

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

## **ESCUELA DE POSTGRADO**



## **DOCTORADO EN CIENCIAS**

### **MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES**

### **TESIS**

**“EFECTOS DE LA DESCOLMATACIÓN INDUCIDA EN LA EFICIENCIA DE  
CAPTACIÓN Y EN LA MORFOLOGÍA DEL RÍO GRANDE-CAJAMARCA,  
AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE”**

**Para optar el Grado Académico de:  
Doctor en Ciencias**

**Presentado por:  
José Francisco Huamán Vidaurre**

**Asesora:  
Dra. Rosa Haydee Llique Mondragón**

**Cajamarca - Perú**

**2016**

COPYRIGHT © 2016 by  
**JOSÉ FRANCISCO HUAMÁN VIDAURRE**  
Todos los derechos reservados

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

## **ESCUELA DE POSTGRADO**



## **DOCTORADO EN CIENCIAS**

### **MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES**

### **TESIS**

**“EFECTOS DE LA DESCOLMATACIÓN INDUCIDA EN LA EFICIENCIA DE  
CAPTACIÓN Y EN LA MORFOLOGÍA DEL RÍO GRANDE-CAJAMARCA,  
AGUAS ARRIBA DEL BARRAGE”**

**Presentado por:  
José Francisco Huamán Vidaurre**

**Comité científico:**

**Dra. Rosa Haydee Llique Mondragón  
Asesora**

**Dra. Consuelo Plasencia Alvarado  
Miembro de Comité Científico**

**Dr. Edin Alva Plasencia  
Miembro de Comité Científico**

**Dr. Alejandro Lagos Manrique  
Miembro de Comité Científico**

**Cajamarca - Perú**

**2016**

## **DEDICATORIA**

A Dios por darme la vida y todo lo necesario para servir en bien de los que me necesitan

A la memoria de mi madre, Sra. Margarita Vidaurre Muñoz, por su esfuerzo, su bondad y su orientación cristiana que han marcado mi formación personal

A mi hermana Juana por su apoyo y disciplina que han contribuido en gran parte de mi vida

A las personas que trabajan por el bienestar de los más necesitados

## **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad Nacional de Cajamarca por el financiamiento de mis estudios de doctorado.

A la Escuela de Post Grado de la Universidad Nacional de Cajamarca por el alto nivel académico y científico de los docentes del Programa de Doctorado de quienes he aprovechado sus conocimientos y experiencias.

A la Dra. Rosa Haydee Llique Mondragón por su asesoramiento en el desarrollo y culminación de la presente tesis.

Al Proyecto VLIR por el apoyo con equipo de aforo y movilidad para toma de datos de campo, especialmente al Dr. Guido Wyseure y al Dr. Nilton Deza Arroyo.

A la Junta de Usuarios del río Mashcón por permitirme tomar datos de campo de la captación Tres Molinos.

A la Facultad de Ingeniería por permitirme utilizar un área del Laboratorio de Ensayo de Materiales para realizar los ensayos del modelo, específicamente al Ingeniero Mauro Centurión Vargas y al Técnico Juan Villanueva Zumarán.

A los alumnos de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Hidráulica por su apoyo en la toma de datos, especialmente al Bachiller Jairo Alvarez Villanueva.

A mi esposa, Vilma Torres Ramírez, por los cuidados, apoyo espiritual y mucho afecto hacia mi persona en todo momento de mi vida familiar y laboral; así como a mis hijos Felipe y Margarita, a mis nietas Francesca y Aimé, por su afecto y alegría que alimentan mi vida.

## ÍNDICE

	<b>Página</b>
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xv
ABSTRACT	
xvi	
<b>CAPÍTULO I</b>	
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	4
HIPÓTESIS	4
<b>CAPÍTULO II</b>	
REVISIÓN DE LITERATURA	6
<b>CAPÍTULO III</b>	
DISEÑO DE CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS	27
<b>CAPÍTULO IV</b>	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
APÉNDICE	72

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Página</b>
Tabla 1. Tipos de fondo móvil	10
Tabla 2. Clasificación de sedimentos por tamaño	15
Tabla 3. Escalas utilizadas en modelos hidráulicos	19
Tabla 4. Coordenadas UTM y altitud de los puntos de muestreo de sedimentos del río Grande	36
Tabla 5. Caudales del río Grande aguas arriba de la captación Tres Molinos	39
Tabla 6. Tipo de sedimentos y profundidades estimadas en el río Grande aguas arriba del barrage de la captación Tres Molinos	40
Tabla 7. Tamizado de los sedimentos del río Grande, ubicados aguas arriba del barrage de la captación Tres Molinos	41
Tabla 8. Muestras de guijarros y cantos del río Grande aguas arriba de la captación Tres Molinos	43
Tabla 9. Conteo de guijarros y cantos para el análisis granulométrico	44
Tabla 10. Datos del prototipo para diseño del modelo físico a escala 1/25	48
Tabla 11. Resultados del diseño del modelo hidráulico a escala 1/25	52
Tabla 12. Caudales del río Grande y duración en el prototipo y en el modelo	55

	<b>Página</b>
Tabla 13. Caudales en el río y en el bocal del modelo, del ensayo sin sedimentos	57
Tabla 14. Caudales a escala el río y en el bocal durante la descolmatación inducida, de enero a marzo de 2015	58
Tabla 15. Caudales del río Grande, del bocal, y eficiencia de captación durante la descolmatación inducida, en el prototipo	60
Tabla 16. Formato del aforo del río Grande	76
Tabla 17. Profundidades desde las platinas transversales hasta el fondo del río, sin sedimentos, a escala 1/25	77
Tabla 18. Profundidad de sedimentos en el río Grande a escala 1/25 en los ejes transversales antes de la descolmatación	78
Tabla 19. Profundidades desde las platinas transversales hasta el fondo del cauce después de 5 horas con 20 minutos de iniciada la descolmatación para un caudal de 0,39 Ls <sup>-1</sup>	79
Tabla 20. Profundidades desde las platinas transversales hasta el fondo del cauce después de 48 horas de iniciada la descolmatación para un caudal de 0,30 Ls <sup>-1</sup>	80



Tabla 21. Profundidades desde las platinas transversales hasta el fondo del cauce después de un mes escala (enero 2015) de iniciada la descolmatación	81
Tabla 22. Profundidades desde las platinas transversales hasta el fondo del cauce después de haber transcurrido enero, febrero y marzo de 2015 (tiempo escala: 273,6 horas)	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura 1. Ubicación de la zona de estudio	27
Figura 2. Ubicación de la captación Tres Molinos en la microcuenca del río Grande	28
Figura 3. Captación Tres Molinos	34
Figura 4. Tramo colmatado del río Grande aguas arriba de la captación Tres Molinos	34
Figura 5. Sección de aforo del río Grande a 200 m aguas arriba del barrage	35
Figura 6. Sedimentos extraídos del río Grande	37
Figura 7. Distribución granulométrica de los sedimentos (arenas y gravas) del río Grande, aguas arriba del barrage de la captación Tres Molinos	42
Figura 8. Distribución granulométrica de los sedimentos (guijarros y cantos) del río Grande, aguas arriba del barrage de la captación Tres Molinos	44
Figura 9. Captación Tres Molinos y morfología del tramo de estudio del río Grande	47
Figura 10. Isometría del modelo de la captación Tres Molinos y tramo del río Grande a escala 1/25	53

	<b>Página</b>
Figura 11. Vista del modelo a escala 1/25 instalado en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la UNC	56
Figura 12. Vista frontal de la captación a escala 1/25 durante el ensayo sin sedimentos, con el barrage abierto en los extremos	56
Figura 13. Captación colmatada aguas arriba del barrage a escala 1/25	58
Figura 14. Medida de profundidades durante la descolmatación	59
Figura 15. Modelo hidráulico donde se observa la morfología del río Grande, debido a la descolmatación, con caudales de enero de 2015	62
Figura 16. Modelo hidráulico donde se observa la morfología del río Grande aguas arriba de los muros de protección, de la captación Tres Molinos, en enero de 2015	62
Figura 17. Modelo hidráulico donde se observa la morfología del río Grande por efecto de la descolmatación inducida de enero a marzo de 2015	63
Figura 18. Modelo físico a escala 1/25 con sistema de recirculación	83
Figura 19. Ubicación de 18 ejes transversales (platinas de acero) a nivel	83
Figura 20. Número de orificios (05 en cada eje transversal) para medir profundidades en el río. Se indican los del eje N°4	83

	<b>Página</b>
Figura 21. Captación Tres Molinos colmatada en el río Grande, con el barrage sin aperturar, a escala 1/25	84
Figura 22. Morfología del río Grande al inicio de la descolmatación inducida en enero de 2015, después de aperturar los extremos del barrage, con un caudal escala de 0,39 Ls <sup>-1</sup> en el río (1,23 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> prototipo)	84
Figura 23. Morfología del río Grande vista desde el barrage hacia aguas arriba, en enero de 2015, durante la descolmatación que se intensificó en la margen izquierda	85
Figura 24. Morfología del río Grande en la zona de la curva, durante la descolmatación en el mes de enero de 2015	85
Figura 25. Efecto de la descolmatación en la limpieza del bocal, después de 48 horas con un caudal de 0,39 Ls <sup>-1</sup> en el modelo que, en el prototipo equivalen a 240 horas y 1,23 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> , para enero	86
Figura 26. Medida del caudal en el bocal, con el método volumétrico, durante la descolmatación	86
Figura 27. Morfología del río Grande cerca del barrage, al terminar el mes de enero de 2015, con un caudal escala de 1,80 L s <sup>-1</sup> , equivalente a 5,63 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> en el prototipo	87

	<b>Página</b>
Figura 28. Funcionamiento del bocal en el mes de marzo, con un caudal  escala en el río de $1,09 \text{ L s}^{-1}$ , y en el bocal $0,34 \text{ L s}^{-1}$ , que en el  prototipo equivalen a $3,41 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $1062,5 \text{ L s}^{-1}$ , respectivamente	87
Figura 29. Morfología del río Grande desde el barrage hasta donde se  extienden los muros de protección, debido a la descolmatación,  desde enero hasta marzo de 2015 (duración escala: 273,6 horas)	88
Figura 30. Bocal libre de sedimentos después de la descolmatación,  desde enero hasta marzo de 2015	88
Figura 31. Vista en planta del modelo a escala 1/25 de la captación  Tres Molinos y tramo del río Grande	89
Figura 32. Vista isométrica del modelo hidráulico	90
Figura 33. Vista isométrica del modelo hidráulico colmatado	91
Figura 34. Morfología del río Grande hasta 50 m aguas arriba del barrage  antes de la descolmatación	92
Figura 35. Captación Tres Molinos con barrage aperturado en ambos  extremos y morfología del río Grande hasta 50 m aguas arriba  del barrage, por efecto de la descolmatación inducida, para el  mes de enero de 2015	93

Figura 36. Captación Tres Molinos y morfología del río Grande hasta 50 m

aguas arriba del barrage, por efecto de la descolmatación inducida,

desde enero hasta marzo de 2015

94

## RESUMEN

En cuencas alto andinas como las cuencas del Mashcón y del Chonta de Cajamarca, el agua de los ríos se aprovecha derivándola hacia canales con captaciones de barrage fijo. Estas presentan problemas de colmatación debido al transporte de sedimentos afectando la eficiencia de captación y la morfología del río. La presente investigación tuvo como objetivo determinar los efectos de la descolmatación inducida en la eficiencia de captación y en la morfología del río Grande aguas arriba del barrage de la captación Tres Molinos, ubicada en el distrito de Cajamarca, provincia de Cajamarca, departamento de Cajamarca. La descolmatación inducida se planteó en base a la apertura del barrage fijo en sus dos extremos con una longitud equivalente al 10% (1,80 m) del total, y a la acción erosiva del agua del río en los meses de enero, febrero y marzo de 2015. Se realizó el estudio mediante un modelo hidráulico a escala 1/25 aplicando la ley de Froude y la ley de Reynolds, tomando como prototipo la captación Tres Molinos, y un tramo de 50,00 m del río Grande aguas arriba del barrage. La descolmatación inducida se manifestó debido a la acción erosiva de los caudales que variaron desde  $1,23 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  hasta  $7,89 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , observándose la degradación del fondo del río conformado por limo, arenas, gravas y guijarros. Al finalizar el mes de marzo se obtuvo el 100% de eficiencia de captación, así como un desalojo de sedimentos de  $1220,63 \text{ m}^3$  equivalente al 93% de sedimentos atrapados desde el barrage en un tramo de 50,0 m aguas arriba. El lecho del río colmatado descendió entre 2,20 m y 1,25 m en diferentes secciones, salvo en la parte convexa de la curva donde el descenso fue de 0,20m, y el bocal quedó libre de sedimentos.

**Palabras clave:** Descolmatación inducida, captación, río de montaña, eficiencia de captación, morfología, barrage.

## ABSTRACT

In the high Andean watersheds like Mashcon and Chonta placed in Cajamarca, the water of the rivers is taken towards canals of catchments of fixed barrage. Those present problems of filling due to sediments affecting the efficiency of the catchment and morphology of the river. The present research had has the goal to determine effects of induced desilting in the efficiency of catchment and in the morphology of the Grande river upward water of Tres Molinos's barrage catchment, located in the district of Cajamarca, province of Cajamarca, department of Cajamarca. The induced desilting was outlined based on the opening of the fixed barrage in two extremes a length equivalent to 10% (1,80m) from the total, and the erosive action of the water in months of January, February and March of 2015. It was realized the study through a hydraulic model with a scale of 1/25 applying Froude's law and Reynolds's law, taking like prototype Tres Molinos's catchment, and a stretch of 50,0 m of river Grande upward water of the barrage. The induced desilting was a result of the erosive action of the flows that varied from  $1,23 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  to  $7,89 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , observing the degradation of the river depth formed by limo, sand, gravels and shingle. At the end of March was obtained 100% of efficiency of the captation, so as an eviction of sediments of  $1220,63 \text{ m}^3$  equivalent to 93% of trapped sediments from the barrage in a stretch of 50,0 m upward waters. The catchment river bed descended between 2,20 m and 1,25 m in different sections, except in the convex part of the curve where the decline was 0,20 m, and the bocal stayed free of sediments.

**Key words:** Induced desilting, catchment, river of mountain, efficiency of catchment, morphology, barrage.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción

El aprovechamiento del recurso hídrico superficial de ríos de alta montaña ha requerido desde tiempos antiguos la necesidad de derivar el agua mediante construcciones rústicas, siendo el más simple un enrocado y otros elementos de madera que trabajan como pantalla para elevar el nivel del agua, especialmente en los meses de estiaje. La tecnología y la ingeniería permitieron el diseño y construcción de estructuras hidráulicas tal como las captaciones de derivación, dotándolas de un barrage, un bocal, muros de encauzamiento y protección, poza disipadora de energía y compuertas de limpieza. Sin embargo, dichas estructuras han provocado la alteración de la morfología del río, tanto aguas arriba como aguas abajo del barrage, debido a la sedimentación y a la erosión.

El objetivo principal de una captación de derivación es proporcionar el caudal necesario y oportuno requerido con fines de riego, uso poblacional, hidroenergético, etc. La mayoría de captaciones en las cuencas de Cajamarca son con fines de riego; los usuarios son los encargados del mantenimiento de la captación. Muchas de las captaciones tienen una antigüedad mayor de 40 años, algunas han sido reconstruidas y otras habilitadas debido a que colapsaron.

Una captación nueva se puede colmatarse en un año, tal como lo demostraron Reyna y Huamán (2007) estudiando la captación Río Grande de Cajamarca. Los mismos autores señalan que para remover los sólidos se requiere de mano de obra o maquinaria pesada, labor que de preferencia, deberá realizarse en los meses de estiaje, pero según lo observado no se realiza. Para hacer frente a realidades como esta, es pertinente aplicar el

conocimiento de la erosión hídrica en los cauces así como el concepto de barrage fijo-fusible, como una alternativa de limpieza de sedimentos en una captación colmatada, aprovechando los elevados caudales de los meses lluviosos. En Cajamarca, y particularmente en la captación Tres Molinos, esta nueva forma de mantenimiento merece ser estudiada, ya sea a nivel de escala natural o escala reducida.

Los ríos de las cuencas del Mashcón y del Chonta son fuentes de aprovechamiento hídrico de los Distritos de Cajamarca y Baños del Inca, en mayor cantidad para la agricultura. Las captaciones son de derivación, fabricadas de hormigón; y el mantenimiento de las mismas por parte de los usuarios no ha logrado resultados favorables.

En los meses lluviosos el caudal de los ríos se incrementa, y por consiguiente la velocidad del flujo y el transporte de sedimentos. En los tramos donde se ubican las captaciones se observa una reducción de la pendiente del cauce debido a la colmatación, por la presencia de obstáculos, tal como los barrages, que provocan la depositación de sólidos transportados.

Los esfuerzos que hace el gobierno y los mismos usuarios del agua, respecto a la descolmatación, ya sea utilizando maquinaria pesada o simplemente mano de obra no ha resuelto el problema técnico.

Huamán (2003) señala que la introducción del concepto de barrage fusible en el diseño de captaciones de alta montaña, constituye una alternativa para mitigar el colapso de dichas obras por efectos de colmatación y socavación. El barrage fusible es la parte de una captación cuya función es elevar el nivel de agua en el cauce para que ingrese por el bocal un caudal requerido, así como evitar la colmatación frente al mismo. Dicho barrage

está compuesto por una parte fija, central, y otra parte fusible (enrocado) en los extremos de la parte fija central. La parte fusible tiende a colapsar por acción de una avenida, permitiendo el paso de sólidos que transporta el río. La reposición del enrocado se hace en forma manual cuando el nivel del agua haya descendido.

El mal estado de las captaciones de río de las cuencas del Mashcón y del Chonta, nos conlleva a recurrir a las bondades de la propia naturaleza, como es la misma erosión que produce el flujo de los ríos, capaz de remover masas de sedimentos de su cauce; por lo cual si aperturamos los extremos del barrage de una captación existente y colmatada, aplicando el conocimiento de barrage fijo-fusible, se espera conseguir una descolmatación aguas arriba del mismo; generando interrogantes que responder con el propósito de obtener elementos de juicio y así establecer aplicaciones de la descolmatación inducida en captaciones de alta montaña.

El río Grande pertenece a la cuenca del Mashcón, en el cual está ubicada la captación Tres Molinos con fines de riego, pero se encuentra totalmente colmatada desde hace muchos años y con una obstrucción total del bocal; sin embargo, siguen aprovechando el agua derivándola mucho más aguas arriba del lugar original. Existe, por lo tanto, la posibilidad de adecuar el barrage para que los sedimentos atrapados sean transportados por el flujo, limpiando de esta forma la parte obstruida del bocal que permita un funcionamiento eficiente de la captación.

No existen hasta la fecha estudios relacionados con la descolmatación inducida de las captaciones de alta montaña de las cuencas del Mashcón y del Chonta, lo que ha motivado continuar la investigación en captaciones de alta montaña; pues está directamente relacionado con el mantenimiento de dichas obras y la fluviomorfología.

## **1.2 Objetivos**

### **Objetivo general**

Determinar los efectos de la descolmatación inducida en la eficiencia de captación y en la morfología del río Grande-Cajamarca, aguas arriba del barrage.

