

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS**



**“MODELAMIENTO NUMÉRICO DE FLUJOS  
TRANSITORIOS 2D CON FACTOR DE FRICCIÓN  
VARIABLE EN EL ESPACIO Y TIEMPO”**

**Presentada por:  
NILSON GARCÍA RAMOS**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO  
MAGÍSTER SCIENTIAE EN RECURSOS HÍDRICOS**

**Lima – Perú**

**2021**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS**

**“MODELAMIENTO NUMÉRICO DE FLUJOS  
TRANSITORIOS 2D CON FACTOR DE FRICCIÓN  
VARIABLE EN EL ESPACIO Y TIEMPO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO  
MAGÍSTER SCIENTAE EN RECURSOS HÍDRICOS**

**Presentada por:**

**NILSON GARCÍA RAMOS**

**Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:**

Dr. Abel Mejía Marcauczco

**PRESIDENTE**

Dr. Samuel Quisca Astocahuana

**ASESOR**

Ph.D. Eduardo Chávarri Velarde

**MIEMBRO**

Mg.Sc. Miguel Sánchez Delgado

**MIEMBRO**

## **DEDICATORIA**

*A mi familia, especialmente a mi padre por su paciencia y apoyo incondicional que me ha brindado hasta el día de hoy.*

*A mis amigos y compañeros, quienes sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, alegrías y tristezas; y a todas aquellas personas que durante todo este tiempo estuvieron a mi lado apoyándome.*

*Gracias a todos*

## **AGRADECIMIENTOS**

En muestra de mi gratitud quiero expresar mis más sinceros agradecimientos:

Al Programa de Maestría en Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Agraria La Molina por el apoyo recibido para la realización de la presente investigación.

Al Proyecto descolmatación y encauzamiento del cauce del Río Chillón, Sector Huatocay por su colaboración con toda la información proporcionada la cual hizo posible la presente investigación.

Al Mg.Sc. Miguel Sánchez Delgado, Ing. Yelko Huacoto Pallarozo e Ing. Jose Carlos Díaz por el apoyo para la realización de la presente investigación.

A la empresa SQ & Ingenieros Consultores Constructores S.R.L. por el apoyo con el uso irrestricto del equipo de topografía en la etapa final del trabajo de campo.

A mi patrocinador, el Dr. Samuel Quisca Astocahuana a quien dejo mi admiración y respeto por el apoyo constante, motivación y amistad brindados a lo largo del desarrollo de la presente investigación.

# ÍNDICE GENERAL

<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. DIFICULTAD DE LA MODELACIÓN DEL FACTOR DE FRICCIÓN EN EL ESPACIO Y TIEMPO.	2
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b>	<b>4</b>
2.1. REVISIÓN DEL ESTADO DEL CONOCIMIENTO DEL FACTOR DE FRICCIÓN	4
2.1.1. Factor de fricción variable en el espacio	4
2.1.2. Factor de fricción variable en el tiempo	5
2.2. LA CUENCA DEL RÍO CHILLÓN	8
2.2.1. Descripción de la geomorfología de la cuenca	8
2.2.2. Climatología	10
2.2.3. Hidrografía	11
2.2.4. Hidrometría	13
2.3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO BIDIMENSIONAL	14
2.4. RESISTENCIA AL FLUJO EN RÍOS ALUVIALES CON LECHOS DE SEDIMENTOS GRUESOS	15
2.4.1. Ecuaciones de resistencia al flujo para baja rugosidades	18
2.4.2. Ecuaciones de resistencia al flujo para grandes rugosidades	19
2.5. SOCAVACIÓN GENERAL	19
2.5.1. Determinación de las características granulométricas de los suelos granulares	19
2.5.2. Esquema hidráulico del flujo	22
2.5.3. Socavación general en cauces definidos	23
2.5.4. Acorazamiento en el cálculo de socavación	30
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>32</b>
3.1. ÁREA DE ESTUDIO	32
3.2. MATERIALES	33
3.3. METODOLOGÍA	33
<b>IV. RESULTADOS</b>	<b>39</b>

<b>4.1. PROGRAMA PARA EL MODELAMIENTO NUMÉRICO DE FLUJOS TRANSITORIOS 2D CON FACTOR DE FRICCIÓN VARIABLE EN EL ESPACIO Y TIEMPO.</b>	<b>39</b>
<b>4.2. MODELAMIENTO NUMÉRICO DE FLUJOS TRANSITORIOS 2D CON FACTOR DE FRICCIÓN VARIABLE EN EL ESPACIO Y TIEMPO EN EL SECTOR HUATOCAY DEL RÍO CHILLÓN.</b>	<b>41</b>
<b>4.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD</b>	<b>42</b>
<b>4.4. VALIDACIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>43</b>
<b>4.5. RESULTADOS</b>	<b>47</b>
<b>V. DISCUSIÓN</b>	<b>68</b>
<b>VI. CONCLUSIONES</b>	<b>71</b>
<b>VII. RECOMENDACIONES</b>	<b>73</b>
<b>VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>74</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Características geomorfológicas de las 22 subcuencas del río Chillón.....	9
Cuadro 2: Criterios de sumersión para clasificar el proceso primario de resistencia al flujo..	17
Cuadro 3: Valores de $D_{84}$ , $D_{95}$ y $D_m$ en las muestras de calicata .....	21
Cuadro 4: Valores $x$ para suelos cohesivos y no cohesivos.....	25
Cuadro 5: Valores del coeficiente de frecuencia $\beta$ .....	26
Cuadro 6: Criterio para aplicar el factor de corrección en el cálculo de socavación. ....	30
Cuadro 7: Criterio para el acorazamiento en el cálculo de socavación. ....	31
Cuadro 8: Comparación de los parámetros obtenidos en el aforo del día 7/2/2019 en la sección de control Nro. 1 y la modelación $t_{(Días)}=69$ .....	44
Cuadro 9: Comparación de los parámetros obtenidos en el aforo del día 12/3/2019 en la sección de control Nro. 2 y la modelación $t_{(Días)}=102$ .....	44
Cuadro 10: Comportamiento transitorio de la variación morfológica.....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Formación de fosas donde la sección es más profundas y el agua fluye lentamente (Río Chillón) .....	1
Figura 2: Formación de rápidas donde la sección es poco profunda y el agua rompe sobre el lecho de grava (Río Chillón).....	2
Figura 3: Perfil Estructural Macro - Geomorfológico de la cuenca del Río Chillón .....	10
Figura 4: Mapa de cuenca y subcuenca del Río Chillón .....	12
Figura 5: Hidrograma de caudales del río Chillón Estación Puente Magdalena .....	13
Figura 6: Variación de la función resistencia en función de la sumersión relativa.....	17
Figura 7: Condiciones de rugosidad del lecho en canales de grava .....	18
Figura 8: División del hidrograma en pasos de tiempo, intervalos de tiempo y periodos de retorno.....	23
Figura 9: Socavación general en cauces definidos.....	27
Figura 10: Variación de la socavación en la rama ascendente del hidrograma. ....	29
Figura 11: Aumento del valor del factor de corrección ante la disminución del tirante del flujo. ....	29
Figura 12: Área de estudio sector Huatocay del río Chillón.....	32
Figura 13: Levantamiento topográfico del área de trabajo, estado inicial $t_{(Días)}=0$ .....	34
Figura 14: Sección trapezoidal del cauce del río Chillón, estado inicial $t_{(Días)}=0$ .....	35
Figura 15: Diagrama de flujo de la metodología propuesta.....	36
Figura 16: Diagrama de flujo general de la metodología propuesta y del programa elaborado .....	38
Figura 17: Ventana del programa principal .....	39
Figura 18: Ventana del subprograma Gis .....	40
Figura 19: Ventana del subprograma Transitorio .....	40
Figura 20: imagen satelital de la cobertura vegetal en el sector Huatocay del río Chillón .....	42
Figura 21: Sensibilidad del tirante de agua por la variación del factor de fricción.....	43
Figura 22: Comparación de los perfiles de velocidad en la sección de control Nro. 1. ....	44
Figura 23: Campo de velocidades obtenidos en la sección de control Nro. 1 con el ADCP el día 7/2/2019, $t_{(Días)}=69$ . ....	45
Figura 24: Comparación de los perfiles de velocidad en la sección de control Nro. 2. ....	45



Figura 25: Campo de velocidades obtenidos en la sección de control Nro. 2 con el ADCP el día 12/3/2019, $t_{(Días)}=102$ .	45
Figura 26: Comparación del nivel topográfico en la sección de control Nro. 1.	46
Figura 27: Comparación del nivel topográfico para en la sección de control Nro. 2.	47
Figura 28: Variabilidad morfológica del río Chillón. (a) Resultados de la formación de la mesoforma MS-1 del modelo numérico, (b) Formación de la mesoforma MS-1 entre las progresivas km 0+380 y km 0+420.	48
Figura 29: Variación temporal de la mesoforma MS-1 entre las progresivas km 0+380 y km 0+420.	49
Figura 30: Variación temporal del factor de fricción del río entre las progresivas km 0+380 y km 0+420. (a) Ubicación de los puntos de análisis en la sección km 0+399 (b) Variación temporal del factor de fricción en los puntos de análisis, ubicados en la sección km 0+399 de la mesoforma MS-1.	49
Figura 31: Campo de velocidad alrededor de la mesoforma MS-1 para $t_{(Días)}=120$ .	50
Figura 32: Variabilidad morfológica del río Chillón. (a) Resultados de la formación de la mesoforma MS-2 del modelo numérico, (b) Formación de la mesoforma MS-2 entre las progresivas km 0+620 y km 0+740.	51
Figura 33: Variación temporal de la de la mesoforma MS-2 entre las progresivas km 0+620 y km 0+740	52
Figura 34: Variación temporal del factor de fricción del río entre las progresivas km 0+620 y km 0+740. (a) Ubicación de los puntos de análisis en la sección km 0+696 (b) Variación temporal del factor de fricción en los puntos de análisis, ubicados en la sección km 0+696 de la mesoforma MS-2.	53
Figura 35: Campo de velocidad alrededor de la mesoforma MS-2 para $t_{(Días)}=121$ .	54
Figura 36: Variabilidad geomorfológica del río Chillón. (a) Resultados de la formación de mesoformas del modelo numérico, (b) Formación de la mesoforma BL-1 entre las progresivas km 0+740 y km 0+800.	55
Figura 37: Variación temporal de la mesoforma BL-1 entre las progresivas km 0+740 y km 0+800.	56
Figura 38: Variación temporal del factor de fricción del río entre las progresivas km 0+740 y km 0+800. (a) Ubicación de los puntos de análisis en la sección km 0+782 (b) Variación temporal del factor de fricción en los puntos de análisis, ubicados en la sección km 0+782 de la mesoforma.	57
Figura 39: Campo de velocidad alrededor de la mesoforma BL-1 para $t_{(Días)}=121$ .	57

Figura 40: Variabilidad temporal del factor de fricción y el tirante del flujo para el rango de tiempo (Días) 9 – 62. ....	59
Figura 41: Variabilidad temporal del factor de fricción y el tirante del flujo para el rango de tiempo (Días) 67 – 84. ....	60
Figura 42: Variabilidad temporal del factor de fricción y el tirante del flujo para el rango de tiempo (Días) 88 – 124. ....	61
Figura 43: Variabilidad temporal del factor de fricción y la socavación para el rango de tiempo (Día) 9 – 62. ....	62
Figura 44: Variabilidad temporal del factor de fricción y la socavación para el rango de tiempo (Día) 67 – 84. ....	63
Figura 45: Variabilidad temporal del factor de fricción y la socavación para el rango de tiempo (Días) 88 – 124. ....	64
Figura 46: Secciones de análisis del valor del tirante del flujo en el punto P. ....	65
Figura 47: Análisis temporal del valor del tirante del flujo, en el punto P para distintas secciones. ....	66
Figura 48: Resultados de la serie ajustadas a la distribución Gumbel. ....	127

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1:</b> Galería de fotos de los trabajos de descolmatación y encauzamiento .....	78
<b>Anexo 2:</b> Galería de fotos y vista aérea de la topografía antes y después del tránsito de la avenida.....	79
<b>Anexo 3:</b> Galería de fotos de la cobertura vegetal antes y después del tránsito de la avenida	84
<b>Anexo 4:</b> Campaña de extracción de muestras y elaboración de curva granulométrica .....	86
<b>Anexo 5:</b> Resultados y mediciones con el perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP) “RiverSurveyor S5” .....	122
<b>Anexo 6:</b> Análisis estadístico de datos hidrológicos.....	126
<b>Anexo 7:</b> Lista de mapas. ....	138

## RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo principal desarrollar un modelamiento numérico de flujos transitorios 2D en cauces naturales, considerando coeficientes de fricción variable en el espacio y tiempo. En la primera etapa de la investigación se realizó los trabajos de muestreo para el análisis granulométrico global y trabajos de levantamiento topográfico, en la segunda etapa se realiza mediciones de caudal y velocidad con un ADCP que son comparadas con la serie de caudales de la estación Puente Magdalena. En la siguiente etapa se desarrolla un algoritmo para implementar la metodología, modelos para estimar el factor de fricción y el cálculo de la socavación general. Finalmente se realiza mediciones de campo de la profundidad de la socavación producida por la avenida entre el periodo de agosto del 2018 y mayo del 2019, se analizan dos secciones de control utilizadas para la validación. Aplicando la metodología, los resultados de la socavación del modelo numérico se aproxima a las mediciones realizadas en distintos periodos de tiempo. Además permite estudiar la variabilidad morfológica, como barras centrales en el espacio y tiempo del cauce del río Chillón. Se realiza un análisis temporal del factor de fricción, tirante del flujo y socavación para ríos aluviales con lechos de sedimentos gruesos, determinando rangos para estudiar la variabilidad morfológica en el espacio y tiempo del cauce.

