



RESUMEN

El estudio de los procesos de arrastre de fondo en cauces es fundamental para el establecimiento de los parámetros de diseño y de las condiciones a las cuales podría estar sujeta una obra hidráulica o una intervención. Al momento se dispone en la literatura técnica de muchas ecuaciones que interpretan el fenómeno de transporte de carga de lecho en cauces naturales, sin embargo, dichas ecuaciones han sido desarrolladas para condiciones específicas, como por ejemplo: condiciones de laboratorio, cauces de ríos de llanura, rangos limitados de caudal, etc. Esto hace que no se disponga al momento de relaciones definitivas que permitan establecer tasas de transporte de carga de lecho de manera especial para el caso de ríos de montaña. Para el estudio se ha realizado un análisis de ecuaciones para transporte de carga de lecho, las mismas que han sido validadas con la ayuda de un modelo hidráulico de escala reducida no distorsionada de lecho móvil. Como resultado de la simulación con las distintas formulaciones (Meyer-Peter, Nielsen, Van Rijn), se ha establecido que las tasas determinadas mediante la ecuación de Nielsen simplificada, se ajustaron adecuadamente a las condiciones para el “Río Negro”, las tasas incorporadas con la formulación de Van Rijn resultaron subestimadas debido a que la ecuación está basada en materiales de granulometría menor que la representativa del río, y las tasas obtenidas con la formulación de Meyer-Peter resultaron sobreestimadas, ya que provocaron procesos de acumulación durante los ensayos de calibración.

PALABRAS CLAVES

Arrastre de fondo, Ecuaciones de arrastre de fondo, Cauces naturales, Validación, Modelo Hidráulico, Lecho móvil, Ensayos de calibración, Granulometría.



CONTENIDO

RESUMEN.....	1
PALABRAS CLAVES.....	1
CONTENIDO	2
LISTA DE TABLAS	8
LISTA DE ILUSTRACIONES.....	11
LISTA DE GRÁFICAS	12
LISTA DE IMÁGENES.....	13
LISTA DE SÍMBOLOS.....	14
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	16
1.1 RESUMEN	16
1.2 ANTECEDENTES.....	16
1.3 OBJETIVOS.....	17
1.4 JUSTIFICACIÓN	17
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	18
2.1 TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO EN CAUCES NATURALES.....	18
2.2 MODELOS HIDRÁULICOS PARA ESTUDIOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO	37
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS	42
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	42
3.2 CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL MODELO	43
3.3 CONCEPTUALIZACIÓN PARA EL MODELO.....	48
3.4 EQUIPAMIENTO.....	48
3.5 ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE ESCALA REDUCIDA	52
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS	61
4.1 RESULTADOS.....	61
4.2 ANÁLISIS.....	76
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
5.1 CONCLUSIONES	88
5.2 RECOMENDACIONES	91
BIBLIOGRAFÍA	92
ANEXOS.....	93
ANEXO A	93
ANEXO B.....	106



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Jorge Israel Beltrán Zhindón, 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 hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Jorge Israel Beltrán Zhindón
0104426986

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 odjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Fundada en 1867

Yo, Jorge Israel Beltrán Zhindón, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.


Jorge Israel Beltrán Zhindón
0104426986

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



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Diego Fernando Ordóñez Salazar, 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 hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Diego Fernando Ordóñez Salazar
0104429055

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



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Fundada en 1867

Yo, Diego Fernando Ordóñez Salazar, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Diego Fernando Ordóñez Salazar
0104429055

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



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**“ESTUDIO PARA ESTABLECIMIENTO DE TASAS DE ARRASTRE DE FONDO
PARA EL PROYECTO DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA HIDRO SAN
BARTOLO MEDIANTE MODELO FÍSICO DE LECHO MÓVIL”**

Tesis previa a la obtención del Título
de Ingeniero Civil

Director: Ing. MSc. Esteban A. Pacheco T.

Tutor: Ing. Verónica Carrillo S.

Autores: Jorge Israel Beltrán Zhindón
Diego Fernando Ordóñez Salazar

CUENCA-ECUADOR
2012



LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1: PROPIEDADES APROXIMADAS DE LOS SEDIMENTOS DE ACUERDO AL TAMAÑO (JULIEN P. Y., 2002).....	20
TABLA 2.2: CLASIFICACIÓN DE PARTÍCULAS DE ACUERDO A SU TAMAÑO (JULIEN P. Y., 2002).....	21
TABLA 2.3: TENDENCIAS DEL DIAGRAMA DE SHIELDS PARA DISTINTOS REGÍMENES DE FLUJO TURBULENTO (CHANSON, 2004).....	28
TABLA 3.1: CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN LOS SITIOS DE TOMA DEL APROVECHAMIENTO COPAL - SAN BARTOLO EN M ³ /S (PACHECO & CARRILLO, 2012).....	44
TABLA 3.2: ESPECIFICACIONES BOMBA ELÉCTRICA DEL SISTEMA (PACHECO & CARRILLO, 2012).....	49
TABLA 3.3: SERIE DE TAMICES ESTÁNDAR (ASTM).....	50
TABLA 3.4: RESUMEN DE PARÁMETROS INICIALES PARA EL CÁLCULO DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	53
TABLA 3.5: GRANULOMETRÍA DEL PROTOTIPO (PACHECO & CARRILLO, 2012).....	55
TABLA 4.1: RESUMEN DE PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL INICIO DEL MOVIMIENTO DE SEDIMENTOS.....	61
TABLA 4.2 CÁLCULO DE LA TASA DE CARGA DE LECHO ECUACIÓN DE DU BOYS.....	62
TABLA 4.3 CÁLCULO DE LA TASA DE CARGA DE LECHO ECUACIÓN DE SHIELDS.....	63
TABLA 4.4 CÁLCULO DE LA TASA DE CARGA DE LECHO ECUACIÓN DE EINSTEIN (1942) ..	63
TABLA 4.5 CÁLCULO DE LA TASA DE CARGA DE LECHO ECUACIÓN DE SCHOKLITSCH (1950).....	64
TABLA 4.6 CÁLCULO DE LA TASA DE CARGA DE LECHO ECUACIÓN EINSTEIN (1950).....	65
TABLA 4.7: VALORES RESULTANTES DE LA FUNCIÓN DE EINSTEIN PARA DIFERENTES CAUDALES.....	65
TABLA 4.8: CÁLCULO DE LA TASA DE CARGA DE LECHO ECUACIÓN DE MEYER PETER (1951).....	66
TABLA 4.9: CÁLCULO DE LA TASA DE CARGA DE LECHO ECUACIÓN DE VAN RIJN (1984-1993).....	66
TABLA 4.10: CÁLCULO DE LA TASA DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE NIELSEN (1992).....	67
TABLA 4.11: CÁLCULOS DE LA TASA DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE NIELSEN SIMPLIFICADO.....	67
TABLA 4.12: TABLA DE RELACIONES DE ESCALA DE PARÁMETROS FÍSICOS E HIDRÁULICOS RELEVANTES.....	68
TABLA 4.13: HIDROGRAMA RESULTANTE PARA EL MODELO (PROMAS 2012).....	69
TABLA 4.14: CÁLCULO DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA PARA EL MODELO (PROMAS 2012).....	69
TABLA 4.15: ENSAYO DE CALIBRACIÓN PARA FORMULACIÓN DE MEYER-PETER (CAUDAL DE 2.83 LTS/S EN EL MODELO, 50 M ³ /S EN EL PROTOTIPO).....	71
TABLA 4.16: ENSAYO DE CALIBRACIÓN PARA FORMULACIÓN DE NIELSEN MODIFICADA (CAUDAL DE 2.83 LTS/S EN EL MODELO, 50 M ³ /S EN EL PROTOTIPO).....	72



TABLA 4.17: ENSAYO DE CALIBRACIÓN PARA FORMULACIÓN DE VAN RIJN (CAUDAL DE 2.83 LTS/S EN EL MODELO, 50 M ³ /S EN EL PROTOTIPO)	73
TABLA 4.18: RESULTADOS DE ENSAYOS PARA FORMULACIÓN DE MEYER PETER-NIELSEN MODIFICADA (CAUDAL DE 4.24 LTS/S EN EL MODELO, 75 M ³ /S EN EL PROTOTIPO) ...	74
TABLA 4.19: RESULTADOS DE ENSAYOS PARA FORMULACIÓN DE VAN RIJN (CAUDAL DE 4.24 LTS/S EN EL MODELO, 75 M ³ /S EN EL PROTOTIPO)	75
TABLA 4.20: RESULTADOS DE ENSAYOS PARA FORMULACIÓN DE MEYER-PETER Y NIELSEN MODIFICADA (CAUDAL DE 16.97 LTS/S EN EL MODELO, 300 M ³ /S EN EL PROTOTIPO)	76
TABLA 4.21: TABLA COMPARATIVA DIÁMETRO VS ESFUERZO CORTANTE PARA DISTINTOS CAUDALES	77
TABLA 4.22: TABLA COMPARATIVA DIÁMETRO DEL SEDIMENTO VS ESFUERZO CORTANTE CRÍTICO PARA DISTINTOS CAUDALES.....	79
TABLA 4.23 CÁLCULO TEÓRICO DE LAS TASAS DE CARGA DE LECHO PARA DISTINTOS CAUDALES	80
TABLA 4.24: TASAS DE TRANSPORTE TOTALES (KG/S) PARA EL MODELO	83
TABLA 4.25: TASA DE CARGA DE LECHO AJUSTADA AL MODELO Y OBTENIDA A PARTIR DE LA FORMULACIÓN SIMPLIFICADA DE NIELSEN	85
TABLA 4.26: PROPORCIÓN ENTRE LAS TASAS TEÓRICAS Y CALCULADAS PARA EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL “RÍO NEGRO”.	86
TABLA 4.27: APROXIMACIÓN DE TASAS CALIBRADAS EN EL MODELO PARA FORMULACIÓN DE NIELSEN Y MEYER PETER.	86
TABLA 4.28: TASAS CALIBRADAS PARA EL MODELO DE ESCALA REDUCIDA DEL “RÍO NEGRO”, SEGÚN LA FORMULACIÓN DE NIELSEN.....	87
TABLA A.1: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE BOYS 1879 (CAUDAL 75 M ³ /S PROTOTIPO)	93
TABLA A.2: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE SHIELDS 1936 (CAUDAL 75 M ³ /S PROTOTIPO).....	94
TABLA A.3: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE EINSTEIN 1942 (CAUDAL 75 M ³ /S PROTOTIPO)	94
TABLA A.4: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE SCHOKLITSCH 1950 (CAUDAL 75 M ³ /S PROTOTIPO)	95
TABLA A.5: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE MEYER-PETER 1949-1951 (CAUDAL 75 M ³ /S PROTOTIPO).....	95
TABLA A.6: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE NIELSEN 1992 (CAUDAL 75 M ³ /S PROTOTIPO).....	96
TABLA A.7: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE NIELSEN SIMPLIFICADA (CAUDAL 75 M ³ /S PROTOTIPO)	96
TABLA A.8: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE VAN RIJN 1984A-1993 (CAUDAL 75 M ³ /S PROTOTIPO).....	97
TABLA A.9: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE BOYS 1879 (CAUDAL 300 M ³ /S PROTOTIPO)	98
TABLA A.10: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE SHIELDS1936 (CAUDAL 300 M ³ /S PROTOTIPO).....	98
TABLA A.11: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE EINSTEIN 1942 (CAUDAL 300 M ³ /S PROTOTIPO)	99



TABLA A.12: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE SCHOKLITSCH 1950 (CAUDAL 300 M ³ /S PROTOTIPO)	99
TABLA A.13: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE MEYER-PETER 1949-1951 (CAUDAL 300 M ³ /S PROTOTIPO)	100
TABLA A.14: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE NIELSEN 1992 (CAUDAL 300 M ³ /S PROTOTIPO)	100
TABLA A.15: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE NIELSEN SIMPLIFICADA (CAUDAL 300 M ³ /S PROTOTIPO)	101
TABLA A.16: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE VAN RIJN 1984A, 1993 (CAUDAL 300 M ³ /S PROTOTIPO)	101
TABLA A.17: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE BOYS 1879 (CAUDAL 800 M ³ /S PROTOTIPO)	102
TABLA A.18: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE SHIELDS 1936 (CAUDAL 800 M ³ /S PROTOTIPO)	102
TABLA A.19: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE EINSTEIN 1942 (CAUDAL 800 M ³ /S PROTOTIPO)	103
TABLA A.20: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE SCHOKLITSCH 1950 (CAUDAL 800 M ³ /S PROTOTIPO)	103
TABLA A.21: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE MEYER PETER 1949, 1951 (CAUDAL 800 M ³ /S PROTOTIPO)	104
TABLA A.22: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE NIELSEN 1992 (CAUDAL 800 M ³ /S PROTOTIPO)	104
TABLA A.23: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE NIELSEN SIMPLIFICADA (CAUDAL 800 M ³ /S PROTOTIPO)	105
TABLA A.24: CÁLCULO DE TASA TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO CON LA ECUACIÓN DE VAN RIJN 1984A, 1993 (CAUDAL 800 M ³ /S PROTOTIPO)	106



LISTA DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 2.1: DIÁMETRO NOMINAL (ROCHA, 1998)	21
ILUSTRACIÓN 2.2: DIÁMETRO DE CRIBADO (ROCHA, 1998)	22
ILUSTRACIÓN 2.3: DIÁMETRO DE SEDIMENTACIÓN (ROCHA, 1998).....	22
ILUSTRACIÓN 2.4: VALORES DE ÁNGULO DE REPOSO PARA DIVERSAS FORMAS DE PARTÍCULAS (CHANSON, 2004)	23
ILUSTRACIÓN 2.5: DIAGRAMA DE SHIELDS PARA SEDIMENTOS EN AGUA (SHIELDS, 1936)27	
ILUSTRACIÓN 2.6: FUERZAS QUE ACTÚAN EN UNA PARTÍCULA DE SEDIMENTO (EFECTO DE UNA PENDIENTE LONGITUDINAL) (CHANSON 2002).....	29
ILUSTRACIÓN 2.7: MOVIMIENTO DE CARGA DE LECHO. (A) ESQUEMA DE MOVIMIENTO EN SALTACIÓN. (B) ESQUEMA DE DEFINICIÓN DE LA CAPA DE CARGA DE LE LECHO (CHANSON, 2004).....	30
ILUSTRACIÓN 2.8: DISPONIBILIDAD Y CAPACIDAD EN RELACIÓN AL TRANSPORTE SOLIDO (VIDE, 2003)	31
ILUSTRACIÓN 2.9: TASA DE TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO; COMPARACIÓN ENTRE LAS FÓRMULAS DE MEYER-PETER, LOS CÁLCULOS DE EINSTEIN Y DATOS DE LABORATORIO (CHANSON, 2004).....	34
ILUSTRACIÓN 3.1: ESQUEMA DE LA OBRA DE CAPTACIÓN Y CONDUCCIÓN PARA EL PROYECTO HIDROELÉCTRICO “HIDRO SAN BARTOLO” (PACHECO & CARRILLO, 2012)	42
ILUSTRACIÓN 3.2: MAPA DE UBICACIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO “HIDRO SAN BARTOLO”	43
ILUSTRACIÓN 3.3: GEOLOGÍA GENERAL DE LA ZONA DEL PROYECTO (PACHECO & CARRILLO, 2012).....	46
ILUSTRACIÓN 3.4: ESQUEMA GEOMORFOLÓGICO (PACHECO & CARRILLO, 2012)	47



LISTA DE GRÁFICAS

GRÁFICA 3.1: HIDROGRAMA DE 100 AÑOS PARA EL “RÍO NEGRO” (VILLACIS, 2011)	55
GRÁFICA 3.2: CURVA GRANULOMÉTRICA DEL “RÍO NEGRO” (PROTOTIPO) (PACHECO & CARRILLO, 2012)	56
GRÁFICA 4.1: HIDROGRAMA RESULTANTE PARA EL MODELO (PACHECO & CARRILLO, 2012)	68
GRÁFICA 4.2: CURVA GRANULOMÉTRICA DEL PROTOTIPO Y DEL MODELO (PROMAS 2012)	70
GRAFICA 4.3: COMPARACIÓN DIÁMETRO VS PARÁMETRO DE SHIELDS PARA DISTINTOS CAUDALES	78
GRÁFICA 4.4: COMPARACIÓN DIÁMETRO DEL SEDIMENTO VS ESFUERZO CORTANTE CRÍTICO PARA DISTINTOS CAUDALES.....	79
GRAFICA 4.5 CURVA DE TASAS DE CARGA DE LECHO VS CAUDALES PARA DISTINTOS CAUDALES (8 ECUACIONES).....	80
GRAFICA 4.6 CURVA DE TASAS DE CARGA DE LECHO VS CAUDALES PARA DISTINTOS CAUDALES (6 ECUACIONES).....	81
GRAFICA 4.7: CURVA DE TASAS DE CARGA DE LECHO VS CAUDALES PARA DISTINTOS CAUDALES (4 ECUACIONES).....	82
GRÁFICA 4.8: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA ECUACIÓN DE VAN RIJN.....	83
GRÁFICA 4.9: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA ECUACIÓN DE MEYER-PETER Y NIELSEN	84



LISTA DE IMÁGENES

IMAGEN 3.1: AGUAS ABAJO DEL EMPLAZAMIENTO DE LA OBRA PENDIENTES BAJAS (PACHECO & CARRILLO, 2012)	45
IMAGEN 3.2: PIEDRAS $\Phi=60$ CM EXISTENTES AGUAS ABAJO DEL EMPLAZAMIENTO DE LA OBRA (PACHECO & CARRILLO, 2012).....	45
IMAGEN 3.3: INFRAESTRUCTURA DEL LABORATORIO DE MODELACIÓN HIDRÁULICA DE PROMAS-UNIVERSIDAD DE CUENCA (PACHECO & CARRILLO, 2012).....	50
IMAGEN 3.4: SERIE DE TAMICES ESTÁNDAR (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS)	51
IMAGEN 3.5: TOLVA PARA LA DOSIFICACIÓN DEL MATERIAL (PACHECO & CARRILLO, 2012)	51
IMAGEN 3.6: EQUIPO DE NIVELACIÓN PARA CONTROL DE PENDIENTES	52
IMAGEN 3.7: MEDICIÓN DE PENDIENTES EN EL MODELO DE ESCALA REDUCIDA	60
IMAGEN 4.1: EFECTOS DE ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS, ECUACIÓN MEYER PETER (CAUDAL 2.83 LTS/S EN EL MODELO, 50 M ³ /S EN EL PROTOTIPO)	71
IMAGEN 4.2: EFECTOS DE ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS, ECUACIÓN NIELSEN MODIFICADA (CAUDAL 2.83 LTS/S EN EL MODELO, 50 M ³ /S EN EL PROTOTIPO)	72
IMAGEN 4.3: EFECTOS DE EROSIÓN, ECUACIÓN VAN RIJN (CAUDAL 2.83 LTS/S EN EL MODELO, 50 M ³ /S EN EL PROTOTIPO)	73
IMAGEN 4.4: EFECTOS DE ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS, EVALUACIÓN NIELSEN MODIFICADA Y MEYER-PETER (CAUDAL 4.24 LTS/S EN EL MODELO, 75 M ³ /S EN EL PROTOTIPO)	74
IMAGEN 4.5: EFECTOS DE EROSIÓN, ECUACIÓN VAN RIJN (CAUDAL 4.24 LTS/S EN EL MODELO, 75 M ³ /S EN EL PROTOTIPO)	75
IMAGEN 4.6: ZONAS DE DEPOSITACIÓN PRESENTADAS AL APLICAR TASA EVALUADA CON LAS ECUACIONES DE NIELSEN SIMPLIFICADA (CAUDAL DE 16.97 LTS/S EN EL MODELO 300 M ³ /S EN EL PROTOTIPO)	76



UNIVERSIDAD DE CUENCA

LISTA DE SÍMBOLOS



UNIVERSIDAD DE CUENCA



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 RESUMEN

El estudio de los procesos de arrastre de fondo en cauces es fundamental para el establecimiento de los parámetros de diseño y de las condiciones a las cuales podría estar sujeta una obra hidráulica o una intervención. Al momento se dispone en la literatura técnica de muchas ecuaciones que interpretan el fenómeno de transporte de carga de lecho en cauces naturales, sin embargo, dichas ecuaciones han sido desarrolladas para condiciones específicas, como por ejemplo: condiciones de laboratorio, cauces de ríos de llanura, rangos limitados de caudal, etc. Esto hace que no se disponga al momento de relaciones definitivas que permitan establecer tasas de transporte de carga de lecho de manera especial para el caso de ríos de montaña. Para el estudio se ha realizado un análisis de ecuaciones para transporte de carga de lecho, las mismas que han sido validadas con la ayuda de un modelo hidráulico de escala reducida no distorsionada de lecho móvil. Como resultado se ha establecido que luego de haber probado con las tasas obtenidas con las formulaciones de Meyer-Peter, Nielsen Simplificada y Van Rijn, las tasas determinadas mediante la ecuación de Nielsen simplificada, se han ajustado adecuadamente al “Río Negro”, las tasas incorporadas con la formulación de Van Rijn resultaron subestimadas debido a que la ecuación está basada en materiales de granulometría menor que la representativa del río, y las tasas obtenidas con la formulación de Meyer-Peter resultaron sobreestimadas, ya que provocaron procesos de acumulación durante los ensayos de calibración.