### **Objetivos específicos**

- a) Determinar los efectos de la descolmatación inducida en la eficiencia de captación a nivel del bocal de la captación Tres Molinos del río Grande-Cajamarca, en los meses de enero, febrero y marzo de 2015, mediante un modelo físico a escala reducida.
- b) Determinar el volumen descolmatado, hasta 50,0 m aguas arriba del barrage, de la captación Tres Molinos del río Grande-Cajamarca, por efecto de la erosión hídrica en la estación lluviosa (enero, febrero y marzo de 2015), mediante un modelo físico a escala reducida.
- c) Determinar la morfología del río Grande, hasta 50,0 m aguas arriba del barrage, de la captación Tres Molinos del río Grande-Cajamarca, después de la descolmatación inducida, mediante un modelo físico a escala reducida.

## **1.3 Hipótesis**

La descolmatación inducida incrementa la eficiencia de captación y modifica la morfología del río Grande-Cajamarca, permitiendo el desalojo de los sedimentos retenidos aguas arriba del barrage.

Variables:

Variable independiente: Descolmatación inducida

Variable dependiente: Morfología del río Grande aguas arriba del barrage

Variable dependiente: Eficiencia de captación

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1 Antecedentes de la investigación

Monsalve, et al. (2010) realizaron un estudio de la zona de captación del sistema de acueducto del Municipio de Calacá en el Departamento del Quindío de Colombia, localizada en la parte alta del río Santo Domingo. El uso del agua es con fines de satisfacer la demanda poblacional. Observaron que en la captación con rejilla de fondo, ubicada en dicho río, la presencia constante del material de arrastre generado por el flujo del agua, ocasionó la socavación y alteración de la estructura. Asimismo, en sus conclusiones señalan que del análisis de la situación en la zona de captación se estableció que cualquier tipo de alternativa a emplear para captar agua estará condicionada por el funcionamiento y la operación, condicionados así mismo por el comportamiento de la corriente, aguas arriba de la estructura; por tal motivo se efectuó una intervención de tal manera que no se interfiera con las condiciones naturales y dinámicas del río.

Reyna y Huamán (2007) estudiaron la variación del lecho del río Grande aguas arriba y aguas abajo de la captación del mismo nombre, con fines de uso poblacional, y su efecto sobre dicha obra. La captación fue construida en el año 2004 y puesta en funcionamiento el año 2005 con la finalidad de cubrir la demanda para consumo de agua potable de la ciudad de Cajamarca. El barrage de la captación es fijo, con una compuerta de limpieza ubicada en la margen izquierda, y un bocal en la misma margen. En sus conclusiones manifiestan que la pendiente del cauce del río, en el tramo en estudio es de 3,33%, y tomando medidas de campo en el período Noviembre 2005- Abril 2006 se determinó que los sedimentos (45,25% de grava, 54,47% de arena y 0,28% de finos) alcanzaron la corona del barrage con una obstrucción del 36,93% de la altura del bocal. Asimismo,

aguas arriba del barrage el lecho del río se modificó debido a los sedimentos acumulados (117,56 m<sup>3</sup>).

Huamán (2003) utilizando un modelo físico de una captación para riego de alta montaña (representando a las captaciones de las cuencas del Mashcón y del Chonta de Cajamarca), a escala 1/35, demostró que, cuando el barrage está compuesto por una parte fija central y otra parte fusible (enrocado, colocado a ambos costados de la parte fija), existe un caudal de avenida para el cual la parte fusible es arrasada totalmente, lográndose una autolimpieza de la zona frente al bocal, quedando así libre de sedimentos, permitiendo el ingreso del agua hacia el canal de derivación sin ninguna dificultad obteniéndose una eficiencia de captación del 100%. La particularidad del experimento fue el utilizar un flujo combinado de agua con sedimentos.

## **2.2 Bases teóricas**

### **2.2.1 Colmatación (azolvamiento, depositación, agradación)**

Rocha (2006) menciona que el azolvamiento o colmatación, es el proceso mediante el cual los sólidos acarreados por la corriente fluvial se depositan dentro de un embalse y originan su pérdida de volumen útil. El nombre viene de la palabra azolve que significa sedimento. Hay varios sinónimos como entarquinamiento, que viene de tarquín, palabra de origen árabe que significa lodo, y aterramiento, que se usa en España. En el Perú suele usarse la palabra sedimentación y también está muy extendido el uso de la expresión colmatación.

Ochoa (2011) indica que las actividades humanas son la mayor causa de los cambios en la elevación del lecho de un río. Las actividades más comunes que producen cambios en

la elevación del lecho por actividades humanas son: las alteraciones del río, los dragados del lecho, las presas y embalses y los cambios en el uso de la tierra. Los embalses de almacenamiento y de control de crecientes producen una respuesta del río tanto aguas arriba como aguas abajo. Una corriente que transita dentro de un embalse forma un delta a medida que la carga de sedimentos se deposita en el agua almacenada. Esta depositación reduce el gradiente del río aguas arriba del embalse y propicia la agradación en el cauce. La agradación se puede extender varios kilómetros hacia aguas arriba.

### **2.2.2 Erosión**

Apaclla (2014) indica que los sedimentos, son materiales producto de la fragmentación de suelo y roca de los cauces y cuencas, pueden ser transportados de diversas formas por el flujo de una corriente cuando el esfuerzo cortante promedio sobre el fondo del cauce excede el esfuerzo crítico tractivo del material del fondo.

El transporte puede ser por rodamiento o deslizamiento sobre el fondo, a saltos dentro del flujo y suspendido o soportado por el flujo durante el tiempo que es transportado. El transporte de sedimentos puede darse también como una combinación de los anteriores.

Martín (2002) señala que la erosión en un cauce es el descenso del fondo (o el retroceso de las orillas) como consecuencia de fenómenos de dinámica fluvial naturales o suscitados por obras del hombre. También es una respuesta del cauce a la falta de equilibrio entre las variables principales. Ya que una de estas variables, el caudal sólido, es de una incierta cuantificación, es lógico que la erosión sea extraordinariamente difícil de prever. Cabe distinguir la erosión general de la erosión local. La erosión general del fondo se puede explicar por la acción de un flujo de agua caracterizado simplemente por una velocidad media. Afecta a tramos largos del cauce y sería la única o primordial en un



cauce recto, prismático y sin ninguna singularidad. La erosión local del fondo se explica por la acción de un flujo más complejo, que en una sección de la corriente (vertical u horizontal) requeriría una descripción bidimensional de las velocidades. Se presenta asociada a singularidades, como obstáculos. La erosión local afecta a una pequeña extensión y el flujo local tiene una fuerte turbulencia y desarrolla vórtices.

Rocha (1998) señala que el movimiento de los sólidos a lo largo de un río no es un proceso continuo, sino intermitente; y que en un cierto momento, para un determinado caudal, el material depositado es parcialmente erosionado y transportado hasta otro lugar, donde a su vez sedimenta. También indica que la construcción de una obra de toma representa una alteración de las condiciones normales del escurrimiento, y por lo tanto deben esperarse cambios fluviomorfológicos importantes como erosión y sedimentación. Además, considera que la erosión puede ser local o generalizada, en los siguientes términos:

- a) La erosión local, o socavación, como fenómeno hidráulico, se origina en movimientos vorticosos que ocurren al pie de determinadas estructuras hidráulicas.
- b) La erosión generalizada, o degradación, se produce a lo largo y ancho de un cauce fluvial. La degradación del cauce es extensa y progresiva.

También menciona que una de los orígenes de la erosión de los cauces fluviales es la ocurrencia de una avenida, o simplemente un aumento de caudal, también aumenta la velocidad media de la corriente, la fuerza tractiva y la capacidad de transporte; y que puede conducir a un acorazamiento del lecho, a una erosión generalizada, a erosiones locales en determinados puntos, etc. Cuando el aumento de caudal se combina con otras circunstancias, los fenómenos de erosión pueden ser muy grandes. Es un fenómeno tridimensional, impermanente, en el que hay una gran interacción entre la corriente y el

lecho que está siendo erosionado, pudiendo ocurrir una superposición de ambos tipos de erosión.

Schröder (1994) afirma que en las partes altas de los ríos existe una fuerte pendiente y una relativa poca cantidad de sedimentos, menos de la que el río es capaz de transportar. Por lo que se tiene un exceso en la capacidad de transporte, potencialmente muy agresiva, que ataca el fondo de los cauces, resultando una tendencia a la profundización (erosión). En las partes bajas, se tiene el caso contrario de acumulación y elevación del lecho. Realiza una relación entre el tamaño de sólidos, tipo de paisaje, configuración del fondo del cauce y el tipo de transporte, tal como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de fondo móvil

Granulometría de sólidos		Tipo de paisaje	Configuración de fondo	Tipo de transporte
Partícula gruesa $d_{50} \geq 1 \text{ mm}$	Grava y arena gruesa	Montaña	Bancos, lecho acorazado	Arrastre de fondo
Partícula fina $d_{50} < 1 \text{ mm}$	Arena, barro, arcilla	Llanura	Dunas, rizos, bancos	Arrastre de fondo y sólidos en suspensión

Fuente: Schröder (1994)

Otro problema es que, a veces, en la superficie se forma una capa superior, compuesta principalmente por granos gruesos, ya que los finos son arrastrados por el flujo. Al respecto Schröder (1994) considera que el diámetro medio corresponde aproximadamente con el 90 % del material original (si esta capa superior se ha desarrollado completamente).

Esta coraza superior puede (hasta un grado determinado) frenar la erosión (en el caso que no haya aporte de sólidos desde aguas arriba). Este fenómeno se presenta especialmente en lechos de grava (acorazamiento del lecho).

Ochoa (2011) manifiesta que los ríos de montaña corren en valles angostos y poco desarrollados que frecuentemente se encañonan y presentan laderas de pendientes muy fuertes. El cauce puede ser rocoso y resistente a la erosión, la sección transversal no posee bancas y la cuenca es montañosa. El flujo en estos ríos posee pocas profundidades, pendientes longitudinales fuertes, superiores a 0,005 y velocidades considerables durante crecientes, que varían de 1,0 a 2,5 m s<sup>-1</sup>, y en ocasiones, hasta 5,0 m s<sup>-1</sup>. Debido a sus velocidades, el flujo arrastra frecuentemente cantos rodados y bloques. El cauce es recto o presenta curvaturas suaves. La ubicación de fosas y crestas no sigue ninguna ley definida. En estos tramos predomina la socavación profunda del lecho. También menciona que la profundidad del muestreo del material del lecho depende de la homogeneidad de los materiales superficiales y subsuperficiales. Por ejemplo, en un lecho de arenas y gravas, en todos los muestreos de sedimentos se debe considerar la existencia potencial de una capa superficial de materiales gruesos (armadura o coraza) en la parte de una superficie relativamente inalterada. Las muestras que contienen material de ambas capas incluyen materiales de dos granulometrías en proporciones desconocidas, por lo cual es más apropiado tomar muestras de cada capa por separado. Si el propósito del muestreo es evaluar la resistencia hidráulica o la iniciación del movimiento en el lecho, la muestra superficial será la de mayor interés. Al contrario, si lo importante es el transporte del material del lecho durante una gran creciente (es decir, suficientemente grande como para alterar la capa superficial), entonces la capa más importante será la sub superficial, es decir, la capa inferior.

### **2.2.3 Fluviomorfología**

Apaclla (2014) afirma que diferentes factores influyen en una corriente para tomar una u otra forma, entre ellos, los parámetros hidráulicos, propiedades del fluido y características del flujo, características del material de fondo y de los bordos (tamaño, graduación, forma, etc.), geometría y estructura de los bordes (altura, pendiente, cohesión, estratificación o tipo rocoso), las características biológicas (tipo de vegetación tales como pasto, arbustos y árboles); e igualmente trascendentes los factores humanos, como agricultura, urbanización, drenaje, desarrollo de las llanuras de inundación y bordos de protección. Los ríos en la naturaleza presentan generalmente tres formas de acuerdo con su geometría: rectos, trezados y meandreantes. Un río recto es aquel que no tiene comportamiento meándrico; esto es, su sinuosidad es menor que 1,5. Un río con meandro es aquel en el que la configuración se presenta en forma de una serie de curvas consecutivas.

Una de las clasificaciones más utilizadas por los geomorfólogos y ampliamente aceptadas en ingeniería es la tipificación del cauce por grados: jóvenes, maduros y viejos. Los ríos jóvenes tienen generalmente valles irregulares en forma de V, sus cauces adoptan la misma forma y están constituidos por materiales fracturados que pueden o no ser erosionables. Casi todos los ríos de montaña y sus tributarios son ejemplos de ríos jóvenes. En los ríos maduros, el valle aluvial se ensancha, las pendientes longitudinales son suaves y la erosión lateral es mucho más significativa que la erosión en el fondo.

Novak, et al. (2001) considera que la morfología de ríos se relaciona con la configuración y geometría del canal y el perfil longitudinal; es dependiente del tiempo y varía en particular con la descarga, la entrada y características de los sedimentos y el material de la banca. Esta morfología puede ser muy influenciada por las obras de ingeniería, aunque dicha influencia no necesariamente es benéfica.

Ochoa (2011) expresa que los flujos del fondo, al alterar el estado de los materiales del lecho, desprenden un gran número de partículas y las trasladan a un nuevo sitio. Este transporte produce cambios graduales y episódicos de manera permanente en las formas del cauce. Las características de este fenómeno dependen de la estructura hidráulica de cada tramo, pero ésta resulta influenciada por el relieve del río. La erosión y el posterior depósito de sedimentos resuelven en buena medida la contradicción preexistente entre la estructura del flujo y la conformación del cauce y, al mismo tiempo, crean una nueva incongruencia entre la antigua estructura de la corriente y las nuevas formas del cauce.

#### **2.2.4 Sedimentos**

Según la UNESCO (2010) el transporte total de una corriente puede ser estimado del volumen depositado en un contenedor, a partir de sondeos y del peso específico del sedimento muestreado. Si el tiempo de retención es corto y el sedimento no logra depositarse, se requerirá cuantificar el sedimento en suspensión. También indica que el peso específico del sedimento depositado será función del tamaño y distribución de las partículas, de la consolidación que alcance en el tiempo al estar sujeto el material a una carga de presión, y a un estado alternado de humedecimiento y secado, lo cual se presenta si el material está expuesto a la atmósfera como consecuencia de las variaciones de los niveles de agua en el almacenamiento.

Ochoa (2011) señala que los sedimentos no tienen diámetro propiamente dicho debido a su forma irregular y, generalmente, se supone que la partícula tiene una forma aproximadamente esférica. El material aluvial de los ríos de llanura está compuesto de arenas y, en algunas ocasiones, de gravas pequeñas y medianas. En los tramos de montaña y de pie de monte, en la composición de los depósitos de fondo predominan la grava gruesa y los cantos, es decir, partículas desde 5 hasta 100 mm. Se encuentran también

partículas de dimensiones considerables; de más de 100 mm. En la composición de los depósitos de fondo en cantidades no muy grandes se encuentran, también, partículas muy pequeñas que se pueden clasificar como limos y arcillas de diámetros entre 0,1 y 0,01 mm y de 0,01 a 0,001 mm, correspondientemente e, incluso, fracciones cuyo diámetro es menor que 0,001 mm. Estas partículas constituyen la masa fundamental de los sedimentos que en los ríos se transportan en suspensión. En relación al cálculo de la granulometría de los sedimentos señala que es difícil determinar las dimensiones mínimas y máximas de las partículas porque la composición de los sedimentos más pequeños de la mezcla varía considerablemente ya que ellos pueden ser lavados o transportados por el flujo e, incluso, pueden depositarse en función de las condiciones del régimen de la corriente; también indica que se ha establecido desde hace mucho tiempo que las curvas granulométricas de los sedimentos son muy similares a las curvas elementales de duración de frecuencias, es decir, cada mezcla de sedimentos tiene su propia función de distribución o función de densidad de probabilidad.

Tabla 2. Clasificación de sedimentos por tamaño.

Nombre	Tamaño	Tamizado
<b>Canto rodado</b>		
- Muy grande	4m - 2 m	
- Grande	2 m - 1 m	
- Mediano	1 m - 0.5 m	
- Pequeño	0.5 m - 0.25 m	
<b>Guijarro</b>		
- Grande	286 mm - 128 mm	
- Pequeño	128 mm - 64 mm	
<b>Grava</b>		
- Muy gruesa	64 mm - 32 mm	Pasa el tamiz 3" y es retenido por el tamiz N°4
- Gruesa	32 mm - 16 mm	
- Mediana	16 mm - 8 mm	
- Fina	8 mm - 4 mm	
- Muy fina	4 mm - 2 mm	
<b>Arena</b>		
- Muy gruesa	2 mm - 1 mm	Pasa el tamiz N°4 y es retenido por el tamiz N° 200
- Gruesa	1 mm - ½ mm	
- Mediana	½ mm - ¼ mm	
- Fina	¼ mm - 1/8 mm	
Limo	1/16 mm - 1/256 mm	Pasa el tamiz N°200
Arcilla	1/256 mm - 1/4096 mm	Pasa el tamiz N° 200

Fuente: Bolinaga (1979)

Martín (2002) expresa que del fenómeno del acorazamiento se desprenden algunas consecuencias para los métodos de campo de determinación de la granulometría. El método más completo se puede llamar muestreo volumétrico: consiste en extraer del cauce un cierto volumen del material “subsuperficial”. Esto implica retirar primero la capa superficial en un espesor comparable al tamaño de la mayor partícula observada en la superficie. El volumen que se toma a continuación debe ser representativo del material granular del cauce, para lo cual se puede seguir el criterio de que la mayor partícula extraída no represente más del 1% en peso de toda la muestra, o bien para mayor precisión el 0,1% en peso. Si, por ejemplo,  $D_{\text{máx}} = 10$  cm estos criterios dan unos 100 y 1000 kg respectivamente. Si las partículas más grandes son mayores que el tamiz más grande del laboratorio más vale medir su eje  $b$  y pesarlas con balanza in situ. Se entiende que si  $a$ ,  $b$  y  $c$  son los ejes de una partícula,  $a > b > c$ . Finalmente el autor concluye que cualquiera que sea el método de muestreo debe procurarse la representatividad en un sentido que va más allá del significado estadístico de la palabra. Emplazados en el sitio, hay que realizar la toma en un lugar representativo del depósito aluvial, de apariencia media, ni lo fino, ni lo grueso. Es normal interesarse por los materiales con más movilidad: en aguas bajas tomar las que están cerca del agua es un criterio interesante.

### **2.2.5 Barrage fijo y barrage fusible**

Novak (2001) señala que los vertederos y las barreras son presas con niveles relativamente bajos construidas en un río para elevar suficientemente su nivel, para desviar la totalidad o parte del flujo hacia un canal de suministro o conducto para irrigación, generación hidroeléctrica, usos domésticos e industriales, etc. Estas estructuras de desviación usualmente proporcionan una capacidad pequeña de almacenamiento.



Huamán (2003) mediante el estudio en modelo hidráulico a escala 1/35, de una captación de alta montaña, encontró que si un barrage dispone de una parte fusible (enrocado) a ambos costados de la parte fija, los sedimentos atrapados frente al bocal son arrasados totalmente cuando ocurre el colapso previsto y deseado de la parte fusible, gracias a las avenidas del río.