**Palabras claves:** ADCP, Flujos transitorios, Factor de fricción, Socavación general.

## **ABSTRACT**

The main objective of the present investigation is the development of a numerical modeling of 2D unsteady flows with variable friction factor in space and time. In the first stage of the investigation, the sampling works for the global granulometric analysis and topographic survey work were carried out, in the second stage flow and velocity measurements are made with an ADCP that are compared with the series of flows of the Magdalena Bridge station. In the next stage an algorithm is developed to implement the methodology, models to estimate the friction factor and the calculation of the general scour depth. Finally, field measurements are made of the general scour depth produced by the routing of a flow hydrograph between the period of December 2018 and June 2019, Two control sections used for validation are analyzed. Applying the methodology, the results of the scour depth of the numerical model approximates the measurements made in different periods of time. It also allows to study the morphological variability, as central bars in the space and time of the Chillón river bed. A temporary analysis of the friction factor, depth and scour depth for gravel bed rivers, determining ranges to study the morphological variability in the space and time of the Chillón river bed.

## I. INTRODUCCIÓN

Las principales fuerzas físicas que controlan el flujo en un río son la inercia, la presión, la gravedad y la morfología del río. Estos están directamente influenciados por la morfología y la rugosidad del cauce del río. La correlación existente entre coeficiente de resistencia y pendiente se atribuye a diferentes causas: el transporte de sedimento, el tamaño del sedimento (partícula sólida del material de lecho) y la sumersión relativa de la partícula (Alonso 2005). La presente investigación, toma como base los estudios realizados sobre los límites de sumersión relativa definidas por Bathurst *et al.* (1981). Dichos límites de sumersión relativa, distinguen 3 zonas: zona de rugosidad de alta, media y baja. La literatura sugiere diferentes formas de estimar el factor de fricción, pero los ríos de lecho de grava tienen un coeficiente de rugosidad mucho mayor a los lechos de arena y una configuración del lecho que sufre transformaciones de una manera secuencial formando fosas y rápidas. La Figura 1 muestra la formación de fosas y la Figura 2 muestra la formación de rápidas.



Figura 1: Formación de fosas donde la sección es más profundas y el agua fluye lentamente (Río Chillón)



Figura 2: Formación de rápidas donde la sección es poco profunda y el agua rompe sobre el lecho de grava (Río Chillón)

La propuesta metodológica de modelamiento numérico de flujos transitorios 2D con factor de fricción variable en el espacio y tiempo, permite dejar de lado los métodos donde se considera el factor de fricción constante y efectuar un análisis más consistente y confiable en su estimación.

### **1.1. DIFICULTAD DE LA MODELACIÓN DEL FACTOR DE FRICCIÓN EN EL ESPACIO Y TIEMPO.**

Hasta el momento no se ha encontrado una expresión numérica de cálculo válida para todas las formas de flujo posibles en todos los tipos de canales debido fundamentalmente, a la dificultad de definir de manera universal los valores de la resistencia que el cauce ofrece a la corriente (Rubio 2017).

Para el lecho compuesto por material grueso relativamente inmóvil, la geometría puede determinarse fácilmente, mientras que la estimación del factor de fricción es difícil, debido a que es un parámetro que refleja principalmente la resistencia al flujo.

Existe pocos estudios que han establecido una fórmula para estimar el factor de fricción transitorio en canales. Algunos de ellos como Graf y Song (1995) analiza el esfuerzo de corte no uniforme en el fondo en flujo estacionario en canales abiertos, concluyendo que la velocidad de fricción, aumenta en la dirección  $x$  al acelerar el flujo, pero disminuye

cuando este desacelera. Además, el flujo transitorio alcanza su máximo valor en la rama ascendente del hidrograma y posteriormente disminuye. Pathirana & Ranasinghe (2006) buscan mejorar la simulación hidráulica transitoria de la fricción en canales con factor de fricción transitoria, de igual modo Shamloo *et al.* (2015) para el caso de tuberías. Los fenómenos de avenidas de inundación son tan complejos que actualmente es imposible proporcionar un análisis exhaustivo, y el problema de la resistencia al flujo en condiciones transitorias aún plantea un desafío (Mrokowska *et al.* 2014).

La estimación tradicional del factor de fricción conduce a una subestimación del valor del factor de fricción, lo que resultaría en una sobreestimación del tirante del flujo e incertidumbre en la estimación de la socavación. La propuesta metodológica deja de lado el estudio del factor de fricción bajo condiciones de laboratorio en canales, realizados por Graf y Song (1995) y Shamloo *et al.* (2015). Los resultados de la aplicación de la metodología y del modelamiento numérico de flujos transitorios 2D con factor de fricción variable en el espacio y tiempo, permiten estudiar a mayor detalle las ecuaciones de deformación del lecho del cauce en el espacio y tiempo.

El objetivo principal es desarrollar un modelamiento numérico de flujos transitorios 2D en cauces naturales, considerando coeficientes de fricción variable en el espacio y tiempo, del cual se desprende los siguientes objetivos específicos a desarrollar:

- Evaluar el estado del conocimiento en el desarrollo y aplicación de modelos de fricción transitorio en modelos numéricos de flujos transitorios (tuberías y canales).
- Determinar el factor de fricción y/o técnicas que consideren el comportamiento transitorio del factor de fricción en cauces naturales
- Proponer una metodología para fines de ingeniería en el modelamiento numérico de flujos transitorios 2D, con factor de fricción variable en el espacio y tiempo.
- Desarrollar el programa de cómputo para el modelamiento numérico de flujos transitorios 2D con factor de fricción variable en el espacio y tiempo.
- Evaluar el comportamiento en base a la experimentación numérica y aplicación a un caso práctico: Sector Huatocay del Río Chillón.



## II. REVISIÓN DE LITERATURA

Se presenta el resumen de la revisión de literatura, resaltando algunos aportes teóricos de varios investigadores, para el mejor entendimiento de la evolución del factor de fricción en el espacio y tiempo.

### 2.1. REVISIÓN DEL ESTADO DEL CONOCIMIENTO DEL FACTOR DE FRICCIÓN

#### 2.1.1. Factor de fricción variable en el espacio

En el artículo de López *et al.* (2007) se desarrolla la calibración y validación de tres modelos previamente propuestos por otros investigadores; utilizando una amplia base empírica, compuesta por 904 datos de más de 400 alcances de ríos de grava y montaña corrientes de diversas regiones del mundo. Gracias al procedimiento de validación, los tres modelos fueron calibrados utilizando la base de datos completa, lo que permitió que las ecuaciones ajustadas se basen en el número máximo de observaciones.

En la tesis de Alonso (2005) se evalúa una serie de modelos de resistencia al flujo para ríos de montaña y de grava. Se analiza el efecto sobre la capacidad predictiva de las ecuaciones con ajuste por subconjuntos, definidos éstos por intervalos de diferentes variables de control, como son la sumersión relativa del flujo, la pendiente del cauce o el índice de movilidad del sedimento. Los modelos evaluados se dividen en dos grandes grupos: a) los que toman el factor de fricción de Darcy-Weisbach ( $f$ ) como variable dependiente, y b) aquellos que adoptan el caudal del flujo ( $Q$ ) o su velocidad media ( $v$ ) como variables respuesta y que no incluyen coeficiente de resistencia explícitamente como variable explicativa. Como principal resultado se ha obtenido un conjunto de ecuaciones, de los dos grupos anteriormente citados, que cuentan con una capacidad de

predicción superior a la de fórmulas derivadas hasta la actualidad por otros investigadores.

Bathurst (2002) explica que las relaciones de resistencia de flujo existentes para los ríos de montaña pueden ser erróneas en un 30%. En parte esto se debe a que la resistencia del flujo es un fenómeno complejo. Sin embargo, una razón adicional es la dependencia de los análisis anteriores de las relaciones adecuadas a los datos de múltiples sitios. Por lo tanto, veintisiete conjuntos de datos de campo cuidadosamente seleccionados de siete fuentes bibliográficas se analizan empíricamente para mostrar variaciones de resistencia en un sitio, con el objetivo de mejorar la precisión y la aplicabilidad de las relaciones de resistencia al flujo de la corriente del río. Teniendo en cuenta únicamente la rugosidad del grano del lecho, los factores principales que probablemente determinen la resistencia al flujo se identifican como  $d/d_{84}$  sumersión relativa, la distribución del tamaño del lecho y la pendiente del canal. La dependencia de la función de resistencia  $(8/f)^{1/2}$  (donde  $f$  es el coeficiente de resistencia de Darcy-Weisbach) en  $d/d_{84}$  se describe con mayor precisión por una ley de potencia que por una ley semilogarítmica, especialmente en caudales altos. A partir de observaciones de conjuntos de datos coincidentes en el sitio, se derivan dos ecuaciones, que se distinguen en gran medida según la pendiente del canal. Además, detecto dos tendencias diferenciadas al tomar un umbral de la pendiente del 8%. Bajo dicho umbral la relación potencial ajustada mostro menor tasa de cambio que por encima.

Bathurst (1985) presenta un enfoque empírico basado en los datos disponibles, que permite calcular el factor de fricción a partir de la sumersión relativa con un error de hasta  $\pm 25\%$  a  $\pm 35\%$ . Señala que el valor de  $d_{84}/d_{50}$  varía entre 1.5 y 2.5, un rango relativamente reducido que sugiere que el efecto de la distribución de tamaños es aproximadamente constante. Los datos del río de este estudio confirman la importancia de la sumersión relativa y la distribución del tamaño del lecho, observándose 3 zonas: zona de rugosidades grandes ( $d/d_{84} < 1$ ), medias ( $1 < d/d_{84} < 6$ ) y pequeñas ( $d/d_{84} > 6$ ).

### **2.1.2. Factor de fricción variable en el tiempo**

Bao *et al.* (2018) consideran como un parámetro crítico el considerar constante el valor del factor de fricción y uniforme, el factor de fricción cambia en flujo transitorio ante eventos de inundación; es decir, las condiciones de flujo del tramo del río afectan significativamente la resistencia al flujo. En este estudio, se estableció una fórmula modificada para mejorar la simulación transitoria de la fricción en canales. Los resultados muestran que agregar demasiados términos adicionales proporciona un mejor rendimiento en la fase de calibración, pero reduce la precisión en la fase de validación debido a un fenómeno de sobreajuste. La cantidad óptima de términos adicionales es tres, y la fórmula establecida puede mejorar la simulación transitoria de la fricción.

Shamloo *et al.* (2015) revisaron un modelo cuasi permanente y cuatro modelos de fricción transitorio para el flujo transitorio en tuberías. Uno de los factores que pueden afectar la precisión de los modelos unidimensionales de flujo de transitorio es el factor de fricción. Este coeficiente se puede estimar como constante, cuasi- permanente y transitorio. En el enfoque constante, se usa un valor constante del factor de fricción Darcy-Weisbach. En la aproximación cuasi permanente, las pérdidas por fricción se estiman utilizando la fórmula derivada para las condiciones de flujo de estado estacionario. Durante las condiciones transitorias, el esfuerzo cortante en la pared no está en fase con la velocidad media. Además, el perfil de velocidad puede ser completamente diferente de un perfil de flujo uniforme. Por lo tanto, las pérdidas de fricción calculadas mediante el uso de relaciones de estado estacionario son inexactas en el flujo laminar y turbulento transitorio. Para hacer frente a este problema, tanto para los flujos laminares como turbulentos, es posible agregar algebraicamente términos de flujo transitorio al término de resistencia casi constante de los modelos unidimensionales. Se expone modelos transitorios como Zielke (1968), Vardy & Brown (2003), Trikha (1975) y Brunone (1991) que se comparan con los resultados de las mediciones de laboratorio para casos de golpes de ariete con flujos turbulentos laminados y bajos números de Reynolds. Los resultados computacionales muestran claramente que el modelo de Zielke resulta tener mejor correlación con los datos experimentales.

Meile (2010) llevó a cabo varias investigaciones en laboratorio sobre oleadas positivas y negativas, desde aguas arriba en un canal de 40 m de longitud con una pendiente media de lecho de 1.14 ‰ y geometrías de banco de canales no prismáticas. Los bancos de

canales incluían elementos de macro-rugosidad, es decir varias cavidades. En total, se han investigado 41 configuraciones geométricas diferentes. En las geometrías con macro-rugosidad de banco de canales, se reducen la celeridad de onda absoluta de  $V_w$  y la celeridad de onda  $c$ . Entre otras razones, la reducción observada de la celeridad de la onda absoluta se debe al incremento de la resistencia al flujo.

Mrokowska *et al.* (2014) analizan los métodos para expresar y evaluar la resistencia al flujo en un flujo transitorio. El documento sugiere abandonar, en lo posible, los coeficientes de resistencia en favor de las variables basadas en la física, como el esfuerzo cortante y la velocidad de fricción para expresar la resistencia al flujo. En consecuencia, se examina un método reconocido de evaluación de resistencia al flujo basado en las relaciones derivadas de ecuaciones de flujo. El documento presenta una discusión teórica sobre varios aspectos de la evaluación de la resistencia al flujo y la aplicación del método a los datos de campo, que se originan de las olas artificiales de inundación en un pequeño río de tierras bajas. Como el método es propenso a muchos errores debido a la escasez y la incertidumbre de los datos de medición, el objetivo del artículo es proporcionar sugerencias sobre cómo aplicar el método para mejorar la corrección de los resultados. La velocidad de fricción y el factor de fricción se comparan en términos de resistencia a la variabilidad del flujo durante la propagación de las ondas de inundación. Se concluye que el factor de fricción puede ser un indicador engañoso de la magnitud de la resistencia en el flujo transitorio cuando la interpretación física de la resistencia es necesaria. Los fenómenos de onda de inundación son tan complejos que actualmente es imposible proporcionar un análisis exhaustivo, y el problema de la resistencia al flujo en condiciones transitorios todavía plantea un desafío.

Pathirana y Ranasinghe (2006) mencionan que pocos estudios se han llevado a cabo en el pasado para estimar el esfuerzo de corte en flujos transitorios, sobre lecho de canales rugosos. La velocidad de corte derivada de las ecuaciones de Saint Venant se comparó con la formulación de estado estacionario utilizando datos experimentales. La diferencia en las velocidades de corte predichas por formulas estacionaria y no estacionarias aumenta con el tránsito del flujo. Además, la velocidad de corte en flujos de aceleración es generalmente más alta que en flujos en desaceleración y esta información es muy útil para los estudios de transporte de sedimentos en flujos transitorios.

