



Resumen

El estudio de los procesos de transporte de sedimento en suspensión para el Proyecto Hidroeléctrico HIDROSANBARTOLO, contempla básicamente, un análisis de las tasas de transporte de sedimento en suspensión esperadas, la determinación de los diámetros potenciales susceptibles de suspensión en el río, la variación de la concentración de sólidos suspendidos totales aguas arriba de la obra de captación y la caracterización del sedimento depositado en las distintas zonas. Las tasas de transporte esperadas fueron establecidas en base a un estudio de los diámetros potenciales susceptibles de suspensión, y en base a tasas de transporte medidas en campo. En ese sentido se estableció que las tasas esperadas oscilan entre 8407 – 44844 kg/s , con diámetros característicos de 1.3 a 5.2 mm para caudales que van de 50 a 800 m^3/s , respectivamente. Para establecer la variación de la concentración de sólidos suspendidos en el embalse del modelo se ha empleado una ecuación empírica que relaciona la concentración de sólidos suspendidos con la turbiedad. El estudio reveló que las concentraciones oscilan entre 0.138 a 0.478 kg/m^3 para caudales de 50 a 400 m^3/s , respectivamente. La caracterización del material depositado se realizó mediante ensayos por cribado y ensayos hidrométricos. Se observó que la granulometría a lo largo del lecho se presenta en forma escalonada, con un amplio rango de tamaños que van desde los limos (0.002 a 0.063 mm) hasta las gravas de tamaño medio (6 a 20 mm) y con velocidades de sedimentación que varían entre 0,00013 - 0,67 $\frac{m}{s}$.

Palabras clave: sedimento en suspensión, diámetros potenciales, variación de concentración, tasas de transporte.



Contenido

Agradecimiento	12
Dedicatoria	13
Resumen	1
Lista de Símbolos	14
Lista de figuras	4
Lista de Tablas	5
1 Introducción	16
1.1 Antecedentes	16
1.2 Justificación.....	17
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo General	17
1.3.2 Objetivos Específicos.....	18
1.4 Alcance	18
2 Marco Teórico	20
2.1 Generalidades.....	20
2.2 Propiedades físicas de los sedimentos.....	20
2.3 Velocidad de sedimentación de las partículas.....	21
2.4 Inicio del movimiento de los sedimentos en suspensión.....	21
2.5 Mecanismos de transporte y tasa de sedimentos en suspensión	23
2.5.1 Concentración de sedimentos en corrientes	24
2.5.2 Tipo de movimiento del sedimento y regiones de flujo en flujos cargados de sedimento...24	
2.5.3 Concentración y elevación de referencia	25
2.5.4 Tasa de transporte de sedimentos en suspensión.....	25
2.6 Capacidad de transporte de sedimentos	27
2.7 Modelos hidráulicos	28
2.7.1 Consideraciones teóricas	28
2.8 Turbiedad y sólidos suspendidos.....	32
2.8.1 Generalidades y definición	32
2.8.2 Medio diseminante	33
2.8.3 Relación entre turbiedad y sólidos suspendidos.....	35
2.9 Métodos para la medición de la turbiedad.....	36
2.9.1 Método 180.1 de la EPA.....	36
2.9.2 Método Estándar 2130B.....	37
3 Materiales y Métodos	38
3.1 Descripción del Proyecto Hidroeléctrico HIDROSANBARTOLO	38
3.2 Consideraciones hidrológicas para el modelo	39



3.3	Modelo Físico.....	39
3.3.1	Consideraciones generales.....	39
3.3.2	Dimensiones para el modelo	40
3.3.3	Implementación del modelo morfológico.....	41
3.3.4	Calibración del modelo	42
3.4	Procedimiento para el estudio de sólidos suspendidos.....	42
3.4.1	Escalamiento del sedimento	43
3.4.2	Escalamiento del hidrograma	43
3.4.3	Relación entre la concentración de sólidos suspendidos totales y turbiedad del flujo.....	45
3.4.4	Cálculo de las tasas de transporte de sedimento en suspensión para el río Negro	46
3.4.5	Ensayos en el modelo físico	48
3.4.6	Determinación de la concentración de sedimentos suspendidos totales en el embalse del modelo	49
3.4.7	Caracterización del material susceptible de sedimentación en el embalse del modelo	51
4	Resultados y Discusión.....	53
4.1	Tasas de transporte de sedimento en suspensión esperadas para el río Negro	53
4.2	Diámetros potenciales y tasas de transporte correspondientes para los caudales de interés....	58
4.3	Variación de la concentración de sólidos suspendidos en el embalse	64
4.3.1	Variación de la concentración aguas arriba de la obra proyectada	64
4.3.2	Variación de la concentración en la sección frente a la bocatoma	66
4.3.3	Variación de la concentración en la Zona P2.1.....	68
4.4	Caracterización del material sedimentado.....	71
5	Conclusiones y Recomendaciones.....	77
5.1	Conclusiones.....	77
5.2	Recomendaciones.....	80
	Referencias	81
	Apéndice	83
A	Criterios para movimiento de carga en suspensión	83
A.1	Criterios adoptados para el inicio del movimiento de carga en suspensión	83
A.2	Criterios descartados para el inicio del movimiento de carga en suspensión	83
B	Capacidad de transporte de sedimentos	84
C	Sensibilidad del modelo matemático de tasa de transporte de sedimento en suspensión	85
D	Caracterización de las muestras obtenidas en las zonas de sedimentación	87



Lista de figuras

<i>Figura 2.5.1: Movimiento de sedimento suspendido por procesos de convección y difusión (Chanson, 2004a)</i>	23
<i>Figura 2.5.2: Esquema para flujo cargado de sedimentos (Chanson, 2004a)</i>	24
<i>Figura 2.8.1: Diseminación de la luz (Arboleda Valencia, 2005)</i>	34
<i>Figura 2.8.2: Ángulo de máxima diseminación de la luz (Arboleda Valencia, 2005)</i>	35
<i>Figura 2.8.3: Relación entre turbiedad y sólidos suspendidos totales para diferentes suspensiones (Holliday et al., 2003)</i>	36
<i>Figura 3.1.1: Mapa de ubicación del proyecto hidroeléctrico HIDROSANBARTOLO</i>	39
<i>Figura 3.3.1: Infraestructura del Laboratorio de Dinámica de Fluidos PROMAS – Universidad de Cuenca</i>	40
<i>Figura 3.3.2: Configuración del cauce y lecho base del río Negro</i>	42
<i>Figura 3.4.1: Curva granulométrica del prototipo y del modelo</i>	43
<i>Figura 3.4.2: Hidrograma del río Negro para un periodo de retorno de 100 años – Prototipo</i>	44
<i>Figura 3.4.3: Hidrograma del río Negro para un periodo de retorno de 100 años – Modelo</i>	45
<i>Figura 3.4.4: Materiales y Equipos usados durante los ensayos de discriminación de material sedimentado en el modelo físico</i>	50
<i>Figura 3.4.5: Turbidímetro marca WTW, modelo Turb 555</i>	51
<i>Figura 3.4.6: Equipos para caracterizar el material sedimentado en el modelo</i>	52
<i>Figura 4.1.1: Distribución de concentración de sedimentos - $Q = 90 \text{ m}^3/\text{s}$</i>	55
<i>Figura 4.1.2: Distribución de concentración de sedimentos - $Q = 280 \text{ m}^3/\text{s}$</i>	56
<i>Figura 4.1.3: Tasas de transporte de sedimento en suspensión esperadas para el río Negro</i>	57
<i>Figura 4.1.4: Concentración de sedimentos suspendidos esperada para el río Negro</i>	57
<i>Figura 4.2.1: Diámetros potenciales de sedimento en suspensión para el río Negro</i>	59
<i>Figura 4.2.2: Tasas de transporte asociadas a los diámetros potenciales</i>	60
<i>Figura 4.2.3: Diámetros susceptibles a suspensión según los diferentes criterios</i>	61
<i>Figura 4.2.4: Curva granulométrica del material en suspensión analizado luego del muestreo convencional en el río Negro</i>	62
<i>Figura 4.3.1: Zonas de muestreo para zonificación de concentraciones en el embalse</i>	64
<i>Figura 4.3.2: Concentraciones en el embalse aguas arriba</i>	65
<i>Figura 4.3.3: Concentraciones frente a la bocatoma para el modelo</i>	68
<i>Figura 4.3.4: Flujo preferencial para caudales bajos</i>	69
<i>Figura 4.3.5: Variación de concentración en la zona P2.1 para los diferentes caudales</i>	70
<i>Figura 4.3.6: Cambio de las condiciones de flujo para la zona P2.1</i>	71
<i>Figura 4.4.1: Zonas de muestreo de material sedimentado en el embalse</i>	72
<i>Figura 4.4.2: Material sedimentado en el modelo</i>	73
<i>Figura 4.4.3: Material sedimentado en el margen derecho aguas arriba (Zona S4)</i>	75
<i>Figura A.1: Sensibilidad del modelo matemático con respecto al número de pasos</i>	85
<i>Figura D.1: Granulometría Zona S1 con VR</i>	87
<i>Figura D.2: Granulometría Zona S2 con VR</i>	88
<i>Figura D.3: Granulometría Zona S3 con VR</i>	89
<i>Figura D.4: Granulometría Zona S1 con VL</i>	90
<i>Figura D.5: Granulometría Zona S2 con VL</i>	91
<i>Figura D.6: Granulometría Zona S3 con VL</i>	92
<i>Figura D.7: Granulometría Zona S4</i>	93



Lista de Tablas

Tabla 2.6.1: Capacidad máxima de transporte (Chanson, 2002).....	28
Tabla 3.2.1: Caudales medios mensuales en los sitios de toma del aprovechamiento Copal – San Bartolo	39
Tabla 3.4.1: Cálculo de la curva granulométrica para el modelo.....	43
Tabla 3.4.2: Relación entre concentración de sólidos suspendidos y turbiedad para diferentes ríos (Pacheco, 2008).....	46
Tabla 4.1.1: Capacidad de transporte de sedimento en suspensión y concentraciones esperadas para el río Negro	53
Tabla 4.1.2: Tasas de transporte y concentración de sedimento en suspensión medida en el Río Negro.....	54
Tabla 4.2.1: Diámetros potenciales para el río Negro	58
Tabla 4.2.2: Análisis granulométrico del material en suspensión analizado luego del muestreo convencional en el río Negro	62
Tabla 4.2.3: Tasas máximas de transporte de sedimento en suspensión para el río Negro según el criterio de Julien (1995).....	62
Tabla 4.2.4: Diámetros característicos susceptibles de suspensión para el río Negro	63
Tabla 4.3.1: Concentraciones en los puntos P1, P2, P3, P4, y P5 del embalse	65
Tabla 4.3.2: Concentraciones frente a la bocatoma (puntos P1, P1.1, y P1.2).....	68
Tabla 4.3.3: Concentración en la Zona P2.1 del embalse.....	69
Tabla 4.4.1: Tiempos de vaciado para los ensayo	73
Tabla 4.4.2: Clasificación según la norma DIN 4020.....	74
Tabla 4.4.3: Resumen de las granulometrías realizadas en el modelo para las zonas S1, S2, S3.....	74
Tabla 4.4.4: Resumen de las granulometrías en el modelo (S1, S2, S3) escaladas para el prototipo.....	74
Tabla 4.4.5: Clasificación del material de la Zona S4 para el modelo y prototipo.....	76
Tabla A.1: Criterios para movimiento de carga en suspensión adoptados en el análisis de diámetros potenciales	83
Tabla A.2: Criterios para movimiento de carga en suspensión descartados en el análisis de	83
Tabla B.1: Correlaciones empíricas y semiempíricas de transporte total de sedimentos (Chanson, 2002)	84
Tabla D.1: Granulometría y velocidades de sedimentación para partículas de la Zona S1 (VR)	88
Tabla D.2: Granulometría y velocidades de sedimentación para partículas de la Zona S2 (VR)	89
Tabla D.3: Granulometría y velocidades de sedimentación para partículas de la Zona S3 (VR)	90
Tabla D.4: Granulometría y velocidades de sedimentación para partículas de la Zona S1 (VL).....	91
Tabla D.5: Granulometría y velocidades de sedimentación para partículas de la Zona S2 (VL).....	92
Tabla D.6: Granulometría y velocidades de sedimentación para partículas de la Zona S3 (VL).....	93
Tabla D.7: Granulometría y velocidades de sedimentación de partículas para la zona S4.....	94



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Juan Pablo Cabrera Zamora, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Juan Pablo Cabrera Zamora.
0104899562

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador

Autores: Juan Pablo Cabrera Zamora
César Augusto Montalvo Cedillo.



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Juan Pablo Cabrera Zamora, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Juan Pablo Cabrera Zamora
0104899562

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador

Autores: Juan Pablo Cabrera Zamora
César Augusto Montalvo Cedillo.



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, César Augusto Montalvo Cedillo, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

César Augusto Montalvo Cedillo.
0105295893

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316
e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103
Cuenca - Ecuador

Autores: Juan Pablo Cabrera Zamora
César Augusto Montalvo Cedillo.



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, César Augusto Montalvo Cedillo, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

César Augusto Montalvo Cedillo
0105295893

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador

Autores: Juan Pablo Cabrera Zamora
César Augusto Montalvo Cedillo.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil
Av. 12 de Abril s/n, Cuenca

Estudio de los procesos de transporte de sedimento en suspensión para el Proyecto de Generación Hidroeléctrica HIDRO-SANBARTOLO, mediante un modelo físico de lecho móvil

Director:
Ing. Esteban A. Pacheco Tobar, MSc.

Tesis previa a la obtención del
grado de Ingeniero Civil

Tutor:
Ing. Verónica Carrillo S.

Autores:
Juan Pablo Cabrera Zamora
César Augusto Montalvo Cedillo

Cuenca - Ecuador
Octubre 1, 2012

Autores: Juan Pablo Cabrera Zamora
César Augusto Montalvo Cedillo.



Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.

– Albert Einstein



Agradecimiento

Hacemos uso de la presente para expresar nuestros más sinceros agradecimientos al personal técnico y administrativo del Programa para el Manejo del Agua y el Suelo PROMAS – Universidad de Cuenca, de manera especial a nuestro Director Ing. MSc. Esteban Pacheco, a la Ing. Verónica Carrillo y al Ing. PhD. Felipe Cisneros por todo el apoyo brindado.

Juan Pablo Cabrera Zamora
Cesar Augusto Montalvo Cedillo,

Cuenca, Octubre 2012



Dedicatoria

A mi familia y amigos, de manera especial a mis padres Wilson Ramiro y Gloria Soledad por su ejemplo y apoyo incondicional y a mis hermanos Erika Leonor y Wilson Reinaldo por su confianza y afecto.

Juan Pablo Cabrera Zamora,
Cuenca, Octubre 2012

A mi familia y amigos por el apoyo incondicional.

César Augusto Montalvo Cedillo,
Cuenca. Octubre 2012



Lista de Símbolos

Símbolos Generales

Cd	Coeficiente de arrastre de la partícula
cs	Concentración local de sedimento
$(Cs)cl$	Concentración de sedimentos en la capa de carga de lecho
$(Cs)y = ys$	Concentración de sedimentos de referencia
Cu	Coeficiente de uniformidad
d	Calado del flujo
ds	Diámetro del sedimento
$d50$	Diámetro medio del sedimento
DH	Diámetro hidráulico
Ds	Difusividad del sedimento, o coeficiente de mezcla de sedimentos, o coeficiente de difusión de sedimentos
$D *$	Parámetro adimensional de la partícula
f	Factor de fricción de Darcy
Fr	Número de Froude
g	Aceleración de la gravedad, 9.81 m/s^2
I	Luz transmitida
Io	Luz incidente
ks	Altura de rugosidad equivalente
K	Constante de von Karman, $K = 0,4$
L	Espesor de la suspensión
q	Caudal por unidad de ancho
qs	Tasa de transporte de sedimento por unidad de ancho
$(qs)cl$	Tasa de transporte de carga de lecho por unidad de ancho
$(qs)s$	Tasa de transporte de carga en suspensión por unidad de ancho
s	Gravedad específica
T	Turbiedad de la suspensión
v	Velocidad local a una distancia y medida perpendicular al canal
V	Velocidad media del flujo
$Vmax$	Velocidad en la superficie libre
Vs	Velocidad promedio del sedimento en la capa de carga de lecho
$V *$	Velocidad de corte
$w\theta$	Velocidad de sedimentación de una partícula de sedimento
ys	Elevación de referencia
$(\delta s)cl$	Espesor de la capa de carga de lecho
θ	Pendiente del lecho
λ	Longitud de onda de luz
λl	Relación de escala de longitudes
λv	Relación de escala de velocidades
λa	Relación de escala de áreas
λq	Relación de escala de caudales



λt	Relación de escala de tiempo
μ	Viscosidad dinámica del fluido
ν	Viscosidad cinemática del fluido
ρ	Densidad del agua
ρ_s	Densidad de una partícula de sedimento
τ_0	Esfuerzo cortante del lecho
τ^*	Parámetro de Shields
$(\tau^*)_c$	Parámetro crítico de Shields

Acrónimos

EPA	Environmental Protection Agency
NTU	Unidades Nefelométricas de Turbiedad
PROMAS	Programa para el Manejo del Agua y del Suelo
TSS	Sólidos Suspendidos Totales
VL	Vaciado Lento
VR	Vaciado Rápido



Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

La creciente demanda de energía limpia en nuestro país ha generado que muchas entidades públicas y privadas apuesten por el desarrollo de proyectos hidroeléctricos en afán de solventar dicha necesidad. En este sentido el Proyecto Hidroeléctrico HIDROSANBARTOLO en la provincia de Morona Santiago pretende generar 92 MW, y con el interés de optimizar el diseño preestablecido de la obra de captación han optado por implementar un modelo hidráulico el cual se encuentra a cargo del Programa para el Manejo del Agua y del Suelo - PROMAS. Dicho modelo, entre otras situaciones, permitirá estudiar los procesos de transporte de sedimentos en suspensión, tema que es de considerable interés teniendo presente que el río Negro sobre el cual se emplazará la obra tiene una gran capacidad de arrastre de sedimentos que tienen características físicas importantes (tamaño y dureza, principalmente) que pueden afectar ciertos elementos clave del proyecto.

El cambio en las condiciones de flujo al realizar el embalse ocasiona una discontinuidad en el gradiente longitudinal y en los procesos naturales del río, esto da como resultado una retención neta de materiales en forma de sedimentos, ocasionando la colmatación. Es entonces cuando toman importancia temas como el estudio del transporte de sedimentos en suspensión, zonas de depósito de material en el embalse, características del material sedimentado, así como las tasas de material en suspensión que son captadas por la obra, todos estos aspectos son de gran interés en el diseño y optimización de los componentes del proyecto.

Morfológicamente el tramo de río considerado para el estudio presenta un descenso de la pendiente longitudinal, se ha identificado al tramo en una transición de curso superior (zona de erosión) a curso inferior (zona de sedimentación)¹, situación que es característica en los ríos de montaña. En cuanto al emplazamiento mismo de la estructura de captación (según los diseños preestablecidos), se observa que este no es el más favorable desde el punto de vista hidráulico y de flujo, esto obedece a criterios topográficos y geológicos principalmente con los cuales se ha establecido su ubicación. Como se observa en la Figura 4.3.1, está previsto ubicar la captación en una zona cóncava del margen derecho del río Negro, por lo tanto, el emplazamiento previsto que se tiene para la obra, compromete aspectos relacionados con arrastre de sedimentos, erosión, distribución de concentraciones de sedimento, lavado del sedimento, disipación de energía, entre otros.

¹ Aguas arriba de donde se proyecta la obra la pendiente crece, en tanto que hacia aguas abajo se identifican zonas de muy baja pendiente.



La litología de la zona presenta esquistos cuarcíticos de color blanquecino, esquistos cericíticos, y en menor porción esquistos grafitosos y micáceos, razón por la cual son importantes aspectos relacionados con el desgaste de las obras de conducción y de manera especial de las turbinas debido a la característica abrasiva de los sedimentos, principalmente los cuarcíferos, que según estudios previos toman importancia para diámetros del orden de 0,3 *mm*.

A pesar de los refinados modelos numéricos disponibles para resolver problemas hidráulicos, las entidades en cuestión han acordado realizar los estudios de optimización mediante un modelo físico de lecho móvil, basados en que los modelos físicos son una herramienta poderosa cuando se trata de evaluar aspectos de diseño que la literatura clásica no alcanza a predecir. La ventaja de estos modelos, entre otras, es que permiten la visualización en tres dimensiones del flujo, lo cual proporciona valiosa información para la optimización de los diseños preestablecidos y para identificación de aspectos relacionados.

1.2 Justificación

Considerando los aspectos descritos anteriormente para el Proyecto Hidroeléctrico HIDROSANBARTOLO, principalmente los que se refieren a: i) Ubicación en planta elegida para el emplazamiento de la obra de captación, que no es la más adecuada para este tipo de obras, ii) Litología de la zona prevista para el emplazamiento, que comprenden sedimentos cuarcíticos de gran abrasividad, entre otros, y iii) Ubicación morfológica para el emplazamiento, que se ha identificado como un tramo de transición de zona de erosión a zona de sedimentación; se hace importante efectuar un análisis completo de sedimentos en suspensión para la obra de captación del proyecto hidroeléctrico en cuestión. Se considera que con un modelo hidráulico de lecho móvil se logra apreciar de mejor manera aspectos de gran interés como las líneas de corriente, las zonas de aquietamiento y sedimentación para las diferentes condiciones de operación de la obra, así como las características del material susceptible de sedimentación. Además, con el modelo se ha logrado obtener datos importantes como velocidades en las zonas de flujo con el fin de evaluar condiciones de suspensión y ubicar con exactitud las zonas de sedimentación y las zonas de mayor concentración de sedimentos suspendidos, el modelo además ha permitido la caracterización del material sedimentado, proporcionando datos que escalados dan pautas para la optimización de los diseño de la obra y para la identificación de medidas de mitigación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Aportar en el aprendizaje de los procesos relacionados al transporte de sedimentos en suspensión en corrientes naturales así como en la variación de la concentración de sólidos suspendidos totales en embalses, mediante estudios en modelo físico de lecho móvil



1.3.2 Objetivos Específicos

- Revisar la literatura técnica para identificación de las variables y procesos que intervienen en el transporte de sedimento en suspensión
- Realizar un estudio para determinación de las tasas teóricas de transporte de sedimento en suspensión para el río Negro y modelo físico
- Realizar un estudio en modelo de lecho móvil para analizar los procesos de transporte de sedimento en suspensión

1.4 Alcance

El estudio del transporte de sedimentos en suspensión para el proyecto Hidroeléctrico HIDROSANBARTOLO abarca tres temas fundamentales, el primero contempla un análisis teórico de los diámetros y tasas potenciales esperadas para el río Negro en su estado natural. La teoría existente para este análisis no abarca todas las variables que influyen en el proceso, de modo que ha sido necesario realizar ciertas suposiciones y simplificaciones, las que se deben tener presente el momento de interpretar los resultados. En general las ecuaciones de transporte de sedimento en suspensión usadas en este trabajo, dan predicciones razonables teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Canal prismático con sección relativamente ancha.
- Flujo uniforme sin corrientes secundarias.
- Lecho plano (sin formas de fondo como ondas, dunas, etc.)
- La pendiente longitudinal del canal debe ser pequeña.
- En el cálculo de las tasas se considera una granulometría relativamente uniforme, una distribución extensa de tamaños de partículas puede afectar el inicio de transporte de sedimentos por el fenómeno de acomodamiento de las partículas.
- Se considera un lecho infinito de material susceptible de ser suspendido, esta disponibilidad de sedimento implica que las tasas obtenidas serán las máximas que se podrán presentar para una determinada condición de flujo.

Estas suposiciones no se cumplen con exactitud en el cauce natural, por lo que el análisis teórico servirá únicamente como una guía, que será complementada con mediciones en campo.

La segunda parte del estudio comprende el análisis de concentraciones en distintos puntos del embalse en el modelo físico, para ello se ha empleado una ecuación netamente empírica (ver la Sección 3.4.3) que relaciona la concentración de sólidos suspendidos con la turbiedad. Como se explica en la Sección 2.8 la medición de la turbiedad depende de varios factores, por lo que en ocasiones esta no aproximará de manera correcta la cantidad de sólidos presentes. En el estudio se toman en cuenta solo las concentraciones que presenten variaciones significativas. En el embalse del modelo físico el flujo no es uniforme en las secciones transversales, existen zonas con



altas velocidades, zonas con velocidades casi nulas, y zonas donde el flujo es rotacional; tomando en cuenta esto, y considerando que las muestras son puntuales, no se puede transformar las concentraciones a tasas de transporte en suspensión como se hace regularmente, sino que el análisis se limita únicamente a la variación de la concentración en diferentes puntos del embalse.

La tercera parte del estudio comprende la caracterización del material sedimentado, para obtener las muestras se requiere el vaciado total del embalse lo cual provoca un lavado de material que sin duda afecta los resultados. Por esta razón se realizaron dos ensayos para caracterizar el material del embalse, uno luego de un vaciado lento y otro luego de un vaciado rápido. La muestra obtenida corresponde a material de transporte de fondo así como también de suspensión (sedimentable), para la caracterización no se hizo distinción entre estos dos.



Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Generalidades

En este capítulo se estudian los conceptos básicos en relación al transporte de sedimentos en canales abiertos, así como la teoría sobre turbiedad y su relación con los sólidos suspendidos. En primera instancia se resumen las propiedades físicas más importantes de las partículas de sedimentos y luego se hace énfasis en la velocidad de sedimentación de las mismas (Ley de Stokes). Seguidamente se establece el criterio para el inicio del movimiento de sedimentos en suspensión, el cual básicamente expresa que el movimiento inicia cuando la relación entre la velocidad de corte y la velocidad de sedimentación supera un valor crítico. Además, se presentan los mecanismos de transporte de sedimentos en suspensión junto con la tasa de transporte de sedimentos y la capacidad máxima de transporte, la cual se define como la suma de las tasas de carga de lecho, suspensión y lavado. Adicionalmente, se presenta la teoría referente a la turbiedad como su origen y definición y su relación con la concentración de sólidos suspendidos totales. Con respecto a los modelos físicos hidráulicos, se presentan las consideraciones teóricas generales junto con los criterios de semejanza con respecto al transporte de sedimentos en suspensión.

