evidencian que el río Porcón presenta un régimen estacional bien definido, con tres períodos diferenciados:

Estiaje (julio – noviembre): Caudales inferiores a 0.35 m³/s (promedio 0.168 m³/s). Este es el período donde la sedimentación en la zona de captación es más crítica, ya que la baja capacidad de arrastre del flujo favorece la acumulación de material en el lecho. Es durante este período que las operaciones de descolmatación resultan más necesarias.

Transición (mayo – junio, diciembre): Caudales entre 0.3 y 0.7 m³/s (promedio 0.550 m³/s). Estos meses marcan la transición entre temporadas y presentan condiciones hidráulicas intermedias.

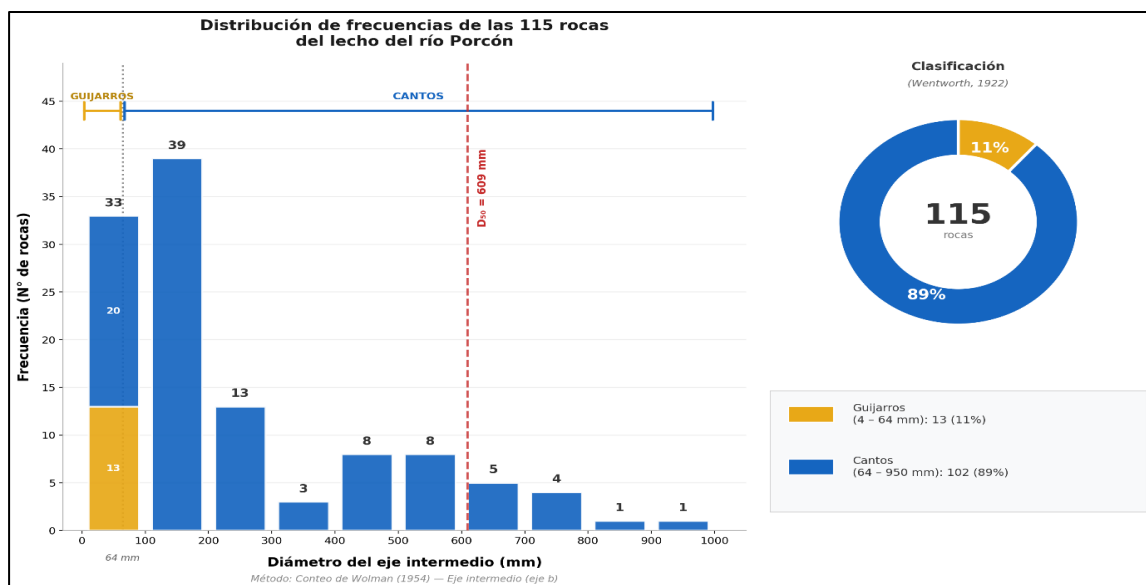
Avenidas (enero – abril): Caudales superiores a 1.0 m³/s, con picos que alcanzan los 5.893 m³/s. Durante este período, el río posee mayor capacidad de transporte, movilizandolos sedimentos finos (arenas y gravas) que posteriormente se depositan en la zona de captación al disminuir los caudales.

4.2. Granulometría superficial del río Porcón

Para la caracterización del material grueso del lecho, se realizó un muestreo superficial mediante el método de conteo de Wolman (1954), midiendo el eje intermedio (eje b) de las rocas seleccionadas aleatoriamente a lo largo del cauce.

La muestra definitiva comprende 115 rocas representativas, con diámetros que oscilan entre 43 mm (1.69 pulgadas) y 950 mm (37.4 pulgadas). La Tabla 10 del Anexo C presenta el registro completo de las 115 mediciones ordenadas de menor a mayor. A continuación se analizan los resultados procesados.

Figura 29: Distribución de frecuencias de las 115 rocas del lecho del río Porcón, clasificadas según la escala de Wentworth (1922) en guijarros y cantos).



La Figura 29 muestra que el lecho del río Porcón está ampliamente dominado por cantos, que representan el 89% de la muestra (102 elementos), mientras que los guijarros constituyen apenas el 11% restante (13 elementos).

La distribución es fuertemente asimétrica positiva (sesgada hacia la derecha), con la mayor concentración de frecuencias en el rango de 0 a 200 mm (72 rocas, 63% del total). A partir de los 300 mm, las frecuencias disminuyen progresivamente hasta alcanzar apenas 1 elemento en las fracciones de 800 – 900 mm y 900 – 1000 mm. El D_{50} volumétrico de 609 mm indica que la mitad del volumen del material grueso corresponde a cantos mayores de 61 cm de diámetro.

Esta distribución es característica de ríos de montaña con pendientes elevadas, donde el flujo posee suficiente energía para transportar sedimentos finos pero no para movilizar el material grueso del lecho durante condiciones normales de operación

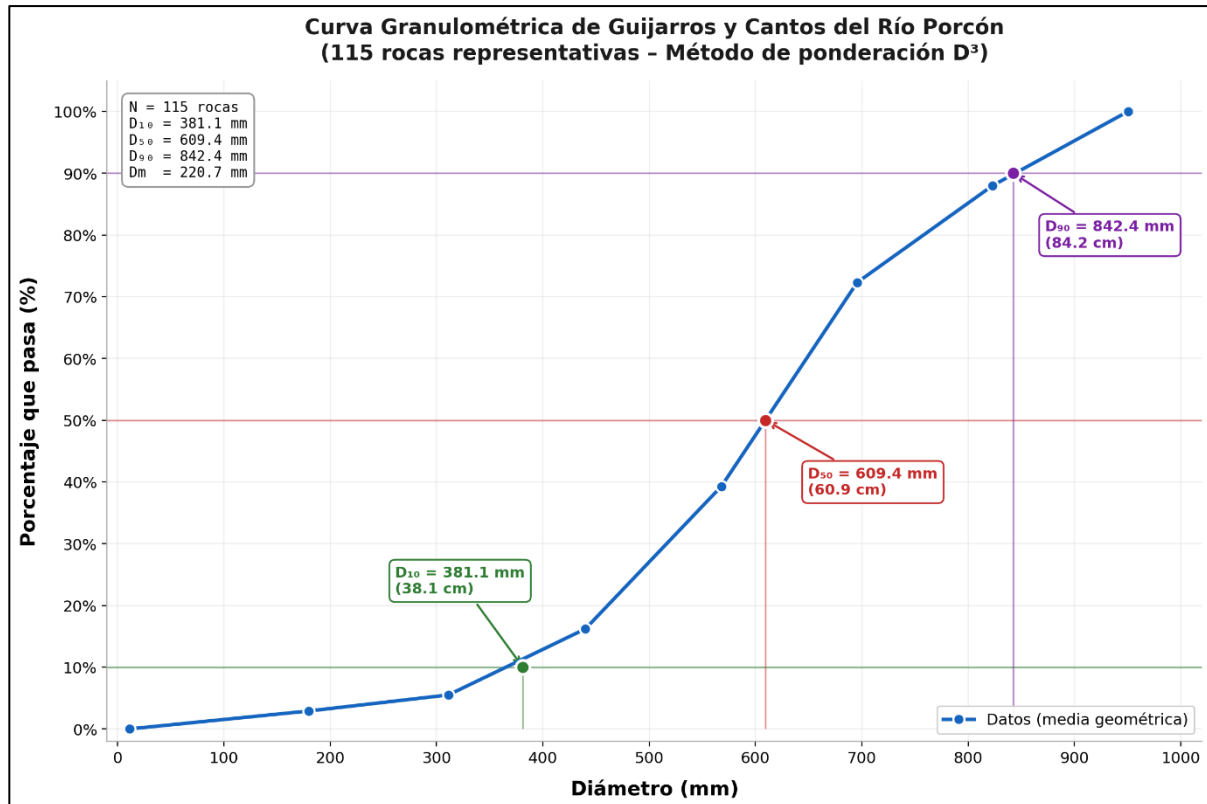
Para la construcción de la curva granulométrica del material grueso se empleó el método de ponderación volumétrica (D^3), el cual asigna a cada fracción un peso proporcional al cubo de su diámetro medio geométrico, representando así la distribución de volumen (o masa) del material en el lecho. La Tabla 9 presenta los resultados del conteo ponderado.

Tabla 9: *Conteo guijarros y cantos del río Porcón para análisis granulométrico.*

Diámetro		Factor de Ponderación D^3 (mm³) (10³)	Conteo para Cada Fracción	Conteo x D^3 (10⁶)	Porcentaje	Porcentaje que Pasa
Fracción (pulgada)	Media Geométrica (mm)					
0 a 5	11.27	1.431	45	0.06	0.00%	0.00%
5 a 10	179.61	5793.7	36	208.57	2.90%	2.90%
10 a 15	311.09	30104.96	6	180.63	2.50%	5.50%
15 a 20	439.94	85149.68	9	766.35	10.70%	16.20%
20 a 25	567.96	183212.95	9	1648.92	23.10%	39.30%
25 a 30	695.61	336583.67	7	2356.09	33.00%	72.30%
30 a 35	823.05	557551.64	2	1115.1	15.60%	88.00%
35 a 40	950.38	858406.91	1	858.41	12.00%	100.00%
		Total	115	7134.13	100.0%	

Se observa que, aunque la fracción de 0 a 5 pulgadas concentra la mayor cantidad de elementos (45 rocas), su contribución volumétrica es insignificante (0.0%). En contraste, las fracciones de 20 a 30 pulgadas representan el 56.1% del volumen total de material grueso. Esta discrepancia refleja la influencia cúbica del diámetro en el volumen, donde una roca de 70 cm de diámetro equivale en volumen a aproximadamente 343 rocas de 10 cm.

Figura 30: Distribución granulométrica de los guijarros y cantos del río Porcón.



En la tabla 10 se observa los diámetros efectivos para guijarros y cantos.

Tabla 10: Diámetros efectivos del material grueso del río Porcón aguas arriba del barrage.

Tipo de diámetro efectivo	Tamaño (mm)
d10	381.10
d50	609.40
d90	842.40
dm	220.70

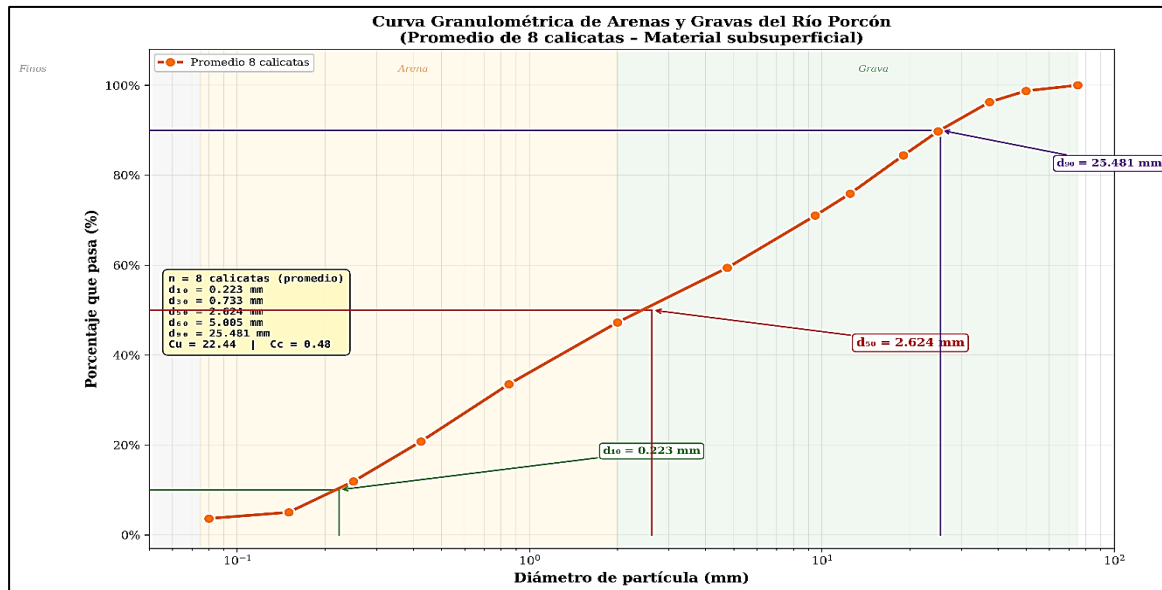
4.3. Granulometría subsuperficial del río Porcón

Tabla 11: Tamizado de los sedimentos del río Porcón, aguas arriba del barrage.

N° TAMIZ	FAC MALLA (mm)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE ACUMULADO
3"	75.00	0.00	100.00
2"	50.00	1.26	98.74
1 1/2"	37.50	3.75	96.25
1"	25.00	10.25	89.75
3/4"	19.00	15.63	84.38
1/2"	12.50	24.13	75.88
3/8"	9.50	29.00	71.00
N° 4	4.75	40.63	59.38
N° 10	2.00	52.75	47.25
N° 20	0.85	66.50	33.50
N° 40	0.425	79.25	20.75
N° 60	0.25	88.13	11.88
N° 140	0.15	95.00	5.00
N° 200	0.08	96.38	3.63
TOTAL		100.00	

La Figura 31 presenta la curva granulométrica de arenas y gravas del río Porcón, con mención de los diámetros efectivos d_{10} , d_{50} y d_{90} . La Tabla 11 presenta los resultados del tamizado promedio.

Figura 31: Distribución granulométrica de arenas y gravas del río Porcón aguas arriba del barrage.



En la tabla 12 se observa los diámetros efectivos para arenas y gravas.

Tabla 12: Diámetros efectivos de arenas y gravas del río Porcón aguas arriba del barrage.

Tipo de diámetro efectivo	Tamaño (mm)
d ₁₀	0.223
d ₅₀	0.733
d ₉₀	25.481
dm	9.802

4.4. Cálculo del caudal dominante

Haciendo uso de la ecuación (1), se determina el caudal dominante en tres secciones identificadas en el río.

Tabla 13: Caudal dominante del río Porcón.

Sección	Área (m ²)	Pendiente (%)	Rugosidad de Manning (n)	Perímetro Mojado (m)	Radio Hidráulico (m)	Caudal (m ³ /s)
S-01	9.81	3.21%	0.0471	9.90	0.99	37.09
S-02	11.27	3.25%	0.0471	11.60	0.97	42.31
S-03	7.52	3.27%	0.0471	9.43	0.80	24.81
Q_{dominante} promedio						(*)34.74

(*) Será considerado como caudal de máximas avenidas para un periodo de retorno de 30 años.

4.5. Captación derivadora “Río Porcón”

En el cauce del río Porcón, a 2849 metros sobre el nivel del mar, se encuentra la obra de captación derivadora que está compuesta de varios componentes y opera como un solo sistema.

Los componentes son los siguientes:

- a) Un barrage tipo creager de concreto armado de 8.43 m de longitud por 1.78 m de altura a la corona, el cual se encuentra en buenas condiciones porque fue renovado en el año 2022.
- b) Una poza de disipación de 6.00m de longitud de concreto armado mezclada con piedra de 20” de diámetro.
- c) Un emboquillado de mampostería de piedra de 30cm de espesor.
- d) Un desarenador que atrapa sedimentos gruesos, protegiendo las estructuras contiguas.
- e) Un canal de derivación conduce flujo de sección rectangular y paredes de concreto reforzado.
- f) Una caja de reunión que mezcla caudales que amortigua turbulencias, facilita inspección y control.
- g) Una canaleta Parshall inoperativa; el caudal estimado 100 L/s durante 24 h, total 86 400 L.

A unos 40 metros aproximadamente se encuentra una segunda captación derivadora utilizada para fines de regadío que conduce el agua hacia el centro poblado de Huambocancha Baja, cuyos componentes se describen a continuación:

- a) Un barrage tipo vertedero de concreto armado de 7.81m de longitud con una rápida incluida en el lado derecho mirando aguas abajo.
- b) Dos pozas de disipación una de 4.77m de longitud y la otra de 4.61m de longitud, ambas de concreto armado.
- c) Dos rápidas una de 2.09m de longitud y la otra de 2.98m de longitud, ambas de concreto armado.
- d) Una compuerta/bocal utilizada para desviar el agua captada hacia un canal.
- e) Un canal rectangular de concreto armado que deriva el agua hacia el C.P. de Huambocancha Baja.

(*) Para ver el plano en planta de las estructuras revisar el *Anexo N°3: Planos Elaborados* específicamente el *Plano Detallado De Estructuras De Captación Y Derivación De Agua Del Río Porcón*.

4.6. Caracterización del tramo de estudio (Prototipo)

El prototipo para modelamiento está conformado por la captación “Río Porcón” y un tramo del río Porcón de 95 metros de longitud, aguas arriba del barrage y 40 metros aguas abajo del barrage hasta la segunda captación derivadora.

En dicho tramo se estimó un volumen de 852 m³ de sedimentos colmatados quitando su correcta funcionalidad de la estructura.

Tabla 14: Datos del prototipo tomados en cuenta para diseño del modelo físico.

Variable	Magnitud	Unidad
Longitud de la sección del río aguas arriba del barrage	180	m
Longitud de la sección del río aguas abajo del barrage	70	m
Pendiente del río previo a la colmatación aguas arriba del barrage	0.0323	m/m
Pendiente del río colmatado aguas arriba del barrage	0.0137	m/m
Ancho del barrage	8.24	m
Caudal menor	0.532	m ³ /s
Caudal mayor	5.893	m ³ /s
Caudal de captación/dotación	0.100	m ³ /s
Altura del barrage	1.78	m
d ₉₀ de sedimentos (guijarros y cantos)	842.40	mm
d ₅₀ de sedimentos (guijarros y cantos)	609.40	mm
d ₉₀ de sedimentos (arenas y gravas)	25.481	mm
d ₅₀ de sedimentos (arenas y gravas)	2.624	mm
Altura del bocal	1.40	m
Dimensiones aproximadas del bocal (ancho x alto)	0.30x0.80	m

4.7. Diseño del modelo físico

Se eligió la escala 1/15 porque garantiza un flujo turbulento con Reynolds superior a 5000 y a la vez aprovecha al máximo el área disponible para construir el modelo, cuya construcción se desarrolló en la casa del tesista.

*** Caudal máximo del modelo**

Haciendo uso de la ecuación (22) se obtiene $Q_M = Q_P (15)^{-\frac{5}{2}}$, donde M representa el modelo mientras P hace referencia al prototipo.

Reemplazando el valor del caudal mayor se obtiene: $Q_M = 5.893(15)^{-\frac{5}{2}} = 0.006763 \frac{m^3}{s} = 6.763 \frac{L}{s} = 405.78 L/min$ (caudal mayor de prueba del modelo).

*** Caudal mínimo del modelo**

Lo correspondiente al caudal mínimo que debe validarse alcanzando un número de Reynolds ($Re_M > 5000$)

Con la ecuación (23) se obtiene el número de Reynolds del modelo y la velocidad media del modelo, V_M , se calcula usando la fórmula (21).

Buscando el caudal mínimo adecuado que cumpla con la condición para flujo turbulento, se determinó que el caudal de $0.532 m^3/s$ tiene un numero de Reynols adecuado y se calculó de la siguiente manera:

La velocidad se determinó, considerando un tirante medio de 0.178 metros junto con un ancho superficial de 6 metros. Así la sustitución de estos parámetros medidos directamente arroja el resultado siguiente:

$$V_M = \frac{0.532}{(0.178)(6.00)} \left(\frac{1}{15}\right)^{\frac{1}{2}} = 0.13 \frac{m}{s}$$

El D_{HP} (diámetro hidráulico), equivalente a cuatro radios hidráulicos, equivalente:

$$D_{HP} = 4 \left(\frac{A}{P_m}\right) = 4 \left(\frac{1.01}{6.23}\right) = 0.65m$$

El diámetro hidráulico en el modelo es: $D_{HM} = \frac{0.65}{15} = 0.0433 m$

Para el modelo se usa agua y a $14^\circ C$ la viscosidad cinemática medida en la estación Augusto Weberbauer de la Universidad Nacional de Cajamarca alcanza: $\vartheta_M = 1.1076 \times 10^{-6} m^2/s$.

El número de Reynolds en el modelo resulta:

$$Re_M = \frac{(0.13)(0.0433)}{1.1076 \times 10^{-6}} = 5054.0018 \text{ (Cumple con la condición para flujo turbulento)}$$

En consecuencia, el menor caudal adecuado para el modelo es:

$$Q_M = 0.532 (15)^{-\frac{5}{2}} = 0.00061 \frac{m^3}{s} = 0.61 \frac{L}{s} = 36.63 \text{ L/min} \text{ (Caudal menor de prueba del modelo).}$$

4.8. Verificación de la similitud sedimentológica

La verificación se realiza bajo las siguientes premisas:

- No se escala la rugosidad de Manning del río. Es prácticamente imposible lograr que las piedras y sedimentos del modelo tengan la misma rugosidad escalada que el prototipo.
- Solo se verifica que el Froude del sedimento (θ) sea igual tanto en el modelo como en el prototipo, mediante la ecuación (37).
- Ambos valores deben ubicarse en la misma zona del diagrama de Shields, garantizando el mismo régimen de transporte, conforme al criterio relajado de la ecuación (38).
- El número de Reynolds del flujo debe ser suficientemente alto para garantizar régimen turbulento ($Re > 5000$).

El parámetro de Shields se define como la relación entre el esfuerzo cortante en el lecho y el peso sumergido de las partículas, mediante la ecuación (36).

El Reynolds del grano, necesario para ubicar los puntos en el diagrama de Shields, se calcula mediante la ecuación (39).