1.2 ANTECEDENTES

Dentro de los fenómenos y procesos interactivos que estudia la hidráulica de lecho móvil, sin duda el más importante es el de transporte de sedimentos que ocasiona azolvamiento y erosión. La evaluación o estudio del proceso de transporte de sedimentos y de los fenómenos asociados como la erosión y depositación, se puede realizar a partir de la construcción de modelos hidráulicos de escala reducida de lecho móvil. En este sentido, y puesto que la eficiencia y confiabilidad de un modelo hidráulico bien concebido es una herramienta importante para toma de decisiones hacia aspectos económicos y de seguridad tanto en las fases de construcción y de operación, para el proyecto de generación Hidroeléctrica HIDRO SAN BARTOLO, la empresa HIDROSANBARTOLO S.A. en convenio con la Universidad de Cuenca ha decidido financiar la ejecución de un estudio que permita la evaluación de procesos de flujo y la optimización del diseño de las obras. El estudio ha sido realizado en el Laboratorio de Dinámica de Fluidos del Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS en un modelo global de las obras de cierre y de captación para el proyecto, a través de dicho modelo se han ejecutado de manera conjunta otras iniciativas para evaluar aspectos



relacionados a procesos como: transporte de sedimento en suspensión, procesos fluviomorfológicos y disipación de energía.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir al entendimiento de los procesos relacionados al transporte de la carga de lecho en cauces de montaña mediante el estudio en modelo físico de escala reducida

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las ecuaciones más relevantes para cálculo de tasas de transporte de carga de lecho
- Estudiar los procesos de arrastre de fondo y de equilibrio para el proyecto mediante un modelo físico de escala reducida
- Validar en un modelo físico de escala reducida las tasas de transporte de lecho calculadas
- Proyectar la tasa de transporte de fondo para el cauce en el proyecto

1.4 JUSTIFICACIÓN

El estudio de procesos de flujo relacionados al transporte de sedimento tanto de lecho como en suspensión, reviste de especial importancia para el diseño de obras para aprovechamiento hidráulico así como para la operación y mantenimiento. De manera particular, para ríos de montaña, no se dispone en la literatura técnica de suficiente información para predecir de forma adecuada las tasas de transporte debido a que los aspectos que caracterizan los cauces montañosos hacen aún más complejo el tratamiento del fenómeno desde un punto de vista exclusivamente teórico. Es por esto que el estudio de dichos procesos debe estar acompañado de procedimientos como la modelización física, mediante la cual es factible identificar relaciones causa-efecto, grado de influencia, verificar relaciones matemáticas, grado de influencia de variables presentes, etc. Solo a través de una mejor evaluación del transporte de carga de lecho es posible establecer criterios y conclusiones que permitan la optimización, corrección y complementación de diseños a fin de garantizar el buen desempeño de una obra hidráulica.



CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO EN CAUCES NATURALES

2.1.1 GENERALIDADES

Los lechos de los diversos ríos pueden estar caracterizados por materiales granulares y cohesivos. En el caso de materiales granulares el lecho estará constituido por una serie de partículas sueltas con tamaños variables. Los ríos con lechos granulares son de origen aluvial. (Martin Vide, 2003). De la misma manera un lecho puede encontrarse conformado por un cauce de roca que no debe considerarse inamovible sino más bien de transporte lento ya que ejerce mayor resistencia a la erosión fluvial. Por otro lado están los lechos cohesivos que se caracterizan principalmente porque al suceder una erosión de fondo, el nuevo fondo generado ya no es cohesivo sino se presentará granular. Las partículas cohesivas (arcillas, limos) se localizan adheridas unas contra otras, y el movimiento de sólidos se verá afectado por una fuerza adicional llamada fuerza de cohesión, de la cual carecen los materiales granulares (arenas, gravas), que para ser empujados solo bastaría con ganar a la resistencia ejercida por su propio peso que estará en relación a la vez con su forma. (Rocha, 1998).

En general los sedimentos señalados con anterioridad adquieren un comportamiento no cohesivo (arena, grava), y el flujo puede llegar a distorsionar el lecho de varias formas, debido a las fuerzas de arrastre que están actuando sobre el mismo, y puede cambiar el movimiento de sedimentos, volviéndose un proceso interactivo sumamente complejo.

Los parámetros básicos que predominan en la formación del lecho son (Chanson, 2004):

- Pendiente del lecho
- Profundidad
- La velocidad de flujo
- Tamaño del sedimento
- Velocidad de asentamiento de la partícula

El movimiento de la carga de lecho es la denominación que se le da al transporte de un determinado tipo de material ya sea este limo, arena, grava, cantos rodados, entre otros, en ríos y corrientes aluviales. (Chanson, 2004). La carga de sedimentos es el material transportado, y está formada por la carga de lecho y la carga de suspensión.



PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS

Volumen y densidad de masa

Peso específico de las partículas sólidas

Una de las principales propiedades de la partícula individual es su peso específico, el cual corresponde al peso por unidad de volumen de sólido, y se obtiene del producto de la densidad de masa por la aceleración de la gravedad. Generalmente, los cauces naturales están formados por partículas provenientes de la meteorización de rocas y minerales cuyo peso específico tiene poca variación. Un valor medio es 2.65 gr/cm^3 .

Densidad relativa

Es el cociente o proporción entre el peso específico de la partícula sólida y el peso específico del agua. Es importante señalar que este corresponde a un valor adimensional. Un valor medio de gravedad específica es 2,65.

Peso específico sumergido de la partícula

De acuerdo con el principio de Arquímedes se afirma que el peso específico de una partícula sumergida en agua es igual a la diferencia entre el peso específico de la partícula sólida y del agua.

Tamaño o diámetro del sedimento

Para un sedimento determinado la propiedad más importante es su tamaño, debido a que es una representación del volumen por la poca variación del peso específico de las partículas que se encuentran conformando los distintos lechos. Es importante señalar que en función del tamaño o escala de las partículas se pueden caracterizar distintas propiedades de las mismas como se observa en la Tabla 2.1.



Nombre de Clase	Diámetro d_s (mm)	Angulo de Reposo ϕ (grados)	Esfuerzo cortante crítico $(\tau_o)_c$ (N/m ²)	Velocidad cortante crítica V_{*c} (m/s)	Velocidad de Sedimentación ω_o (mm/s)
Rocas					
Muy grande	>2048	42	1790	1.33	5430
Grande	>1024	42	895	0.94	3839
Mediano	>512	42	447	0.67	2715
Pequeño	>256	42	223	0.47	1919
Rocas redondeadas					
Grande	>128	42	111	0.33	1357
Pequeño	>64	41	53	0.23	959
Gravas					
Muy grueso	>32	40	26	0.16	678
Grueso	>16	38	12	0.11	479
Mediano	>8	36	5.7	0.074	338
Fino	>4	35	2.71	0.052	237
Muy fino	>2	33	1.26	0.036	164
Arenas					
Muy grueso	>1	32	0.47	0.0216	109
Grueso	>0,5	31	0.27	0.0164	66.4
Mediano	>0.25	30	0.194	0.0139	31.3
Fino	>0.125	30	0.145	0.012	10.1
Muy fino	>0,062	30	0.110	0.0105	2.66
Limo					
Grueso	>0.031	30	0.083	0.0091	0.067
Mediano	>0.016	30	0.065	0.0080	0.167
Fino	>0.008		Material Cohesivo		0.042
Muy fino	>0,004				0.01
Arcilla					
Grueso	>0.0020				2.6x10-3
Mediano	>0.0010				6.5x10-4
Fino	>0.0005				1.63x10-4
Muy fino	>0.00024				4.1x10-5

Tabla 2.1: Propiedades aproximadas de los sedimentos de acuerdo al tamaño (Julien P. Y., 2002)

La denominación del tipo de partícula de acuerdo al tamaño se presenta en la Tabla 2.2:

1) Cantos rodados (250-4000 mm)	muy grandes	4000-2000 mm
	grandes	2000-1000 mm
	medianos	1000-500 mm
	pequeños	500-250 mm
2) Guijarros (64-250 mm)	grandes	250-125 mm
	pequeños	125-64 mm
3) Gravas (2-64 mm)	muy gruesa	64-32 mm
	gruesa	32-16 mm
	media	16-8 mm
	finas	8-4 mm
	muy fina	4-2 mm
4) Arenas (0.062- 2 mm)	muy gruesa	2-1 mm
	gruesa	1-05 mm
	media	0.5-0.25 mm
	finas	0.25-0.125 mm
	muy fina	0.125-0.062 mm
5) Limos (4 a 62 μ) = (0.004 a 0.062 mm)		
6) Arcillas (0.24 a 4 μ) = (0.00024 a 0.004 mm)		

Tabla 2.2: Clasificación de partículas de acuerdo a su tamaño (Julien P. Y., 2002)

A partir de la caracterización de una partícula de acuerdo a su tamaño se pueden establecer conceptos sobre el tamaño representativo de la misma, los cuales son establecidos por el U.S: Inter Agency Committee on Water Resources, Sub-Committee on Sedimentation, como sigue:

Diámetro nominal: es el diámetro de una esfera cuyo volumen es equivalente al volumen de la partícula (Ilustración 2.1).

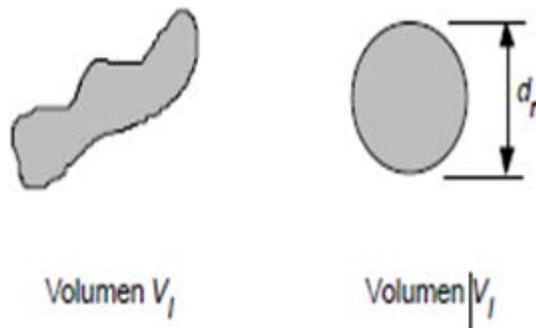


Ilustración 2.1: Diámetro nominal (Rocha, 1998)

Diámetro de cribado: es conocido también como diámetro de tamiz, y en general es el más usado, por la simplicidad en su determinación, y es equivalente a la abertura de malla mínima para que pase la partícula (Ilustración 2.2).

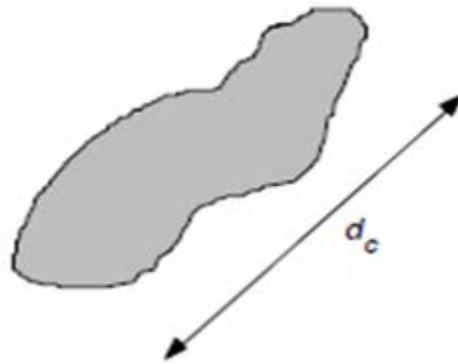


Ilustración 2.2: Diámetro de cribado (Rocha, 1998)

Diámetro de sedimentación: es el diámetro de una esfera del mismo peso específico que la partícula de sedimento, y cuya velocidad de caída terminal es igual a la de la partícula (Ilustración 2.3).

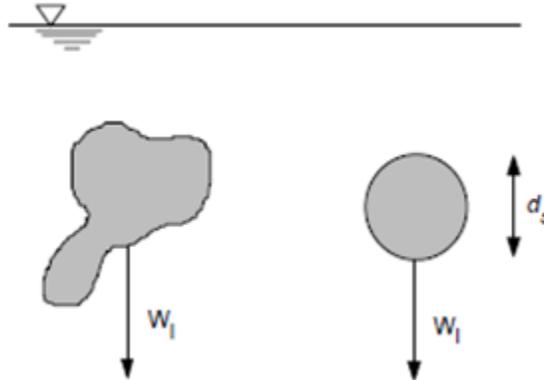
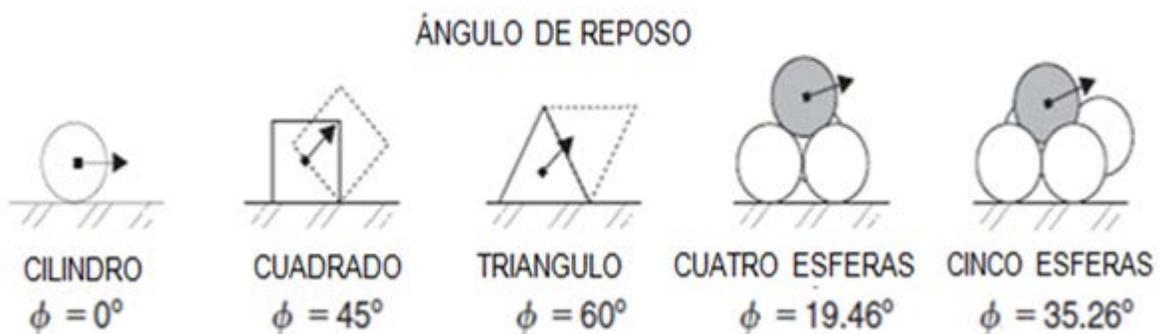


Ilustración 2.3: Diámetro de sedimentación (Rocha, 1998)

Distribución de tamaño de las partículas

Los materiales de fondo cuando se encuentran en condiciones naturales, tienden a poseer una distribución de tamaños asimétrica. En general la manera de establecer una distribución de tamaños de partículas se logra pasando el conjunto de partículas por tamices de diferentes tamaños, y obtener el peso de las partículas que pasan por un determinado tamiz y son retenidas por el siguiente. Los resultados se grafican en una curva de porcentajes de pesos acumulados versus diámetros de tamices obteniendo la “Curva Granulométrica”, que es la representación o caracterización de la distribución de tamaños que presenta un conjunto de partículas de sedimento. (Martin Vide, 2003). El tamaño más importante a considerarse es el d_{50} , que es el diámetro de tamiz que deja pasar el 50% del material y que en la mayoría de casos se considera como el representativo del grupo de sedimentos. Un criterio importante dentro de la distribución de tamaños de sedimentos es el coeficiente de uniformidad, el cual se obtiene a partir de la curva granulométrica.

Los materiales que son provenientes de lechos fluviales como es el caso de los ríos poseen un grado de uniformidad evidente, el cual será establecido a través del análisis granulométrico. Este coeficiente se expresa a través de la expresión (2.1).





Velocidad de sedimentación de la partícula

Cuando tenemos un fluido en reposo las partículas más pesadas se sedimentan con un movimiento vertical hacia abajo. La velocidad final de la partícula será la velocidad de la partícula en equilibrio, en donde la suma de las fuerzas, gravitacional, flotación y arrastre es igual a cero. Este es un parámetro descriptivo de primera importancia en el estudio de la interacción flujo – sedimento, principalmente en el estudio del transporte de sedimentos.

La velocidad de caída de una partícula se expresa de la siguiente manera:



en la resistencia al escurrimiento debido a variaciones en la rugosidad, todo lo descrito converge en cambios morfológicos de la sección transversal que influyen en el transporte de sedimento.

En resumen el material que entra en transporte o arrastre de fondo está constituido por partículas de tamaño considerable, que se deslizan o ruedan siempre en contacto con el fondo a una velocidad menor a la corriente y van generando a su paso diversas formas. Es importante señalar que como el tipo de transporte que se producirá va a depender de las velocidades que presentan las corrientes, entonces un aumento o disminución de dicha velocidad se expresará en un cambio de la modalidad de transporte, debido a que el transporte de suspensión se produce bajo altas velocidades semejantes a las que presenta la corriente.

Los parámetros principales que intervienen en el análisis del inicio del movimiento de sedimentos son (Chanson, 2004):

- El esfuerzo cortante del lecho (



UNIVERSIDAD DE CUENCA

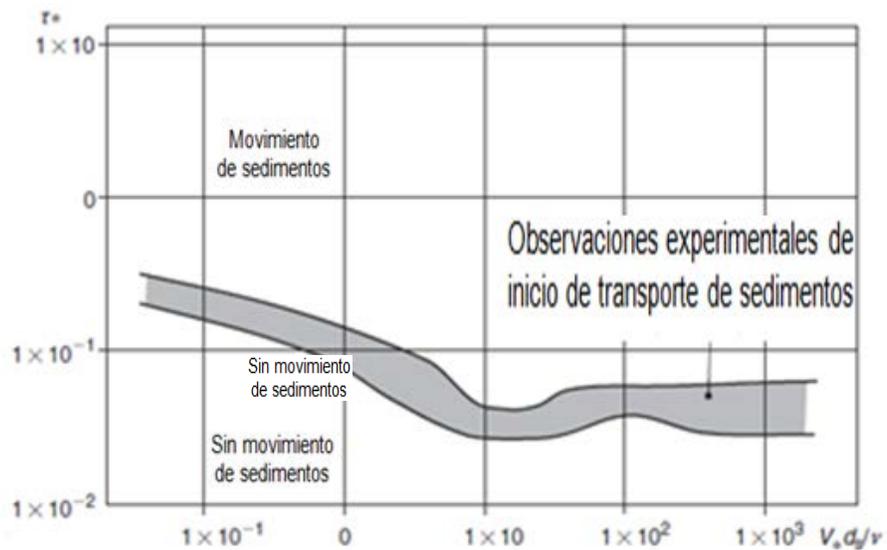
Donde

La URL de esta página es: [http://www.uca.edu.ec](#)



CONDICIÓN PARA EL MOVIMIENTO DE CARGA DE LECHO

Para que se produzca o inicie el movimiento de carga de lecho, las condiciones tanto del material como del fluido deben converger en la siguiente condición:





Flujo turbulento liso		0.035 <
Régimen de Transición	4 a 5 <	0.03 <
Flujo turbulento completamente rugoso	75 a 100 <	0.03 <

Tabla 2.3: Tendencias del diagrama de Shields para distintos regímenes de flujo turbulento (Chanson, 2004)

Cuando se produce un flujo turbulento completamente rugoso el parámetro crítico de Shields (

pequeñas, de manera que luego del primer proceso de erosión aguas abajo se forma una capa más resistente a la erosión. (Chanson, 2004).