Graf y Song (1995) analizan el esfuerzo de corte no uniforme en el fondo en flujo estacionario en canales abierto por tres métodos. La velocidad de fricción,  $u^*$ , aumenta en la dirección  $x$  al acelerar, pero disminuye cuando el flujo desacelera. En flujo transitorio alcanza su máximo valor en la rama ascendente del hidrograma. En un flujo transitorio, el factor de fricción alcanza su máximo valor en la rama ascendente del hidrograma y posteriormente disminuye.

Haizhou y Graf (1993) presentan un estudio sobre el factor de fricción en flujo transitorio en canales abiertos sobre lechos de grava. Diferentes hidrogramas fueron investigados experimentalmente. La velocidad de fricción se determinó usando la ecuación de Motion. El flujo transitorio se expresó con el parámetro de Clausen adimensional. Se muestra que para un hidrograma dado la velocidad de fricción,  $u_{*SV}$ , es generalmente más grande en la rama ascendente (flujo en aceleración) que en la rama descendente (flujo en desaceleración); alcanza su valor máximo antes de la llegada del pico del hidrograma. Durante el paso de un hidrograma, el factor de fricción,  $f$ , es generalmente más grande en la rama ascendente y más pequeño en la rama descendente; la tendencia descendente del valor de  $f$  en la rama ascendente suele ir seguido de un ascendente valor de  $f$  menos pronunciado en la rama descendente.

## **2.2. LA CUENCA DEL RÍO CHILLÓN**

En términos de demarcación política cubre a la provincia de Canta y a los distritos de Carabayllo, Puente Piedra, Ventanilla, y parte de Comas, Los Olivos y San Martín de Porras integrados a la provincia de Lima.

### **2.2.1. Descripción de la geomorfología de la cuenca**

El Río Chillón se origina en la laguna de Chonta a una altura de 4,850 msnm, con un recorrido de 126 Km hasta su desembocadura en el Océano Pacífico. El Río Chillón cuenta con un área de drenaje de 2,444 Km<sup>2</sup>, de los cuales 1,040 Km<sup>2</sup> es de la cuenca húmeda, lo que representa el 42% del área sensible al escurrimiento superficial. Tiene una pendiente de 2% donde se encuentra la zona agrícola más importante, con una hoya

hidrográfica alargada de fondo profundo quebrado y pendientes fuertes, presenta una fisiografía escarpada en partes abruptas, estrecha y limitada por cadenas de cerros que en dirección agua abajo muestra un descenso sostenido de las cumbres.

En el Cuadro 1 se muestra las principales características geomorfológicas de las 22 subcuencas del río Chillón.

Cuadro 1: Características geomorfológicas de las 22 subcuencas del río Chillón

Nº	Subcuenca	Área (Km <sup>2</sup> )	Perímetro (km)	Altitud media (msnm)	Rango altitudinal cauce principal (m)	Longitud cauce principal (km)	Pendiente de cauce principal (%)	Coef. de compaci.	Relac. de Elonga.
1	Cueva	68.1	35.6	1350	350	12.5	2.8	1.68	0.74
2	Ucañan	57.5	44.9	2950	2900	19.5	14.8	1.89	0.44
3	Quiruana	215.4	79.0	2000	1000	20.4	4.9	2.51	0.81
4	Yanacocha	61.0	39.7	3500	1900	13	14.6	1.78	0.68
5	Mayru	56.1	31.1	2825	550	7.5	7.3	1.57	1.13
6	Yanacoto	50.1	35.9	3900	1700	12.1	14.1	1.69	0.66
7	Huaypian	19.4	23.2	2800	500	4.6	10.9	1.36	1.08
8	Mincancancha	49.8	32.7	4100	1300	11.2	11.6	1.61	0.71
9	Chillón alto	220.1	72.8	4150	1400	25.4	5.5	2.41	0.66
10	Chacramito	89.2	54.0	3850	1700	19.7	8.6	2.07	0.54
11	Yaurimana	40.4	30.1	3725	1450	11.8	12.3	1.55	0.61
12	Potaca	13.7	17.6	2850	300	4.3	7	1.18	0.98
13	Cotabamba	33.9	28.8	3565	1730	10.8	16	1.51	0.61
14	Sacayhuanca	59.0	36.2	3040	2620	9.6	27.3	1.7	0.9
15	Chacalla	46.3	35.4	2715	1970	10.7	18.5	1.68	0.72
16	Curhuane	9.9	13.6	1605	250	3.3	7.5	1.04	1.06
17	Jicamarca	68.3	39.1	2390	1820	13.6	13.4	1.76	0.69
18	Posanca	22.5	22.6	1315	330	5.4	6.1	1.34	0.99
19	Orobel	19.6	21.7	2050	1900	8.7	22	1.31	0.58
20	Río seco	17.6	20.0	1750	1500	6.7	22.5	1.26	0.71
21	Huerta vieja	9.4	14.4	1590	1220	6.3	19.4	1.07	0.55
22	Chillón bajo	1126.1	207.3	550	1100	58.6	1.9	4.06	0.65

Fuente: ANA, Octubre (2003), Estudio Integral de los Recursos Hídricos de la cuenca del Río Chillón.

Al norte de la ciudad de Lima, a 20 kilómetros de trayectoria por la carretera Panamericana, se sitúa el valle del Chillón. Tiene una extensión o área de drenaje de 2,444 Km<sup>2</sup>. de la cual el 42%, o sea 1,039 Km<sup>2</sup>, corresponde a la cuenca húmeda, denominada así por hallarse por encima de la cota de los 2,500 msnm, límite inferior

fijado al área que se estima contribuye efectivamente al escurrimiento superficial. Limita por el norte con las cuencas de Chancay-Huaral, por el sur con el valle del Rímac, por el este con el valle del Mantaro y por el oeste con el Océano Pacífico.

El río Chillón, en su curso superior, hasta la localidad de Canta, tiene una pendiente de 6%, en su curso medio, de la localidad de Canta a la de Santa Rosa de Quives, tiene una pendiente de 5% y en su curso inferior, a partir de Santa Rosa de Quives en donde el valle empieza a abrirse, la pendiente disminuye a 2%. En este último tramo el río Chillón ha formado un cono de deyección, sobre el cual se encuentra la zona agrícola más importante de la cuenca. La cuenca del río Chillón, geológicamente, muestra diversidad de formaciones sedimentarias (lutitas, calizas, areniscas, etc.), metamórficas, volcánicas (mayormente andesitas) e intrusivas (granodioritas) de diferentes edades, así como evidencias de fuerte tectonismo (fallamientos, plegamientos), que favorecen una buena mineralización.

En la Figura 3 se muestra el perfil estructural Macro - Geomorfológico de la cuenca del Río Chillón.

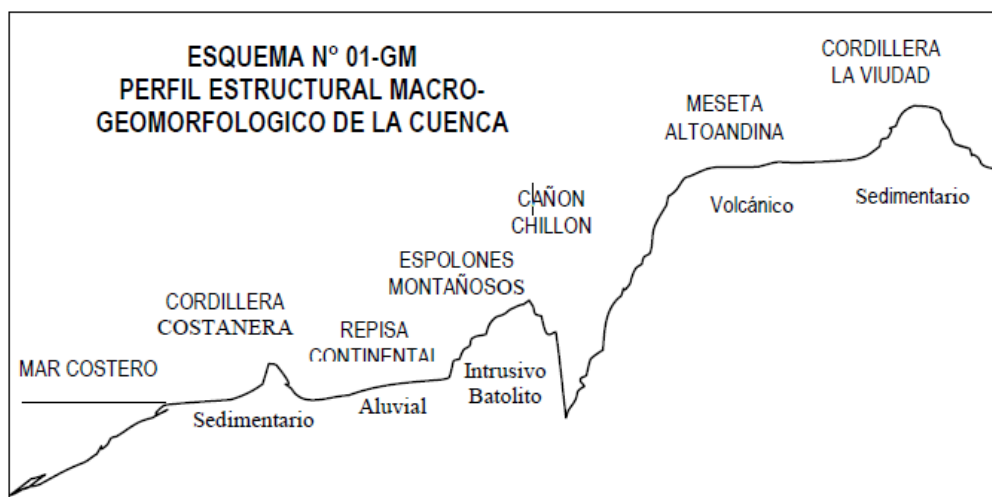


Figura 3: Perfil Estructural Macro - Geomorfológico de la cuenca del Río Chillón  
Fuente: Municipalidad Metropolitana de Lima Instituto Metropolitano de Planificación, Vol. 1 (2013), Plan Integral de la cuenca Chillón.

### 2.2.2. Climatología

La temperatura es el elemento meteorológico más ligado en sus variaciones al factor altitudinal; se aprecia que dicho elemento experimenta variaciones que van desde el tipo semicálido en el área de la Costa al tipo polar en los nevados, quedando comprendida entre éstos límites una gama de variaciones, que caracterizan térmicamente a cada uno de los pisos altitudinales dentro de la región. El promedio anual de temperatura de las estaciones que están cercanas al mar, es de 20 °C y en las estaciones que se hallan en el interior es de 13.6 °C (Canta 2,832msnm).

En el sector altitudinal, situado entre 3,100 y 3,800 msnm tiene una temperatura promedio anual de 10 °C; en el nivel superior de éste sector es frecuente la existencia de temperatura mínimas de 0 °C. En el sector comprendido entre los 3,800 y 4,800 msnm se cuenta con información referencial de una estación de la cuenca vecina del río Rímac cuyo promedio anual es de 5 °C donde las temperaturas mínimas se mantienen siempre bajo el punto de congelación.

La precipitación pluvial en la cuenca del río Chillón varía desde escasos milímetros en la Costa árida y desértica hasta más de 600 mm en la cordillera; el sector menos lluvioso está comprendido entre el litoral marino y aproximadamente los 2,200 msnm, presentando un promedio anual de lluvias que fluctúan alrededor de los 60 mm, notándose que va en claro aumento paralelamente con el alejamiento del litoral marino.

En el sector comprendido entre los 2,200 y 3,100 msnm las lluvias son más abundantes, los datos registrados en éste sector señalan un promedio de precipitación anual de 350 mm apreciándose que éste aumente a medida que la altitud se acerca a la cota superior. En las cumbres más altas que delimitan la cuenca, sobre los 5,000 msnm la precipitación anual es del orden de los 1,000 mm.

### **2.2.3. Hidrografía**

El río presenta un régimen de descargas irregular y torrencioso. Éstas son parcialmente reguladas por un grupo de lagunas de las partes altas, que sirven para complementar las necesidades de riego de los agricultores en las partes media y baja de la cuenca en el período de estiaje (Las lagunas son tres: Chunchún, Leóncocha y



Azulcocha embalsadas en las partes altas de la cuenca), En su conjunto las tres lagunas tienen una capacidad de 19.30 millones de m<sup>3</sup>, llenándose por lo común todos los años. El estiaje del río Chillón cubre los meses de mayo a diciembre, siendo el promedio mínimo del cauce de 1.5 m<sup>3</sup>/s. En dicho período se genera el mayor déficit de este recurso.

El período de avenida va de enero a abril, meses en que el río carga agua por las lluvias y deshielos en las partes altas de la cuenca. Adicionalmente en la zona superior y media alta del ámbito de la Junta de Usuarios existen puquiales que contribuyen comparativamente en pequeña medida a la descarga total del río. En la Figura 4 se muestra las 22 subcuencas del río Chillón.

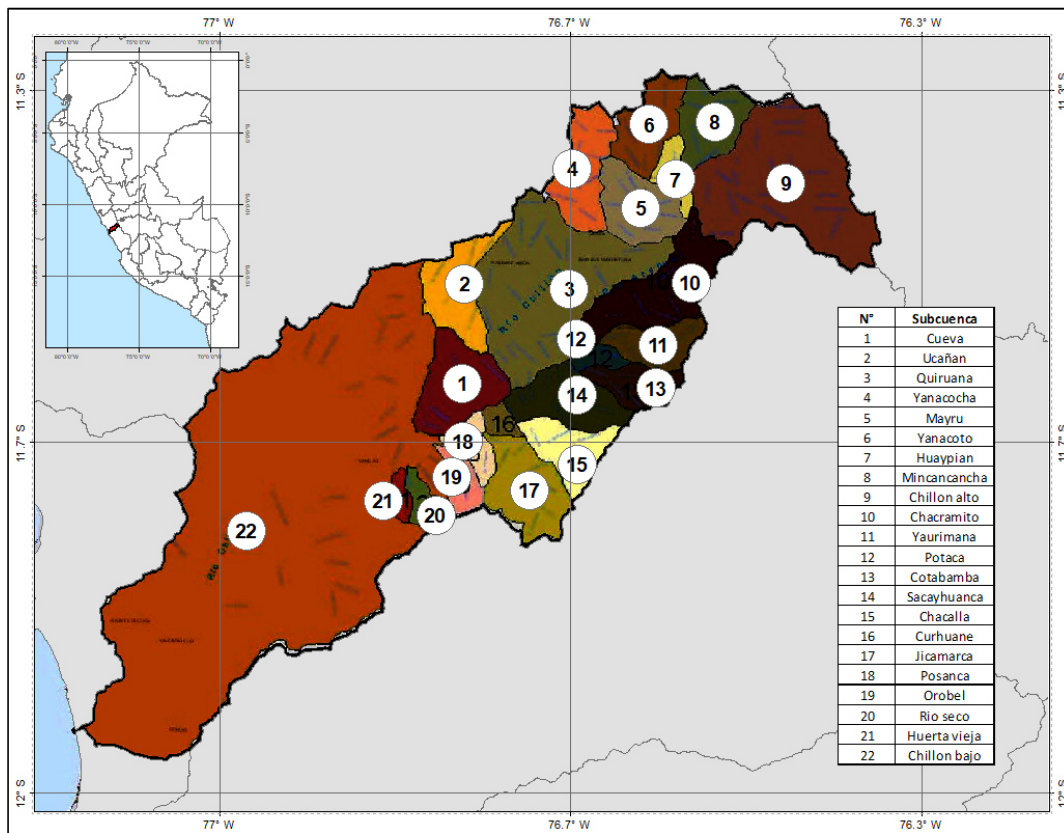


Figura 4: Mapa de cuenca y subcuenca del Río Chillón

Fuente: ANA, Octubre (2003), Estudio Integral de los Recursos Hídricos de la cuenca del Río Chillón.