La escala del sedimento coincide con la escala geométrica ($dr = \frac{d50_p}{d50_m} = \frac{2.624}{0.1749} = 15.00 = Lr$), lo cual es una condición ideal para la similitud sedimentológica según la ecuación (34).

Tabla 15: Datos para el cálculo del parámetro de Shields.

Parámetro	Prototipo	Modelo
Área de sección transversal, A (m ²)	1.01	0.00449
Perímetro mojado, P (m)	6.23	0.415
Radio hidráulico, R = A/P (m)	0.1621	0.0108
Pendiente, (m/m)	0.0323	0.0323
d ₅₀ arenas y gravas (mm)	2.624	0.1749
ρ agua a 15°C (kg/m ³)	999.2	999.2
ρs sedimento (kg/m ³)	2623.46	2623.46
γ = ρ × g (N/m ³)	9802.15	9802.15
γs = ρs × g (N/m ³)	25736.14	25736.14
(γs - γ) (N/m ³)	15933.99	15933.99

Verificación de escalas (Lr = 15):

$$R_o / R_m = 0.1621 / 0.0108 = 15.01 \approx Lr$$

$$d_{50o} / d_{50m} = 2.624 / 0.1749 = 15.00 = Lr$$

*** Parámetro de Shields del prototipo (θ_p)**

Esfuerzo cortante sobre el lecho:

$$\tau_{0p} = \gamma * R_p * S_p = 9802.15 * 0.1621 * 0.0323$$

$$\tau_{0p} = 51.322 \text{ N/m}^2$$

Peso sumergido unitario de la partícula:

$$(\gamma_s - \gamma) * d_p^3 = 15933.99 * 0.002624 = 41.811 \text{ N/m}^2$$

Calcular θ :

$$\theta_p = \frac{51.322}{41.811}$$

$$\theta_p = 1.2275$$

*** Parámetro de Shields del modelo (θ_m)**

Esfuerzo cortante sobre el lecho:

$$\tau_{0p} = \gamma * R_p * S_p = 9802.15 * 0.0108 * 0.0323$$

$$\tau_{0p} = 3.419 \text{ N/m}^2$$

Peso sumergido unitario de la partícula:

$$(\gamma_s - \gamma) * d^{50}_p = 15933.99 * 0.0001749 = 2.787 \text{ N/m}^2$$

Calcular θ :

$$\theta_p = \frac{3.419}{2.787}$$

$$\theta_p = 1.2270$$

Los valores del parámetro de Shields son prácticamente idénticos:

$$\theta_{\text{PROTOTIPO}} = 1.2275 \approx \theta_{\text{MODELO}} = 1.2270$$

$$\text{Ratio } \frac{\theta_m}{\theta_p} = \frac{1.2270}{1.2275} = 0.9998 \approx 1.00$$

Esta coincidencia casi exacta se debe a que la escala del sedimento ($d_r = 15.00$) iguala a la escala geométrica ($L_r = 15$), condición ideal según Yalin (1971).

*** Cálculo del Reynolds del grano (Re^*)**

a) Prototipo:

$$u^*_p = \sqrt{9.81 * 0.1621 * 0.0323} = 0.2266 \text{ m/s}$$

$$Re^*_p = \frac{(0.2266 * 0.002624)}{(1.1076 \times 10^{-6})} = 537$$

b) Modelo:

$$u^*_p = \sqrt{9.81 * 0.0108 * 0.0323} = 0.0585 \text{ m/s}$$

$$Re^*_p = \frac{(0.0585 * 0.0001749)}{(1.1076 \times 10^{-6})} = 9.2$$

El prototipo tiene $Re^*_p = 537$, ubicándose en la zona de turbulento rugoso ($Re^* > 70$) donde θ_c es constante (≈ 0.06). El modelo tiene $Re^*_m = 9.2$, ubicándose en la zona de transición ($5 < Re^* < 70$). Esta diferencia es inevitable en modelos a escala reducida debido a la disminución del tamaño del sedimento y la velocidad de corte (Yalin, 1971; ASCE Manual No. 110, 2008).

Las coordenadas de ambos puntos en el diagrama de Shields son:

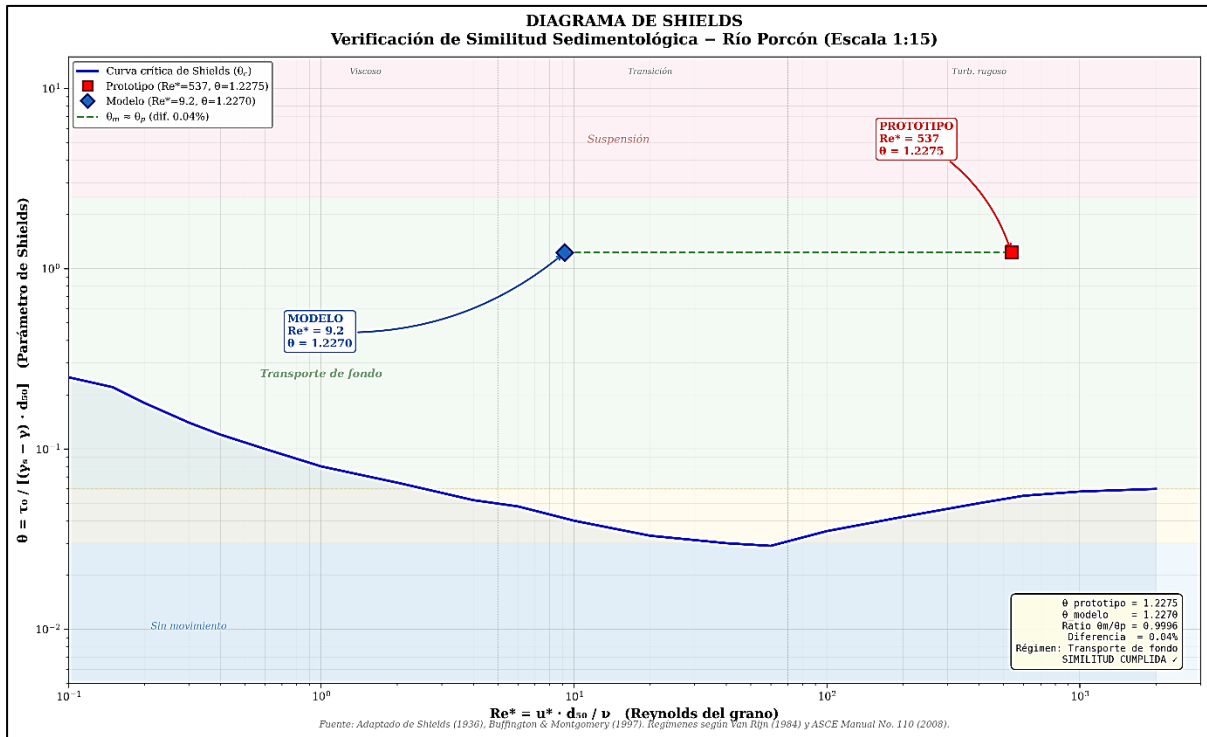
Tabla 16: *Coordenadas en el diagrama de Shields.*

Parámetro	Prototipo	Modelo
Re* (eje x)	537	9.2
θ (eje y)	1.2275	1.2270
Régimen de transporte	Transporte de Fondo	Transporte de Fondo

La Figura 32 muestra el diagrama de Shields con la ubicación de los puntos correspondientes al prototipo ($Re^* = 537$, $\theta = 1.2275$) y al modelo ($Re^* = 9.2$, $\theta = 1.2270$). Se observa que ambos puntos se ubican en la zona de transporte de fondo, muy por encima de la curva crítica, y a la misma altura ($\theta \approx 1.23$), confirmando visualmente la similitud sedimentológica.

En el presente modelo de fondo móvil no se realizó escalamiento de la rugosidad de Manning del sedimento del río, dado que es prácticamente imposible reproducir a escala la textura y distribución granulométrica del lecho natural. La validación del modelo se sustenta exclusivamente en la verificación del parámetro de Shields y la correspondencia de regímenes de transporte, que es el enfoque aceptado internacionalmente para modelos de fondo móvil (Yalin, 1971; Chanson, 2004; ASCE Manual No. 110, 2008).

Figura 32: Diagrama de Shields – Verificación de Similitud Sedimentológica.



La verificación de la similitud sedimentológica mediante el parámetro de Shields demuestra que el modelo hidráulico de fondo móvil del río Porcón a escala 1:15 cumple satisfactoriamente todos los criterios establecidos para la representación de los fenómenos de transporte de sedimentos:

El parámetro de Shields del modelo ($\theta_m = 1.2270$) es prácticamente idéntico al del prototipo ($\theta_p = 1.2275$), con una diferencia de apenas el 0.04%. Esta coincidencia se debe a que la escala del sedimento ($d_r = 15.00$) iguala a la escala geométrica ($L_r = 15$), condición ideal según Yalin (1971).

Ambos puntos se ubican en la zona de transporte de fondo del diagrama de Shields, con valores más de 20 veces superiores al umbral crítico ($\theta \approx 1.23 \gg \theta_c \approx 0.06$). Esto confirma que el modelo reproduce correctamente el régimen de transporte de sedimentos del prototipo, cumpliendo tanto el criterio exacto de la ecuación (37) como el criterio relajado de la ecuación (38).

El modelo es por lo tanto válido para representar los fenómenos de transporte de sedimentos del río Porcón bajo las condiciones de flujo estudiadas.

4.9. Uso de agua clara en modelos de fondo móvil y su efecto en la similitud sedimentológica

La similitud sedimentológica exige igualar el número de Froude sedimentológico entre prototipo y modelo. Cuando se utiliza agua clara, no se reproduce la suspensión, lo que puede distorsionar la interacción entre el fluido y la partícula, así como el umbral de movimiento y la conformación del lecho sedimentario. Sin embargo, en procesos dominado por fuerzas de inercia y gravedad como la apertura y descolmatación a través de un barrage fusible basta aplicar la similitud de Froude clásica, siempre que el objetivo no sea estudiar el transporte en suspensión

La justificación para el uso de agua clara es:

- * Facilita la recirculación y control de caudal en circuito cerrado, evitando colmatación de bombas y tuberías.
- * Permite ensayos sucesivos sin limpieza intermedia, aumentando la eficiencia experimental.

En conclusión, el uso de agua clara en modelos físicos de fondo móvil está respaldado por la validación empírica local e internacional. Resulta técnica y científicamente sustentable para ensayos de apertura fusible y descolmatación inducida, como lo demuestran los modelos experimentales en la región de Cajamarca, siempre que el objetivo no sea estudiar el transporte en suspensión ni la dinámica detallada de partículas finas.

4.10. Invariabilidad del Peso Específico del Fluido al Escalar un Modelo Físico

Al desarrollar modelos físicos en laboratorio, surge la duda de si al escalar las dimensiones también es necesario modificar el peso específico del fluido. La respuesta técnica es que el peso específico del fluido permanece constante al utilizar el mismo fluido (agua) tanto en el modelo como en el prototipo, independientemente de los cambios en dimensiones o velocidades.

El peso específico (γ) se define como el peso por unidad de volumen del fluido:

$$\gamma = \rho * g$$

Donde:

- γ : Peso específico del fluido
- g : Aceleración de la gravedad, en m/s^2
- ρ : Densidad, en kg/m^3

Ambas magnitudes (ρ y g) son constantes para el mismo fluido y condiciones normales de laboratorio.

Las ecuaciones de similitud hidráulica (como los números de Froude y Reynolds) se basan en números adimensionales que relacionan fuerzas, velocidades y caudales en el flujo. Para que los resultados puedan extrapolarse del modelo al prototipo, es imprescindible mantener constante la densidad, ya que esta es fundamental en la expresión y comparación de las fuerzas presentes en ambos sistemas. Si se usa agua en ambos casos, el peso específico es inalterable.

Si la densidad no se mantiene constante, se originan varios problemas y efectos de escala indeseables:

Alteración de las fuerzas físicas relevantes

- * Los principales números adimensionales hidráulicos (Reynolds, Froude, Shields, etc.) dependen de la densidad.
- * Las fuerzas de inercia y gravedad cambian de magnitud relativa si la densidad varía, afectando la dinámica real del flujo.

Errores en velocidades, caudales y presiones

- * Las ecuaciones para velocidades críticas, caudales y presiones consideran la densidad. Si esta varía, los resultados del modelo dejan de ser válidos para el prototipo.
- * Fenómenos como el arrastre de sedimentos y la formación de ondas están directamente ligados a la densidad del fluido.

Imposibilidad de extrapolación práctica

- * Los resultados experimentales de laboratorio no pueden aplicarse con seguridad al prototipo, lo que invalida los diseños y predicciones basadas en el modelo reducido.

En conclusión, al cambiar la densidad entre modelo y prototipo se generan efectos de escala indeseables que invalidan la similitud hidráulica y la extrapolación de resultados. Por esto, la densidad debe mantenerse constante para asegurar la equivalencia física y la confiabilidad de los resultados en estudios de laboratorio.

4.11. Caudales y tiempos para los ensayos

De los 41 aforos del período mayo 2023 – abril 2024 se seleccionaron 21 registros con caudales iguales o superiores a $0.532 \text{ m}^3/\text{s}$, que son los que garantizan un número de Reynolds mayor a 5

000 en el modelo (régimen turbulento). La duración asignada a cada caudal corresponde al número de días calendario transcurridos desde el aforo anterior, expresados en horas (días × 24 h/día); es decir, se asume que cada caudal medido se mantiene constante hasta la siguiente medición.

La simulación se divide en dos períodos separados por el estiaje (julio – diciembre 2023), durante el cual todos los caudales fueron inferiores al umbral turbulento y la capacidad de transporte del río es mínima. El Período 1 abarca la transición a estiaje (mayo – junio 2023, aforos 1 al 7), y el Período 2 comprende la temporada de avenidas (enero – abril 2024, aforos 8 al 21). Los aforos N° 1 y N° 8 tienen duración cero por ser el inicio de cada período. Los caudales y tiempos se escalaron al modelo mediante las ecuaciones (22) y (21) de similitud de Froude.

Tabla 17: Caudales del río Porcón y duración para los ensayos en modelo a escala 1/15.

N°	Fecha	Q prototipo (m³/s)	Días entre aforos	Duración prototipo (h)	Q modelo (L/min)	Duración modelo (h)
1	10/5/2023	0.619	—	0	42.62	0
2	18/05/2023	0.619	8	192	42.62	49.57
3	19/05/2023	0.657	1	24	45.236	6.2
4	20/05/2023	0.652	1	24	44.892	6.2
5	21/05/2023	0.615	1	24	42.345	6.2
6	1/6/2023	0.532	11	264	36.63	68.16
7	14/06/2023	0.59	13	312	40.623	80.56
8	25/01/2024	1.068	—	0	73.535	0
9	30/01/2024	1.271	5	120	87.512	30.98
10	3/2/2024	1.475	4	96	101.558	24.79
11	6/2/2024	2.647	3	72	182.254	18.59
12	14/02/2024	2.941	8	192	202.497	49.57
13	20/02/2024	3.913	6	144	269.422	37.18
14	28/02/2024	4.355	8	192	299.855	49.57
15	4/3/2024	4.918	5	120	338.619	30.98
16	15/03/2024	5.4	11	264	371.806	68.16
17	25/03/2024	5.893	10	240	405.751	61.97
18	2/4/2024	3.75	8	192	258.199	49.57
19	12/4/2024	3.214	10	240	221.294	61.97
20	20/04/2024	2.679	8	192	184.457	49.57
21	30/04/2024	2.143	10	240	147.552	61.97
Período 1 (mayo – junio 2023): aforos 1–7				840	—	216.9
Período 2 (enero – abril 2024): aforos 8–21				2 304	—	594.9
TOTAL SIMULADO				3 144	—	811.8

La duración total simulada equivale a 131 días de prototipo (3 144 horas), reproducidos en 811.8 horas de ensayo en el modelo (33.8 días). Los mayores caudales se concentran en el Período 2, con un pico de 5.893 m³/s (aforo N° 17), mientras que el Período 1 presenta caudales moderados entre 0.532 y 0.657 m³/s. Esta secuencia constituye el hidrograma discretizado que se reprodujo en el modelo durante los ensayos de descolmatación.

4.12. Calibración del modelo físico

El proceso de calibración del modelo físico de la captación Río Porcón se realizó considerando una escala 1/15 y siguiendo la metodología experimental observada en investigaciones previas. Para cada caudal de ensayo, se midieron los tirantes de agua sobre el barrage tanto en el prototipo como en el modelo físico, este último ajustado previamente mediante la correspondiente ley de similitud de Froude.

En la tabla 18 se consignan los valores de caudal medido en campo, el tirante sobre el barrage en el prototipo transformado a escala modelo, y el tirante realmente registrado en el modelo; se incluye también el porcentaje de similitud, evidenciando el grado de coincidencia entre la simulación y la realidad.

Tabla 18: Calibración del modelo físico mediante comparación de tirantes sobre el barrage - Captación Río Porcón a escala 1/15.

N° Ensayo	Caudal en modelo (L/min)	Tirante Observado en prototipo (cm)	Tirante Observado en prototipo a escala (mm)	Tirante medido en modelo (mm)	Diferencia (mm)	Error (%)
1	42.620	5.25	3.5	3.3	0.2	5.71
2	42.620	5.25	3.5	3.3	0.2	5.71
3	45.236	5.7	3.6	3.5	0.3	7.89
4	44.892	5.4	3.6	3.3	0.3	8.33
5	42.345	5.25	3.5	3.1	0.4	11.43
6	36.630	4.5	3.2	2.8	0.2	6.67
7	40.623	5.1	3.4	3.2	0.2	5.88
8	73.535	7.35	4.9	4.5	0.4	8.16
9	87.512	8.25	5.5	5.3	0.2	3.64
10	101.558	9	6.0	6.0	0.0	0.00
11	182.254	12.75	8.5	8.2	0.3	3.53
12	202.497	13.5	9.0	9.0	0.0	0.00
13	269.422	14.85	9.9	9.7	0.2	2.02
14	299.855	15.15	10.1	9.8	0.3	2.97
15	338.619	15.53	10.35	10.1	0.2	2.38

Nº Ensayo	Caudal en modelo (L/min)	Tirante Observado en prototipo (cm)	Tirante Observado en prototipo a escala (mm)	Tirante medido en modelo (mm)	Diferencia (mm)	Error (%)
16	371.806	16.8	11.2	10.9	0.3	2.68
17	405.751	21.15	14.1	13.7	0.4	2.84
18	258.199	14.7	9.8	9.6	0.2	2.04
19	221.294	13.95	9.3	9.1	0.2	2.15
20	184.457	12.9	8.6	8.4	0.2	2.33
21	147.552	11.4	7.6	7.6	0.0	0.00
Error promedio						4.11%

Comparando los resultados de los tirantes de la tabla 20 de calibración con los tirantes teóricos calculados mediante las leyes de similitud hidráulica, se verificó que el modelo físico a escala 1:15 de la captación Río Porcón presenta una concordancia relevante con los valores esperados. En el análisis estadístico se encontró un error promedio de 4.11% entre los tirantes observados y los tirantes calculados, entonces se puede decir que el modelo cumple satisfactoriamente con las leyes de similitud y es apto para realizar los ensayos.

El error promedio de 4.11% obtenido en la calibración está dentro de los parámetros de precisión establecidos para modelos físicos. Boulos & Ormsbee (1991) establecen que los modelos hidráulicos deben alcanzar una precisión del $\pm 5\%$ respecto a los valores de referencia para considerarse adecuadamente calibrados.

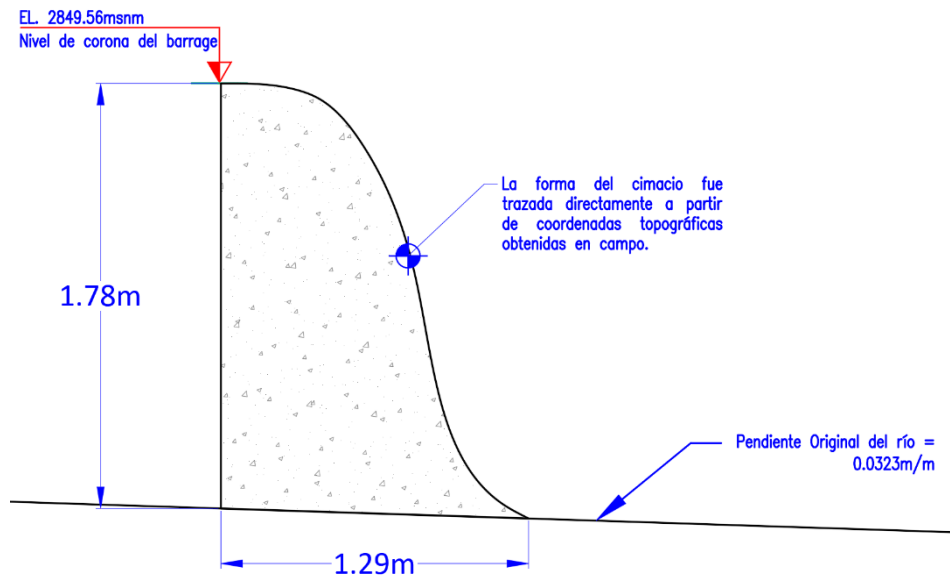
4.13. Implementación de Sistema Fijo-Fusible

Al analizar el plano: *Detallado De Estructuras De Captación Y Derivación De Agua Del Río Porcón* se sabe que esta captación está conformada por una ataguía de 2.14 metros de ancho y un barrage fijo de cresta tipo Creager de 8.24 metros de ancho, como en esta investigación se busca determinar la influencia de la descolmatación inducida en la eficiencia de la captación se apertura el barrage en sus extremos al 20% de su longitud, la ataguía se colocara en el modelo y no se afectara su forma.