Pendiente del lecho: Pendientes altas ayudan a desestabilizar las partículas, produciendo movimiento del lecho a bajos esfuerzos cortantes comparado con los lechos de menor pendiente. Cuando la pendiente del lecho es mayor al ángulo de reposo propio de la partícula, se considera a un lecho como inestable, ya que una partícula aun sin la presencia de flujo podría rodar o moverse a través del lecho, la consideración de la pendiente longitudinal se puede resumir en el hecho de que las partículas de sedimento pueden iniciar su movimiento cuando la suma de las fuerzas críticas del fluido es equivalente a la suma de fuerzas estabilizantes como se observa en la ilustración (2.6). Y cuando se toma en cuenta la pendiente transversal una partícula de sedimento se pondrá en movimiento cuando la suma de las fuerzas de conducción del fluido sea igual a la suma de las fuerzas de estabilización de la partícula. (Chanson, 2004)

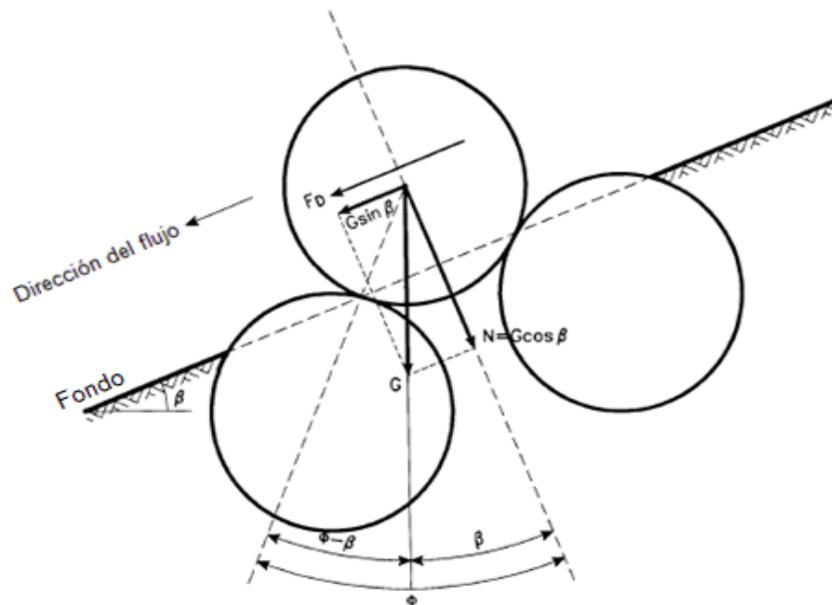


Ilustración 2.6: Fuerzas que actúan en una partícula de sedimento (efecto de una pendiente longitudinal) (Chanson 2002)

Materiales cohesivos: al presentarse un lecho que está compuesto por arcilla u otros materiales lodosos, el movimiento de las partículas de sedimento se ve influenciado por fuerzas cohesivas entre las partículas, dependiendo del tipo de material de arcilla, este efecto puede ser más o menos pronunciado. Las fuerzas cohesivas aumentan la resistencia del lecho a la erosión, influyendo de esta manera en el inicio del movimiento. El factor más importante del cual dependen las fuerzas cohesivas es el grado de consolidación del material de fondo. (Chanson, 2004)

2.1.3 PRINCIPALES ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE CARGA DE LECHO

Cuando el esfuerzo cortante del lecho excede un valor crítico, los sedimentos son transportados en forma de carga de lecho y carga en suspensión. Para el transporte de carga de lecho, los modos básicos del movimiento de las partículas son: rodante, deslizante y por saltación (ver ilustración 2.7) (Chanson, 2004)

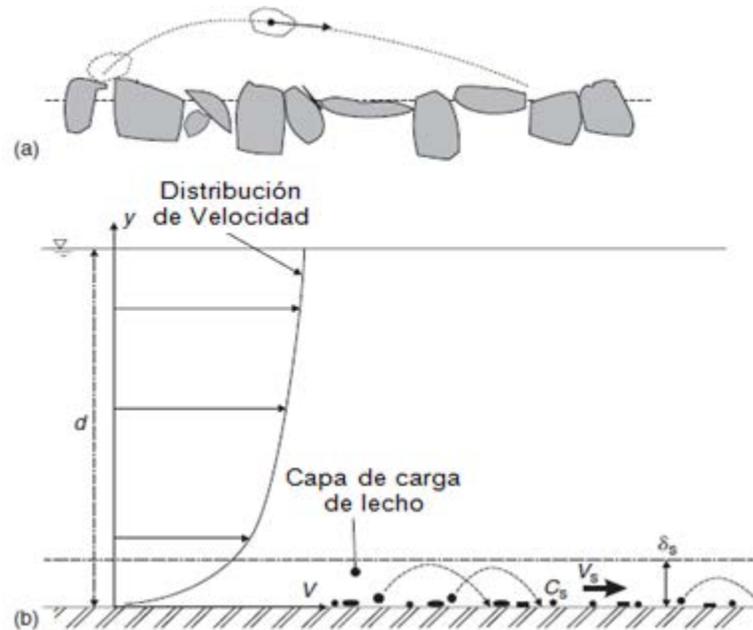


Ilustración 2.7: Movimiento de carga de lecho. (a) Esquema de movimiento en saltación. (b) Esquema de definición de la capa de carga de lecho (Chanson, 2004)

Las ecuaciones para predecir las tasas del transporte de carga de lecho pueden ser medidas en peso, masa o volumen por unidad de tiempo, y en la práctica se expresara por unidad de ancho y se miden por la masa o por el volumen, la masa y el volumen se relacionan con la siguiente expresión:

es importante señalar que estas ecuaciones no son exactas por lo que requieren de una validación y que su aplicación se encuentre dentro del rango para el cual fueron obtenidas. (Martin Vide, 2003). Una limitación de estas ecuaciones es que son fórmulas de capacidad de transporte (transporte en potencia), de manera que para que el transporte real sea comparable a la capacidad de transporte es necesario que haya sedimento disponible para la corriente, y si no se dispone de material el transporte real será menor a la capacidad, entonces para un flujo dado la capacidad de transporte es menor a mayor tamaño, como se puede observar en la ilustración (2.8).

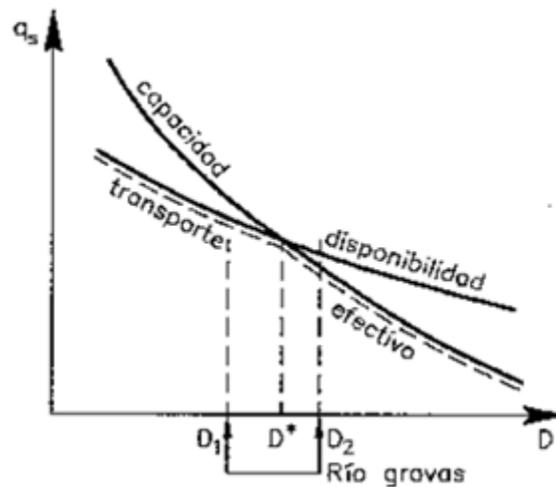


Ilustración 2.8: Disponibilidad y capacidad en relación al transporte sólido (Vide, 2003)

La utilización de una fórmula de transporte será inexacta si el material es más fino que el diámetro representativo pues la cantidad transportada está controlada por la disponibilidad de material a más de la capacidad de transporte.

La relación más práctica que se adopta en el cálculo de las tasas de transporte de sedimentos es por unidad de ancho y es la siguiente:



ECUACIÓN DE DU BOYS (1879)

Es la fórmula más antigua conocida para el cálculo del transporte de material de fondo, fue publicada en 1879, y partió de la suposición de considerar que el transporte de fondo se producía por medio de capas cuyo espesor estaba en la misma relación del diámetro de las partículas que constituían el lecho. Sin embargo MEYER – PETER señalan que el suponer que el transporte se realiza por capas está alejado de la realidad.

Otra consideración importante es afirmar que las distribuciones verticales de velocidades y de corte se presentan lineales, e introdujo el concepto de fuerza tractiva crítica.

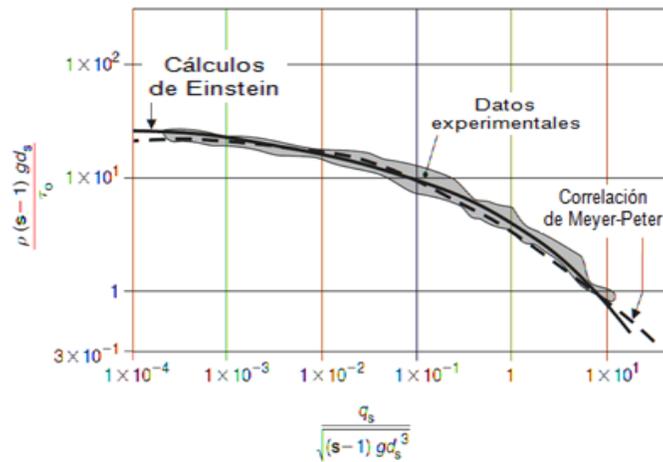


UNIVERSIDAD DE CUENCA

pendiente del lecho,



Es una ecuación semiteórica que se obtuvo a partir de experimentos de laboratorio para mezclas de arena. Para su obtención se requiere de una gráfica de diseño (ver ilustración 2.9). Los valores obtenidos con esta expresión son comparables a los obtenidos con la expresión de Meyer Peter siempre y cuando se trabaje dentro de su rango de validez.





UNIVERSIDAD DE CUENCA

Ecuación empírica obtenida mediante ensayos de laboratorio, cubre pendientes de hasta el 2%, y tamaños del material de 30 mm (material grueso). Es considerada apropiada para canales anchos (grandes relaciones ancho profundidad).



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Donde



2.2 MODELOS HIDRÁULICOS PARA ESTUDIOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO

Los modelos físicos son importantes en la resolución de problemas en la ingeniería hidráulica, consisten básicamente en la réplica del problema a escala reducida (modelo), llamando a la realidad prototipo, la utilización de modelos se vuelve necesaria debido a que el cálculo hidráulico no ha alcanzado la competencia suficiente como para remplazarlos, los motivos para que los cálculos no sean perfectos es debido a fenómenos de turbulencia y las dificultades que presentan los contornos reales tridimensionales y sobre todo cuando se trata de modelos de lecho móvil. Aunque los modelos reducidos son costosos y presentan un tiempo de construcción y calibración, puede producir en un futuro un ahorro mucho mayor, luego de que se implementen las mejoras y corrección de errores que posteriormente hubieran obligado a obras de reparación. (Martin Vide, 2003). En el siglo XX la ingeniería hidráulica se benefició enormemente por el desarrollo de las teorías de la capa límite y de la turbulencia dentro del campo de la mecánica de fluidos, pero en la actualidad es recomendable llevar de la mano tanto la parte teórica como la experimentación mediante modelos hidráulicos con el fin de mejorar y optimizar resultados.

Para el empleo adecuado de un modelo determinado es sumamente importante conocer de manera clara y precisa los principios de similitud, se pueden enunciar tres tipos diferentes:

- Similitud geométrica
- Similitud cinemática
- Similitud dinámica

SIMILITUD GEOMÉTRICA

Se obtiene una similitud geométrica cuando se logra que la relación de dimensiones se mantenga, por lo cual se la denomina similitud de forma.

SIMILITUD CINEMÁTICA

Para lograr este tipo de similitud es necesario que se cumplan las siguientes condiciones:

- Los patrones o las trayectorias del movimiento sean geoméricamente similares.
- Las razones de las velocidades de las partículas involucradas en los dos movimientos sean iguales.



SIMILITUD DINÁMICA

Para lograr este tipo de similitud es necesario que se cumplan las siguientes condiciones.

- La razón de las masas de los objetos involucrados sea igual.
- Las razones de las fuerzas que afectan el movimiento sean iguales.

Para aproximarse a una similitud dinámica es necesario realizar un escalamiento de las ecuaciones de régimen, aunque existe otro método que nos permite lograr este objetivo que es aplicar el análisis dimensional. Es recomendable confinar la similitud a una sola fuerza, debido a que en la mayoría de problemas en canales abiertos la fuerza de gravedad es primordial y el uso respectivo de agua como fluido es casi un factor común en la realización de modelos hidráulicos, con sus respectivas excepciones. Lo que se busca es obtener un flujo turbulento, haciendo que el número de Reynolds basado en el radio hidráulico exceda de 2000, si se sabe que el flujo laminar se produce cuando el número de Reynolds es menor que 500, de manera que existe una zona de transición entre estos dos valores, el objetivo al momento de realizar experimentación en un modelo hidráulico es estar alejado de esta zona.

Además la elaboración de un modelo está sujeto a Limitaciones físicas como:

- Tiempo
- Dinero
- Espacio del laboratorio y equipamiento
- Abastecimiento de agua disponible

2.2.1 LEY DE SEMEJANZA DE FROUDE

Como lo establece la teoría para flujos a cielo abierto, las relaciones entre los parámetros hidráulicos en el modelo y en el prototipo se rigen por la condición de similitud de Froude.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Donde



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- La rugosidad de frontera del modelo no está controlada por el diseño, por lo que es una variable dinámica controlada por el movimiento del sedimento y la forma del fondo que se desarrolla.
- Es necesario simular correctamente no solo el movimiento de agua del prototipo si no también el movimiento del sedimento del prototipo.

Modelos de fondo móvil no distorsionado son utilizados para el caso de la modelación de ríos, cuyos prototipos poseen superficies relativamente rugosas y tienen una escala horizontal que varían desde 1:2000 hasta 1:100 y una escala vertical con una variación de 1:150 hasta 1:50. Para este tipo de modelos es necesario un estricto cumplimiento de la similitud dinámica.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

El proyecto hidroeléctrico “HidroSanBartolo” comprende una central de generación hidroeléctrica de pasada con una potencia de generación aproximada de 48.07 megavatios (MW), y que generará alrededor de 350 gigavatios (GW) por año, con un factor de planta del 83,25%. El proyecto está ubicado en la provincia de Morona Santiago, en la zona poblada de San Bartolo, teniendo como centros poblados próximos a Copal, La delicia, La dolorosa entre otros. Las coordenadas del proyecto son 787741 – 9696202 (UTM WGS84 ZONA 17 S). 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 tubería es de 5.500 metros para mantener una carga neta de 183 metros.

Obra de Toma: La captación es del tipo convencional y captará un caudal de 30 m³/s. Cuenta con un azud con un ancho de 19.5m y una altura de 12.8m, tres compuertas que serán utilizadas en eventos de crecida para la evacuación de caudal con una abertura de 7 m y un ancho de 6m, 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 800m de longitud continuando con un tramo formado de una tubería circular hasta alcanzar la casa de máquinas.

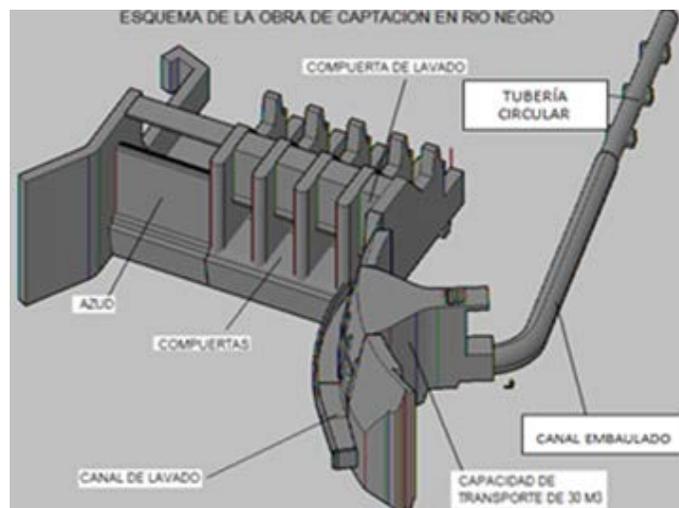


Ilustración 3.1: Esquema de la obra de captación y conducción para el proyecto hidroeléctrico “Hidro San Bartolo” (Pacheco & Carrillo, 2012)

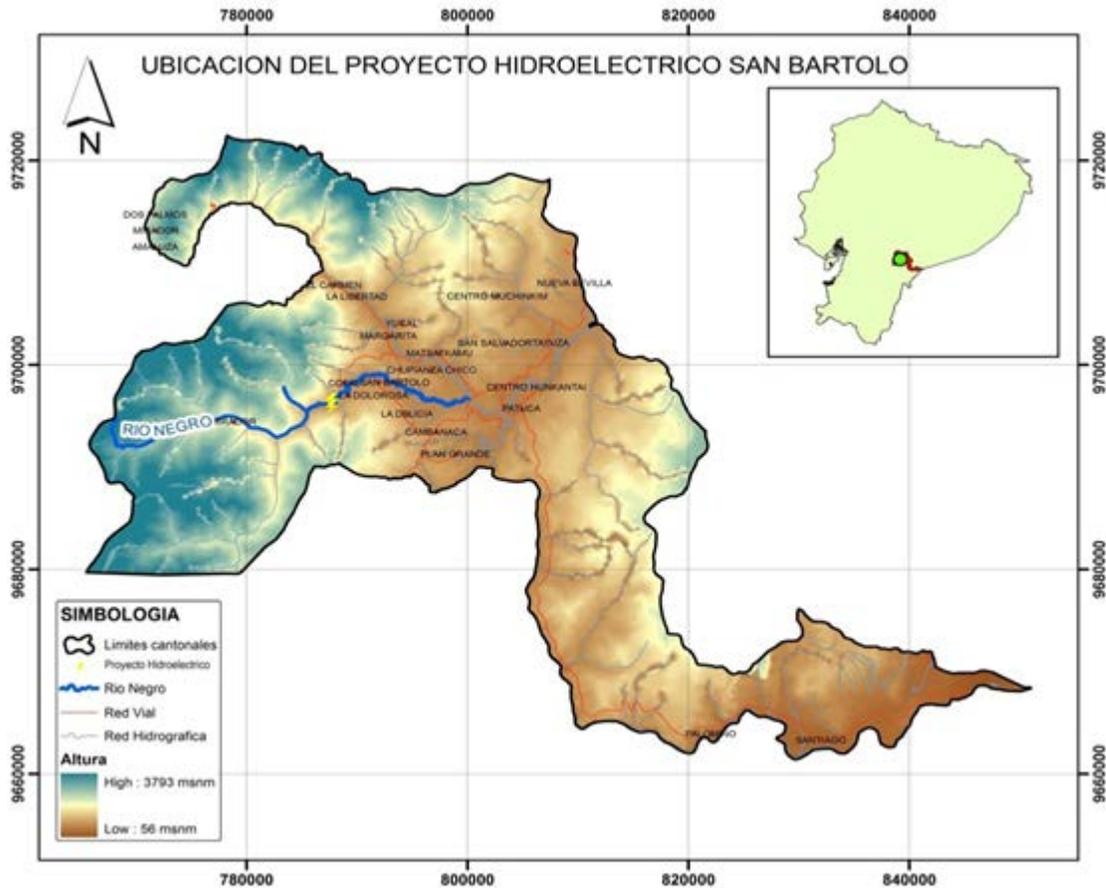


Ilustración 3.2: Mapa de ubicación del proyecto hidroeléctrico “Hidro San Bartolo”

3.2 CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL MODELO

3.2.1 CONSIDERACIONES DE HIDROLOGÍA FLUVIAL PARA EL MODELO

Tomando en cuenta que el cauce en análisis corresponde a un río en dinámica de procesos erosivos y de transporte, se ha asociado estos fenómenos y los procesos de flujo a la hidrología de los eventos de regularidad hidrológica, y a la hidrología de eventos extremos como base para el análisis de los fenómenos asociados al transporte de carga de lecho en situaciones extremas.