### **2.2.6 Eficiencia de captación**

Huamán (2003) refiere que la eficiencia de captación es la relación entre el caudal que ingresa por el bocal, según las condiciones en que se encuentra, y el caudal requerido para satisfacer la demanda. La eficiencia de captación está dada por la siguiente expresión:

$$E_c = \frac{Q_f}{Q} 100$$

*Fórmula 1.*

Donde:

Ec: Eficiencia de captación, en %

Q<sub>f</sub>: Caudal que ingresa por el bocal hacia el canal de derivación. Este caudal depende tanto del nivel del agua en el río como de las características y condiciones de obstrucción del bocal.

Q: Caudal requerido que debe ingresar por el bocal hacia el canal de derivación, para cubrir la demanda del proyecto.

### **2.2.7 Caudal**

Novak (2001) indica que las velocidades del flujo se miden utilizando correntómetros en puntos sistemáticamente distribuidos sobre una sección transversal. El área de la sección transversal se determina de los sondeos y el caudal obtenido como:

$$Q = \sum A_i V_i$$

*Fórmula 2.*

Donde:

$A_i$ : área parcial de la sección hidráulica “ $i$ ” del río.

$V_i$ : velocidad media en la franja “ $i$ ”

El control natural de un tramo de un río es una sección particular (estación de aforo) donde se mide el caudal y su correspondiente nivel y se establece una única relación (denominada curva de calibración) entre estos dos valores. Tal relación puede ser utilizada para estimar el caudal a partir del nivel observado.

### **2.2.8 Modelo hidráulico**

Rocha (1998) señala que una de las formas de conocer mejor el comportamiento fluvial es mediante un modelo hidráulico, cuya ventaja reside en que en él el flujo es tridimensional, convirtiéndose en un eficaz instrumento de ayuda en los casos en que la teoría es incompleta, inaplicable o inexistente. El problema de la investigación en modelos consiste en establecer con un cierto grado de aproximación la forma en que la naturaleza va a reaccionar frente a una obra hecha por el hombre; exigiendo por lo tanto que, en todo modelo tengan que mirarse los siguientes aspectos: (a) el fenómeno natural (por ejemplo un río), (b) la obra proyectada y su influencia sobre el fenómeno natural (por ejemplo una presa derivadora); y, (c) la extensión espacial y temporal de los efectos producidos por la obra.

Vergara (1995) al ocuparse de la selección de escalas lineales de los modelos hidráulicos, expresa los rangos de escalas lineales empleados para problemas diversos (Tabla 3).

Martín (2002) considera que la semejanza dinámica completa entre modelo y prototipo es imposible, es decir, cada fuerza presente en el problema se reduce de una manera diferente (no en la misma proporción) de prototipo a modelo. Sin embargo, el modelo puede ser aún una buena representación del movimiento real si una fuerza es tan dominante sobre las demás (o sea, si representa la casi totalidad de la resultante, igualada a las fuerzas de inercia) que también pese a la diferente proporción en que se reducen, es dominante en el modelo. Los problemas de obras hidráulicas y de ingeniería fluvial son dominados por la fuerza de gravedad.

Tabla 3. Escalas utilizadas en modelos hidráulicos.

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

Fuente: Vergara (1995)

Los modelos reducidos de ingeniería fluvial se pueden clasificar en cuatro grandes tipos, todos ellos analizados según la semejanza de Froude:

- Los modelos de estructuras hidráulicas, es decir, de obras de corta extensión, emplazadas en los ríos y estudiadas en sus características hidráulicas. El fondo es fijo (no erosionable). La preparación del modelo debe atender sobre todo a la correcta reproducción de la geometría.
- Los modelos de lecho fijo o modelos “hidráulicos” de ríos, en sentido estricto, son de contornos o lecho fijo (no erosionable), y reproducen un tramo extenso del río. El objetivo del modelo es el estudio de las magnitudes hidráulicas: calados, velocidades, superficie inundada, etc. El modelo debe representar correctamente la geometría y la rugosidad fluvial.
- Los modelos de lecho móvil o modelos “fluviales”, son de lecho móvil (erosionable), y también se reproducen un tramo extenso del río. El objetivo del modelo es por un lado las magnitudes hidráulicas y por otro el comportamiento del fondo erosionable: erosiones, sedimentaciones, etc. El modelo debe de representar correctamente la geometría y la rugosidad y debe emplear criterios de semejanza respecto al sedimento utilizado y respecto al caudal sólido.
- Los modelos de obras locales con lecho móvil, de corta extensión y realizadas por el estudio de fenómenos locales de la superficie libre y sobre todo del lecho, tal como la erosión local, deben reproducir correctamente la geometría y emplear criterios de semejanza respecto al sedimento.

## Modelos basados en la ley de Froude

French (1988) indica que los modelos basados en la ley de Froude aseveran que la fuerza primordial que causa el movimiento del fluido es la gravedad y que todas las otras fuerzas, como la fricción del fluido y la tensión superficial, pueden despreciarse.

$$F_M = F_P \quad \text{Fórmula 3.}$$

donde F = número de Froude y los subíndices M y P designan los números de Froude del modelo y del prototipo, respectivamente. La fórmula 3 puede resolverse para dar:

$$U_R = \frac{U_M}{U_P} = \left( \frac{g_M L_M}{g_P L_P} \right)^{1/2} = \sqrt{g_R L_R} \quad \text{Fórmula 4.}$$

donde R = subíndice que indica la razón entre la variable del modelo al prototipo.

$U_R$  = razón de velocidad

$L_R$  = razón de escala de longitud

$g_R$  = razón de gravedad

Ya que desde un punto de vista práctico no se puede alterar la aceleración de gravedad

$$g_R = 1$$

y la ecuación queda como

$$U_R = \sqrt{L_R} \quad \text{Fórmula 5.}$$

Puesto que la velocidad del flujo se puede expresar en términos de distancia y tiempo, entonces:

$$T_R = \sqrt{L_R} \quad \text{Fórmula 6.}$$

donde  $T_R$  = escala de tiempos

También

$$Q_R = L_R^{5/2} \quad \text{Fórmula 7.}$$

$Q_R$  = escala de caudales

## Modelos de fondo móvil

French (1988) manifiesta que cuando es de vital importancia el movimiento de materiales que componen los taludes y el fondo de un canal, se emplea un modelo de fondo móvil para atacar diferentes problemas, siendo uno de ellos la morfología general de los ríos para estudiar cambios en: las pendientes del río, sección transversal, erosión, sedimentación, y cambios en el gasto y arrastre de sedimentos asociados a estructuras hidráulicas.

Chanson (2002) señala que en la modelación de ríos, los efectos gravitacionales y los viscosos son básicamente del mismo orden de magnitud. Por ejemplo, en flujos uniformes de equilibrio (es decir, flujos normales), la componente de fuerza gravitacional contrabalancea con exactitud la resistencia al flujo y las condiciones de flujo se deducen de las ecuaciones de continuidad y de momentum. En la práctica, los modelos de ríos se escalan con una similitud de Froude y se deben minimizar los efectos viscosos de escala. El flujo en el modelo debe ser turbulento y en lo posible turbulento completamente rugoso con la misma rugosidad relativa que la del prototipo:

$$Re_m > 5000$$

**Fórmula 8.**

$$(K_s)_r = L_r$$

**Fórmula 9.**

donde el número de Reynolds ( $Re$ ) se define en términos del diámetro hidráulico (es decir,  $Re = \rho V D_H / \mu$ ), y  $K_s$  es la altura de rugosidad.

En estructuras hidráulicas y en estudios sobre movimiento de ondas, el efecto de la gravedad es casi siempre predominante con el prototipo. El flujo es turbulento y por lo tanto, los efectos de la viscosidad y la tensión superficial son insignificantes en el prototipo si la velocidad de flujo es razonablemente pequeña. En tales casos se debe seleccionar una similitud de Froude.

La estrategia más económica es:

- Escoger una relación de escala geométrica  $L_r$ , de tal forma que las dimensiones del modelo se mantengan pequeñas, y
- Asegurar que el número de Reynolds del modelo  $Re_m$  es lo suficientemente grande para hacer que el flujo sea turbulento en los caudales de prueba más pequeños.

### **2.2.9 Rugosidad**

French (1988) manifiesta que se han desarrollado varios métodos empíricos para estimar el coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning. Para mezclas de materiales de fondo con una significativa proporción de tamaños granulométricos, Meyer - Peter y Müller (1948) sugieren la siguiente ecuación

$$n = 0,038d_{90}^{1/6} \qquad \qquad \qquad \textit{Fórmula 10.}$$

donde  $d_{90}$ = tamaño de material de fondo en metros, tal que el 90% del material por peso es menor.

### **2.2.10 Escalamiento de resistencia**

Chanson (2002) referente a la resistencia al flujo expresa que con frecuencia, la similitud geométrica de altura de rugosidad y de su espaciamiento no es suficiente. Por ejemplo, se observa algunas veces que aquel no reproduce los patrones del flujo en el prototipo debido a que el modelo es demasiado “liso” o demasiado “rugoso”. En algunos casos (en particular con una relación de escala  $L_r$  grande), el flujo en el modelo no es tan turbulento como el flujo en el prototipo. Una solución es utilizar elementos de rugosidad (por ejemplo, mallas, alambres, varillas verticales) para aumentar la turbulencia del flujo en el modelo y, por consiguiente, simular más satisfactoriamente el patrón del flujo en el prototipo.

Otro aspecto es el escalamiento del coeficiente de resistencia. La resistencia al flujo puede descubrirse en términos del factor de fricción de Darcy (f) o un coeficiente de resistencia empírico (por ejemplo, coeficiente de Chézy o Gaukler – Manning).

En flujos uniformes de equilibrio, la ecuación de momentum implica:

$$V_r = \sqrt{L_r} = \sqrt{\frac{(D_H)_r (\text{Sen } \theta)_r}{f_r}} \quad \text{Fórmula 11.}$$

donde

$V_r$  = escala de velocidades

$L_r$  = escala de longitudes

$(D_H)_r$  = escala de diámetros hidráulicos

$$D_H = 4 \frac{(\text{área sección transversal})}{\text{perímetro}} \quad \text{Fórmula 12.}$$

$\theta$  = escala de ángulo formado por la horizontal y el fondo del canal

$f_r$  = escala de factor de fricción de Darcy

Para un modelo no distorsionando, una similitud de Froude implica que la resistencia al flujo en el modelo será similar a la del prototipo:

$$f_r = 1 \quad \text{Fórmula 13.}$$

La mayoría de los flujos en el prototipo son turbulentos completamente rugosos y el factor de fricción de Darcy en esencia es una función de la rugosidad relativa.

La ecuación de Chézy implica que, en los flujos gradualmente variados y en los uniformes de equilibrio, se mantiene la siguiente relación de escalas:

$$V_r = \sqrt{L_r} = \frac{1}{(n_{Manning})_r} ((D_H)_r)^{2/3} \sqrt{(\text{Sen } \theta)_r} \quad \text{Fórmula 14.}$$

Para un modelo no distorsionando, la fórmula 14 se convierte en:

$$(n_{Manning})_r = L_r^{1/6} \quad \text{Fórmula 15.}$$



La fórmula 15 indica que la noción de una similitud completa se aplica tanto a la textura de la superficie como a la forma de su esquema general. En la práctica el valor mínimo alcanzable del  $n_{\text{Manning}}$  es alrededor de 0,009 a 0,010 s m<sup>-1/3</sup> (es decir para vidrio). Con tal valor, el coeficiente de resistencia del prototipo ( $n_{\text{Manning}})_p$  y la similaridad del coeficiente del Gaukler – Manning ( $n_{\text{Manning}})_r$  podría limitar la máxima relación de similitud geométrica  $L_r$ . Si  $L_r$  es muy pequeña (típicamente menor que 40), el modelo físico puede ser poco económico e inconveniente.

### **2.2.11 Materiales y construcción del modelo hidráulico**

French (1988) refiere que al construir un modelo físico, hidráulico, el modelador debe estar consciente de que el modelo tiene que:

1. Ser una réplica geométrica escalada y precisa del prototipo.
2. Retener su consistencia y precisión geométrica durante su operación
3. Contener las estructuras necesarias para controlar y medir el gasto
4. No presentar dificultad para hacer cambios fácil y rápidamente en detalle
5. Ser consistente con el propósito del estudio y su presupuesto.

Los modelos a menudo se construyen con materiales fácilmente disponibles (madera, concreto, metal, cera, parafina, plástico, arena, y carbón). Los equipos de taller requeridos para preparar y modelar estos materiales también deben estar disponibles. En muchos casos, gran parte del tiempo requerido para llevar a cabo un estudio en un modelo se emplea en los procesos de diseño y construcción.

Vergara (1995) considera que con base en la información de campo se determina las fronteras del modelo y el equipo de alimentación y reproductor de los gastos. Además, la conformación del cauce en el material móvil se acostumbra hacerlo con escantillones, o

tarrajas, apoyados sobre placas, plataformas o rieles laterales del cauce, nivelados y tomando como referencia un banco de nivel, las secciones del cauce se separan un máximo de 50 cm.

En relación con la granulometría del material móvil del prototipo, se recomienda que cuando el material sea prácticamente uniforme (desviación estándar  $\sigma < 3$ ), se utilice solo escala de diámetro medio ( $E_{D50}$ ). Cuando la granulometría sea extendida ( $\sigma > 3$ ), se recomienda seccionarla y calcular  $E_{D50}$  para cada sección.

#### **2.2.12 Calibración y verificación del modelo físico.**

French (1998) señala que un modelo no tiene ningún valor si no se puede usar para predecir el comportamiento del prototipo. Por ende, después de construido un modelo hidráulico, debe calibrarse y verificarse; se debe hacer una determinación que indique si los eventos del prototipo se reproducen precisamente en el modelo. En los modelos numéricos, con frecuencia se logra la concordancia entre el modelo y el prototipo ajustando los coeficientes empleados en el modelo hasta que se llega a una concordancia adecuada entre el modelo y el prototipo. En un modelo físico, la concordancia prototipo – modelo se logra ajustando las características físicas, como la rugosidad de fondo, el gasto, y/o los niveles de agua.

## CAPÍTULO III

### DISEÑO DE CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

#### 3.1 Ubicación geográfica

La zona de estudio está ubicada en la parte baja de la micro cuenca del río Grande, en el Paraje Puruay, del distrito de Cajamarca, departamento de Cajamarca. Comprende la captación Tres Molinos que está ubicada en las coordenadas  $07^{\circ} 06' 25''$  latitud sur,  $78^{\circ} 01' 13''$  longitud oeste y 2795 m.s.n.m. y un tramo de 50 m del río Grande, medido desde el barrage de la captación hacia aguas arriba.

La temperatura máxima es de  $18,3^{\circ}\text{C}$  y la mínima de  $7,1^{\circ}\text{C}$ ; con una humedad relativa máxima de 96% y una mínima de 74%.



Figura 1. Ubicación de la zona de estudio

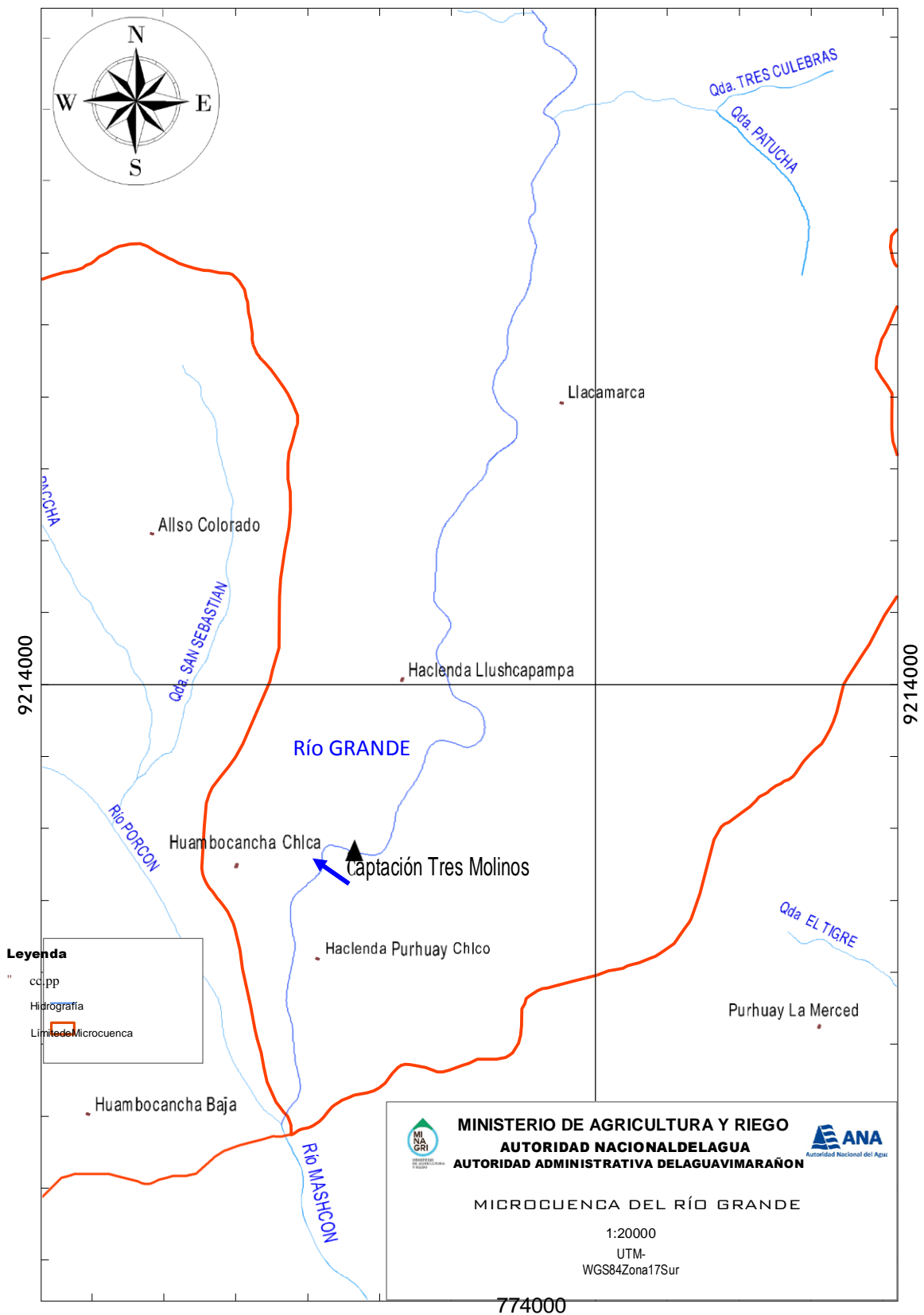


Figura 2. Ubicación de la captación Tres Molinos en la microcuenca del río Grande

La estructura hidráulica objeto del estudio, captación Tres Molinos, se encuentra ubicada a 8,2 Km al norte de la ciudad de Cajamarca. El acceso tiene lugar a través de la carretera que va hacia Bambamarca, debiéndose tomar el desvío a la derecha ubicada en el kilómetro 7,0; luego se recorre 1,2 km por una trocha carrozable que cruza el río Porcón.