La intervención consiste únicamente en abrir los extremos laterales del barrage y colocar enrocado; manteniendo intactas las dimensiones estructurales originales. En particular, el ancho de corona del barrage fijo-fusible se conservará igual al ancho de corona de la estructura en campo. Además, como menciona la bibliografía el enrocado de los extremos tendrá taludes de 1:1 (H:V) tanto aguas arriba como aguas abajo.

Los datos de la tabla 14 son los que se usaran para el modelo. A continuación, se representa geoméricamente los datos registrados:

Figura 33: Perfil transversal del cimacio tipo Creager - Sección fija del barrage y ataguía.



Por razones constructivas el ancho de corona del barrage fusible será de 0.40 metros.

Figura 34: Perfil transversal del barrage fusible.

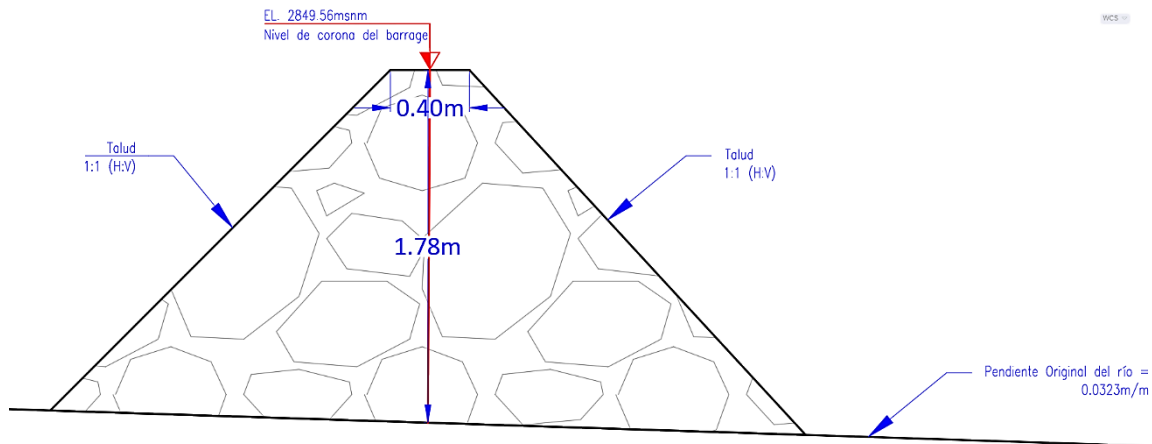
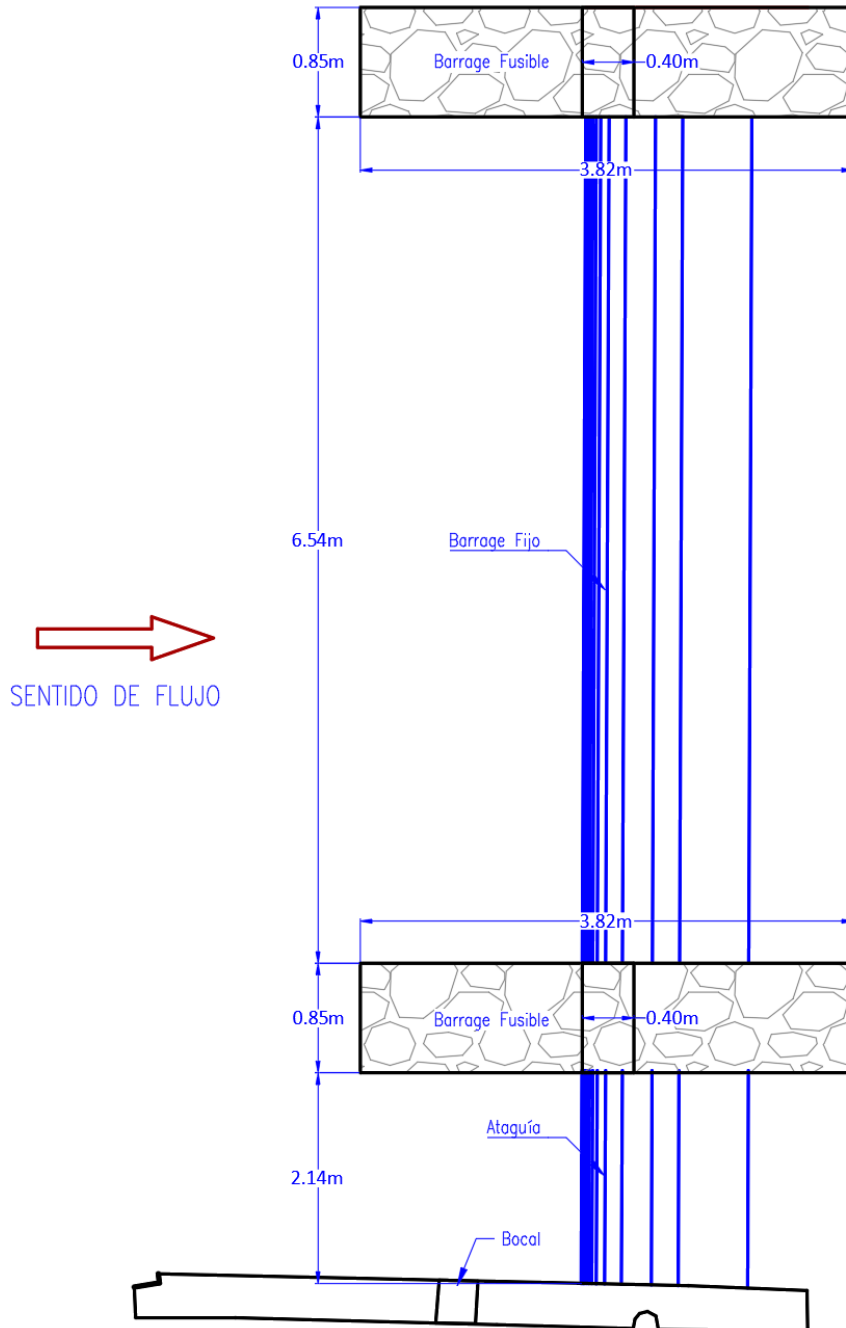


Figura 35: Vista en Planta del barrage fijo-fusible propuesto – Captación Río Porcón.



4.14. Ensayos en modelo físico en distintas condiciones

Con la finalidad de desarrollar la investigación, se plantearon dos fases experimentales. En la primera, se analizó el comportamiento del sistema bajo condiciones de colmatación, cuantificando la acumulación de sedimentos que se presenta antes del barrage en el Río Porcón. Estas mediciones permiten caracterizar el estado inicial del sistema y evaluar en qué medida la presencia de sedimentos altera tanto el desempeño de la poza disipadora como el funcionamiento de la captación secundaria.

En la segunda fase, se procedió a inducir la remoción de sedimentos utilizando el barrage fijo-fusible, para luego verificar la profundidad de los materiales expulsados aguas arriba de la captación y estudiar cómo este proceso afecta tanto la eficiencia hidráulica de la poza de amortiguación como la capacidad de toma de agua destinada al riego en la zona de Huambocancha Baja. Para ambas fases, los ensayos se realizaron aplicando los caudales obtenidos en campo y representándolos conforme a la escala establecida, garantizando así la similitud hidráulica y la fiabilidad de los resultados obtenidos.

-Ensayo en estructura colmatada

Se efectuará una primera etapa de ensayo para evaluar la eficiencia del bocal que, ha sido ampliado por la Empresa Prestadora de Servicios (EPS) a fin de mitigar su obstrucción por sedimentos.

En este proceso se medirá la profundidad de sedimentos acumulados aguas arriba del barrage Río Porcón, así como la profundidad de la poza de amortiguación antes de la descolmatación. Además, se registrará la profundidad del río aguas arriba de la captación para riego.

Dado que el bocal original se encuentra francamente obstruido, la sección de captación ampliada no afecta su eficiencia en caudales elevados, pero sí disminuye el rendimiento en caudales bajos. Por ello, si se descolmata completamente, la eficiencia podría superar el 100% respecto al diseño original, debido al mayor diámetro del orificio.

A continuación, se muestran los datos obtenidos durante este ensayo:

Tabla 19: *Profundidad de sedimentos representada en metros del prototipo.*

Pto.	Ejes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.50	1.75	1.53	1.35	1.24	1.01	0.38	0.11	0.02	0.00
2	1.74	1.68	1.65	1.58	1.41	0.99	0.45	0.18	0.08	0.05
3	1.80	1.65	1.71	1.57	1.37	0.92	0.55	0.17	0.10	0.09
4	1.83	1.70	1.60	1.38	1.26	0.80	0.64	0.15	0.13	0.07
5	1.75	1.43	1.68	1.42	1.24	0.71	0.54	0.21	0.14	0.08
6	1.69	1.71	1.55	1.45	1.32	0.62	0.57	0.17	0.10	0.05
7	1.77	1.50	1.49	1.35	1.30	0.54	0.29	0.16	0.08	0.03
8	1.72	1.64	1.58	1.47	1.34	0.85	0.42	0.14	0.04	0.02
9	1.71	1.65	1.61						0.05	0.01
10	2.04									

- Distribución de ejes: Eje 1 a 2 m del barrage, Ejes 2-10 espaciados cada 6.75 m aguas arriba.
- Distribución de puntos: Cada 1.35 m transversalmente, con densidad variable según geometría del cauce.
- Patrón de colmatación: Máxima acumulación en ejes 1-3 debido a estar más cerca del barrage, disminución hacia márgenes (9-10).

Desde la construcción de la estructura, los sedimentos se acumulan hasta superar la corona del barrage, alcanzando una altura máxima de 2.04 m junto al muro principal, lo que ha permitido el establecimiento de vegetación en la cresta. Hacia aguas arriba, a partir de los 40 m desde la línea de muro, la profundidad de sedimentos sigue superando el metro de altura, demostrando la necesidad de aplicar la descolmatación inducida para restablecer la eficiencia de la captación.

En esta primera fase no se registrarán profundidades de sedimentos en la poza disipadora ni en la captación secundaria, ya que el objetivo es caracterizar únicamente la colmatación previa al barrido experimental.

Estas zonas se asumen libres de sedimentos al inicio del ensayo, para poder cuantificar posteriormente la cantidad de material movilizado aguas abajo en la segunda fase.

En la segunda fase, se medirá la profundidad de sedimentos depositados tras la descolmatación inducida, tanto en la poza disipadora como en la captación de riego hacia Huambocancha Baja (40 m aguas abajo del barrage Río Porcón), con el fin de evaluar el impacto real del proceso de limpieza.

Se verifica la eficiencia captación de agua en la siguiente tabla, en condición de captación colmatada:

Tabla 20: *Eficiencia de captación en estructura colmatada a escala 1/15.*

Caudal medido en el río (m³/s)	Caudal en modelo (L/min)	Caudal de dotación en modelo (L/min)	Área del bocal libre de sedimento en modelo (cm²)	Caudal que se derivó en modelo (L/min)	Eficiencia de la captación (%)
0.619	42.620	6.885	5	1.951	28.340
0.619	42.620	6.885	5	1.951	28.340
0.657	45.236	6.885	5	2.703	39.255
0.652	44.892	6.885	5	2.532	36.770
0.615	42.345	6.885	5	1.937	28.128
0.532	36.630	6.885	5	1.626	23.617
0.590	40.623	6.885	5	1.778	25.821
1.068	73.535	6.885	5	2.581	37.482
1.271	87.512	6.885	5	3.641	52.878
1.475	101.558	6.885	5	3.960	57.522
2.647	182.254	6.885	5	7.273	105.631
2.941	202.497	6.885	5	9.302	135.110
3.913	269.422	6.885	5	10.811	157.020
4.355	299.855	6.885	5	11.429	165.992
4.918	338.619	6.885	5	13.793	200.336
5.400	371.806	6.885	5	15.444	224.314
5.893	405.751	6.885	5	17.391	252.597
3.75	258.199	6.885	5	10.585	153.741
3.214	221.294	6.885	5	10.526	152.888
2.679	184.457	6.885	5	7.339	106.601
2.143	147.552	6.885	5	6.897	100.168
Eficiencia de captación promedio =					100.598

La acumulación severa de sedimentos en la estructura, y especialmente junto al bocal de captación, obligó a la EPS a intervenir rompiendo parcialmente la pared de captación para agrandar el orificio como se observa en la Figura 36. Esta modificación permitió que el prototipo siga captando hasta 100 l/s en condiciones favorables, reflejándose en el modelo a escala como 6.885 l/min. Por esta razón, en varios ensayos la eficiencia de captación supera el 100%, ya que el caudal realmente captado es mayor al que correspondería a la dotación original de diseño.

Figura 36: Vista del bocal de captación ampliado tras intervención por la EPS.



Es fundamental precisar que, de no haberse ejecutado la ampliación de la sección hidráulica del bocal, manteniendo su condición crítica de colmatación, los niveles de eficiencia no habrían logrado el 100%; bajo un escenario de obstrucción severa, dichos valores difícilmente superarían el 50%, indistintamente del caudal afluente. Por tanto, las cifras elevadas reportadas en la Tabla 20, reflejan el impacto directo de la modificación estructural en la bocatoma y no deben interpretarse como el desempeño hidráulico bajo las condiciones de diseño original o sin medidas correctivas.

Respecto a la eficiencia de captación promedio registrada de 100.598%, este resultado se atribuye a la intervención de la EPS, consistente en el ensanchamiento de la ventana de captación para mitigar la colmatación extrema. Mediante esta modificación geométrica, el caudal captado logró exceder la dotación de diseño durante los ensayos de máximas avenidas. En ausencia de esta expansión del área de flujo y persistiendo la configuración original colmatada, la eficiencia habría permanecido invariablemente por debajo del umbral del 100%.

-Ensayo en estructura inducida la descolmatación

En esta fase se inició el proceso experimental recirculando los diferentes caudales registrados en campo, representados a escala de laboratorio, para simular condiciones de captación completamente descolmatada. Cada caudal se mantuvo por una duración específica que permitiera observar la respuesta hidráulica y la eficiencia de la estructura en la remoción de sedimentos. Para ello, se procedió a abrir los extremos del barrage propuesto equivalentes al 20% de su longitud total, favoreciendo así el flujo transversal y la movilización de sedimentos en la zona de captación. Este procedimiento permitió medir de manera precisa la evolución de las profundidades de fondo y evaluar el efecto directo de la apertura lateral en el rendimiento hidráulico y operativo del sistema.

Figura 37: Vista frontal del barrage fijo-fusible a escala 1/15.

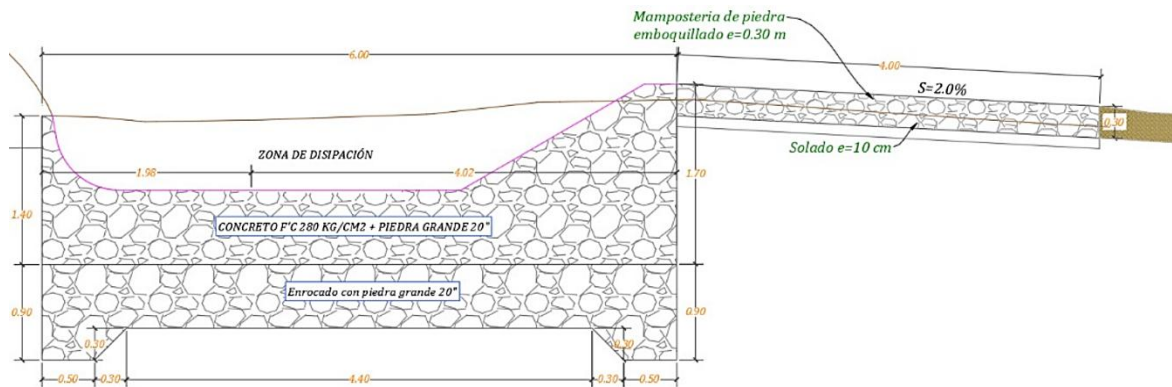


Al realizar la recirculación de los diferentes caudales en el modelo, se observó que el barrage fusible izquierdo se abrió primero, con un caudal de $2.941 \text{ m}^3/\text{s}$ ($202.497 \text{ L}/\text{min}$ a escala real), ya que en ese extremo existía menor presencia de sedimento, lo que facilitó su desalojo. Por el contrario, el barrage fusible derecho permaneció estable hasta alcanzar un caudal mayor de $4.355 \text{ m}^3/\text{s}$ ($299.855 \text{ L}/\text{min}$), momento en el cual la acumulación de sedimentos frente a este extremo cedió y permitió su apertura total. Estos resultados evidencian que no es la inestabilidad estructural la que determina la apertura de los extremos del barrage, sino la cantidad de sedimento acumulado y el caudal requerido para movilizarlo efectivamente bajo condiciones de flujo creciente.

Figura 38: *Descolmatación efectiva aguas arriba y colmatación inicial en poza disipadora.*



Figura 39: *Perfil de poza disipadora y cambio de pendiente aguas abajo.*



Nota. Fuente: Modificado de EPS SEDACAJ.

La primera imagen muestra de forma clara el proceso de descolmatación inducida con ambos extremos del barrage fusible abiertos, permitiendo que el agua y sedimentos sean movilizados aguas abajo. Sin embargo, se observa que la poza disipadora comienza a colmarse con sedimento arrastrado por el flujo, fenómeno que se explica por la geometría de la estructura: como se señala en la segunda imagen, la poza tiene una sección recta y un tramo ascendente antes del canal de salida.

Esta configuración favorece la formación de depósitos justo en el cambio de pendiente, ya que la energía del flujo disminuye en la zona de disipación y la grava y arena transportadas por el agua tienden a sedimentarse rápidamente. El ascenso final actúa como barrera física para la salida libre de material, propiciando un nuevo foco de colmatación en la poza, aunque la zona aguas arriba del barrage haya movilización de material. Este resultado evidencia la importancia de considerar detalles morfológicos y de pendiente en el diseño de pozas disipadoras, ya que pueden convertirse en nuevas zonas de acumulación si no se prevé suficiente extracción o manejo de sedimentos bajo condiciones de alto flujo y evento inducido.

Figura 40: *Estado final de la captación tras descolmatación inducida.*



Figura 41: *Bocal libre de sedimento tras la descolmatación inducida.*



Las imágenes muestran los resultados finales del proceso de descolmatación inducida. Se observa el despeje total de sedimentos en el área de la captación, especialmente a la altura del bocal, que ha quedado completamente libre, asegurando condiciones óptimas para la entrada de agua.

Tabla 21: *Profundidad de sedimentos representada en metros del prototipo.*

Pto.	Ejes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.44	0.30	0.16	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.61	0.47	0.33	0.19	0.23	0.37	0.43	0.00	0.00	0.00
3	0.59	0.45	0.31	0.17	0.21	0.32	0.50	0.00	0.00	0.00
4	0.66	0.52	0.38	0.24	0.27	0.26	1.05	0.00	0.00	0.00
5	0.63	0.49	0.35	0.21	0.24	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.64	0.50	0.36	0.22	0.25	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.62	0.48	0.34	0.20	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.45	0.31	0.53	0.38	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.38	0.24	0.10						0.00	0.00
10	0.60									

- Distribución de ejes: Eje 1 a 2 m del barrage, Ejes 2-10 espaciados cada 6.75 m aguas arriba.
- Distribución de puntos: Cada 1.35 m transversalmente, con densidad variable según geometría del cauce.
- Patrón de colmatación: Máxima acumulación en ejes 1-3 debido a estar más cerca del barrage, disminución hacia márgenes (9-10).

Tabla 22: *Tabla de diferencia punto a punto.*

Pto.	Ejes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.06	1.45	1.37	1.31	1.22	1.01	0.38	0.11	0.02	0.00
2	1.13	1.21	1.32	1.39	1.18	0.62	0.02	0.18	0.08	0.05
3	1.21	1.20	1.40	1.40	1.16	0.60	0.06	0.17	0.10	0.09
4	1.17	1.18	1.22	1.14	0.99	0.54	-0.41	0.15	0.13	0.07
5	1.12	0.94	1.33	1.21	1.00	0.46	0.54	0.21	0.14	0.08
6	1.05	1.21	1.19	1.23	1.07	0.33	0.57	0.17	0.10	0.05
7	1.15	1.02	1.15	1.15	1.07	0.54	0.29	0.16	0.08	0.03
8	1.27	1.33	1.06	1.09	0.92	0.85	0.42	0.14	0.04	0.02
9	1.33	1.41	1.51						0.05	0.01
10	1.24									
MAX	1.33	1.45	1.51	1.40	1.22	1.01	0.57	0.21	0.14	0.09
MIN	1.05	0.94	1.06	1.09	0.92	0.33	-0.41	0.11	0.02	0.00

Nota: Los tonos rojos indican erosión (descolmatación positiva) y los azules acumulación de sedimentos.

La tabla de diferencia muestra claramente la cantidad de sedimento removido en cada punto del área de estudio, utilizando un formato de colores para distinguir zonas de mayor y menor recuperación. Los valores positivos (tonos rojos) indican una exitosa descolmatación, especialmente en el centro y aguas arriba, mientras que los valores negativos puntuales (azules) reflejan que hubo migración de material grueso o acumulación localizada tras el movimiento general de sedimentos. Como resultado, el bocal quedó completamente libre de sedimento, lo que permite prever un aumento significativo en la eficiencia hidráulica de la captación.