HIDROLOGÍA DE CAUDALES CLASIFICADOS

Del resultado de los estudios hidrológicos definitivos (ver tabla 3.1) se establece que la distribución de los valores medios mensuales para esta zona obedece al comportamiento de un régimen amazónico, es decir con caudales mayores en la mitad del año. Al analizar la distribución de los caudales medios mensuales se puede establecer como adecuado el caudal medio anual como el caudal formativo



del cauce, considerando el valor de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ para efecto de todos los estudios necesarios en el modelo físico.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Mínimo	19,8	19,2	21,0	22,5	27,7	31,9	47,0	21,2	25,1	22,0	19,5	19,1	35,4
Medio	29,4	37,2	45,7	60,4	64,6	73,1	76,6	59,7	48,0	41,2	34,7	31,2	49,3
Máximo	52,5	74,1	85,5	112,6	105,4	116,8	103,3	92,0	85,6	71,9	61,4	57,5	65,3

Tabla 3.1: Caudales Medios Mensuales en los Sitios de Toma del Aprovechamiento Copal - San Bartolo en m^3/s (Pacheco & Carrillo, 2012)

3.2.2 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DEL CAUCE

Al tratarse de un modelo no distorsionado de lecho móvil es de fundamental importancia conocer con claridad las características morfológicas principales del cauce en estudio para posteriormente establecer si se están replicando los fenómenos propios del prototipo en el modelo. El conocimiento de las características morfológicas ayuda en el ajuste de las tasas de transporte, ya que se deben reflejar en el modelo los aspectos morfológicos más importantes como la pendiente, al aplicar una tasa previamente estimada bajo un caudal formativo.

Con la consideración de que el tramo en estudio corresponde a una zona de transición entre pendiente del orden de 8% (macro escala) a una zona de menor pendiente 5% se ha creído pertinente identificar características importantes a lo largo del cauce en un trayecto de aproximadamente 6 km aguas arriba del sitio de emplazamiento de la obra de captación.

De las observaciones realizadas en campo (visita técnica realizada) y en términos generales se lograron identificar las siguientes características.

- El cauce presenta el descenso de la pendiente longitudinal, siendo un proceso natural su continua evolución sobre las llanuras de inundación. Entonces es necesario correlacionar los procesos morfológicos con los posibles efectos debidos a la regularidad hidrológica (formativa del cauce) y a eventos extremos.
- Los tramos donde se realizó el presente estudio se encuentran atravesando un proceso de transición de una zona de erosión de lecho a una de depositación, por lo cual presenta las típicas configuraciones morfológicas de escalonamiento en micro y macro escala.

- Aguas abajo del sitio de emplazamiento de la obra y a medida que la pendiente disminuye, en el río se empieza a identificar zonas de pendiente baja (ver imagen 3.1).



Imagen 3.1: Aguas abajo del emplazamiento de la obra pendientes bajas (Pacheco & Carrillo, 2012)

- El cauce presenta profundización del lecho en lugar de llanuras de inundación, lo cual puede ser un factor que se suma a la inestabilidad de taludes y deslizamientos observados.
- Adicionalmente aguas abajo de la estructura de captación la configuración morfológica del cauce establece una amplia zona cóncava hacia la margen derecha con rocas de $\phi=60\text{cm}$ como promedio ver imagen 3.2.



Imagen 3.2: Piedras $\Phi=60\text{ cm}$ existentes aguas abajo del emplazamiento de la obra (Pacheco & Carrillo, 2012)

- En la zona donde será emplazada la obra de captación se observó al margen derecho en sentido del río, un depósito de material fino de

dimensiones considerables, el banco tiene una potencia aproximada de 1.5 m de altura ocupando una área aproximada de 400 m²

- Metros antes del lugar donde se emplazará la obra, en el margen izquierdo se observó un tramo que se encuentra en contra pendiente y está conformado por un lecho duro

3.2.3 INFORMACIÓN GEOLÓGICA REGIONAL

El tramo de estudio se encuentra en una zona de rocas metamórficas, además de localizarse próximo a la zona de transición con la formación Napo (ver ilustración 3.3). Esta formación metamórfica está constituida principalmente por esquistos cuarcíticos de color blanquecino, esquistos cericíticos, y en menor porción esquistos grafitosos y micáceos.

En la zona se identifican estructuras geológicas como fallas inferidas, y gran cantidad de depósitos coluviales que originan varios derrumbes debido a la inestabilidad de los taludes y las fuertes pendientes.

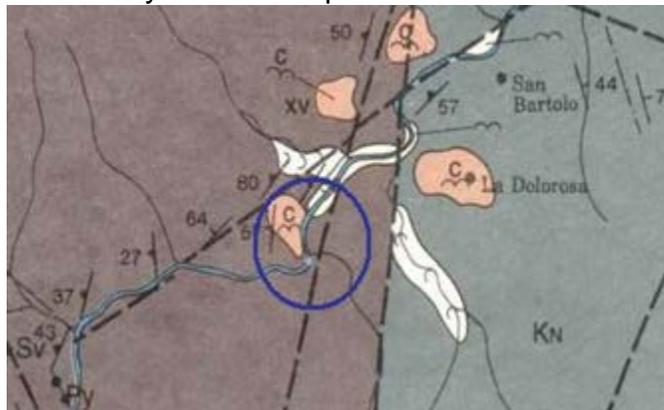


Ilustración 3.3: Geología General de la Zona del Proyecto (Pacheco & Carrillo, 2012)

Desde el punto de vista geomorfológico el río va en sentido Oeste-Este sin cambios de dirección pero con la presencia de curvas pronunciadas. La zona de estudio se encuentra en el cambio entre zona de montaña y la zona de colinas, ver Ilustración (3.4).

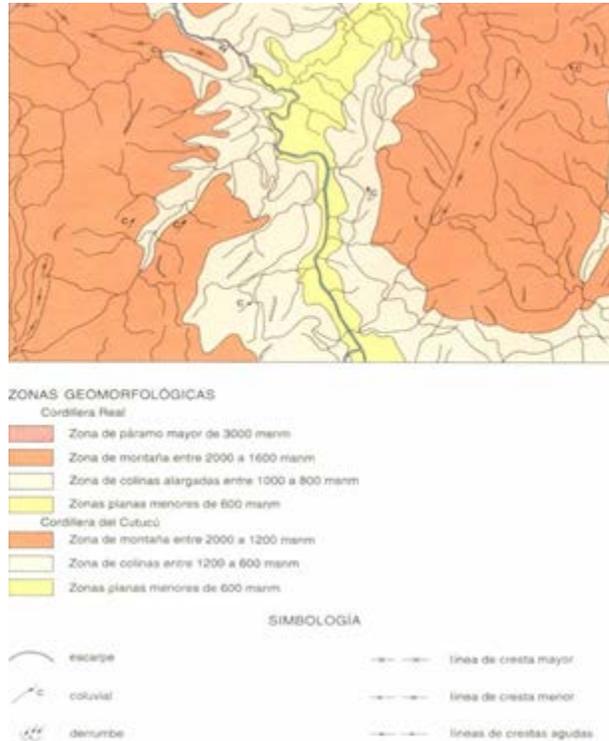


Ilustración 3.4: Esquema Geomorfológico (Pacheco & Carrillo, 2012)

El perfil longitudinal del río (pendiente promedio de micro escala 2% para la zona del proyecto) presenta una característica de escalonamiento asociada a la formación metamórfica, con grandes boleos (hasta dos metros en algunas zonas), y algunos tramos del río con zonas de pendientes muy bajas. Es importante notar las fuertes pendientes de los afluentes secundarios, lo cual podría ser un indicativo de los procesos vinculados a la zona de transición de una zona de socavación a una zona de depositación.

3.2.4 TOPOGRAFÍA DEL LUGAR DE ESTUDIO

Es necesario contar con la información topográfica detallada de interés para el proyecto (zona de implementación de la obra de captación), que comprende una longitud aproximada de 300 metros aguas arriba y aguas abajo de la obra, de manera que, conjuntamente con visitas al lugar, permitan establecer de mejor manera las características geométricas del cauce. La información disponible tiene una resolución que permite disponer de curvas de nivel cada metro. La topografía fue proporcionada por la empresa HIDROSANBARTOLO S.A. (VER ANEXO B).

3.2.5 CONSIDERACIONES ADICIONALES PARA EL MODELO

Para la construcción, implementación y calibración del modelo se han considerado los grados de libertad para la planta, ancho (dentro de la limitación impuesta por la orografía del encauzamiento) y calado de flujo. A través de la observación de



dichos parámetros se realizó el establecimiento del cauce base para el modelo de tal manera que se pueda a futuro tomar en cuenta los aspectos de variación espacial y temporal en el tramo analizado.

Una aproximación al caudal formativo del cauce es necesaria con el fin de obtener un mejor entendimiento del comportamiento morfológico más representativo, antes de considerar el evento de la avenida de diseño. En consideración de la información hidrológica antes mencionada, se ha fijado un caudal dominante (caudal formativo) de $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Así mismo, y para efectos de identificación de otros caudales de interés, y para 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 ($75 \text{ m}^3/\text{s}$), además de caudales correspondientes a periodos de retorno de 5 y 10 años.

En el proceso de calibración del río es sumamente importante realizar un análisis cualitativo de los fenómenos de arrastre y depositación que permitirán evaluar y calibrar las ecuaciones utilizadas por lo que en el modelo se ha considerado los aspectos relevantes como la 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.

3.3 CONCEPTUALIZACIÓN PARA EL MODELO

El modelo implementado para la obra de captación del río Negro plantea un estudio en lecho móvil a través del cual se ha inspeccionado las condiciones relevantes como (Pacheco & Carrillo, 2012)

- 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.

3.4 EQUIPAMIENTO

Las pruebas fueron realizadas en el Laboratorio de Dinámica de Fluidos del Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS Universidad de Cuenca, el cual tiene las siguientes características:



El laboratorio de hidráulica cuenta con un canal de experimentación fabricado de fibra de vidrio de dimensiones 15m de longitud, 5m de ancho y 0,70m de alto, equipado con un tanque de reserva tanto en la parte frontal como posterior del canal. El tanque frontal cumple la función de recibir y almacenar el agua proveniente de la circulación en el modelo físico, y el tanque posterior se utiliza para recibir y almacenar la cantidad de agua necesaria para realizar la experimentación. El tanque frontal cuenta con dos vertederos de pared delgada de 2.5m de ancho controlados con un sistema de regulación de flujo. El tanque posterior se encuentra habilitado con un vertedero de pared delgada de 1.1m de ancho y que constituye la puerta de entrada al modelo.

La recirculación del agua del tanque frontal al posterior se realiza con una bomba eléctrica (tabla 3.2) que se encuentra acoplada a un sistema electrónico que permite controlar los caudales enviados a través del modelo. La capacidad o volumen de flujo que es proporcionada por la bomba eléctrica es de 80 l/s.

EL tanque cuenta con un sistema de recirculación constituido por una tubería con un diámetro de 6 pulgadas para la succión y acoplada con una válvula tipo check, y con una tubería de 4 pulgadas instalada con un sistema de válvulas en paralelo utilizadas para la descarga y con el fin de regular los caudales de flujo durante los diferentes ensayos.

Especificaciones Bomba Eléctrica del Sistema	
Marca	Brook Crompton Parkinson Motors
Nº de serie	K826R
Potencia	15KW
Voltaje	220 V
RPM	1740
Amperaje	53 A

Tabla 3.2: Especificaciones bomba eléctrica del sistema (Pacheco & Carrillo, 2012)



Imagen 3.3: Infraestructura del Laboratorio de Modelación Hidráulica de PROMAS-Universidad de Cuenca (Pacheco & Carrillo, 2012)

Adicionalmente se realizaron ensayos en el laboratorio de hidrofísica de suelos con el principal objetivo de caracterizar el sedimento empleado en el modelo, para lo cual se utilizó la serie de tamices estándar regulados por la ASTM (American Society for Testing and Materials) (tabla 3.3) (imagen 3.4) y una tamizadora marca Retsch AS 200, para la caracterización de tamaño del material del fondo y la construcción de la granulometría del fondo del lecho en el modelo. En el análisis granulométrico se utilizaron equipos básicos como balanza y el horno necesarios para preparar el material para realizar el ensayo.

TAMICES		
N ^o	Código	Abertura (mm)
5	302039	4
10	103912	2
18	103906	1
25	302076	0.71
35	99802	0.5
45	302482	0.355
60	302481	0.25
80	302074	0.18
120	302478	0.125
170	302072	0.09
230	302476	0.063

Tabla 3.3: Serie de tamices estándar (ASTM)



Imagen 3.4: Serie de tamices estándar (American Society for Testing and Materials)

EQUIPO COMPLEMENTARIO

Para el control de la alimentación de sedimento al modelo se utilizó una estructura para la incorporación de carga de sedimento al flujo durante la realización de los ensayos. (Imagen 3.5)



Imagen 3.5: Tolva para la Dosificación del Material (Pacheco & Carrillo, 2012)

Para el establecimiento de la pendiente del lecho y el control de las pendientes luego de realizar los ensayos de validación de las tasas de transporte, se contó con un equipo de nivelación que está conformado por un nivel de ingeniero, una trípode y una mira. (Imagen 3.6)



Imagen 3.6: Equipo de nivelación para control de pendientes

3.5 ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE ESCALA REDUCIDA

La concepción del modelo se realizó a partir de la información disponible y de un amplio análisis de los factores que intervienen en el modelo, tales como, las características dimensionales, propiedades de los materiales, capacidad de caudal y otras condiciones de flujo, que permitan en conjunto representar de la manera más óptima los fenómenos que ocurren en el cauce natural.

El modelo implantado es de fondo móvil ya que nos ofrece la ventaja de simular los efectos característicos de la hidráulica fluvial o de corrientes aluviales, como son la erosión y depositación producidos por el fenómeno de transporte de sedimentos.

Para el emplazamiento del modelo en el canal se utilizó una escala no distorsionada de

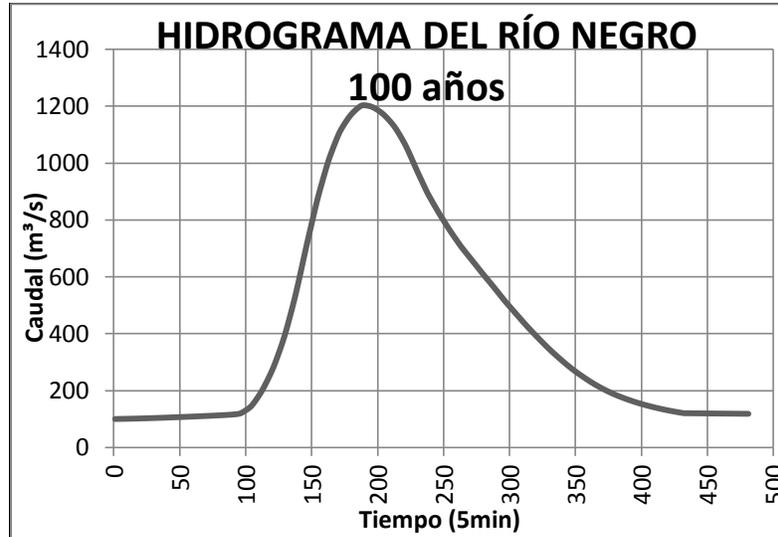


UNIVERSIDAD DE CUENCA

tomado de los estudios de aforos en el cauce proporcionados por la empresa HIDROSANBARTOLO S.A.



- Una vez definidos los datos y condiciones iniciales se procede al cálculo de los parámetros que intervienen en el umbral o inicio del movimiento de carga de lecho, parámetros del flujo como son la velocidad de corte, el esfuerzo cortante y parámetros influenciados por las características del fondo como el número de Reynolds de corte, para luego determinar el parámetro de estabilidad (parámetro de Shields) que relaciona las características del flujo con las del lecho de fondo.
- Con el número de Reynolds de la partícula se procede a establecer según la tabla propuesta por Shields (1936), el parámetro crítico. Para establecer una ocurrencia del movimiento de sedimentos es necesario que el parámetro de estabilidad supere al crítico.
- Ya comprobada la ocurrencia del movimiento de carga de lecho se procede al cálculo de las distintas tasas de transporte para el prototipo.
- Para realizar el cálculo de las tasas de transporte se utilizaron inicialmente ocho ecuaciones (ver sección 2.1.3) que serán evaluadas para establecer la expresión más adecuada para la estimación del transporte de carga de lecho en el “Río Negro”. Hay que considerar que cualquiera que sea finalmente la expresión escogida, estará directamente relacionada con las características de la cuenca, específicamente con su erosionabilidad, producción de sedimentos, entre otras.
- Las tasas de transporte calculadas son las obtenidas para caudales representativos en el prototipo y posteriormente fueron escaladas al modelo para su validación y ajuste, por lo que es necesario utilizar las correlaciones existentes como:



Gráfica 3.1: Hidrograma de 100 años para el “Río Negro” (Villacis, 2011)

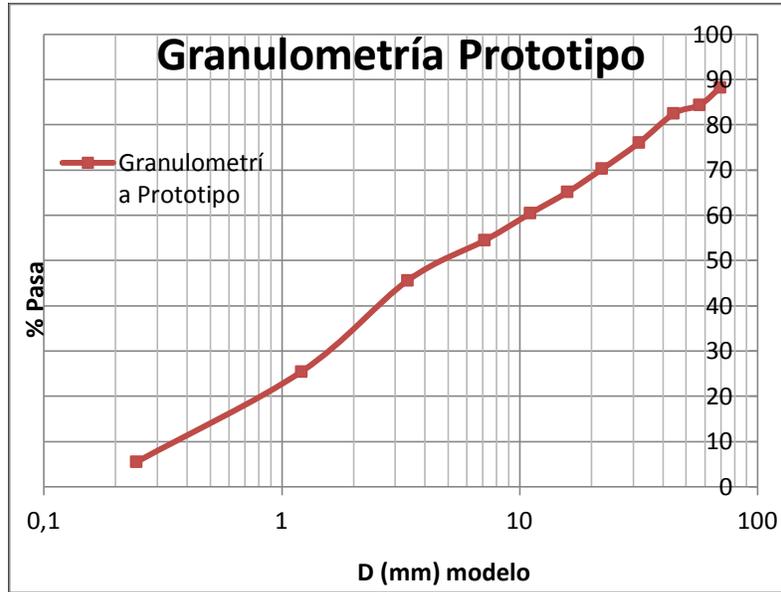
ESCALAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DE LA GRANULOMETRÍA

Para la construcción de la granulometría necesaria para modelar el lecho del río en estudio, se partió de la granulometría del mismo, y se escaló en función de la velocidad de sedimentación de las partículas mediante la ecuación de Soulsby (Soulsby, 1997) que relaciona la velocidad de sedimentación de una partícula con su diámetro.