2.2 Propiedades físicas de los sedimentos

Las propiedades físicas más importantes de los sedimentos (no cohesivos) como partículas individuales son: la densidad, la gravedad específica y el tamaño del mismo. Estas propiedades influyen de manera directa en el cálculo de las tasas de transporte de sedimentos, por lo que una adecuada estimación de estos parámetros es de vital importancia. La densidad de una partícula de sedimento se define como la masa por unidad de volumen $\rho_s = \text{masa/volumen (kg/m}^3\text{)}$ y la gravedad específica como la relación entre la densidad de la partícula y la densidad del fluido $s = \rho_s/\rho$. El tamaño del sedimento d_s hace referencia al tamaño característico o diámetro de las partículas, sin embargo, debido a que los sedimentos naturales tienen forma irregular, existen varios tamaños de sedimentos, por ejemplo, diámetro del tamiz, diámetro de sedimentación, diámetro nominal, etc., aunque generalmente se emplea $d_s = d_{50}$ ². Este tema se halla ampliamente desarrollado en las siguientes referencias (van Rijn, 1993; Rocha Felices, 1998; Julien, 2002; Vanoni, 2002).

² Tamaño para el cual el 50% por peso del material es más fino.



2.3 Velocidad de sedimentación de las partículas

La teoría de sedimentación de partículas únicas esféricas en fluidos en reposo (Ley de Stokes) indica que:

$$w_o = - \sqrt{\frac{4gd_s}{3C_d}}(s - 1) \quad (2.1)$$

donde w_o es la velocidad de sedimentación de una partícula esférica en un fluido en reposo, g es la aceleración de la gravedad, d_s es el diámetro de la partícula, C_d es el coeficiente de arrastre y s es la gravedad específica.

El análisis dimensional indica que C_d es función del número de Reynolds de la partícula ($Re_s = \rho w_o d_s / \mu$) y de la forma de la partícula; para números de Reynolds bajos ($Re_s < 1$), el flujo alrededor de la partícula es laminar y $Cd = 24/Re_s$, y para números de Reynolds altos ($Re > 1000$), el flujo alrededor de la partícula es turbulento y C_d es casi constante ($C_d \approx 0,5$).

Sin embargo, para el caso de canales naturales, esta teoría no puede aplicarse en forma directa debido a que dicha velocidad es afectada por la turbulencia del flujo y por la interacción entre las partículas de sedimento, además, las partículas de sedimentos que arrastran los ríos son de forma irregular (con frecuencia angular o en forma de disco) y el coeficiente de arrastre es diferente al de las partículas esféricas. Para arenas y gravas, una aproximación del coeficiente de arrastre es:

$$C_d = \frac{24\mu}{\rho |w_o| d_s} + 1.5 \quad Re_s < 1 \times 10^4 \quad (2.2)$$

Al combinar las ecuaciones (2.1) y (2.2), una aproximación de la velocidad de sedimentación (velocidad terminal) de la partícula de sedimento es:

$$w_o = - \sqrt{\frac{4gd_s}{3 \left(\frac{24\mu}{\rho |w_o| d_s} + 1.5 \right)}}(s - 1) \quad (2.3)$$

donde $|w_o|$ es el valor absoluto de velocidad de sedimentación de la partícula, ρ y μ , son la densidad y la viscosidad dinámica del fluido, respectivamente (Chanson, 2002).

2.4 Inicio del movimiento de los sedimentos en suspensión

Aunque el inicio del movimiento de los sedimentos en suspensión es una condición aun no definida con claridad, se asume que este ocurre a medida que se incrementa el esfuerzo cortante del lecho τ_o (o la velocidad de corte V_c), en otras palabras, a medida



que el número de partículas que rebotan y chocan se incrementa a tal punto que son transportados mediante suspensión.

De manera análoga que en el caso del inicio del movimiento de la carga de lecho, ver las referencias (Martín Vide, 2003; Chanson, 2002), el criterio para el inicio de la suspensión es que la relación entre la velocidad de corte y la velocidad de caída de la partícula sea mayor que un valor crítico³:

$$\frac{V_*}{w_o} > \text{valor crítico} \quad (2.4)$$

donde w_o es la velocidad de caída de la partícula y V_* es la velocidad de corte, la cual se define de la siguiente manera:

$$V_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \quad (2.5)$$

donde τ_o es el esfuerzo cortante medio en el lecho y ρ es la densidad del fluido. Para el caso de flujo uniforme en equilibrio en un canal abierto, la velocidad de corte es igual a:

$$V_* = \sqrt{g \frac{D_H}{4} \sin \theta} \quad (2.6)$$

donde D_H es el diámetro hidráulico y θ es la pendiente del lecho. Para el caso de un canal abierto ancho, en el cual $D_H \approx 4d$, la velocidad de corte se convierte en:

$$V_* = \sqrt{gd \sin \theta} \quad (2.7)$$

Como una primera aproximación, se establece que la suspensión ocurre para:

$$\frac{V_*}{w_o} > 0.2 \text{ a } 2$$

En la generalidad de los casos se usa principalmente el criterio dado por Bagnold (1966) para establecer el inicio de la carga en suspensión, dicho criterio indica que:

$$\frac{V_*}{w_o} > 1 \quad (2.8)$$

Sin embargo, en el presente trabajo se han considerado además otros criterios para el inicio de la suspensión, los cuales se presentan en Apéndice A extraídos de la referencia (Chanson, 2002). El tema de inicio del movimiento del sedimento en

³ Este criterio no tiene en cuenta el efecto de la pendiente del lecho.

suspensión puede ampliarse en las referencias (van Rijn, 2007a, 1993; Martín Vide, 2003; Chanson, 2002).

2.5 Mecanismos de transporte y tasa de sedimentos en suspensión

El transporte de sedimentos en suspensión ocurre por una combinación de dos fenómenos: la *difusión* turbulenta y advectiva y la *convección*. La *difusión advectiva* produce un movimiento aleatorio y de mezcla de partículas a través de toda la profundidad del agua por encima del movimiento longitudinal del flujo (Figura 2.5.1b), mientras que el transporte por *convección* puede definirse como el entrapamiento de sedimentos por vórtices de escala muy grande, por ejemplo, en caídas del lecho, tanques de amortiguación y en resaltos hidráulicos (Figura 2.5.1a) (Chanson, 2002). Cuando las partículas de sedimento son más pesadas que el agua, la concentración de sedimentos es mayor cerca del lecho y la *difusión turbulenta* produce un movimiento de partículas hacia zonas de menor concentración. Un balance promedio en el tiempo entre los flujos de asentamientos y difusivos se deduce de la ecuación de la continuidad para la materia de sedimentos⁴:

$$D_s \frac{dc_s}{dy} = -w_o c_s \quad (2.9)$$

donde c_s es la concentración local de sedimentos a una distancia y medida perpendicular al lecho del canal, D_s es la difusividad del sedimento (o coeficiente de mezcla de sedimentos, o coeficiente de difusión de sedimentos), y w_o es la velocidad de asentamiento de la partícula. Los temas relacionados con la mezcla turbulenta y la difusión en ríos pueden ampliarse en las referencias (Chanson, 2004b; French, 1988).

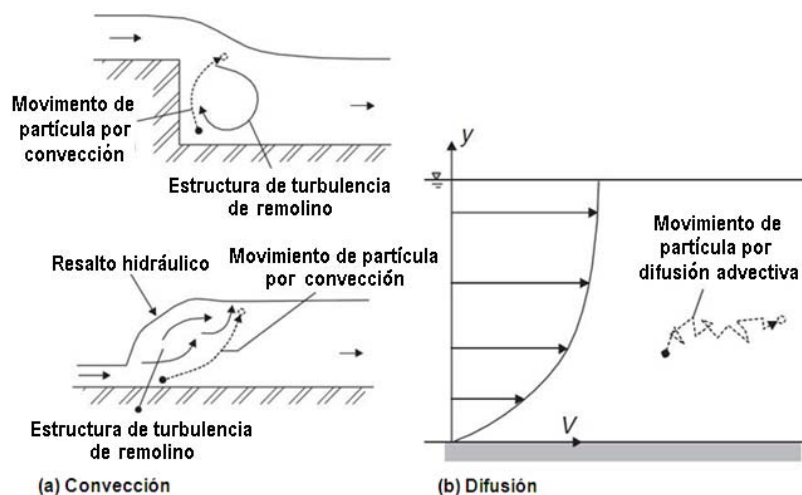


Figura 2.5.1: Movimiento de sedimento suspendido por procesos de convección y difusión (Chanson, 2004a)

⁴ La ecuación 2.9 se deduce de la Ley de Fick, y es válida cuando la difusión turbulenta balancea exactamente el movimiento de partículas que se sedimentan (es decir, es válida en equilibrio).

2.5.1 Concentración de sedimentos en corrientes

En corrientes naturales la difusividad de sedimentos puede suponerse semejante al coeficiente de difusión turbulento (es decir, viscosidad de remolino). La viscosidad de remolino y por consiguiente la difusividad de sedimentos puede entonces expresarse como:

$$D_s \approx KV_* (d - y) \frac{y}{d} \quad (2.10)$$

donde d es la profundidad del flujo, V_* es la velocidad de corte y K es la constante de von Karman ($K = 0,4$). Integrando la ecuación (2.9) combinada con la ecuación (2.10) (ley de difusividad parabólica) se obtiene la distribución de la concentración de sedimentos a través de la profundidad del flujo:

$$c_s = (C_s)_{y=y_s} \left(\frac{\frac{d}{y_s} - 1}{\frac{d}{y} - 1} \right)^{w_{0s}/(KV_*^2)} \quad (2.11)$$

donde $(C_s)_{y=y_s}$ es la concentración de sedimentos de referencia en el sitio de referencia ($y = y_s$). La ecuación (2.11) debe usarse para $y > y_s$, ya que muy cerca del lecho predice una concentración infinita (Chanson, 2002).

2.5.2 Tipo de movimiento del sedimento y regiones de flujo en flujos cargados de sedimento

En un flujo cargado de sedimentos se presentan dos regiones claramente definidas: **(1)** la capa de carga de lecho que ocurre cuando $\tau_* > (\tau_*)_c$, donde τ_* es el parámetro de Shields y $(\tau_*)_c$ es el parámetro crítico de Shields; y **(2)** la capa de carga en suspensión que ocurre cuando $V_* / w_o > 0.2$ a 2 (Figura 2.5.2). El tipo de movimiento de sedimento (arrastre de fondo o suspensión) depende de las propiedades del mismo, de la pendiente del lecho y de las condiciones del flujo.

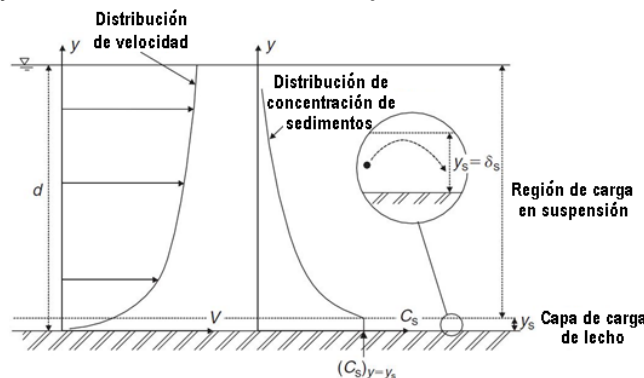


Figura 2.5.2: Esquema para flujo cargado de sedimentos (Chanson, 2004a)



2.5.3 Concentración y elevación de referencia

Una correcta predicción de la distribución de concentración de sedimentos depende de la selección de la concentración de referencia $(C_s)_{y=y_s}$ y de la elevación de referencia y_s . Debido a que muy cerca del lecho el movimiento del sedimento ocurre en la capa de carga de lecho, una selección razonable de y_s es el espesor de dicha capa, y por tanto, la concentración de referencia debe tomarse como la concentración de sedimentos de esta capa:

$$y_s = (\delta_s)_{cl} \quad (2.12)$$

$$(C_s)_{y=y_s} = (C_s)_{cl} \quad (2.13)$$

donde el subíndice cl se refiere a las propiedades de la capa de carga de lecho.

2.5.4 Tasa de transporte de sedimentos en suspensión

De la Figura (2.5.2) se deduce que la tasa de transporte de sedimentos en suspensión es igual a:

$$q_s = \int_{\delta_s}^d c_s v dy \quad (2.14)$$

donde q_s es la tasa de transporte volumétrica de carga en suspensión por unidad de ancho, c_s es la concentración de sedimentos (ecuación 2.11), v es la velocidad local en una distancia y medida perpendicularmente al lecho del canal, d es la profundidad de flujo y δ_s es el espesor de la capa de carga de lecho.

La ecuación (2.14), junto con la ecuación (2.11) y las características de la capa de carga de lecho permiten estimar la tasa de transporte de carga en suspensión. Ahora bien, el espesor y la concentración⁵ de la capa de carga de lecho pueden obtenerse mediante las ecuaciones propuestas por algunos autores tales como Nielsen o van Rijn:

$$(C_s)_{cl} = \frac{0,117}{d_s} \left(\frac{v^2}{(s-1)g} \right)^{1/3} \left(\frac{\tau_*}{(\tau_*)_c} - 1 \right) \quad \text{van Rijn (1984)} \quad (2.15)$$

$$(\delta_s)_{cl} = 0,3 d_s \left(d_s \left(\frac{(s-1)g}{v^2} \right)^{1/3} \right)^{0,7} \sqrt{\frac{\tau_*}{(\tau_*)_c} - 1} \quad \text{van Rijn (1984)} \quad (2.16)$$

⁵ La concentración de sedimentos en la capa de carga de lecho tiene un límite superior de 0.65 para granos redondeados



$$(C_s)_{ct} = 0,65 \quad \text{Nielsen (1992)} \quad (2.17)$$

$$(\delta_s)_{ct} = 2,5 d_s (\tau_* - (\tau_*)_c) \quad \text{Nielsen (1992)} \quad (2.18)$$

Donde $\tau_* = \tau_o / (\rho(s - 1)g d_s)$, $(\tau_*)_c$ es el parámetro crítico de Shields para el inicio de la carga de lecho, d_s es el tamaño del sedimento, $\tau_o = \rho g d s \sin \theta$ es el esfuerzo cortante de lecho, $s = \rho_s / \rho$ y ν es la viscosidad cinemática del fluido.

Para flujo turbulento rugoso, la distribución de velocidad v a través de la profundidad del flujo puede expresarse como:

$$\frac{v}{V_*} = \frac{1}{K} \ln \left(\frac{y}{k_s} \right) + 8,5 \quad (2.19)$$

donde k_s es la altura de rugosidad equivalente⁶. En un flujo en canal abierto completamente desarrollado la ecuación (2.19) es válida para $y/d < 0.1$ a 0.15 .

Para flujos turbulentos completamente desarrollados en canales abiertos, la distribución de velocidades también puede expresarse como:

$$\frac{v}{V_{max}} = \left(\frac{y}{d} \right)^{1/N} \quad (2.20)$$

donde V_{max} es la velocidad en la superficie libre, la cual es igual a:

$$V_{max} = \frac{N + 1}{N} \frac{q}{d} = \frac{N + 1}{N} V_* \sqrt{\frac{8}{f}} \quad \text{Para un canal rectangular ancho} \quad (2.21)$$

y q es el caudal por unidad de ancho y f es el factor de fricción de Darcy.

Para un flujo uniforme de equilibrio, Chen (1990) demostró que el exponente N se relaciona con el factor de fricción de Darcy de la siguiente manera:

$$N = K \sqrt{\frac{8}{f}} \quad (2.22)$$

El factor de fricción de Darcy para flujo turbulento esta dado como (fórmula de Colebrook - White):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log_{10} \left(\frac{k_s}{3,71 D_H} + \frac{2,51 \nu}{V D_H \sqrt{f}} \right) \quad (2.23)$$

⁶ Se puede suponer que k_s es igual al tamaño mediano del grano.



donde V es la velocidad media del flujo.

2.6 Capacidad de transporte de sedimentos

La tasa total de transporte de sedimentos (o capacidad de transporte) se define como el volumen total de partículas de sedimento que son transportadas por unidad de tiempo. Esta tasa incluye el transporte de sedimentos por carga de lecho, suspensión y la carga de lavado (material flotante).

A pesar de los avances recientes en este campo, ninguna de las ecuaciones planteadas (Sección 2.5.4, ecuaciones 2.15 a 2.18) puede predecir con exactitud el movimiento real de los sedimentos en corrientes naturales.

Además, se debe tener presente que las ecuaciones planteadas para predecir la capacidad de transporte, "predicen" solo la capacidad máxima de transporte de una mezcla conocida de sedimentos en el lecho, y no consideran la entrada de sedimentos a lo largo del cauce, ni los procesos de erosión y acreción que se generan durante el flujo.

La capacidad de transporte de sedimentos es igual a la suma de la tasa de transporte de carga de lecho y la tasa de carga en suspensión:

$$q_s = (q_s)_{cl} + (q_s)_s \quad (2.24)$$

donde:

$$(q_s)_{cl} = (C_s)_{cl}(\delta_s)_{cl}(V_s)_{cl} \quad \text{Tasa de transporte de carga de lecho} \quad (2.25)$$

$$q_s = \int_{\delta_s}^d c_s v dy \quad \text{Tasa de transporte de sedimento en suspensión} \quad (2.26)$$

Donde δ_s es el espesor de la capa de carga de lecho, d es profundidad de flujo y el subíndice cl se refiere a la capa de carga de lecho. Los detalles de la ecuación (2.25) pueden revisarse en la referencia (Chanson, 2002, Capítulo 10).

Existen correlaciones empíricas y semiempíricas para determinar la tasa total de transporte de sedimentos, en la Tabla (2.6.1) se presentan las expresiones que se usan en el común de los casos. En el Apéndice B, Tabla 2 se presenta otras correlaciones.

Hay que notar que las ecuaciones (2.24) a (2.26) arrojan datos razonables para el caso de canales rectos prismáticos con una sección transversal relativamente ancha y para un *lecho móvil plano*, mas no para corrientes naturales, en las cuales deberán ser validadas. A continuación se presentan algunas restricciones para los cálculos:

- Flujo no uniforme y presencia de corrientes secundarias,



- Presencia de curvas, irregularidades en el canal, forma de la orilla, formación de barras, presencia de formas del lecho,
- Cambio en el régimen de flujo (por ejemplo, cambio en la pendiente del lecho),
- Régimen de transición (por ejemplo, entre dunas y lecho plano).

Referencia	Ecuaciones	Rango	Anotaciones
Engelund y Hansen (1967)	$q_s = 0,4 f \frac{V_s}{\rho} \sqrt{\frac{d_s}{(s-1)g}}$	$0,19 < d_s < 0,93 \text{ mm}$	Con base en datos de laboratorio de Guy <i>et. al.</i> (1966) ($B = 2,44 \text{ m}$). Válida para $d_{20} > 0,15 \text{ mm}$ y $\sqrt{d_{90}/d_{10}} < 16$
Graf (1971)	$\frac{q_s}{q} = 10,89 \frac{V D_H/4}{\sqrt{(s-1)g d_{20}^3}} \left(\frac{(s-1)d_{20}}{\sin \theta D_H/4} \right)$	$0,1 < \frac{(s-1)d_{20}}{\sin \theta D_H/4} < 15$	Con base en datos experimentales en flujos en canales y tuberías

Tabla 2.6.1: Capacidad máxima de transporte (Chanson, 2002)

Notas: B = ancho del canal, D_H = Diámetro hidráulico, q_s = caudal volumétrico total de sedimentos por unidad de ancho

En las referencias (van Rijn, 2007b, 1993, 1984; ASCE, 2002; Martín Vide, 2003; Rocha Felices, 1998) se puede ampliar el tema del transporte de sedimentos en suspensión.

2.7 Modelos hidráulicos

2.7.1 Consideraciones teóricas

Los modelos físicos hidráulicos se usan comúnmente durante las etapas de diseño para optimizar una estructura y asegurar una operación apropiada de la misma. Para ser eficientes y útiles, las investigaciones experimentales sobre estos modelos requieren guías teóricas que se deducen de los principios básicos (por ejemplo, el transporte de sedimentos), de la teoría de similitud y análisis dimensional, por lo que la modelación hidráulica no puede dissociarse de la teoría básica de la mecánica de fluidos.

En un modelo hidráulico, las condiciones de flujo son similares a la del prototipo si el modelo muestra una similitud de forma (*similitud geométrica*), de movimiento (*similitud cinemática*), y de fuerzas (*similitud dinámica*), ver (Streeter et al., 2000; Sotelo Ávila, 1997; Novak et al., 2001; French, 1988; Chanson, 2002; Rocha Felices, 1998; Julien, 2002). La *similitud geométrica* implica que las relaciones de las longitudes características del prototipo con respecto a las longitudes del modelo son iguales. La longitud, el área y el volumen son los parámetros involucrados en la similitud geométrica. La *similitud cinemática* implica que las relaciones de las velocidades características del prototipo con respecto a las del modelo son las mismas. La *similitud dinámica* implica que las relaciones de las fuerzas del prototipo con respecto a las del



modelo son iguales. El trabajo y la potencia son otros parámetros involucrados en la similitud dinámica.

En flujos de superficie libre, los efectos gravitacionales son predominantes, por lo que la similitud modelo – prototipo se lleva a cabo con una similitud de Froude que establece que:

$$F_{r_m} = F_{r_p} \quad (2.27)$$

La modelación por número de Froude se utiliza cuando las pérdidas por fricción son pequeñas y el flujo es altamente turbulento. Estructuras tales como rebosaderos, vertederos de pared delgada, flujo alrededor de pilas de puentes, piscinas de disipación de energía, transiciones en canales y vertederos, etc. tienen fuerzas debidas a la gravedad (causadas por cambios en la elevación de superficies de los líquidos) y fuerzas inerciales que son mayores que las fuerzas viscosas y de esfuerzo cortante turbulento. En estos casos la *similitud geométrica* y el *mismo valor del número de Froude* en el modelo y en el prototipo producen una *buena aproximación a la similitud dinámica* (Streeter et al., 2000).

De la ecuación (2.27) se deduce que:

$$\frac{V_m}{\sqrt{g_m y_m}} = \frac{V_p}{\sqrt{g_p y_p}} = \frac{V_m (g_m y_m)^{1/2}}{V_p (g_p y_p)} \quad (2.28)$$

Como modelo y prototipo están afectados por igual condición de gravedad, entonces $g_m/g_p = 1$, además considerando que:

$$\lambda_v = \frac{V_m}{V_p} \quad y \quad \lambda_l = \frac{y_m}{y_p}$$

entonces:

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda_l} \quad (2.29)$$

De manera análoga se obtiene que:

$$\lambda_a = \lambda_l^2 \quad (2.30)$$

$$\lambda_q = \lambda_a * \lambda_v = \lambda_l^2 * \lambda_l^{1/2} = \lambda_l^{5/2} \quad (2.31)$$

donde λ_l , λ_v , λ_a y λ_q son la escala longitudinal, de velocidades, de áreas y de caudales, respectivamente.



Criterios de semejanza respecto al transporte de sedimentos

La semejanza en el transporte de sedimentos exige además de los criterios hidráulicos, criterios con respecto al tamaño y densidad del sedimento, y con respecto al caudal de sólidos. Estos criterios pueden ser *empíricos* (basados en la experiencia de otros modelos), *morfológicos* (basados en la teoría del régimen) o *analíticos*, ver (Martín Vide, 2003).

En términos generales, en un modelo hidráulico (de lecho móvil) la similitud en el transporte de sedimentos se consigue cuando el parámetro de Shields (τ_*) y el parámetro adimensional de la partícula (D_*) son similares en ambos sistemas (modelo y prototipo), es decir, cuando $\tau_{*r} = 1$ y $D_{*r} = 1$, lo que a su vez implica que $Rs_{*r} = 1$ (Julien, 2002).

La similitud en el parámetro adimensional de la partícula $D_{*r} = 1$ impone la siguiente relación entre el diámetro de la partícula y la densidad de la misma:

$$d_{*r}^3 = \frac{1}{(s-1)_r} \quad (2.32)$$

La similitud en el parámetro de Shields $\tau_{*r} = 1$ impone la siguiente relación entre el diámetro de la partícula y la similitud de pendiente S_r :

$$\tau_{*r} = \frac{z_r S_r}{(s-1)_r d_{*r}} = 1 \quad (2.33)$$

De las ecuaciones (2.32) y (2.33) se puede ver que con el fin de satisfacer simultáneamente $D_{*r} = 1$, $\tau_{*r} = 1$, y $S_r = z_r/x_r$, la condición $d_{*r} = x_r^{1/2}/z_r$ debe ser satisfecha.

Sin embargo, para establecer la relación de escala para el diámetro del sedimento y para la densidad del mismo, se deben satisfacer simultáneamente las ecuaciones correspondientes a la *relación de escala de velocidades*, *similitud de Froude*, *similitud del parámetro adimensional de la partícula*, y *similitud del parámetro de Shields* (ecuaciones 2.29, 3.2, 2.32, 2.33, respectivamente). Con base en esto, las relaciones de escala son las siguientes:

$$d_{*r} = x_r^{-0.2} \quad (2.34)$$

$$(s-1)_r = x_r^{0.6} \quad (2.35)$$

donde el subíndice r se refiere a la relación de escalas, x_r y y_r , son relaciones de escalas longitudinales, el resto de términos se definieron en otras secciones.



Con respecto al sedimento en suspensión, el criterio para escalar se basa en la velocidad de sedimentación $w_o = (8\nu/d_s) \left[(1 + 0,0139 D_s^3)^{0,5} - 1 \right]$. Dicho criterio establece que la relación entre la velocidad de sedimentación y la velocidad de corte sea idéntica en ambos sistemas ($w_{o,m}/V_{c,m} = 1$). Esto nos conduce directamente a $d_{s,p} = x_r^{1/2}/z_r$, lo cual es idéntico a la condición previamente obtenida del parámetro de Shields. Podemos entonces concluir que la similitud en el parámetro de Shields es equivalente a la similitud en la carga de fondo y en el sedimento en suspensión, con la condición de que $D_{s,r} = 1$. Esto fortalece los requerimientos de $D_{s,r} = 1$ y $\tau_{s,r} = 1$ para la similitud en el transporte de sedimentos (Julien, 2002).