Esta restauración favorece el ingreso de caudal al sistema, asegurando un mejor desempeño operativo en la captación. Los ligeros incrementos negativos en algunos puntos son atribuibles a la migración y deposición localizada de materiales gruesos, sin afectar el balance positivo del saneamiento global.

La descolmatación inducida permitió remover aproximadamente 568 m³ de sedimentos, lo que representa un 67% del volumen originalmente colmatado (852 m³), restableciendo la sección hidráulica del cauce. Este proceso fue especialmente efectivo en el eje central y junto al barrage, donde se alcanzaron los mayores valores de recuperación.

Se verifica la eficiencia captación de agua en la siguiente tabla, en condición de captación colmatada:

Tabla 23: *Eficiencia de captación en estructura descolmatada a escala 1/15.*

Caudal medido en el río (m³/s)	Caudal en modelo (L/min)	Caudal de dotación en modelo (L/min)	Área del bocal libre de sedimento en modelo (cm²)	Caudal que se derivó en modelo (L/min)	Caudal que se derivó en modelo (L/min)	Eficiencia de la captación (%)
0.619	42.620	6.885	10	9.524	2.639	100.000
0.619	42.620	6.885	10	9.524	2.639	100.000
0.657	45.236	6.885	10	10.053	3.168	100.000
0.652	44.892	6.885	10	9.929	3.044	100.000
0.615	42.345	6.885	10	8.889	2.004	100.000
0.532	36.630	6.885	10	7.692	0.807	100.000
0.590	40.623	6.885	10	8.414	1.529	100.000
1.068	73.535	6.885	10	10.722	3.837	100.000
1.271	87.512	6.885	10	11.501	4.616	100.000
1.475	101.558	6.885	10	12.283	5.398	100.000
2.647	182.254	6.885	10	16.779	9.894	100.000
2.941	202.497	6.885	10	17.857	10.972	100.000
3.913	269.422	6.885	10	21.635	14.75	100.000
4.355	299.855	6.885	10	23.331	16.446	100.000
4.918	338.619	6.885	10	25.491	18.606	100.000
5.400	371.806	6.885	10	26.339	19.454	100.000
5.893	405.751	6.885	10	28.231	21.346	100.000
3.75	258.199	6.885	10	21.010	14.125	100.000
3.214	221.294	6.885	10	18.954	12.069	100.000
2.679	184.457	6.885	10	16.902	10.017	100.000
2.143	147.552	6.885	10	14.846	7.961	100.000
Eficiencia de captación promedio =						100.000

Los resultados experimentales demuestran que la descolmatación inducida y el aumento del área libre del bocal generan un incremento significativo en la capacidad de captación, logrando satisfacer el 100% de la eficiencia de captación requerida por el caudal de dotación. Adicionalmente, la estructura recupera tanta capacidad hidráulica que es capaz de derivar un caudal excedente. Esta mejora confirma la hipótesis de la investigación, evidenciando que la apertura lateral y la remoción de sedimentos permiten restaurar y optimizar el sistema, asegurando la operatividad hidráulica y el abastecimiento total incluso frente a fluctuaciones en el río. Por tanto, la intervención aplicada es una alternativa eficaz y comprobada para enfrentar problemas de

colmatación en captaciones similares. Si bien la descolmatación inducida resultó altamente efectiva para restaurar y maximizar la eficiencia de captación Río Porcón, es importante considerar los efectos negativos aguas abajo, especialmente cuando existen otras infraestructuras de captación a corta distancia, como es el caso de una segunda toma para riego ubicada a 40 metros.

Figura 42: *Acumulación de sedimentos en la poza disipadora posterior a la remoción inducida en la captación.*



Figura 43: *Colmatación total aguas arriba del barrage de la segunda captación tras la descolmatación inducida en la captación superior.*



Las imágenes muestran la acumulación significativa de sedimentos aguas arriba del barrage de la segunda captación de agua para riego, como consecuencia directa de la descolmatación inducida en la captación principal ubicada aguas arriba. Se observa cómo el material arrastrado, compuesto principalmente de grava y arena, colmató por completo el sector de ingreso a la segunda captación, obstaculizando el paso del agua y generando la necesidad de labores de limpieza adicionales para mantener la operatividad. Este resultado evidencia el riesgo de colmatación secundaria aguas abajo, así como la importancia de coordinar intervenciones y manejo de sedimentos a escala de cuenca y de todo el sistema de captación

A continuación, se muestran los datos obtenidos durante este ensayo:

Figura 44: Distribución de ejes de medición en la poza disipadora.

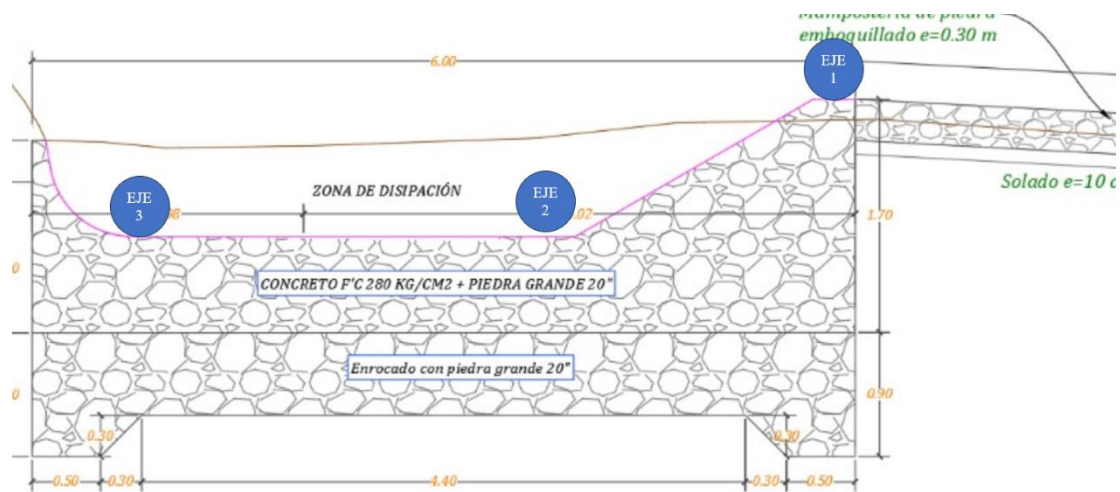


Tabla 24: Profundidad de sedimentos en la poza disipadora representada en metros del prototipo.

Pto.	Ejes		
	1	2	3
1	0.60	0.50	0.42
2	0.45	0.72	0.56
3	0.15	0.84	0.54
4	0.45	0.72	0.74
5	0.30	0.57	0.65
6	0.26	0.68	0.72
7	0.15	0.78	0.72
8	0.30	1.02	0.57
9	0.59	0.87	1.02
10	0.45	0.87	0.72

- Distribución de ejes: Ejes 1-3 están espaciados distintamente, del eje 1 al eje 2 hay 1.73m y del eje 2 al eje 3 hay una separación de 3.43m.
- Distribución de puntos: Cada 1.35 m transversalmente, con densidad variable según geometría de la poza.
- Patrón de colmatación: Máxima acumulación en eje 2 debido a tener un cambio de pendiente abrupto.

La acumulación de sedimentos en la poza disipadora se ve fuertemente influenciada por la geometría del canal, especialmente en presencia de un tramo recto y un cambio abrupto de pendiente en subida.

Estos factores propician la reducción de la velocidad del flujo y, en consecuencia, incrementan la deposición de material sedimentario. Por tanto, se concluye que diseños que incluyan tramos rectos prolongados y cambios bruscos de pendiente deben ser evitados o mitigados para asegurar un adecuado funcionamiento hidráulico y prolongar la vida útil de la infraestructura, reduciendo la necesidad de mantenimiento por remoción de sedimentos.

Tabla 25: Profundidad de sedimentos en la segunda captación de agua para riego representada en metros del prototipo.

Pto.	Ejes					
	1	2	3	4	5	6
1	0.75	0.3	0.6	0.585	0.3	0.15
2	0.6	0.255	0.39	0.6	0.15	0.45
3	0.3	0.54	0.3	0.165	0.405	0.03
4	0.39	0.405	0.405	0.3	0.285	0.06
5	0.75	0.48	0.3825	0.285	0.165	0.075
6	0.225	0.3	0.285	0.315	0.03	0.045
7	0.45	0.75	0.435	0.3465	0.225	0.105
8	0.6	0.6	0.42	0.42	0.33	0.6
9		0.75	0.735	1.05	0.555	0.75
10				0.75	0.45	1.05

- Distribución de ejes: Ejes 1-6 espaciados cada 6.80 m aguas arriba del barrage para riego, siendo el eje 1 el punto más cercano y el eje 6 es más alejado cerca a la poza.
- Distribución de puntos: Cada 1.35 m transversalmente, con densidad variable según geometría de la poza.
- Patrón de colmatación: Máxima acumulación en eje 4 y en el eje 6.

Se concluye que la descolmatación inducida en una estructura de captación ubicada aguas arriba puede generar efectos negativos significativos en las estructuras situadas aguas abajo, como lo evidencia el comportamiento de sedimentación en la segunda captación para riego observada en la tabla de profundidades. El retiro de sedimentos aguas arriba provoca su transporte y eventual deposición en la siguiente poza, incrementando la acumulación especialmente en zonas específicas (como los ejes 4 y 6), lo que puede afectar la capacidad de captación, la eficiencia del sistema y aumentar la frecuencia de mantenimiento requerido.

Este proceso demuestra que la gestión de sedimentos debe considerar los impactos en toda la red hidráulica y no únicamente en el punto de intervención; de lo contrario, se corre el riesgo de que los problemas de colmatación se trasladen y agraven en otras estructuras aguas abajo, afectando la funcionalidad general del sistema de captación de agua.

Finalmente, los resultados experimentales obtenidos permiten contrastar y validar de manera afirmativa la hipótesis planteada en la presente investigación. Se demostró empíricamente que la apertura de los extremos laterales del barrage y la erosión ocasionada por el flujo inducen efectivamente la descolmatación aguas arriba de la estructura. Esta recuperación morfológica y la liberación total del área del bocal aseguran la operatividad del sistema, garantizando el 100% de la eficiencia de captación para satisfacer la dotación de diseño, además de permitir el ingreso de un caudal excedente. Por lo tanto, se verifica que la intervención aplicada cumple con el objetivo de maximizar el rendimiento hidráulico de la captación derivadora Río Porcón.

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se determinó que la descolmatación inducida, mediante la apertura de los extremos del barrage en un 20% de su longitud, logró la recuperación integral del área hidráulica efectiva del bocal y generó cambios sustanciales en la morfología del río Porcón. El proceso permitió restablecer la sección del cauce al remover aproximadamente 568 m³ de material acumulado, lo que representó la eliminación del 67% del volumen total colmatado estimado en 852 m³. Como resultado directo de esta modificación morfológica y la liberación de la ventana de captación, se garantizó una eficiencia del 100% para satisfacer la dotación de diseño y se logró captar un caudal excedente promedio que superó en más del doble el requerimiento original.

Se caracterizó la captación "Río Porcón" y su cauce en un tramo de 250 metros, identificando un régimen hidrológico estacional con caudales de estiaje promedio de 0.168 m³/s y avenidas máximas que alcanzaron picos de 5.893 m³/s durante el periodo evaluado. Desde el punto de vista morfológico y granulométrico, se estableció que el lecho superficial estuvo dominado en un 89% por cantos con un diámetro medio de 609.40 mm, mientras que el material subsuperficial se compuso de arenas y gravas con un diámetro medio de 2.624 mm. Asimismo, se evidenció que la estructura presentaba una colmatación severa, con sedimentos que superaban la corona del barrage alcanzando alturas de hasta 2.04 metros junto al muro principal, lo que redujo la pendiente longitudinal del río de su valor original de 0.0323 m/m a 0.0137 m/m debido al proceso de agradación.

Se determinó la evolución morfológica del cauce en los 180 metros aguas arriba del barrage tras inducir la erosión hídrica mediante la apertura de los elementos fusibles laterales. Durante los ensayos, el extremo izquierdo colapsó con un caudal de 2.941 m³/s, mientras que el derecho requirió un caudal mayor de 4.355 m³/s para su apertura total, debido a la mayor consolidación de sedimentos en esa zona. La erosión resultante logró recuperar la sección hidráulica original en el eje central y zonas adyacentes; sin embargo, se registró una transferencia de carga sedimentaria hacia aguas abajo, provocando la colmatación total de la segunda captación de riego ubicada a 40 metros de la estructura principal.

Se evaluó el comportamiento del área del bocal comparando las condiciones antes y después de la descolmatación en el modelo físico a escala 1/15. En su estado colmatado inicial, la estructura lograba satisfacer el 100% de la demanda de diseño, resultado atribuible a una ampliación estructural previa ejecutada por la EPS. Tras inducir la erosión con caudales representativos de los meses lluviosos, se verificó que el bocal quedó completamente libre de sedimentos. Esta limpieza restauró la capacidad 101 hidráulica máxima de la captación, garantizando la derivación continua de la dotación (eficiencia del 100%) y permitiendo captar un caudal excedente que llegó a superar en más del doble el volumen de diseño original durante los picos de avenida.

Se estimó el volumen descolmatado y el tiempo de respuesta morfodinámica sometiendo el modelo físico a la variación temporal de caudales característica de la época de lluvias. La simulación se focalizó en los periodos de mayor magnitud registrados en la curva de variación estacional, identificando que estos eventos críticos son los responsables de la fuerza tractiva necesaria para la limpieza del cauce. Mediante este procedimiento, se logró la remoción efectiva de 568 m³ de sedimentos, demostrando que la recuperación de la sección hidráulica se consigue principalmente durante la ocurrencia de los caudales máximos representados en la variación temporal, logrando la descolmatación del tramo de 180 metros sin requerir tiempos prolongados de flujo base.

5.2. Recomendaciones

Implementar un plan integral de manejo de sedimentos a nivel de cuenca, coordinando la descolmatación de captaciones aguas arriba y aguas abajo para evitar el traslado masivo de sedimentos y reducir la colmatación secundaria en otras estructuras hidráulicas.

Diseñar y construir estructuras de retención o trampas de sedimentos entre captaciones en cascada, como pozas disipadoras adicionales o barreras filtrantes, que permitan atrapar y remover el material antes de que alcance infraestructuras críticas situadas aguas abajo.

Realizar monitoreos periódicos de la dinámica de sedimentos y morfología del cauce antes y después de cada intervención de limpieza, utilizando mediciones de profundidad y distribución granulométrica, para ajustar la frecuencia y el método de las operaciones según el comportamiento real del sistema.

Optimizar el diseño de las pozas disipadoras y canales de salida, evitando tramos rectos prolongados y cambios bruscos de pendiente que propician la rápida sedimentación, e incorporar salidas de limpieza o extracciones frecuentes para facilitar el mantenimiento.

Integrar criterios ambientales en la programación de la descolmatación, considerando los impactos sobre la biodiversidad, la vegetación de ribera y la calidad del agua, e implementando medidas de mitigación y restauración ecológica para asegurar la sostenibilidad del sistema y la compatibilidad con los usos de riego y consumo humano aguas abajo.

No utilizar diseños estándar como la poza tipo III de la U.S.B.R. sin adaptaciones al entorno y al régimen de caudales local. Preferir diseños personalizados, validados con modelos físicos y adecuados a la morfología fluvial, la pendiente y los tipos de sedimentos presentes, para maximizar la eficiencia hidráulica y minimizar los riesgos de colmatación y socavación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bibliografía

- Andrews, E. D. (1980). Effective and bank-full discharges of streams in the Yampa River basin, Colorado and Wyoming. *Journal of Hydrology*, 46(1–2), 311–330 P.
- Arboleda, J., Felipe, O., & Yerrén, J. (2018). *Manual de hidrometría* (Dirección de Hidrología, DHI; Subdirección de Predicción Hidrológica, SPH). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).
- Cáceres Mendoza, K. J. (2024). Comportamiento hidráulico del barrage fijo – fusible de la captación Tres Molinos – Cajamarca, a nivel de modelo físico (Tesis de Título Profesional, Universidad Nacional de Cajamarca).
- Camargo Hernández, J. E., y Franco, V. (1993). Adquisición de Datos. En *Manual de Ingeniería de Ríos* (1.a ed., p. 140). Instituto de Ingeniería.
- Castañeda Vargas, F. J. (2025). *Efecto de la descolmatación inducida en la eficiencia de la captación derivadora Huacariz, con un barrage fusible central* [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Cajamarca].
- Chamorro, G. I. (2011). Estimación del caudal por método de flotadores [Guía de hidrometría, SENAMHI/DR-Lima N° 01-2011]. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
- Chow, V. te. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Bogotá, Colombia. Editorial Nomos S.A. 1ra ed. 667P.
- Chuquiruna Marin, L. R. (2025). Eficiencia hidráulica de la poza disipadora de energía de la captación Cristo Rey, con barrage fijo-fusible, Cajamarca (Tesis de Título Profesional, Universidad Nacional de Cajamarca).
- Dietrich, W. E., & Gallinatti, J. D. (1991). Fluvial geomorphology. In O. Slaymaker (Ed.), *Field*

experiments and measurement programs in geomorphology, 188–199 P.

Eagle, L. J. B., Milner, A. M., Klaar, M. J., Carrivick, J. L., Wilkes, M., & Brown, L. E. (2021). Extreme flood disturbance effects on multiple dimensions of river invertebrate community stability. *Journal of Animal Ecology*, 90, 2135–2146 P.

Fattorelli, S., & Fernández, P. C. (2011). *Diseño Hidrológico*. 2ª ed. Edición Digital. Instituto Nacional del Agua (INA) - Water Assessment & Advisory Global Network. ISBN: 978-987-05-2738-2. 531 P.

French, R. H. (1988). *Hidráulica de Canales Abiertos*. México. Editorial Mc Graw Hill, 1era ed. 724 P.

García, M. H. (2008). Sediment transport and morphodynamics. In *River dynamics: Morphology to support management*, Cambridge University Press, 432–506 P.

García, M. H. (Ed.). (2018). *Sedimentation engineering: Processes, measurements, modeling, and practice* (ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110). American Society of Civil Engineers.

Giles, R. V, Evett, J. B., & Liu, C. (2003). *Mecánica de los Fluidos e Hidráulica*. España. España. Editorial Mc Graw Hill, 3ra ed. 444 P.

Huamán Vidaurre, J. F. (2016). Efectos de la Descolmatación Inducida en la Eficiencia de Captación y en la Morfología del Río Grande-Cajamarca, Aguas Arriba del Barrage. Universidad Nacional de Cajamarca.

Huamán Vidaurre, J. F. (2022). Captación Derivadora de Alta Montaña. En *Separata del curso de estructuras hidráulicas*.

Huamán Vidaurre, J. F., & Rodríguez Cruzado, S. R. (2023). Cambio de elevación por erosión del lecho de los ríos Grande, Porcón y Mashcón en tramos impactados por captaciones

derivadoras. Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cajamarca, 23(1–2), 199–206 P.

INGETEC S.A. (2003). Reporte de auditoría y evaluación ambiental No. 2.8.1: Manejo del abastecimiento actual de agua potable de la ciudad de Cajamarca. En Auditoría ambiental y evaluaciones ambientales de las operaciones de Minera Yanacocha en Cajamarca – Perú (Contrato C-03-015). <https://www.calameo.com/read/004433360441b117889c1>.

Julien, P. Y. (2018). River mechanics, Cambridge University Press, 2da ed. 6–40P.

Kondolf, G. M. (1997). Hungry water: Effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management*, 21(4), 533–551 P.

Kraatz, D. B., & Mahajan, I. K. (1982). Pequeñas obras hidráulicas. En *Estudio FAO: Riego y drenaje* (1a ed., p. 165). Roma.

Martín, V. J. P. (2001). Ingeniería de Ríos. Ediciones de la Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona. Editorial Mexicana Registro N°2317, 1ra ed. 301 P.

Nixon, M. (1959). “A study of bank-full discharges of rivers in England and Wales.” Proc., Institution of Civil Engineers, 157–175 P.

Novák, P., Moffat, I. A. B., & Nalluri, C. (2001). Estructuras Hidráulicas. Colombia. Editorial Mc Graw Hill, 2da ed. 599 P.

Ochoa, R. T. (2011). Hidráulica de Ríos y Procesos Morfológicos. Colombia. Editorial Ecoe Ediciones, 1ra ed. 632P.

Rocha Felices, A. (1998). Introducción a la Hidráulica Fluvial (1.a ed.). UNI.

Rocha, F. A. (2006). La Problemática de la Sedimentación de Embalses en el Aprovechamiento de los Ríos Peruanos, Aplicada al Embalse de Poechos. Primer Congreso Internacional de Hidráulica, Hidrología, Saneamiento y Medio Ambiente. Lima, Perú. 1ra ed. 42 P. Rudas Chunqui, J. L. (2020). *Gasto sólido de fondo aguas arriba de la captación Río Porcón - Cajamarca 2020* [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Cajamarca].