## **3.2 Diseño de la investigación**

### **3.2.1 Caudal del río Grande**

- a) Visita al río Grande aguas arriba de la captación Tres Molinos, en un tramo de 200 m, para seleccionar las secciones de aforo más apropiadas y tomar fotografías.
- b) Aforo del río, una vez por semana, por dos métodos, dependiendo del nivel del agua y de la facilidad de ingreso al cauce. Siendo el método del flotador el más conveniente cuando el nivel del agua es elevado y el método por vadeo cuando el nivel del agua permitía tomar velocidades dentro del cauce, ya sea utilizando tubo de Pitot o velocímetro de hélice. En el caso de estos dos últimos se hace un seccionamiento en franjas de 50 cm de ancho y en el eje central de cada una se mide el tirante, y al 60% de profundidad de éste se mide la velocidad.
- c) Proceso de los datos de aforo del río Grande para determinar la velocidad media en  $\text{ms}^{-1}$ , el área en cada sección en  $\text{m}^2$  y el caudal en  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .
- d) Tabulación de caudales, medidos semanalmente, de los meses de enero, febrero y marzo del año 2015.

### **3.2.2 Morfología del río Grande**

- a) Topografía del tramo de estudio del río para determinar la morfología a curvas de nivel y las dimensiones de las diferentes partes de la captación. La altimetría y distancias se obtienen haciendo uso de estación total y winchas.

- b) Elaboración del plano topográfico del tramo del río, a curvas de nivel, y ubicación en planta de la captación.
- e) Estimación de la pendiente longitudinal del tramo del río en estudio antes que ocurra la colmatación y de la pendiente actual, aguas arriba de la captación.

### **3.2.3 Granulometría de sedimentos**

- a) Muestreo de sedimentos, por el método volumétrico, depositados en el cauce en un tramo de 200 m aguas arriba del barrage de la captación. Para sedimentos mayores a tres pulgadas el tamaño se mide directamente con wincha y para tamaños menores hasta arenas se extraen muestras, realizando calicatas, para luego llevarlas al laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Nacional de Cajamarca.
- b) Determinación de la curva granulométrica de los sedimentos con los datos del tamizado y tamaño de rocas de la muestra, para obtener los tamaños  $d_{10}$  y  $d_{90}$ .

### **3.2.4 Descolmatación inducida**

El modelo hidráulico a escala constituye el instrumento y la fuente de donde se obtiene la información para contrastar la hipótesis.

- a) Obtención de los parámetros de diseño del modelo hidráulico.
- b) Diseño del modelo a escala reducida utilizando la ley de Froude, sin distorsión, en función del espacio disponible del laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Cajamarca (UNC).
- c) Elaboración del plano del modelo.

- d) Construcción del modelo en el laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Cajamarca, utilizando materiales convencionales de construcción civil (acero, vidrio, marmolina, tubos PVC, accesorio PVC) y equipo de bombeo.
- e) Calibración del modelo. Esto se logra midiendo el caudal y las profundidades de sedimentos en el río, correspondientes al prototipo y verificando el valor de la relación de escala entre ambos. Se colocan los sedimentos simulando el estado colmatado de la captación tomando en cuenta que las arenas y los limos estén más cerca del barrage, mientras que la grava y las arenas estén mucho más aguas arriba que los anteriores, con una aproximación al estado del tramo sedimentado del prototipo; para lo cual se toman en cuenta los datos de campo.
- f) Ensayo del modelo, sin sedimentos, aperturando previamente el barrage en sus dos extremos en una longitud equivalente al 10% de la longitud total del barrage, haciendo circular caudales equivalentes a los ocurridos en el río Grande de los meses de enero, febrero y marzo del año 2015. Los caudales del río y del bocal se miden volumétricamente. Los puntos de medición en el modelo, aguas arriba del barrage, son ubicados a diferentes distancias que permitan obtener las medidas de profundidades representativas.
- g) Colmatación de la captación con sedimentos con el barrage sin aperturar. El tamaño de estos últimos cumple la relación de escala.
- h) Después de dos días de saturación de los sedimentos que colmataron la captación, se apertura el barrage en cada extremo, una longitud del 10% de la longitud total. Inmediatamente se procede hacer circular los caudales en el río, en forma secuencial, equivalentes a los ocurridos en el río Grande de los meses de enero, febrero y marzo del año 2015. Durante el proceso de descolmatación del modelo se toman medidas

del caudal en el río y en el bocal, profundidades del lecho móvil, en función del tiempo escala.

- i) Medida de las profundidades del lecho del río al finalizar cada uno de los meses de enero, febrero y marzo.
- j) Estimación del volumen de sedimentos en un tramo de 50 m del río, aguas arriba del barrage.
- k) Procesamiento e interpretación de los datos obtenidos del ensayo del modelo.
- l) Elaboración de planos de la morfología del río al terminar la descolmatación en los meses de enero, febrero y marzo de 2015.

### **3.3 Métodos de investigación**

Desde el punto de vista del pensamiento se utiliza la inducción-deducción.

Por tratarse de estudiar la relación causa-efecto se utiliza el método experimental. En este caso los caudales de los meses enero, febrero y marzo de 2015 así como la apertura parcial del barrage, representan la causa de la erosión del material sedimentado aguas arriba del barrage; y el efecto es la descolmatación en el bocal de la captación.

Es una investigación aplicada por ser de naturaleza práctica, porque depende de los descubrimientos y avances de la investigación básica, enriqueciéndose de los mismos, con utilización y consecuencias prácticas de los conocimientos, para ser aplicada a estructuras similares. Es cuantitativa ya que utiliza predominantemente los símbolos numéricos para la exposición de datos que provienen de un cálculo o medición. Es de campo y laboratorio puesto que se distingue el lugar donde se desarrolla la investigación, ya que las condiciones de los acontecimientos son naturales en el terreno; además, se crea



un ambiente artificial para realizar la investigación en laboratorio a través de una simulación de eventos.

### **3.4 Población, muestra, unidad de análisis y unidad de observación**

#### **Población**

Captaciones con fines de riego de las cuencas del Mashcón y del Chonta, que están colmatadas y con el bocal parcialmente o totalmente obstruido.

#### **Muestra**

La muestra se ha seleccionado por conveniencia, y está constituida por la captación Tres Molinos, ubicada en el río Grande.

#### **Unidad de análisis**

Es el modelo físico a escala de la captación Tres Molinos y de un tramo de 50 m del río Grande, aguas arriba del barrage.

#### **Unidades de observación**

Tramo de 50 m del río Grande cerca del barrage y el bocal de la captación Tres Molinos.

### **3.5 Técnicas e instrumentos de recopilación de información**

#### **Prototipo**

Las características geométricas de la captación Tres Molinos han sido obtenidas por medición directa utilizando wincha metálica, wincha de plástico, graduadas en metros, centímetros y milímetros y teodolito. El tipo de material de sus diferentes partes (barrage, muros laterales, pozas disipadoras de energía, compuerta del bocal, compuerta de limpieza) se ha determinado visualmente con cámara fotográfica digital, al tacto y por información verbal de los técnicos de la Junta de Usuarios del Río Mashcón.



Figura 3. Captación Tres Molinos

La morfología del río Grande, en un tramo de 200,00 m aguas arriba del barrage de la captación se ha obtenido realizando un levantamiento topográfico a curvas de nivel cada 25 cm, utilizando estación total TS06 PLUS. Los puntos del levantamiento han sido seleccionados dentro del cauce y en las riberas teniendo en cuenta el thalweg. Asimismo, se han ubicado los puntos de muestreo de los sedimentos.



Figura 4. Tramo colmatado del río Grande aguas arriba de la captación Tres Molinos

El aforo del río Grande se realizó en dos secciones ubicadas aguas arriba del barrage a 180 m y a 200 m. En cada sección se midió directamente las profundidades el agua con una varilla metálica graduada en metros, centímetros y milímetros, haciendo una subdivisión en franjas cada 50 cm de ancho o menor; la velocidad en el eje de cada franja se midió a una profundidad del 60% del tirante. Las velocidades se obtuvieron con tubo de Pitot y con velocímetro digital de hélice. Con el tubo de Pitot se registró la altura del menisco con precisión al milímetro y con el medidor de hélice se registró la velocidad con precisión a las décimas, en metros por segundo. En los casos de incremento de profundidad del agua en el río se utilizó el método del flotador para medir la velocidad superficial; las longitudes del tramo del cauce y de los espejos de agua en cada sección se midieron con wincha de plástico de 30 m, graduada; y para medir el tiempo de recorrido del flotador se utilizó cronómetro con precisión al segundo.



Figura 5. Sección de aforo del río Grande a 200 m aguas arriba del barrage

El muestreo de sedimentos del río Grande se realizó por el método volumétrico. De diferentes puntos del cauce del río, en forma aleatoria, se recolectaron 60 muestras de rocas (guijarros y cantos) de la superficie y sub superficie de tamaño mayores a 3 pulgadas; los limos, las arenas y las gravas se obtuvieron de seis puntos del río aperturando calicatas de 0,50 m por 0,50 m utilizando pico, barreta y palana para extraer el material subsuperficial hasta profundidades de 0,70 m a la cual se encontró la napa freática. La cantidad de la muestra de sedimentos (limo, arena y grava) fue de 170,00 kg.

Tabla 4. Coordenadas UTM y altitud de los puntos de muestreo de sedimentos del río Grande

Punto de muestreo de sedimentos hasta 70 cm de profundidad	E	N	Altitud (m.s.n.m)
1	705471,05	9205095,96	2799,20
2	705472,19	9205107,65	2799,38
3	705532,57	9205192,81	2799,38
4	705581,51	9205286,76	2800,32
5	705585,35	9205292,06	2800,37
6	705602,21	9205318,75	2800.63



Figura 6. Sedimentos extraídos del río Grande

Con la finalidad de estimar la profundidad y tipo de sedimento a profundidades mayores que 0,70 m se realizaron sondeos, utilizando una varilla de acero corrugado de 0,5 pulgada de diámetro; dicha varilla se hizo penetrar verticalmente con golpes hasta una profundidad donde los sedimentos ofrecían mucha resistencia, profundidad a la cual se supone la existencia de material gravoso o rocas, ya que en la parte superficial se observa el predominio de limo y arena.

El análisis mecánico de la muestra de sólidos (arenas y gravas), secada previamente, se realizó tomando en cuenta la norma NTP339.28 (ASTM422), utilizando un juego de mallas y balanza eléctrica con precisión al 0,1 g. Con la información de porcentajes en peso que pasaron los tamices se elaboró la curva granulométrica. Para los guijarros y cantos se utilizó el método de estadística matemática. El peso específico de las muestras de rocas (guijarro y cantos) se obtuvo midiendo el peso y el volumen de cada una de ellas;

el peso se midió con balanza y el volumen se obtuvo mediante el principio de Arquímedes utilizando agua potable y una probeta graduada en centímetros cúbicos.

### **3.6 Técnicas para el procesamiento y análisis de la información**

Para la representación de la forma de la captación y del tramo el río con los datos obtenidos en campo se elaboró el plano topográfico utilizando el programa Autocad 2013.

Las áreas, caudales, peso específico de sólidos, curva granulométrica de sedimentos y diseño del modelo a escala reducida, se procesaron utilizando el programa Excel 2013.

### **3.7 Equipos y materiales**

Estación total

GPS

Wincha metálica de 5,0 m

Wincha de plástico de 30,0 m

Cámara fotográfica digital

Tubo de Pitot

Medidor de velocidad digital tipo hélice

Dinamómetro

Juego de tamices

Balanza electrónica

Probeta graduada

Lap top

Calculadora de bolsillo

Bolsas plásticas



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Caudales del río Grande

Tabla 5. Caudales del río Grande aguas arriba de la captación Tres Molinos

Fecha (día/mes/año)	Caudal (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Duración estimada (días)
13/01/2015	1,23	10
23/01/2015	6,02	2
25/01/2015	7,89	1
26/01/2015	5,13	5
31/01/2015	5,63	2
07/02/2015	1,63	6
08/02/2015	2,87	1
09/02/2015	1,90	11
21/02/2015	0,69	1
22/02/2015	0,73	1
23/02/2015	0,59	5
28/02/2015	1,20	1
01/03/2015	3,41	2
05/03/2015	2,49	1
06/03/2015	2,38	1
07/03/2015	3,39	2
09/03/2015	2,51	5
16/03/2015	0,90	8
23/03/2015	6,91	2
30/03/2015	2,93	6

Las secciones de aforo del río Grande se ubicaron a 180,00 m y a 200,00 m aguas arriba del barrage de la captación Tres Molinos. Los aforos se realizaron en los meses de enero, febrero y marzo del año 2015. El caudal de cada fecha se ha determinado con el método área-velocidad. Las velocidades se midieron con velocímetro electrónico y con tubo de Pitot. Se observa en la tabla 5 que los caudales son variables, habiéndose presentado valores altos con mayor frecuencia en el mes de enero, mientras que los caudales menores con mayor frecuencia se presentaron en el mes de febrero. El mayor caudal (7,89 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)

ocurrió en el mes de enero y el menor ( $0,59 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) en el mes de febrero. Por lo cual, en el río Grande, aguas arriba de la captación Tres Molinos, los mayores caudales se presentaron en los meses de enero y marzo.

#### 4.2 Sedimentos del río Grande

Los puntos de muestreo de sedimentos (tabla 6) se han ubicado en seis lugares diferentes, aguas arriba del barrage hasta profundidades de 70,0 cm (ver figura 9).

Tabla 6. Tipo de sedimentos y profundidades estimadas en el río Grande aguas arriba del barrage de la captación Tres Molinos

Punto de sondeo	Distancia desde el barrage (m)	Profundidad de sondeo (m)	Grado de resistencia durante el sondeo en la profundidad señalada	Tipo de sedimento en la profundidad de sondeo
1	0,30	0,62	Baja resistencia	Limo y arena
2	3,10	0,83	Baja resistencia	Limo y arena
3	12,40	1,12	Mediana resistencia	Limo, arena y grava
4	21,20	1,17	Mediana resistencia	Limo, arena y grava
5	30,50	1,11	Mediana resistencia	Limo, arena y grava
6	14,50	1,83	Baja resistencia	Limo y arena

Los sedimentos depositados en el cauce del río Grande, aguas arriba de la captación Tres Molinos están constituidos por limos, arenas, gravas y cantos con una distribución granulométrica heterogénea.



El sedimento ubicado cerca del barrage (puntos de sondeo 1, 2 y 6) está conformado principalmente por limo y arena, mientras que los más alejados (puntos de sondeo 3, 4 y 5) además muestran la presencia de partículas de mayor tamaño. Esta distribución de sedimentos es característica aguas arriba de presas de almacenamiento ubicadas en ríos.

Tabla 7. Tamizado de los sedimentos del río Grande, ubicados aguas arriba del barrage de la captación Tres Molinos

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido (%)	Peso retenido acumulado (%)	Peso que pasa (%)
3"	75,00	0,00	0,00	0,00	100,00
2 ½"	62,50	6720,00	3,953	3,95	96,06
2"	50,00	4652,00	2,736	6,69	93,31
1 ½"	37,50	6938,00	4,081	10,77	89,23
1"	25,00	13888,00	8,169	18,94	81,06
¾"	19,05	9408,00	5,534	24,47	75,53
½"	12,70	10958,00	6,446	30,92	69,08
3/8"	9,53	7454,00	4,385	35,30	64,70
¼"	6,35	10326,00	6,074	41,38	58,62
N°4	4,75	3674,00	2,161	43,54	56,46
N°10	2,00	16068,00	9,452	52,99	47,01
N°20	0,85	14824,00	8,720	61,71	38,29
N°30	0,59	6932,00	4,078	65,79	34,21
N°40	0,43	4532,00	2,666	68,46	31,54
N°60	0,25	16292,00	9,584	78,04	21,96
N°100	0,15	18272,00	10,748	88,79	11,21
N°200	0,08	6523,00	3,837	92,62	7,38
Cazoleta	-----	12539,00	3,376	100,00	0,00
Total		157461,00			

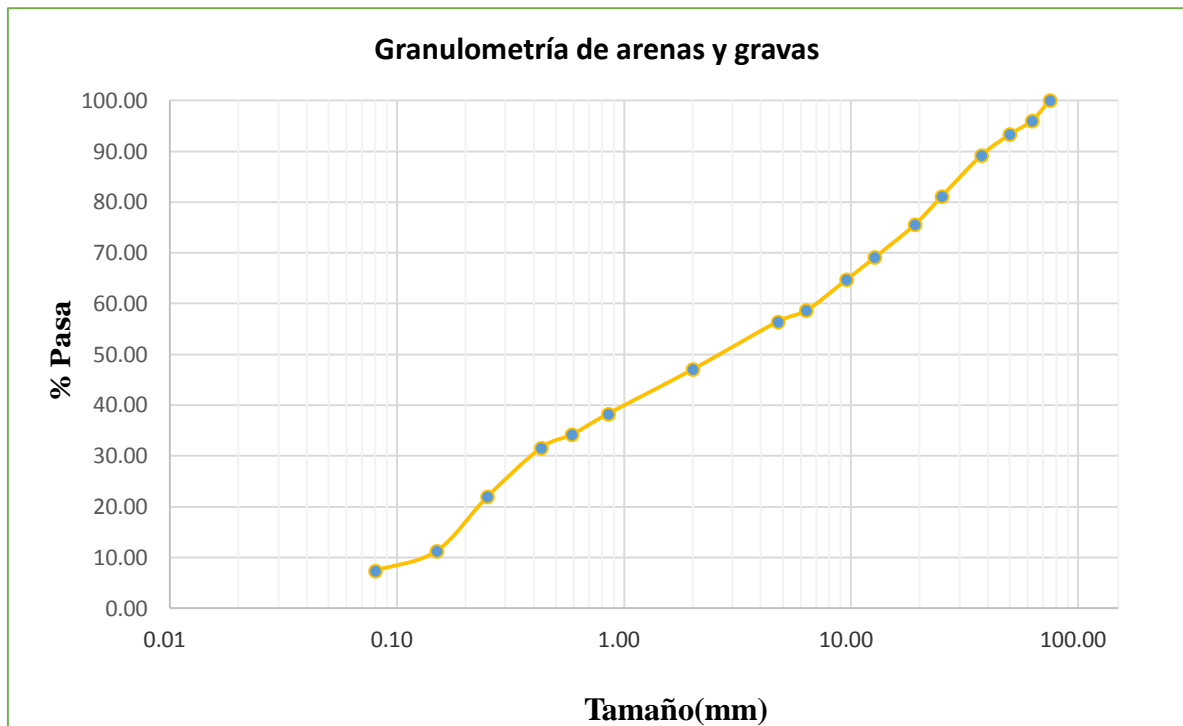


Figura 7. Distribución granulométrica de los sedimentos (arenas y gravas) del río Grande, aguas arriba del barrage de la captación Tres Molinos

La distribución granulométrica de sedimentos (arenas, gravas, guijarros y cantos) del río Grande, aguas arriba de la captación Tres Molinos (Figuras 7 y 8) muestra que se trata de partículas con tamaños bien graduados, característico de ríos de montaña y pie de monte.

### 4.3 Morfología del río Grande

De acuerdo a la topografía del río, las velocidades del flujo y el material sólido del cauce, el tramo del río de 200 m de longitud aguas arriba del barrage pertenece a un río de montaña, con una pendiente longitudinal de 1,33%. La forma del cauce es aproximadamente rectangular con un ancho que varía de 9,70 m a 18,00 m y una profundidad de 1,10 m a 5,50 m. En el lecho se observa acorazamiento y formación de barras, lejos de la captación, pero cerca de ésta predomina la presencia de limo y arena. Las riberas están estabilizadas por la vegetación.