Ahora, considerando que el material así escalado corresponde a un material muy liviano (de baja densidad) cuando en el modelo se usan partículas grandes (analizar la ecuación 2.32), a continuación se desarrolla un método analítico basado en el criterio de inicio del movimiento del sedimento en suspensión, de tal forma que permita conservar la misma densidad del sedimento tanto en el modelo como en el prototipo, es decir, determinar el tamaño del sedimento para el modelo a partir del sedimento del prototipo de modo que el inicio del movimiento ocurra bajo condiciones análogas en el modelo y en el prototipo y que la densidad del sedimento sea igual en ambos sistemas, por lo tanto:

$$\left(\frac{V_c}{w_o}\right)_m = \left(\frac{V_c}{w_o}\right)_p = \frac{w_{o,m}}{w_{o,p}} = \frac{V_{c,m}}{V_{c,p}} \quad (2.36)$$

donde

$$V_{c,m} = \sqrt{g_m y_p S_m} \quad (2.37)$$

$$V_{c,p} = \sqrt{g_p y_p S_p} \quad (2.38)$$

por lo tanto

$$\frac{w_{o,m}}{w_{o,p}} = \sqrt{\frac{g_m y_p S_m}{g_p y_p S_p}} \quad (2.39)$$

Ahora, considerando que tanto el modelo como el prototipo esta en iguales condiciones de gravedad ($g_m/g_p = 1$), que la pendiente del lecho del modelo y del prototipo es la misma ($S_m/S_p = 1$), y que ($y_m/y_p = \lambda l$), la ecuación (2.39) se convierte en:

$$\frac{w_{o,m}}{w_{o,p}} = \sqrt{\lambda l} \quad (2.40)$$



donde λl es la escala de longitud, w_s es la velocidad de sedimentación de la partícula, V_c es la velocidad de corte, y es el calado de flujo, y S es la pendiente de lecho.

Adicionalmente a partir de la granulometría del lecho y de acuerdo a la ecuación de (Soulsby, 1997), se calculan las velocidades de sedimentación, en función del diámetro de la partícula, de su peso específico sumergido y de la viscosidad del fluido considerando que:

$$w_s = \frac{v}{D} \left[\left(10,36^2 + 1,049 D_*^3 \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (2.41)$$

$$D_* = \left[\frac{g R}{\nu^2} \right]^{1/3} D \quad (2.42)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, ν es la viscosidad cinemática del agua, D es el diámetro medio de los granos, $R = (\rho_s - \rho)/\rho$ es el peso específico sumergido de los granos.

Con la relación establecida para las velocidades de sedimentación de prototipo y modelo (ecuación 2.40), y los valores obtenidos de la ecuación de Soulsby, para los diferentes diámetros de las partículas, se determinan las velocidades de sedimentación en el modelo y en base a estas y con la misma ecuación se establecen los diámetros de los granos para el modelo.

Para el caso de la similitud del caudal de sólidos, de acuerdo con la referencia (Martín Vide, 2003) se tiene que, si el material del modelo es de origen mineral igual que en prototipo, la escala de caudal sólido de este material es $q_{s,m} = \lambda l^{3/2}$, igual que la escala de caudal líquido, siempre que el material del modelo se haya reducido a la misma escala geométrica que el resto de dimensiones.

En la referencia (Julien, 2002) se pueden hacer una revisión más amplia sobre modelos de lecho móvil, modelos de lecho fijo y sobre los criterios de semejanza con respecto al transporte de sedimentos tanto de fondo como en suspensión. Además, en la referencia (Vanoni, 2002) se encuentra un análisis completo sobre "Escalamiento del Transporte de Sedimentos para Modelos Físicos".

2.8 Turbiedad y sólidos suspendidos

2.8.1 Generalidades y definición

La turbiedad es la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz se disemine y absorba en lugar de transmitirse sin cambios de dirección e intensidad a través de ella, es decir, se puede expresar como la interacción luz – sólidos suspendidos. En corrientes naturales se debe a la presencia de materia suspendida y coloidal tales como arcillas, limos y partículas de sílice provenientes de la erosión del suelo de sus



cuencas. Además, puede deberse a la presencia de algas, microorganismos y materia orgánica. Correlacionar la medida de la turbiedad con la concentración de sólidos suspendidos de manera genérica es muy difícil debido a que el tamaño, la forma, el índice de refracción (tanto de las partículas como del líquido) y la longitud de onda de la luz afectan la dispersión de la misma en la suspensión. El color también afecta la dispersión de la luz, debido a que una sustancia coloreada absorbe luz en ciertas bandas del espectro visible cambiando las características tanto de la luz transmitida como de la luz dispersada, y por tanto afectando la lectura de la turbiedad.

Matemáticamente, la turbiedad se puede definir como el logaritmo natural de la disminución de la intensidad luminosa, al pasar un rayo de luz a través de un medio de espesor l (Arboleda Valencia, 2005):

$$T = \frac{1}{l} \ln \frac{I}{I_0} \quad (2.43)$$

donde T es la turbiedad de la suspensión, I es la luz transmitida⁷, e I_0 es la luz incidente. La luz reflejada solo se presenta cuando hay partículas muy grandes, y en la mayoría de los casos se puede despreciar.

Hay que tener presente que el problema es más complejo debido a que los movimientos ondulatorios de las ondas luminosas dentro de la suspensión se pueden combinar, lo cual produce interferencias⁸ (ver la Figura 2.8.1a). Además, al chocar un rayo de luz contra un átomo de la misma partícula, las ondas resultantes se combinan según estén en fase o fuera de fase y pueden chocar con nuevos átomos, de modo que la luz diseminada o transmitida no es una función lineal de la luz incidente (ver la Figura 2.8.1b).

Como la turbiedad es la que produce la diseminación de la luz, debe considerarse a aquella como la interacción de un conjunto de ondas actuando sobre un conjunto de átomos y partículas, y a priori, sin relación con la concentración de la suspensión.

2.8.2 Medio diseminante

El número, concentración, masa, tamaño, forma e índice de refracción de la partículas presentes en la suspensión, influyen en la turbiedad aparente de la misma (Arboleda Valencia, 2005).

Número de partículas

⁷ La luz transmitida se define de la siguiente manera: $I = I_0 - I_D$ cuando no hay luz absorbida o $I = I_0 e^{-k l}$ cuando hay luz absorbida, donde: I_D es la luz diseminada y k es el coeficiente de absorción.

⁸ Por ejemplo, si dos ondas de luz de igual amplitud están fuera de fase se restan o se cancelan, y si existe solamente un desfaseamiento, aparece una onda de amplitud intermedia. Por lo tanto, al haber una gran variedad de ondas luminosas de diferente amplitud y/o frecuencia, una onda puede destruir a otra o sumarse con ella.

Dependiendo del *tamaño* de las partículas con respecto a la longitud de onda de luz, se establece lo siguiente: **(1)** cuando el tamaño es menor que $\lambda/20$ (λ = longitud de onda), las amplitudes se consideran aditivas y la luz diseminada se hace proporcional al número de partículas presentes N , a su masa m , y a su volumen V , de la siguiente manera:

$$\frac{I_D}{I_0} = f(N) \quad (2.44)$$

$$\frac{I_D}{I_0} = f(m^2) \quad (2.45)$$

$$\frac{I_D}{I_0} = f(V^2) \quad (2.46)$$

De tal manera que esta propiedad se usa para determinar la concentración⁹ de una solución comparándola con la turbiedad de otra solución de concentración conocida; y **(2)** cuando el tamaño es mayor que $\lambda/20$, la luz diseminada no puede considerarse como función lineal del número de partículas o de la concentración de la suspensión¹⁰.

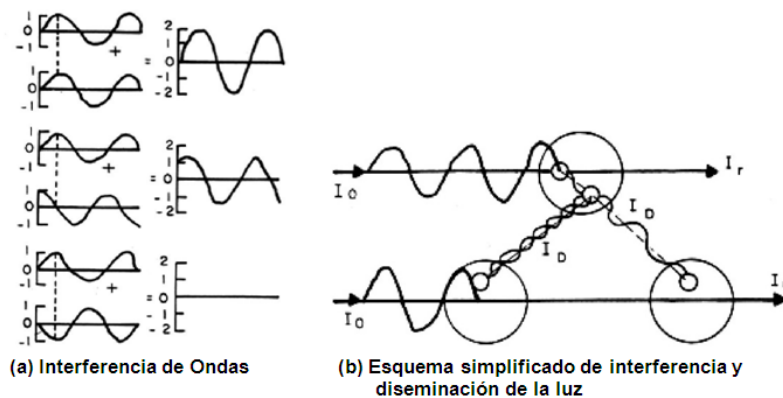


Figura 2.8.1: Diseminación de la luz (Arboleda Valencia, 2005)

Tamaño de las partículas

El tamaño de las partículas influencia en la cantidad de luz diseminada y el ángulo de diseminación. Si $d \ll \lambda$ (d = diámetro de la partícula), la luz total diseminada es proporcional a $1/\lambda^4$ y consecuentemente cualquier variación en el tipo de luz incidente producirá una lectura diferente de turbiedad. Si $d \approx \lambda$, se produce la máxima diseminación de luz incidente y la luz diseminada varía en relación a $1/\lambda^2$, y si $d > \lambda$, la luz diseminada es proporcional al radio de la partícula.

⁹ La concentración es igual a $NV\rho$, donde ρ es la densidad de las partículas.

¹⁰ Por esta razón la turbiedad se expresa en Unidades Nefelométricas de Turbiedad (NTU) y no en mg/l

El ángulo de diseminación varía de la siguiente manera: si $d < \lambda/20$, la luz se disemina más en la dirección de I que a 90° de ella, y si $d > \lambda/20$, se disemina más luz a 90° que en la dirección de I_0 (ver la Figura 2.8.2).

Índice de refracción

El índice de refracción de las partículas presentes en la suspensión así como el del líquido de la misma afectan la relación entre la luz incidente y la luz diseminada. Es por eso importante a la hora de medir la turbiedad, mantener el agua libre de burbujas de aire, pues estas tienen un índice de refracción diferente al del líquido que las rodea. Las lecturas de la turbiedad también se verán afectadas por el material de que están hechas las celdas donde se coloca la muestra, y por el grado de limpieza o transparencia de ellas.

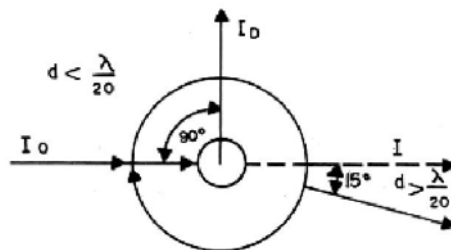


Figura 2.8.2: Ángulo de máxima diseminación de la luz (Arboleda Valencia, 2005)

2.8.3 Relación entre turbiedad y sólidos suspendidos

Hay que mencionar en primera instancia que no existe ninguna relación universal entre la turbiedad y los sólidos suspendidos, ni entre las mediciones de turbiedad realizadas en suspensiones con partículas de diferente tamaño, ni incluso entre las mediciones de turbiedad realizadas sobre la misma suspensión con instrumentos diferentes, por lo que la turbiedad no es una medida directa de las partículas suspendidas en el agua. Sin embargo, se puede establecer dicha relación para un lugar, suspensión y tiempo específicos.

Holliday *et al.*, realizó experimentos sobre muestras de laboratorio y demostró que la turbiedad y los sólidos suspendidos totales (TSS) se relacionan de la siguiente manera:

$$NTU = a (TSS)^b \quad (2.47)$$

donde a y b son coeficientes de regresión. Los ensayos se realizaron usando como sedimento arcilla, arcilla y limo, y tierra, en todos los casos el coeficiente b es semejante a uno, mientras que el coeficiente a es alto para la solución de arcilla y limo, y bajo para las soluciones restantes (Holliday *et al.*, 2003).

En la Figura 2.8.3 se presenta la relación entre la turbiedad medida y los sólidos suspendidos totales, producto de la investigación de Holliday *et al.*



Sin embargo, además de depender de las partículas en suspensión, la turbiedad depende también de otros factores tales como la presencia de materia orgánica y otros residuos flotantes, algas, burbujas de aire y la decoloración del agua. Por lo tanto, en estas condiciones, la correlación de las mediciones de turbiedad con las partículas suspendidas puede ser incompatible debido a la gran variabilidad de las partículas suspendidas. Adicionalmente, la correlación entre la turbiedad y las partículas suspendidas por lo general falla para altas concentraciones¹¹, por lo que en principio las expresiones presentadas en la Figura 2.8.3 no pueden aplicarse directamente a muestras de corrientes naturales. Sin embargo, se indica que estudios para la región (Pacheco, 2008) indicarían un comportamiento que se acopla al esquema teórico y que corroboran la relación antes establecida.

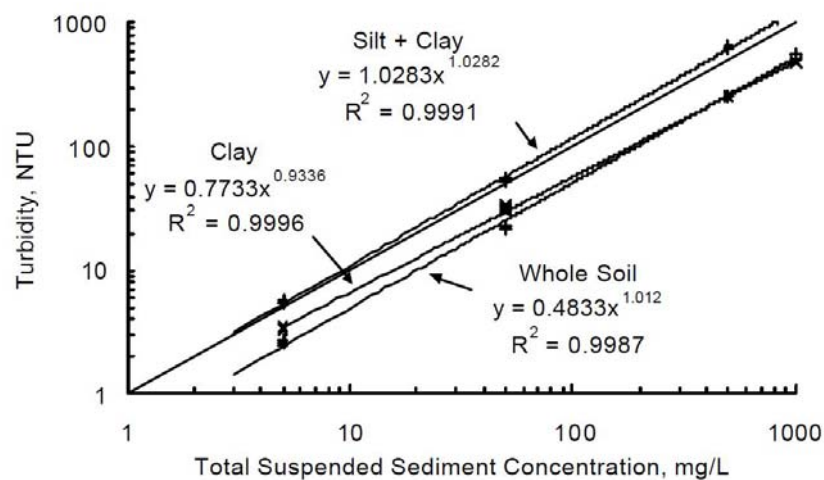


Figura 2.8.3: Relación entre turbiedad y sólidos suspendidos totales para diferentes suspensiones (Holliday et al., 2003)

2.9 Métodos para la medición de la turbiedad

2.9.1 Método 180.1 de la EPA

Este método se refiere a la determinación de la turbiedad por nefelometría. Se basa en una comparación de la intensidad de la luz dispersada por la muestra en condiciones definidas con la intensidad de la luz dispersada por una suspensión de referencia estándar. Cuanto mayor sea la intensidad de la luz dispersa, mayor será la turbidez. Las lecturas se realizan en un nefelómetro diseñado de acuerdo a las especificaciones establecidas en el método. Una suspensión estándar primaria se utiliza para calibrar el instrumento. Una suspensión estándar secundaria se utiliza como una comprobación de calibración. Véase el Apéndice B para el Método 180.1 de la EPA.

¹¹ En este caso la calibración entre la turbiedad y la luz dispersada se convierte en no lineal (Campbell et al., 2005).



2.9.2 Método Estándar 2130B

Este método se encuentra en Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, y es similar al método 180.1 de la EPA. También se basa en una comparación de la intensidad de la luz dispersada por la muestra en condiciones definidas con la intensidad de la luz dispersada por una suspensión de referencia, bajo las mismas condiciones. Cuanto mayor sea la intensidad de dispersión de la luz, mayor es la turbiedad. El polímero de formacina se utiliza como suspensión estándar de referencia primaria. Véase el Apéndice C del método estándar 2130B.



Capítulo 3

Materiales y Métodos

3.1 Descripción del Proyecto Hidroeléctrico HIDROSANBARTOLO

El proyecto “HIDROSANBARTOLO” S.A. comprende una central de generación hidroeléctrica de pasada con una potencia de generación aproximada de 92 megavatios (MW), y que generara alrededor de 350 gigavatios (GW) por año, con un factor de planta del 83,25 %. Los principales elementos del proyecto comprenden una presa de derivación de poca altura, la estructura de captación de agua, tuberías de acero, tubería de presión, una central eléctrica de superficie, una línea de transmisión y una subestación eléctrica. La longitud de la conducción del proyecto es de aproximadamente 7000 metros para mantener una cabeza neta de 183 metros.

Obra de Toma: La captación es del tipo convencional y captará un caudal de $30 \text{ m}^3/\text{s}$. Cuenta con un azud cuyo ancho es de 19.5 m y una altura de 12.8 m , tres compuertas que serán utilizadas en eventos de crecida para la evacuación de caudal con una abertura de 7 m y un ancho de 6 m , una compuerta de lavado de 4 m de ancho que está conectada a un canal para el desalojo de sedimentos con una pendiente del 4% y una longitud total de 80 m que desemboca aguas abajo de la obra.

Obra de conducción: la conducción está formada por un tramo inicial constituido por un canal embaulado de 800 m de longitud continuando con un tramo formado de una tubería circular hasta alcanzar la casa de maquinas.

Ubicación del proyecto de obra de captación: El proyecto está ubicado en la provincia de Morona Santiago, teniendo como centros poblados próximos a Copal, San Bartolo, La Delicia, La Dolorosa, entre otros. Las coordenadas del proyecto son: 787836 E, 9696226 N (DATUM WGS84 ZONA 17S). Ver la Figura 3.1.1.

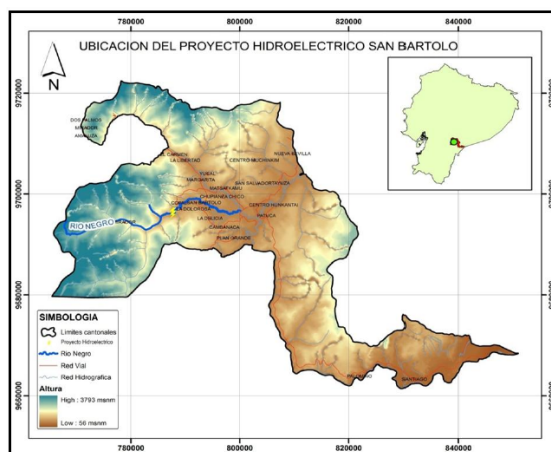


Figura 3.1.1: Mapa de ubicación del proyecto hidroeléctrico HIDROSANBARTOLO

3.2 Consideraciones hidrológicas para el modelo

Para un mejor entendimiento del comportamiento morfológico, de flujo, de transporte de sedimentos, etc. del modelo frente a los caudales de mayor representatividad para la zona de estudio, es necesario identificar el caudal formativo del cauce a fin de poder establecer otros caudales de interés que pudieran usarse para validar fenómenos tales como el de transporte de sedimentos, así como para evaluar el comportamiento de la obra de derivación frente a eventos extremos (avenida de diseño). Dicho esto y considerando la información hidrológica presentada en la Tabla 3.2.1, se ha establecido (Pacheco & Carrillo, 2012) como caudal formativo el valor de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, para la validación de los procesos de transporte de sedimento se ha considerado para la calibración inicial, caudales en el rango correspondiente a los medios anuales del periodo húmedo en el rango de $75 \text{ m}^3/\text{s}$ y para el posterior estudio de equilibrio de pendiente y de procesos de transporte de sólidos o erosión se incorporará caudales correspondientes a regularidades hidrológicas anuales y multianuales ($300 \text{ m}^3/\text{s}$ y $800 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente).

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic	Anua
Mínimo	19,	19,	21,	22,5	27,7	31,9	47,0	21,	25,	22,	19,	19,	35,4
Medio	29,	37,	45,	60,4	64,6	73,1	76,6	59,	48,	41,	34,	31,	49,3
Máxim	52,	74,	85,	112,	105,	116,	103,	92,	85,	71,	61,	57,	65,3

Tabla 3.2.1: Caudales medios mensuales en los sitios de toma del aprovechamiento Copal – San Bartolo

3.3 Modelo Físico

3.3.1 Consideraciones generales

El modelo implementado para la obra de captación del río Negro plantea un estudio en lecho móvil a través del cual se inspeccionaran las condiciones relevantes a:

- Identificación de los efectos debidos a la configuración geométrica en planta prevista para la obra de captación.
- Proceso de transporte de sedimento y de depositación aguas arriba del cierre.
- Procesos de sedimento en suspensión.
- Caracterización de las condiciones hidráulicas de flujo relevantes para la obra (calados, distribución de velocidad).
- Identificación de obras complementarias para funcionamiento de la obra.
- Identificación de otros fenómenos hidráulicos que pudieran ser de interés para el diseño de la obra.

Para el estudio de propósitos cualitativos en el modelo se ha considerado los aspectos relevantes a pendiente longitudinal, caudal líquido, caudal de sólidos, y caracterización de material transportado, que han permitido el establecimiento de un cauce en equilibrio ante los procesos de flujo hidráulico y de transporte de sedimento.



Figura 3.3.1: Infraestructura del Laboratorio de Dinámica de Fluidos PROMAS – Universidad de Cuenca

3.3.2 Dimensiones para el modelo

El modelo en planta, de la obra de toma proyectada sobre el río Negro, ha sido concebido como un modelo de lecho móvil para efectos de identificar el comportamiento de procesos hidráulicos de arrastre de fondo y depositación de sedimentos en zonas críticas, proyectado para la regularidad hidrológica anual identificada, así como para otros caudales de interés de regularidad hidrológica multianual. Las escalas del modelo se han definido en consideración a las condiciones presentes para la implementación del mismo como por ejemplo el espacio disponible, que es un factor predominante, la capacidad de suministro de caudal máximo para el modelo, y otras condiciones de flujo que se derivan del establecimiento de una escala



del modelo. En el caso de la obra de toma proyectada sobre el río Negro se ha modelado sobre una superficie considerada suficiente para reproducir los efectos y fenómenos a ser estudiados. Dicha superficie resulto establecida en un área de $250 \times 700 \text{ m}$ que de acuerdo al espacio disponible se logra con una escala horizontal de $\lambda l = 1/50$, considerando aspectos tanto de capacidad del laboratorio, así como también aspectos relativos al flujo en el modelo (número de Reynolds principalmente), se ha establecido que la magnitud de esta escala permite realizar el modelo en una escala no distorsionada. Con el valor de la escalas definido, se procedió a verificar el valor correspondiente del caudal para el modelo.

3.3.3 Implementación del modelo morfológico

La modelación del cauce del río Negro y la obra de toma se ha realizado en un canal de fibra de vidrio de 15 m de longitud por 5 m de ancho y $0,70 \text{ m}$ de alto. Posee un tanque de ingreso de flujo a la cabecera del modelo y un tanque de almacenamiento con dos compuertas que permiten la regulación de niveles tanto en el cauce a la salida de la obra de toma, como en el que corresponde a la toma propiamente dicha en el modelo, el sistema de recirculación cuenta con una capacidad proyectada para el modelo de un volumen de recirculación de 8 m^3 . El modelo posee una capacidad instalada de flujo de 80 L/s , la bomba con la que se ha suministrado el caudal tiene las siguientes especificaciones.

- Marca: Brook Crompton Parkinson Motors
- N° de Serie: K826R
- Potencia: 15 KW
- Voltaje: 220 V
- RPM: 1740
- Amperaje: 53 A

El sistema de recirculación tiene en la succión un diámetro de 6 pulgadas, con válvula check, y la descarga se realizó mediante tubería de 4 pulgadas con un sistema de válvulas en paralelo para maniobrar el sistema a fin de controlar los caudales de flujo durante las diferentes etapas de experimentación. Cabe señalar que al equipo hidromecánico mencionado se ha incorporado sistemas de controles electrónicos y de medición mismos que han sido adaptados y calibrados para efectos de conseguir que se simule a tiempo real en la proporción de la escala de modelo tanto hidrogramas, así como también otros caudales de interés.

En el canal de base se procedió a la configuración del cauce de estudio. La construcción del cauce natural del río Negro se realizó con material granular, a fin de representar apropiadamente la topografía de la zona. Se procedió con la impermeabilización del cauce para posteriormente realizar el proceso de calibración del mismo. En la Figura 3.3.2 se ilustra este proceso.



Figura 3.3.2: Configuración del cauce y lecho base del río Negro

3.3.4 Calibración del modelo

Para predecir el comportamiento del prototipo en las condiciones del flujo establecidas y para identificar los efectos de la obra proyectada, sobre los procesos naturales de flujo y de transporte de sedimento, una vez construido y emplazado el modelo, se procedió con la calibración que permita ajustar y validar las condiciones que rigen los fenómenos a estudiar, hasta que se logre una concordancia entre el modelo y el prototipo para los fenómenos relevantes. Los detalles del proceso de calibración del modelo físico para el proyecto de generación hidroeléctrico HIDROSANBARTOLO se detallan en las referencias (Pacheco & Carrillo, 2012b) y (Beltran & Ordoñez, 2012).

3.4 Procedimiento para el estudio de sólidos suspendidos

El cálculo de las tasas de transporte de sedimento en suspensión así como la determinación de la variación de la concentración de sólidos suspendidos en el embalse de la obra requiere que previamente se realicen actividades tanto a nivel de gabinete como de laboratorio. Las actividades de gabinete incluyen básicamente lo siguiente: determinación de la curva granulométrica del sedimento ajustado al modelo físico (escalamiento del sedimento), el escalamiento del hidrograma, cálculo de las tasas de transporte de sedimento en suspensión, y determinación de la ecuación que relaciona la concentración de sólidos suspendidos totales con el grado de turbidez del flujo. A nivel de laboratorio es necesario realizar, básicamente, la simulación de flujos con carga en suspensión para posteriormente tomar muestras de agua en diferentes secciones del embalse para las distintas condiciones de flujo, determinar la turbidez de dichas muestras, y tomar muestras del sedimento depositado en las zonas de mayor sedimentación y caracterizar las mismas.

3.4.1 Escalamiento del sedimento

A partir de la teoría expuesta en la Sección 2.7.1 y usando los valores de la granulometría del lecho, a continuación en la Tabla 3.4.1 y Figura 3.4.1 se presentan los resultados obtenidos para la curva granulométrica adaptada al modelo, así como los valores correspondientes al prototipo.