- Simons, D. B., & Sentürk, F. (1992). *Sediment transport technology: Water and sediment dynamics*. Water Resources Publications.
- Soar, P. J. (2000). *Channel restoration design for meandering rivers* (Doctoral dissertation). University of Nottingham.
- Strickler, A. (1923). Contribuciones al conocimiento de la distribución de velocidades en canales abiertos. *Mitteilungen del Sindicato Suizo de Ingenieros y Arquitectos*, 69, 345–401P.
- Silva, A. (2024). Erosión aguas abajo de pozas disipadoras de energía. En M. López & R. Pérez (Eds.), *Dinámica fluvial y gestión de cuencas*, Editorial Hidráulica, 45–67 P.
- Vanoni, V. A. (1975). *Sedimentation engineering* (Manuals and Reports on Engineering Practice No. 54). American Society of Civil Engineers.
- Vanoni, V. A. (Ed.). (2006). *Sedimentation engineering: Processes, measurements, modeling, and practice* (Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110). American Society of Civil Engineers.
- Vergara, S. M. A. (1995). *Técnicas de Modelación en Hidráulica*. México. Editorial Alfaomega S. A. 1ra ed. 293 P.
- Wolf, P., & Brinker, R. (1997). *Topografía*. Alfaomega.
- Wolman, M. G., & Miller, J. P. (1960). Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *Journal of Geology*, 68(1), 54–74 P.
- Xu, X., Li, Y., Chen, Z., & Wang, H. (2024). Application of machine learning and emerging remote sensing approaches for streamflow estimation: A review. *Journal of Hydrology*, 620, Article 128123.
- Yalin, M. S. (1971). *Theory of hydraulic models*. Macmillan.

ANEXOS

Anexo 1: Panel Fotográfico

Figura 45: *Sedimentos superficiales aguas arriba de la captación “Río Porcón”.*



Figura 46: *Medición de puntos topográficos aguas arriba del barrage.*

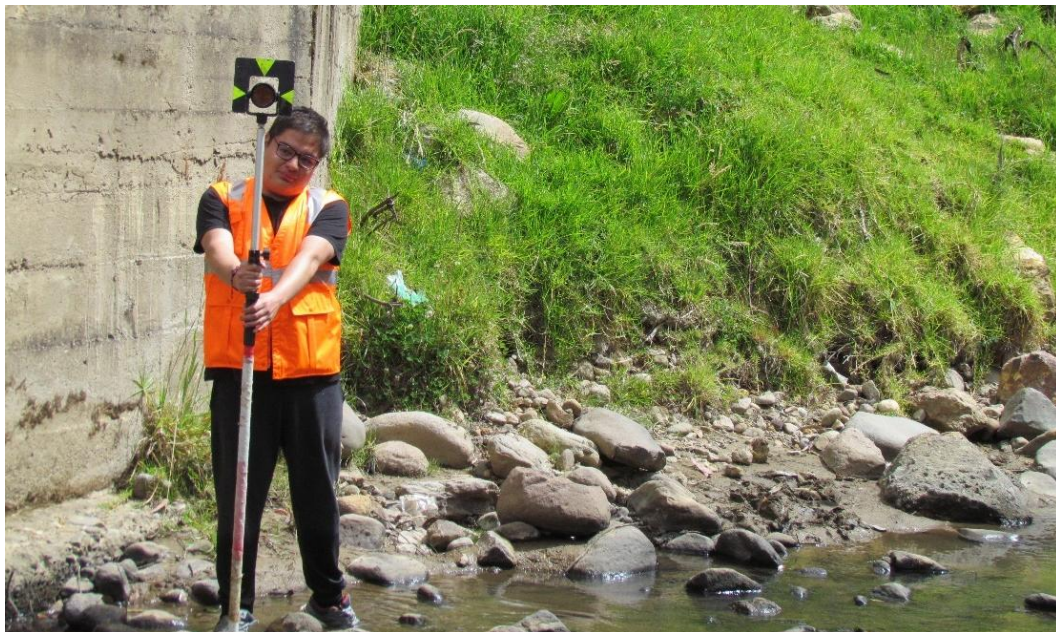


Figura 47: *Sedimentos superficiales aguas abajo de la captación “Río Porcón”.*



Figura 48: *Bocal de la segunda captación aguas abajo de la captación “Río Porcón”.*



Figura 49: Levantamiento topográfico de poza disipadora de la captación “Río Porcón”.



Figura 50: Establecimiento del primer punto de control (BM) durante el levantamiento topográfico.



Figura 51: *Establecimiento del segundo punto de control (BM) durante el levantamiento topográfico.*



Figura 52: *Levantamiento topográfico de la segunda captación.*



Figura 53: *Excavación de calicatas para la extracción de sedimentos superficiales cerca al barrage.*



Figura 54: *Excavación de calicatas aguas arriba del barrage.*



Figura 55: *Configuración del sedimento subsuperficial.*



Figura 56: *Traslado del material laboratorio de mecánica de suelos.*



Figura 57: Granulometría de la muestra M1 realizada en laboratorio.

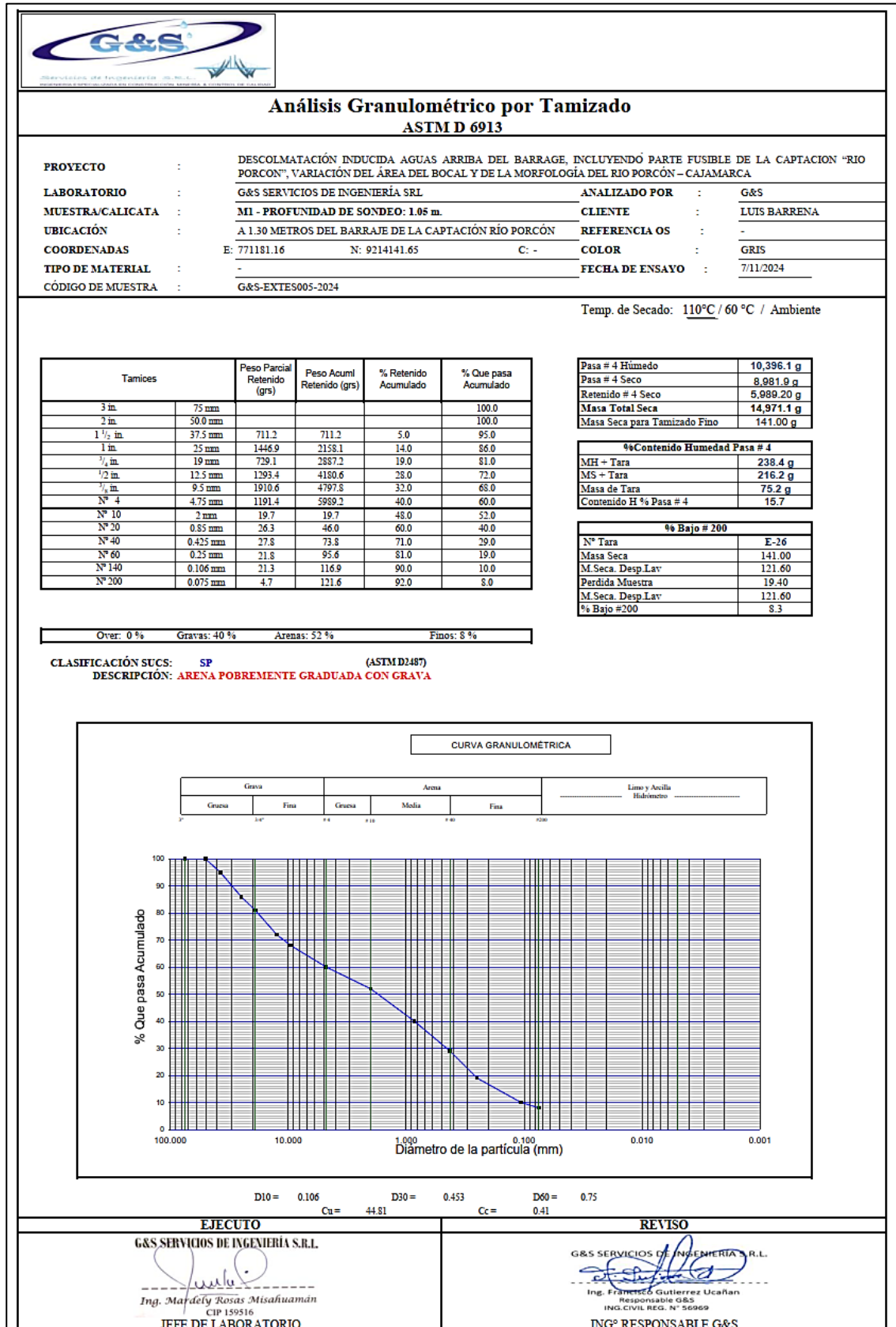


Figura 58: Granulometría de la muestra M2 realizada en laboratorio.

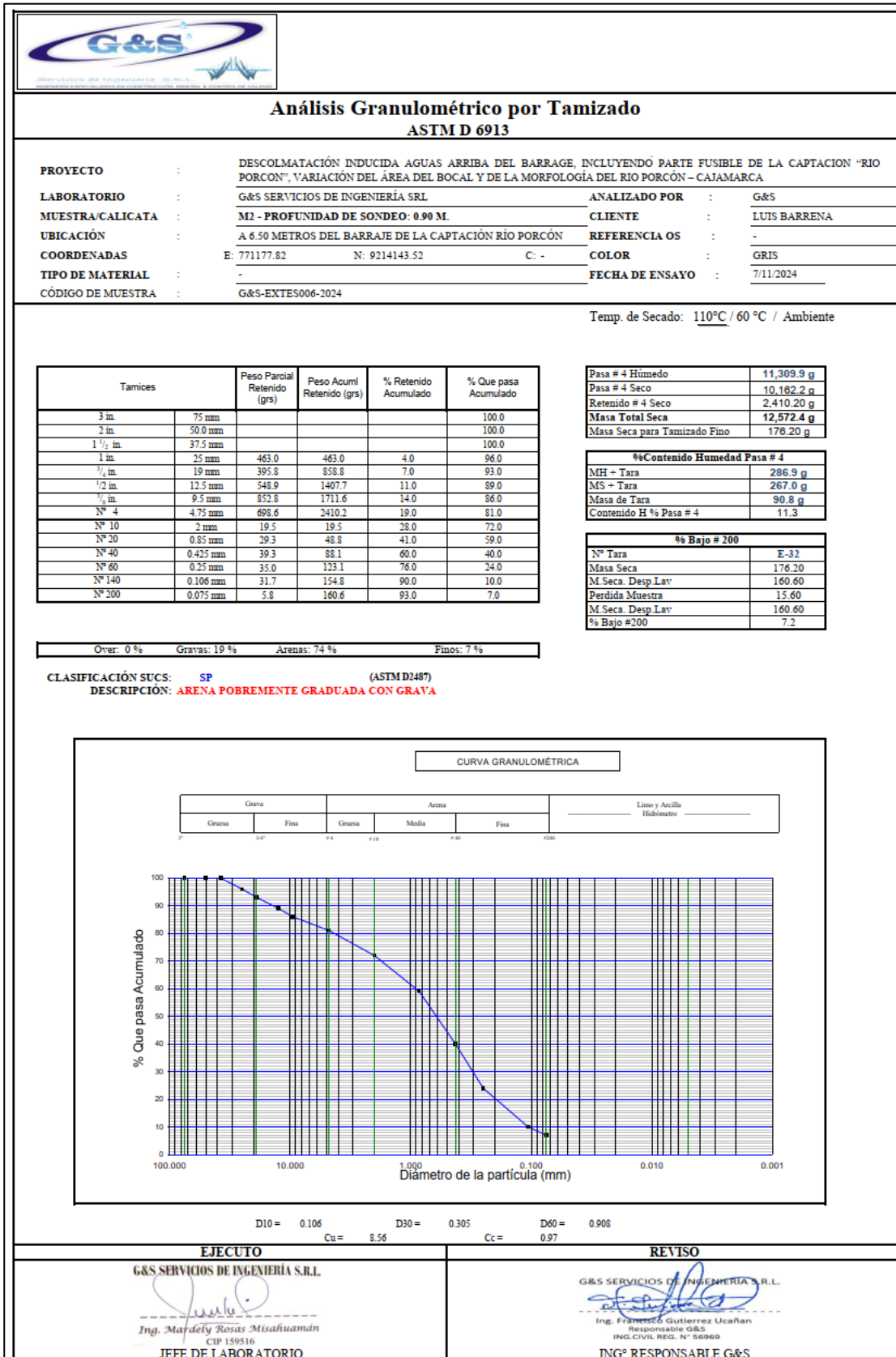


Figura 59: Granulometría de la muestra M3 realizada en laboratorio.

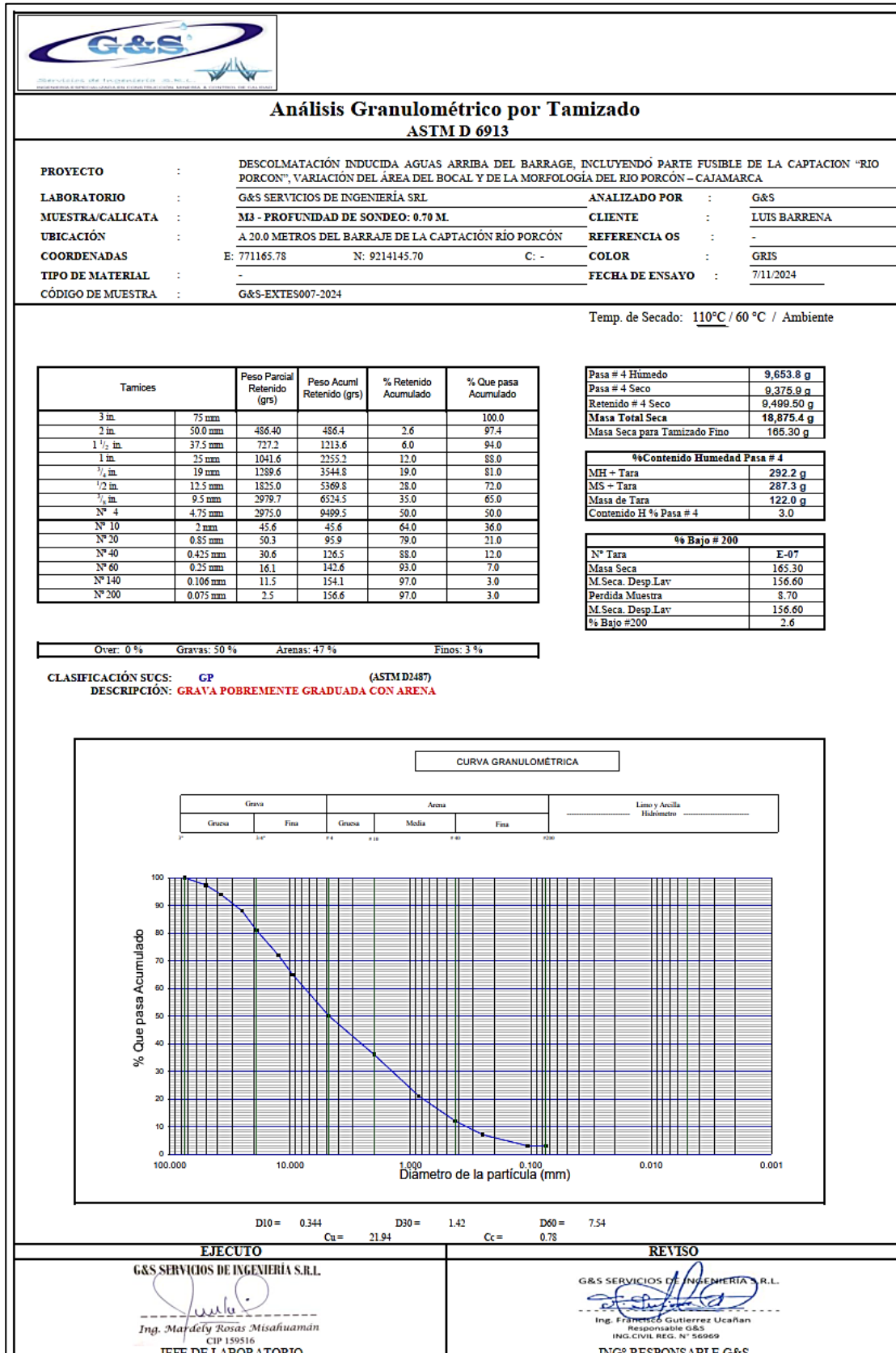


Figura 60: Granulometría de la muestra M4 realizada en laboratorio.

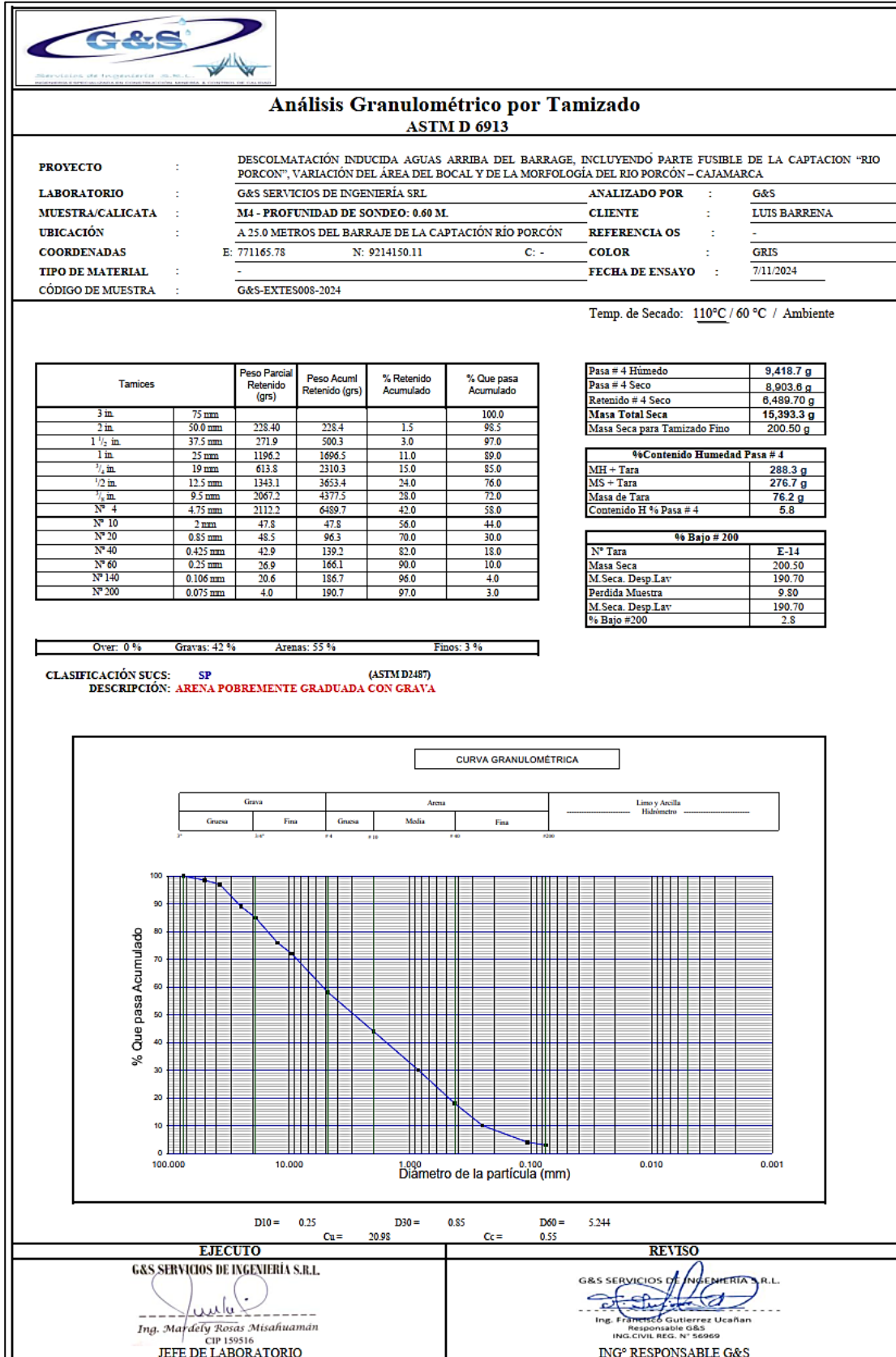


Figura 61: Granulometría de la muestra M5 realizada en laboratorio.