Tabla 8. Muestras de guijarros y cantos del río Grande aguas arriba de la Captación Tres Molinos

N°	Tamaño (pulgadas)	N°	Tamaño (pulgadas)	N°	Tamaño (pulgadas)
1	5,05	21	4,92	41	4,10
2	5,50	22	4,13	42	3,60
3	8,00	23	5,31	43	4,60
4	6,60	24	4,25	44	3,70
5	7,60	25	5,28	45	3,90
6	6,40	26	3,43	46	4,40
7	7,00	27	4,53	47	11,20
8	7,50	28	4,02	48	5,50
9	10,30	29	4,53	49	3,00
10	6,70	30	3,86	50	4,00
11	5,10	31	5,71	51	6,10
12	9,10	32	4,57	52	4,53
13	4,80	33	11,20	53	4,33
14	6,20	34	13,50	54	5,51
15	9,10	35	3,25	55	4,33
16	8,20	36	3,75	56	4,13
17	5,10	37	4,20	57	5,51
18	6,90	38	4,70	58	4,33
19	6,20	39	4,50	59	5,91
20	8,80	40	4,90	60	3,86

El tramo del río de 50 m, objeto de estudio, tiene un ancho máximo de 18,0 m en el eje del barrage, un ancho mínimo de 9,70 m, una pendiente longitudinal de 0,01%; sin embargo se ha estimado la pendiente antes que ocurra la colmatación resultando ser 1,33%. Los sedimentos que se observan en la superficie y sub superficie de dicho tramo están conformados por limo, arena y gravas en profundidades variables de 0,62 m a 1,83 m. Se observó junto al bocal material gravoso debido a que los limos y arenas han sido lavados por la corriente del agua que ingresa por el bocal. En el centro del río, junto al barrage, los sedimentos están constituidos por limo y arena en un espesor de 0,62 m.

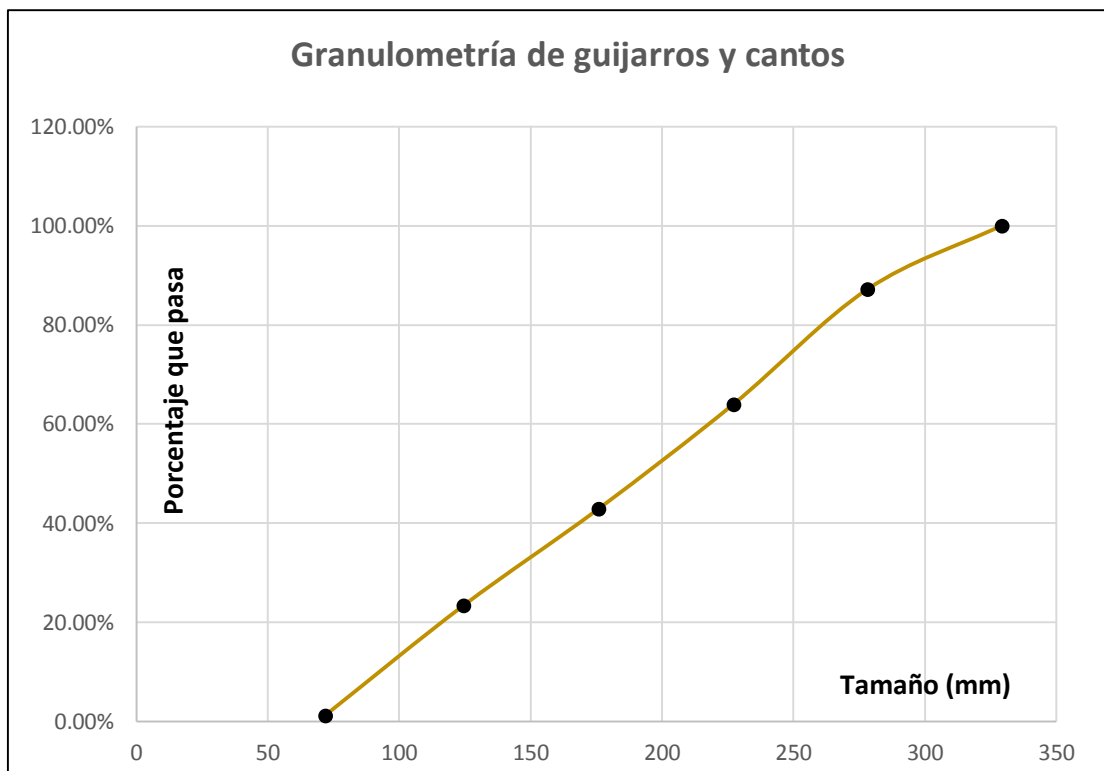


Figura 8. Distribución granulométrica de los sedimentos (guijarros y cantos) del río Grande, aguas arriba del barrage de la captación Tres Molinos

La Tabla 9 muestra que las partículas (guijarros y cantos) tienen tamaños distribuidos entre 2 (5,08 mm) y 14 (355,60 mm) pulgadas, predominando las comprendidas entre 4 (101,60 mm) y 6 (152,40 mm) pulgadas. Dicha tabla fue utilizada para elaborar la curva granulométrica de la Figura 8.

Tabla 9. Conteo de guijarros y cantos para el análisis granulométrico

Fracción (pulg)	Diámetro Media geométrica (mm)	Factor de ponderación $D^3$ ( $mm^3$ ) ( $10^3$ )	Conteo para cada fracción	Conteo $x D^3$ ( $10^6$ )	Porcentaje	Porcentaje que pasa
2 a 4	72	370,797	9	3,34	1,2	1,2
4 a 6	124	1926,717	32	61,65	22,1	23,3
6 a 8	176	5449,580	10	54,50	19,6	42,9
8 a 10	227	11725,628	5	58,63	21,1	64,0
10 a 12	278	21541,355	3	64,62	23,2	87,2
12 a 14	329	35683,305	1	35,68	12,8	100,0
Total :			60	278,42	100,0	

Los guijarros y cantos que conforman los sedimentos gruesos del río Grande son característicos de un río de alta montaña.

#### **4.4 Captación Tres Molinos**

Es una captación derivadora ubicada en el lecho del río Grande a una altitud de 2800 m.s.m.; está compuesta por las siguientes partes:

- a) Un barrage tipo vertedero de concreto armado de 18,0 m de longitud por 2,20 m de altura el cual se encuentra en buenas condiciones porque fue reconstruido el año 2004. Los sedimentos del río aguas arriba del barrage han alcanzado el nivel de la corona en toda su longitud.
- b) Una ventana de captación o bocal de forma irregular de 1,00 m de ancho por 1,00 m de altura, aproximadamente, ubicada en la margen izquierda del río, en un muro de concreto ciclópeo. Está obstruida con los sedimentos del río pero el agua logra entrar al bocal por filtración atravesando los sedimentos. El bocal dispone de una compuerta metálica que es izada manualmente cuando los usuarios lo requieren.
- c) Una compuerta de limpieza ubicada en la margen derecha del río. La abertura de la ventana de limpieza es de forma rectangular de 1,0 m de ancho por 1,20 m de alto. Actualmente está fuera de servicio, cerrada, porque el canal de limpieza está ubicado en propiedad privada.
- d) Dos muros de encauzamiento de concreto ciclópeo aguas arriba del barrage que se extienden hasta 25,0 m por la margen derecha y 9,60 m por la margen izquierda. La colmatación ha elevado el fondo del cauce, quedando 0,40 m de

altura efectiva de muros, en promedio. Estos muros tienen una antigüedad de 40 años aproximadamente y se encuentran en malas condiciones.

- e) Dos pozas disipadoras de energía ubicadas en serie, de 18,00 m de ancho por 11,10 m de longitud la primera y 7,72 m de longitud la segunda, con un desnivel de 2,80 m. Ambas son de concreto armado y están en buenas condiciones porque han sido reconstruidas el año 2004.
- f) Dos muros de encauzamiento que se extienden aguas abajo del barrage, en ambas márgenes, una longitud de 31,40 m.

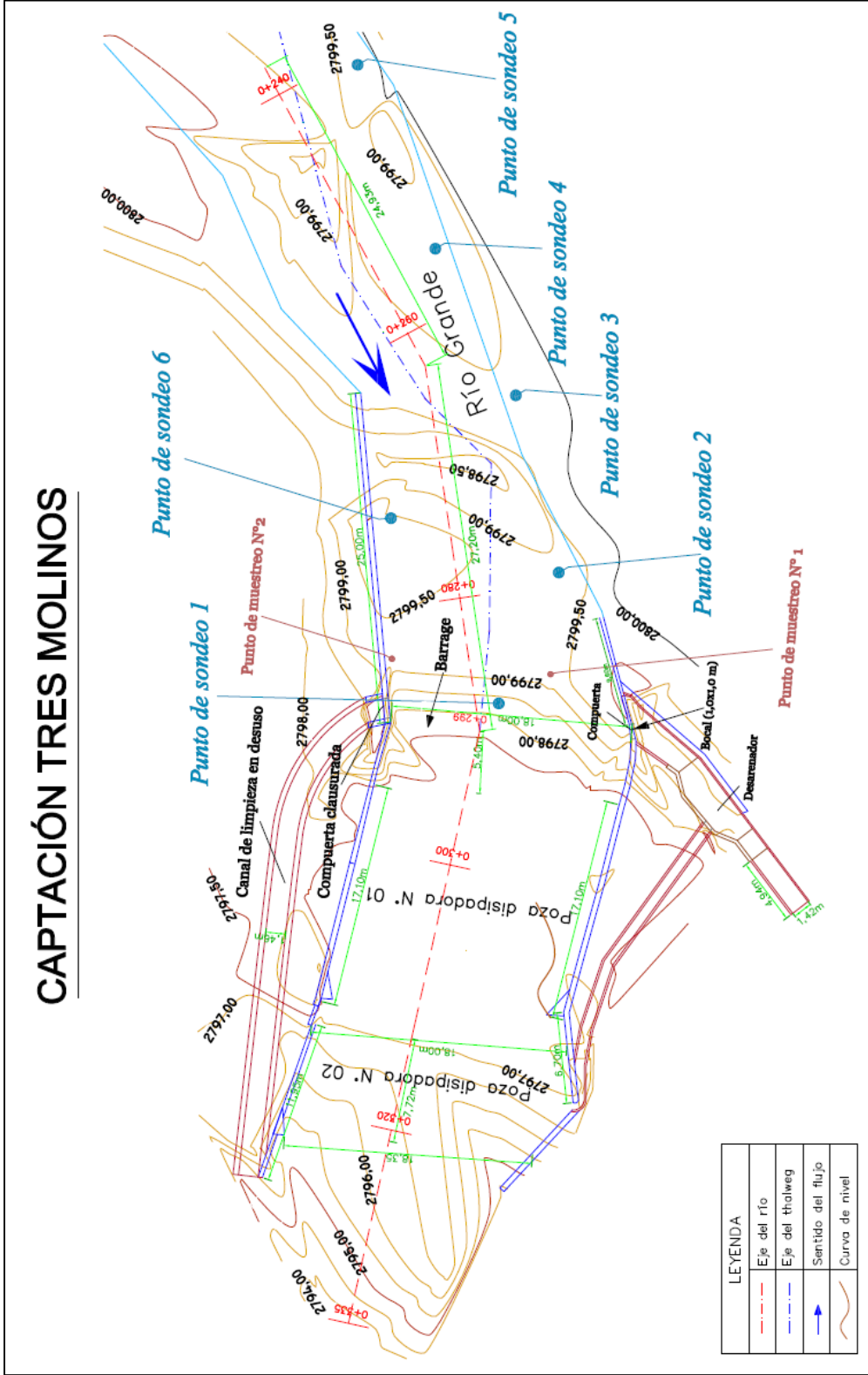


Figura 9. Captación Tres Molinos y morfología del tramo de estudio del río Grande

#### 4.5 Datos del prototipo

El prototipo para modelamiento está conformado por la captación Tres Molinos y un tramo del río Grande de 50,00 m de longitud, aguas arriba del barrage.

En una longitud de 163,60 m aguas arriba del barrage ha sido elevado el lecho del río debido a la colmatación. En dicho tramo se estimó un volumen de 3158,48 m<sup>3</sup>, de sedimentos.

Tabla 10. Datos del prototipo para diseño del modelo físico a escala 1/25

Dato	Magnitud	Unidades
Caudal menor	1,23	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Caudal mayor	7,89	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Longitud del tramo del río	50,00	m
Ancho menor de sección del río	9,70	m
Ancho mayor de sección del río	18,00	m
Profundidad mayor de sección del río	3,00	m
Pendiente del cauce antes de la colmatación	0,0133	m/m
Pendiente del cauce colmatado	0,0001	m/m
d <sub>90</sub> de sedimentos (arena y grava)	0,0399	m
d <sub>90</sub> de sedimentos (guijarros y cantos)	0,2873	m
d <sub>10</sub> de sedimentos (guijarros y cantos)	0,093	m
Cu para arena y grava	55,2	No tiene
Cu para gujarros y cantos	2,34	No tiene
Longitud del barrage de hormigón	18,00	m
Altura del barrage de hormigón	2,20	m
Talud aguas abajo del barrage (V:H)	1:2	No tiene
Ancho de corona del barrage	0,72	m
Longitud del bocal	1,00	m
Altura del bocal	1,00	m
Longitud muro derecho, aguas arriba, de hormigón	25,00	m
Longitud muro izquierdo, aguas arriba, de hormigón	9,60	m
Altura de muros	3,00	m
Longitud poza disipadora de energía, de hormigón	17,10	m
Ancho poza disipadora de energía, de hormigón	18,00	m



La captación Tres Molinos deriva agua para riego de 265,77 ha, las que requieren 227 L s<sup>-1</sup>; sin embargo, en los meses de estiaje los usuarios solamente tienen autorización para derivar 100 L s<sup>-1</sup>.

#### 4.6 Diseño del modelo

La escala seleccionada del modelo es  $L_M/L_P = 1/x = 1/25$ , la cual permite que ocurra la turbulencia del flujo ( $Re > 5000$ ), así como la utilización del espacio disponible del Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Cajamarca.

- Caudal mayor del modelo

De la fórmula 7 se obtiene  $Q_M = Q_P \times x^{-5/2}$  (los sub índices M y P significan modelo y prototipo, respectivamente), donde al reemplazar el valor del caudal mayor del prototipo y el valor de la escala se obtiene

$$Q_M = (7,89) (25)^{-5/2} = 0,00252 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 2,52 \text{ L s}^{-1} \quad (\text{caudal mayor de prueba del modelo})$$

- Caudal menor del modelo

Es el menor caudal de prueba que debe ser verificado con el número de Reynolds en el modelo ( $Re_M > 5000$ ).

Según la fórmula 8, el número de Reynolds en el modelo tiene la siguiente expresión

$$Re_M = \frac{V_M D_{HM}}{\nu_M}$$

donde, la velocidad media en el modelo ( $V_M$ ) se obtiene con la fórmula 5, de la cual resulta

$V_M = V_P \left(\frac{1}{x}\right)^{\frac{1}{2}}$ . En esta última expresión la velocidad en el prototipo ( $V_P$ ) es la velocidad media en la sección de aforo del río para el caudal  $1,23 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , con una profundidad media de tirante  $0,34 \text{ m}$  y un ancho de espejo de  $6,00 \text{ m}$  que al reemplazar se obtiene

$$V_M = \frac{1,23}{(0,34)(6,0)} \left(\frac{1}{25}\right)^{1/2} = 0,60 \left(\frac{1}{25}\right)^{1/2} = 0,12 \text{ m s}^{-1}$$

El diámetro hidráulico en el prototipo ( $D_{HP}$ ) es cuatro veces el radio hidráulico. Para el caudal  $1,23 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  resulta

$$D_{HP} = 4 \left(\frac{2,04}{6,68}\right) = 1,22 \text{ m}$$

El diámetro hidráulico en el modelo es  $D_{HM} = 1,22/25 = 0,049 \text{ m}$

El fluido a utilizar en el modelo es agua; la viscosidad cinemática para una temperatura de  $14 \text{ }^\circ\text{C}$  (temperatura media anual para la ciudad de Cajamarca, según la estación climatológica Augusto Weberbauer ubicada en el campus de la sede central de la Universidad Nacional de Cajamarca) es  $\nu_M = 0,0000011076 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

El número de Reynolds en el modelo resulta

$$R_{eM} = \frac{(0,12)(0,049)}{0,0000011076} = 5309 > 5000 \quad (\text{condición para flujo turbulento})$$

Por lo tanto, el menor caudal para el modelo es

$$Q_M = (1,23) (25)^{-5/2} = 0,0003936 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 0,39 \text{ L s}^{-1} \quad (\text{caudal menor de prueba del modelo})$$

- Escalamiento de la rugosidad del lecho del río

El lecho del río Grande está conformado por mezcla de limo, arena, grava, guijarros y cantos. Tomando en cuenta que durante los meses lluviosos de Enero, Febrero y Marzo, el río erosiona el lecho y transporta sedimentos en suspensión y de fondo; la resistencia

al flujo se produce principalmente por el material de fondo. Debido a la compleja distribución de sedimentos en el lecho, para representar la rugosidad de Manning en el modelo se utilizará la rugosidad de Manning del prototipo ( $n_p$ ) calculada con la fórmula 10, en la cual se reemplaza el promedio del tamaño de partícula  $d_{90}$  obtenida de arenas y gravas (0,0399 m), y de guijarros y cantos (0,2873 m).

$$n_p = 0,038 \left( \frac{0,0399+0,2873}{2} \right)^{1/6} = 0,028 \frac{s}{m^{1/3}} . \text{ La rugosidad de Manning en el modelo } (n_M)$$

se calcula con la fórmula 15, de la cual se obtiene

$$n_M = n_p x^{-1/6}$$

Reemplazando valores,  $n_M = (0,028) (25)^{-1/6} = 0,016 \text{ s m}^{-1/3}$  . Esta rugosidad corresponde a superficie de acero liso pintada (French, 1988) que varía de 0,012 a 0,017  $\text{s m}^{-1/3}$ .

- Escalamiento de la rugosidad de la captación

La rugosidad del prototipo se estima en  $0,017 \text{ s m}^{-1/3}$ , que corresponde a hormigón viejo (Naudascher, 2012).

La rugosidad para el modelo es  $n_M = (0,017) (25)^{-1/6} = 0,010 \text{ s m}^{-1/3}$ . Esta rugosidad corresponde a superficies de vidrio. Por lo cual los muros de la captación en el modelo son de vidrio y el barrage con la poza disipadora son de marmolina. Este último material permite darle la forma al barrage y cortarlo en partes durante el ensayo; además la suavidad es similar al del vidrio.