% Pasa	D_p (mm)	D_{*p}	V_{s_p}	V_{s_m}	D_m (mm)
88	69.85	1695.09	1.09	0.15	1.52
84	57.15	1386.9	0.98	0.14	1.28
82	44.45	1078.7	0.87	0.12	1.04
76	31.75	770.5	0.73	0.1	0.8
70	22.25	539.95	0.61	0.09	0.62
65	15.9	385.86	0.52	0.07	0.5
60	11.11	269.61	0.43	0.06	0.41
57	7.14	173.27	0.35	0.05	0.33
46	3.38	82.02	0.24	0.03	0.24
25	1.21	29.36	0.13	0.02	0.17
6	0.2455	5.96	0.03	0	0.08

Tabla 3.4.1: Cálculo de la curva granulométrica para el modelo

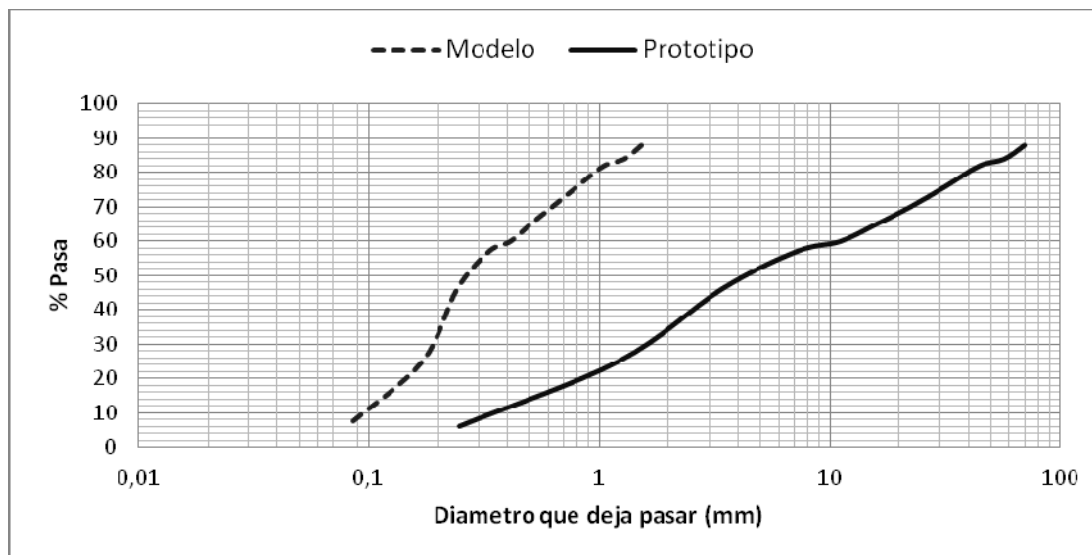


Figura 3.4.1: Curva granulométrica del prototipo y del modelo

3.4.2 Escalamiento del hidrograma

El hidrograma establecido para un periodo de retorno de 100 años para el rio Negro se muestra en la Figura 3.4.2, el que fuera obtenido del estudio hidrológico y el análisis de la información existente.

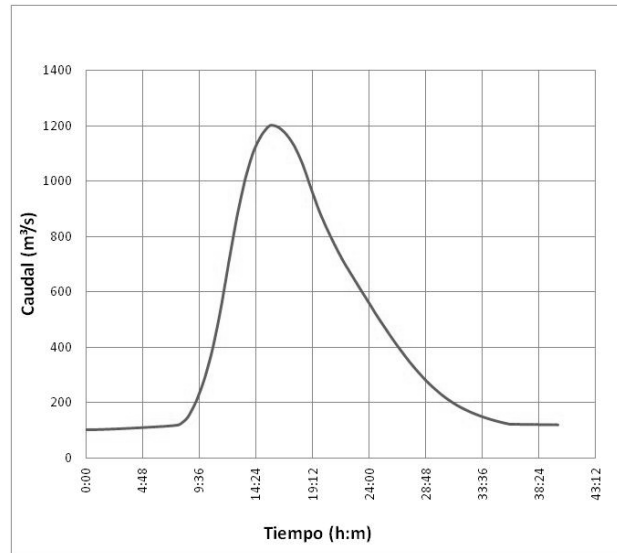


Figura 3.4.2: Hidrograma del rio Negro para un periodo de retorno de 100 años – Prototipo

Para efectos de consideraciones de eventos hidrológicos y que influirán en el dimensionamiento de capacidad del modelo, se ha escalado el hidrograma presentado anteriormente. El procedimiento señalado para escalamiento de caudal (Sección 2.7), se replicó para cada uno de los valores de caudal del hidrograma de la avenida de crecida. Para la escala temporal resulta:

$$\lambda t = \sqrt{\lambda L} = \sqrt{1/50} \tag{3.1}$$

Con los valores del caudal y el tiempo traducidos a la escala del modelo tenemos el hidrograma resultante, el cual se presenta en la Figura 3.4.3.

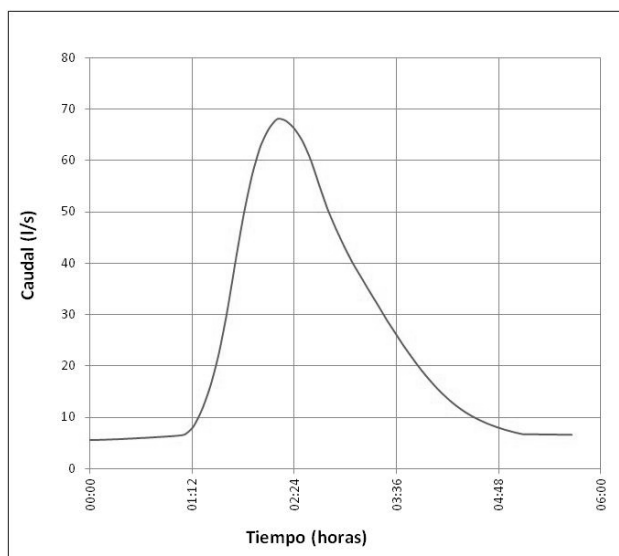


Figura 3.4.3: Hidrograma del rio Negro para un periodo de retorno de 100 años – Modelo

3.4.3 Relación entre la concentración de sólidos suspendidos totales y turbiedad del flujo

Como se explico en la Sección 2.8.3, la fórmula general que relaciona la concentración de sólidos suspendidos con la turbiedad es de la forma $NTU = a(TSS)^b$. Según estudios realizados en ríos de montaña con muestras elaboradas, en la Tabla 3.4.2 se presentan ecuaciones correspondientes para cauces de la cuenca media del río Paute (Pacheco, 2008). Basados en la semejanza hidrológica y de transporte y de características de sedimento, se ha considerado que la ecuación obtenida para el Río Jadán es la más apropiada para representar la relación concentración – turbiedad en el Río Negro.

$$SSC = 0,0012 T \quad (3.2)$$

#

donde T es la turbiedad de la muestra de agua con sedimento en suspensión (NTU) y SSC es la concentración de sólidos suspendidos presentes en dicha muestra en kg/m^3 . Sin embargo, para el presente trabajo, en base a estudios realizados en el río Negro, se ajustó el coeficiente de dicha ecuación a 0.0013.

Turbiedad y CSS	
Lugar	Ecuación propuesta
R.Turupamba	$SSC = 0,0084T$
R. Jadán	$SSC = 0,0012T$
R. Mapayacu	$SSC = 0,002T$
R. Tabacay	$SSC = 0,0001T$



R. Cachiwayco	SSC = 0,0143T
---------------	---------------

Tabla 3.4.2: Relación entre concentración de sólidos suspendidos y turbiedad para diferentes ríos (Pacheco, 2008)

3.4.4 Cálculo de las tasas de transporte de sedimento en suspensión para el río Negro

La determinación de las tasas de transporte de sedimento en suspensión tanto del modelo como del prototipo se llevó a cabo mediante la aplicación de la teoría expuesta en el Capítulo 2, Secciones 2.2 a 2.6. Para ello, en primera instancia se ha identificado las variables principales que intervienen en el proceso de cálculo, dichas variables son:

- **Caudal (Q):** se ha determinado la tasa de transporte de sedimento para distintos caudales considerados de interés como son el caudal formativo ($50 \text{ m}^3/\text{s}$), el caudal medio anual del periodo húmedo ($75 \text{ m}^3/\text{s}$), y los correspondientes a regularidades hidrológicas anuales y multianuales ($300 \text{ m}^3/\text{s}$ y $800 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente).
- **Ancho del cauce (b):** en el cálculo de las tasas se considera al cauce del río como un canal abierto ancho, de modo que este valor corresponde al ancho superficial del cauce cuando por el fluye cada caudal considerado.
- **Pendiente del lecho (S):** la pendiente del perfil longitudinal del río se ha establecido como promedio a nivel de microescala en el orden de 1,5 %, pero cabe indicar que la zona de estudio se encuentra en una zona de transición entre una pendiente del orden de 8% a 5% a nivel de macroescala.
- **Coefficiente de rugosidad de Manning (n):** el valor de dicho coeficiente fue establecido en el orden de $n = 0,05$, los detalles del valor seleccionado se encuentran en (Beltran & Ordoñez, 2012).
- **Viscosidad cinemática (ν):** corresponde a la del agua y se estableció en $\nu = 1,006 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.
- **Gravedad específica (s):** se ha determinado que la densidad del sedimento del río Negro es del orden de $\rho = 2640 \text{ kg}/\text{m}^3$, por lo que la gravedad específica es $s = 2,64$.
- **Diámetro del sedimento (d_s):** el tamaño del sedimento puede considerarse como una variable independiente cuando se determine la tasa de transporte para una condición conocida de flujo y sedimento, en cuyo caso se obtendrá de la curva granulométrica correspondiente (Figura 3.4.1) y será igual al d_{50} ; pero además puede considerarse como una variable independiente cuando se



requiera determinar el diámetro potencial de sedimento para una condición conocida de flujo, es decir, cuando desee estimar el tamaño máximo de sedimento que una condición de flujo pueda transportar en forma de suspensión.

Nota: la explicación de las variables anteriores es válida para el caso del prototipo, para el del modelo, el caudal y el ancho del cauce se obtienen escalando los valores correspondientes del prototipo de acuerdo con la Sección 2.7.1, mientras que la pendiente del lecho, la viscosidad cinemática y gravedad específica son iguales tanto en el modelo como en el prototipo. El coeficiente de rugosidad de Manning para el caso del modelo se escala usando el coeficiente de Gauckler–Manning, el cual expresa que $(n_{Manning})_r = Lr^{1/6}$ (Chanson, 2002). El diámetro del sedimento se considera de la misma forma que para el caso del prototipo, la curva granulométrica escalada para el caso del modelo de presenta en la Figura 3.4.1.

Proceso de cálculo

El cálculo de las tasas de transporte implica una serie de cálculos previos a la aplicación de las expresiones existentes para este fin, dichos cálculos incluyen entre otros la determinación del calado normal del flujo (d), la velocidad media (V), el número de Reynolds tanto del flujo como de la partícula (Re y Re_p , respectivamente), la velocidad de corte y el esfuerzo cortante del lecho (V_c y τ_o , respectivamente), el parámetro de Shields (τ_*) y el parámetro crítico de Shields (τ_{*c}), el cual es una función del número de Reynolds de la partícula y del parámetro de Shields (Re_p , τ_*) y se obtiene del diagrama de Shields.

Con los cálculos anteriores es posible establecer si existe o no movimiento de sedimento tanto de fondo como en suspensión, los criterios correspondientes, para el caso de sedimento en suspensión se presentan en el Capítulo 2 y en (Chanson, 2002) para el caso de arrastre de fondo.

Para el caso de movimiento en suspensión se procede de la siguiente manera:

1. Características de la capa de carga de lecho:

Determinar la concentración de referencia $(C_r)_{cr}$ y el espesor de la capa de carga de lecho $(\delta_r)_{cr}$, según las expresiones dadas en la Sección 2.5.4. Debe anotarse que la concentración de sedimentos en la capa de carga de lecho tiene un valor límite de 0.65 (Chanson, 2002).

2. Distribución de velocidad (v):

Según el tipo de flujo se procede a determinar la distribución de velocidad, para ello previamente es necesario determinar la velocidad en la superficie libre (V_{max}), el factor de fricción de Darcy (f) y el coeficiente N (ver Sección 2.5.4).

3. Integración numérica de la tasa de transporte de sedimento en suspensión:



Debido a que la ecuación (2.14) no se puede integrar de forma analítica es necesario usar un proceso numérico para estimar la tasa de sedimento en suspensión. Un método para realizar dicha estimación lo proporciona la regla de Simpson, la cual establece que *si la función f es continua en el intervalo cerrado $[a, b]$, n es un número entero par, y los números $a = x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n = b$ forman una partición regular de $[a, b]$, entonces:*

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{3n} [f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + 4f(x_3) + 2f(x_4) + \dots + 2f(x_{n-2}) + 4f(x_{n-1}) + f(x_n)]$$

produce una buena aproximación de la integral definida, donde n es el número de subintervalos.

Con lo expuesto anteriormente, el intervalo de integración se divide en un número de subintervalos adecuado, y una vez determinada la concentración de referencia y el espesor de la capa de carga de lecho, se procede a estimar dicha tasa. Del Apéndice C se observa que para valores de $n = 150$, $n = 200$ y $n = 250$ no existe mayor variación en la estimación de las tasas, por lo que se considera que para todos los casos un adecuado número de subintervalos es $n = 250$, debido a que para $n > 250$ la estimación de la tasa resultaría en un valor semejante.

Por otro lado, considerando que dentro de la literatura existente existen varios criterios para el inicio del movimiento en suspensión, se considera adecuado determinar el tamaño máximo de sedimento que cumple con la condición de inicio de movimiento para cada criterio y para las distintas regularidades hidrológicas (diámetros potenciales). Todo esto con la finalidad de establecer valores máximos de diámetros de sedimento que el río Negro podría transportar en suspensión, de tal forma que en base a estos valores se puedan tomar las precauciones correspondientes en los diseños de las obras considerando la posibilidad de ocurrencia que tienen estos valores. El cálculo se llevó a cabo mediante un proceso iterativo del valor del diámetro de la partícula, teniendo como restricción el valor del criterio de inicio de movimiento adoptado, sin perder de vista la condición de movimiento de fondo. Asociado a estos diámetros máximos, se ha determinado la tasa de transporte correspondiente según lo explicado anteriormente.

3.4.5 Ensayos en el modelo físico

Una vez determinada la tasa “real¹²” de transporte (en la cola del embalse), se procede a estudiar el proceso de transporte de sedimentos suspendidos a lo largo del embalse. Dicho estudio contempló un monitoreo¹³ de la variación de la concentración de

¹² Entiéndase como “real” la tasa de transporte calculada en base a las características reales del sedimento del río Negro.

¹³ Adicionalmente, el monitoreo de la concentración permitirá establecer la tasa de sedimentos y los diámetros máximos captados por la bocatoma.



sedimentos suspendidos aguas arriba de la obra proyectada, para ello se usó la teoría expuesta en la Sección 2.8 y la ecuación obtenida en la Sección 3.4.3. Adicionalmente, se identificó las zonas de mayor sedimentación en el embalse y los diámetros de sedimento que se espera que se depositen en dichas zonas. Identificadas las zonas de sedimentación, con la ayuda de láminas de polietileno colocadas en el lecho se procedió a recolectar muestras de material arrastrado y sedimentado en cada una de ellas, para posteriormente caracterizar las mismas.

La simulación de flujos con carga en suspensión se realizó en base a las tasas de transporte de fondo correspondientes a cada caudal de simulación, cabe indicar que la alimentación de material de fondo al flujo se realizó de forma manual a través de una tolva instalada en la cola del embalse del modelo. Una vez terminado el periodo de alimentación (generalmente de 10 minutos) se procedió a la toma de muestras de agua en las distintas secciones del embalse, medición de velocidades del flujo y posteriormente al vaciado del embalse. El vaciado del embalse se realiza de forma gradual de tal manera que no se afecte el proceso de sedimentación de las partículas.

En la Figura 3.4.4 se presentan los materiales y equipos usados durante la simulación de flujos con carga en suspensión.

3.4.6 Determinación de la concentración de sedimentos suspendidos totales en el embalse del modelo

Las muestras de agua se obtuvieron de cinco secciones del embalse y en una zona puntual (la de mayor sedimentación), en la primera sección se tomaron tres muestras: una frente a la bocatoma, otra en el centro de la sección y una en el margen izquierdo, en el resto de secciones se tomó una sola muestra en la línea de corriente dominante (ver la Figura 4.3.1 en el Capítulo 4). Todas las muestras corresponden a un volumen aproximado de 250 cm^3 y se tomaron a una profundidad de 10 cm medido desde la superficie. La medición de la turbidez de dichas muestras se efectuó de acuerdo a las especificaciones dadas en el Método 180.1 de la EPA y en el Método Estándar 2130B (nefelometría, en ambos casos), en el Laboratorio de Hidrofísica de Suelos del PROMAS – Universidad de Cuenca, usando un turbidímetro marca WTW, modelo Turb 555 (ver la Figura 3.4.5), con las siguientes especificaciones:

- Fuente de luz: Lámpara de tungsteno o LED IR
- Rango de medición: 0 – 10000 NTU/FNU/FAU
- Calibración: Automática en 1 – 5 puntos
- Tiempo de reacción: < 6 segundos
- Temperatura de servicio: 0 – 50 $^{\circ}\text{C}$
- Alimentación eléctrica: Aparato con conexión a la red de 100 – 240 VAC $\pm 10\%$ / 47 – 63 Hz
- Características especiales: ACA protegida con contraseña, métodos de relaciones para reducción de efectos perturbadores, transmisión, mediciones de flujo (sin presión/hasta 4 bar)



Figura 3.4.4: Materiales y Equipos usados durante los ensayos de discriminación de material sedimentado en el modelo físico

El cálculo de la concentración de sedimentos en las distintas secciones y puntos del embalse se realizó usando la ecuación desarrollada en la Sección 3.4.3, esto para cada condición de flujo.



Figura 3.4.5: Turbidímetro marca WTW, modelo Turb 555

3.4.7 Caracterización del material susceptible de sedimentación en el embalse del modelo

Las zonas de mayor sedimentación en el modelo fueron identificadas en términos generales en dos áreas del embalse, la primera se extiende desde la obra misma hasta la segunda curva siguiendo el margen izquierdo del embalse hacia aguas arriba, y la segunda, en el margen derecho de la cola del embalse. En la primera zona se observó distintas condiciones de flujo a lo largo de ella, por lo que esta se subdividió en tres microzonas (ver la Figura 4.3.1) en afán de determinar para cada una de ellas un diámetro de material sedimentado característico, el cual se espera que sea diferente para cada microzona en función de la condición de flujo.

En la primera zona las muestras de sedimento se obtuvieron de las láminas de polietileno colocadas en el lecho del embalse y de la superficie misma del modelo; en la segunda zona las muestras se obtuvieron directamente de la superficie del modelo, ya que en esta área el material tiende a depositarse en el margen del río natural, fuera del lecho. El material recuperado de las distintas zonas se llevó al laboratorio para su caracterización. La caracterización (en el laboratorio) se centró únicamente en determinar el rango de tamaños de sedimento para cada zona, esto mediante un análisis por cribado y un análisis hidrométrico realizado en las instalaciones del Laboratorio de Hidrofísica de Suelos del PROMAS – Universidad de Cuenca. Una vez establecido el rango de tamaños y luego de escalar al prototipo dicho rango, se procede a determinar las fracciones de grava, arena, limo y arcilla según su tamaño para cada zona del prototipo. Adicionalmente, como parte de la caracterización se determinó las velocidades de sedimentación de las partículas para cada zona.

El análisis hidrométrico se llevó a cabo en un cilindro de sedimentación con 20 *gr* de muestra seca al horno. El cilindro de sedimentación tiene 457 *mm* de alto y 63.5 *mm* de diámetro y está marcado para un volumen de 1000 *ml*. Como agente dispersor se usó

hexametáfosfato de sodio 4 %. El volumen de la suspensión de material dispersado se llevó hasta los 1000 ml añadiendo agua destilada. Los detalles del ensayo hidrométrico pueden revisarse en el *Libro de Normas* de la ASTM – Prueba D422. Una particularidad del ensayo realizado es que además de los tiempos de medición recomendados se tomaron otros adicionales, correspondientes a 15, 30 y 60 min con la finalidad de obtener una curva granulométrica más representativa. El equipo empleado para el ensayo hidrométrico consta de lo siguiente:

- Agua desionizada
- Hidrómetro ASTM 152H (-5 -60 g/L)
- Cilindro de sedimentación (1 L)
- Vaso de vidrio
- Tapón para el cilindro de sedimentación
- Cronometro
- Solución dispersante
- Termómetro
- Tamices: 2.00, 0.063 mm
- Batidora
- Alcohol Amílico

El análisis por cribado se ejecutó con equipo de Tamizadora Analítica AS 200 digit, marca Retsch. En la Figura 3.4.6 se presentan los equipos usados para la caracterización del material con respecto al tamaño.



(a) Equipo para análisis granulométrico

(b) Equipo para análisis hidrométrico

Figura 3.4.6: Equipos para caracterizar el material sedimentado en el modelo



Capítulo 4

Resultados y Discusión

4.1 Tasas de transporte de sedimento en suspensión esperadas para el río Negro

La estimación de las tasas de transporte de sedimento en suspensión esperadas para las distintas regularidades hidrológicas del río Negro se realizó en base al proceso de cálculo explicado en la Sección 3.4. Los valores numéricos de las distintas variables fueron establecidos como sigue:

- Caudal: 50, 75, 300, y 800 m^3/s (correspondientes a los caudales de interés explicados en la Sección 3.2), además, se consideran los caudales de 90 y 280 m^3/s para los cuales se dispone de mediciones de campo que más adelante se usaran para analizar y/o comparar datos.
- Ancho del cauce: 35, 37, 43, y 53 m , correspondientes a cada caudal de interés, respectivamente. Para los caudales de 90 y 280 m^3/s se tiene los siguientes anchos: 37,5 y 42,5 m , respectivamente.
- Pendiente del lecho: 1,5 %
- Coeficiente de rugosidad de Manning: 0,05
- Viscosidad cinemática: $\nu = 1,007 \times 10^{-6} m^2/s$
- Gravedad específica: 2,64
- Diámetro del sedimento (d_{50}): 4,6 mm (obtenido de la curva granulométrica del material del prototipo, Figura 3.4.1)

Considerando lo anterior y luego del respectivo proceso de cálculo y verificación, a continuación en la Tabla 4.1.1 se presentan los resultados tanto de la tasa de transporte como de la concentración de sólidos suspendidos totales esperadas para el río Negro para cada regularidad hidrológica considerada.

Caudal	Calado	Ancho del cauce	Velocidad	Tasa de transporte de suspensión			Concentración
				m^2/s	m^3/s	kg/s	
50	0.74	35	1.94	0.0017	0.0605	159.6	3.19
75	0.91	37	2.23	0.0037	0.1385	365.6	4.87
90	1.01	37.4	2.38	0.0054	0.2034	536.9	5.99
280	1.87	42.5	3.52	0.0515	2.191	5783.4	20.65
300	1.94	43	3.60	0.0585	2.517	6645.3	22.15
400	2.25	45	3.95	0.1002	4.511	11908.6	29.77
500	2.51	47	4.23	0.1491	7.008	18500.4	37.00
800	3.11	53	4.85	0.3205	16.986	44844.1	56.06

Tabla 4.1.1: Capacidad de transporte de sedimento en suspensión y concentraciones esperadas para el río Negro



Se debe anotar que estas tasas corresponden al análisis realizado para el d_{50} correspondiente a la granulometría encontrada en el cauce, e indican la capacidad máxima de transporte de sedimento en suspensión que podría alcanzar el río para las diferentes condiciones de flujo y sedimento (tamaño), en el supuesto de una disponibilidad ilimitada (lecho infinito) de material susceptible de suspensión en el lecho.

Está claro que en corrientes naturales esta suposición no se cumple, en particular para el río Negro las condiciones del cauce se alejan por mucho de la condición teórica supuesta, la disponibilidad de sedimento es muy limitada ya que el cauce es rocoso y no permite mayor erosión, además, gran parte de la superficie del lecho está cubierta de una capa de rocas cuyo tamaño y condición (acorazado) no permite la suspensión, por lo que no se cumple dicho criterio en su totalidad, es decir no todo el lecho está sujeto a suspensión.

Con respecto a la concentración de sedimentos suspendidos totales en el río Negro, por analogía se deduce que esta corresponde al valor máximo que cada condición de flujo puede tomar, es decir, suponiendo un lecho infinito de material susceptible de suspensión. Es importante tener presente que la estimación de las tasas de transporte y concentración de sólidos suspendidos se realizan considerando una distribución de concentraciones de tipo asintótica a lo largo de la profundidad del flujo.

Con la finalidad de comparar los datos calculados, se utilizó los resultados del “Estudio de sólidos en suspensión relevantes para el Proyecto Hidroeléctrico HIDROSANBARTOLO” (Pacheco & Carrillo, 2012a), en el cual se hace un análisis del muestreo convencional para la caracterización de material en suspensión y la estimación de las tasas de transporte de sedimento en el río Negro para caudales de 90 y 280 m^3/s (pico instantáneo). En dicho estudio, basados en que el ancho del cauce es muy grande en relación al calado correspondiente, y considerando la gran turbulencia que presenta el flujo en la sección de aforo, se ha optado por tomar muestras puntuales bajo el supuesto de que para esas condiciones el material sólido en suspensión está uniformemente distribuido a lo largo de la sección transversal y en toda la profundidad del flujo, de modo que cualquier muestra puntual es igualmente representativa. Dicho esto, los resultados del estudio se presentan en la Tabla 4.1.2.

Caudal	Concentración de Sedimento en Suspensión	Tasa de Transporte Estimada
m^3/s	kg/m^3	kg/s
90	0.435	39
280	1.82	509

Tabla 4.1.2: Tasas de transporte y concentración de sedimento en suspensión medida en el Río Negro

Al comparar los valores correspondientes de las Tablas 4.1.1 y 4.1.2, se puede observar que los valores de las tasas de transporte calculados presentan gran variación

respecto a las tasas medidas en campo, para las dos condiciones de flujo. Los cálculos realizados sobreestiman la tasa de transporte en un factor de alrededor de 20 en ambos casos, lo cual seguramente, se debe en primera instancia a que no se cumple el criterio de disponibilidad ilimitada de sedimento susceptible de suspensión y en menor grado a la distribución de concentraciones supuesta para cada caso, a través de la profundidad del flujo. Para el caso de la concentración de sedimentos, los valores calculados sobreestiman dicha concentración en un factor de 13 y 11 para los caudales de 90 y 280 m^3/s , respectivamente.

Como ya se mencionó, no se puede descartar que la alta discrepancia en los resultados se deba a las distintas consideraciones sobre la distribución de concentración de sedimentos, nótese que el estudio de campo considera una distribución constante de concentración a lo largo de la profundidad de flujo, mientras que en los cálculos se considera que esta tiene una distribución de tipo asintótica, como se puede ver en las Figuras 4.1.1 y 4.1.2 para los caudales de 90 y 280 m^3/s , respectivamente.