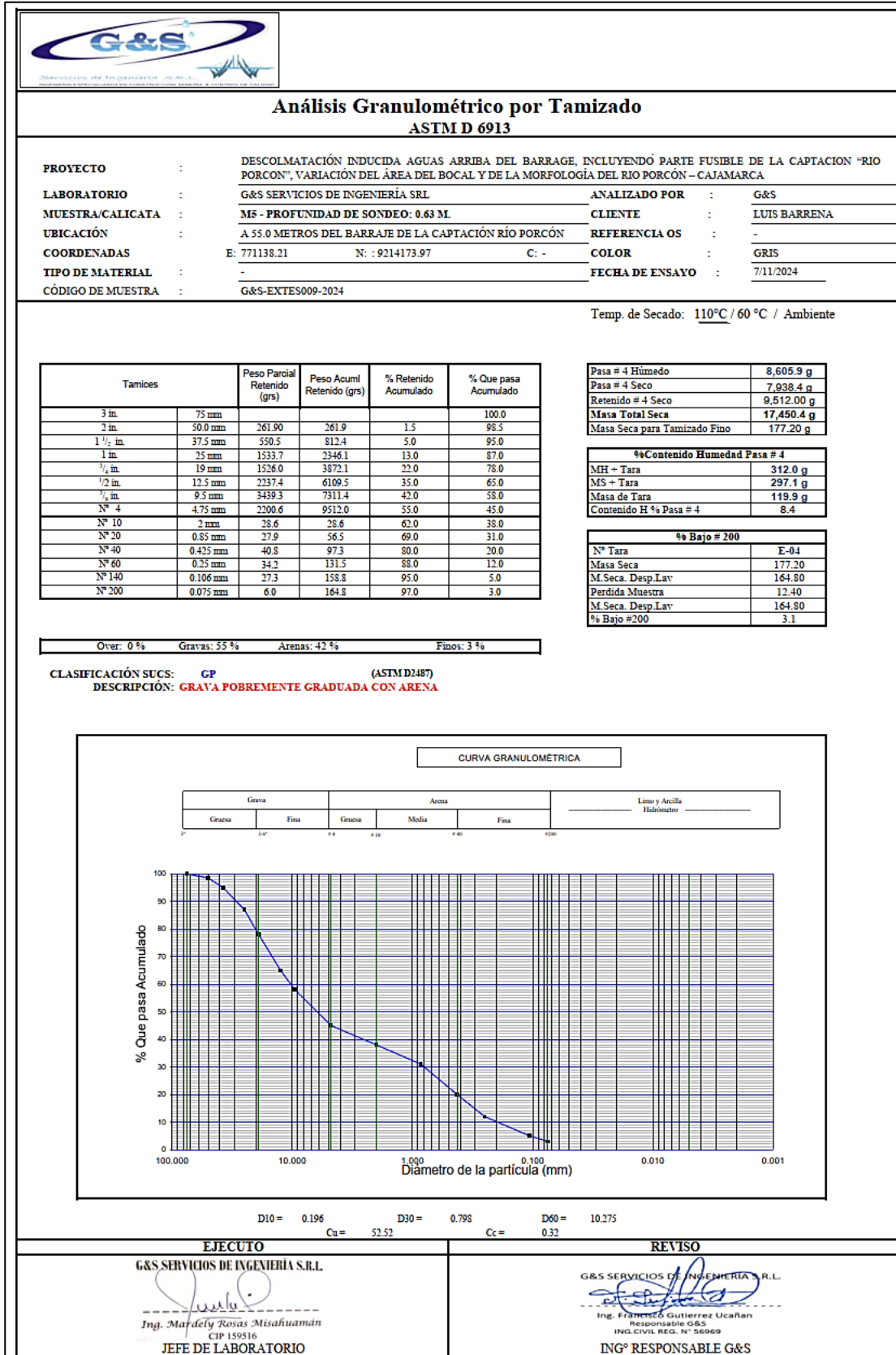


Figura 62: Granulometría de la muestra M6 realizada en laboratorio.

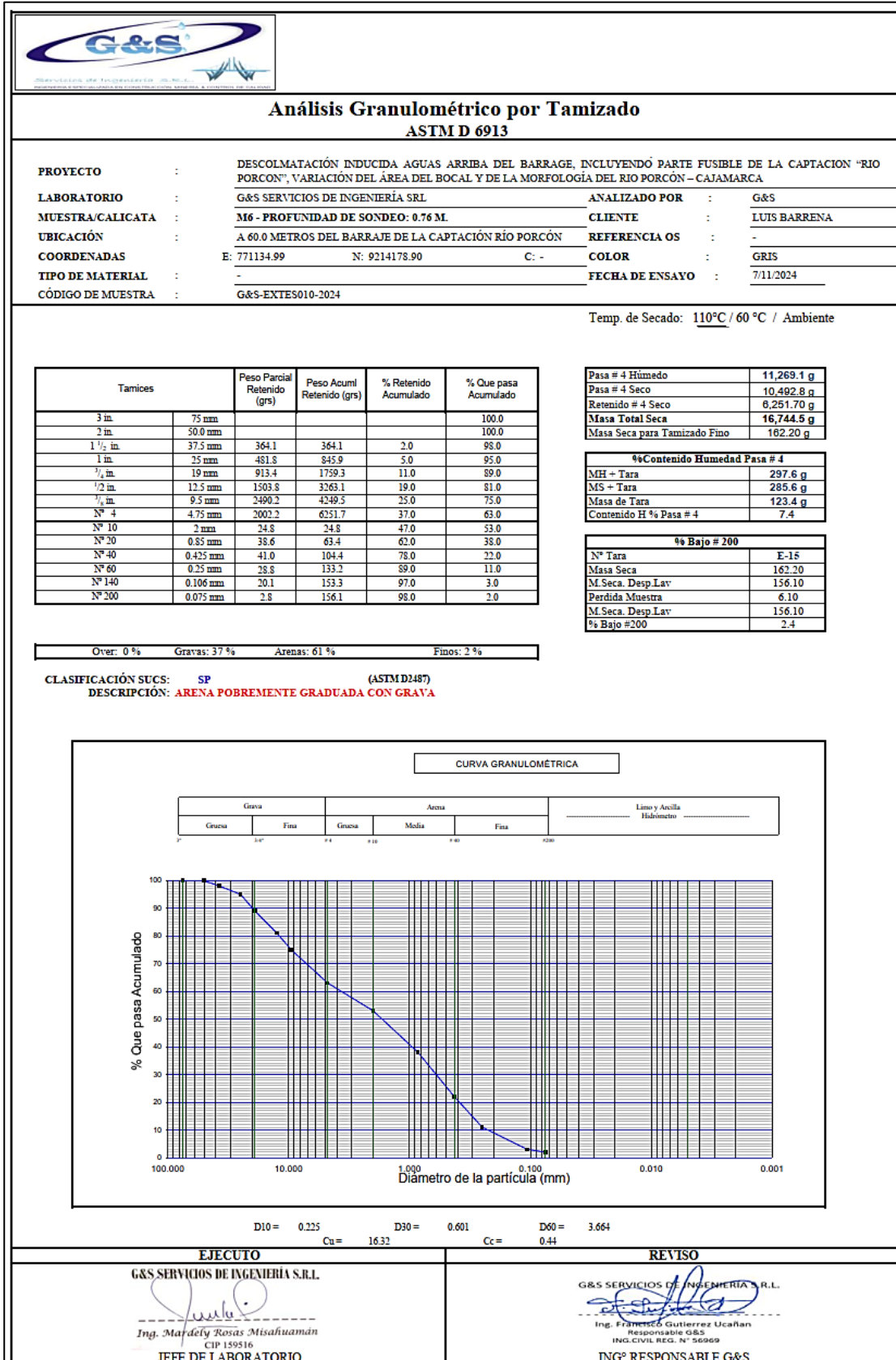


Figura 63: Granulometría de la muestra M7 realizada en laboratorio.

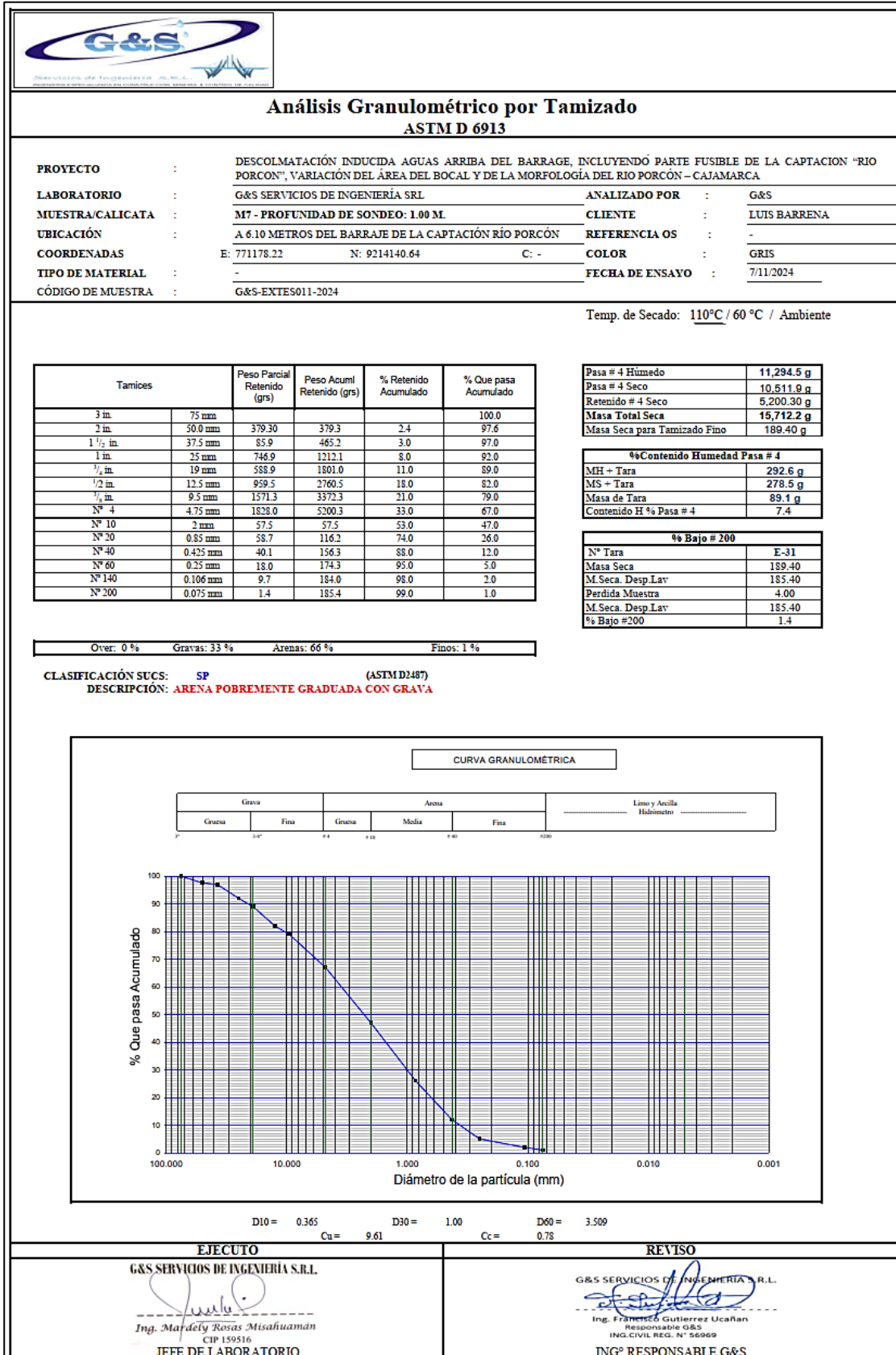


Figura 64: Granulometría de la muestra M8 realizada en laboratorio.

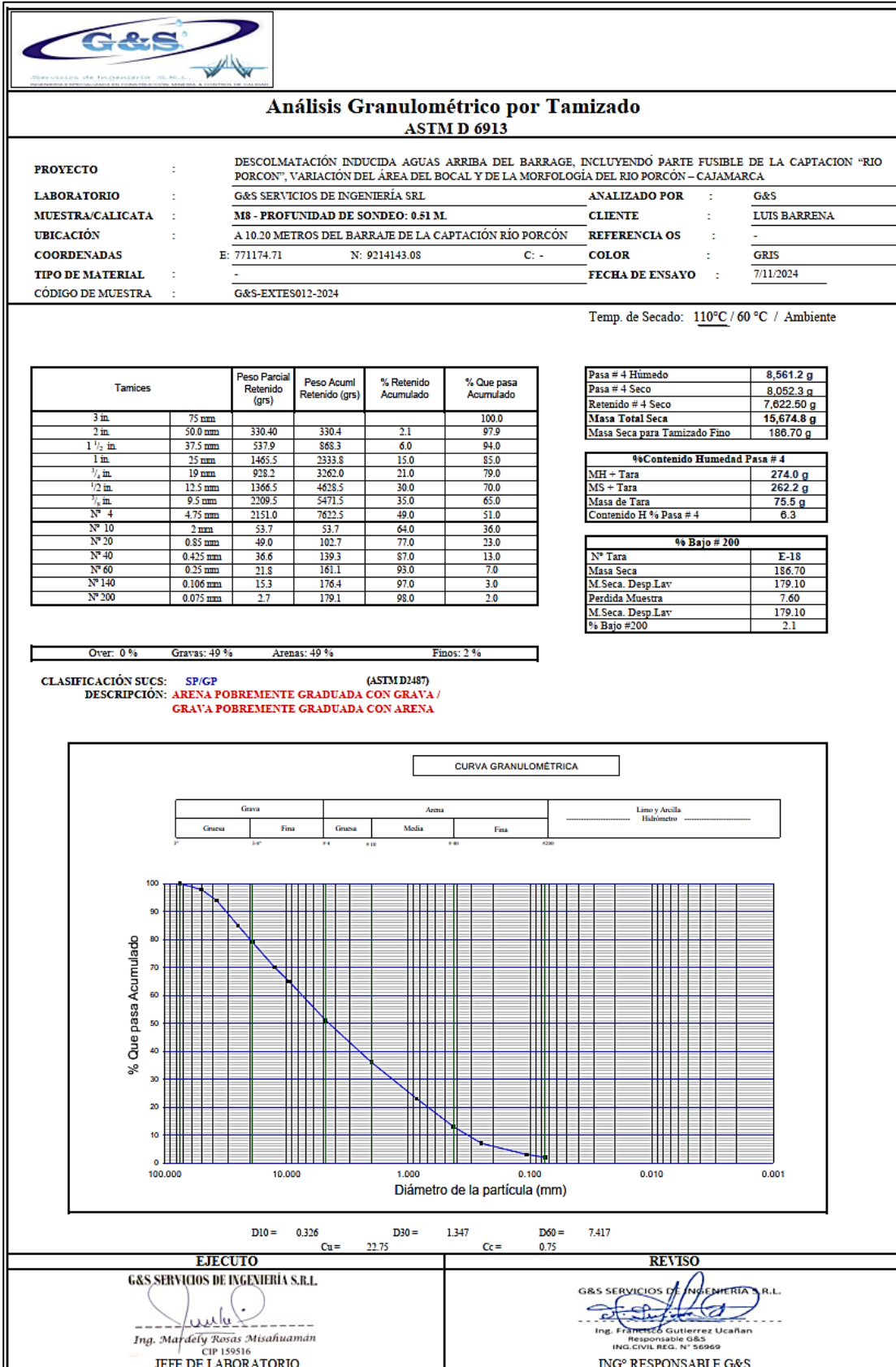


Figura 65: *Construcción de la estructura metálica del modelo físico.*



Figura 66: *Verificación de la pendiente del modelo físico.*



Figura 67: *Fabricación de la poza de disipación del modelo físico.*



Figura 68: *Aplicación de sellador en huecos y fisuras de la estructura metálica del modelo hidráulico.*



Figura 69: *Revestimiento de las paredes laterales del modelo físico con mezcla de concreto.*



Figura 70: *Trabajos de pintura y acabado superficial del modelo físico previo a pruebas hidráulicas.*



Figura 71: *Fabricación de los barrages a escala para el modelo físico.*



Figura 72: *Trabajos de pintura y acabado superficial de los barrages a escala.*



Figura 73: *Preparación y separación de fracciones de sedimentos para su uso en el modelo físico.*



Figura 74: *Caracterización de la colmatación aguas arriba del barrage.*



Figura 75: *Medición de tirantes sobre la corona del barrage para calibrar el modelo.*



Figura 76: *Aforo del bocal en condición de colmatación.*



Figura 77: *Apertura del 20% del barrage fusible.*



Figura 78: *Efectos negativos en la segunda captación durante la descolmatación inducida.*



Figura 79: *Bocal libre de sedimentos durante la mitad de ensayos de descolmatación.*



Figura 80: *Situación morfológica final después de los ensayos de descolmatación.*



Figura 81: *Aforo del bocal libre de sedimentos.*



Figura 82: *Vista de la captación para riego completamente obstruida por sedimentos arrastrados desde el barrage descolmatado.*



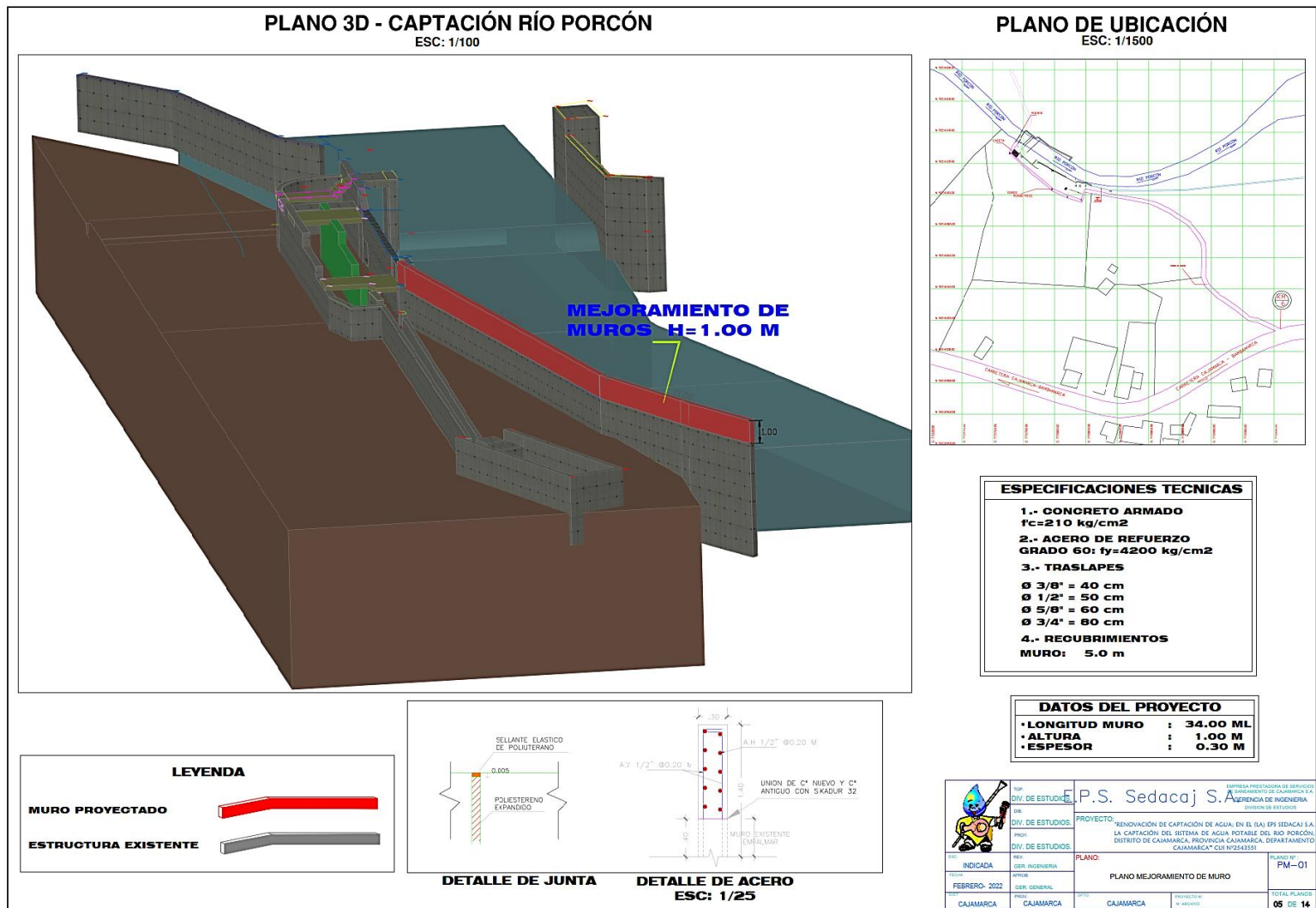
Figura 83: *Aforo de caudales en el modelo.*



Figura 84: *Medición de la profundidad de sedimentos después de la descolmatación*

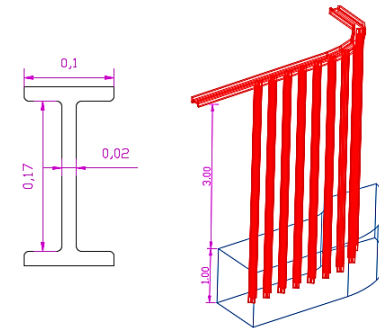
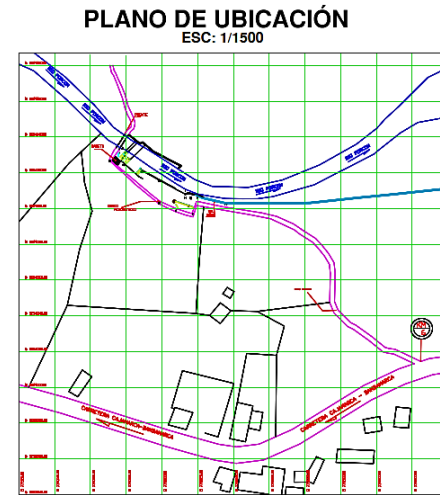
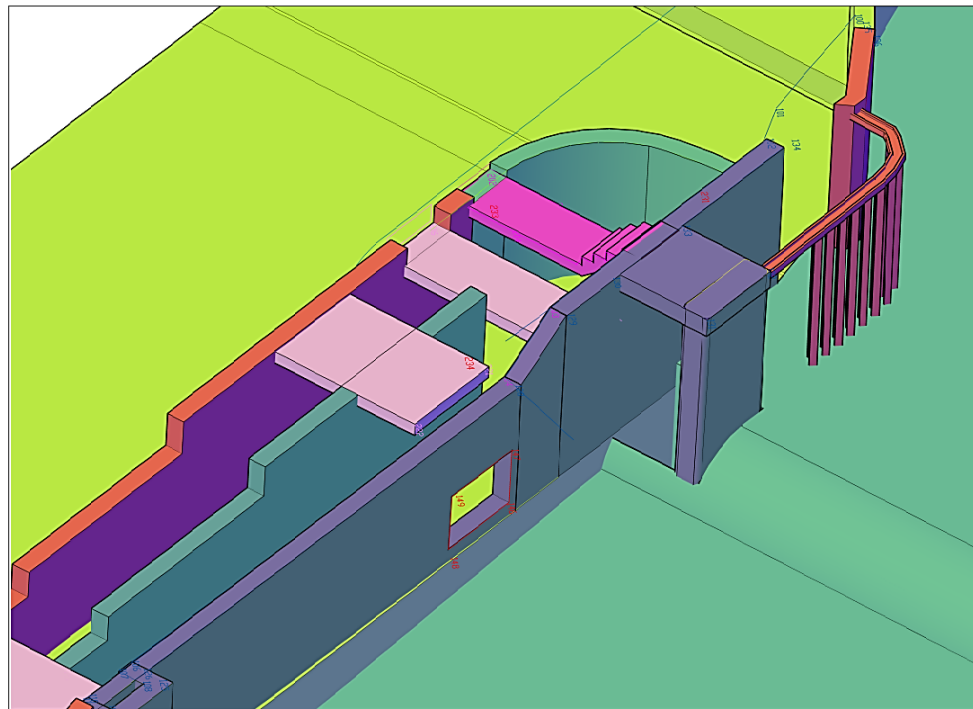


Figura 85: Isométrico de las estructuras que derivan el agua captada hacia la PTAP “El Milagro”.