Tabla 11. Resultados del diseño del modelo hidráulico a escala 1/25

Dato para construcción del modelo	Magnitud	Unidad
Caudal menor	0,39	L s <sup>-1</sup>
Caudal mayor	2,52	L s <sup>-1</sup>
Longitud del tramo del río	2,00	m
Ancho menor de sección del río	0,39	m
Ancho mayor de sección del río	0,72	m
Profundidad mayor de sección del río	0,12	m
Pendiente del cauce antes de la colmatación	0,0133	m/m
Pendiente del cauce colmatado	0,0001	m/m
d <sub>90</sub> de sedimentos ( arena y grava a escala)	1,6	mm
d <sub>90</sub> de sedimentos (guijarros y cantos a escala)	11,5	mm
d <sub>10</sub> de sedimentos (guijarros y cantos a escala)	3,7	mm
Longitud del barrage	0,72	m
Altura del barrage	0,088	m
Talud aguas abajo del barrage (V:H)	1:2	No tiene
Ancho de corona del barrage	0,029	m
Longitud del bocal	0,04	m
Altura del bocal	0,04	m
Longitud muro derecho, aguas arriba del barrage	1,00	m
Longitud muro izquierdo, aguas arriba aguas arriba del barrage	0,384	m
Altura de muros	0,120	m
Longitud poza disipadora de energía	0,684	m
Ancho poza disipadora de energía	0,72	m

- Escalamiento de los sedimentos del río

Se ha encontrado que los sedimentos del río Grande tienen una distribución granulométrica no uniforme, tal como lo señala el coeficiente de uniformidad ( $C_u > 2$ ); por lo cual es conveniente utilizar como tamaño máximo de sedimentos para el modelo el valor  $d_{90}$ .

De acuerdo a la escala seleccionada  $1/x = 1/25$ , los tamaños de sedimentos del modelo resulta

$$d_{90M} (\text{arenas y gravas}) = 0,0399 / 25 = 0,0016 \text{ m} \quad (\text{material que pasa el tamiz N}^\circ 10).$$

$d_{90M}$  (guijarros y cantos) =  $0,2873/25 = 0.0115$  m (material que pasa el tamiz de  $\frac{1}{2}$ " de abertura).

$d_{10M}$  (guijarros y cantos) =  $0,093/25 = 0,0037$  m (material retenido por el tamiz N°4)

Por lo tanto, las arenas y la gravas a ser utilizadas en el modelo se obtienen del mismo material del río Grande que pasen el tamiz N°10; los guijarros y cantos también provienen del mismo material pero se separan entre los tamices de  $\frac{1}{2}$ " y N°4.

Los limos para el modelo fueron utilizados directamente del material sedimentado en el prototipo.

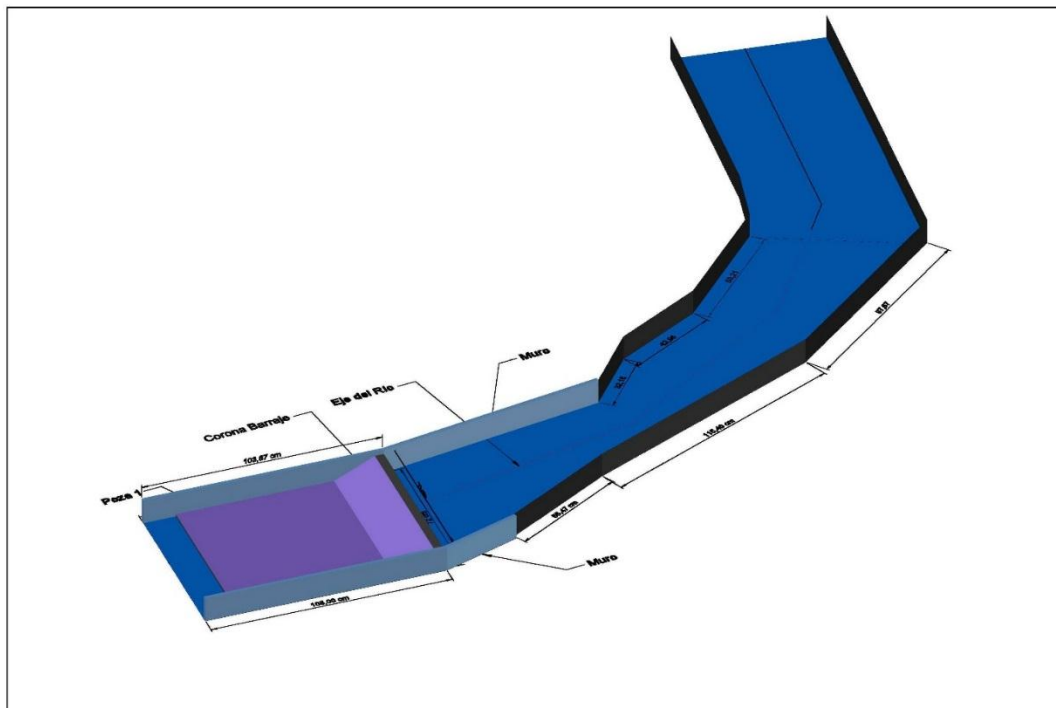


Figura 10. Isometría del modelo de la captación Tres Molinos y tramo del río Grande, a escala 1/25

#### **4.7 Construcción del modelo**

El modelo hidráulico se construyó en el laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Cajamarca. Es una representación a escala 1/25, cuyas medidas están indicadas en la tabla 12. Los materiales con rugosidad escala, tanto para el río como para la captación son metal liso pintado, vidrio y marmolina. Las paredes y fondo del río son de metal liso pintado, los muros de la captación son de vidrio, el barrage y la poza disipadora de energía son de marmolina.

Para que se ensaye el modelo con diferentes caudales se construyó un sistema de recirculación mediante bombeo. Los caudales de ensayo de indican en la tabla 13.

#### **4.8 Caudales y tiempos a escala para ensayo del modelo**

Los caudales seleccionados del prototipo varían desde  $1,23 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  hasta  $7,89 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  y la duración desde 24 horas hasta 264 horas. La duración de cada caudal se estimó contando los días transcurridos entre cada aforo. En la tabla 12 se muestran dichos caudales en metros cúbicos por segundo, y la duración en horas.

Conociendo el caudal del prototipo se determinó el caudal a la escala 1/25 con la fórmula 7, y el tiempo a la misma escala mediante la fórmula 6. Estos resultados se muestran en las dos últimas columnas de la tabla 12, donde el caudal está en litros por segundo y la duración en horas.

Los caudales del río Grande muestran que el régimen es muy variable siendo más elevados en los meses de enero y marzo en comparación con el mes de febrero.

Tabla 12. Caudales del río Grande y duración, en el prototipo y en el modelo

Mes del año 2015	Caudal del prototipo ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	Duración del caudal en el prototipo (h)	Caudal del modelo ( $\text{L s}^{-1}$ )	Duración del caudal en el modelo (h)
Enero	1,23	240	0,39	48,0
Enero	6,02	48	1,93	9,6
Enero	7,89	24	2,52	4,8
Enero	5,13	120	1,64	24,0
Enero	5,63	48	1,80	9,6
Febrero	1,63	144	0,52	28,8
Febrero	2,87	24	0,92	4,8
Febrero	1,90	264	0,61	52,8
Marzo	3,41	48	1,09	9,6
Marzo	2,49	24	0,80	4,8
Marzo	2,38	24	0,76	4,8
Marzo	3,39	48	1,08	9,6
Marzo	2,51	120	0,80	24,0
Marzo	6,91	48	2,21	9,6
Marzo	2,93	144	0,94	28,8

#### 4.9 Calibración del modelo

La calibración se realizó para dos condiciones. La primera relacionada con los caudales de ensayo, observando que las profundidades del flujo no excedan las previstas en el diseño del modelo; la segunda, teniendo en cuenta que los sedimentos alcancen como máximo el nivel de la corona del barrage extendiéndose hasta 2,00 m aguas arriba.

#### 4.10 Ensayo del modelo

En el modelo físico a escala 1/25, el ensayo se realizó en dos fases; la primera haciendo fluir agua sin sedimentos por el río y la captación sin colmatarse, con el barrage abierto en sus dos extremos; la segunda haciendo fluir agua sin sedimentos por el río y la captación colmatada con el barrage abierto en sus dos extremos. En esta última fase se observó el proceso de descolmatación inducida por la apertura parcial del barrage y la erosión fluvial.

#### 4.10.1 Ensayo sin sedimentos

En esta primera fase se hicieron circular diferentes caudales en el río, con el barrage abierto en sus dos extremos y el bocal totalmente abierto.



Figura 11. Vista del modelo a escala 1/25 instalado en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la UNC



Figura 12. Vista frontal de la captación a escala 1/25 durante el ensayo sin sedimentos, con el barrage abierto en los extremos



Tabla 13. Caudales en el río y en el bocal del modelo, del ensayo sin sedimentos

Caudal en el río (L s <sup>-1</sup> )	Caudal en el bocal (L s <sup>-1</sup> )
0,39	0,06
1,93	0,26
2,52	0,35
1,64	0,29
1,80	0,31
0,52	0,08
0,92	0,17
0,61	0,09
1,09	0,21
0,80	0,15
0,76	0,14
1,08	0,20
0,80	0,15
2,21	0,34
0,94	0,20

La tabla 13 indica el caudal que circula por el río Grande y el que logra ingresar por el bocal de la captación Tres Molinos, con el barrage abierto en sus dos extremos, a escala 1/25. Esta parte del ensayo se hizo sin sedimentos, tal que el bocal no presentaba ninguna obstrucción cuando se midieron los caudales derivados.

Según estos resultados se muestra que en el modelo el caudal que ingresa por el bocal se incrementa cuando en el río el caudal también es cada vez mayor.

#### 4.10.2 Ensayo con sedimentos

Los sedimentos utilizados lo constituyeron los sólidos granulares extraídos del río Grande, cuya granulometría fue seleccionada pasándolos por el tamiz N°10; los guijarros y cantos también provienen del mismo material pero se separaron entre los tamices de ½” y N°4, y finalmente los limos como sedimentos más finos. Esta granulometría se ajusta a la escala 1/25 del modelo.

La morfología del río Grande debido a la descolmatación inducida (ver figura 23 del Apéndice) se modificó observándose mayor erosión a la izquierda del eje del río debido al efecto del flujo en la curva. Las profundidades del cauce se incrementaron cerca del bocal en el mes de enero debido a la presencia de los mayores caudales; sin embargo, el volumen de descolmatación fue de 18,45% (ver figura 22 del Apéndice). Durante el mes de febrero y marzo los caudales modificaron aún más la morfología (ver figura 29 del Apéndice) observándose una erosión casi uniforme, excepto en la parte convexa de la curva donde quedaron sedimentos, a la derecha del eje del río. Esto concuerda con el patrón del flujo en una curva de los cauces naturales.

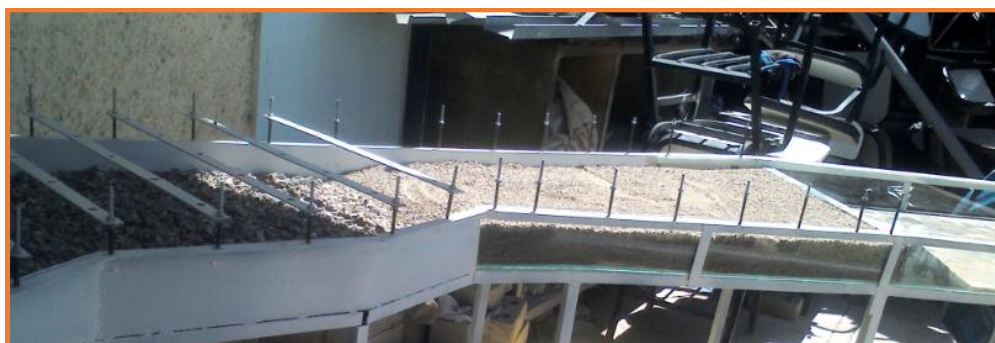


Figura 13. Captación colmatada aguas arriba del barrage a escala 1/25

Tabla 14. Caudales a escala 1/25 en el río y en el bocal durante la descolmatación inducida de enero a marzo de 2015

Mes del año 2015	Caudal en el río (L s <sup>-1</sup> )	Caudal en el bocal (L s <sup>-1</sup> )
Enero	0,39	0,13
Enero	1,93	0,57
Enero	2,52	0,67
Enero	1,64	0,51
Enero	1,80	0,58
Febrero	0,52	0,23
Febrero	0,92	0,34
Febrero	0,61	0,26
Marzo	1,09	0,34
Marzo	0,80	0,30
Marzo	0,76	0,28
Marzo	1,08	0,35
Marzo	0,80	0,30
Marzo	2,21	0,64
Marzo	0,94	0,34

La tabla 14 indica el caudal que ingresó por el bocal de la captación Tres Molinos según el caudal que circuló por el río Grande, con el barrage abierto en sus dos extremos, durante el proceso de descolmatación. Esta parte del ensayo se realizó haciendo fluir agua sin sedimentos estando la captación colmatada; es decir, al inicio el bocal estuvo totalmente obstruido con sedimentos, pero al transcurrir el tiempo dichos sedimentos fueron desalojados paulatinamente por efecto de la erosión hídrica, permitiendo el ingreso de agua por el bocal en cantidades mayores que las observadas durante el ensayo sin sedimentos. Los caudales del bocal se midieron al finalizar el tiempo de duración del flujo de cada caudal del río, señalados en la tabla 12.

Las profundidades del lecho del río se midieron después de hacer circular los caudales y al final de cada mes de enero, febrero y marzo. Para lo cual se elaboró la topografía a curvas de nivel.



Figura 14. Medida de profundidades en el modelo durante la descolmatación

#### 4.11 Eficiencia de captación

Según la Junta de Usuarios del Mashcón el caudal de derivación de la captación Tres Molinos es de  $227 \text{ L s}^{-1}$  para uso agrícola. Este caudal se tomó como el caudal de dotación para calcular la eficiencia de captación durante el proceso de descolmatación.

De acuerdo a los ensayos realizados en el modelo hidráulico a escala 1/25, durante la descolmatación inducida, los caudales que ingresaron por el bocal de la captación Tres Molinos en los meses de enero, febrero y marzo de 2015 se muestran en la tabla 14. Transformando los valores a escala natural (prototipo) mediante la fórmula 7, y dividiendo dichos caudales entre  $227 \text{ L s}^{-1}$  según la fórmula 1, se obtiene la eficiencia de captación tal como se indica en la tabla 15.

Tabla 15. Caudales del río Grande, del bocal, y eficiencia de captación durante la descolmatación inducida, en el prototipo

Mes del año 2015	Caudal del río ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )	Duración del caudal en el río (h)	Caudal del bocal ( $\text{L s}^{-1}$ )	Eficiencia de captación (%)
Enero	1,23	240	406,25	100
Enero	6,02	48	1781,25	100
Enero	7,89	24	2093,75	100
Enero	5,13	120	1593,75	100
Enero	5,63	48	1812,50	100
Febrero	1,63	144	718,75	100
Febrero	2,87	24	1062,50	100
Febrero	1,90	264	812,50	100
Marzo	3,41	48	1062,50	100
Marzo	2,49	24	937,50	100
Marzo	2,38	24	875,00	100
Marzo	3,39	48	1093,75	100
Marzo	2,51	120	937,50	100
Marzo	6,91	48	2000,00	100
Marzo	2,93	144	1062,50	100

#### **4.12 Morfología del río**

La forma del lecho cambió paulatinamente; se observó que la erosión avanzó desde el barrage hacia aguas arriba en las primeras horas de ensayo. Con los primeros caudales escala del mes de enero,  $0,39 \text{ L s}^{-1}$  y  $1,93 \text{ L s}^{-1}$ , la descolmatación fue rápida en la zona próxima al bocal y al barrage, continuando con mayor intensidad en la margen izquierda hasta donde se extienden los muros de protección. Luego la erosión se manifestó profundizando el lecho progresivamente haciendo que en las secciones del río sea cada vez más uniforme en el tramo comprendido entre el barrage y la curva. En esta última los sedimentos fueron arrasados en la parte cóncava y se quedaron atrapados en la parte convexa hasta finalizar el mes de marzo, observándose también que la erosión fue mayor en la margen izquierda al culminar dicho mes.

Tal como señala la teoría de la erosión de cauces aluviales, en el proceso de la descolmatación inducida se aprecia el desalojo de los sedimentos atrapados aguas arriba del barrage, pero no fue necesario la presencia del mayor caudal en el mes de enero para modificar rápidamente la morfología del río cerca del barrage (ver figuras 22 y 25 del Apéndice).

La morfología del río a 50,0 m aguas arriba del barrage se modificó en gran medida desde enero hasta marzo (ver figuras 34, 35 y 36 del Apéndice) debido a la acción erosiva de los caudales de los meses de enero a marzo de 2015. Por lo cual siendo mayores los caudales en enero y marzo también fue mayor la erosión en dichos meses.

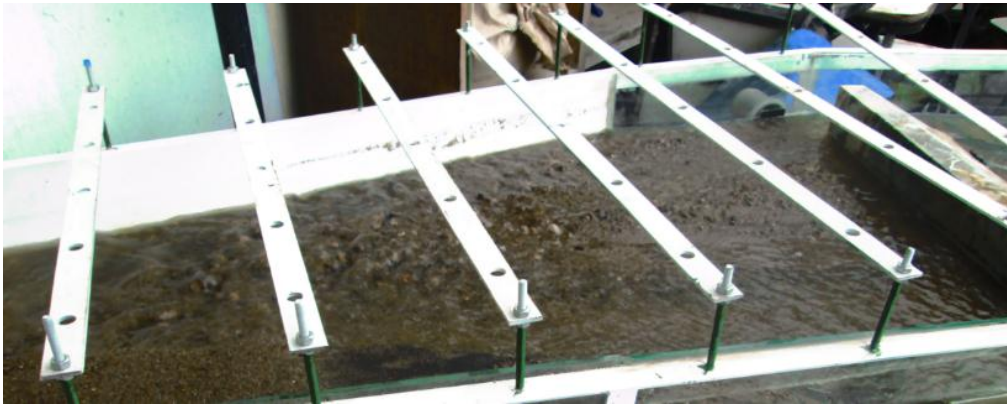


Figura 15. Modelo hidráulico donde se observa la morfología del río Grande desde el barrage de la captación Tres Molinos, debido a la descolmatación, con caudales de enero de 2015

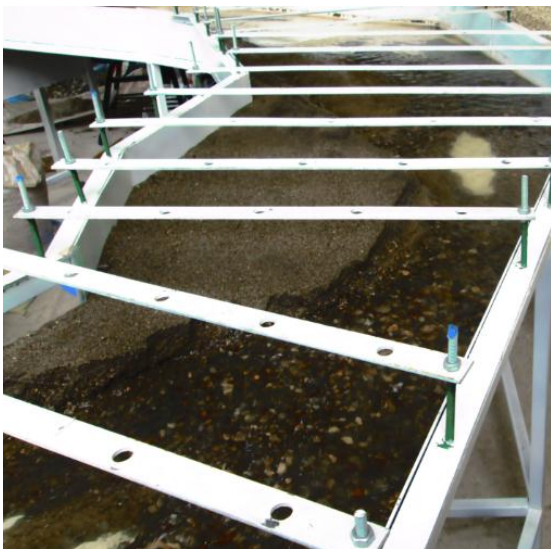


Figura 16. Modelo hidráulico donde se observa la morfología del río Grande aguas arriba de los muros de protección de la captación Tres Molinos, en enero de 2015



Figura 17. Modelo hidráulico donde se observa la morfología del río Grande por efecto de la descolmatación inducida de enero a marzo de 2015

Las profundidades medidas en el modelo durante la descolmatación se presentan en las tablas 17, 18, 19, 20, 21, 22, y la morfología del río a curvas de nivel en las figuras 34, 35 y 36 del Apéndice.

#### **4.13 Eficiencia de captación**

Los caudales que ingresaron por el bocal durante los meses de descolmatación fueron superiores al requerimiento de los usuarios de la captación de  $227 \text{ L s}^{-1}$ , por lo cual se ha considerado que la eficiencia en los meses de enero, febrero y marzo fue del 100%.