Los desbordes del río Chillón son recurrentes en los meses de verano año tras año, el sector de chocas en Carabayllo es uno de los afectados. Se tienen registros de desbordes

de mayor magnitud que suscitaron el año 1997 y 1982. Estos eventos estuvieron relacionados con el fenómeno del Niño. El caudal que causo el desborde en San Diego fue de 35 m<sup>3</sup>/s en el 2001, el máximo en el 2006 fue de 16 m<sup>3</sup>/s y en enero del 2007 fue de 7.4 m<sup>3</sup>/s.

Durante las ocurrencias de El Niño, se producen los eventos de mayor destrucción de la infraestructura en las zonas de los huaycos y del río Chillón, por inundaciones y socavamiento; desde Trapiche hasta la desembocadura en el mar. Tramo de mayor riesgo y vulnerabilidad. Las Sub-Cuencas más afectadas por El Niño, son las de la Cuenca Media, como las de Caballero (o Río Seco), Naranjal, Quilca, Socos, entre otras; las que impactan en el Valle Chillón Central.

#### 2.2.4. Hidrometría

Para el control de las descargas o caudales del río Chillón se cuenta con un conjunto de estaciones hidrométricas: Puente Huarabí, Puente Magdalena, Larancocha, Yipata Obrajillo y Pariacancha); de las cuales, la Estación del Puente Magdalena ha sido considerada como estación base para registrar los caudales que ingresa al valle, en la Figura 5 se muestra el hidrograma de caudales del río Chillón Estación Puente Magdalena.

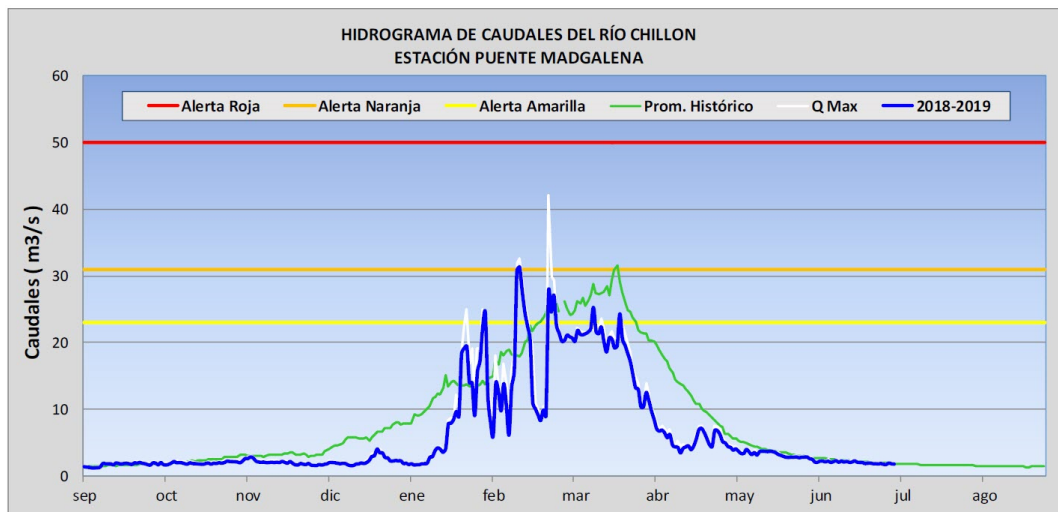


Figura 5: Hidrograma de caudales del río Chillón Estación Puente Magdalena  
Fuente: SENAMHI, Julio (2019).

Las otras estaciones se ubican en aguas arriba del Puente Magdalena, la información hidrométrica diaria utilizada para caracterizar los caudales registrados en el río Chillón, corresponde a la publicación de SENAMHI para el periodo 01/Setiembre/2018 al 28/Junio/2019 de la estación Puente Magdalena. El valor mínimo del hidrograma es de  $1.58 \text{ m}^3/\text{s}$  y el máximo es de  $30.19 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### **2.3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO BIDIMENSIONAL**

Las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales se obtienen a partir de las leyes físicas de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento, junto con la primera y segunda leyes de la termodinámica. De ellas, para un fluido newtoniano e isótropo se obtienen las ecuaciones de Navier - Stokes, particularizadas para describir las variables promediadas en un pequeño incremento de tiempo, se concretan en las ecuaciones de Reynolds (Bladé & Gomez 2006).

En gran parte de los flujos en lámina libre, y especialmente en problemas de propagación de avenidas en ríos, el valor de las variables cambia poco en una misma vertical. Esta consideración permite pensar en una simplificación de las ecuaciones de Reynolds a dos dimensiones mediante un promedio vertical de las ecuaciones tridimensionales. Para poder hacer esta simplificación se consideran las hipótesis siguientes:

- Profundidad de la capa de agua pequeña con relación a las otras dimensiones del problema.
- Distribución hidrostática de presiones en la vertical
- Pendiente de solera reducida.

El cumplimiento de estas hipótesis implica además que las componentes de la velocidad y aceleración en el eje  $z$  son despreciables frente a las componentes en los otros ejes, y también que éstas últimas tienen una marcada uniformidad vertical. Con esta integración de las ecuaciones de Reynolds en la profundidad, se obtienen las ecuaciones bidimensionales del flujo en lámina libre o ecuaciones de Saint Venant bidimensionales:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2 + g\frac{h^2}{2}) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = gh(S_{ox} - S_{fx})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(huv) + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2 + g\frac{h^2}{2}) = gh(S_{oy} - S_{fy})$$

Donde:

h es el calado.

u, v son las velocidades horizontales promediadas en profundidad.

$$S_{ox} = -\frac{\partial z_0}{\partial x}$$

$$S_{oy} = -\frac{\partial z_0}{\partial y}$$

$$S_{fx} = -\frac{u\sqrt{u^2 + v^2}n^2}{h^{4/3}}$$

$$S_{fy} = -\frac{v\sqrt{u^2 + v^2}n^2}{h^{4/3}}$$

Donde:

n es el coeficiente de rugosidad de Manning.

z<sub>0</sub> es la elevación de la lámina libre.

S<sub>fx</sub>, S<sub>fy</sub> es la pendiente motriz.

#### 2.4. RESISTENCIA AL FLUJO EN RÍOS ALUVIALES CON LECHOS DE SEDIMENTOS GRUESOS

Para efectos de analizar de la resistencia, los ríos aluviales se deben dividir en ríos con lechos de arena y ríos con lechos granulares gruesos, tales como gravas, cantos, bolos y bloques. Esta división es fundamental, dado que solo los ríos con lechos de arena presentan microformas, es decir, resistencia por relieve como mecanismo para aumentar su rugosidad, mientras que los ríos con depósitos granulares gruesos deben su resistencia, básicamente, a la textura proporcionada por los materiales superficiales y, en caso necesario, incrementan su rugosidad gracias a las mesoformas, las cuales se

analizan como obstrucciones o como cambios en la forma del cauce (barras laterales, islas, islotes y barras centrales en los trenzamientos) o como curvas en planta (en todos los tipos de meandros) (Rubio 2017).

La resistencia hidráulica de un río aluvial de configuración recta en planta, prismático, sin obstrucciones y sin vegetación, posee cuatro componentes:

- La resistencia por textura.
- La resistencia por relieve.
- La resistencia por carga de sedimentos de fondo.
- La resistencia por carga de sedimentos en suspensión.

Esta resistencia es debida al tamaño de los sedimentos del lecho (en otros textos se denomina como resistencia de grano). La deducción de algunas fórmulas para determinar la resistencia por textura en lechos planos parte de la confrontación de la ecuación de Chézy y la función de distribución de velocidades en la vertical. El hecho es que existe una relación entre el perfil de velocidades y la resistencia (Rubio 2017).

Estudios realizados sobre los límites de sumersión relativa definidas por Bathurst *et al.* (1981) distinguen 3 zonas:

- Zona de rugosidades grandes ( $Y / D_{84} < 1.2$ ).
- Zona de rugosidades medias ( $1.2 < Y / D_{84} < 4$ ).
- Zona de rugosidades pequeñas ( $Y / D_{84} > 4$ ), donde Y (en m) es la profundidad de agua y  $D_{84}$  es el diámetro (en m) tal que el 84% del material de la muestra es menor que el  $D_{84}$ . En la Figura 6 se presenta la variación de la función de resistencia en función de la sumersión relativa.

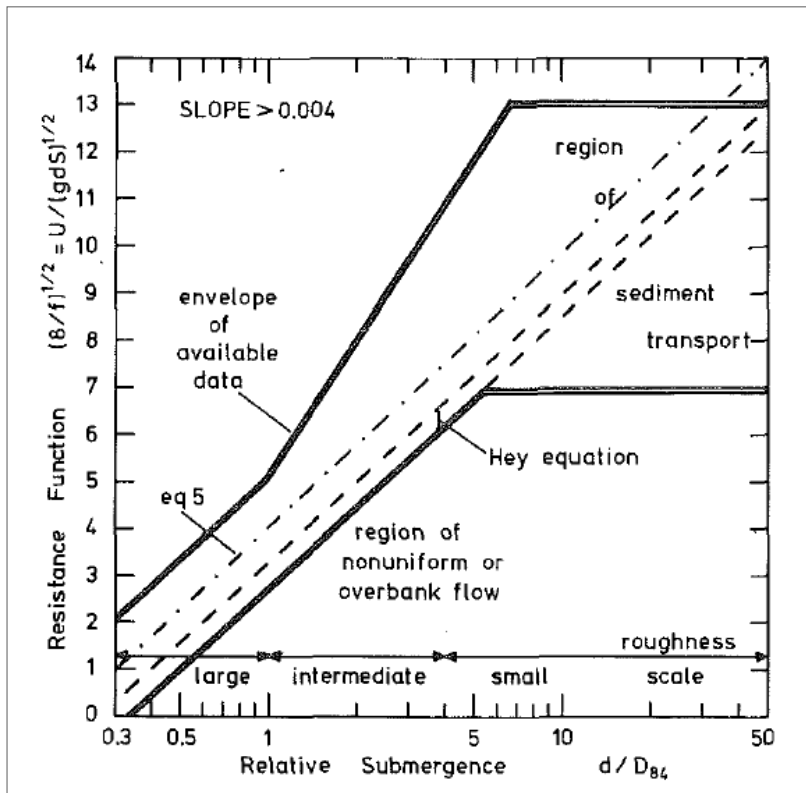


Figura 6: Variación de la función resistencia en función de la sumersión relativa  
Fuente: Bathurst (1985).

En el Cuadro 2 se muestran algunos de los criterios relativos de sumersión utilizados para clasificar el proceso primario de resistencia al flujo (degradación de la energía) en flujos de canales abiertos por distintos autores.

Cuadro 2: Criterios de sumersión para clasificar el proceso primario de resistencia al flujo

Autor	Escala de rugosidad			
	Alta	Media		Baja
		a alta escala	a baja escala	
Bray & Davar (1987)	$Y/D_{50} \leq 3$	$3 < Y/D_{50} \leq 10$	$10 < Y/D_{50} \leq 20$	$Y/D_{50} > 20$
Bathurst <i>et al.</i> (1981)	$Y/D_{50} \leq 2$ $Y/D_{84} \leq 1.2$	$2 < Y/D_{50} \leq 7.5$ $1.2 < Y/D_{84} \leq 4$		$Y/D_{84} > 7.5$ $Y/D_{84} > 4$
Lawrence (1997)	$Y/k < 1$	$1 \leq Y/k < 10$		$Y/k > 10$

Fuente: Powell (2014).

La fricción de partícula generalmente se supone que es la fuente dominante de resistencia al flujo si la sumersión relativa es alto, donde el lecho es plano y está compuesto de

granos bien ordenados y muy compactos (Figura 7a). Los flujos dominados por la fricción de partícula se conocen como flujos de cortante y se encuentran más comúnmente en el lecho de grava en ríos de gradientes bajos a moderados, aunque algunas formas de arrastre se asocian generalmente con pérdidas de energía a pequeña escala en torno a grandes clastos y/o agrupamientos aislados. La fuerza de arrastre por la forma de fondo aumenta en importancia a medida que disminuye la sumersión relativa (Figura 7b). A menudo se convierte en la fuente dominante de resistencia al flujo a la sumersión relativa baja cuando las partículas individuales comienzan a extenderse a través de la mayor parte o la totalidad de la profundidad del flujo (Figura 7c) generando un régimen de flujo de chorro y estela. Como podría esperarse, la distribución espacial de las partículas en el lecho tiene implicaciones importantes para la resistencia al flujo en una sumersión relativa baja (Powell 2014).

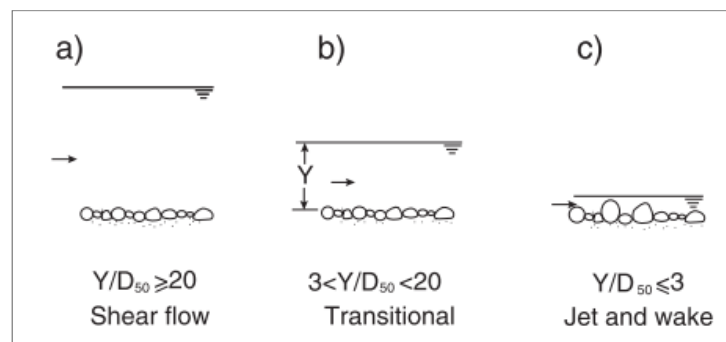


Figura 7: Condiciones de rugosidad del lecho en canales de grava  
Fuente: Bray & Davar (1987)

#### 2.4.1. Ecuaciones de resistencia al flujo para baja rugosidades

Limerinos (1970) obtiene una ecuación a partir de 50 datos de diferentes ríos de gravas, canto rodado y bolos mediano del estado de california (EE.UU.) en el rango  $0.9 \leq R/D_{84} \leq 68.55$  y caudal entre 5.6 a 427 m<sup>3</sup>/s.

$$n = \frac{0.113 \cdot R^{1/6}}{2 \cdot \log\left(\frac{R}{D_{84}}\right) + 1.160}$$

Donde:

n es el factor de fricción.