En la tabla 3.5 y gráfica 3.2 se presentan la granulometría y curva granulométrica correspondiente al lecho del prototipo.

Diámetro	% Pasa
mm	%
76.2	93.28
63.5	83.28
50.8	85.46
38.1	79.45
25.4	72.58
19.1	67.91
12.7	62.3
9.52	58.57
4.76	50.37
2	40.77
0.42	10.15
0.071	0.86

Tabla 3.5: Granulometría del Prototipo (Pacheco & Carrillo, 2012)



Gráfica 3.2: Curva Granulométrica del “Río Negro” (Prototipo) (Pacheco & Carrillo, 2012)

El cálculo se caracterizó primero por relacionar la velocidad de sedimentación de una partícula en el prototipo con la del modelo, a partir de la velocidad de corte que tiene relación con la velocidad de sedimentación de la partícula. La relación entre la velocidad de corte y velocidad de sedimentación en el modelo y el prototipo se establece a partir de suponer que se ha logrado la similitud dinámica o de movimiento de carga de lecho en ambos escenarios, es decir que las fuerzas inerciales, gravitacionales y de fricción son iguales.



UNIVERSIDAD DE CUENCA



Para la selección de las ecuaciones a ser validadas o calibradas en el modelo se procedió a realizar un análisis comparativo de las distintas ecuaciones calculadas para las características propias del río.

En el proceso de calibración se procedió a buscar una tasa de sedimentos que permita que las partículas no sean arrastradas de manera total y que tampoco sean depositadas, es decir que mantenga el equilibrio en el cauce y se conforme la pendiente longitudinal esperada.

3.5.4 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

En cualquier tipo de experimento es sumamente importante la identificación de las variables de interés, las mismas que serán fundamentales en la valoración y estimación de los procesos que están ocurriendo durante la experimentación. En este estudio es necesario diferenciar dos tipos de variables las dependientes y las no dependientes (controlables).

VARIABLES CONTROLABLES

- **Caudal:** se realizó la experimentación para caudales de interés que permitan identificar condiciones de respuesta morfológica del cauce. Los caudales empleados corresponden al caudal formativo adoptado, y el caudal representativo de los periodos húmedos anuales.
- **Tasas de transporte:** establecidas en el proceso de calibración y validación para los caudales en consideración del estudio.

VARIABLES DEPENDIENTES

Para la experimentación se ha considerado el tratamiento de variables dependientes que mediante procedimientos observacionales han permitido pre identificar posibles efectos y procesos de flujo. Las variables dependientes consideradas para nuestro estudio fueron (Pacheco & Carrillo, 2012):

- Balance de las tasas de transporte en el modelo y/o volúmenes de sedimentación como efecto de los eventos hidrológicos simulados y asociados a la configuración del emplazamiento y dimensiones de las obras.
- Cambios en la configuración morfológica de áreas de sedimentación o erosión que permitan establecer la calibración de las ecuaciones de transporte de fondo.



3.5.5 MEDICIÓN DE VARIABLES Y TOMA DE DATOS

ENSAYOS PRELIMINARES PARA EL ESTUDIO EN EL MODELO

Con motivo de realizar el ajuste de las tasas de transporte es necesario aplicar al modelo caudales escalados previamente (según sección 3.5.2). El suministro de caudal se estableció en base al cálculo del caudal que pasa sobre el vertedero de entrada al modelo mediante la fórmula 3.12.

- Las tasas fueron aplicadas aguas arriba de la obra de toma a una distancia suficiente para poder visualizar y evaluar los efectos del transporte de sedimentos en los lugares de interés.
- Una vez aplicada la tasa de transporte se procedió a medir la pendiente de forma que se compruebe, que las pendientes de equilibrio del “Río Negro” se produzcan en el modelo. (Ver imagen 3.7)



Imagen 3.7: Medición de pendientes en el modelo de escala reducida

- Una vez determinada la ecuación que mejor se ajuste al modelo en términos de producir el equilibrio del cauce, se procederá a disminuir o aumentar la magnitud de las tasas evaluadas, con el motivo de conseguir la tasa que no produzca considerables efectos de erosión o sedimentación.
- Para el caso de los eventos de creciente la calibración será realizada en términos de reproducir un cauce que presente rasgos de erosión que varíen de leves a medianos, basando en las consideraciones del orden geológico establecidas en campo.



CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 RESULTADOS

4.1.1 PARÁMETROS INICIALES PARA EL CÁLCULO DE LAS TASAS DE TRANSPORTE

Previo al cálculo teórico del transporte de carga de lecho hay que establecer los parámetros que intervienen en el movimiento de la carga de lecho. En la tabla 4.1 se presenta el resumen de los parámetros calculados, para los distintos caudales considerados para el estudio.

RESUMEN DE PARAMETROS QUE INFLUYEN EN EL INICIO DEL MOVIMIENTO (PROTOTIPO)						
TIPO	PARAMETROS	SIMBOLO	Q =m3/seg	VALOR	UNIDAD	FORMULA
Parametros del flujo	Velocidad de corte	V_*	50	0.329	m/seg	$V_* = \sqrt{9,81 \times Yn \times i}$
			75	0.372		
			300	0.572		
			800	0.782		
	Esfuerzo cortante	τ_o	50	108.2	Pa	$\tau_o = (V_*)^2 \times 1000$
			75	138.7		
			300	327.3		
			800	612		
Parametros de la partícula	Parametro de estabilidad de Shields	τ_*	50	1.446	adimensional	$\tau_* = \frac{\tau_o}{\rho(s-1)gd_s}$
			75	1.852		
			300	4.371		
			800	8.175		
	Reynolds de Corte	Re_*	50	1444	adimensional	$Re_* = \frac{d_s V_*}{u}$
			75	1635		
			300	2512		
			800	3435		
Parametro comparativo	Parametro critico de Shields	$(\tau_*)_c$	0.06		adimensional	Tablas en funcion de Re_*

Tabla 4.1: Resumen de parámetros que influyen en el inicio del movimiento de sedimentos

4.1.2 CÁLCULO TEÓRICO DE LA TASAS DE TRANSPORTE

A continuación se presentan los resultados del cálculo teórico de las tasas de transporte de carga de lecho para el modelo y prototipo, haciendo uso de las distintas formulaciones propuestas en el capítulo 2. Los cálculos presentados se realizaron para el caso de un caudal de 50 m³/s, y los resultados obtenidos con los caudales de 75, 300 y 800 m³/s se presentarán en el Anexo A.



ECUACIÓN DE DU BOYS (1879)

ECUACIÓN:	BOYS (1879)		
CONDICIÓN			
DATOS INICIALES			
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Diámetro		m	0.0046
Coefficiente de sedimento característico	λ	adimensional	3.3E-05
Esfuerzo cortante crítico		Pa	4.49
TASA DE TRANSPORTE			
Tasa de carga de lecho		m ² /s (p)	0.377
		Kg/s (p)	34830.77
		m ² /s (m)	0.00107
		Kg/s (m)	1.97

Tabla 4.2 Cálculo de la tasa de carga de lecho ecuación de Du Boys

En la tabla 4.2 observamos que la tasa obtenida para el modelo es 1.97 kg/s, que equivale a 746



ECUACIÓN DE SHIELDS (1936)

ECUACIÓN:	SHIELDS (1936)		
CONDICIÓN			
DATOS INICIALES			
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Diámetro		m	0.00465
Esfuerzo cortante crítico		Pa	4.49
Caudal por unidad de ancho		m ² /s/m	1.43
TASA DE TRANSPORTE			
Tasa de carga de lecho		m ² /s (p)	0.112
		Kg/s (p)	10393.413
		m ² /s (m)	0.000318
		Kg/s (m)	0.588

Tabla 4.3 Cálculo de la tasa de carga de lecho ecuación de Shields

En la tabla 4.3 se observa que el diámetro característico utilizado se encuentra fuera del rango de validez de la ecuación por lo que se podría esperar que la expresión proporcione valores no ajustados a la realidad del río.

ECUACIÓN DE EINSTEIN (1942)

ECUACIÓN:	EINSTEIN (1942)		
CONDICIÓN			
DATOS INICIALES			
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Diámetro		m	0.00170
TASA DE TRANSPORTE			
Tasa de carga de lecho		m ² /s (p)	5.6E-04
		Kg/s (p)	51.805
		m ² /s (m)	1.58E-06
		Kg/s (m)	0.0029

Tabla 4.4 Cálculo de la tasa de carga de lecho ecuación de Einstein (1942)

En la tabla 4.4 se observa que se obtuvo una tasa de 0.0029



por lo cual se puede considerar a esta tasa como subestimada a pesar de que cumple con las condiciones de aplicación de la expresión.

ECUACIÓN DE SCHOKLITSCH (1950)

ECUACIÓN:		SCHOKLITSCH (1950)	
DATOS INICIALES			
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Díámetro		m	0.00196
Esfuerzo cortante crítico		m ³ /s/m (p)	0.00691
Caudal por unidad de ancho		m ³ /s/m (p)	1.428
TASA DE TRANSPORTE			
Tasa de carga de lecho	ms	Kg/s/m (p)	6.53
		Kg/s (p)	228.5291
		m ³ /s (p)	0.087
		m ³ /s (m)	0.0000049
		kg/s (m)	0.013

Tabla 4.5 Cálculo de la tasa de carga de lecho ecuación de SCHOKLITSCH (1950)

Se puede observar en la tabla 4.5 que la tasa calculada es igual a 0.01



ECUACIÓN DE EINSTEIN (1950)

ECUACIÓN:	EINSTEIN (1950)		
CONDICIÓN			
DATOS INICIALES			
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Diámetro		m	0.00338
TASA DE TRANSPORTE			
Tasa de carga de lecho		m ² /s (p)	1.18E-02
		Kg/s (p)	1092.43
		m ² /s (m)	3.34E-05
		Kg/s (m)	0.062

Tabla 4.6 Cálculo de la tasa de carga de lecho ecuación Einstein (1950)

FUNCIÓN	VALOR RESULTANTE DE LA FUNCIÓN	CAUDAL (m3/s)
	0.502	50
	0.392	75
	0.166	300
	0.089	800

Tabla 4.7: Valores resultantes de la función de Einstein para diferentes caudales

Los valores obtenidos en la tabla 4.6 se basan en la gráfica de diseño (ilustración 2.9) presentada en la sección 2.1.3.

El rango de validez de esta correlación cumple únicamente para un caudal de 50



ECUACIÓN DE MEYER PETER (1951)

ECUACIÓN:	MEYER PETER (1949,1951)		
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Tasa de carga de lecho		m ² /s (p)	0.0169
		Kg/s (p)	1557.16
		m ² /s (m)	0.0000477
		Kg/s (m)	0.0881

Tabla 4.8: Cálculo de la tasa de carga de lecho ecuación de MEYER PETER (1951)

La correlación de Meyer Peter fue utilizada debido a que es recomendada para canales anchos, con grandes relaciones ancho profundidad, como lo es el “Río Negro” por tener un ancho de 35 metros y un valor de relación (ancho / profundidad) = 47.55 , además su pendiente promedio es de 1.5 % y el rango de validez de esta expresión es de hasta 2 %. El uso de esta ecuación será de bastante interés en la estimación del transporte real debido a que los parámetros iniciales del presente estudio se encuentran en el rango de validez de la misma.

ECUACIÓN DE VAN RIJN (1984 a -1993)

ECUACIÓN:	VAN RIJN (1984a-1993)			
CONDICIÓN	$\frac{\tau_*}{(\tau_*)_c} \geq 2$	30.872	$d_s = d_{s0}$ $d > 0.1 \text{ m}$	
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR	
Concentración media de sedimentos			0.0239	
Velocidad de movimiento de la carga de lecho		m/s	2.303	
Espesor de capa de carga de lecho		m	Prototipo	Modelo
			0.184	0.0037
Tasa de carga de lecho		m ² /s (p)	0.0101	
		Kg/s (p)	934.252	
		m ² /s (m)	2.86E-05	
		Kg/s (m)	0.0528	

$$C_s = \frac{0.117}{d_s} \left(\frac{v^2}{(s-1)g} \right)^{1/3} \left(\frac{\tau_*}{(\tau_*)_c} - 1 \right)$$

Tabla 4.9: Cálculo de la tasa de carga de lecho ecuación de Van Rijn (1984a-1993)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Se observa en la tabla 4.9, que $\frac{\tau_*}{(\tau_*)_c} = 21.35 > 2$ por lo tanto

$$\frac{V_s}{V_*} = 4.8$$

$$C_s = 0.65$$

$$\frac{\delta s}{d_s} = 2.5(\tau_* - (\tau_*)_c)$$



4.1.3 RELACIONES GEOMÉTRICAS E HIDRÁULICAS DE ESCALA

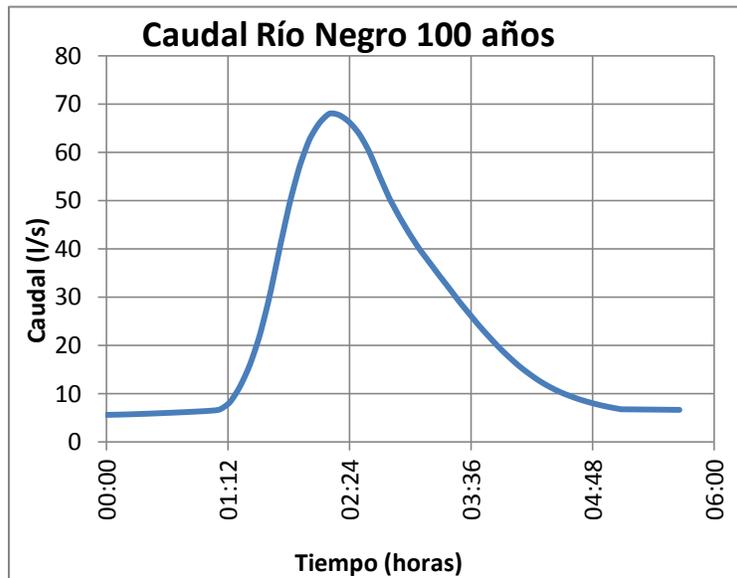
El escalamiento de las variables geométricas e hidráulicas representativas se realizó en base a relaciones de escala, que se presentan en la tabla 4.12:

TABLA DE RELACIONES DE ESCALA		
RELACIÓN	SÍMBOLO	VALOR
Caudal	λ_Q	0.000057
Velocidad	λ_V	0.141
Caudal de sólidos	λ_q	0.000057
Longitud	λ_l	0.02
Calado	λ_y	0.02
Tiempo	λ_t	0.141
Velocidad de sedimentación	λ_{wo}	0.141

Tabla 4.12: Tabla de relaciones de escala de parámetros físicos e hidráulicos relevantes

4.1.4 HIDROGRAMA ESCALADO

Con los valores del caudal y el tiempo traducidos a la escala del modelo tenemos el hidrograma resultante, el cual se presenta a continuación en la Gráfica 4.1 y en la tabla 4.13.



Gráfica 4.1: Hidrograma Resultante para el Modelo (Pacheco & Carrillo, 2012)



Hora	Caudal (l/s)	Hora	Caudal (l/s)
0:00:00	5,657	2:56:04	45,139
0:06:22	5,696	3:03:08	41,167
0:13:26	5,761	3:10:13	37,735
0:20:30	5,842	3:17:17	34,448
0:27:35	5,935	3:24:21	31,254
0:34:39	6,035	3:31:25	28,060
0:41:43	6,142	3:38:30	25,066
0:48:47	6,256	3:45:34	22,237
0:55:52	6,381	3:52:38	19,588
1:02:56	6,542	3:59:43	17,222
1:10:00	7,356	4:06:47	15,109
1:17:04	10,281	4:13:51	13,296
1:24:09	15,296	4:20:55	11,759
1:31:13	22,626	4:28:00	10,496
1:38:17	32,839	4:35:04	9,488
1:45:22	44,483	4:42:08	8,645
1:52:26	54,614	4:49:12	7,951
1:59:30	61,991	4:56:17	7,376
2:06:34	66,228	5:03:21	6,898
2:13:39	68,060	5:10:25	6,787
2:20:43	67,125	5:17:29	6,762
2:27:47	64,715	5:24:34	6,737
2:34:51	60,673	5:31:38	6,713
2:41:56	54,973	5:38:42	6,688
2:49:00	49,566		

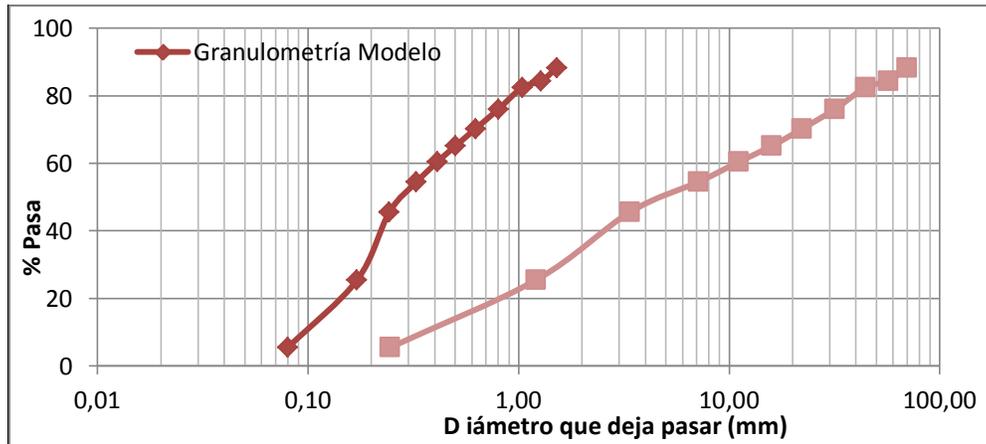
Tabla 4.13: Hidrograma Resultante para el Modelo (PROMAS 2012)

4.1.5 GRANULOMETRÍA ESCALADA

Los resultados del cálculo descrito en la sección 3.5.2 se presenta en la tabla 4.14 y la curva granulométrica del material del prototipo y de la granulometría construida, en la gráfica 4.2:

% Pasa	D (mm)p	D _p	<u>V_{sp}</u>	<u>V_{sm}</u>	D (mm)m
88,28	69,85	1695,09	1,09	0,15	1,52
84,37	57,15	1386,90	0,98	0,14	1,28
82,455	44,45	1078,70	0,87	0,12	1,04
76,015	31,75	770,50	0,73	0,10	0,80
70,245	22,25	539,95	0,61	0,09	0,62
65,105	15,9	385,86	0,52	0,07	0,50
60,435	11,11	269,61	0,43	0,06	0,41
54,47	7,14	173,27	0,35	0,05	0,33
45,57	3,38	82,02	0,24	0,03	0,24
25,46	1,21	29,36	0,13	0,02	0,17
5,505	0,2455	5,96	0,03	0,00	0,08

Tabla 4.14: Cálculo de la Curva Granulométrica para el Modelo (PROMAS 2012)



Gráfica 4.2: Curva Granulométrica del Prototipo y del Modelo (PROMAS 2012)

4.1.6 VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES DE TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO

A continuación se presenta los resultados de los ensayos de validación de las ecuaciones de carga de lecho y calibración del modelo para un caudal de 2.83 lts/s en el modelo, que simula un caudal de 50 m³/s en el prototipo.