Los resultados de la tabla 15 muestran que a mayor caudal en el río mayor caudal de derivación por el bocal, siendo los más elevados en los meses de enero y marzo comparados con los de febrero. Los caudales derivados siendo superiores a  $227 \text{ L s}^{-1}$  garantizan la dotación de agua con la captación Tres Molinos, durante el proceso de descolmatación.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- a) La descolmatación inducida en el río Grande, desde el barrage de la captación Tres Molinos hasta 50 m aguas arriba, durante los meses de enero, febrero y marzo de 2015 permitió la limpieza de sedimentos junto al bocal, alcanzó una eficiencia de captación del 100 % debido a la acción erosiva de los caudales del río que variaron desde  $1,23 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  hasta  $7,89 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , y se derivaron caudales por el bocal desde  $406,25 \text{ L s}^{-1}$  hasta  $2093,75 \text{ L s}^{-1}$ , superiores al requerido de  $227 \text{ L s}^{-1}$ .
- b) La apertura del barrage de la captación Tres Molinos en un 10% (1,80 m) de su longitud en cada uno de sus dos extremos, y el flujo de caudales del río Grande, en los meses de enero, febrero y marzo de 2015, permitieron que se produzca la descolmatación inducida por erosión hídrica, observándose mayor rapidez en los extremos del barrage los primeros días del mes de enero, con un caudal de  $1,23 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .
- c) La obstrucción parcial del bocal con sedimentos durante el proceso de descolmatación de enero a marzo de 2015 no ha seguido un patrón porque en algunos momentos estaba libre de sedimentos, en otros se observó la presencia de los mismos, modificándose la cantidad y la profundidad en forma aleatoria, debido a la turbulencia del flujo; y al finalizar el mes de marzo de 2015 se observó el bocal libre de sedimentos.
- d) La descolmatación inducida en los meses de enero a marzo de 2015 modificó la morfología del río Grande en los 50 m observados, aguas arriba del barrage. El



lecho del río colmatado en todo su ancho descendió 2,20 m frente al bocal; aguas arriba en la margen derecha, junto al muro de protección, descendió 1,25 m; en otras secciones del río el descenso fue variable, con profundidades entre 1,25 m y 2,20 m. En la parte convexa de la curva del río Grande la descolmatación fue menor, con un descenso de 0,20 m, y aguas arriba de dicha curva la descolmatación fue total.

- e) En el río Grande, hasta 50 m aguas arriba desde el barrage de la captación Tres Molinos, el volumen de sedimentos de 1312,50 m<sup>3</sup> que produjo la colmatación, fue removido en 93 % (1220,63 m<sup>3</sup>) desde enero hasta marzo de 2015, debido a la descolmatación inducida.
- f) El estudio de la descolmatación inducida de la captación Tres Molinos y la morfología del río Grande, se logró realizar mediante un modelo hidráulico a escala 1/25 sin distorsión, aplicando la Ley de Froude para flujo totalmente turbulento y rugoso.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

- a) Es importante realizar estudios similares en otras captaciones colmatadas de las cuencas del Mashcón y del Chonta, mediante el uso de modelos hidráulicos.
- b) Los resultados obtenidos en la presente investigación pueden aplicarse a una actividad de limpieza (descolmatación) en captaciones de alta montaña.
- c) La apertura de un barrage de una captación produce un flujo de agua y sedimentos aguas abajo del barrage que merece ser estudiado mediante modelos físicos.

## **PROPUESTA**

### **LINEAMIENTOS PARA EL PROGRAMA DE DESCOLMATACIÓN DE LAS CAPTACIONES DE LAS CUENCAS DEL MASHCÓN Y DEL CHONTA DE CAJAMARCA**

#### **1) Formulación de la propuesta para la descolmatación de captaciones**

Las captaciones ubicadas en las cuencas del Mashcón y del Chonta tienen problemas de colmatación aguas arriba del barrage, lo cual repercute en la derivación del agua necesaria para uso agrícola en los meses de estiaje y el cambio de la morfología del río principalmente en la reducción de la profundidad del cauce.

La propuesta de solución se enmarca en los siguientes aspectos:

- Relativas al mantenimiento de la captación
  - Capacitación a las autoridades y personal técnico de las oficinas de las Juntas de Usuarios del Mashcón y del Chonta acerca de la descolmatación inducida de captaciones para riego.
  - Capacitación de los usuarios acerca de la descolmatación de captaciones de agua para riego, mediante talleres. Los temas a tratar serán referidos a la eficiencia de captación y a la recuperación del lecho del río mediante el proceso de descolmatación inducida.
  
- Relativas al proceso de descolmatación
  - Sensibilización de los usuarios para realizar la ruptura parcial de los barrages de las captaciones, en sus dos extremos.

- Sensibilización de las juntas de usuarios para adoptar las captaciones con barrage fijo-fusible.
- Relativas a la educación ambiental
- Talleres con la participación de autoridades y personal especializado de instituciones públicas y privadas, y comisiones de regantes de las cuencas del Mashcón y del Chonta, para elaborar un Plan de Educación Ambiental que contribuya a la conservación y preservación de los ríos de dichas cuencas.
- Capacitación al personal técnico y a los usuarios del agua para riego, acerca de los efectos en la vida acuática debido a la colmatación y descolmatación de captaciones.
- Costos de implementación de la propuesta

Considerando que se trata de una aplicación técnica en obras hidráulicas, debe elaborarse un proyecto de inversión considerando dos componentes: la capacitación del personal técnico de las instituciones involucradas y los beneficiarios directos (regantes), y la apertura del barrage de las diferentes captaciones de las cuencas del Mashcón y del Chonta.

#### **b) Beneficios que aporta la propuesta**

- Beneficio económico

La descolmatación de las captaciones para uso agrícola de las cuencas del Mashcón y del Chonta se realizará en los meses lluviosos para que el desalojo de sedimentos se logre solamente por la acción misma del flujo del río al incrementarse el caudal. Esto es un

trabajo que no requiere el empleo de maquinaria pesada para limpiar los cauces. En esta fase no hay ninguna intervención de los usuarios y ninguna inversión económica.

Al inicio del período de estiaje, el barrage fusible será reconstruido con la intervención de los usuarios, pero solamente utilizando los cantos rodados del río. En esta fase se requiere mano de obra no especializada y dirección técnica de los técnicos de la junta de usuarios.

- Beneficio ecológico

Se reduce el impacto de la modificación de la morfología del cauce, permitiendo que se genere mayor capacidad hidráulica y evitar desbordes cuando se presenten máximas avenidas.

Se genera mayor volumen de agua, aguas arriba del barrage de la captación, lo cual es muy beneficioso para las comunidades acuáticas.

- Beneficio tecnológico

- En el diseño de las captaciones de alta montaña se incluirá el barrage fijo-fusible; es decir el barrage fijo, generalmente de concreto ocupará solamente la parte central del ancho del río donde se ubique la captación y la parte fusible estará constituida por enrocado proveniente del mismo río.

- La cantidad de agua que deriva la captación durante el proceso de descolmatación es mayor que la requerida en los meses lluviosos y en estiaje el bocal queda libre de sedimentos permitiendo el ingreso de agua necesaria.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Apaclla, R. 2014. *Hidráulica Fluvial*. Universidad Agraria La Molina. Lima, Perú. 219 P.
- Bolinaga, J. 1979. *Drenaje Urbano*. Ministerio del Ambiente de los Recursos Naturales Renovables. Instituto Nacional de Obras Sanitarias. Venezuela, Caracas. 470 P.
- Cerna, J. 2005. *Protección de Estructuras de Captación para Canales de Irrigación "Bocatoma del Canal la Collpa"*. Informe de Prácticas Pre-Profesionales. Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.
- Chanson, H. 2002. *Hidráulica del flujo en canales abiertos*. Editorial Mc Graw Hill, Colombia. 560 P.
- Cotrina, J. 2004. *Protección de Estructuras de Captación para Canales de Irrigación "Bocatoma del Canal Cristo Rey"*. Informe de Prácticas Pre-Profesionales. Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.
- French, R. 1988. *Hidráulica de Canales Abiertos*. Editorial Mc Graw Hill, México. 724 P.
- Huamán, F. 2003. *Captación de Agua Superficial, en condiciones de Alta Montaña*. Tesis M.Cs. Cajamarca, Perú. Universidad Nacional de Cajamarca. 118 P.
- Martín, J. 2002. *Ingeniería de Ríos*. Ediciones de la Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. 301 P.
- Martínez, E. 2001. *Hidráulica Fluvial Principios y Práctica*. Ediciones Técnicas y Científicas BELLISCO, Madrid. 382 P.
- Novak, P., Moffat, A. y Nalluri, C. 2001. *Estructuras Hidráulicas*. Editorial Mc Graw Hill, Colombia. 599 P.
- Naudascher, E. 2012. *Hidráulica de Canales*. Editorial Limusa, México. 375 P.
- Ocharán, L. 2005. *Protección de Estructuras de Captación para Canales de Irrigación "Bocatoma del Canal La Victoria-Yanamarca"*. Informe de Prácticas Pre-Profesionales. Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca, Perú.
- Ochoa, T. 2011. *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos*. Ecoe Ediciones, Colombia. 632 P.
- Reyna, L. y Huamán, F. 2007. *Variación del Lecho del Río Grande Aguas Arriba y Aguas Abajo de la Captación del Mismo Nombre y su Efecto Sobre dicha Obra*. Tesis Ingeniero Civil. Cajamarca, Perú. Universidad Nacional de Cajamarca. 111 P.

Rocha, A. 2006. *La Problemática de la Sedimentación de Embalses en el Aprovechamiento de los Ríos Peruanos, Aplicada al Embalse de Poechos*. Primer Congreso Internacional de Hidráulica, Hidrología, Saneamiento y Medio Ambiente. Lima, Perú.

Rocha, A. 1998. *Introducción a la Hidráulica Fluvial*. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. 270 P.

Schröder, W. 1994. *Regularización y Control de Ríos*. Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria. Universidad de Piura. Piura, Perú. 203 P.

UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura).2010. Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe. *Procesos de erosión- sedimentación en cauces y cuencas*. Daniel Brea, Francisco Balocchi. Volumen 1. Documento Técnico N°22.

Vergara, M. 1995. *Técnicas de Modelación en Hidráulica*. Editorial Alfaomega, México.294 P.

## **APÉNDICE**



## **TÉRMINOS BÁSICOS**

**Río de montaña:** Río que corre por valles angostos; el flujo posee pocas profundidades, pendientes longitudinales fuertes, superiores a 0,005 y velocidades considerables durante crecientes, que varían de 1,0 a 2,5 m s<sup>-1</sup>, y en ocasiones hasta 5,0 m s<sup>-1</sup>. Debido a sus velocidades, el flujo arrastra frecuentemente cantos rodados y bloques. El cauce es recto o presenta curvaturas suaves. En estos tramos predomina la socavación profunda del lecho.

**Morfología fluvial:** La morfología de ríos se relaciona con la configuración y geometría del canal y el perfil longitudinal; es dependiente del tiempo y varía en particular con la descarga, la entrada y característica de los sedimentos y el material de la banca. Esta morfología puede ser muy influenciada por las obras de ingeniería.

**Erosión:** La erosión en un cauce es el descenso del fondo (o el retroceso de las orillas) como consecuencia de fenómenos de dinámica fluvial naturales o suscitados por obras del hombre. Cabe distinguir la erosión general de la erosión local. La erosión general del fondo se puede explicar por la acción de un flujo de agua caracterizado simplemente por una velocidad media, y que afecta a tramos largos del cauce; mientras que la erosión local del fondo afecta a una pequeña extensión y se explica por la acción de un flujo más complejo que requiere una descripción bidimensional de las velocidades en una sección en particular.

**Captación:** Estructura hidráulica emplazada en un río con la finalidad de derivar agua hacia un canal. Se compone generalmente de las siguientes partes: Barrage, bocal, poza disipadora de energía, muros de protección, antecanal, aliviadero.

**Barrage fijo-fusible:** Son barreras tipo vertedero de altura relativamente baja construidas en un río para elevar suficientemente el nivel del flujo y desviarlo hacia un canal de suministro. Se componen de una parte central fija (hormigón) y dos partes laterales fusibles (enrocado) que tiene la propiedad de colapsar cuando en el río se presenta una avenida.

**Bocal:** Parte fundamental de una captación de río. Es una ventana rectangular que permite el ingreso de un caudal suficiente hacia un canal de derivación en épocas de estiaje; mientras que en meses lluviosos funciona como orificio de fondo con un caudal superior al requerido.

**Colmatación (azolvamiento, depositación, agradación):** Proceso mediante el cual los sólidos acarreados por la corriente fluvial se depositan dentro de un embalse y originan su pérdida de volumen útil o reducen su eficiencia hidráulica.

**Descolmatación inducida:** Desalojo de sedimentos de un río, por erosión hídrica, tal como los retenidos por una captación, aperturando parcialmente el barrage fijo en sus dos extremos.

**Eficiencia de captación:** Es la relación, en porcentaje, entre el caudal que ingresa por el bocal de una captación (según las condiciones en que se encuentra) y el caudal requerido para satisfacer la demanda.

**Ley de Froude:** Parámetro adimensional que relaciona las fuerzas de gravedad con la fuerzas de inercia. Los modelos basados en la ley de Froude aseveran que la fuerza

primordial que causa el movimiento del fluido es la gravedad y que todas las otras fuerzas, como la fricción del fluido y la tensión superficial, pueden despreciarse.

**Modelo hidráulico:** Representación física que permite simular el comportamiento del flujo tridimensional de un sistema real (prototipo), convirtiéndose en un eficaz instrumento de ayuda en los casos en que la teoría es incompleta. Las escalas utilizadas en modelos hidráulicos dependen principalmente del fenómeno que se quiere observar.

**Rugosidad:** Según el principio de resistencia al flujo la rugosidad de superficie depende del Número de Reynolds, la altura de rugosidad de la pared, el radio hidráulico, la forma de la sección transversal del conducto y la estructura de la rugosidad uniformemente distribuida sobre la superficie de un contorno plano. En cambio, si la superficie del contorno contiene ondulaciones, estrías o dunas, o está cubierta de cuerpos perturbadores individuales como piedras o vegetación (rugosidad de forma), se incrementa de manera notable la resistencia al flujo.

Tabla 16. Formato del aforo del río Grande

AFORO DEL RÍO GRANDE DE LA CUENCA DEL MASHCÓN

AFORO DEL DÍA 26 DE ENERO DE 2015, A LAS 10:00 A.M., DÍA NUBLADO, NO LLOVIÓ

SECCIÓN DEL RÍO: A 200 m AGUAS ARRIBA DE LA CAPTACIÓN TRES MOLINOS

EQUIPO: VELOCÍMETRO, WINCHA GRADUADA, CORDEL, ROPA IMPERMEABLE,

CALCULADORA DE BOLSILLO

MÉTODO POR VADEO UTILIZANDO LA ECUACIÓN  $Q = \sum V_i A_i$

ANCHO DE ESPEJO: 6.50 m

<b>FRANJA</b>	<b>y</b>	<b>0.6 y</b>	<b>V0.6</b>	<b>Area</b>	<b>Caudal parcial</b>
N°	(m)	(m)	(m s <sup>-1</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
1	0,71	0,426	0,3	0,355	0,1065
2	0,77	0,462	0,5	0,385	0,1925
3	0,75	0,450	1,1	0,375	0,4125
4	0,78	0,468	1,4	0,390	0,546
5	0,79	0,474	1,3	0,395	0,5135
6	0,75	0,450	1,6	0,375	0,6
7	0,73	0,438	1,5	0,365	0,5475
8	0,75	0,450	1,3	0,375	0,4875
9	0,73	0,430	1,1	0,365	0,4015
10	0,72	0,432	1,1	0,360	0,396
11	0,74	0,444	1,0	0,370	0,37
12	0,85	0,510	0,8	0,425	0,34
13	0,38	0,228	0,8	0,266	0,2128
Caudal total=					5,13

Tabla 17. Profundidades desde las platinas transversales hasta el fondo del río sin sedimentos a escala 1/25

Pto	Eje N°1	Pto	Eje N°2	Pto	Eje N°3	Pto	Eje N°4
1	0,217 m	1	0,218 m	1	0,215 m	1	0,208 m
2	0,215 m	2	0,216 m	2	0,212 m	2	0,205 m
3	0,214 m	3	0,215 m	3	0,207 m	3	0,197 m
4	0,211 m	4	0,210 m	4	0,202 m	4	0,194 m
5	0,208 m	5	0,205 m	5	0,199 m	5	0,194 m

Pto	Eje N°5	Pto	Eje N°6	Pto	Eje N°7	Pto	Eje N°8
1	0,200 m	1	0,201 m	1	0,191 m	1	0,183 m
2	0,194 m	2	0,196 m	2	0,190 m	2	0,180 m
3	0,191 m	3	0,192 m	3	0,190 m	3	0,179 m
4	0,188 m	4	0,188 m	4	0,188 m	4	0,183 m
5	0,187 m	5	0,184 m	5	0,185 m	5	0,184 m

Pto	Eje N°9	Pto	Eje N°10	Pto	Eje N°11	Pto	Eje N°12
1	0,179 m	1	0,178 m	1	0,173 m	1	0,170 m
2	0,179 m	2	0,177 m	2	0,170 m	2	0,168 m
3	0,178 m	3	0,176 m	3	0,172 m	3	0,167 m
4	0,179 m	4	0,180 m	4	0,172 m	4	0,169 m
5	0,181 m	5	0,180 m	5	0,178 m	5	0,172 m

Pto	Eje N°13	Pto	Eje N°14	Pto	Eje N°15	Pto	Eje N°16
1	0,169 m	1	0,165 m	1	0,159 m	1	0,154 m
2	0,170 m	2	0,171 m	2	0,162 m	2	0,151 m
3	0,172 m	3	0,172 m	3	0,162 m	3	0,152 m
4	0,172 m	4	0,169 m	4	0,161 m	4	0,152 m
5	0,170 m	5	0,166 m	5	0,163 m	5	0,156 m

Pto	Eje N°17	Pto	Eje N°18
1	0,149 m	1	0,143 m
2	0,144 m	2	0,140 m
3	0,146 m	3	0,143 m
4	0,146 m	4	0,144 m
5	0,151 m	5	0,149 m

Tabla 18. Profundidad de sedimentos en el río Grande a escala 1/25 en los ejes transversales antes de la descolmatación

Pto	Eje N°1	Pto	Eje N°2	Pto	Eje N°3	Pto	Eje N°4
1	0,102 m	1	0,099 m	1	0,101 m	1	0,085 m
2	0,102 m	2	0,099 m	2	0,091 m	2	0,085 m
3	0,102 m	3	0,096 m	3	0,084 m	3	0,076 m
4	0,096 m	4	0,090 m	4	0,084 m	4	0,070 m
5	0,092 m	5	0,084 m	5	0,077 m	5	0,073 m

Pto	Eje N°5	Pto	Eje N°6	Pto	Eje N°7	Pto	Eje N°8
1	0,081 m	1	0,077 m	1	0,067 m	1	0,061 m
2	0,074 m	2	0,072 m	2	0,066 m	2	0,056 m
3	0,069 m	3	0,069 m	3	0,068 m	3	0,057 m
4	0,068 m	4	0,068 m	4	0,066 m	4	0,060 m
5	0,068 m	5	0,066 m	5	0,063 m	5	0,063 m