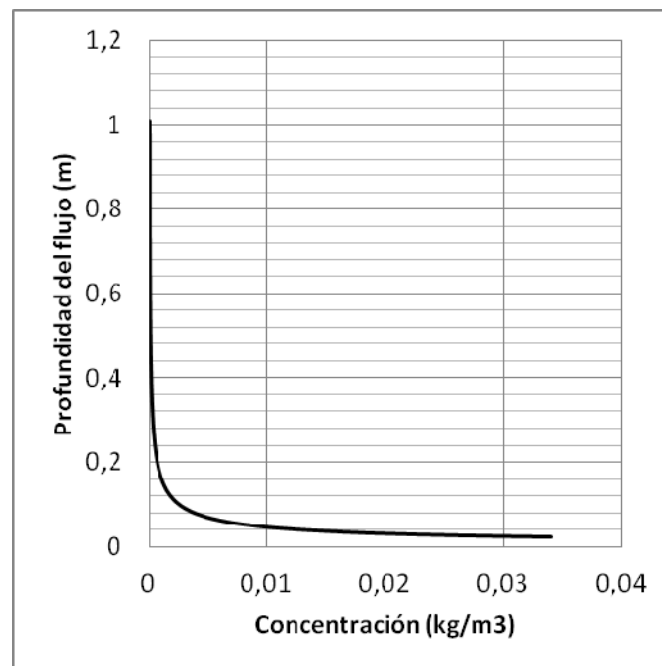


Figura 4.1.1: Distribución de concentración de sedimentos - Q = 90 m³/s

De las Figuras 4.1.1 y 4.1.2 se observa que teóricamente, la concentración de sedimentos se puede suponer constante a partir de cierta profundidad mas no para toda la capa de carga en suspensión, particularmente para el río Negro, según los cálculos, se puede suponer una distribución constante a partir de los 0.46 m y 1.32 m (medido desde el fondo del cauce) hasta la superficie del flujo, para caudales de 90 y 280 m^3/s , respectivamente. Sin embargo, hay que tener presente que por debajo de estos niveles la concentración de sedimentos es muy superior a la que está por encima de dichos niveles y que por tanto representa casi la totalidad de la tasa de transporte en suspensión, por lo que es posible que los aforos de campo bajo el supuesto de

concentración uniforme de sedimentos estén subestimando el valor real de la tasa de transporte. Aunque por otro lado, la poca disponibilidad de material susceptible de suspensión, la condición de lecho acorazado y la alta turbulencia del flujo pueden justificar plenamente dicha suposición.

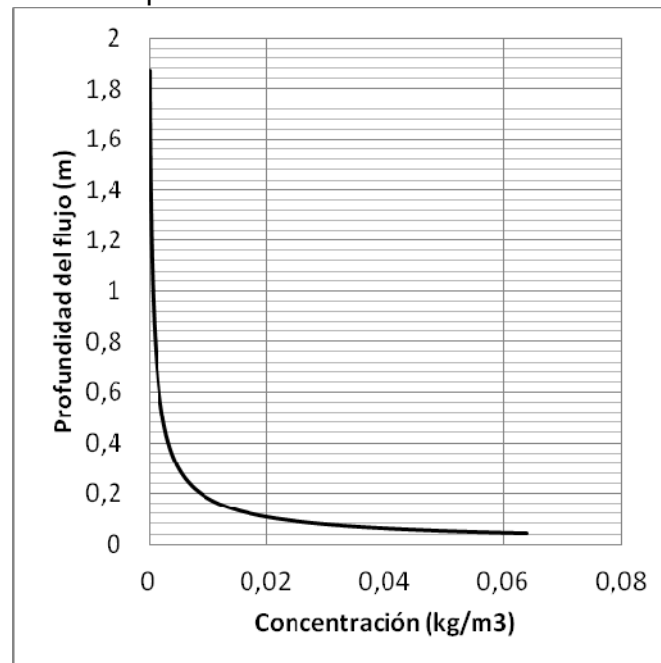


Figura 4.1.2: Distribución de concentración de sedimentos - Q = 280 m³/s

A pesar de lo expuesto anteriormente y estando conscientes de ello, las tasas de transporte de carga en suspensión esperadas para el río Negro varían entre los 159,6 – 44844,1 kg/s para regularidades hidrológicas que van desde los 50 hasta los 800 $m³/s$, respectivamente, en tanto que las concentraciones de sedimentos suspendidos varían en el orden de 3,19 – 56,06 $kg/m³$ para las mismas regularidades hidrológicas. Hay que tener presente estos valores tanto de tasas de transporte como de concentración de sedimentos, ya que si bien son teóricos, pueden llegar a suceder frente a una eventual degradación de la cuenca hidrográfica del río por actividades agrícolas, mineras o de cualquier otra índole (por ejemplo deslizamientos), considerando que como consecuencia de dicha degradación la condición del lecho se aproximaría a la condición hasta ahora supuesta (lecho infinito), dando lugar a tasas de transporte y concentraciones de sedimentos mas aproximadas al valor esperado, sin embargo, dichos valores en este caso están sujetos a ajustes por cambios tanto en las condiciones del flujo como en las características del sedimento (tamaño y densidad).

En la Figura 4.1.3 se presentan gráficamente los resultados del estudio de transporte de sedimentos en suspensión para el río Negro, se observa que la tendencia de la serie de datos es de tipo parabólico y el ajuste realizado a los mismos se presenta en la misma figura. Considerando que para el río Negro no se dispone de una curva de descarga de caudal solido en suspensión, dicho ajuste puede considerarse como tal bajo las suposiciones antes mencionadas y para el rango de caudal líquido indicado,



esto con la finalidad de poder estimar tasas de transporte de sedimento en suspensión (esperadas) para regularidades hidrológicas intermedias a las indicadas.

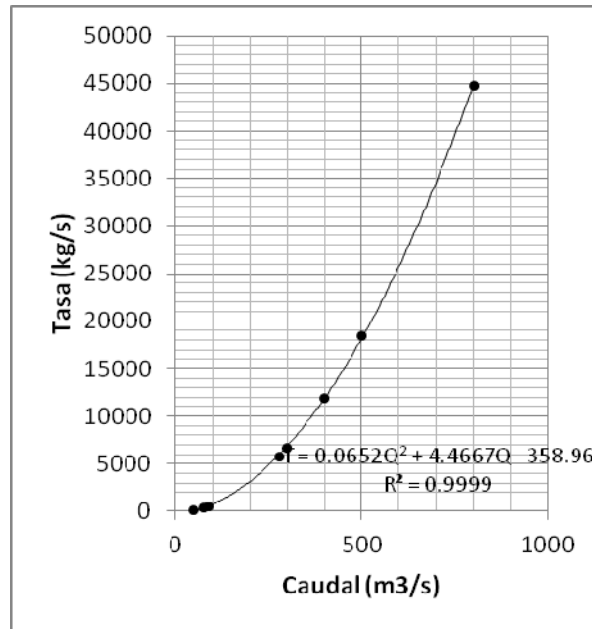


Figura 4.1.3: Tasas de transporte de sedimento en suspensión esperadas para el río Negro

De igual manera, en la Figura 4.1.4 se presentan los resultados de la variación de la concentración de sólidos suspendidos esperada para el río Negro, la tendencia de la serie de datos permite considerar una variación lineal entre el caudal líquido y la concentración de sedimentos esperada, para las condiciones de lecho supuestas (infinito), el ajuste realizado a la serie de datos se presenta en la misma figura, y puede ser usado para aproximar la concentración de sedimentos de una condición de flujo intermedia al rango indicado para sedimento de iguales características (tamaño y densidad).

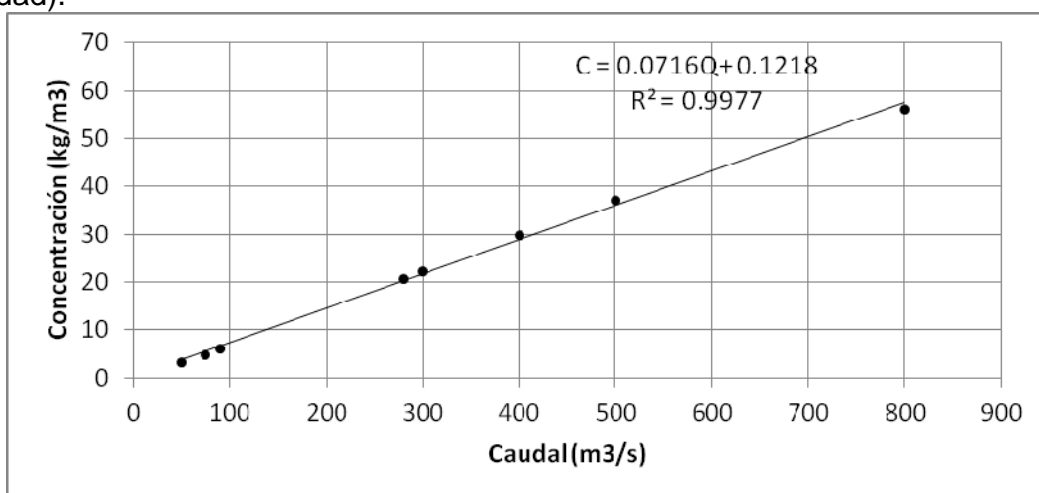


Figura 4.1.4: Concentración de sedimentos suspendidos esperada para el río Negro



4.2 Diámetros potenciales y tasas de transporte correspondientes para los caudales de interés

La estimación de los diámetros potenciales para el río Negro, se realizó de manera análoga a la estimación de las tasas esperadas, la diferencia radica en que el diámetro del sedimento para este caso es una variable dependiente en el sentido de que este se obtiene mediante un proceso iterativo, teniendo como restricción el criterio de inicio de movimiento en suspensión, sin dejar la de lado la condición de inicio de movimiento de fondo.

En cuanto a los criterios para el inicio de la suspensión se adoptaron tres, dos de los cuales, según la literatura garantizan una carga suspendida dominante (Raudkivi, 1990; y Julien, 1995), y otro que establece que el inicio de la suspensión ocurre cuando la velocidad de corte supera a la velocidad de sedimentación (Bagnold, 1966). En la Anexo A.1 se presentan los criterios adoptados para el análisis de diámetros potenciales.

Una vez terminado el proceso de iteración, es decir, luego de determinar el diámetro máximo que cada condición de flujo puede transportar en forma de suspensión, se procedió a estimar la tasa de transporte de igual forma que en la Sección 4.1. Los resultados de dicho cálculo (diámetros potenciales) se presentan en la Tabla 4.2.1.

Diámetros potenciales y tasas de sedimento correspondientes						
Caudal	Bagnold ($V^*/w_o > 1$)		Raudkivi ($V^*/w_o > 1.2$)		Julien ($V^*/w_o > 2.5$)	
	Diámetro	Tasa	Diámetro	Tasa	Diámetro	Tasa
m ³ /s	mm	kg/s	mm	kg/s	mm	kg/s
50	7.5	34.2	5.3	102	1.3	8407
75	9.4	38.4	6.6	120	1.6	10395
90	10.4	41.1	7.3	128	1.8	11268
280	19.3	63.4	13.4	198	3.2	18749
300	20.0	65.6	13.9	205	3.3	19372
400	23.2	73.8	16.1	230	3.8	22018
500	25.9	81.4	18.0	254	4.2	24437
800	32.0	102.3	22.3	320	5.2	30947

Tabla 4.2.1: Diámetros potenciales para el río Negro

El criterio para el inicio de la suspensión de van Rijn da diámetros exageradamente grandes cuya suspensión puede considerarse imposible bajo las condiciones que presenta en el río (tamaño de sedimento), por esta razón se descartan estos valores para el análisis de los de diámetros potenciales. De igual forma, se descartan los resultados obtenidos con criterios que garantizan el inicio de la suspensión o saltación, ya que por un lado los diámetros obtenidos son muy grandes para la condición del río y por otro la saltación es un fenómeno aun no bien definido en el sentido de que algunos



autores consideran a este tipo de movimiento como parte del arrastre de fondo mientras que otros lo incluyen en el transporte suspendido. En la Anexo A.2 se presentan los criterios de inicio de suspensión descartados en el análisis de diámetros potenciales.

Considerando lo expuesto hasta ahora, de la Tabla 4.2.1 se tiene que el criterio de Bagnold (1966) establece que para las regularidades hidrológicas consideradas, los máximos diámetros que se pueden transportar por suspensión oscilan entre 7.5 – 32.0 mm (para 50 y 800 m³/s, respectivamente), sin embargo, según el criterio de Raudkivi (1990) los diámetros máximos para una carga suspendida dominante son menores y oscilan entre 5.3 – 22.3 mm, por último, el criterio de Julien (1995) también para una carga suspendida dominante establece que los máximos diámetros que se pueden suspender oscilan entre 1.3 – 5.2 mm, para las mismas regularidades hidrológicas.

Asociado a los diámetros anteriores, se presentan también las tasas de transporte en suspensión para las distintas regularidades hidrológicas.

Se observa que según el criterio de Bagnold (1966) las tasas de transporte oscilan entre 34.2 – 102.3 kg/s, según Raudkivi (1990) las tasas oscilan entre 102 – 320 kg/s y según Julien (1995) las tasas de transporte de sedimento en suspensión oscilan entre 8407 – 30947 kg/s, para las distintas regularidades hidrológicas consideradas de interés. Nótese la gran variabilidad de dichas tasas según los criterios establecidos.

En la Figura 4.2.1 se presenta gráficamente los rangos de diámetros potenciales para cada criterio considerado.

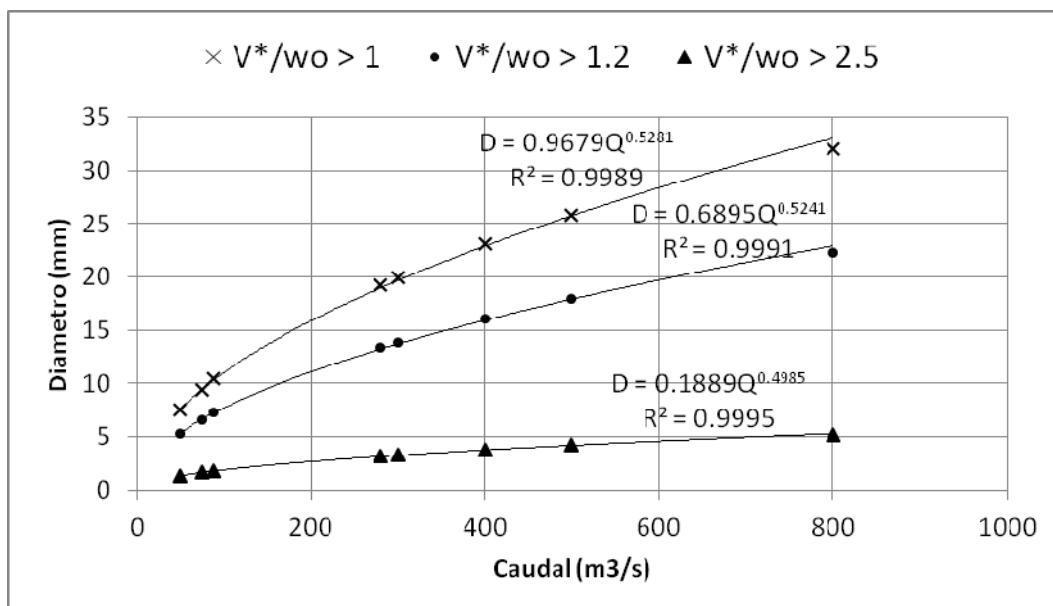


Figura 4.2.1: Diámetros potenciales de sedimento en suspensión para el río Negro

Se observa que en todos los casos la tendencia de la serie de datos es potencial, la diferencia radica en que el criterio dado por Julien presenta menos variabilidad en el rango de diámetros potenciales (1,3–5,2 mm) en comparación con los demás criterios. De igual manera, en la misma figura se presenta el ajuste potencial de las distintas series de datos, esto con el fin de poder obtener diámetros potenciales aproximados para otras condiciones de flujo dentro del rango.

En la Figura 4.2.2 se presentan gráficamente los valores de las tasas de transporte asociadas a los diámetros potenciales calculados para cada criterio de inicio de movimiento de carga en suspensión. Para todos los criterios, las tasas de transporte crecen con la misma tendencia que los diámetros potenciales (potencial). La diferencia en los rangos de diámetros potenciales se traduce en diferencias notables de tasas de transporte según el criterio.

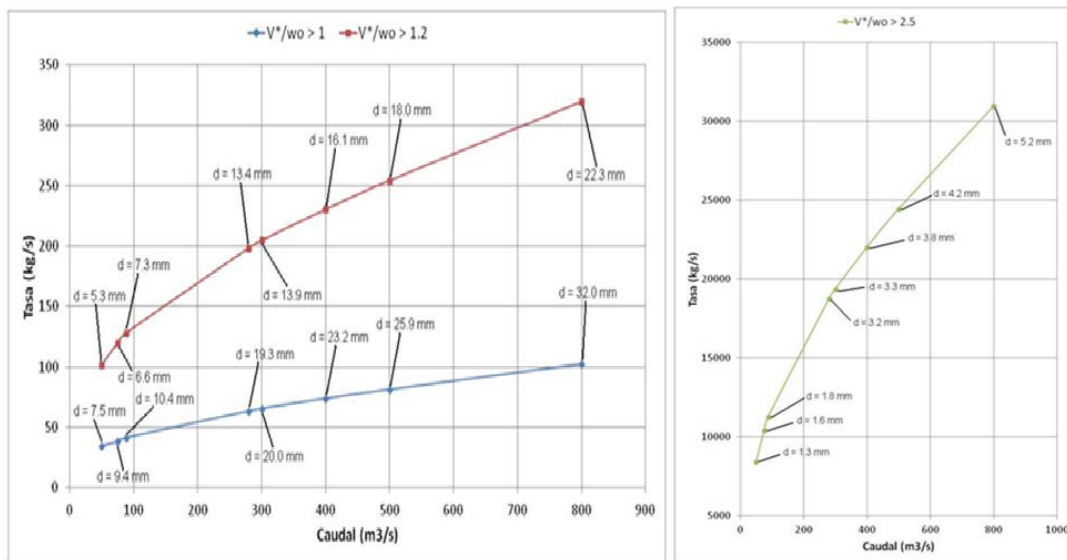


Figura 4.2.2: Tasas de transporte asociadas a los diámetros potenciales

Sobre la curva granulométrica del lecho del río Negro, en la Figura 4.2.3 se presenta gráficamente los rangos de diámetros máximos susceptibles al transporte por suspensión para los diferentes caudales y para cada criterio de inicio de movimiento de carga en suspensión considerado. Nótese que de acuerdo al material existente en el lecho del río, todos los rangos de diámetros potenciales son posibles, es decir, existe en el lecho material de tamaño mayor o igual al calculado como potencial, sin embargo, de acuerdo con las características del material analizado en el documento “Estudio de sólidos en suspensión relevantes para el Proyecto Hidroeléctrico HIDROSANBARTOLO” (Pacheco & Carrillo, 2012a) se tiene que para un caudal de 280 m³/s el máximo diámetro transportado en suspensión corresponde a 1 mm (ver la Tabla 4.2.2 y la Figura 4.2.4), tamaño de sedimento que es considerablemente menor a cualesquiera de los calculados como potenciales. Por esta razón, sería lógico y conservador establecer como diámetros potenciales (máximos) los correspondientes al

criterio de Julien, ya que para este caso, el correspondiente teórico según este criterio es de 3.2 mm, notablemente sobreestimado (en más del triple), por lo que el resto de criterios lo sobreestimarían aun más.

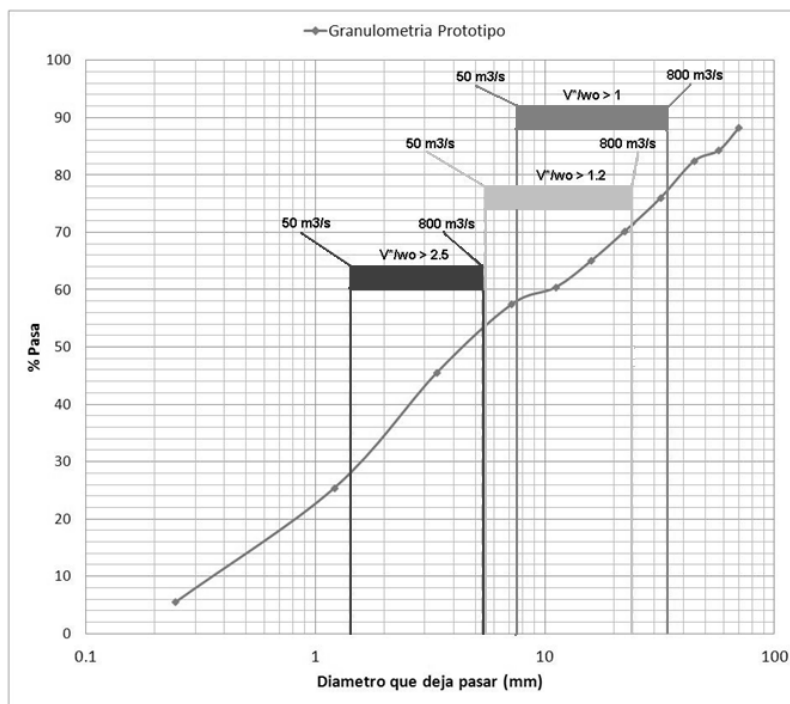


Figura 4.2.3: Diámetros susceptibles a suspensión según los diferentes criterios

Una vez establecido el criterio para los diámetros potenciales del río Negro, es necesario hacer un análisis de las tasas de transporte de sedimento en suspensión. En primer lugar se debe indicar que las tasas esperadas se establecieron como tales en función del d_{50} del material del lecho del río para todas las regularidades hidrológicas (método convencional), sin embargo, el análisis de diámetros potenciales indica que asociado a cada caudal existe un tamaño máximo de sedimento que puede ser transportado en suspensión (en todos los casos menor que el d_{50} del material del lecho, excepto para $800 \text{ m}^3/\text{s}$), consecuentemente las tasas de transporte calculadas con el método convencional son inferiores a las correspondientes a los diámetros potenciales. Por esta razón, se cree conveniente ajustar las tasas hasta ahora presentadas como esperadas. En la Tabla 4.2.3 se presenta dicho ajuste junto con los diámetros máximos correspondientes. Nótese que para el caudal de $800 \text{ m}^3/\text{s}$ la tasa ajustada es menor que la calculada con el método convencional, esto se debe a que el modelo implementado para este fin no considera el efecto de una granulometría bien graduada.



Abertura del tamiz (μm)	% Retenido Acumulado	% Pasa	Minerales
1000	1,50	98,50	cuarzo, feldespatos, moscovita y mica
500	4,15	95,85	
250	12,42	87,58	Arena fina y otros
125	86,37	13,63	
63	98,80	1,20	Arena fina
-	100,00	0,00	

Tabla 4.2.2: Análisis granulométrico del material en suspensión analizado luego del muestreo convencional en el río Negro

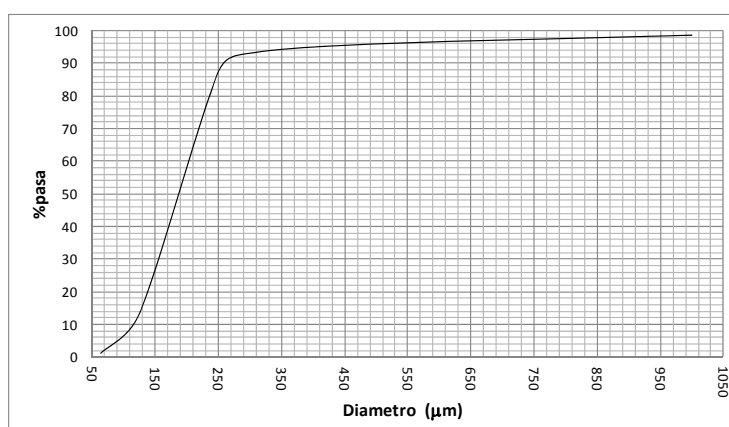


Figura 4.2.4: Curva granulométrica del material en suspensión analizado luego del muestreo convencional en el río Negro

Caudal	Tasas esperadas ajustadas	Diámetro máximo
m^3/s	kg/s	mm
50	8407	1.3
75	10395	1.6
90	11268	1.8
280	18749	3.2
300	19372	3.3
400	22018	3.8
500	24437	4.2
800	30947	5.2

Tabla 4.2.3: Tasas máximas de transporte de sedimento en suspensión para el río Negro según el criterio de Julien (1995)



Nótese además que cada regularidad hidrológica del río Negro transporta en suspensión un diámetro característico máximo del material del lecho del río (ver la Figura 4.2.3), en la Tabla 4.2.4 se presenta dicho diámetro característico para cada regularidad, sin embargo, debe advertirse que estos datos son exclusivamente para las características hidrológicas y de sedimento que presenta el río Negro.

Adicionalmente, en el documento “Estudio de sólidos en suspensión relevantes para el Proyecto Hidroeléctrico HIDROSANBARTOLO” se dispone de una caracterización del material que corresponde a la porción sedimentable y, de acuerdo a los análisis realizados en el laboratorio se establece lo siguiente:

- Elementos constitutivos: arena fina, partículas de cuarzo, partículas de feldespato, micas y moscovita (ver la Tabla 4.2.2).
- Para la arena fina se establecen diámetros característicos menores a 0,1 mm en un porcentaje del orden de 10 % (aproximadamente).
- Para las partículas de diámetro de hasta 0,3 mm se establecen porcentajes del orden del 90 %.
- De manera particular para los minerales mencionados se establece para diámetros mayores a 0,3 mm un porcentaje del orden del 10 %.
- Para los diámetros mayores ($> 0,3 \text{ mm}$) se han determinado velocidades en el rango de 0,01 a 0,04 m/s. mientras que para las partículas de diámetros inferiores (arena fina) se han determinado velocidades en el rango de 0,005 a 0,02 m/s.

Caudal m^3/s	Diámetros característicos d_x	Diámetro (mm)
50	$\approx d_{25}$	1.3
75	$\approx d_{31}$	1.6
90	$\approx d_{33}$	1.8
280	$\approx d_{45}$	3.2
300	$\approx d_{46}$	3.3
400	$\approx d_{48}$	3.8
500	$\approx d_{55}$	4.2
800	$\approx d_{72}$	5.2

Tabla 4.2.4: Diámetros característicos susceptibles de suspensión para el río Negro

Finalmente, es importante mencionar que todas las tasas calculadas consideran un lecho de granulometría uniforme, no obstante, como se observa en la Figura 4.2.3, la granulometría del lecho del río Negro es prácticamente todo lo contrario (bien graduada), y consecuentemente, todas las partículas con diámetros menores a estos máximos también se transportarían por suspensión afectado de esta manera el valor de las tasas calculadas. Por esta razón, las tasas hasta ahora presentadas se deberán ajustar aun más mediante un cálculo que considere el efecto de una granulometría bien

graduada, un método para ello lo proporciona van Rijn en la referencia (van Rijn, 2007c), sin embargo dicho ajuste ha estado fuera del alcance de este trabajo.

4.3 Variación de la concentración de sólidos suspendidos en el embalse

Las tasas calculadas anteriormente representan la capacidad máxima posible de transporte de sedimentos para el río en su estado natural, con el emplazamiento de la obra cambia por completo las condiciones de flujo, al elevarse artificialmente los calados del río hay un aumento grande de la sección transversal, la velocidad de la corriente disminuye, y aun para caudales grandes esta puede tener valores muy pequeños que favorecen la sedimentación.