R es el radio hidráulico en metros.

$D_{84}$  es el tamaño del material del lecho se considerado en metros.

#### 2.4.2. Ecuaciones de resistencia al flujo para grandes rugosidades

Ugarte & Madrid (1994) sobre la base de los datos publicados por Bathurst (1985) relacionados con los ríos del Reino Unido y los datos publicados por Jarret (1984) de los ríos Colorado determinan la siguiente ecuación de resistencia al flujo. Ajustan una serie de ecuaciones a un conjunto de datos de ríos de grava incorporan la pendiente y el número de Froude como variables para el cálculo del coeficiente de resistencia, pues sostienen que son de gran influencia en la resistencia al flujo en ríos de montaña. Proponen clasificar el flujo en función de la sumersión relativa y ajustar expresiones diferentes para los tres intervalos considerados de dicha variable. La ecuación de regresión de resistencia al flujo para grandes rugosidades obtenida se presenta a continuación.

$$n = \left( 0.183 + \ln \left( \frac{1.7462 \cdot S_f^{0.1581}}{F_d^{0.2631}} \right) \right) \cdot \frac{D_{84}^{1/6}}{\sqrt{g}}$$

Donde:

n es el factor de fricción.

$F_d$  es el número de Froude.

$S_f$  es la pendiente de fricción.

$D_{84}$  es el tamaño del material del lecho se considerado en metros.

Usando esta fórmula empírica para estimar la velocidad media, el error promedio es de aproximadamente 5.7%, el mayor error es igual a 21%. Es importante mencionar que los datos utilizados para estimar esta fórmula consideran un rango de flujos pequeños, siendo el más alto igual a 10.3 m<sup>3</sup>/s.

## 2.5. SOCAVACIÓN GENERAL

### 2.5.1. Determinación de las características granulométricas de los suelos granulares



En los cálculos para pronosticar la deformación del lecho del cauce, el material del lecho se clasifica en suelos cohesivos y no cohesivos. En nuestro país predominan los ríos y quebradas con materiales del lecho no cohesivos. En los estudios de sedimentos, usualmente se aplica los criterios y métodos de la mecánica de suelos para la caracterización de los sedimentos y suelos del lecho del río y quebradas, que no consideran los materiales gruesos. Por lo tanto, no es totalmente correcto utilizar las normas y criterios de sedimentos existentes (basados en la mecánica de suelos) en los estudios de sedimentos, principalmente en el pronóstico de socavación y transformación del lecho del cauce de los ríos. Seguidamente, se presenta los criterios de la norma rusa CP-32-102-95 del sistema de documentos normativos de la construcción, que corrige y hace precisiones al respecto.

A los materiales no cohesivos pertenecen los materiales gruesos (cantos rodados, piedras y gravas) y los suelos arenosos. Para fines de diseño de la socavación, el contenido del material del lecho en peso no debe exceder en más de 10% de restos de material orgánico de cobertura, y debe contener menos del 20% de material más fino que la arena muy fina, o de partículas pulverizadas (menor de 0.10 mm).

En el cálculo de la socavación del lecho o la socavación local, la característica principal del material no cohesivo del lecho se constituye el diámetro medio del material del lecho ( $d$ ), el cual se determina mediante el análisis convencional del tamizado y con la siguiente fórmula:

$$d = \sum_{i=1}^n d_i p_i$$

Donde:

$d_i$  es el diámetro medio de la partícula de la fracción  $i$ , determinado por la media aritmética de los orificios de los tamices, que limita la fracción dada.

$p_i$  es el contenido de la fracción  $i$ , en fracción de unidad de peso.

$n$  es el número de fracciones.

Se presenta en el Anexo C la campaña de extracción de muestra y elaboración de curva granulométrica. En el Cuadro 2 se muestran los valores del  $D_{84}$ ,  $D_{95}$  y  $D_m$  obtenidos en las muestras de las calicatas.

Cuadro 3: Valores de  $D_{84}$ ,  $D_{95}$  y  $D_m$  en las muestras de calicata

Nro.	Nombre	D84 (mm)	D95 (mm)	Dm (mm)
1	C-1	58	88	35
2	C-2	68	91	37
3	C-3	56	87	37
4	C-4	61	88	37
5	C-5	61	87	39
6	C-6	66	91	36
7	C-7	64	90	39
8	C-8	68	91	41
9	C-9	71	92	39
10	C-10	55	86	38
11	C-11	61	89	36
12	C-12	69	91	35
13	C-13	62	88	45
14	C-14	69	91	39
15	C-15	77	94	42
16	C-16	75	93	41
17	C-17	80	95	41
<p><b>Nota:</b>  <math>D_m</math> es el diámetro medio de las partículas del material granular  <math>D_{84}</math> es el diámetro (en mm) tal que el 84% del material de la muestra es menor que el <math>D_{84}</math></p>				

El procedimiento para realizar la extracción de muestras del material depositado por el río en su cauce y la elaboración de curva granulométrica es la siguiente:

- Se realiza una calicata en un área de 1 m<sup>2</sup> y una profundidad de 2D<sub>max</sub> (diámetro máximo de la bolonería) para extraer muestras del material depositado por el río en su cauce.
- El material extraído se separa y coloca sobre una cubierta plastificada.
- Se registra las dimensiones de las muestras de bolonería mayores a 3" extraídas del cauce del río, midiendo su longitud máxima, media, mínima y su peso.
- Si se observa bolones de diámetro superior a 0.4 m se anota solo sus dimensiones.

- Se separa otra muestra de aproximadamente 5 kg de grava más material fino de la calicata, para posteriormente realizar el análisis granulométrico integral.
- Luego se elabora la nueva curva granulométrica global con la curva granulométrica integral y las muestras de bolonería mayores a 3” extraídas.
- Finalmente se determina el diámetro medio del material del lecho (d).

### **2.5.2. Esquema hidráulico del flujo**

La modelación del transporte de sedimentos es compleja, los datos utilizados para predecir el cambio en el lecho son incierta y la teoría empleada para ello es empírica y muy sensible a una gran cantidad de variables físicas. Sin embargo, con buenos datos, se puede utilizar un modelo calibrado para predecir tendencias a largo plazo.

Durante las crecientes el agua presenta un flujo transitorio, pero los cambios del nivel y el caudal con el tiempo son lentos y en la ecuación de movimiento del líquido en el río el miembro que refleja la variación de la velocidad es muy pequeño en comparación con el miembro que considera el valor de las pérdidas de energía específica por resistencia hidráulica; por eso, si se divide el hidrograma de la creciente en pequeños intervalos de tiempo formando escalones (Figura 8), entonces, para cada escalón o intervalo, es válido efectuar los cálculos utilizando la ecuación de flujo permanente. Así, pasando secuencialmente de un intervalo al siguiente y utilizando, para cada uno de ellos, ecuaciones sencillas de flujo permanente, se pueden evaluar los fenómenos hidráulicos relacionados con las variaciones del caudal y del nivel durante el transcurso de la creciente (Rubio 2017)

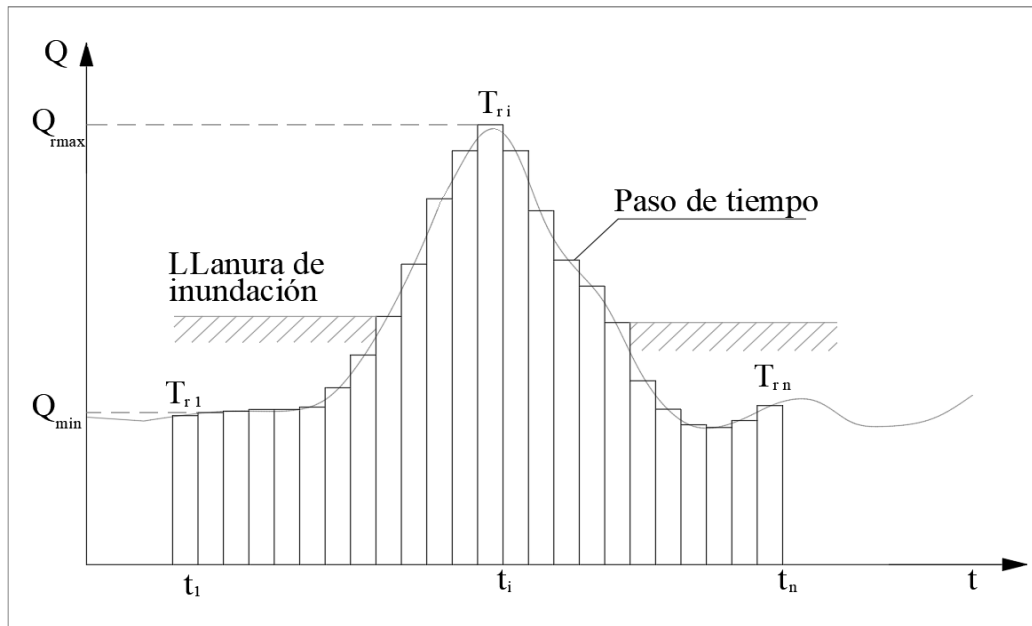


Figura 8: División del hidrograma en pasos de tiempo, intervalos de tiempo y periodos de retorno

### 2.5.3. Socavación general en cauces definidos

El método propuesto por Lischtvan-Levediev es el más usado para el cálculo de la socavación general, se fundamenta en el equilibrio que debe existir entre la velocidad media real de la corriente ( $V_r$ ) y la velocidad media erosiva ( $V_e$ ). La velocidad erosiva no es la que da inicio al movimiento de las partículas en suelos sueltos, sino la velocidad mínima que mantiene un movimiento generalizado del material del fondo. Si el suelo es cohesivo, es la velocidad que es capaz de levantar y poner el sedimento en suspensión. La velocidad erosiva es función de las características del sedimento de fondo y de la profundidad del agua. La velocidad real está dada principalmente en función de las características del río: pendiente, factor de fricción y profundidad del agua.

El método se basa en suponer que el caudal unitario, correspondiente a cada franja elemental en que se divide el cauce natural permanece constante durante el proceso erosivo y puede aplicarse, con los debidos ajustes, para casos de cauces definidos o no, materiales de fondo friccionantes y para condiciones de distribución de los materiales del fondo del cauce homogénea o heterogénea. Así como se muestra en la Figura 9.

### a. Velocidad erosiva

La profundidad de socavación en cualquier punto de la sección transversal se obtiene cuando la velocidad media del cauce iguala a la velocidad erosiva ( $V_r = V_e$ ). Conocido el perfil transversal de la sección antes del paso de la avenida, se escogen algunos puntos en cuyas verticales se desea conocer la profundidad de socavación. Uniendo estos puntos se obtiene el perfil de socavación. Considerando que la hipótesis del método es que el gasto en cada franja del cauce permanece constante durante el proceso erosivo, la profundidad de socavación será igual a 0 en las orillas, por lo que no se permite estimar ninguna erosión lateral de las márgenes.

Para suelos no cohesivos la velocidad erosiva es la que levanta y mantiene el material en movimiento.

$$Ve = 0.68\beta D_m^{0.28} H_S^x \quad (2.1)$$

Donde:

$V_e$  es velocidad erosiva

$H_S$  es el tirante considerado, a cuya profundidad se desea conocer que valor de  $V_e$  se requiere para arrastrar y levantar el material, se considerado en metros.

$D_m$  es el diámetro medio de las partículas del material granular, se considerado en mm.  
 $x$  es exponente variable en función del diámetro medio de la partícula (Cuadro 4).

$Tr$  es el tiempo de retorno.

$x = 0.394557 - 0.04136\text{Log}D_m - 0.00891\text{Log}^2D_m$ , coeficiente de correlación o de ajuste igual a 0.9983, (Higuera C. & Pérez G., 1989).

$\beta = 0.7929 + 0.0973\text{Log}Tr$ , coeficiente de correlación o de ajuste = 0.9910 (Higuera C. & Pérez G., 1989).

$\beta$  es coeficiente de frecuencia (Cuadro 5).