TABLA DE OBSERVACIONES DE ENSAYOS DE CALIBRACIÓN				
ECUACIÓN EVALUADA		Meyer-Peter		IMÁGENES
TASA ENSAYADA	Modelo	0.088	kg/s	
OBSERVACIONES				
<p>En la imagen (4.1) se verifica que al alimentar al lecho con la tasa de 0.088 (kg/s), se produjo una acumulación moderada de material, de manera que se podría establecer que la tasa resulta sobre estimada con respecto a la tasa de equilibrio posible. La pendiente final una vez concluido el ensayo fue rango de 1.2 a 1.6%, menor a la pendiente representativa del cauce (1.5% – 2%).</p> <p>A pesar de que la pendiente del modelo no se ajustó a la pendiente del cauce natural, la diferencia no es crítica (la depositación de material no fue excesiva), de manera que se podría ajustar esta tasa teórica para obtener la tasa real de transporte de arrastre de fondo.</p>				

Imagen 4.1: Efectos de acumulación de sedimentos, ecuación Meyer Peter (Caudal 2.83 lts/s en el modelo, 50 m³/s en el prototipo)

Tabla 4.15: Ensayo de calibración para formulación de Meyer-Peter (Caudal de 2.83 lts/s en el modelo, 50 m³/s en el prototipo)

TABLA DE OBSERVACIONES DE ENSAYOS DE CALIBRACIÓN				
ECUACIÓN EVALUADA		Nielsen		IMÁGENES
TASA ENSAYADA	Modelo	0.086	kg/s	
OBSERVACIONES				
<p>Como observamos en la imagen 4.2 al aplicar una tasa de carga de lecho igual a 0.086 (kg/s), se produce una depositación de material de similares condiciones que la depositación que se produjo con la tasa obtenida de la expresión de Meyer Peter (ligeramente menor). Se obtuvo pendientes a lo largo del cauce entre 1.4 -1.7 % que es un rango de pendiente ligeramente menor al esperado.</p>				
				<p>Imagen 4.2: Efectos de acumulación de sedimentos, ecuación Nielsen Modificada (Caudal 2.83 lts/s en el modelo, 50 m³/s en el prototipo)</p>

Tabla 4.16: Ensayo de calibración para formulación de Nielsen Modificada (Caudal de 2.83 lts/s en el modelo, 50 m³/s en el prototipo)

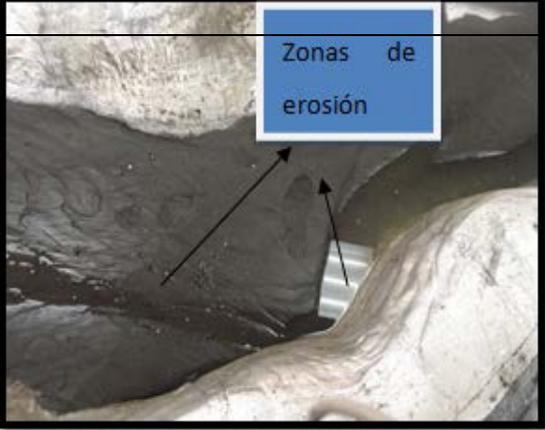
TABLA DE OBSERVACIONES DE ENSAYOS DE CALIBRACIÓN				
ECUACIÓN EVALUADA		Van Rijn		IMÁGENES
TASA ENSAYADA	Modelo	0.052	kg/s	
OBSERVACIONES				
<p>Como se observa en la imagen 4.3 al aplicar la tasa propuesta por Van Rijn que corresponde a 0.052 (kg/s) en el modelo, se produjeron procesos leves de erosión en el lecho de base, de manera que los valores obtenidos con esta ecuación están ligeramente sub estimados.</p> <p>La topografía disponible permite verificar las cavidades que se encuentran visibles en la imagen 4.3 pero en una magnitud ligeramente menor.</p>				
				<p>Imagen 4.3: Efectos de erosión, ecuación Van Rijn (Caudal 2.83 lts/s en el modelo, 50 m³/s en el prototipo)</p>

Tabla 4.17: Ensayo de calibración para formulación de Van Rijn (Caudal de 2.83 lts/s en el modelo, 50 m³/s en el prototipo)

Considerando que las tasas obtenidas con las expresiones de Meyer Peter y Nielsen (simplificada) arrojan valores muy similares, se unificaron los ensayos para estas dos expresiones con la consideración de que con la expresión de Nielsen se obtienen valores de tasas ligeramente menores.

TABLA DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE CALIBRACIÓN				
ECUACIÓN EVALUADA		Meyer Peter - Nielsen (simplificada)		IMÁGENES
TASA ENSAYADA	Modelo	0.128	kg/s	
OBSERVACIONES				
<p>Como podemos observar en la imagen 4.4 existe depositación de material a lo largo del cauce de fondo en lugares que se preveía la existencia de acumulación. De la verificación de la pendiente longitudinal se estableció que esta se encontraba entre los valores de 1.2 y 1.8 %.</p>				
				<p>Imagen 4.4: Efectos de acumulación de sedimentos, evaluación Nielsen Modificada y Meyer-Peter (Caudal 4.24 lts/s en el modelo, 75 m³/s en el prototipo)</p>

Tabla 4.18: Resultados de ensayos para formulación de Meyer Peter-Nielsen Modificada (Caudal de 4.24 lts/s en el modelo, 75 m³/s en el prototipo)

TABLA DE OBSERVACIONES DE ENSAYOS DE CALIBRACIÓN				
ECUACIÓN EVALUADA		Van Rijn		IMÁGENES
TASA ENSAYADA	Modelo	0.087	kg/s	
OBSERVACIONES				
Se nota la presencia de huecos pronunciadas por lo que se puede considerar a esta tasa como sub estimada para este caudal. En la imagen 4.5 se observa claramente la presencia de huecos que se forman en el cauce natural del río pero no de una manera tan marcada, pero sin embargo, se estableció que la tasa real no es tan lejana a la calculada con la expresión de Van Rijn.				
				
<p>Imagen 4.5: Efectos de erosión, ecuación Van Rijn (Caudal 4.24 lts/s en el modelo, 75 m³/s en el prototipo)</p>				

Tabla 4.19: Resultados de ensayos para formulación de Van Rijn (Caudal de 4.24 lts/s en el modelo, 75 m³/s en el prototipo)

Haciendo el análisis de los caudales formativos se ha determinado que la tasa más adecuada es la obtenida con la expresión de Nielsen (Simplificada). Una vez determinada la ecuación que más se ajusta, se procedió a disminuir las tasas de transporte teóricas hasta conseguir el equilibrio en el cauce del río, estableciendo que la tasa real equivale al 70% de la tasa teórica. El análisis detallado de las tasas reales obtenidas se presentará en la sección 4.2.4.

Luego de estimar las tasas reales para los caudales de crecida, fueron probadas en el modelo, los resultados se presentan en la tabla 4.20:

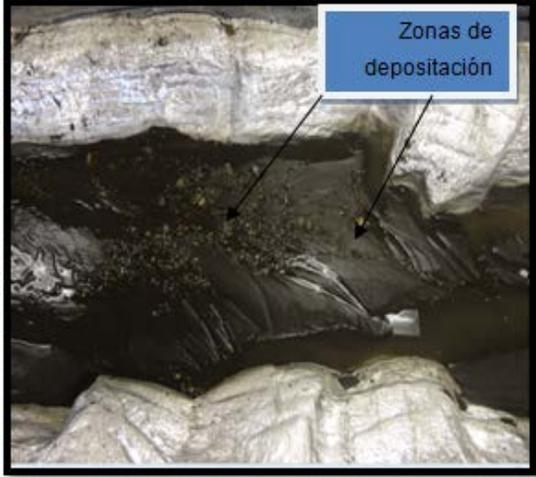
TABLA DE RESULTADOS DE ENSAYOS CON CAUDALES DE CRECIDA				
ECUACIÓN EVALUADA		Nielsen (simplificada)		IMÁGENES
TASA ENSAYADA	Modelo	0.468	kg/s	
OBSERVACIONES				
Como se puede observar en la imagen 4.6 a pesar de haber reducido la tasa teórica en un 30% aún se presentan lugares de depositación.				
				
<p>Imagen 4.6: Zonas de depositación presentadas al aplicar tasa evaluada con las ecuaciones de Nielsen simplificada (caudal de 16.97 lts/s en el modelo 300 m³/s en el prototipo)</p>				

Tabla 4.20: Resultados de ensayos para formulación de Meyer-Peter y Nielsen modificada (Caudal de 16.97 lts/s en el modelo, 300 m³/s en el prototipo)

4.2 ANÁLISIS

4.2.1 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS INICIALES PARA EL CÁLCULO DE LAS TASAS DE TRANSPORTE

A continuación se presenta el análisis de parámetros que interviene en el inicio del movimiento de sedimentos y en el cálculo de las tasas de transporte.

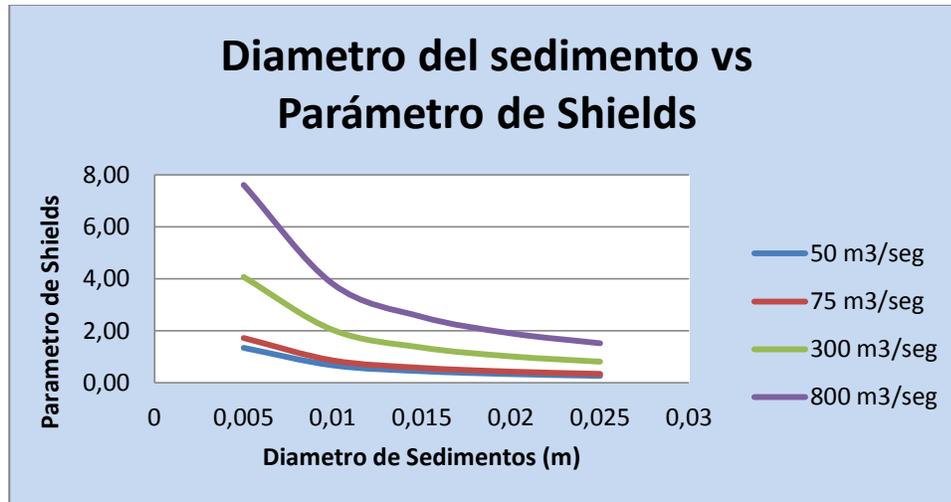
- Para el caso del Río Negro la pendiente no tiene un efecto significativo, ya que el ángulo de pendiente es de aproximadamente 0.85° comparado con un ángulo de reposo para arenas cuyos valores oscilan entre 26° y 34° , por lo cual se les puede considerar a las partículas de sedimento como estables, ya que las fuerzas estabilizantes serán mayores a las críticas.
- En el río negro se tiene una relación (d_{90}/d_{50}) aproximada de 15,47, por lo cual se puede dar un proceso de acorazamiento luego de la erosión de las



UNIVERSIDAD DE CUENCA

partículas más finas circundantes. Este proceso de acorazamiento se produce por falta de alimentación de sedimentos, por lo cual se sustenta el proporcionar tasas de sedimento en el modelo, para representar de manera más aproximada los efectos del transporte de sedimentos.

- Para unas condiciones de flujo, propiedades de sedimento, y esfuerzo cortante dado el parámetro de Shields



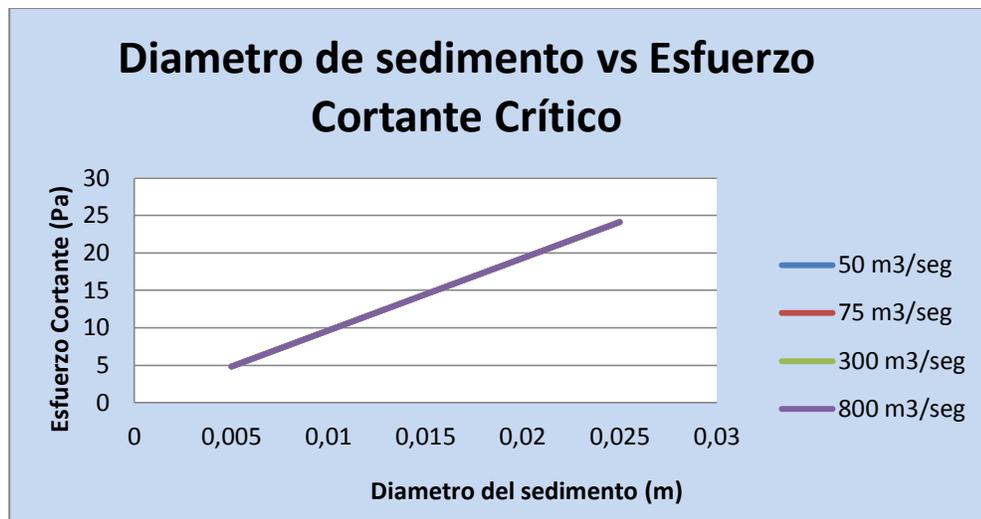
Gráfica 4.3: Comparación diámetro vs parámetro de Shields para distintos caudales

- En la gráfica 4.4 se nota que la variación entre el diámetro del sedimento y el esfuerzo cortante crítico es de tipo lineal e independiente del caudal (gráficas con igual tendencia), con lo cual se comprobó que el flujo se mantiene en un régimen de flujo turbulento completamente rugoso para todos los caudales considerados.



Caudal (m ³ /s)	Diámetro del sedimento (m)	Esfuerzo cortante crítico
50	0.005	4.82652
	0.01000	9.65304
	0.015	14.47956
	0.02	19.30608
	0.025	24.1326
75	0.005	4.82652
	0.01	9.65304
	0.015	14.47956
	0.02	19.30608
	0.025	24.1326
300	0.005	4.82652
	0.01	9.65304
	0.015	14.47956
	0.02	19.30608
	0.025	24.1326
800	0.005	4.82652
	0.01	9.65304
	0.015	14.47956
	0.02	19.30608
	0.025	24.1326

Tabla 4.22: Tabla comparativa diámetro del sedimento vs esfuerzo cortante crítico para distintos caudales



Gráfica 4.4: Comparación diámetro del sedimento vs esfuerzo cortante crítico para distintos caudales

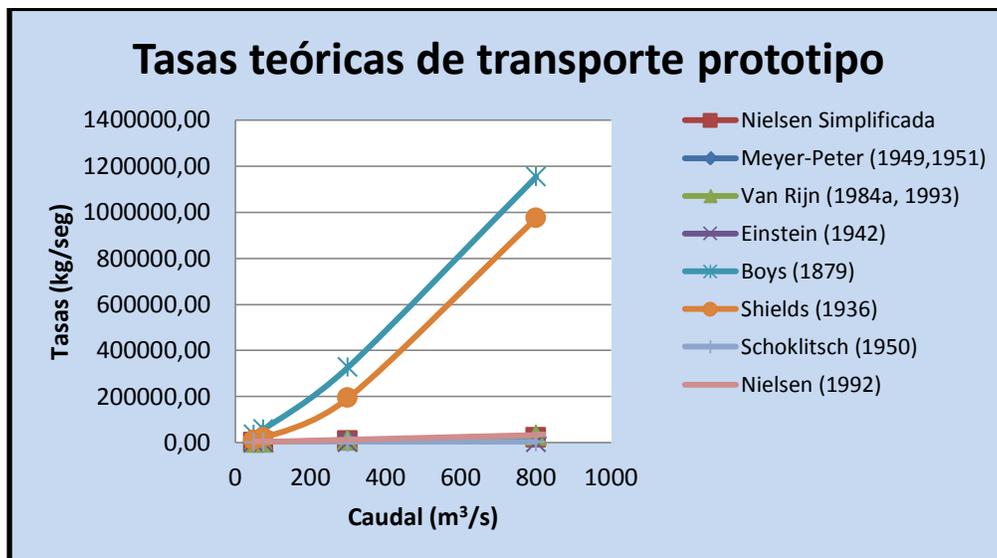
4.2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS TEÓRICOS DE LAS ECUACIONES

A continuación en la tabla 4.23 se muestra el resumen de las tasas de transportes evaluadas con las distintas ecuaciones señaladas anteriormente.

RESUMEN DE TASAS DE TRANSPORTE									
CAUDAL	ECUACIÓN	MEYER-PETER	NIELSEN	VAN RIJN (1984a, 1993)	EINSTEIN (1942)	BOYS (1879)	SHIELDS (1936)	SCHOKLITSCH (1950)	NIELSEN (1992)
50	Kg/s (p)	1557.16	1529.18	934.25	50.69	34830.77	10393.41	228.53	2447.37
75	Kg/s (p)	2283.19	2238.66	1555.44	51.81	57716.34	20163.74	343.35	3551.38
300	Kg/s (p)	8464.55	8272.72	8914.91	54.16	327652.28	194015.92	1376.73	12892.08
800	Kg/s (p)	21809.59	21291.63	31477.35	54.99	1153169.20	973749.81	3673.12	32981.74

Tabla 4.23 Cálculo teórico de las tasas de carga de lecho para distintos caudales

En la gráfica 4.5 se muestran los datos teóricos obtenidos con las 8 ecuaciones señaladas y los caudales de 50, 75, 300 y 800 m³/s.

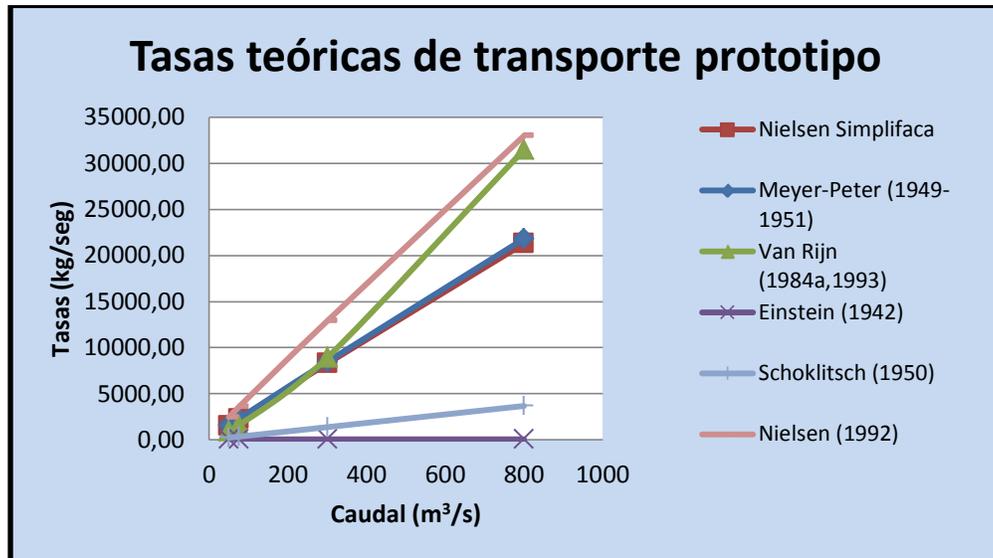


Gráfica 4.5 Curva de tasas de carga de lecho vs caudales para distintos caudales (8 ecuaciones).