Para el análisis de las concentraciones en el embalse se consideran 8 zonas puntuales de muestreo, las mismas que se presentan en la Figura 4.3.1.

Las zonas P1, P2, P3, P4 corresponden a la línea de corriente principal, la cual según las observaciones en el modelo no varían considerablemente para los diferentes caudales. Los puntos de muestreo P1, P1.1, P1.2 corresponden a una sección transversal frente a la bocatoma, donde el flujo preferencial dependerá de la operación en las compuertas de lavado, del caudal captado por la bocatoma y del caudal que pasa por el azud. La zona P2.1 es considerada como una zona de sedimentación de material fino debido a que se observan bajas velocidades, esto para caudales relativamente pequeños, en tanto que para caudales mayores la corriente principal altera su dirección provocando un flujo rotacional en esta zona, como se puede ver en la Figura 4.3.6.

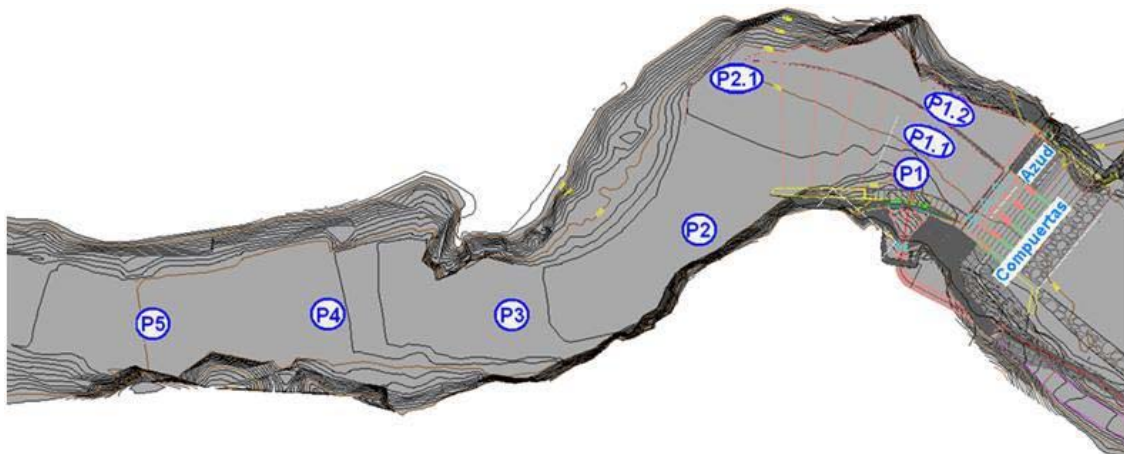


Figura 4.3.1: Zonas de muestreo para zonificación de concentraciones en el embalse

4.3.1 Variación de la concentración aguas arriba de la obra proyectada

De manera general es de esperarse que a medida que nos acerquemos al embalse desde aguas arriba, las concentraciones disminuyan notablemente, sin embargo, esto



puede estar sujeto a variaciones debido a que las secciones transversales no son uniformes, además también dependerá de la velocidad y dirección de los flujos preferenciales que obedecen a la morfología del cauce y al caudal. En la Tabla 4.3.1 se presenta los resultados de las concentraciones obtenidas para los diferentes caudales para las zonas P1, P2, P3, P4, P5, fijadas en el modelo, en la Figura 4.3.2 se presentan de manera grafica estos resultados.

Concentración (kg/m^3)							
UBICACIÓN	Caudal (m^3/s)						
	53	73	88	191	280	303	400
P1 (bocatoma)	0.141	0.206	0.219	0.297	0.356	0.355	0.478
P2	0.158	0.193	0.218	0.3	0.316	0.333	0.42
P3	0.147	0.226	0.243	0.306	0.349	0.379	0.422
P4	0.179	0.227	0.241	0.296	0.32	0.34	0.417
P5	0.168	0.26	0.283	0.316	0.366	0.374	0.411
C_{max}	0.179	0.26	0.283	0.316	0.366	0.379	0.478
C_{min}	0.141	0.193	0.218	0.296	0.316	0.333	0.411
C_{med}	0.158	0.222	0.241	0.303	0.341	0.356	0.43
σ	0.0153	0.0257	0.0263	0.0083	0.0222	0.0205	0.0275

Tabla 4.3.1: Concentraciones en los puntos P1, P2, P3, P4, y P5 del embalse

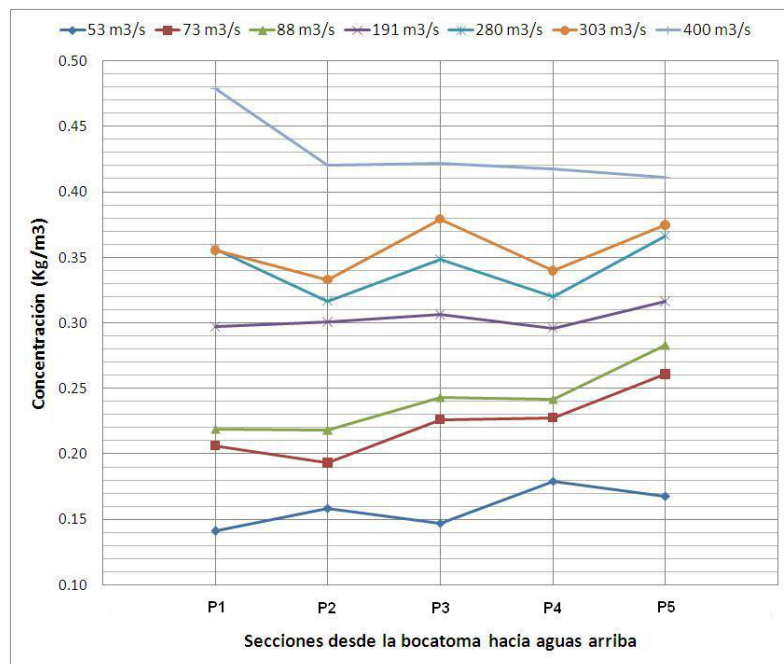


Figura 4.3.2: Concentraciones en el embalse aguas arriba



En la grafica se puede apreciar claramente el aumento de concentración de sólidos suspendidos a lo largo del embalse a medida que el caudal crece, esto es general para todos los puntos de medición (P1, P2, P3, P4, P5,). En cuanto a la diferencia de concentraciones en función de la distancia hacia aguas arriba, se esperaba que la variación sea más pronunciada, sin embargo, en la grafica se observa que estos rangos en general no son considerables. Cabe destacar que para caudales pequeños (hasta $90 \text{ m}^3/\text{s}$) se puede apreciar la disminución de las concentraciones a medida que el flujo se acerca al embalse. A partir de este caudal las concentraciones no muestran una tendencia fija y se muestran en un rango constante. Para estos puntos, las concentraciones varían de 0.141 a 0.478 kg/m^3 para las regularidades hidrológicas de entre 53 a $400 \text{ m}^3/\text{s}$, el mínimo valor pertenece al punto en la bocatoma (P1) para un caudal de $53 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que la máxima concentración corresponde al mismo punto, pero con un caudal de $400 \text{ m}^3/\text{s}$ este notable incremento de las concentraciones para caudales mayores, es debido al cambio en las condiciones del flujo que se genera al operar las compuertas de lavado, lo cual se analizará en la siguiente parte.

4.3.2 Variación de la concentración en la sección frente a la bocatoma

Cerca de la obra, el flujo en la sección transversal dependerá en su mayoría de la operación de las compuertas de lavado y del azud, este último está diseñado para un caudal máximo de $180 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo que para caudales de avenidas mayores a este valor se requiere la apertura de una o más compuertas según el caudal a evacuar. A continuación se muestra las condiciones de operación de compuertas y azud usada en los ensayos para los diferentes caudales, en todos los casos se considera la bocatoma abierta con su máximo caudal de captación ($30 \text{ m}^3/\text{s}$):

- Para el caudal de $53 \text{ m}^3/\text{s}$ se consideró cerradas todas las compuertas de lavado, de modo que para la captación ingresen $30 \text{ m}^3/\text{s}$ y el resto ($Q_a = 23 \text{ m}^3/\text{s}$) sean evacuado por el azud.
 - Bocatoma: $30 \text{ m}^3/\text{s}$
 - Azud: $23 \text{ m}^3/\text{s}$
- Para el caudal de $73 \text{ m}^3/\text{s}$ de igual manera no se abrió ninguna compuerta, de modo que la diferencia de caudal sea nuevamente evacuado por el azud ($Q_a = 43 \text{ m}^3/\text{s}$).
 - Bocatoma: $30 \text{ m}^3/\text{s}$
 - Azud: $43 \text{ m}^3/\text{s}$
- Para el caudal de $88 \text{ m}^3/\text{s}$ igualmente solo trabaja el azud.
 - Bocatoma: $30 \text{ m}^3/\text{s}$

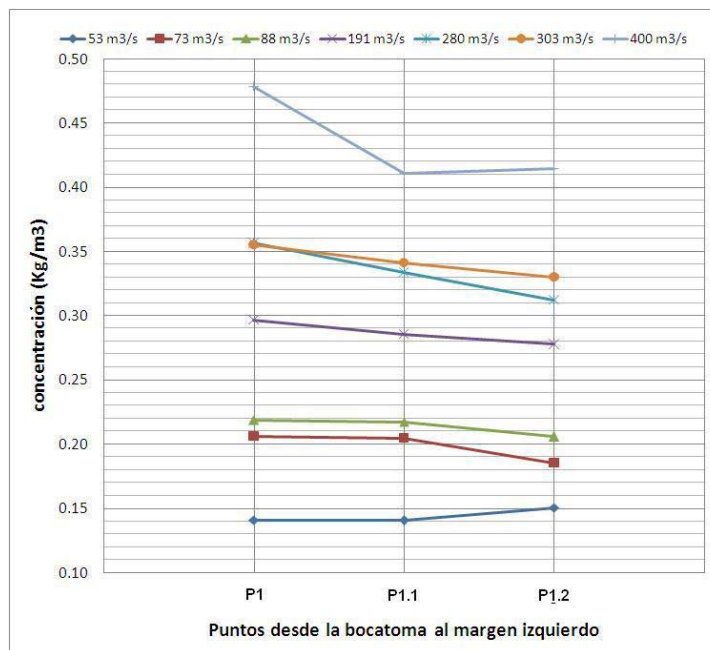


- Azud: 58 m^3/s

- De la misma manera para el caudal de 190 m^3/s no fue necesario la apertura de las compuertas.
 - Bocatoma: 30 m^3/s
 - Azud: 160 m^3/s
- En el caudal de 280 m^3/s se abrió la compuerta pequeña de lavado, y los caudales fueron distribuidos de la siguiente manera:
 - Bocatoma: 30 m^3/s
 - Azud: 136 m^3/s
 - Compuerta de lavado pequeña: 114 m^3/s
- Para el caudal de 303 m^3/s la distribución es la siguiente:
 - Bocatoma: 30 m^3/s
 - Azud: 160 m^3/s
 - Compuerta de lavado pequeña: 113 m^3/s
- Finalmente para 400 m^3/s a más de abrir la compuerta pequeña de lavado, se abrió también una de las compuertas grandes de lavado (adyacente a la de lavado), de esta forma la distribución del caudal es:
 - Bocatoma: 30 m^3/s
 - Azud: 141 m^3/s
 - Compuerta de lavado pequeña: 114 m^3/s
 - Compuerta de lavado grande: 115 m^3/s

Las concentraciones medidas en la sección frente a la bocatoma (esto es los puntos de muestreo P1, P1.1, P1.2) para los diferentes caudales se presentan a continuación en la Tabla 4.3.2 y también de manera grafica en la Figura 4.3.3.

Concentración (kg/m^3)							
UBICACIÓN	Caudal (m^3/s)						
	53	73	88	191	280	303	400
P1 (bocatoma)	0.141	0.206	0.219	0.297	0.356	0.355	0.478
P1.1	0.140	0.204	0.217	0.285	0.333	0.341	0.411
P1.2	0.150	0.185	0.206	0.278	0.312	0.330	0.414
C_{med}	0.144	0.198	0.214	0.286	0.334	0.342	0.434
σ	0.0056	0.0116	0.0072	0.0097	0.0220	0.0127	0.0382

Tabla 4.3.2: Concentraciones frente a la bocatoma (puntos P1, P1.1, y P1.2)

Figura 4.3.3: Concentraciones frente a la bocatoma para el modelo

Se puede observar en la Figura 4.3.3 que para caudales bajos (53, 73, 88 m^3/s) las concentraciones medidas en la sección transversal frente a la bocatoma (ver Figura 4.3.1) son casi constantes, y no presentan mayor variación (ver la desviación estándar en la Tabla 4.3.2). A medida que los caudales crecen se observa que las mayores concentraciones tienden hacia el margen donde se encuentra ubicada la bocatoma (posición P_1). Esto se debe a que para caudales grandes ($>210 m^3/s$) se requiere la apertura de las compuertas de lavado, operación que favorece a la suspensión de material en esta zona por el cambio de las condiciones del flujo (aumento de velocidad, básicamente). El momento de realizar los ensayos para estos caudales grandes las compuertas elegidas para evacuar el exceso de caudal fueron las dos compuertas de lavado más cercanas a la bocatoma, esto con la finalidad de estudiar los casos más desfavorables para la misma, por lo que era esperado el aumento de concentraciones en esta zona para caudales grandes.

4.3.3 Variación de la concentración en la Zona P2.1

Según las observaciones en el modelo físico, para caudales menores se puede ver que en esta zona las velocidades son relativamente bajas lo cual podría favorecer a la sedimentación de material de grano fino, por esta razón se ha considerado esta zona para el muestreo.

Para determinar las corrientes preferenciales en el embalse, se ha empleado trazador (violeta geneciana) con el cual se ha observado (Figura 4.3.4) que las velocidades más altas se presentan en el margen derecho del río en el lado donde se ubica la bocatoma, en comparación con la zona P2.1 de la margen izquierda.

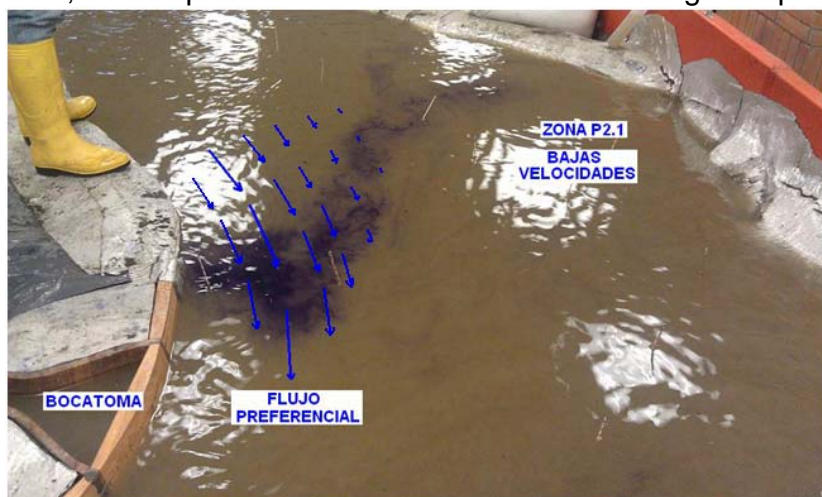


Figura 4.3.4: Flujo preferencial para caudales bajos

Luego de recolectar las muestras y analizar la turbiedad, se obtuvieron las concentraciones mostradas en la Tabla 4.3.3 y graficadas en la Figura 4.3.5 para los diferentes caudales.

Concentración (kg/m^3)							
UBICACIÓN	Caudal (m^3/s)						
	53	73	88	191	280	303	400
P2.1	0.138	0.165	0.164	0.248	0.329	0.328	0.413

Tabla 4.3.3: Concentración en la Zona P2.1 del embalse

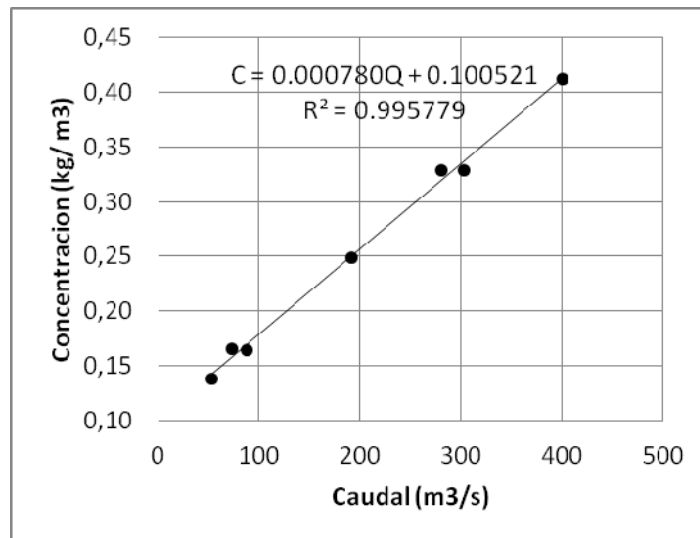


Figura 4.3.5: Variación de concentración en la zona P2.1 para los diferentes caudales

Al comparar estas concentraciones con las concentraciones de las Tablas 4.3.1 y 4.3.2, es decir con el resto de puntos de muestreo, está claro que efectivamente las obtenidas en esta zona son considerablemente menores en este punto que en cualquier otro del embalse, sin embargo esto ocurre solo para los caudales pequeños (53, 73, y 88 m^3/s). A medida que el caudal crece la diferencia entre la concentración en el punto $P_{2,1}$ y las obtenidas en otros puntos se acorta cada vez más, hasta que para caudales mayores esta zona muestra concentraciones similares a las obtenidas en la sección transversal frente a la bocatoma.

Lo anterior sugiere que para caudales grandes la zona P2.1 donde se observaban velocidades relativamente bajas, ahora presenta velocidades aproximadamente del mismo orden que las encontradas más adelante en la sección frente a la bocatoma. Esto se debe a que para los caudales pequeños el flujo preferencial recorre el margen derecho del río en dirección a la bocatoma con lo que deja a la zona P2.1 en aparente reposo. Con el incremento del caudal ($>280 m^3/s$) el flujo en el embalse cambia (ver Figura 4.3.6), este se traslada más hacia el centro, este cambio en la trayectoria del flujo para caudales grandes provoca un flujo rotacional en la zona de muestreo P2.1 que incrementa las velocidades respecto a las observadas para caudales pequeños.

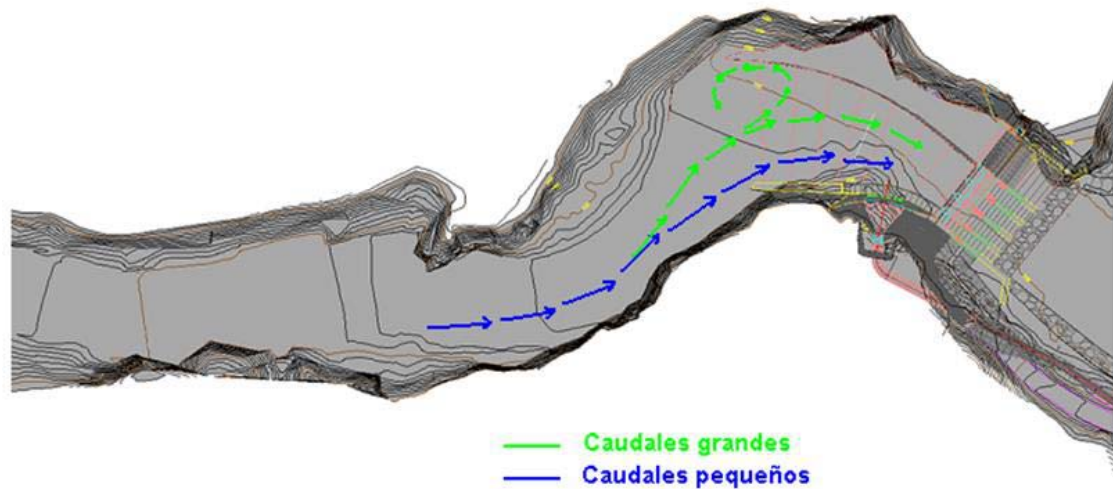


Figura 4.3.6: Cambio de las condiciones de flujo para la zona P2.1

En general las concentraciones medidas en todo el embalse varían en un rango de entre 0.138 a 0.478 kg/m^3 para regularidades hidrológicas desde 53 a $400 \text{ m}^3/\text{s}$, la mínima concentración se da en la zona P2.1 para el caudal de $53 \text{ m}^3/\text{s}$ en tanto que el valor máximo corresponde a al punto P1 frente a la bocatoma para el caudal de $400 \text{ m}^3/\text{s}$ esto debido a la operación de las compuertas como ya se explicó anteriormente.

4.4 Caracterización del material sedimentado

La tendencia general de la sedimentación en embalses nos dice que las partículas de mayor tamaño se sedimentarán en la cola del mismo, y las de menor tamaño hacia aguas abajo cerca de la presa de manera escalonada, esto para materiales con una extensa granulometría, como la encontrada en el río Negro. A medida que los sedimentos se acercan a la presa desde la cola del embalse, la velocidad en la sección disminuye al igual que los esfuerzos de corte y el material en suspensión empieza a transportarse mediante saltación, al continuar el descenso de velocidad el material finalmente se sedimenta. Sólo las partículas más finas de la carga de suspensión pueden no sedimentar y seguir hacia aguas abajo.

Según lo expuesto anteriormente, se espera que en las zonas aguas arriba el material sedimentado en el modelo sea de mayor tamaño, en tanto que cerca de la presa se espera depósitos de materiales finos (limos y arcillas). Mediante observaciones hechas en el modelo físico se establecieron las zonas de la Figura 4.4.1 para la recolección y caracterización de material sedimentado.

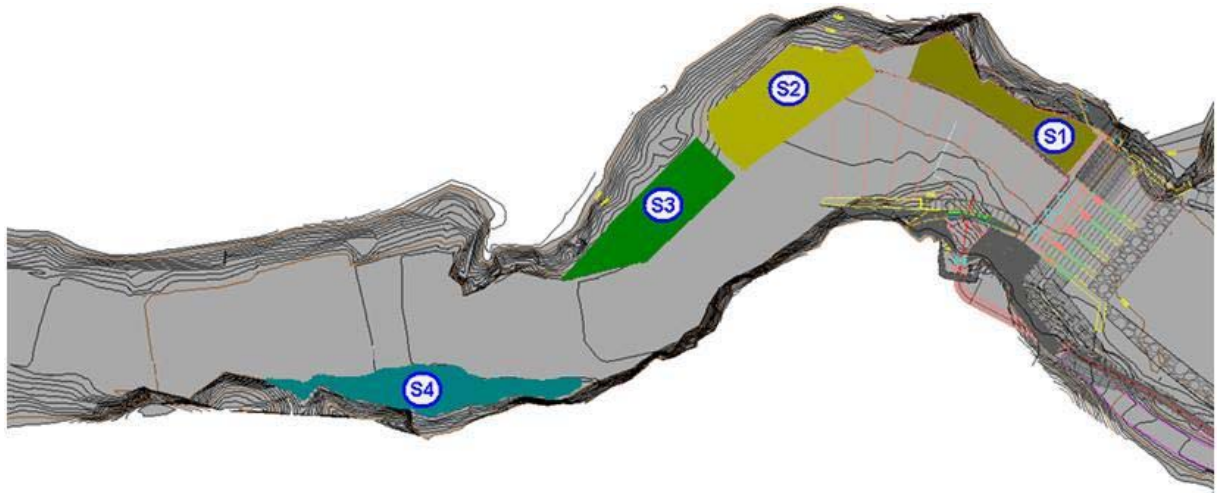


Figura 4.4.1: Zonas de muestreo de material sedimentado en el embalse

Como se explicó en la Sección 3.4.7 se usaron láminas de polietileno para la toma de muestra en las zonas S1 y S2, en tanto que para las zonas S3 y S4 el material se obtuvo recogiendo directamente de las orillas donde se había sedimentado. Ver la Figuras 3.4.4 y 4.4.2.

Un factor importante en la toma de muestras es que para obtener las mismas se requiere vaciar el embalse, lo que puede afectar la muestra según la velocidad con que se proceda. Los ensayos se realizaron de la siguiente manera: se tomaron dos muestras para cada una de las zonas S1, S2, S3, la primera muestra al finalizar los ensayos para los caudales de hasta $280 \text{ m}^3/\text{s}$ (16.8 l/s en el modelo) luego de un vaciado rápido del embalse, y la segunda muestra al finalizar el ensayo para un caudal de $400 \text{ m}^3/\text{s}$ (22.6 l/s en el modelo) empleando un vaciado lento en el embalse. Los tiempos de vaciado del embalse para los dos ensayos se muestran en la Tabla 4.4.1.

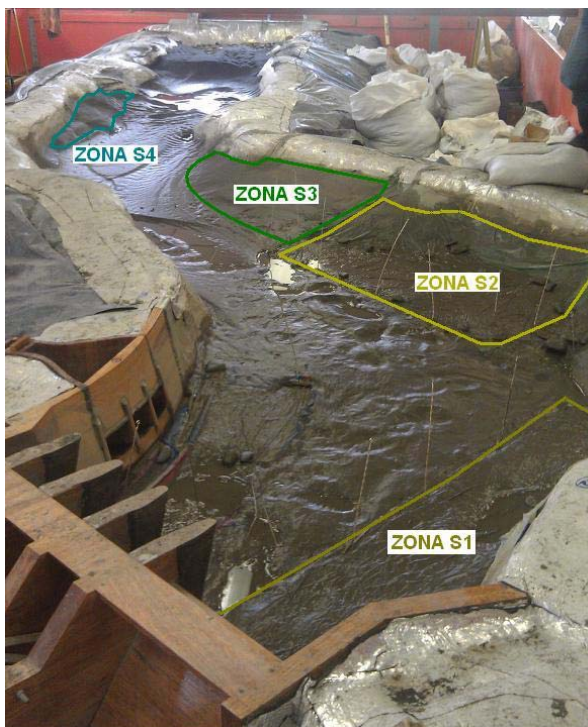


Figura 4.4.2: Material sedimentado en el modelo

Tipo de vaciado	Tiempo de vaciado	
	Modelo (min)	Prototipo (h)
Vaciado Lento (VL)	90	10.6
Vaciado Rápido (VR)	15	1.8

Tabla 4.4.1: Tiempos de vaciado para los ensayo

Para la zona S4 se ha tomado una sola muestra luego de todos los ensayos de hasta de $400 \text{ m}^3/\text{s}$.

El análisis granulométrico se realizó mediante tamices para la parte gruesa (entre 700 y $63 \mu\text{m}$) y con el método del hidrómetro para la parte fina ($\leq 63 \mu\text{m}$), con lo que se obtuvo las curvas granulométricas para las diferentes zonas y caudales.