Cuadro 4: Valores x para suelos cohesivos y no cohesivos

<b>Suelos no cohesivos</b>	
<b>D<sub>m</sub> (mm)</b>	<b>x</b>
0.05	0.43
0.15	0.42
0.50	0.41
1.00	0.40
1.50	0.39
2.50	0.38
4.00	0.37
6.00	0.36
8.00	0.35
10.00	0.34
15.00	0.33
20.00	0.32
25.00	0.31
40.00	0.30
60.00	0.29
90.00	0.28
140.00	0.27
190.00	0.26
250.00	0.25
310.00	0.24
370.00	0.23
450.00	0.22
570.00	0.21
750.00	0.20
1000.00	0.19

Fuente: Juárez Badillo, & Rico Rodríguez (1992)

Cuadro 5: Valores del coeficiente de frecuencia  $\beta$

Valor del Coeficiente $\beta$		
Probabilidad de Excedencia (%)	Periodo de Retorno (Años)	Coeficiente $\beta$
50	2	0.82
20	5	0.86
10	10	0.90
5	20	0.94
2	50	0.97
1	100	1.00
0.2	500	1.05
0.1	1000	1.07

Fuente: Juárez Badillo, & Rico Rodríguez (1992)

### b. Análisis de socavación general

Tómese la franja de espesor  $\Delta B$ , y en forma hipotética considérese que el fondo se encuentra en su nivel inicial antes de que se produzca la erosión. El gasto que pasa por esa sección se expresa según Manning por:

$$Q = \frac{1}{n} S^{1/2} H_0^{5/3} \Delta B \quad (2.2)$$

Donde:

S es la pendiente hidráulica

$H_0$  es la profundidad antes de la erosión

n es el coeficiente de rugosidad de Manning

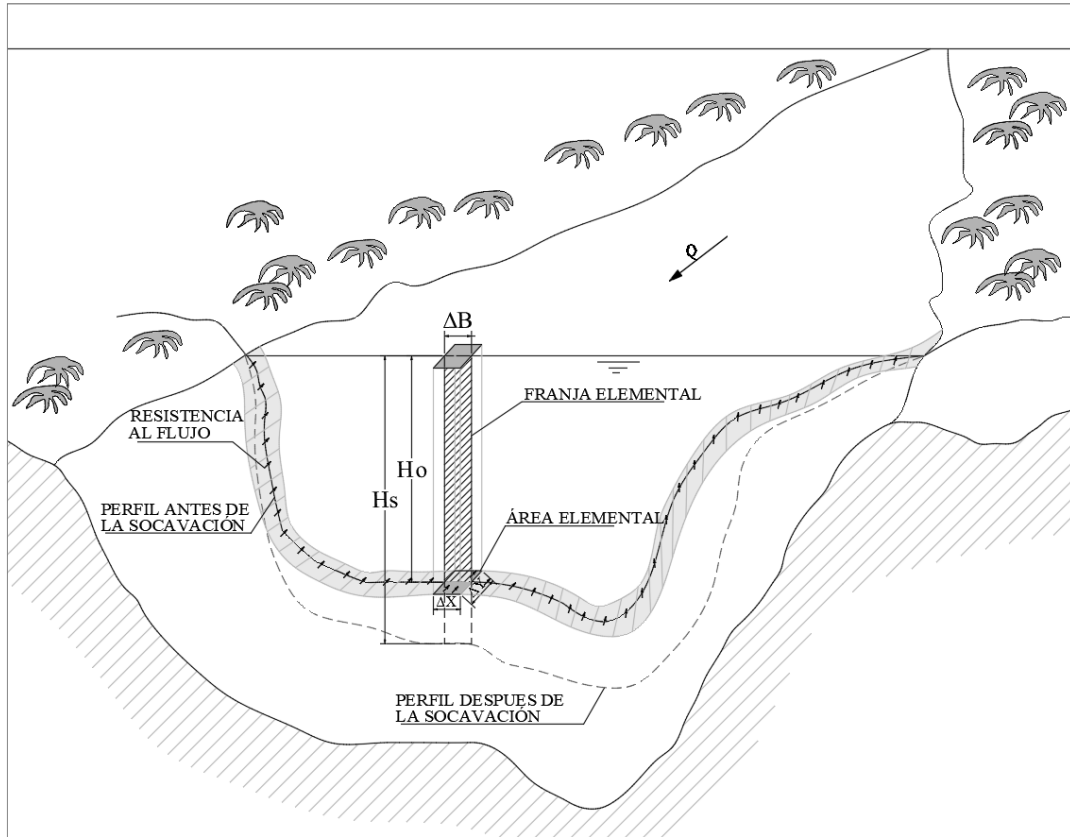


Figura 9: Socavación general en cauces definidos

Como se ha considerado una rugosidad variable en el espacio y tiempo el valor de  $\sqrt{S}/n$  es variable para cualquier punto de la sección y se denominara  $\alpha$ . Entonces:

$$Q = \alpha H_0^{5/3} \Delta B \quad (2.3)$$

En la franja en estudio, al incrementarse  $H_0$  y alcanzar un valor cualquiera  $H_s$ , la velocidad disminuye a un valor  $V_r$ . En función de la velocidad y el tirante del flujo,  $\Delta Q$  en la franja  $\Delta B$  esta expresada por:

$$\Delta Q = V_r H_s \Delta B \quad (2.4)$$

Igualando la ecuación (2.4) y (2.3), despejamos la velocidad real de la corriente:



$$V_r = \frac{\alpha H_0^{5/3}}{H_s} \quad (2.5)$$

La velocidad se detendrá cuando a una profundidad cualquiera alcanzada, el valor de  $V_r$  velocidad de la corriente capaz de producir arrastre y  $V_c$  velocidad que se necesita para que el fondo se degrade, lleguen a ser iguales.

$V_c=V_r$  es la condición de equilibrio

### c. Cálculo de la profundidad de la socavación en suelos homogéneos

En secciones homogéneas puede calcularse fácilmente la profundidad esperada de socavación dentro de la teoría de Lischtvan – Lebediev a partir del análisis hecho los párrafos anteriores. Aplicando la condición de equilibrio para materiales no cohesivos se deduce la profundidad de socavación. La ecuación final para el cálculo de la socavación es la siguiente:

$$H_s = \left[ \frac{\alpha h^{5/3}}{0.68 \beta D_m^{0.28}} \right]^{1/1+x}$$

### d. Factor de corrección a la profundidad de socavación

En la Figura 10 se muestra los valores de socavación luego del modelamiento numérico de flujos transitorios, los resultados muestran que la socavación crece de manera exponencial en la rama ascendente del hidrograma antes de llegar al caudal pico. Este crecimiento exponencial se da por la hipótesis de usar una velocidad media en la expresión de Lischtvan & Levediev.

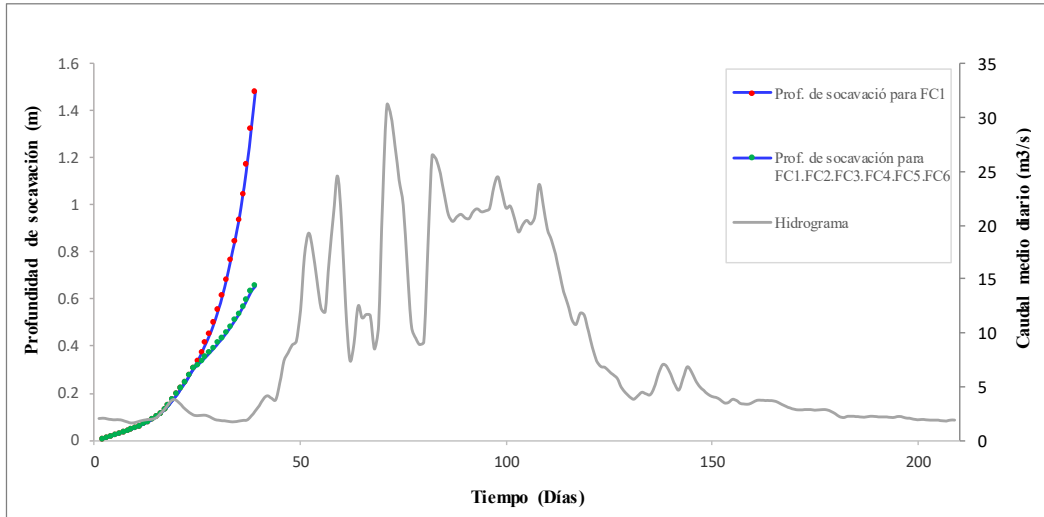


Figura 10: Variación de la socavación en la rama ascendente del hidrograma.

En la Figura 11 se presenta la comparación del valor del tirante del flujo y el factor de corrección, donde se observa que al aumentar el valor del tirante del flujo el valor del factor de corrección disminuye tendiendo a ser lo más cercano al fondo del cauce. Este factor de corrección es aplicado al valor de la profundidad de socavación obtenida al aplicar la teoría de Lischtvan & Levediev.

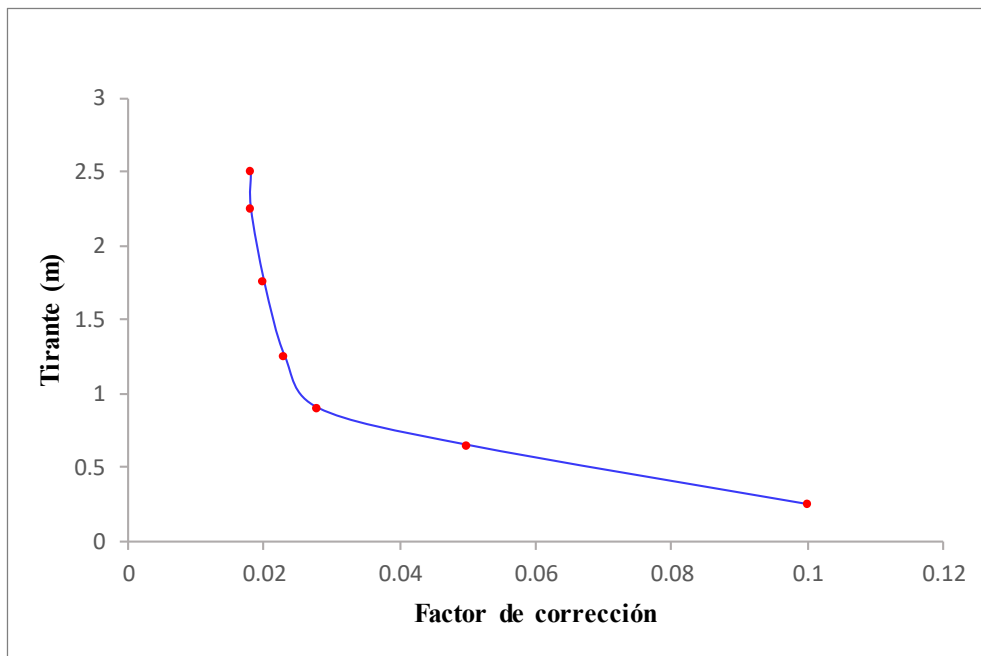


Figura 11: Aumento del valor del factor de corrección ante la disminución del tirante del flujo.

En el Cuadro 6 se muestra el resumen para aplicar el factor de corrección en el cálculo de socavación.

Cuadro 6: Criterio para aplicar el factor de corrección en el cálculo de socavación.

CRITERIO	FACTOR DE CORECCION	NOTA
$0 \text{ m} < Y < 0.5 \text{ m}$	$FC_1 = 0.10$	$Y_g = FC_1 \cdot Y_g$
$0.5 \text{ m} \leq Y < 0.8 \text{ m}$	$FC_2 = 0.05$	$Y_g = FC_2 \cdot Y_g$
$0.8 \text{ m} \leq Y < 1 \text{ m}$	$FC_3 = 0.028$	$Y_g = FC_3 \cdot Y_g$
$1 \text{ m} \leq Y < 1.5 \text{ m}$	$FC_4 = 0.023$	$Y_g = FC_4 \cdot Y_g$
$1.5 \text{ m} \leq Y < 2 \text{ m}$	$FC_5 = 0.020$	$Y_g = FC_5 \cdot Y_g$
$2 \text{ m} \leq Y < 2.5 \text{ m}$	$FC_6 = 0.018$	$Y_g = FC_6 \cdot Y_g$
$Y \geq 2.5 \text{ m}$	$FC_7 = 0.018$	$Y_g = FC_7 \cdot Y_g$
$Y_g = H_s - Y$		

#### 2.5.4. Acorazamiento en el cálculo de socavación

La granulometría de la capa superficial formada durante el proceso de socavación depende de las condiciones hidráulicas iniciales en el flujo y de la granulometría original de los sedimentos que experimentan movimiento durante la socavación: al aumentar la velocidad inicial del flujo para la misma granulometría el diámetro medio de la capa superficial crece (Rubio 2017).

La consideración fundamentada del fenómeno de acorazamiento natural puede elevar considerablemente la confiabilidad del pronóstico para procesos erosivos en suelos granulares y produce un efecto económico considerable en el diseño de canales y otras estructuras hidráulicas en los tramos de los ríos expuestos a la socavación (Rubio 2017).

Para la obtención del diámetro característico del suelo erosionado se emplea el  $D_{84}$  y  $D_{95}$ , que toma en cuenta el acorazamiento del lecho del río en dos capas a distinta profundidad de socavación. En el Cuadro 7 se muestra el resumen del criterio del acorazamiento en el cálculo de socavación.

Cuadro 7: Criterio para el acorazamiento en el cálculo de socavación.