Nota. Fuente: Adaptado de EPS SEDACAJ.

Figura 87: Isométrico de la captación “Río Porcón”.



DETALLE DE PERFIL METÁLICO TIPO I
ESC: 1/50

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

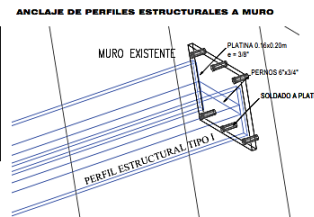
- 1.- CONCRETO SIMPLE
fc=210 kg/cm²
- 2.- VIGA METÁLICA DE PERFIL ESTRUCTURAL TIPO I
- 1 METRO ENTERRADO SOBRE BASE DE CONCRETO SIMPLE

NOTAS

1. Rehabilitación de barraje y zona de disipación de energía.
2. Cada perfil metálico será de 6m cada unidad.
3. Perfil metálico ira anclado al muro de la captación y al muro del puente. (Ver detalle)

METRADO

Perfil metálico 6m : 10 und



		P.S. Sedacaj S.A. <small>EMPRESA PRESTADORA DE SERVICIOS DE ABASTECIMIENTO DE CAJAMARCA Y DE INGENIERÍA DE ESTUDIOS</small>	
DIV. DE ESTUDIOS		PROYECTO: "RENOVACIÓN DE CAPTACIÓN DE AGUA, EN EL (BA) EPS SEDACAJ LA CAPTACIÓN DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DEL RÍO PORCÓN, DISTRITO DE CAJAMARCA, PROVINCIA CAJAMARCA, DEPARTAMENTO CAJAMARCA" CUI Nº2548351	
DIV. DE ESTUDIOS		PLANO: RB-01	
ESC: 1/50 FECHA: FEBRERO, 2022 LUGAR: CAJAMARCA	GER. INGENIERIA: APRIL GER. GENERAL:	RENOVACIÓN DE BARRAJE - CAPTACIÓN RÍO PORCÓN	TOTAL PLANOS: 07 DE 14

Nota.

Fuente: Adaptado de EPS SEDACAJ.

Anexo 2: Medición de morfología del río durante la descolmatación

El experimento se llevó a cabo durante seis días, y durante ese tiempo se fue midiendo las diferentes profundidades que alcanzaba el sedimento mientras se movía.

Tabla 26: Profundidad de sedimentos representada en metros del prototipo al segundo día.

Pto.	Ejes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.23	1.39	1.19	1.02	0.94	0.76	0.29	0.08	0.02	0
2	1.46	1.38	1.32	1.23	1.12	0.84	0.44	0.14	0.06	0.04
3	1.50	1.35	1.36	1.22	1.08	0.77	0.54	0.13	0.08	0.07
4	1.54	1.4	1.3	1.1	1.01	0.66	1.05	0.11	0.1	0.05
5	1.47	1.19	1.35	1.12	0.99	0.6	0.4	0.16	0.11	0.06
6	1.43	1.41	1.25	1.14	1.05	0.54	0.43	0.13	0.08	0.04
7	1.48	1.25	1.2	1.06	1.03	0.4	0.22	0.12	0.06	0.02
8	1.4	1.31	1.32	1.2	1.11	0.64	0.32	0.11	0.03	0.02
9	1.38	1.3	1.23						0.04	0.01
10	1.68									

- Distribución de ejes: Eje 1 a 2 m del barrage, Ejes 2-10 espaciados cada 6.75 m aguas arriba.
- Distribución de puntos: Cada 1.35 m transversalmente, con densidad variable según geometría del cauce.

Tabla 27: Profundidad de sedimentos representada en metros del prototipo al tercer día.

Pto.	Ejes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.97	1.02	0.84	0.7	0.63	0.5	0.19	0.06	0.01	0
2	1.18	1.08	0.99	0.88	0.82	0.68	0.44	0.09	0.04	0.02
3	1.20	1.05	1.01	0.87	0.79	0.62	0.52	0.08	0.05	0.04
4	1.25	1.11	0.99	0.81	0.76	0.53	1.05	0.08	0.06	0.04
5	1.19	0.96	1.01	0.82	0.74	0.48	0.27	0.1	0.07	0.04
6	1.16	1.1	0.96	0.84	0.78	0.45	0.28	0.08	0.05	0.02
7	1.2	0.99	0.92	0.78	0.76	0.27	0.14	0.08	0.04	0.02
8	1.08	0.98	1.06	0.92	0.88	0.42	0.21	0.07	0.02	0.01
9	1.04	0.94	0.86						0.02	0
10	1.32									

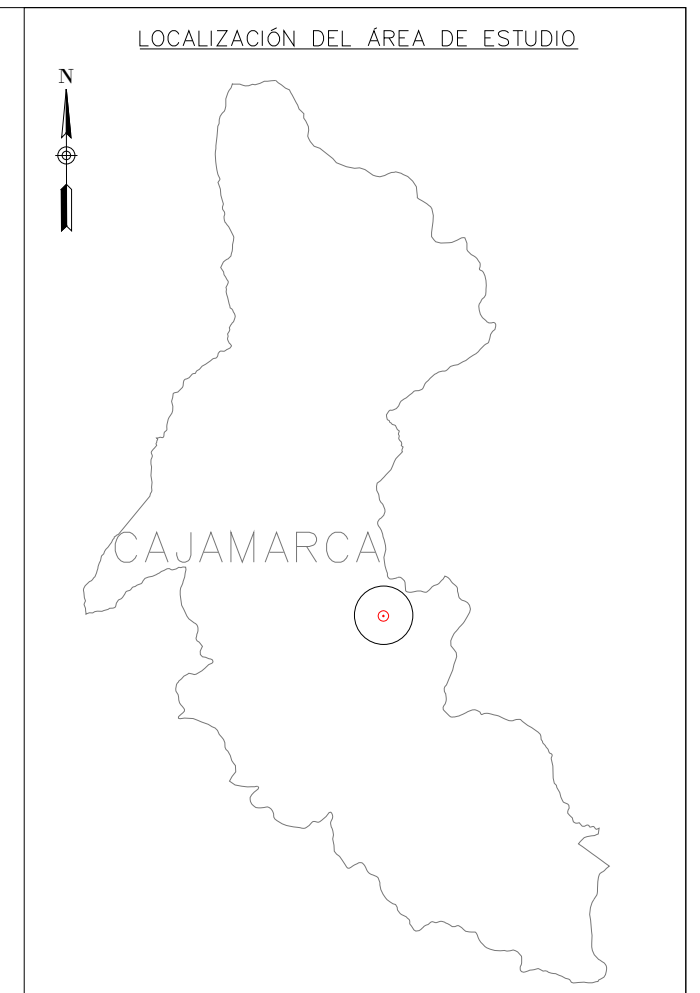
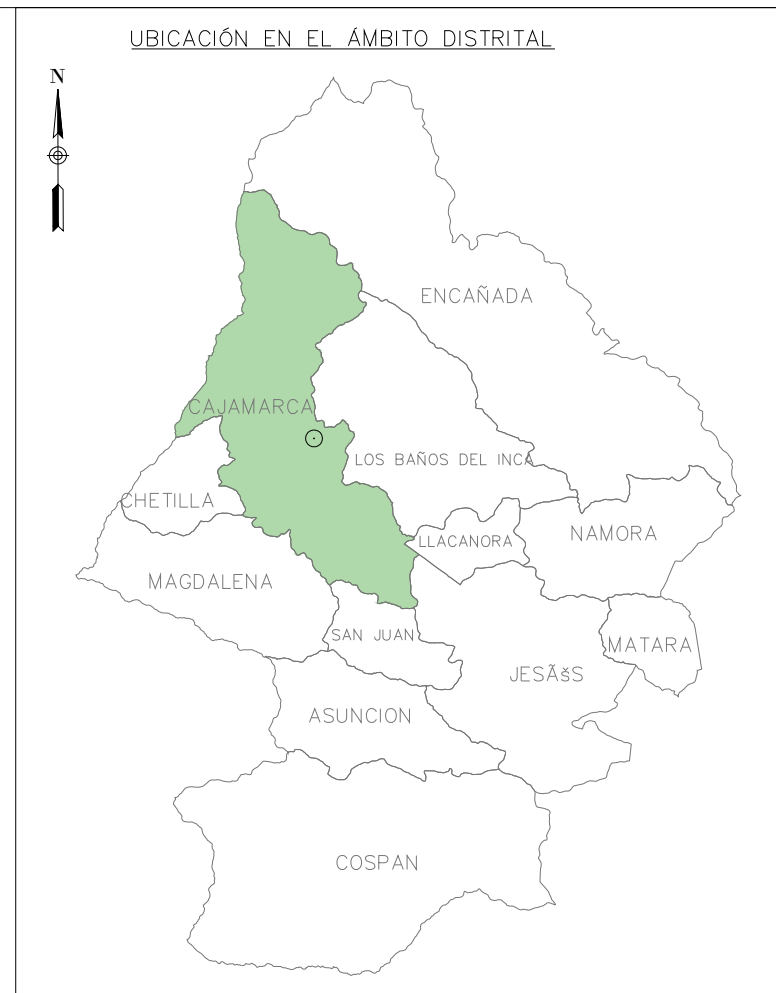
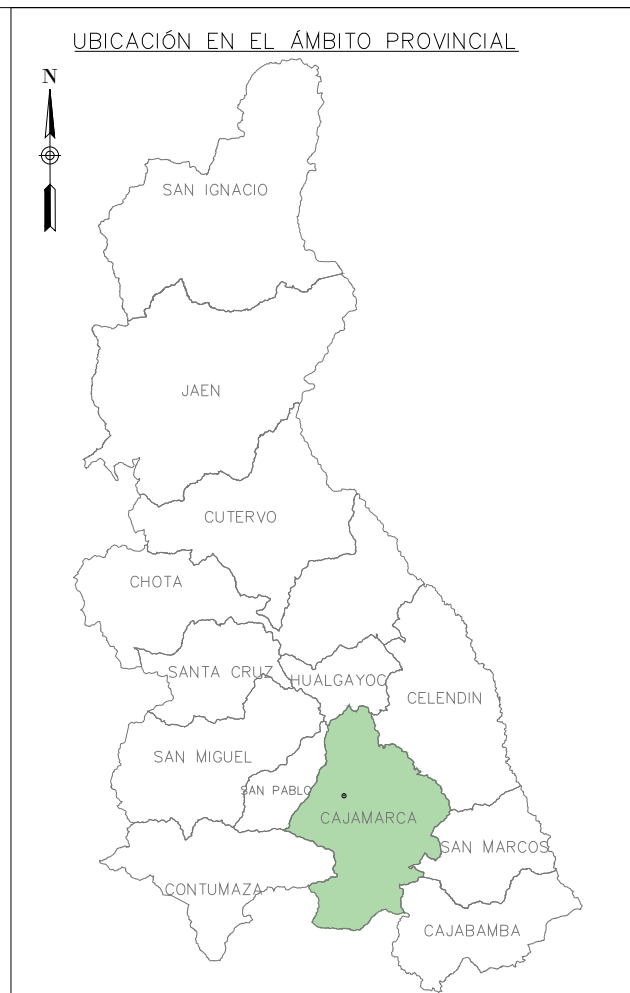
Tabla 28: Profundidad de sedimentos representada en metros del prototipo al cuarto día.

Pto.	Ejes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.7	0.66	0.5	0.37	0.32	0.25	0.09	0.03	0.01	0
2	0.89	0.77	0.66	0.54	0.52	0.52	0.44	0.04	0.02	0.01
3	0.89	0.75	0.66	0.52	0.5	0.47	0.51	0.04	0.02	0.02
4	0.95	0.82	0.68	0.52	0.52	0.4	1.05	0.04	0.03	0.02
5	0.91	0.72	0.68	0.51	0.49	0.36	0.14	0.05	0.04	0.02
6	0.9	0.8	0.66	0.53	0.52	0.37	0.14	0.04	0.02	0.01
7	0.91	0.74	0.63	0.49	0.5	0.14	0.07	0.04	0.02	0.01
8	0.77	0.64	0.79	0.65	0.65	0.21	0.1	0.04	0.01	0.01
9	0.71	0.59	0.48						0.01	0
10	0.96									

- Distribución de ejes: Eje 1 a 2 m del barrage, Ejes 2-10 espaciados cada 6.75 m aguas arriba.
- Distribución de puntos: Cada 1.35 m transversalmente, con densidad variable según geometría del cauce.

Anexo 3: Planos

1. PLANO DE UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO
2. PLANO TOPOGRÁFICO GENERAL
3. PLANO DE PERFILES DE SECCIONES AGUAS ARRIBA
4. PLANO DETALLADO DE ESTRUCTURAS DE CAPTACIÓN Y DERIVACIÓN DE AGUA DEL RÍO PORCÓN
5. PLANO PERFIL LONGITUDINAL PENDIENTES Sm Y Sa
6. PLANO DE MODELO FÍSICO



Punto	Este	Norte	Descripción
1	771183.500	9214136.481	Corona barrage "Río Pocón".
2	771027.200	9214148.432	Inicio del tramo estudiado.
3	771241.208	9214102.660	Fin del tramo estudiado.
4	771216.057	9214111.511	Corona barrage captación de Riego.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERÍA - E. A. P. de Ingeniería Hidráulica

TESIS:
 "DESCOLMATACIÓN INDUCIDA AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE, INCLUYENDO PARTE FUSIBLE DE LA CAPTACIÓN "RÍO PORCÓN", VARIACIÓN DEL ÁREA DEL BOCAL Y DE LA MORFOLOGÍA DEL RÍO PORCÓN - CAJAMARCA 2025"

FECHA
 Octubre - 2025

TEMA: PLANO DE UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

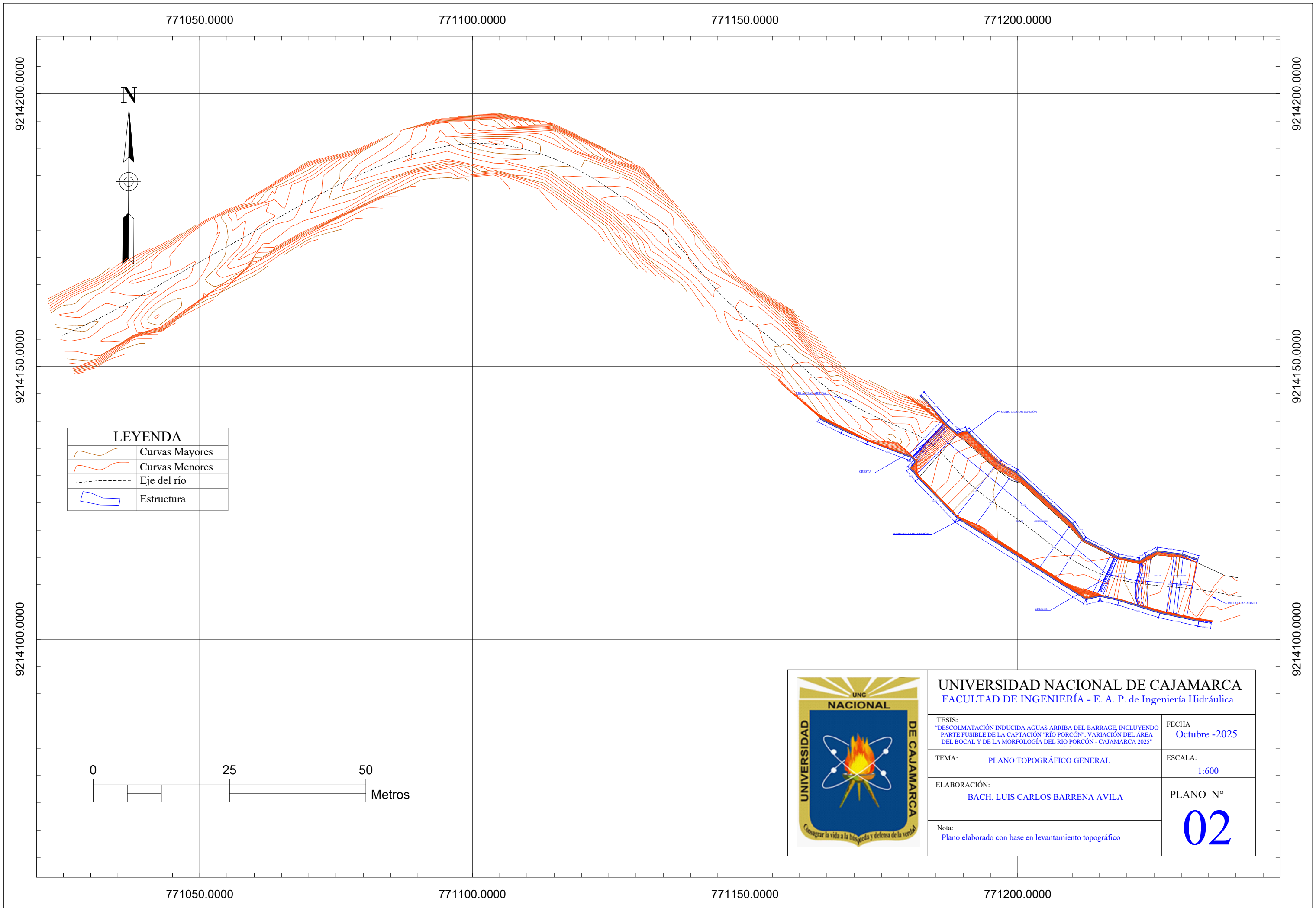
ESCALA:

ELABORACIÓN:
 BACH. LUIS CARLOS BARRENA AVILA

PLANO N°

Nota:
 Plano elaborado con mapas base de cartografía e imágenes satelitales

01



LEYENDA	
	Curvas Mayores
	Curvas Menores
	Eje del río
	Estructura



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERÍA - E. A. P. de Ingeniería Hidráulica

TESIS:
 "DESCOLMATACIÓN INDUCIDA AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE, INCLUYENDO PARTE FUSIBLE DE LA CAPTACIÓN "RÍO PORCÓN", VARIACIÓN DEL ÁREA DEL BOCAL Y DE LA MORFOLOGÍA DEL RÍO PORCÓN - CAJAMARCA 2025"