Empleando la teoría de la Sección 2.7.1 con la que se escaló el sedimento para el modelo en la Sección 3.4.1, se procede a escalar el sedimento obtenido en el modelo para obtener las curvas granulométricas esperadas para el prototipo en las distintas zonas del embalse. Las curvas granulométricas para las diferentes zonas se presentan en el Apéndice D.

En base a las curvas granulométricas se ha clasificado el material por tamaños según la Norma DIN 4020 (Tabla 4.4.2)



A continuación en las Tablas 4.4.3 y 4.4.4 se presenta un resumen de los resultados de las granulometrías obtenidas en las distintas zonas del embalse, para el modelo y para el prototipo, para los dos ensayos realizados, el uno con caudales de hasta 280 m³/s (en el que se efectuó el vaciado rápido), y el otro para un caudal de hasta 400 m³/s (con un vaciado lento).

NORMA DIN(4022)	
Arcilla	<0.0002 mm
Limo	0.002 - 0.063 mm
Arena fina	0.063 - 0.2 mm
Arena media	0.2 - 0.6 mm
Arena gruesa	0.6 - 2 mm
Grava fina	2 - 6 mm
Grava media	6 - 20 mm
Grava gruesa	20 - 60 mm

Tabla 4.4.2: Clasificación según la norma DIN 4020

MODELO	ZONAS DE MUESTREO					
	Para Q = 280 m ³ /s			Para Q = 400 m ³ /s		
Material	S1	S2	S3	S1	S2	S3
Arcilla <0.0002 mm	1.0%	1.0%	1.0%	0.5%	1.9%	0.6%
Limo 0.002 - 0.063 mm	27.8%	25.2%	22.3%	50.2%	44.5%	24.8%
Arena fina 0.063 - 0.2 mm	51.2%	47.8%	47.7%	41.3%	47.6%	62.6%
Arena media 0.2 - 0.6 mm	20.0%	26.0%	29.0%	8.0%	6.0%	12.0%
d₅₀ (mm)	0.092	0.125	0.130	0.062	0.067	0.110
C_u = D₆₀/D₁₀	5.00	8.21	5.71	5.10	5.13	5.20

Tabla 4.4.3: Resumen de las granulometrías realizadas en el modelo para las zonas S1, S2, S3.

PROTOTIPO	ZONAS DE MUESTREO					
	Para Q = 280 m ³ /s (VR)			Para Q = 400 m ³ /s (VL)		
Material	S1	S2	S3	S1	S2	S3
Arcilla <0.0002mm	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Limo 0.002 - 0.063mm	9.8%	12.0%	7.0%	36.0%	34.0%	10.0%
Arena fina 0.063 - 0.2mm	23.2%	16.0%	18.0%	19.0%	17.0%	18.0%
Arena media 0.2 - 0.6mm	33.0%	26.0%	28.0%	31.0%	33.0%	34.0%
Arena gruesa 0.6 - 2mm	14.0%	20.5%	19.0%	5.0%	10.0%	26.0%
Grava fina 2 - 6 mm	8.0%	14.0%	12.0%	3.0%	2.5%	7.5%
Grava media 6 - 20 mm	12.0%	11.5%	16.0%	6.0%	3.5%	4.5%
d₅₀ (mm)	0.320	0.510	0.530	0.180	0.200	0.400
C_u = D₆₀/D₁₀	6.98	15.66	11.84	6.05	6.41	8.36

Tabla 4.4.4: Resumen de las granulometrías en el modelo (S1, S2, S3) escaladas para el prototipo

Se puede observar en la Tabla 4.4.4 que el diámetro máximo encontrado en las zonas de sedimentación no supera los 20 mm para el prototipo, cabe mencionar que el material recolectado pertenece a sedimentación y arrastre de fondo. En general, los mayores porcentajes del material sedimentado los componen arenas de entre 0.063 a 2 mm para el prototipo.

Las zonas S1, S2, S3 se ubican en este orden aguas arriba de la presa (ver Figura 4.4.1). Al observar los diámetros d_{50} para cada zona se aprecia lo que se dijo anteriormente a cerca de la sedimentación escalonada, está claro que el material más fino se encuentra cerca del azud en la zona S1.

Otro aspecto que se observa es la influencia que tiene la velocidad de vaciado del embalse en la granulometría del material, en general para las zonas S1 y S2 que se ubican más cerca de la presa, la granulometría encontrada luego del vaciado rápido es visiblemente más gruesa que la encontrada en las mismas zonas para el vaciado lento. La influencia de la velocidad de vaciado en la distribución de tamaños del sedimento para la zona S3 también se puede notar en los porcentajes de arena y de grava.

La zona S4 se encuentra aguas arriba en la parte recta del río, en el margen derecho, al realizar el vaciado del embalse se observó una gran cantidad de material que se sedimenta en este margen (ver Figura 4.4.3), este sedimento es visiblemente más grueso que el de las zonas anteriores, la curva granulométrica para este material, se presenta en el Apéndice D, junto con las curvas granulométricas de las zonas anteriores.



Figura 4.4.3: Material sedimentado en el margen derecho aguas arriba (Zona S4)



La clasificación del material para la Zona S4 se muestra a continuación en la Tabla 4.4.5. La granulometría de esta zona es muy diferente a todas las granulometrías anteriores, el material representativo de esta zona es la arena media – gruesa y las gravas finas – medias, el diámetro d_{50} se incrementa considerablemente. Según las muestras analizadas, al observar los diámetros medios para las diferentes zonas, estos han venido incrementando su valor a medida que se alejan de la presa, de modo que se espera una granulometría escalonada en el embalse, el último valor medido es de $d_{50} = 1,6\text{mm}$ (para el prototipo) en la zona más alejada de la presa (S4), si el modelo abarcara toda la longitud del remanso, el diámetro escalado en la cola del mismo llegaría a los 4.6 mm que es el d_{50} obtenido de las muestras en campo para el río Negro.

CLASIFICACION DEL MATERIAL DE LA ZONA S4			
MODELO		PROTOTIPO	
Arcilla < 0.0002 mm	0 %	Arcilla < 0.0002 mm	0 %
Limo 0.002 - 0.063 mm	6 %	Limo 0.002 - 0.063 mm	3 %
Arena fina 0.063 - 0.2 mm	50 %	Arena fina 0.063 - 0.2 mm	3 %
Arena media 0.2 - 0.6 mm	44 %	Arena media 0.2 - 0.6 mm	18 %
Arena gruesa 0.6 - 2 mm		Arena gruesa 0.6 - 2 mm	32 %
Grava fina 2 - 6 mm		Grava fina 2 - 6 mm	28 %
Grava media 6 - 20 mm		Grava media 6 - 20 mm	16 %
d_{50} (mm)	0.185	d_{50} (mm)	1.6
$C_u = D_{60}/D_{10}$	2.56	$C_u = D_{60}/D_{10}$	9.09

Tabla 4.4.5: Clasificación del material de la Zona S4 para el modelo y prototipo



Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

El estudio de los procesos de transporte de sedimento en suspensión para el proyecto de generación hidroeléctrica HIDROSANBARTOLO permite presentar las siguientes conclusiones y recomendaciones:

5.1 Conclusiones

- Con respecto a las tasas de transporte de sedimentos y concentración de sólidos suspendidos esperadas para el río Negro:
 - Los valores teóricos calculados para las tasas de transporte de sedimento en suspensión resultaron sobreestimados en un factor de alrededor de 20 con respecto a las medidas en campo para caudales de 90 y 280 m^3/s , esto principalmente, por razones de disponibilidad de material susceptible de suspensión y por las distintas consideraciones sobre la distribución de concentraciones de sedimento en la profundidad del flujo.
 - Los cálculos de la concentración de sólidos suspendidos sobreestiman en un factor de 13 y 11 a los valores medidos en campo para caudales de 90 y 280 m^3/s , respectivamente, por las razones antes expuestas.
 - Las tasas de transporte de sedimentos esperadas oscilan entre 159.6 y 44844.1 kg/s , para un tamaño de sedimento de 4,6 mm (d_{50}) y para regularidades hidrológicas de 50 y 800 m^3/s (consideradas de interés), respectivamente, en tanto que la concentración de sólidos suspendidos varía entre 3.19 y 56.06 kg/m^3 para las mismas condiciones de flujo y sedimento.
 - El método convencional establece que las ecuaciones $T(kg/s) = 0,0652Q^2 + 4,4667Q - 358,96$ y $C(kg/m^3) = 0,0716Q + 0,1218$ pueden usarse para estimar las tasas de transporte esperadas así como la concentración de sedimentos suspendidos, respectivamente, dentro del rango de caudal líquido indicado y para las características de sedimento que presenta el río Negro.
 - Las mediciones de campo establecen que para caudales de 90 y 280 m^3/s las tasas de transporte de sedimento en suspensión oscilan entre 39 y 509 kg/s , mientras que la concentración de sedimentos oscila entre 0,435 y 1,82 kg/m^3 , para sedimentos cuyo tamaño máximo es de 1 mm .
- Con respecto al análisis de diámetros potenciales y tasas de transporte asociadas para el río Negro:



- Los diámetros potenciales se establecieron de acuerdo al criterio de Julien (1995) para una carga suspendida dominante, el mismo que indica que estos varían entre 1.3 – 5.2 mm para regularidades hidrológicas de 50 y 800 m^3/s , respectivamente. Dicho criterio se establece como razonable y conservador debido a que, según el aforo de campo, el diámetro máximo de sedimento transportado en suspensión por un caudal de 280 m^3/s corresponde a 1 mm , en tanto que su correspondiente potencial es de 3.2 mm , notablemente sobreestimado.
 - El criterio adoptado para los diámetros potenciales indica que la ecuación $d (mm) = 0,1889Q^{0,4995}$ puede usarse para obtener diámetros potenciales para regularidades hidrológicas intermedias a las indicadas.
 - El estudio de los diámetros potenciales permite establecer que para las condiciones hidrológicas y de sedimento que presenta el río Negro, este puede transportar en suspensión material con un tamaño característico que varía entre d_{25} y d_{75} , para caudales de 50 y 800 m^3/s , respectivamente.
 - Las tasas de transporte de sólidos suspendidos asociadas a los diámetros potenciales oscilan entre los 8407 y 30947 kg/s para regularidades hidrológicas de 50 y 800 m^3/s , respectivamente, hay que tener presente que a cada una de las tasas le corresponde un diámetro característico diferente.
- Una vez establecidos los diámetros potenciales para el río Negro, las tasas de transporte de sedimento en suspensión esperadas (calculadas con el método convencional) se ajustan en función de dicho criterio, sobre la base de que ciertos diámetros potenciales son menores que el d_{50} considerado, en ese sentido las tasas esperadas varían entre 8407 y 30947 kg/s para 50 y 800 m^3/s , respectivamente.
 - El aforo de campo permitió establecer que el sedimento en suspensión del río Negro tiene como elementos constitutivos arena fina y partículas de cuarzo, feldespato, mica y moscovita. La arena fina tiene como diámetro característico 0,3 mm y se presenta en un porcentaje del orden de 10%. Las partículas con tamaños de hasta 0,3 mm se presentan en un porcentaje del orden de 90%. Para la arena fina se estableció velocidades de sedimentación que varían entre 0,005 – 0,02 m/s , mientras que para partículas mayores a 0,3 mm las velocidades de sedimentación oscilan entre 0.01 – 0.04 m/s .
 - Las tasas de transporte de sedimentos presentadas están sujetas a ajustes por fenómenos hasta ahora considerados como despreciables, dichos fenómenos entre otros incluyen las formas del lecho (dunas, principalmente), granulometría no uniforme, pendiente del lecho (no es constante), rugosidad del cauce, canal no prismático, flujo no uniforme, entre otros.



- Con respecto a la variación de la concentración de sólidos suspendidos en el embalse del modelo físico, el estudio permitió establecer lo siguiente:
 - Las variaciones longitudinales de concentraciones medidas en diferentes secciones transversales aguas arriba de la obra no presentaron mayor variación para un determinado caudal, al crecer los caudales las concentraciones tienden a ser más uniformes en todo el embalse. La longitud analizada fue demasiado corta como para observar claramente la diferencia de concentraciones que se da a medida que el flujo se acerca a la presa.
 - Las concentraciones en los diferentes puntos de la sección frente a la bocatoma no mostraron mayor variación para caudales menores a $210 \text{ m}^3/\text{s}$, a partir de este caudal las concentraciones se incrementaron visiblemente en el punto cerca de la bocatoma (P1), debido a que para evacuar estos caudales se usaron las compuertas que se encuentran cerca de ésta. Se estableció que las concentraciones en este punto varían entre los 0.141 a 0.478 kg/m^3 para caudales de 53 a $400 \text{ m}^3/\text{s}$, este valor máximo corresponde al mayor valor encontrado en todo el embalse.
 - Se ha establecido que las concentraciones en todo el embalse varían de 0.138 a 0.478 kg/m^3 para las regularidades hidrológicas de 53 a $400 \text{ m}^3/\text{s}$, la mínima concentración se presentó en la zona de la curva del margen derecho (zona considerada de bajas velocidades P2,1) con el caudal de $53 \text{ m}^3/\text{s}$, en tanto que el valor máximo corresponde al punto en la bocatoma (P1) para el caudal de $400 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Con respecto a la características del material sedimentado en las distintas zonas se tiene lo siguiente:
 - Como se tenía previsto la sedimentación a lo largo del embalse ocurrió de manera escalonada, el material sedimentado incrementa su tamaño a medida que se aleja de la presa, la granulometría presentó un amplio rango de tamaños proyectados para el prototipo que va desde los limos ($0.002 - 0.063 \text{ mm}$) hasta las gravas de tamaño medio ($6 - 20 \text{ mm}$) en las zonas más alejadas aguas arriba.
 - En las zonas S1 y S2 ubicadas al margen izquierdo del embalse (ver la Figura 4.4.2) se encontró que el material característico lo componen los limos y las arenas ($0.002 - 2 \text{ mm}$), en la zona de la curva (S3) el material representativo son las arenas ($0.063 - 2 \text{ mm}$) con un pequeño porcentaje de gravas finas ($2 - 6 \text{ mm}$), finalmente en la última zona (S4) aguas arriba del embalse predominaron las arenas medias – gruesas y las gravas finas – medias, con diámetros característicos que oscilan entre los $0.2 - 20 \text{ mm}$.



- La velocidad de vaciado del embalse afectó las muestras de material sedimentado, los diámetros encontrados son mayores luego del vaciado rápido que luego del lento. Para la zona S1 y S2 los diámetros d_{50} encontrados luego del vaciado rápido se incrementaron en un 77 y 155% respectivamente, en relación a los diámetros medios encontrados para el vaciado lento. Para la zona S3 la velocidad de vaciado tuvo menor influencia en los diámetros del material sedimentado, el incremento del d_{50} fue de alrededor de 30%.
- Se encontró que para las zonas S1, S2, S3 ya sea con vaciado lento o rápido, el rango principal de diámetros para las partículas oscila entre los 0.013 a 15.61 mm , el rango de velocidades de sedimentación para estos diámetros es de 0.00013 a 0.51 m/s .
- La granulometría más fina que se encontró fue la obtenida en la zona S1 luego del vaciado lento, esta presenta un diámetro medio característico d_{50} de 0.18 mm , en tanto que la granulometría más gruesa se halló en la zona S4 donde el diámetro medio característico alcanzó 1.6 mm .

5.2 Recomendaciones

- Con la finalidad de manejar tasas de transporte de sedimentos en suspensión reales para el río Negro, se recomienda realizar campañas de muestro de sedimentos a fin de construir una curva de descarga de caudal sólido para el río en cuestión.
- Considerando que las tasas de transporte presentadas solo llegarían a producirse cuando el lecho del río alcance la condición supuesta en los cálculos (lecho infinito) o cuando tenga a disposición material suficiente, se recomienda una adecuada protección de cuenca hidrográfica influyente a fin de controlar la producción de sedimentos por acciones antrópicas.
- Para observar de mejor manera el proceso de sedimentación y la variación de concentraciones en el embalse sería recomendable una mayor extensión de análisis que incluya una mayor longitud de la cola del embalse y las obras que se prevean hacia aguas arriba.
- Ajustar cálculo de las tasas esperadas según el método MF de van Rijn



Referencias

- J. Arboleda Valencia, *Teoría y Práctica De La Purificación Del Agua*, 2nd edn (McGraw-Hill, 2005), pp. 21–30.
- J. Beltran and D. Ordoñez. Estudio para establecimiento de tasas de arrastre se fondo para el Proyecto de Generación Hidroeléctrica Hidrosanbartolo mediante modelo físico de lecho móvil. *Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS – Universidad de Cuenca. Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Civil., 2012.*
- C. G. Campbell and others, 'High Concentration Suspended Sediment Measurements Using a Continuous Fiber Optic In-Stream Transmissometer', *Journal of Hydrology*, 311 (2005).
- H. Chanson, *Hidráulica Del Flujo En Canales Abiertos* (McGraw-Hill, 2002), p. 560.
- H. Chanson, *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction* (ELSEVIER, 2004).
- H. Chanson, *Environmental Hydraulics of Open Channel Flows* (ELSEVIER, 2004).
- R. H. French, *Open - Channel Hydraulics* (McGraw-Hill, 1988).
- C. P. Holliday, T. C. Rasmussen and W. P. Miller, 'Establishing the Relationship Between Turbidity and Total Suspended Sediment Concentration', *In Proceedings of the 2003 Georgia Water Resources Conference, University of Georgia: Athens, GA, USA, 2003*, 1–3.
- P. Y. Julien, *River Mechanics* (Cambridge University Press, 2002).
- J. P. Martín Vide, *Ingeniería De Ríos* (Alfaomega, 2003).
- P. Novak, A. I. B. Moffat and C Nalluri, *Estructuras Hidraulicas* (McGraw-Hill, 2001).
- E. Pacheco, Estudio para identificación de una relación entre Concentración de Sólidos en suspensión y Turbidez en ríos de Montaña: Estudio de caso en la cuenca media del río Paute. *Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS Universidad de Cuenca. Cuenca-Ecuador. 2008*
- E. Pacheco, & V. Carrillo, *Estudio De Sólidos En Suspensión Relevantes Para El Proyecto Hidroeléctrico Hidrosanbartolo*. Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS Universidad de Cuenca. Cuenca-Ecuador. 2012.
- E. Pacheco, & V. Carrillo, *Estudio En Modelo Hidráulico Para La Optimización Del Diseño De La Obra De Captación En El Río Negro Del Proyecto Hidroeléctrico Hidrosanbartolo*, Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS Universidad de Cuenca. Cuenca-Ecuador. 2012.
- A. Rocha Felices, *Introducción a La Hidráulica Fluvial* (Universidad Nacional de Ingeniería - Facultad de Ingeniería Civil, 1998).
- G. Sotelo Ávila, *Hidráulica General* (Limusa, 1997).
- R. Soulsby. *Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications*. ASCE Manual of Practice 110 – Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling and Practice. Thomas Telford, 1997.



V.L. Streeter, E Benjamin Wylie and Keith W Bedford, *Mecánica De Fluidos*, 9th edn (McGraw-Hill, 2000), pp. 224–247.

L. C. van Rijn, 'Suspended Transport, Part II: Suspended Load Transport', *Journal of Hydraulic Engineering*, 110 (1984), 1613–1641.

L. C. van Rijn, *Principes of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas* (Aqua Publications, 1993).

L. C. van Rijn, 'Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load Transport', *Journal of Hydraulic Engineering*, 133 (2007), 649–667.

L. C. van Rijn, 'Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. II: Suspended Transport', *Journal of Hydraulic Engineering*, 133 (2007), 668–689.

L. C. van Rijn, 'Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. III: Graded Beds', *Journal of Hydraulic Engineering*, 133 (2007), 761–775.

V. A. Vanoni. *ASCE Manual of Practice 110 – Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling and Practice*. American Society of Civil Engineering, 2002.



Apéndice

A Criterios para movimiento de carga en suspensión

A.1 Criterios adoptados para el inicio del movimiento de carga en suspensión

Referencia	Criterios para suspensión	Notas
Bagnold (1966)	$\frac{V_c}{w_o} > 1$	Como fue dado por van Rijn (1993)
Raudkivi (1990)	$\frac{V_c}{w_o} > 1.2$	Carga suspendida dominante (es decir, suspensión)
Julien (1995)	$\frac{V_c}{w_o} > 2.5$	Carga suspendida dominante

Notas: $s = \rho_s/\rho$; V_c = velocidad de corte; w_o = velocidad terminal de asentamiento

Tabla A.1: Criterios para movimiento de carga en suspensión adoptados en el análisis de diámetros potenciales

A.2 Criterios descartados para el inicio del movimiento de carga en suspensión

Referencia	Criterios para suspensión	Notas
van Rijn (1984b)	$\frac{V_c}{w_o} > \frac{4}{\sqrt{\frac{(s-1)g}{\nu^2} d_s}}$	Deducido de investigaciones experimentales
	$\frac{V_c}{w_o} > 0.4$	para $1 < \sqrt{\frac{(s-1)g}{\nu^2} d_s} < 10$ cuando $d_s = d_{20}$
Raudkivi (1990)	$\frac{V_c}{w_o} > 0.5$	Nota: regla empírica (Raudkivi 1990) Inicio de la suspensión, es decir, saltación.
Julien (1995)	$\frac{V_c}{w_o} > 0.2$	Flujo turbulento de agua sobre fronteras rugosas. Inicio de suspensión.
Sumer <i>et. al.</i>	$\frac{V_c^2}{(s-1)gd_s} > 2$	Observaciones experimentales en flujo en laminas

Notas: $s = \rho_s/\rho$; V_c = velocidad de corte; w_o = velocidad terminal de asentamiento

Tabla A.2: Criterios para movimiento de carga en suspensión descartados en el análisis de



B Capacidad de transporte de sedimentos

Referencia	Ecuaciones	Rango	Anotaciones
Einstein (1950)	$q_s = (q_s)_{cl} \left(1 + I_1 \ln \left(\frac{V}{V_c} \right) + I_2 \right)$ donde I_1 e I_2 son dos integrales deducidas de diagramas de diseño	Tasa de transporte por suspensión pequeña	
van Rijn (1984c)	$\frac{q_s}{q} = 0,008 \left(\frac{V - (V)_c}{\sqrt{(s-1)g d_{20}}} \right)^{5,1} \left(\frac{d_{20}}{d} \right)^{2,5} + 0,012 \left(\frac{V - (V)_c}{\sqrt{(s-1)g d_{20}}} \right)^{5,1} \left(\frac{d_{20}}{d} \right) \times \left(d_{20} \sqrt{\frac{(s-1)g}{V^3}} \right)^{-0,9}$ $(V)_c = 0,19 d_{20}^{0,6} \log_{10} \left(\frac{D_H}{d_{20}} \right)$ Para $0,1 \leq d_{20} \leq 0,8 \text{ mm}$ $(V)_c = 0,8 d_{20}^{0,6} \log_{10} \left(\frac{D_H}{d_{20}} \right)$ Para $0,8 \leq d_{20} \leq 2 \text{ mm}$	$0,1 \leq d_{20} \leq 2 \text{ mm}$ $d_{20}/d_{10} = 4$ $1 \leq d \leq 20 \text{ m}$ $0,8 \leq V \leq 2,8 \text{ m/s}$	Regresiones de los cálculos (a 18°C)

Notas: B = ancho del canal, D_H = Diámetro hidráulico, q_s = caudal volumétrico total de sedimentos por unidad de ancho

Table B.1: Correlaciones empíricas y semiempíricas de transporte total de sedimentos (Chanson, 2002)



C Sensibilidad del modelo matemático de tasa de transporte de sedimento en suspensión

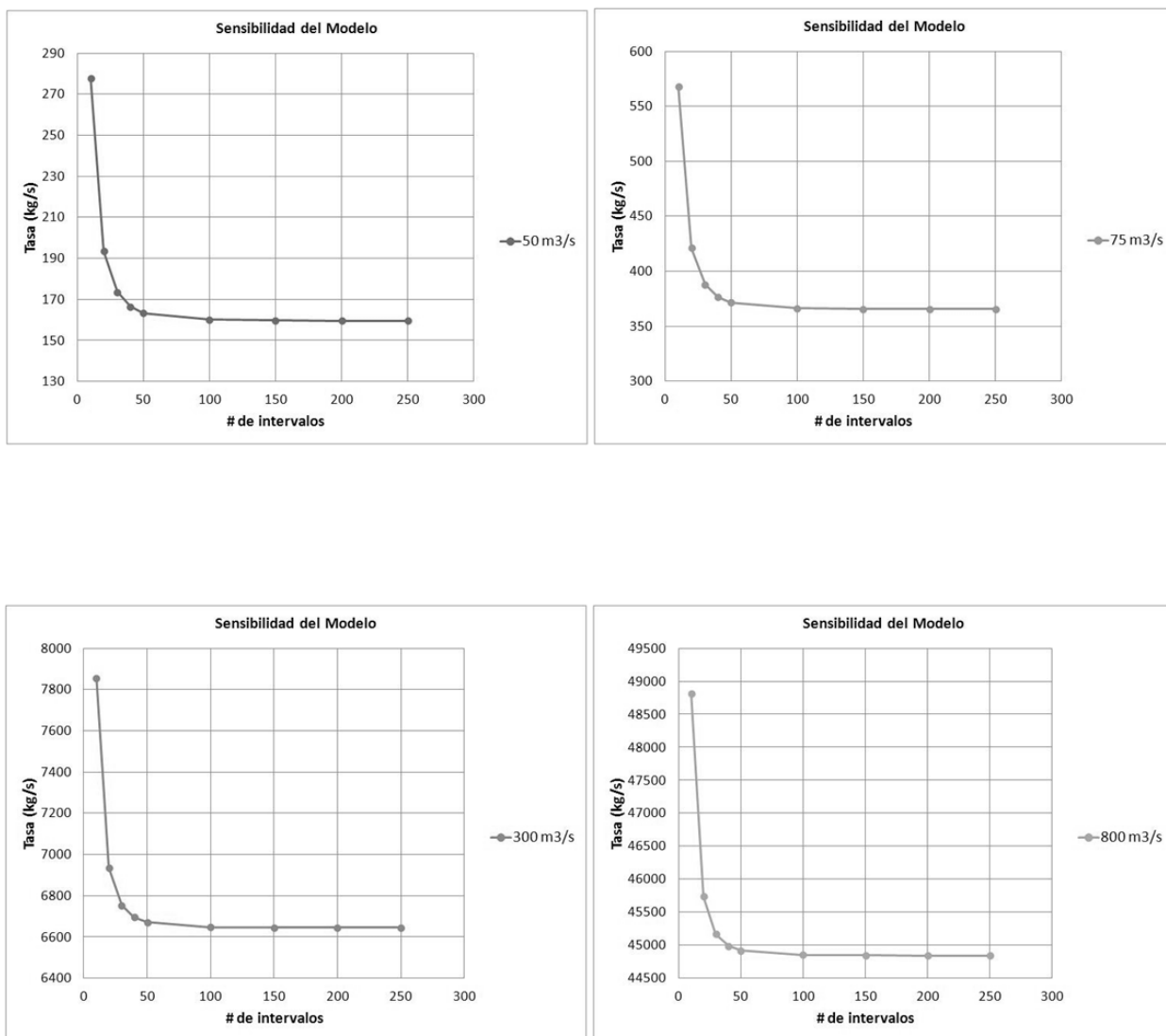


Figura A.1: Sensibilidad del modelo matemático con respecto al número de pasos

En la Figura 1 se presenta de forma grafica los resultados de la sensibilidad del modelo matemático usado para estimar la tasa de transporte de sedimento en suspensión frente al número de intervalos (pasos) usado para calcular la integral correspondiente (ver la Sección 2.5.4).