<b>CRITERIO</b>	<b>NOTA</b>
$0 \text{ m} < Y_s < 0.7 \text{ m}$	$D_m = D_m$
$0.7 \text{ m} \leq Y_s < 1.5 \text{ m}$	$D_m = D_{84}$
$Y_s \geq 1.5 \text{ m}$	$D_m = D_{95}$
$Y_s = H_s - H_0$	

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio es un tramo del río Chillón, llamado sector Huatocay, localizado en la costa central del Perú, en el departamento de Lima. Sus aguas provienen de la Laguna de Chonta (Distrito de Huaros, Provincia de Canta) y de los glaciares de la Cordillera la Viuda. La Figura 12 muestra el area de estudio sector Huatocay del río Chillón

Esta ubicación corresponde aproximadamente a las siguientes coordenadas:

- Latitud :  $11^{\circ} 46.738'S$
- Longitud :  $76^{\circ} 59.080'W$
- Altitud : 411 msnm

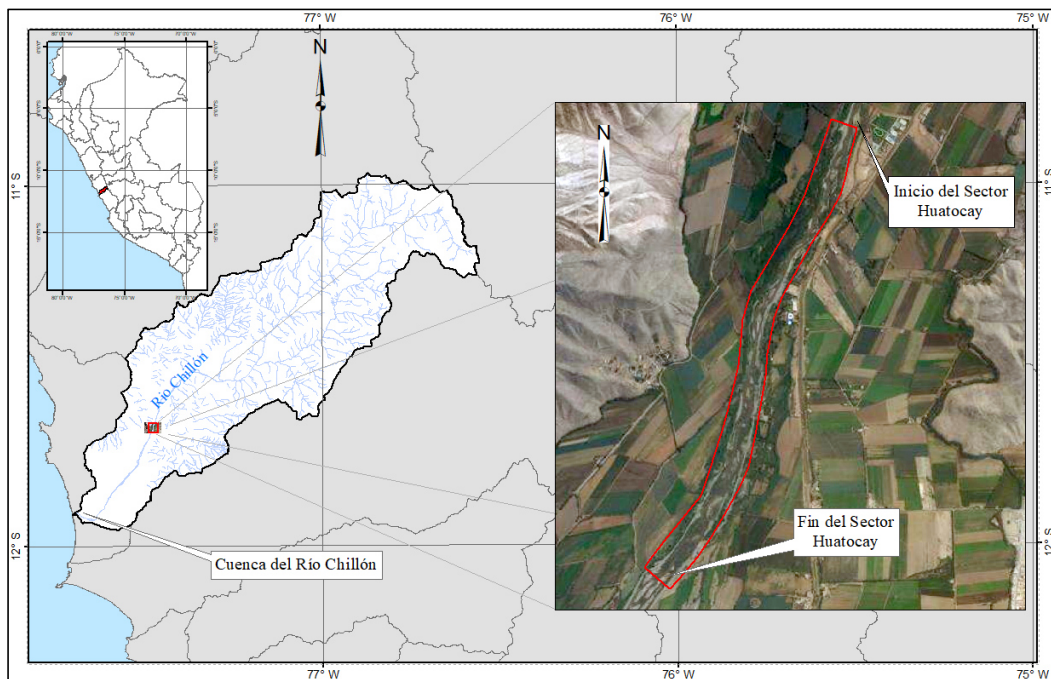


Figura 12: Área de estudio sector Huatocay del río Chillón

### 3.2. MATERIALES

Los materiales necesarios a utilizar en el trabajo de investigación son:

- Una laptop que tenga instalado los siguientes programas: Matlab R2015a, ArcGis 10.4.1, PythonWin 2.7.10, Iber 2.4.3, Microsoft office.
- Una estación total Topcon ES105 para para el levantamiento topográfico.
- Un ADCP Sontek HydroBoard II para mediciones de velocidad, caudal y altura de agua.
- Una balanza electrónica.

### 3.3. METODOLOGÍA

En la presente tesis se ha definido un algoritmo computacional 2D que implementa la metodología propuesta. El lenguaje de programación fue realizado en el entorno MATLAB R2015a, por su uso sencillo en las subrutinas y sus salidas gráficas sofisticadas.

La metodología de la investigación comprendió los siguientes aspectos:

- Finalizado los trabajos de descolmatación y encauzamiento presentados en el Anexo A, la sección transversal final es tipo canal trapezoidal con talud y fondo de cauce uniforme, en la Figura 13 y Figura 15 se muestra el estado inicial de la topografía.
- Levantamiento topográfico a detalle del área de trabajo, en el inicio (realizado el 28/8/2018) y final (realizado el 27/6/2019) del tránsito de la avenida. En el Anexo B se presenta el estado inicial y final de la topografía.
- Se realiza un programa de extracción de 17 muestras para la elaboración de la curva granulométrica y determinación del  $D_m$  y  $D_{84}$ , cuya distribución espacial a lo largo del río en 2 km se presenta en el Anexo F mapa F.1.
- Medición de la velocidad, profundidad de agua y caudal con un ADCP correspondiente a un caudal medio (7/2/2019) y alto (12/3/2019) en dos secciones de control, los resultados se presentan en el Anexo D.

- Determinación del periodo de retorno mediante un modelo probabilístico. Los resultados se presentan en el Anexo E.
- Discusión de las ecuaciones de resistencia al flujo en ríos aluviales con lechos de sedimentos gruesos y desarrollo del algoritmo.
- Planteamiento y definición del dominio computacional.
- Revisión del modelo conceptual de aguas pocas profundas de Saint-Venant 2D, luego se realiza el modelamiento numérico de flujo permanente en el sector Huatocay del río Chillón con el programa IBER 2.4.3, que resuelve las ecuaciones de Saint Venant 2D usando únicamente el módulo hidrodinámico.
- Implementación de un algoritmo computacional que integre el modelamiento numérico de flujo permanente, la elaboración de información de entrada para el modelamiento numérico de flujo permanente, las ecuaciones de factor de fricción variable en el espacio y tiempo y la socavación general.
- El periodo del modelamiento numérica es del 1/12/2018 a 31/5/2019 a paso diario y tamaño de celda de 0.5x0.5m.
- Experimentación numérica y su validación con la base de datos medidos.
- Discusión de las bondades y limitaciones de la metodología propuesta. Evaluación de escenarios y sensibilidad de parámetros.
- Formulación de las conclusiones y recomendaciones.

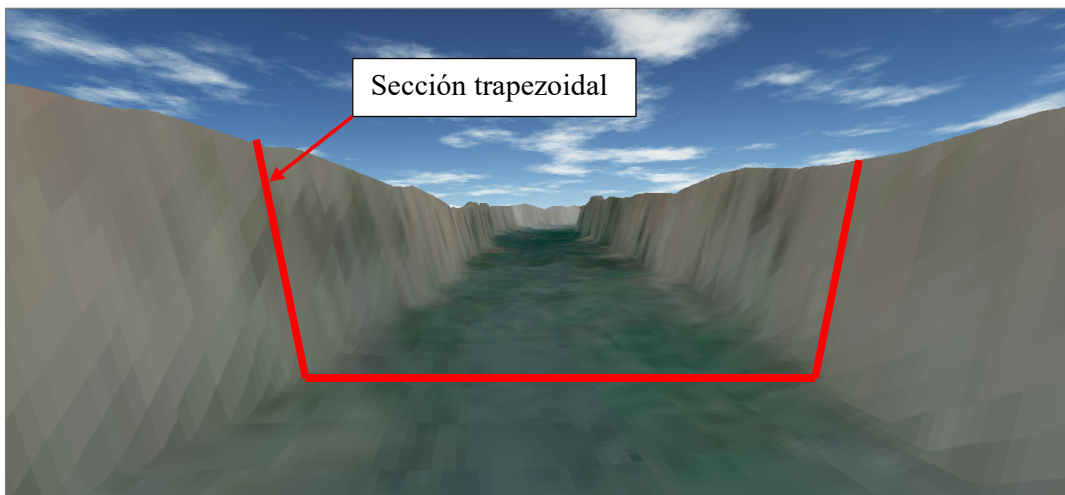


Figura 13: Levantamiento topográfico del área de trabajo, estado inicial  $t_{(\text{Días})}=0$

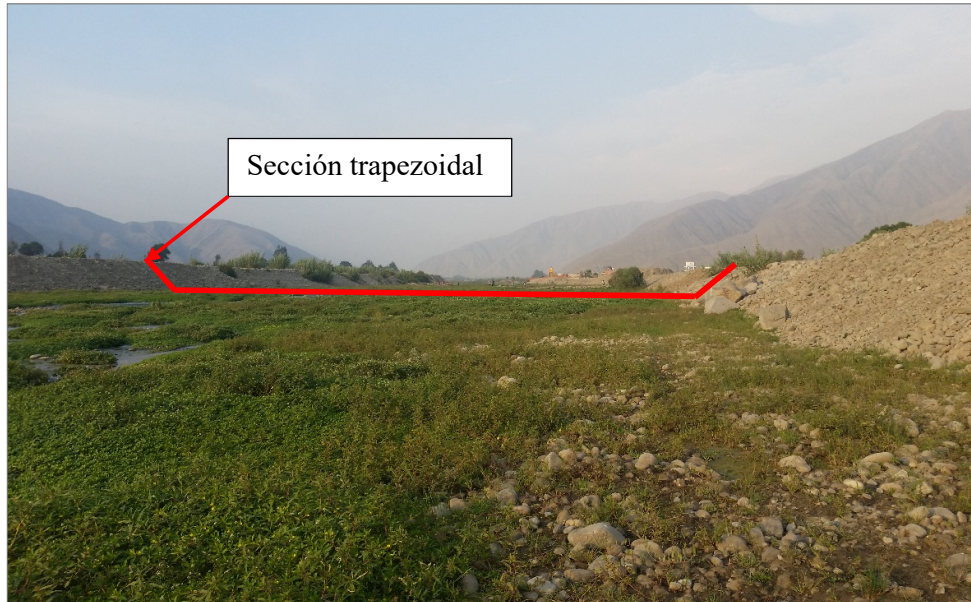


Figura 14: Sección trapezoidal del cauce del río Chillón, estado inicial  $t_{(\text{Días})}=0$

Con fines de mayor entendimiento del modelamiento numérico de flujos transitorios 2D con factor de fricción variable en el espacio y tiempo, se muestra el diagrama de flujo de la metodología propuesta en la Figura 15.

El procedimiento de cálculo del algoritmo consiste en primer lugar en elaborar una plantilla de modelo bidimensional asignándole el tamaño de malla  $\Delta x = \Delta y = 0.5\text{m}$ , condiciones de contorno y condiciones iniciales. Para el primer paso de tiempo  $t_i$ , al modelo bidimensional se le asigna un factor de fricción inicial  $n_i$ , caudal  $Q_i$ , y condición de lecho rígido, los resultados de tirante de flujo  $Y_i$ , y número de Froude  $Fr_i$ , de esta primera simulación serán los datos de entrada para los modelos de factor de fricción, además se ingresa el diámetro  $D_{84}$ . Se analiza si el factor de fricción inicial y el nuevo  $n_{i+1}$  es admisible, si no es admisible el factor de fricción, se asigna al modelo bidimensional el nuevo factor de fricción manteniendo las mismas condiciones iniciales, este procedimiento culmina hasta obtener un factor de fricción admisible  $n_i$ . Con este factor de fricción admisible se inicia el cálculo de la socavación general considerando el acorazamiento, para esto se ingresa el tirante del flujo  $Y_i$ , diámetro  $D_m$ ,  $D_{84}$ ,  $D_{95}$ , pendiente  $S$ , factor de fricción  $n_i$ , periodo de retorno  $Tr_i$ , determinándose un lecho rígido nuevo. Para el nuevo paso de tiempo  $t_{i+1}$  se asigna el nuevo lecho rígido, nuevo caudal  $Q_{i+1}$ , manteniendo el factor de fricción anterior  $n_i$  en el modelo bidimensional. Finalmente se repite todo el procedimiento de cálculo para cada paso de tiempo.



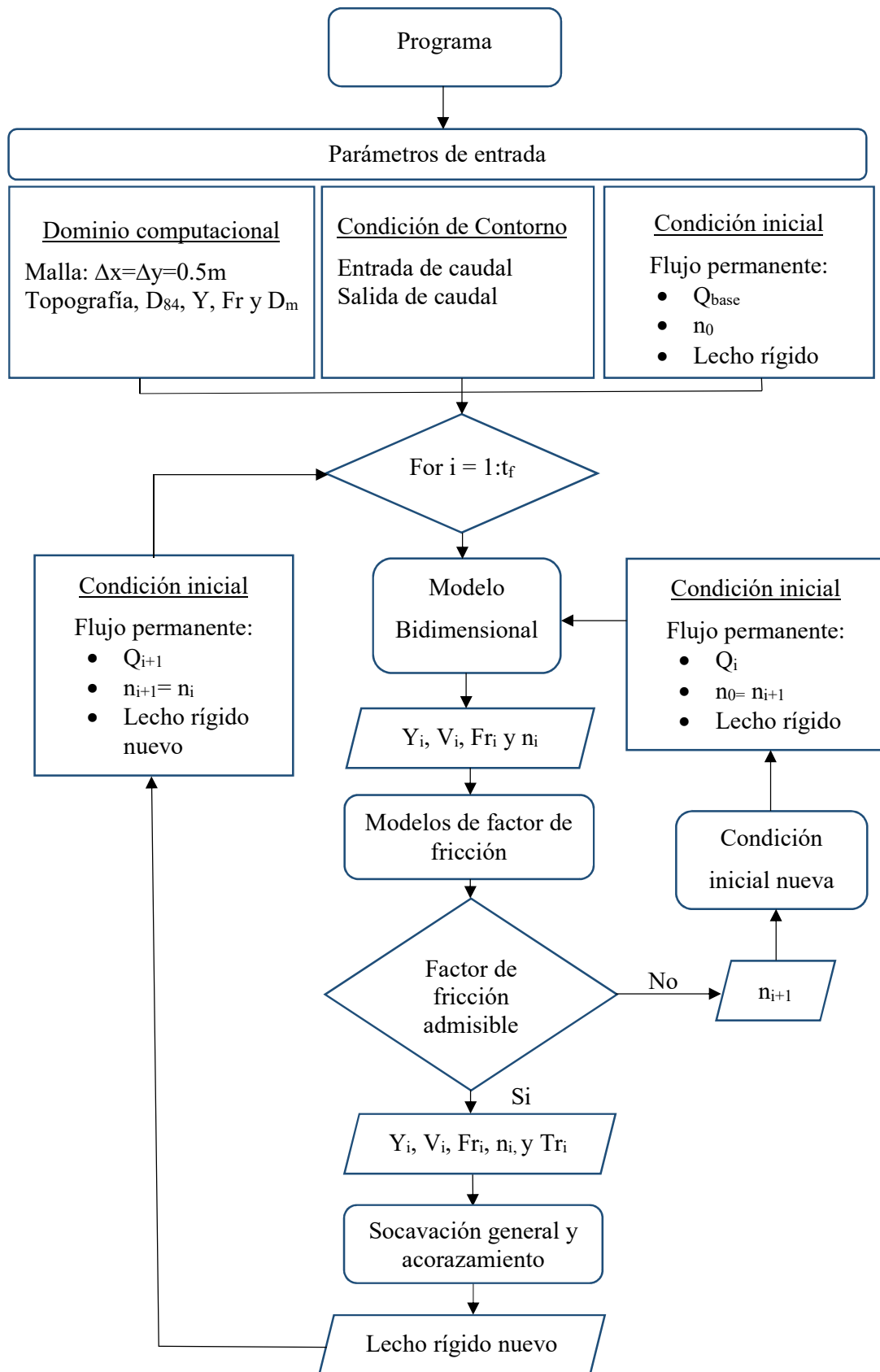


Figura 15: Diagrama de flujo de la metodología propuesta

En la Figura 16 se presenta el diagrama de flujo general donde se detalla el uso del programa principal y subprogramas elaborados, el programa principal controla los subprogramas Gis y Transitorio además tiene la opción modelo hidráulico. El diagrama de flujo muestra como primer nivel de la metodología el subprograma Gis, este genera los datos de ingreso en formato raster para el modelamiento hidráulico como  $D_{84}$ ,  $D_{95}$ ,  $D_m$  y topografía. Luego en el segundo nivel de la metodología con la opción Modelamiento hidráulico se abre el entorno del programa IBER, el cual resolverá las Ecuación de Saint Venant bidimensional, se genera una plantilla de extensión Gid que tiene como datos de ingreso los archivos raster generados con el subprograma Gis, las condiciones de contorno e inicial.