FECHA
 Octubre -2025

TEMA: PLANO TOPOGRÁFICO GENERAL

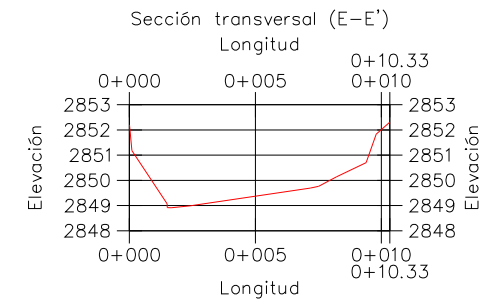
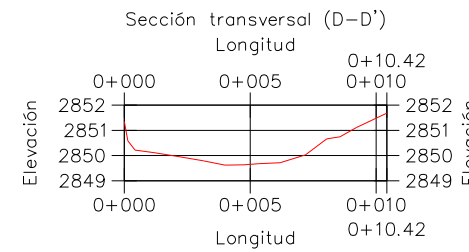
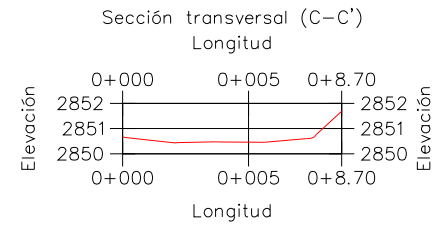
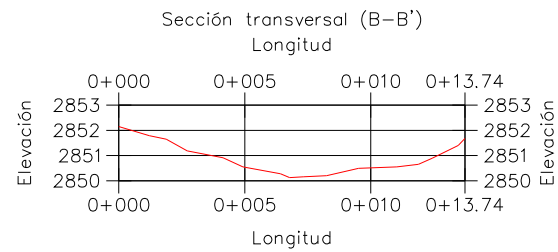
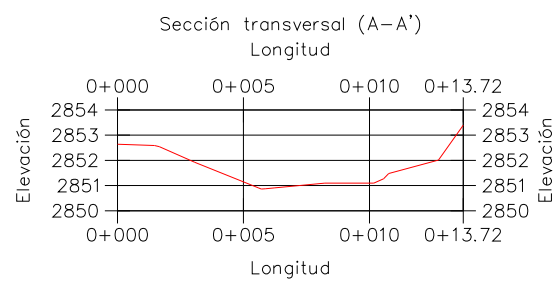
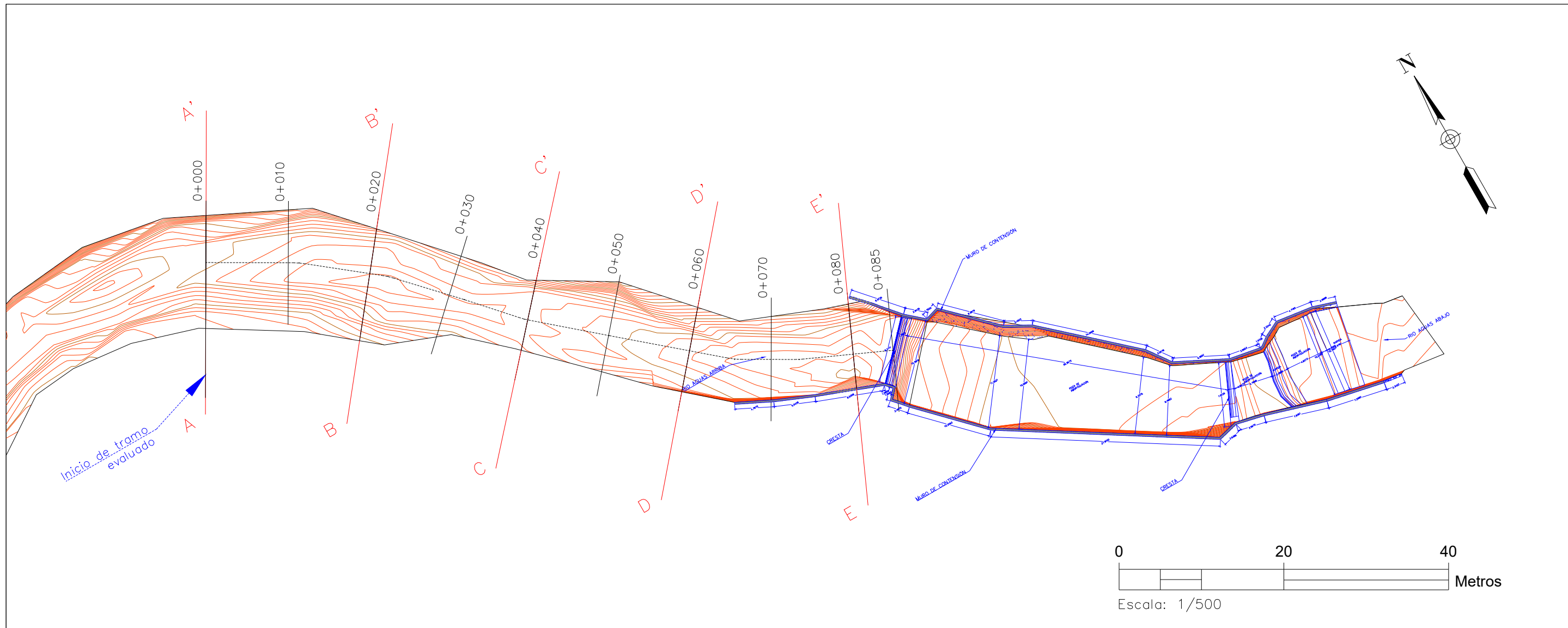
ESCALA:
 1:600

ELABORACIÓN:
 BACH. LUIS CARLOS BARRENA AVILA

PLANO N°

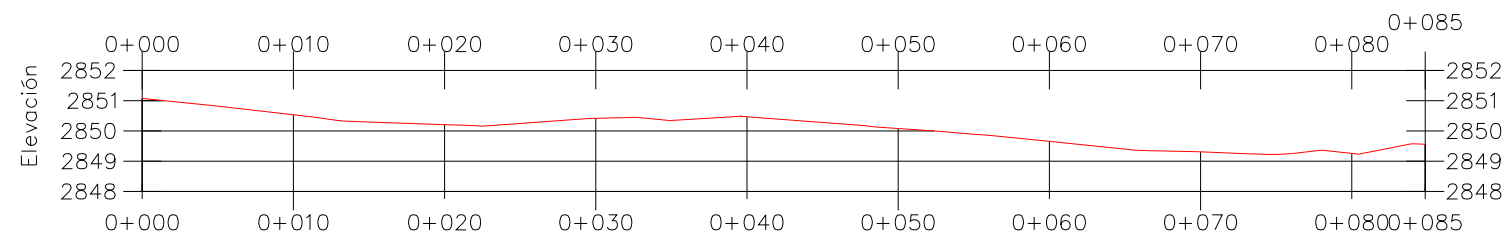
Nota:
 Plano elaborado con base en levantamiento topográfico

02



Escala: 1/300

PERFIL LONGITUDINAL DEL RÍO



NOTA: Exageración vertical = 2

Escala: 1/500



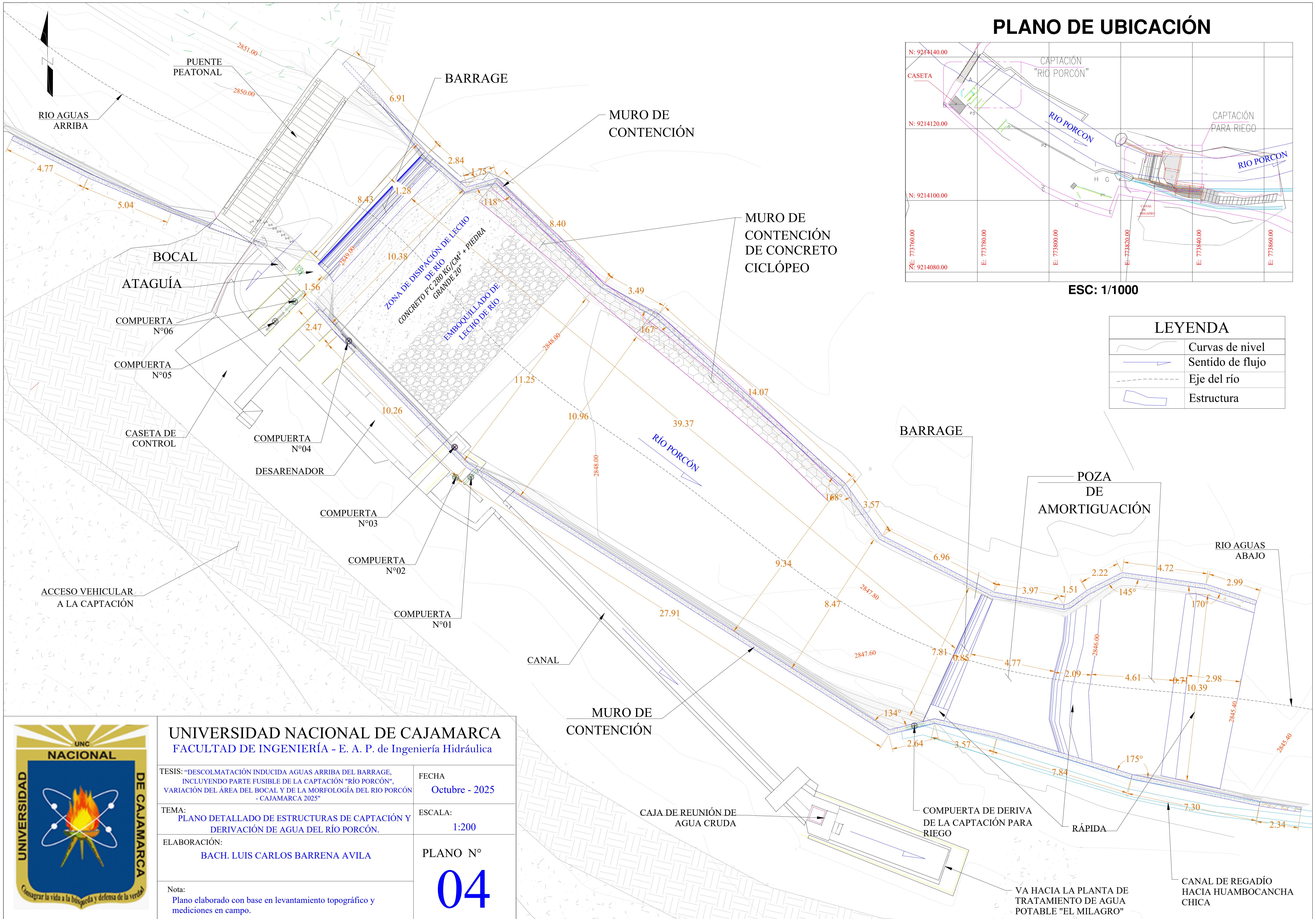
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA - E. A. P. de Ingeniería Hidráulica

TESIS: "DESCOLMATACIÓN INDUCIDA AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE, INCLUYENDO PARTE FUSIBLE DE LA CAPTACIÓN "RÍO PORCÓN", VARIACIÓN DEL ÁREA DEL BOCAL Y DE LA MORFOLOGÍA DEL RÍO PORCÓN - CAJAMARCA 2025"
FECHA: **Octubre -2025**

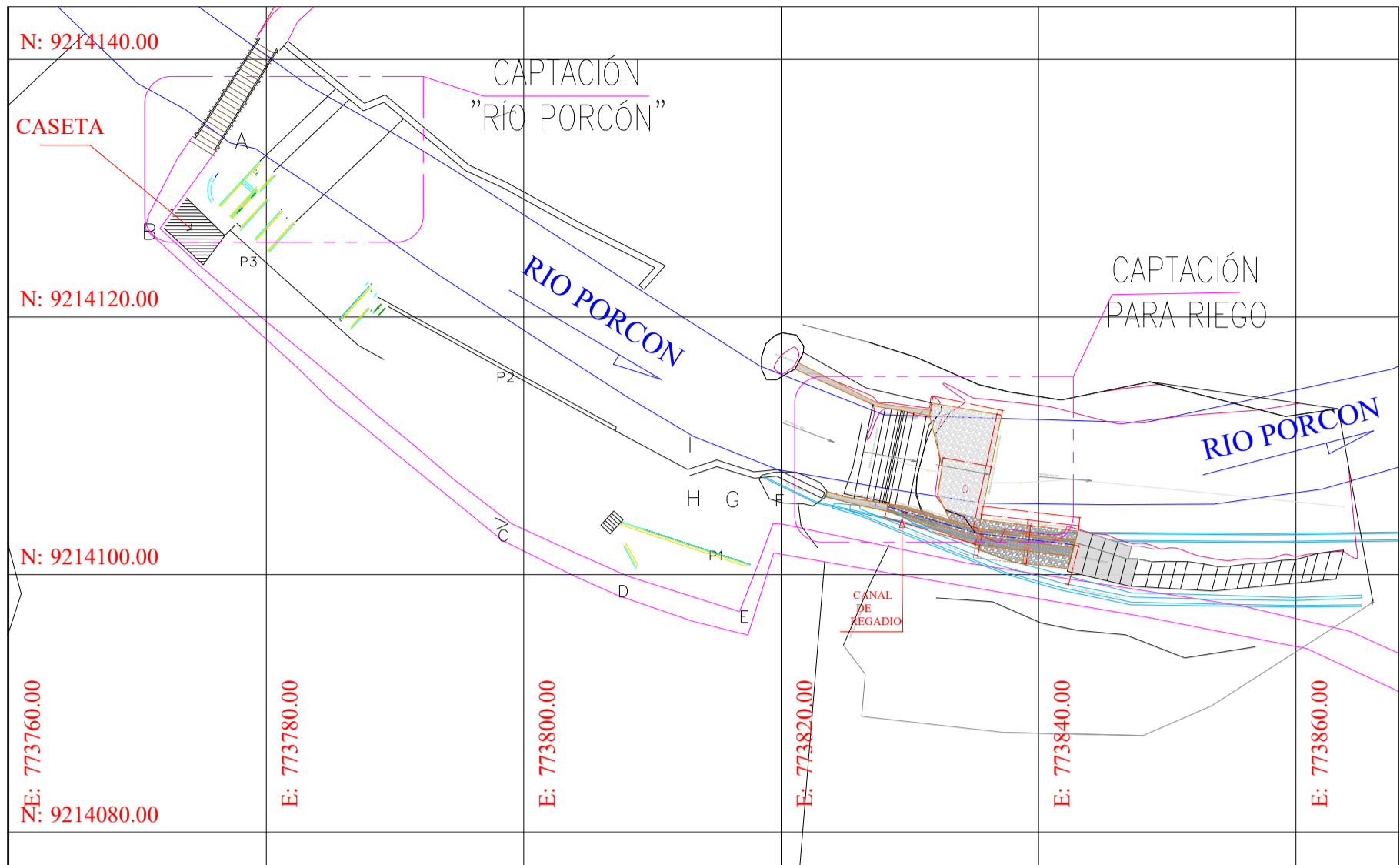
TEMA: **PLANO DE PERFIL LONGITUDINAL Y SECCIONES TRANSVERSALES**
ESCALA: **Indicada**

ELABORACIÓN: **BACH. LUIS CARLOS BARRENA AVILA**
PLANO N°

Nota: **Plano elaborado con base en levantamiento topográfico**
03



PLANO DE UBICACIÓN



ESC: 1/1000

LEYENDA	
	Curvas de nivel
	Sentido de flujo
	Eje del río
	Estructura



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA - E. A. P. de Ingeniería Hidráulica

TESIS: "DESCOLMATACIÓN INDUCIDA AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE, INCLUYENDO PARTE FUSIBLE DE LA CAPTACIÓN "RÍO PORCÓN", VARIACIÓN DEL ÁREA DEL BOCAL Y DE LA MORFOLOGÍA DEL RÍO PORCÓN - CAJAMARCA 2025"

TEMA: **PLANO DETALLADO DE ESTRUCTURAS DE CAPTACIÓN Y DERIVACIÓN DE AGUA DEL RÍO PORCÓN.**

ELABORACIÓN: **BACH. LUIS CARLOS BARRENA AVILA**

Nota: **Plano elaborado con base en levantamiento topográfico y mediciones en campo.**

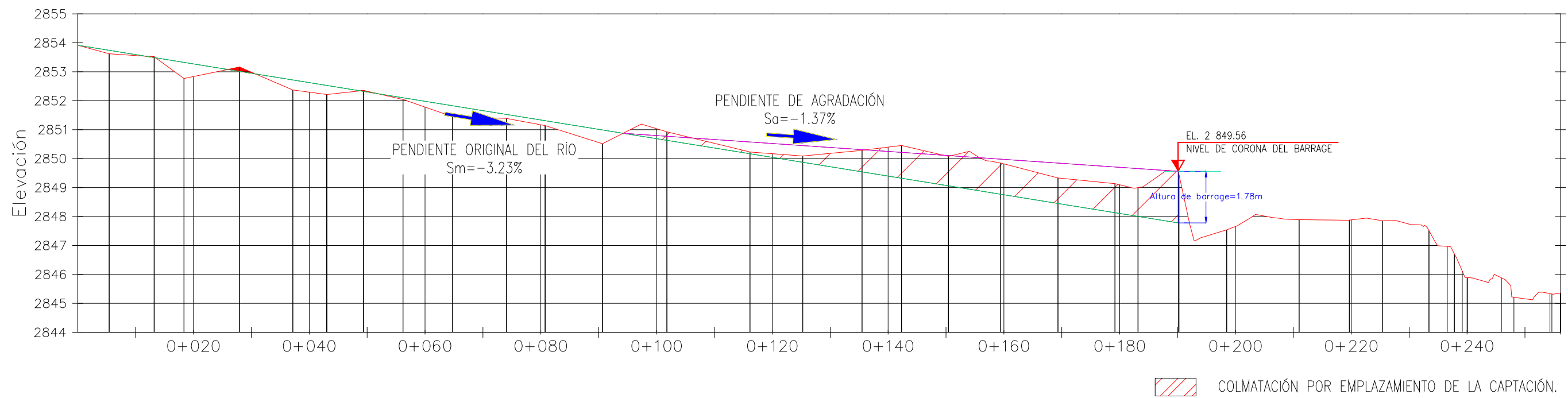
FECHA: **Octubre - 2025**

ESCALA: **1:200**

PLANO N° **04**

VA HACIA LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE "EL MILAGRO"

CANAL DE REGADÍO HACIA HUAMBOCANCHA CHICA



PERFIL LONGITUDINAL
ESC. 1:750



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA - E. A. P. de Ingeniería Hidráulica

TESIS:
"DESCOLMATACIÓN INDUCIDA AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE, INCLUYENDO PARTE FUSIBLE DE LA CAPTACIÓN "RÍO PORCÓN", VARIACIÓN DEL ÁREA DEL BOCAL Y DE LA MORFOLOGÍA DEL RÍO PORCÓN - CAJAMARCA 2025"

FECHA
Octubre -2025

TEMA:
PLANO DE PERFIL LONGITUDINAL

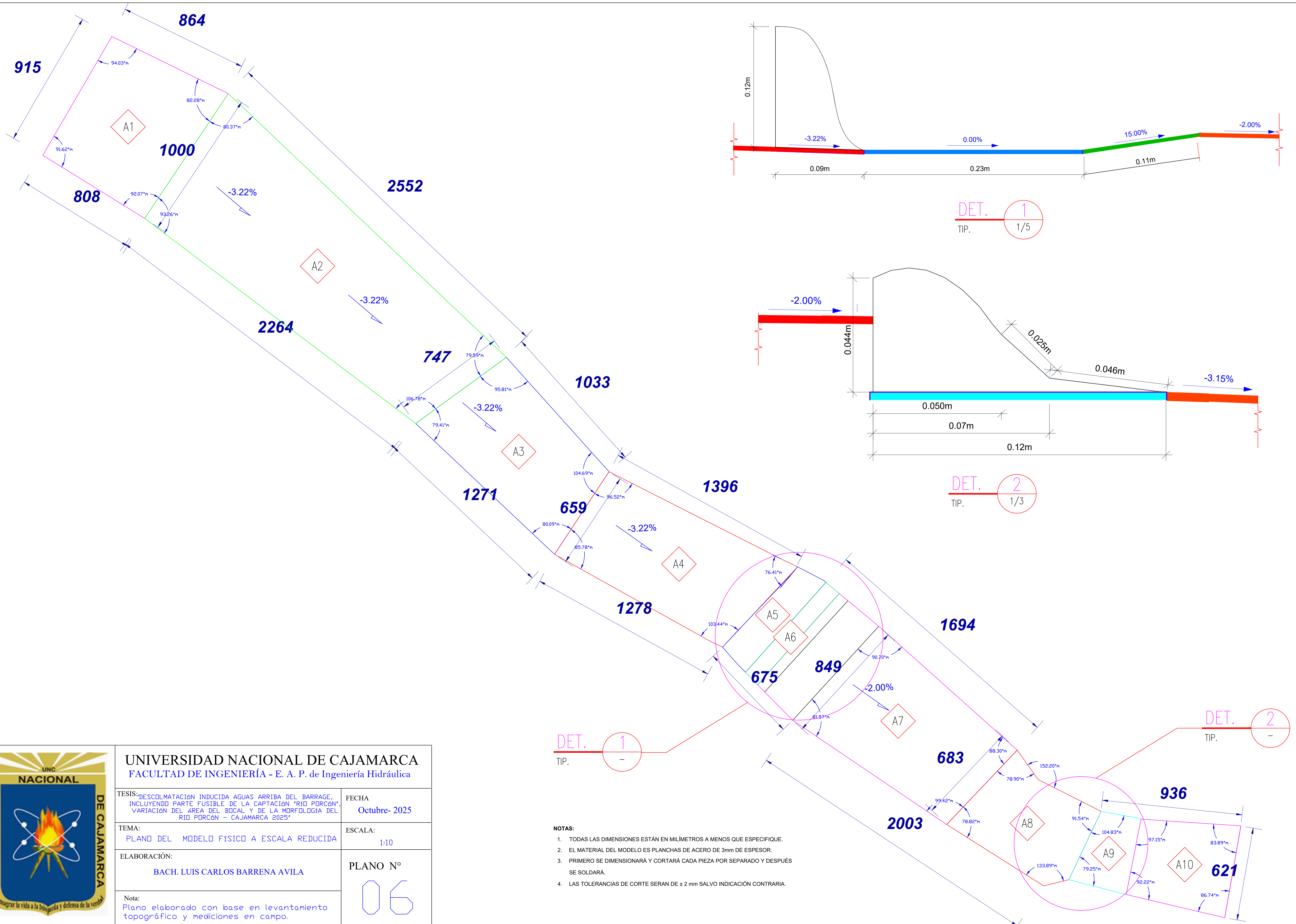
ESCALA:
INDICADA

ELABORACIÓN:
BACH. LUIS CARLOS BARRENA AVILA

PLANO N°

Nota:
Plano elaborado con base en levantamiento topográfico

05



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERÍA - E. A. P. de Ingeniería Hidráulica

TEMA: PLANO DEL MODELO FÍSICO A ESCALA REDUCIDA
 ELABORACIÓN: BACH. LUIS CARLOS BARRENA AVILA

FECHA: Octubre- 2025
 ESCALA: 1:10

PLANO N° 06

Nota:
 Plano elaborado con base en levantamiento topográfico y mediciones en campo.

DET. 1
 TIP. -

- NOTAS:**
1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILÍMETROS A MENOS QUE ESPECIFIQUE.
 2. EL MATERIAL DEL MODELO ES PLANCHAS DE ACERO DE 3mm DE ESPESOR.
 3. PRIMERO SE DIMENSIONARÁ Y CORTARÁ CADA PIEZA POR SEPARADO Y DESPUÉS SE SOLDARÁ.
 4. LAS TOLERANCIAS DE CORTE SERAN DE ± 2 mm SALVO INDICACIÓN CONTRARIA.

DET. 2
 TIP. -