Dichos resultados corresponden a intervalos de integración de 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150, 200 y 250. Se observa que para intervalos pequeños (< 50), las tasas calculadas varían drásticamente con el número de intervalos, sin embargo a partir de los 50 intervalos las tasas calculadas varían muy poco con el incremento de ellos, a tal punto que para 100, 150, 200 y 250 intervalos la tasa calculada es prácticamente constante en todos los casos.

Por lo tanto, un adecuado número de intervalos de integración puede considerarse 100, tal como se observa en la figura, sin embargo, en el presente documento se usan 250 intervalos en todos los casos para estimar las tasas de transporte de sedimento en suspensión, con la finalidad de evitar errores en este sentido.

D Caracterización de las muestras obtenidas en las zonas de sedimentación

A continuación se muestran los resultados de la caracterización de las muestras obtenidas en las diferentes zonas luego de los ensayos en el modelo físico. En primer lugar se muestran los correspondientes a las zonas S1, S2, S3, para el caudal de $280 \text{ m}^3/\text{s}$ con vaciado rápido del embalse, luego para el caudal de $400 \text{ m}^3/\text{s}$ con un vaciado lento, y finalmente se muestran los resultados para la zona S_4 que se obtuvo luego de todos los ensayos.

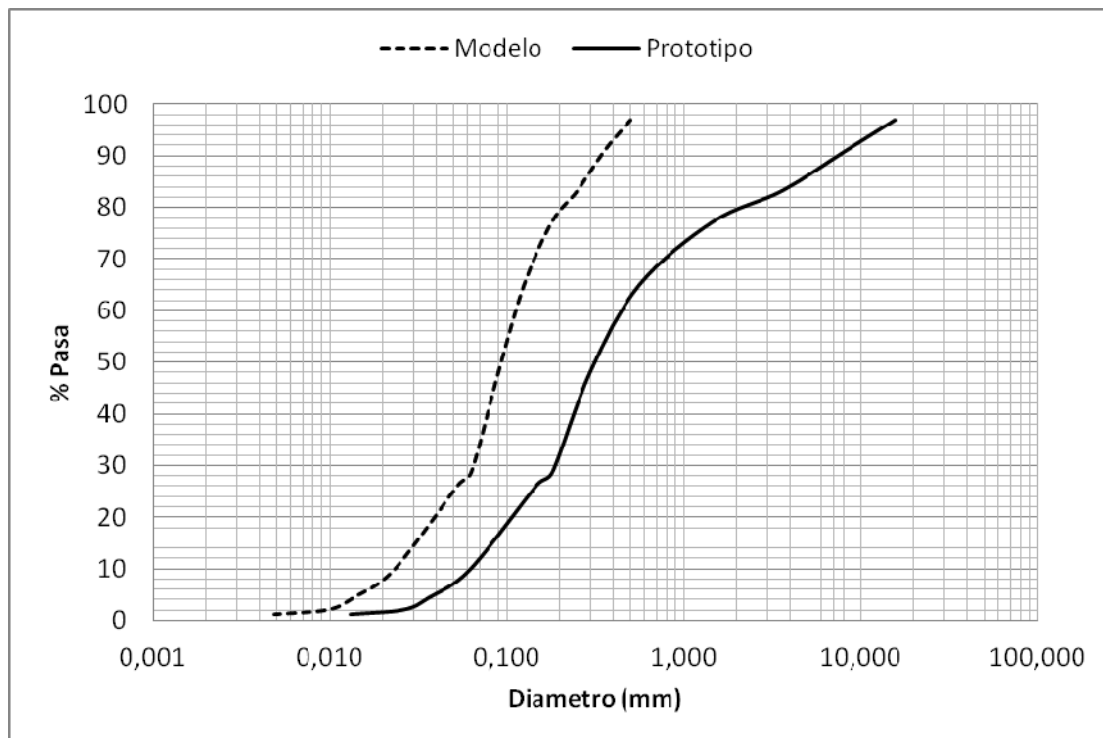


Figura D.1: Granulometría Zona S1 con VR



%pasa	MODELO		PROTOTIPO	
	D (um)	Wo (m/s)	D (mm)	Wo (m/s)
97.00	500	0.07249	15.61	0.51256
91.01	355	0.05242	8.20	0.37068
83.29	250	0.03449	3.61	0.24386
77.30	180	0.02121	1.47	0.14998
65.06	125	0.01128	0.56	0.07978
48.35	90	0.00607	0.30	0.04294
28.80	63	0.00302	0.18	0.02138
26.2	52.9	0.00214	0.147	0.01515
9.8	23.1	0.00041	0.062	0.00289
4.4	13.6	0.00014	0.036	0.00100
2.0	9.7	0.00007	0.026	0.00052
1.2	4.8	0.00002	0.013	0.00013

Tabla D.1: Granulometría y velocidades de sedimentación para partículas de la Zona S1 (VR)

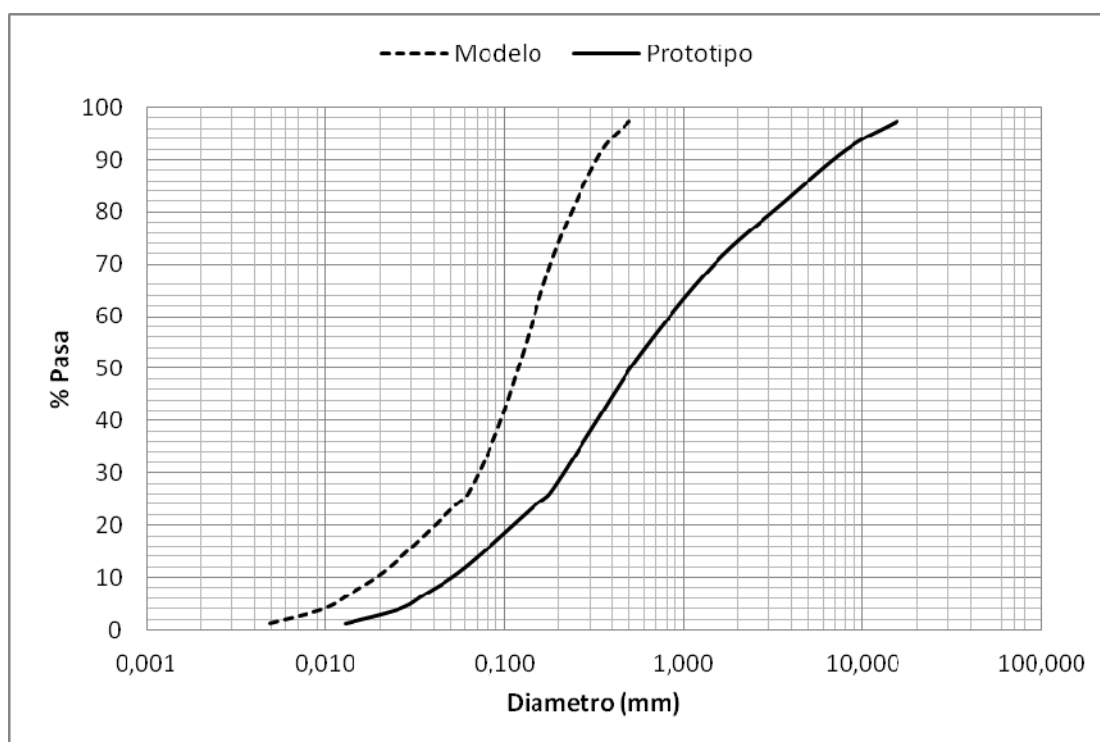


Figura D.2: Granulometría Zona S2 con VR



%pasa	MODELO		PROTOTIPO	
	D (um)	Wo (m/s)	D (mm)	Wo (m/s)
97.47	500	0.07249	15.61	0.51256
92.14	355	0.05242	8.20	0.37068
81.83	250	0.03449	3.61	0.24386
69.87	180	0.02121	1.47	0.14998
52.23	125	0.01128	0.56	0.07978
37.60	90	0.00607	0.30	0.04294
26.16	63	0.00302	0.18	0.02138
23.6	52.9	0.00214	0.147	0.01515
11.9	22.8	0.00040	0.061	0.00283
6.6	13.4	0.00014	0.036	0.00098
3.8	9.7	0.00007	0.026	0.00051
1.1	4.8	0.00002	0.013	0.00013

Tabla D.2: Granulometría y velocidades de sedimentación para partículas de la Zona S2 (VR)

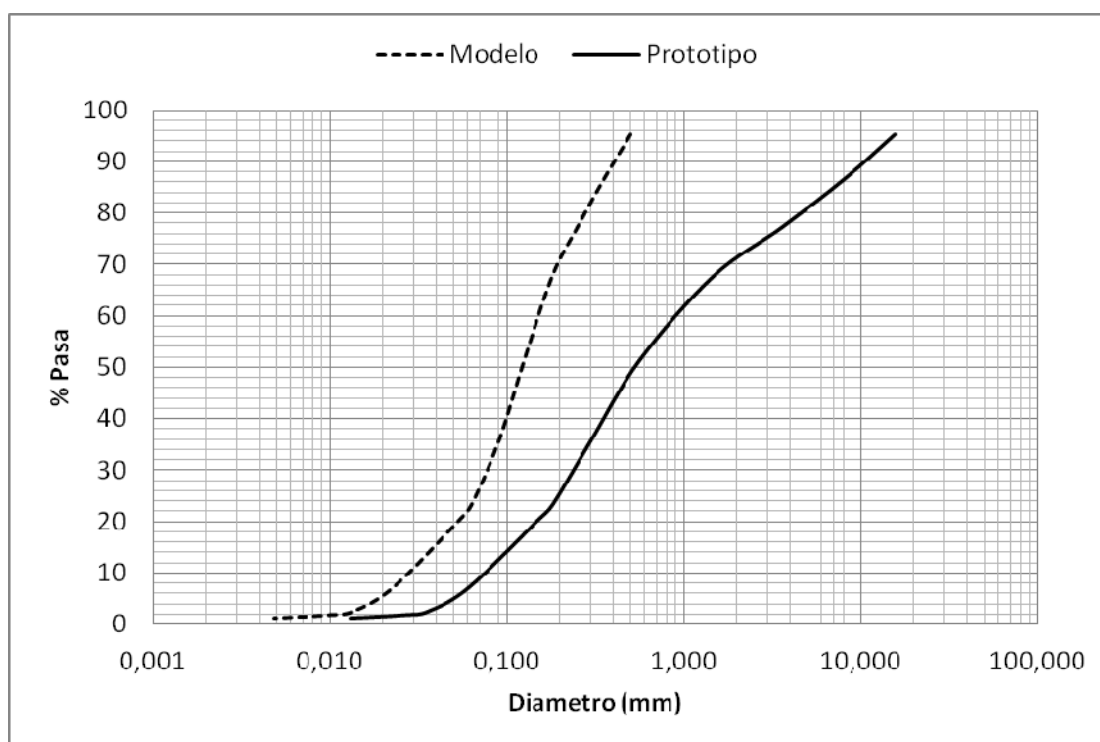


Figura D.3: Granulometría Zona S3 con VR



%pasa	MODELO		PROTOTIPO	
	D (um)	Wo (m/s)	D (mm)	Wo (m/s)
95.41	500	0.07249	15.61	0.51256
86.86	355	0.05242	8.20	0.37068
77.35	250	0.03449	3.61	0.24386
67.75	180	0.02121	1.47	0.14998
51.41	125	0.01128	0.56	0.07978
35.69	90	0.00607	0.30	0.04294
23.27	63	0.00302	0.18	0.02138
20.2	53.3	0.00217	0.148	0.01533
7.1	22.7	0.00040	0.061	0.00281
2.5	13.5	0.00014	0.036	0.00098
1.8	9.7	0.00007	0.026	0.00051
1.2	4.8	0.00002	0.013	0.00013

Tabla D.3: Granulometría y velocidades de sedimentación para partículas de la Zona S3 (VR)

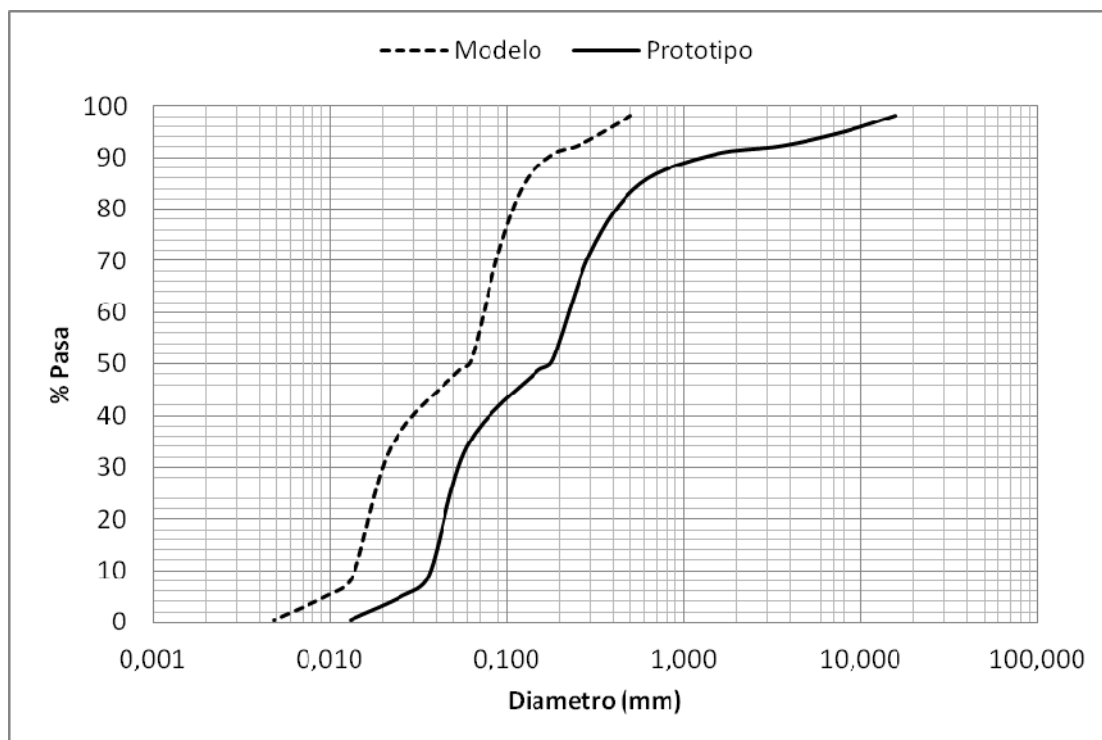


Figura D.4: Granulometría Zona S1 con VL



%pasa	MODELO		PROTOTIPO	
	D (um)	Wo (m/s)	D (mm)	Wo (m/s)
98.07	500	0.07249	15.61	0.51256
94.98	355	0.05242	8.20	0.37068
92.19	250	0.03449	3.61	0.24386
90.50	180	0.02121	1.47	0.14998
84.80	125	0.01128	0.56	0.07978
71.68	90	0.00607	0.30	0.04294
50.75	63	0.00302	0.18	0.02138
48.5	52.8	0.00213	0.147	0.01505
34.1	22.3	0.00038	0.059	0.00269
9.2	13.5	0.00014	0.036	0.00100
5.2	9.7	0.00007	0.026	0.00051
0.5	4.9	0.00002	0.013	0.00013

Tabla D.4: Granulometría y velocidades de sedimentación para partículas de la Zona S1 (VL)

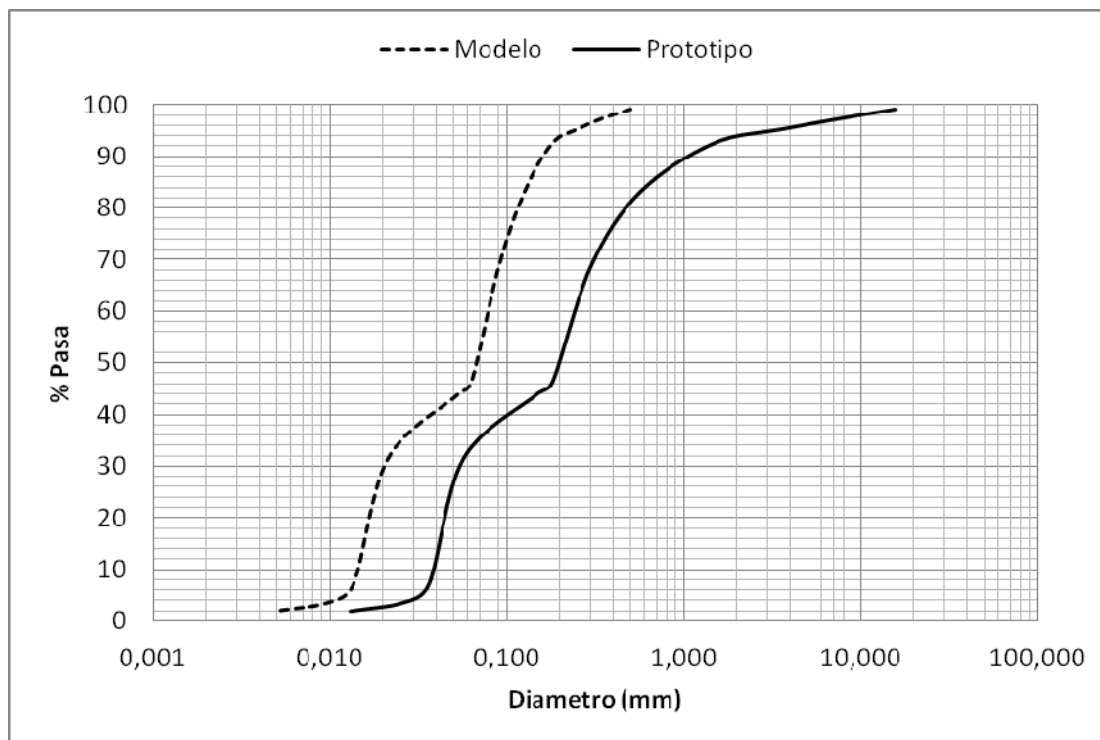


Figura D.5: Granulometría Zona S2 con VL



%pasa	MODELO		PROTOTIPO	
	D (um)	Wo (m/s)	D (mm)	Wo (m/s)
99.12	500	0.07249	15.61	0.51256
97.51	355	0.05242	8.20	0.37068
95.30	250	0.03449	3.61	0.24386
92.53	180	0.02121	1.47	0.14998
83.03	125	0.01128	0.56	0.07978
68.63	90	0.00607	0.30	0.04294
46.36	63	0.00302	0.18	0.02138
43.8	52.6	0.00212	0.146	0.01496
31.4	21.2	0.00035	0.057	0.00245
7.1	13.6	0.00014	0.036	0.00100
3.6	9.7	0.00007	0.026	0.00051
1.9	4.8	0.00002	0.013	0.00013

Tabla D.5: Granulometría y velocidades de sedimentación para partículas de la Zona S2 (VL)

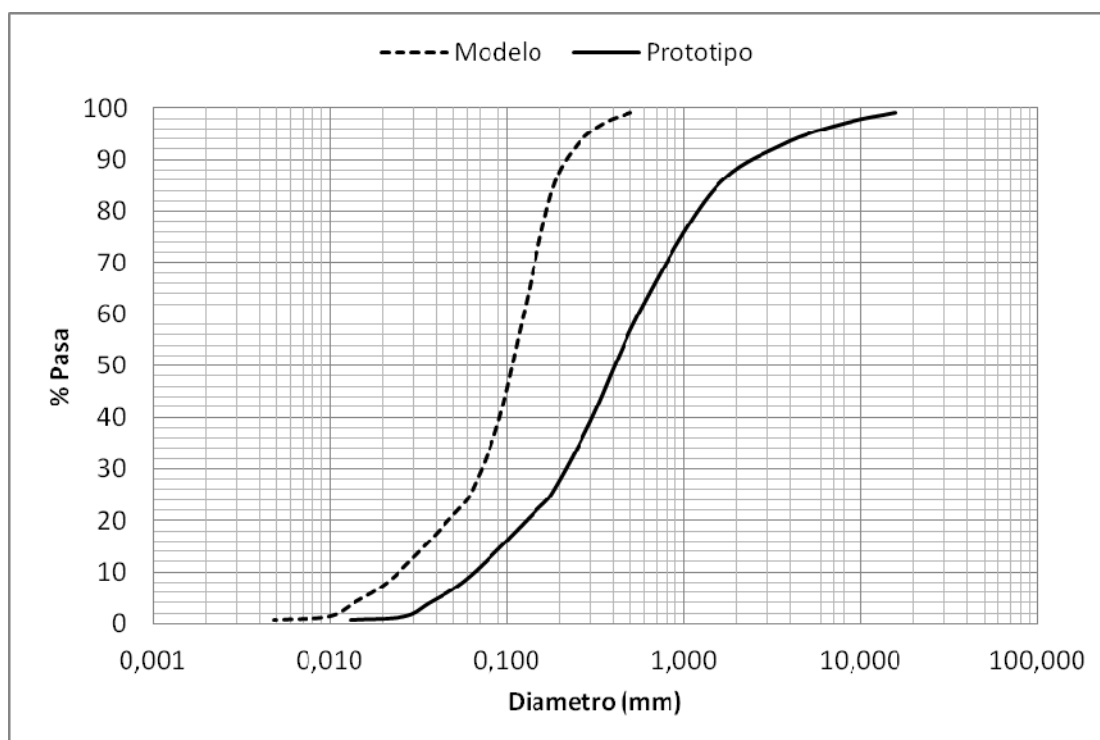


Figura D.6: Granulometría Zona S3 con VL



%pasa	MODELO		PROTOTIPO	
	D (um)	Wo (m/s)	D (mm)	Wo (m/s)
99.10	500	0.07249	15.61	0.51256
97.11	355	0.05242	8.20	0.37068
92.89	250	0.03449	3.61	0.24386
84.03	180	0.02121	1.47	0.14998
60.43	125	0.01128	0.56	0.07978
39.29	90	0.00607	0.30	0.04294
25.40	63	0.00302	0.18	0.02138
22.1	53.3	0.00217	0.148	0.01533
9.1	23.1	0.00041	0.062	0.00290
3.9	13.6	0.00014	0.036	0.00100
1.3	9.8	0.00007	0.026	0.00052
0.6	4.9	0.00002	0.013	0.00013

Tabla D.6: Granulometría y velocidades de sedimentación para partículas de la Zona S3 (VL)

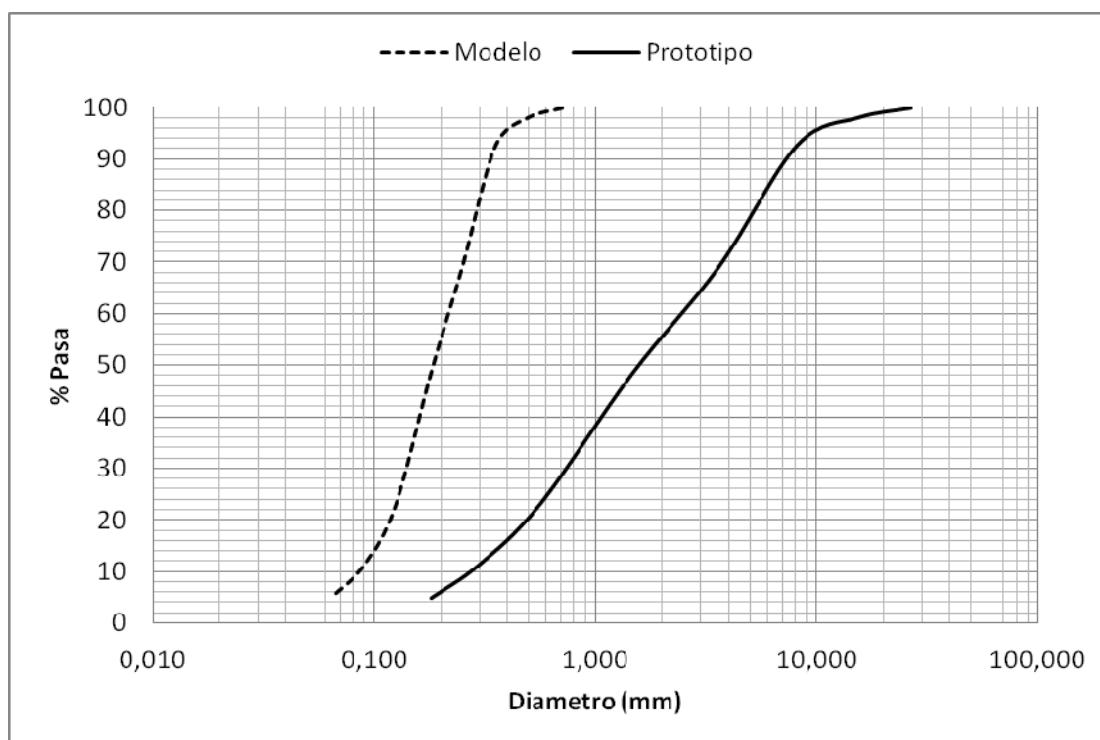


Figura D.7: Granulometría Zona S4



%pasa	MODELO		PROTOTIPO	
	D (um)	Wo (m/s)	D (mm)	Wo (m/s)
99.90	710	0.09508	26.82	0.67235
98.07	500	0.07249	15.61	0.51256
92.74	355	0.05242	8.20	0.37068
69.05	250	0.03449	3.61	0.24386
48.40	180	0.02121	1.47	0.14998
23.08	125	0.01128	0.56	0.07978
11.31	90	0.00607	0.30	0.04294
4.9	63.0	0.00302	0.181	0.02138

Tabla D.7: Granulometría y velocidades de sedimentación de partículas para la zona S4