En la gráfica 4.5 al comparar las curvas, se puede comprobar que las ecuaciones de Du Boys y Shields, proporcionan valores sobre estimados de tasas de transporte, que si serían escalados y probados en el modelo de seguro producirían gran acumulación de material, por lo que serán descartadas, y se procederá al

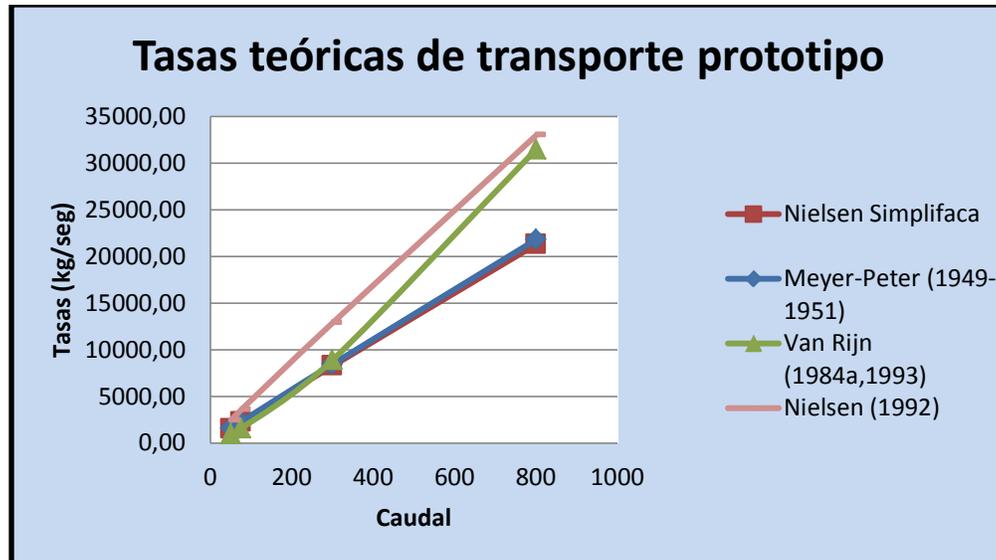


análisis de las tasas obtenidas con las ecuaciones de Einstein, Schoklitsch, Meyer Peter, Van Rijn, Nielsen y Nielsen (modificada), gráfica (4.6).



Gráfica 4.6 Curva de tasas de carga de lecho vs caudales para distintos caudales (6 ecuaciones).

En la gráfica 4.6 al comparar las curvas obtenidas se observa que las tasas determinadas con las ecuaciones de Schoklitsch y Einstein son subestimadas (tasas de carga demasiado bajas), de manera que si ensayamos estas tasas en el modelo, el lecho sufriría un proceso de erosión considerable que impediría establecer un equilibrio en el cauce, de manera que se desecharon estas dos expresiones. Finalmente se compararon las cuatro expresiones restantes (ver gráfica 4.7).



Grafica 4.7: Curva de tasas de carga de lecho vs caudales para distintos caudales (4 ecuaciones).

Como se observa en la gráfica 4.7 los valores obtenidos por la ecuación que inicialmente propusiera Nielsen están por encima de las tasas obtenidas con el resto de ecuaciones, de manera que las ecuaciones seleccionadas como las más relevantes para ser validadas en el modelo en escala reducida serán:

- MEYER – PETER
- VAN RIJN
- NIELSEN (SIMPLIFICADA)

Observamos que las ecuaciones antes mencionadas siguen una misma tendencia sobre todo para caudales formativos del lecho, fundamentales en el proceso de calibración que se abordara más adelante. En la tabla 4.24 se indican las tasas de lecho de fondo obtenidas para los caudales de interés y escaladas para ser evaluadas en el modelo.

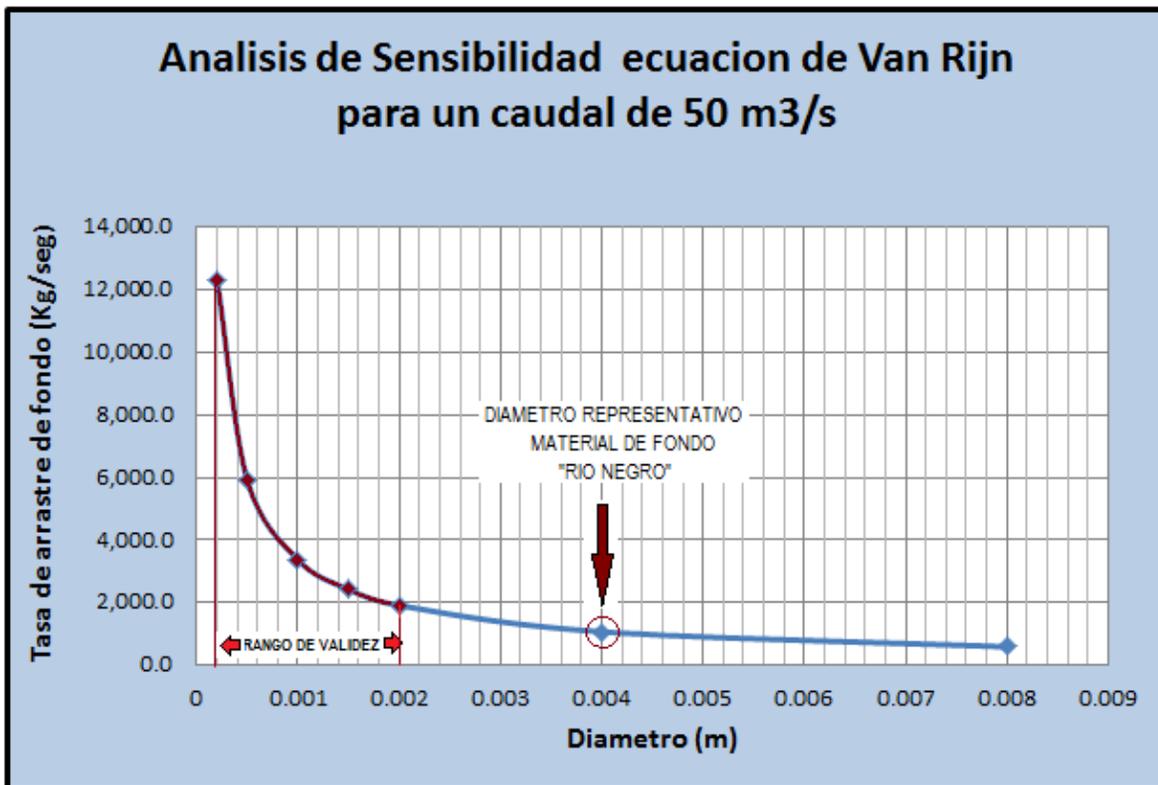


Caudal prototipo(m ³ /s)	Tasas de carga de lecho para el modelo (kg/s)		
	Meyer Peter	Nielsen (simplificada)	Van Rijn
50	0.088	0.086	0.052
75	0.129	0.127	0.087
300	0.479	0.468	0.50
800	1.233	1.204	1.780

Tabla 4.24: Tasas de Transporte Totales (kg/s) para el Modelo

4.2.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS ECUACIONES

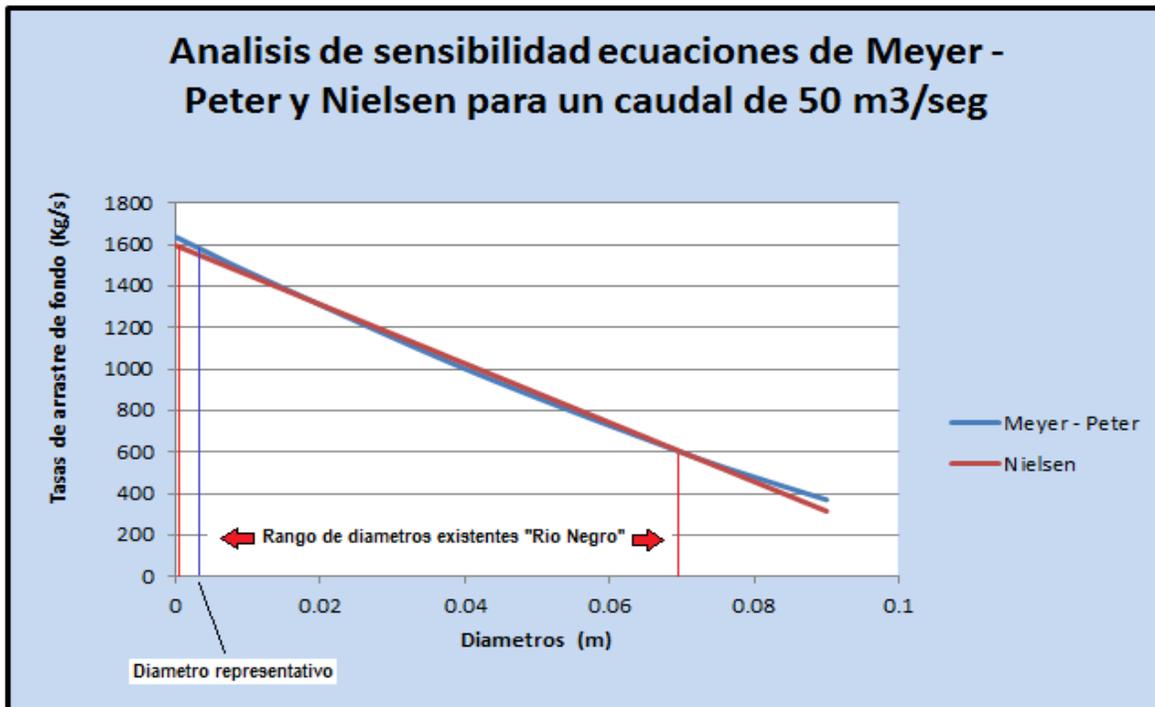
A continuación se presenta el análisis de sensibilidad de las ecuaciones cuyas tasas son probadas en el modelo para el proceso de calibración:



Gráfica 4.8: Análisis de sensibilidad de la ecuación de Van Rijn

Como se puede observar en la gráfica 4.8, tasas obtenidas para el rango de validez de la ecuación de Van Rijn son altas, pero a medida que aumenta el diámetro del sedimento los valores de tasa que se obtienen disminuyen bruscamente debido al comportamiento exponencial que presenta la ecuación, de

esta manera una mínima variación en el diámetro representativo del sedimento provoca que la tasa de transporte se presente subestimada. Ahora considerando que los diámetros obtenidos de la granulometría del “Río Negro” oscilan entre diámetros de 0.07mm a 76.2mm, no es recomendable la estimación de tasas de arrastre de fondo con esta ecuación, ya que este rango se encuentra fuera del rango de validez, y su uso estaría ligado de mejor manera a interpretar el movimiento del material en suspensión (diámetros menores).



Gráfica 4.9: Análisis de sensibilidad de la ecuación de Meyer-Peter y Nielsen

Como se observa en la gráfica 4.9 el comportamiento de las ecuaciones de Nielsen (simplificada) y de Meyer Peter es del tipo lineal para el rango de diámetros existentes en el “Río Negro”, de manera que las tasas varían razonablemente para los valores cercanos al diámetro representativo del río, e inclusive para los diámetros extremos. En estas expresiones no existe una sensibilidad a causa de la variación del diámetro, por lo cual, con la tasa calculada con el diámetro representativo se reflejará un comportamiento adecuado del transporte de sedimentos.

4.2.4 ANÁLISIS DE LA VALIDACIÓN DE ECUACIONES DE TRANSPORTE

Luego de realizar los ensayos en el modelo para el caudales de 50 (m³/s) y 75 (m³/s), se estableció que las expresiones que mejor reproduce las características cualitativas de orden morfológico son las ecuaciones de Nielsen (simplificada) y la de Meyer Peter, sin embargo al ser la ecuación de Meyer Peter una ecuación basada en ensayos sobre arenas bien graduadas, y en base a un análisis

granulométrico se ha establecido que el material utilizado como lecho de fondo en el modelo corresponde a una arena no uniforme (coeficiente de distribución $S=13$, <10 considerado como uniforme), por lo que se ha considerado más adecuada la utilización de la ecuación de Nielsen para la estimación y validación de las ecuaciones de arrastre de fondo para el Río Negro. De un análisis cualitativo del cauce luego de cada ensayo se obtuvieron las siguientes tasas. (Tabla 4.25).

Caudal prototipo(m ³ /s)	Tasas de carga de lecho ajustadas para el modelo (kg/s)
	Nielsen (simplificada)
50	0.055
75	0.096

Tabla 4.25: Tasa de carga de lecho ajustada al modelo y obtenida a partir de la formulación simplificada de Nielsen

Como se puede observar en la imagen 4.7 al aplicar en el modelo una tasa igual a 0.055 kg/s con un caudal simulado de 50 m³/s, se obtuvo la calibración de los procesos de transporte de arrastre de fondo, de igual manera al aplicar una tasa en el modelo de 0.096 kg/s con un caudal simulado de 75 (m³/s) en el prototipo se estableció un cauce de equilibrio.



Imagen 4.7: Modelo calibrado para caudales de 50 y 75 m³/s respectivamente.

A continuación se establecerán las tasas de arrastre de fondo para caudales de 300 y 800 (m³/s) en el prototipo, una aproximación inicial será considerar que las tasas de arrastre de fondo para estos caudales sufrirán la misma disminución que sufrieron las tasas teóricas calculadas para los caudales formativos ver tabla 4.26.



Caudal (m ³ /s) prototipo	Tasa Teórica modelo (Kg/s)	Tasa Real modelo (Kg/s)	% Tasa real respecto a la teórica
50	0.086	0.055	63.95
75	0.126	0.096	76.19
PROMEDIO (%)			70.07

Tabla 4.26: Proporción entre las tasas teóricas y calculadas para el transporte de sedimentos en el “Río Negro”.

En la tabla 4.26 se calculó que porcentaje de la tasa teórica corresponde a la tasa calibrada en el modelo, y en base al promedio de estos valores se estableció que el 70% de la tasa teórica es equivalente a la tasa real, de esta manera que se ajustó teóricamente las tasas calculadas para los caudales de 300 y 800 m³/s.

ECUACIÓN NIELSEN (SIMPLIFICADA)		
Caudal (m ³ /s) prototipo	Tasa Teórica modelo (Kg /s)	Tasa estimada modelo (Kg /s)
300	0.474	0.33
800	1.21	0.84

Tabla 4.27: Aproximación de tasas calibradas en el modelo para formulación de Nielsen y Meyer Peter.

En los ensayos realizados para las tasas estimadas en la tabla 4.27 para el caudal de 300 m³/s, se notó que existen todavía zonas de depositación (ver imagen 4.6) y no se presentan los rasgos de erosión esperados, por lo cual la tasas teóricas se disminuyeron en un 40%, que es una valor que no se alejaría de la realidad debido a que en observaciones geológicas de campo se estableció que en general las fronteras del cauce del río se presentan duras por encontrarse constituidas por rocas metamórficas, lo cual resulta en una menor erosión del cauce ante eventos de crecida y menores tasas de transporte.

Finalmente las tasas reales obtenidas para el modelo tanto para los caudales formativos como para eventos de crecida son los presentados en la tabla 4.28.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Caudal prototipo(m³/s)	Tasas de carga de lecho para el modelo (kg/s)
50	0.055
75	0.096
300	0.33
800	0.72

Tabla 4.28: Tasas calibradas para el modelo de escala reducida del “Río Negro”, según la formulación de Nielsen.



CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Del análisis de las variables que intervienen en la ocurrencia del movimiento de arrastre de fondo se ha establecido las siguientes conclusiones:
 - EL “Río Negro” presenta un ángulo de pendiente de 0.85° con respecto a la horizontal, que es un valor muy inferior al ángulo de reposo del material considerado en el estudio (arena,



- Para las condiciones actuales del río y de acuerdo al estado de la cuenca (conservada), las tasas calculadas y ajustadas serán las máximas posibles que podrá traer el río, sin embargo si el estado de la cuenca se deteriora, comenzarán a existir fenómenos de azolvamiento que producirán que la capacidad de transporte del río no sea suficiente para transportar el material existente y por lo tanto las tasas estimadas se presentaran por debajo de las reales.
- Uno de los parámetros o indicadores de la calidad de una cuenca es la relación de capacidad de transporte con la tasa real transportada, entonces se ha establecido que la tasa de arrastre de fondo real es apenas el 70% de la capacidad de arrastre, por lo que la disponibilidad de material es baja en relación a la capacidad, con lo que se ha establecido que el estado de la cuenca es bueno (capacidad de transporte > disponibilidad de material).
- Dentro del cálculo teórico de las tasas de transporte se ha determinado lo siguientes aspectos:
 - Las expresiones de Du Boys y de Shields proporcionaron valores de tasas de arrastre de fondo sumamente elevadas, y la expresión de Shields considera rango de diámetros que se encuentran lejos del diámetro representativo del “Río Negro”, de manera que el cálculo y utilización de estas expresiones fue considerado para entender de mejor manera las distorsiones grandes que existen entre una y otra expresión y justifica de manera casi indispensable la utilización de un modelo hidráulico de lecho móvil que permita evaluar los resultados obtenidos con cada expresión.
 - La ecuación de Einstein (1950), tiene una tendencia similar a la expresión de Meyer Peter siempre y cuando se trabaje en el rango de validez de la ecuación, que no es el caso de los parámetros iniciales del “Río Negro”, de manera que se ha prescindido de la utilización de las expresiones proporcionadas por Einstein considerando que las condiciones iniciales para el cálculo no son las adecuadas.
 - Las ecuaciones seleccionadas como relevantes en el estudio de arrastre de fondo en río negro son Nilsen (simplificada) , Meyer Peter y Van Rijn al establecer una tendencia marcada en los resultados obtenidos con estas expresiones , de manera que estas expresiones fueron evaluadas en función de parámetros cualitativos de orden morfológico en el modelo físico a escala reducida de lecho móvil.
- De la calibración de las distintas tasas teóricas para un caudal formativo se ha podido establecer que:



- Al aplicar en el modelo la tasa evaluada con la ecuación de Van Rijn se produjeron procesos tenues de erosión en el lecho de base, por lo cual se puede considerar a esta tasa como subestimada. Es lógico que los resultados que arroja esta ecuación sean subestimados, ya que el diámetro considerado como característico para el río negro se encuentra fuera del rango de validez de la ecuación.
 - Al alimentar el lecho del modelo con la tasa de Meyer-Peter se produjo una acumulación moderada de material, y se establece que la tasa se presenta sobreestimada con respecto a la tasa de equilibrio posible, generando una configuración del cauce con una pendiente longitudinal inferior a la esperada, debiéndose este efecto a que la ecuación de Meyer-Peter fue elaborada en base a ensayos con materiales de una granulometría uniforme y con una densidad relativa de $s=1.25$ (Arena lignita), y al no cumplir estas condiciones el “Río Negro”.
 - Al alimentar el modelo con la tasa de Nielsen se produjo una depositación de material, sin embargo un poco más tenue que la depositación que produjo la tasa obtenida con la expresión de Meyer Peter, entonces se ha considerado que los resultados fueron adecuados desde el punto de vista de reproducir un cauce de equilibrio, ya que han permitido la configuración de un lecho en equilibrio, al obtener un rango de pendiente adecuado.
- Del análisis de sensibilidad realizado para las tres ecuaciones probadas en el modelo, se ha establecido lo siguiente:
- A partir de ciertos diámetros la ecuación de Meyer-Peter, deja de mantener la misma tendencia que la ecuación de Nielsen.
 - La ecuación de Nielsen mantiene un comportamiento estable para tamaños cercanos al diámetro característico como para tamaños extremos, por lo cual se ha considerado que las tasas generadas por esta formulación son poco sensibles al cambio de tamaño del sedimento.
 - El valor de la tasa obtenida con la formulación de Van Rijn, se acerca a la tasa ajustada para un caudal formativo, debiendo este fenómeno al hecho de que el diámetro característico utilizado para el cálculo, tiene un tamaño cercano al rango de validez de la ecuación, pero sin embargo se ha concluido que estas tasas al estar bajo la influencia de diámetros lejanos al rango de validez de la ecuación, disminuyen en su valor de manera brusca, que conlleva a obtener tasas muy bajas que son erróneas para expresar un proceso de transporte.