Pto	Eje N°9	Pto	Eje N°10	Pto	Eje N°11	Pto	Eje N°12
1	0,058 m	1	0,056 m	1	0,054 m	1	0,053 m
2	0,059 m	2	0,056 m	2	0,049 m	2	0,049 m
3	0,060 m	3	0,056 m	3	0,055 m	3	0,053 m
4	0,063 m	4	0,060 m	4	0,058 m	4	0,054 m
5	0,067 m	5	0,064 m	5	0,061 m	5	0,056 m

Pto	Eje N°13	Pto	Eje N°14	Pto	Eje N°15	Pto	Eje N°16
1	0,052 m	1	0,057 m	1	0,050 m	1	0,044 m
2	0,056 m	2	0,063 m	2	0,054 m	2	0,043 m
3	0,062 m	3	0,065 m	3	0,056 m	3	0,043 m
4	0,064 m	4	0,067 m	4	0,060 m	4	0,051 m
5	0,064 m	5	0,066 m	5	0,063 m	5	0,057 m

Pto	Eje N°17	Pto	Eje N°18
1	0,034 m	1	0,029 m
2	0,031 m	2	0,026 m
3	0,036 m	3	0,034 m
4	0,039 m	4	0,030 m
5	0,047 m	5	0,038 m

Tabla 19. Profundidades desde las platinas transversales hasta el fondo del cauce después de 5 horas con 20 minutos de iniciada la descolmatación para un caudal de  $0,39 \text{ L s}^{-1}$

Pto	Eje N°1	Pto	Eje N°2	Pto	Eje N°3	Pto	Eje N°4
1	0,200 m	1	0,181 m	1	0,177 m	1	0,176 m
2	0,169 m	2	0,167 m	2	0,164 m	2	0,165 m
3	0,175 m	3	0,159 m	3	0,149 m	3	0,142 m
4	0,184 m	4	0,164 m	4	0,145 m	4	0,126 m
5	0,196 m	5	0,167 m	5	0,148 m	5	0,135 m

Pto	Eje N°5	Pto	Eje N°6	Pto	Eje N°7	Pto	Eje N°8
1	0,175 m	1	0,176 m	1	0,172 m	1	0,162 m
2	0,166 m	2	0,161 m	2	0,162 m	2	0,160 m
3	0,136 m	3	0,128 m	3	0,123 m	3	0,119 m
4	0,128 m	4	0,119 m	4	0,119 m	4	0,116 m
5	0,128 m	5	0,116 m	5	0,117 m	5	0,116 m

Pto	Eje N°9	Pto	Eje N°10	Pto	Eje N°11	Pto	Eje N°12
1	0,153 m	1	0,144 m	1	0,139 m	1	0,130 m
2	0,151 m	2	0,141 m	2	0,136 m	2	0,128 m
3	0,116 m	3	0,112 m	3	0,111 m	3	0,110 m
4	0,117 m	4	0,118 m	4	0,110 m	4	0,108 m
5	0,113 m	5	0,116 m	5	0,113 m	5	0,108 m

Pto	Eje N°13	Pto	Eje N°14	Pto	Eje N°15	Pto	Eje N°16
1	0,130 m	1	0,136 m	1	0,143 m	1	0,140 m
2	0,135 m	2	0,126 m	2	0,123 m	2	0,119 m
3	0,121 m	3	0,120 m	3	0,123 m	3	0,117 m
4	0,106 m	4	0,106 m	4	0,103 m	4	0,124 m
5	0,105 m	5	0,102 m	5	0,098 m	5	0,097 m

Pto	Eje N°17	Pto	Eje N°18
1	0,130 m	1	0,124 m
2	0,116 m	2	0,114 m
3	0,115 m	3	0,113 m
4	0,112 m	4	0,110 m
5	0,115 m	5	0,120 m

Tabla 20. Profundidades desde las platinas transversales hasta el fondo del cauce después de 48 horas de iniciada la descolmatación para un caudal de  $0,30 \text{ L s}^{-1}$

Nº	Eje 1	Nº	Eje 2	Nº	Eje 3	Nº	Eje 4
1	0.201 m	1	0.182 m	1	0.173 m	1	0.172 m
2	0.187 m	2	0.183 m	2	0.169 m	2	0.164 m
3	0.181 m	3	0.173 m	3	0.170 m	3	0.175 m
4	0.189 m	4	0.183 m	4	0.183 m	4	0.184 m
5	0.193 m	5	0.196 m	5	0.195 m	5	0.190 m

Nº	Eje 5	Nº	Eje 6	Nº	Eje 7	Nº	Eje 8
1	0.165 m	1	0.163 m	1	0.167 m	1	0.176 m
2	0.165 m	2	0.181 m	2	0.175 m	2	0.167 m
3	0.125 m	3	0.188 m	3	0.173 m	3	0.167 m
4	0.184 m	4	0.183 m	4	0.177 m	4	0.116 m
5	0.173 m	5	0.172 m	5	0.117 m	5	0.116 m

Nº	Eje 9	Nº	Eje 10	Nº	Eje 11	Nº	Eje 12
1	0.166 m	1	0.167 m	1	0.155 m	1	0.139 m
2	0.137 m	2	0.148 m	2	0.167 m	2	0.163 m
3	0.115 m	3	0.112 m	3	0.110 m	3	0.143 m
4	0.116 m	4	0.118 m	4	0.119 m	4	0.108 m
5	0.114 m	5	0.115 m	5	0.115 m	5	0.109 m

Nº	Eje 13	Nº	Eje 14	Nº	Eje 15	Nº	Eje 16
1	0.136 m	1	0.142 m	1	0.145 m	1	0.140 m
2	0.145 m	2	0.150 m	2	0.150 m	2	0.143 m
3	0.147 m	3	0.136 m	3	0.132 m	3	0.129 m
4	0.140 m	4	0.135 m	4	0.100 m	4	0.124 m
5	0.106 m	5	0.102 m	5	0.100 m	5	0.126 m

Nº	Eje 17	Nº	Eje 18
1	0.144 m	1	0.140 m
2	0.138 m	2	0.137 m
3	0.141 m	3	0.139 m
4	0.126 m	4	0.127 m
5	0.130 m	5	0.126 m



Tabla 21. Profundidades desde las platinas transversales hasta el fondo del cauce después de un mes escala (enero 2015) de iniciada la descolmatación

Nº	Eje 1	Nº	Eje 2	Nº	Eje 3	Nº	Eje 4
1	0.214 m	1	0.192 m	1	0.190 m	1	0.186 m
2	0.176 m	2	0.179 m	2	0.174 m	2	0.177 m
3	0.181 m	3	0.167 m	3	0.169 m	3	0.163 m
4	0.185 m	4	0.180 m	4	0.173 m	4	0.168 m
5	0.191 m	5	0.185 m	5	0.180 m	5	0.173 m

Nº	Eje 5	Nº	Eje 6	Nº	Eje 7	Nº	Eje 8
1	0.182 m	1	0.183 m	1	0.187 m	1	0.178 m
2	0.174 m	2	0.178 m	2	0.177 m	2	0.176 m
3	0.163 m	3	0.159 m	3	0.157 m	3	0.163 m
4	0.165 m	4	0.160 m	4	0.155 m	4	0.136 m
5	0.175 m	5	0.162 m	5	0.125 m	5	0.114 m

Nº	Eje 9	Nº	Eje 10	Nº	Eje 11	Nº	Eje 12
1	0.174 m	1	0.173 m	1	0.170 m	1	0.167 m
2	0.171 m	2	0.172 m	2	0.176 m	2	0.163 m
3	0.133 m	3	0.120 m	3	0.130 m	3	0.145 m
4	0.115 m	4	0.116 m	4	0.118 m	4	0.106 m
5	0.112 m	5	0.115 m	5	0.114 m	5	0.108 m

Nº	Eje 13	Nº	Eje 14	Nº	Eje 15	Nº	Eje 16
1	0.165 m	1	0.161 m	1	0.155 m	1	0.150 m
2	0.166 m	2	0.160 m	2	0.158 m	2	0.146 m
3	0.151 m	3	0.153 m	3	0.157 m	3	0.148 m
4	0.136 m	4	0.162 m	4	0.158 m	4	0.149 m
5	0.104 m	5	0.154 m	5	0.153 m	5	0.153 m

Nº	Eje 17	Nº	Eje 18
1	0.145 m	1	0.140 m
2	0.140 m	2	0.136 m
3	0.141 m	3	0.140 m
4	0.143 m	4	0.141 m
5	0.148 m	5	0.145 m

Tabla 22. Profundidades desde las platinas hasta el fondo del cauce después de haber transcurrido enero, febrero y marzo de 2015 (tiempo escala:273,6 horas)

Nº	Eje 1	Nº	Eje 2	Nº	Eje 3	Nº	Eje 4
1	0.214 m	1	0.190 m	1	0.188 m	1	0.190 m
2	0.177 m	2	0.176 m	2	0.175 m	2	0.181 m
3	0.179 m	3	0.177 m	3	0.170 m	3	0.165 m
4	0.182 m	4	0.177 m	4	0.174 m	4	0.170 m
5	0.194 m	5	0.186 m	5	0.189 m	5	0.173 m

Nº	Eje 5	Nº	Eje 6	Nº	Eje 7	Nº	Eje 8
1	0.190 m	1	0.193 m	1	0.188 m	1	0.178 m
2	0.179 m	2	0.184 m	2	0.187 m	2	0.176 m
3	0.162 m	3	0.163 m	3	0.176 m	3	0.177 m
4	0.164 m	4	0.160 m	4	0.156 m	4	0.125 m
5	0.172 m	5	0.162 m	5	0.126 m	5	0.115 m

Nº	Eje 9	Nº	Eje 10	Nº	Eje 11	Nº	Eje 12
1	0.175 m	1	0.174 m	1	0.169 m	1	0.166 m
2	0.171 m	2	0.173 m	2	0.167 m	2	0.163 m
3	0.148 m	3	0.118 m	3	0.131 m	3	0.145 m
4	0.115 m	4	0.117 m	4	0.118 m	4	0.108 m
5	0.113 m	5	0.115 m	5	0.114 m	5	0.108 m

Nº	Eje 13	Nº	Eje 14	Nº	Eje 15	Nº	Eje 16
1	0.165 m	1	0.167 m	1	0.156 m	1	0.150 m
2	0.167 m	2	0.167 m	2	0.159 m	2	0.147 m
3	0.148 m	3	0.166 m	3	0.159 m	3	0.148 m
4	0.156 m	4	0.166 m	4	0.158 m	4	0.149 m
5	0.166 m	5	0.167 m	5	0.159 m	5	0.153 m

Nº	Eje 17	Nº	Eje 18
1	0.146 m	1	0.139 m
2	0.141 m	2	0.138 m
3	0.142 m	3	0.139 m
4	0.142 m	4	0.139 m
5	0.147 m	5	0.144 m



Figura 18. Modelo físico a escala 1/25 con sistema de recirculación.

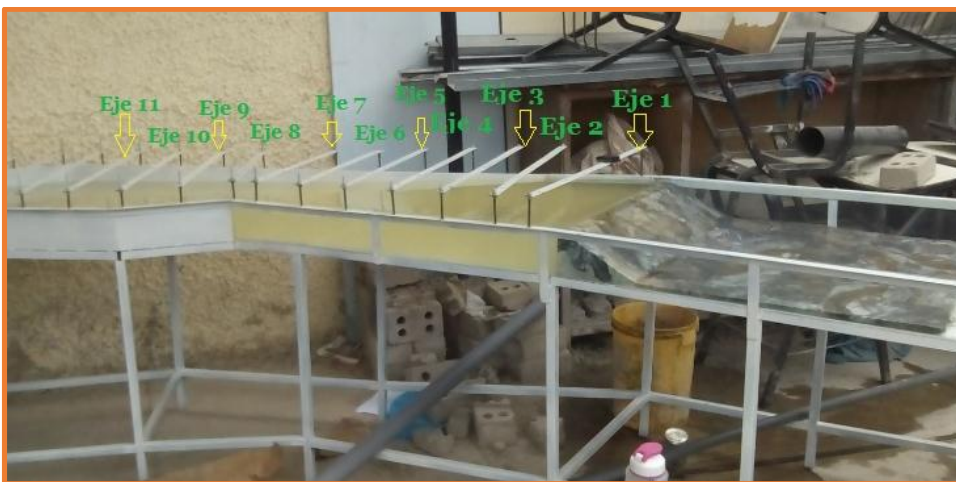


Figura 19. Ubicación de ejes transversales (platinas de acero) a nivel.

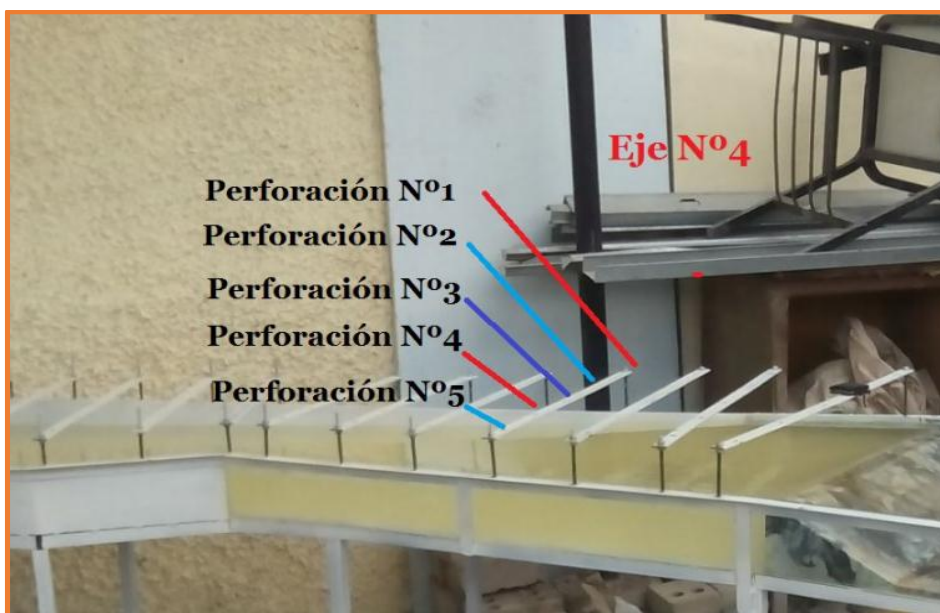


Figura 20. Número de puntos (05 orificios) en cada eje para medir profundidades.

En este caso se indican los puntos del eje N°4 de un total de 18 ejes.



Figura 21. Captación Tres Molinos colmatada en el río Grande, con el barrage sin aperturar, a escala 1/25.



Figura 22. Morfología del río Grande al inicio de la descolmatación inducida en enero de 2015, después de aperturar los extremos del barrage, con un caudal escala de  $0,39 \text{ L s}^{-1}$  en el río, equivalente a  $1,23 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  en el prototipo, con 26 horas de duración en el mes de enero de 2105.





Figura 23. Morfología del río Grande vista desde el barrage hacia aguas arriba en enero de 2015, durante la descolmatación. Nótese que la erosión se intensificó en la margen izquierda del río.



Figura 24. Morfología del río Grande en la zona de la curva, durante la descolmatación en el mes de enero de 2015.

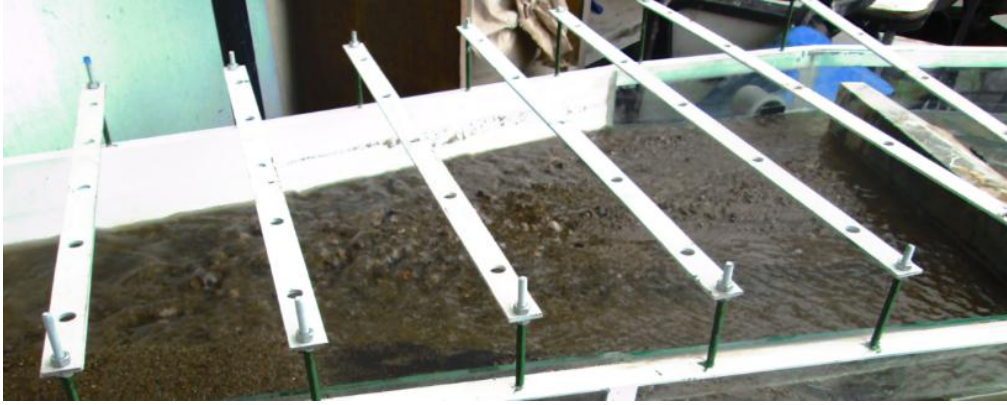


Figura 25. Efecto de la descolmatación en la limpieza del bocal después de 48 horas de duración del caudal de  $0,39 \text{ L s}^{-1}$  en el modelo. En el prototipo equivale a 240 horas (10 días) de duración con un caudal de  $1,23 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  en el río Grande, para el mes de enero de 2015.



Figura 26. Medida del caudal en el bocal, con el método volumétrico, durante la descolmatación.

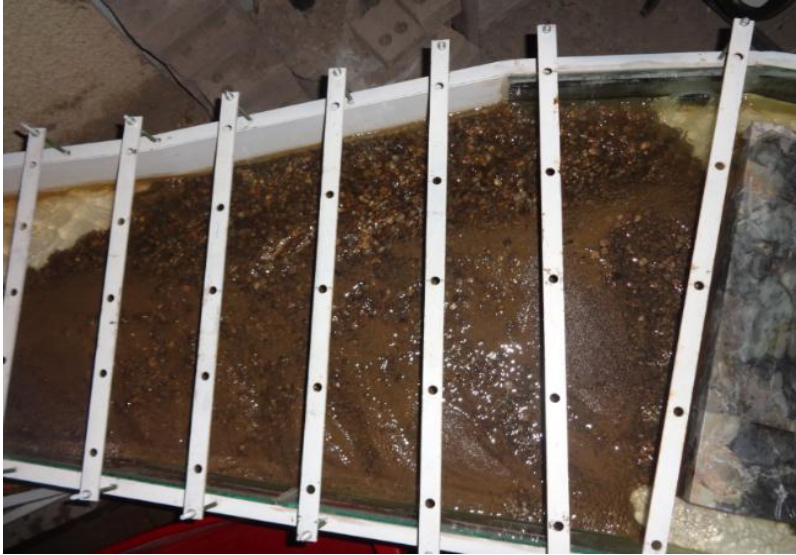


Figura 27. Morfología del río Grande cerca del barrage y limpieza del bocal por efecto de la descolmatación, al terminar el mes de enero de 2105 con un caudal escala de  $1,80 \text{ L s}^{-1}$  en el río, equivalente a  $5,63 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  en el prototipo.



Figura 28. Funcionamiento del bocal en el mes de marzo con un caudal escala en el río de  $1,09 \text{ L s}^{-1}$  y en el bocal  $0,34 \text{ L s}^{-1}$  que en el prototipo equivalen a  $3,41 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  y  $1062,5 \text{ L s}^{-1}$ , respectivamente.





Figura 29. Morfología del río Grande desde el barrage hasta donde se extienden los muros de protección, debido a la descolmatación desde enero hasta marzo de 2015 (duración escala: 273,6 horas).



Figura 30. Bocal libre de sedimentos después de la descolmatación desde enero hasta marzo de 2015.