- Se ha establecido que la ecuación de Nielsen es la que mejor se ajusta al comportamiento del “Río Negro”, ya que se replicaron en el modelo los procesos morfológicos que producen un equilibrio en el cauce para caudales formativos, y establecieron para caudales de crecida procesos erosivos leves en función de las características geológicas de la zona y del estado actual de la cuenca. Los valores de las tasas ajustadas fueron de **0.06 kg/s** para un caudal de **50 m³/s** (2.83 lts/s en el modelo), **0.09 Kg/s** para un caudal de **75 m³/s** (4.24 lts/s en el modelo), **0.33 kg/s** para un caudal de **300 m³/s** (16.97 lts/s en el modelo), y de **0.58 kg/s** para un caudal de **800 m³/s** (45.26 lts/s en el modelo).
- Las tasas proyectadas para el río de montaña “Río Negro” fueron de **1060 kg/s** para un caudal de **50 m³/s**, **1591 kg/s** para un caudal de **75 m³/s**, **5833.63 kg/s** para un caudal de **300 m³/s** y de **10253 kg/s** para un caudal de **800 m³/s**.

5.2 RECOMENDACIONES

- Para la elaboración adecuada del modelo hidráulico se recomienda tomar las siguientes consideraciones:
 - Tendrá que ser una réplica geoméricamente escalada y precisa del prototipo.
 - Mantener la consistencia y precisión geométrica durante la operación del modelo.
 - Tener al alcance las estructuras necesarias para el control y la medición del gasto.
 - Estar en la condición de poder realizar cambios rápidos y a detalle cuando sea necesario.
 - Estar consiente en todo momento del verdadero propósito del estudio y del presupuesto del mismo
- Al momento de determinar la tasa de sólidos se ha considerado que se pueden producir problemas como los siguientes:
 - Variabilidad considerable de los fenómenos, tanto en el espacio como en el tiempo.
 - Elevado número de variables que intervienen, que a la vez no se encuentran bien definidas.
 - Dificultad de comprobar en la naturaleza los resultados obtenidos.



BIBLIOGRAFÍA

- Chanson, H. (2004). *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction*. ELSEVIER.
- French, R. H. (1988). *Hidráulica de Canales Abiertos*. New York: McGraw-Hill.
- Julien, P. Y. (1995). *Erosion and Sedimentation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Julien, P. Y. (2002). *River Mechanics*. New York: Cambridge University.
- Martin Vide, J. P. (2003). *Ingeniería de Ríos*. Barcelona: Universidad Politecnica de Catalunya.
- Pacheco, E., & Carrillo, V. (2012). *Estudio En Modelo hidráulico Para La Optimización Del Diseño De La Obra de Captación En El Río Negro Del Proyecto Hidroelèctrico Hidrosanbartolo, Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS Universidad de Cuenca*. Cuenca-Ecuador.
- Rocha, A. (1998). *Introducción a al Hidráulica Fluvial*. Lima: Universidad Nacional de Ingenieria.
- Shields, A. (1936). *Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenz Forschung auf die Geschiebebewegung*. Berlin: Mitt. der Preussische Versuchanstalt fur Wasserbau und Schiffbau.
- Soulsby, R. L. (1997). *Dynamics of marine sands*. London: Thomas Telford.
- Streeter, V. L., & Wylie, E. B. (2000). *Mecánica de Fluidos*. McGraw-Hill.
- Van Rijn, L. C. (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Stuaries and Coastal Seas*. Amsterdam: Aqua Publications.
- Van Rijn, L. C. (2007a). "Unified view of sediment transport by currents and waves. III: Graded Beds". *J. Hydraul. Eng.*, 133(7), 761-775.
- Van Rijn, L. C. (2007b). "Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load Transport". *J. Hydraul. Eng.*, 133(6), 649-667.
- Villacis, O. (2011). *Estudio Hidrológico a nivel de "Estudios Definitivos"*.
- Wohl, E. (1962). *Mountain Rivers*. Washington, DC.: American Geophysical Union.
- Zanke, U. C. (2003). "On influence of turbulence on the initiation of sediment motion". *Int. J. Sediment Research*, 18(1), 1-15.



ANEXOS

ANEXO A

En este anexo se presenta los cálculos de las tasas de transporte de carga de lecho para las distintas formulaciones (sección 2.1.3) para los caudales de 75, 300 y 800 m³/s en el prototipo y las tasas escaladas para el modelo.

CAUDAL 75 m³/s

ECUACIÓN:	BOYS (1879)		
CONDICIÓN			
DATOS INICIALES			
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Diámetro	ds	m	0.00465
Coefficiente de sedimento característico	λ	adimensional	3.35E-05
Esfuerzo cortante crítico	$(\tau_0)_c$	Pa	4.49
TASA DE TRANSPORTE			
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	0.625
		Kg/s (p)	57716.34
		m ² /s (m)	0.0017
		Kg/s (m)	3.26

Tabla A.1: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Boys 1879 (Caudal 75 m³/s prototipo)



ECUACIÓN:	SHIELDS (1936)		
CONDICIÓN			
DATOS INICIALES			
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Diámetro	ds	m	0.00465
Esfuerzo cortante critico	(τ_0) _c	Pa	4.49
Caudal por unidad de ancho	q	m ² /s/m	2.14
TASA DE TRANSPORTE			
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	0.218
		Kg/s (p)	20163.739
		m ² /s (m)	0.000617
		Kg/s (m)	1.141

Tabla A.2: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Shields 1936 (Caudal 75 m³/s prototipo)

ECUACIÓN:	EINSTEIN (1942)		
CONDICIÓN			
DATOS INICIALES			
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Diámetro	ds	m	0.00170
TASA DE TRANSPORTE			
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	5.606641 E-04
		Kg/s (p)	51.8054
		m ² /s (m)	1.585798 E-06
		Kg/s (m)	0.0029

Tabla A.3: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Einstein 1942 (Caudal 75 m³/s prototipo)



ECUACIÓN:		SCHOKLITSCH (1950)	
DATOS INICIALES			
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Diámetro	ds	m	0.0019
Esfuerzo cortante crítico	qc	m ³ /s/m (p)	0.0069
Caudal por unidad de ancho	q	m ³ /s/m (p)	2.14
TASA DE TRANSPORTE			
Tasa de carga de lecho	ms	Kg/s/m (p)	9.81
	qs	Kg/s (p)	343.34
		m ³ /s (p)	0.130
		m ³ /s (m)	0.0000074
		kg/s (m)	0.019

Tabla A.4: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Schoklitsch 1950 (Caudal 75 m³/s prototipo)

ECUACIÓN:		MEYER PETER (1949,1951)	
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	0.0247
		Kg/s (p)	2283.1855
		m ² /s (m)	0.0000699
		Kg/s (m)	0.1292

Tabla A.5: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Meyer-Peter 1949-1951 (Caudal 75 m³/s prototipo)



ECUACIÓN:	NIELSEN (1992)		
CONDICIÓN			
TASA DE TRANSPORTE			
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	3.84E-02
		Kg/s (p)	3551.38
		m ² /s (m)	1.087E-04
		Kg/s (m)	0.2008

Tabla A.6: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Nielsen 1992 (Caudal 75 m³/s prototipo)

ECUACIÓN:	NIELSEN SIMPLIFICADA			
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR	
Concentración media de sedimentos	Cs		0.650	
Velocidad de movimiento de la carga de lecho	Vs	m/s	1.7875	
Espesor de capa de carga de lecho	δs	m	Prototipo	Modelo
			0.020852106	0.000417
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	2.42E-02	
		Kg/s (p)	2238.66	
		m ² /s (m)	6.85E-05	
		Kg/s (m)	0.1266	

$$\frac{\delta S}{d_s} = 2.5(\tau_* - (\tau_*)_c)$$

Tabla A.7: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Nielsen simplificada (Caudal 75 m³/s prototipo)



ECUACIÓN:	VAN RIJN (1984a-1993)		
CONDICIÓN	$\frac{\tau_*}{(\tau_*)_c} < 2$	30.872	$d_s = d_{50}$ $d > 0.1 \text{ m}$
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Concentración media de sedimentos	Cs		0.0309
Velocidad de movimiento de la carga de lecho	Vs	m/s	2.607
Espesor de capa de carga de lecho	δ_s	m	Prototipo
			Modelo
			0.209
			0.0042
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	0.0168
		Kg/s (p)	1555.441
		m ² /s (m)	4.76E-05
		Kg/s (m)	0.0880

$$C_s = \frac{0.117}{d_s} \left(\frac{v^2}{(s-1)g} \right)^{1/3} \left(\frac{\tau_*}{(\tau_*)_c} - 1 \right)$$

Tabla A.8: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Van Rijn 1984a-1993 (Caudal 75 m³/s prototipo)



CAUDAL 300 m³/s

ECUACIÓN:		BOYS (1879)	
CONDICIÓN			
DATOS INICIALES			
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Diámetro	ds	m	0.0047
Coefficiente de sedimento característico	λ	adimensional	3.36E-05
Esfuerzo cortante critico	(τ_0)c	Pa	4.49
TASA DE TRANSPORTE			
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	3.546
		Kg/s (p)	327652.28
		m ² /s (m)	0.01003
		Kg/s (m)	18.53

Tabla A.9: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Boys 1879 (Caudal 300 m³/s prototipo)

ECUACIÓN:		SHIELDS (1936)	
CONDICIÓN			
DATOS INICIALES			
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Diámetro	ds	m	0.00465
Esfuerzo cortante critico	(τ_0)c	Pa	4.49
Caudal por unidad de ancho	q	m ² /s/m	8.57
TASA DE TRANSPORTE			
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	2.1
		Kg/s (p)	194015.917
		m ² /s (m)	0.005939
		Kg/s (m)	10.975

Tabla A.10: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Shields1936 (Caudal 300 m³/s prototipo)



ECUACIÓN:	EINSTEIN (1942)		
CONDICIÓN			
DATOS INICIALES			
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Diámetro	ds	m	0.00170
TASA DE TRANSPORTE			
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	5.86E-04
		Kg/s (p)	54.1625
		m ² /s (m)	1.65E-06
		Kg/s (m)	0.0031

Tabla A.11: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Einstein 1942 (Caudal 300 m³/s prototipo)

ECUACIÓN:	SCHOKLITSCH (1950)		
DATOS INICIALES			
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Diámetro	ds	m	0.00196
Esfuerzo cortante critico	qc	m ³ /s/m (p)	0.00691
Caudal por unidad de ancho	q	m ³ /s/m (p)	8.57
TASA DE TRANSPORTE			
Tasa de carga de lecho	ms	Kg/s/m (p)	39.34
	qs	Kg/s (p)	1376.73
		m ³ /s (p)	0.521
		m ³ /s (m)	0.0000295
		kg/s (m)	0.078

Tabla A.12: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Schoklitsch 1950 (Caudal 300 m³/s prototipo)



ECUACIÓN:	MEYER PETER (1949- 1951)		
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	0.0916
		Kg/s (p)	8464.55
		m ² /s (m)	0.0002591
		Kg/s (m)	0.4788

Tabla A.13: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Meyer-Peter 1949-1951 (Caudal 300 m³/s prototipo)

ECUACIÓN:	NIELSEN (1992)		
CONDICIÓN			
TASA DE TRANSPORTE			
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	1.40E-01
		Kg/s (p)	12892.082
		m ² /s (m)	3.95E-04
		Kg/s (m)	0.73

Tabla A.14: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Nielsen 1992 (Caudal 300 m³/s prototipo)



ECUACIÓN:	NIELSEN SIMPLIFICADA		
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Concentración media de sedimentos	Cs		0.650
Velocidad de movimiento de la carga de lecho	Vs	m/s	2.746
Espesor de capa de carga de lecho	δs	m	Prototipo
			Modelo
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	8.95E-02
		Kg/s (p)	8272.72
		m ² /s (m)	2.53E-04
		Kg/s (m)	0.4680

Tabla A.15: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Nielsen Simplificada (Caudal 300 m³/s prototipo)

ECUACIÓN:	VAN RIJN (1984a,1993)		
CONDICIÓN	$\frac{\tau_*}{(\tau_*)_c} < 2$	72.858	$d_s = d_{50}$ $d > 0.1 \text{ m}$
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Concentración media de sedimentos	Cs		0.0744
Velocidad de movimiento de la carga de lecho	Vs	m/s	4.005
Espesor de capa de carga de lecho	δs	m	Prototipo
			Modelo
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	0.0965
		Kg/s (p)	8914.911
		m ² /s (m)	2.73E-04
		Kg/s (m)	0.5043

$$C_s = \frac{0.117}{d_s} \left(\frac{v^2}{(s-1)g} \right)^{1/3} \left(\frac{\tau_*}{(\tau_*)_c} - 1 \right)$$

Tabla A.16: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Van Rijn 1984a, 1993 (Caudal 300 m³/s prototipo)



CAUDAL 800 m³/s

ECUACIÓN:	BOYS (1879)		
CONDICIÓN			
DATOS INICIALES			
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Diámetro	ds	m	0.00465
Coefficiente de sedimento característico	λ	adimensional	3.35E-05
Esfuerzo cortante crítico	(τ_0)c	Pa	4.49
TASA DE TRANSPORTE			
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	12.48
		Kg/s (p)	1153169.2
		m ² /s (m)	0.0353
		Kg/s (m)	65.23

Tabla A.17: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Boys 1879 (Caudal 800 m³/s prototipo)

ECUACIÓN:	SHIELDS (1936)		
CONDICIÓN			
DATOS INICIALES			
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Diámetro	ds	m	0.00465
Esfuerzo cortante crítico	(τ_0)c	Pa	4.49
Caudal por unidad de ancho	q	m ² /s/m	22.86
TASA DE TRANSPORTE			
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	10.538
		Kg/s (p)	973749.8
		m ² /s (m)	0.0298
		Kg/s (m)	55.084

Tabla A.18: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Shields 1936 (Caudal 800 m³/s prototipo)



ECUACIÓN:	EINSTEIN (1942)		
CONDICIÓN			
DATOS INICIALES			
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Diámetro	ds	m	0.00170
TASA DE TRANSPORTE			
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	5.95E-04
		Kg/s (p)	54.99
		m ² /s (m)	1.68E-06
		Kg/s (m)	0.0031

Tabla A.19: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Einstein 1942 (Caudal 800 m³/s prototipo)

ECUACIÓN:	SCHOKLITSCH (1950)		
DATOS INICIALES			
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Diámetro	ds	m	0.00196
Esfuerzo cortante crítico	qc	m ³ /s/m (p)	0.00691
Caudal por unidad de ancho	q	m ³ /s/m (p)	22.85
TASA DE TRANSPORTE			
Tasa de carga de lecho	ms	Kg/s/m (p)	104.95
	qs	Kg/s (p)	3673.12
		m ³ /s (p)	1.391
		m ³ /s (m)	0.0000787
		kg/s (m)	0.208

Tabla A.20: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Schoklitsch 1950 (Caudal 800 m³/s prototipo)



ECUACIÓN:	MEYER PETER (1949, 1951)		
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	0.236
		Kg/s (p)	21809.59
		m ² /s (m)	0.000668
		Kg/s (m)	1.234

Tabla A.21: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Meyer Peter 1949, 1951 (Caudal 800 m³/s prototipo)

ECUACIÓN:	NIELSEN (1992)		
CONDICIÓN			
TASA DE TRANSPORTE			
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	3.57E-01
		Kg/s (p)	32981.74
		m ² /s (m)	1.01E-03
		Kg/s (m)	1.87

Tabla A.22: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Nielsen 1992 (Caudal 800 m³/s prototipo)



ECUACIÓN:	NIELSEN SIMPLIFICADA			
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR	
Concentración media de sedimentos	Cs		0.650	
Velocidad de movimiento de la carga de lecho	Vs	m/s	3.755	
Espesor de capa de carga de lecho	δs	m	Prototipo	Modelo
			0.0944	0.0018
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	2.304E-01	
		Kg/s (p)	21291.634	
		m ² /s (m)	6.52E-04	
		Kg/s (m)	1.204	

Tabla A.23: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Nielsen Simplificada (Caudal 800 m³/s prototipo)



ECUACIÓN:	VAN RIJN (1984a, 1993)			
CONDICIÓN	$\frac{\tau_*}{(\tau_*)_c} \angle 2$	136.243	$d_s = d_{50}$ $d > 0.1 \text{ m}$	
PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR	
Concentración media de sedimentos	Cs		0.14	
Velocidad de movimiento de la carga de lecho	Vs	m/s	5.476	
Espesor de capa de carga de lecho	δs	m	Prototipo	Modelo
			0.444	0.0089
Tasa de carga de lecho	qs	m ² /s	0.3407	
		Kg/s (p)	31477.353	
		m ² /s (m)	9.64E-04	
		Kg/s (m)	1.781	

$$C_s = \frac{0.117}{d_s} \left(\frac{v^2}{(s-1)g} \right)^{1/3} \left(\frac{\tau_*}{(\tau_*)_c} - 1 \right)$$

Tabla A.24: Cálculo de tasa transporte de carga de lecho con la ecuación de Van Rijn 1984a, 1993 (Caudal 800 m³/s prototipo)

ANEXO B

PLANO TOPOGRÁFICO DEL PROYECTO