En un tercer nivel de la metodología se inicia el modelamiento para el primer paso de tiempo de los 182 días con el subprograma Transitorio, el entorno de este subprograma permite asignar los caudales diarios para cada paso de tiempo y abre la plantilla del IBER creado en el segundo nivel, se resuelve las ecuaciones de Saint Venant bidimensional y se exporta los resultados que serán datos de ingreso para los modelos de factor de fricción, Este subprograma calcula el nuevo factor de fricción con los resultados del modelamiento hidráulico y los compara. Si el valor del factor de fricción no es admisible el subprograma regresa al inicio de este nivel para repetir todo el proceso de cálculo, pero con el ultimo valor de factor de fricción calculado. Si el valor del factor de fricción es admisible se calcula la socavación general por el método de Lischtvan – Lebediev considerando el acorazamiento, luego se guarda todos los resultados de cada paso de tiempo. Finalmente, se continua con el siguiente paso de tiempo ingresando su correspondiente caudal, el nuevo lecho rígido y factor de fricción (nueva condición inicial para el nuevo paso de tiempo) repitiendo todos los pasos descritos del tercer nivel de la metodología propuesta, hasta completar el tiempo de simulación de 182 días.

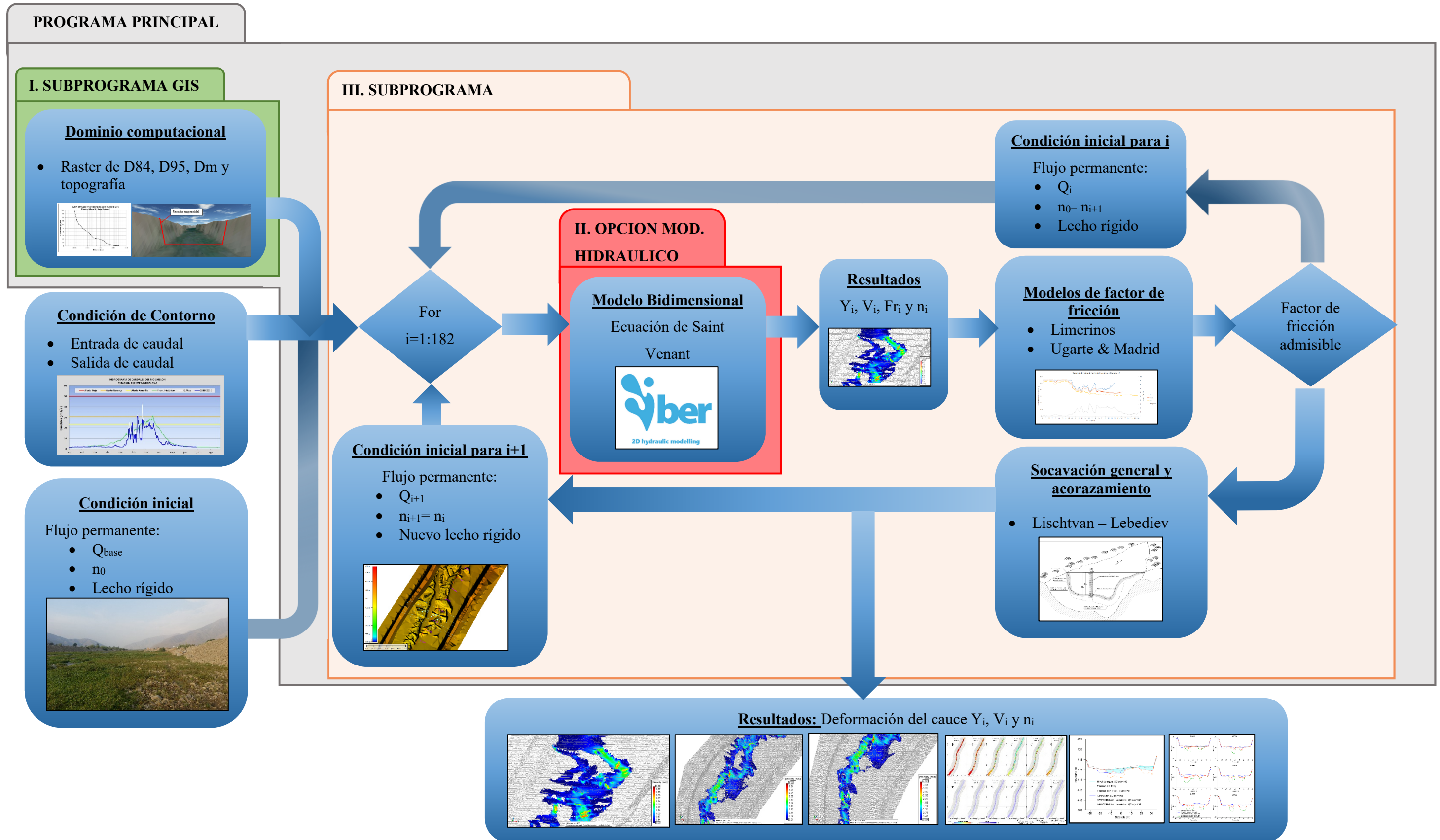


Figura 16: Diagrama de flujo general de la metodología propuesta y del programa elaborado

## IV. RESULTADOS

### 4.1. PROGRAMA PARA EL MODELAMIENTO NUMÉRICO DE FLUJOS TRANSITORIOS 2D CON FACTOR DE FRICCIÓN VARIABLE EN EL ESPACIO Y TIEMPO.

El programa es desarrollado en el entorno MATLAB R2015a, tiene un tamaño de 148 Mb y el tiempo de ejecución bajo condiciones de flujo permanente es de 2.2 a 4 hrs para caudales altos y bajos respectivamente. El programa está compuesto de un programa principal (Figura 17), la opción Mod. Hidráulico permite abrir el entorno del IBER y guardar los archivos ASCII iniciales de velocidad, tirante del flujo, número de Froude y factor de fricción. Además, contiene dos subprogramas (Gis y Transitorio),

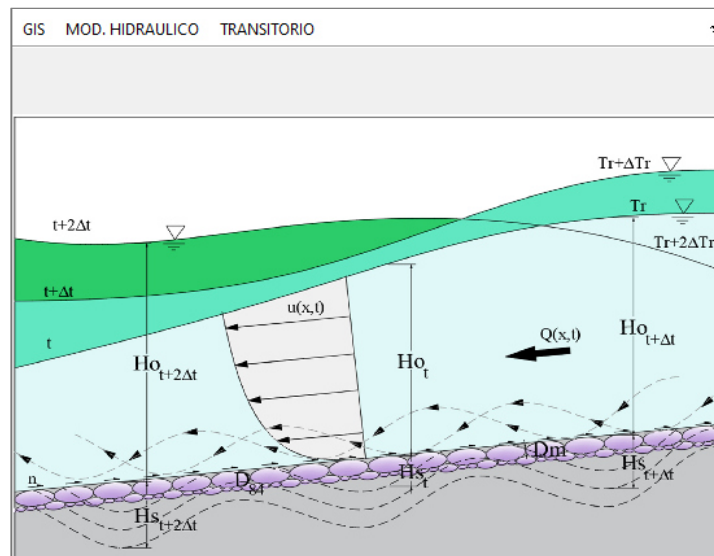


Figura 17: Ventana del programa principal

El primer subprograma Gis (Figura 18) permite abrir el entorno de ArcGis y además genera los archivos shapefile de  $D_{84}$ ,  $D_{95}$  y  $D_m$ , factor de fricción inicial y el raster de topografía.

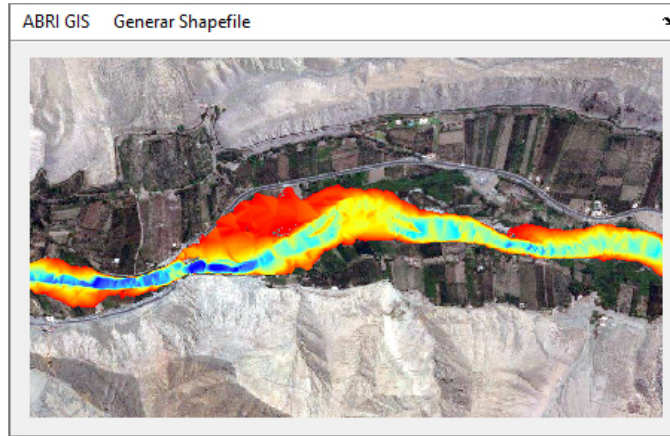


Figura 18: Ventana del subprograma Gis

El segundo subprograma Transitorio (Figura 19) inicia el modelamiento transitorio, además permite ingresar el hidrograma bajo condición de flujo permanente a cada paso tiempo. Como resultado final se obtiene los archivos ASCII de velocidad, tirante del flujo, número de Froude, factor de fricción y la nueva topografía con socavación general.

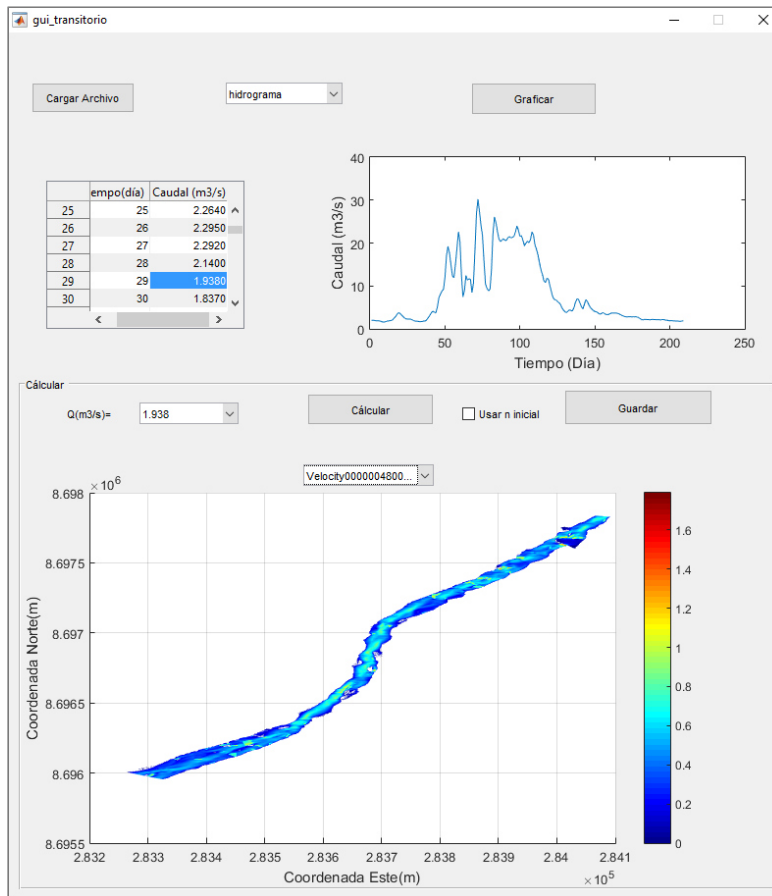


Figura 19: Ventana del subprograma Transitorio

La ejecución del programa se realizó en una computadora con procesador Intel Core i7 - 6700HQ 2.59 GHz, memoria RAM de 24.0 GB, tarjeta de video de 3 GB GDDR5 VRAM y sistema operativo Windows 10 Home.

#### **4.2. MODELAMIENTO NUMÉRICO DE FLUJOS TRANSITORIOS 2D CON FACTOR DE FRICCIÓN VARIABLE EN EL ESPACIO Y TIEMPO EN EL SECTOR HUATOCAY DEL RÍO CHILLÓN.**

El modelamiento numérico en el sector Huatocay del río Chillón fue llevada a cabo en un área de 0.26 km<sup>2</sup>, a lo largo de 2 km, el mallado está conformado por 1,041,969 de elementos tipo cuadrilátero con tamaños de celda de 0.5x0.5m.

La estación hidrométrica del Puente Magdalena es la más cercana al área de estudio, aproximadamente a 21 km aguas arriba de la condición de contorno de entrada. Mediciones del caudal realizadas con el ADCP el 7/2/2019 y 12/3/2019 difieren en 13.67% (Cuadro 8) y 12.64% (Cuadro 9) respectivamente con el valor registrado en la estación Puente Magdalena. Esto indicaría que el aporte principal a la entrada del modelo es la cabecera de cuenca y es registrada por la estación del Puente Magdalena.

Para el modelamiento numérico la información del hidrograma de caudales medio diarios registrados es dividido en pasos de tiempo diario y escalonado, se realiza para un periodo de 182 días desde el 1/12/2018 al 31/5/2019. El caudal fue asociado a un periodo de retorno según la distribución de Gumbel, para caudales bajos como 2.85 m<sup>3</sup>/s se le asignó el periodo de retorno de 1 año, y para el caudal máximo de 31.12 m<sup>3</sup>/s el periodo de retorno de 75.6 años.

Se considera una cobertura vegetal al inicio del modelamiento como se muestra en la Figura 20 y el Anexo C, luego se actualiza el 17/01/2019 y 21/2/2019 debido a los cambios producidos por la avenida a lo largo del periodo de modelamiento. En el algoritmo esta resistencia adicional por la cobertura vegetal se considera un 10% adicional.

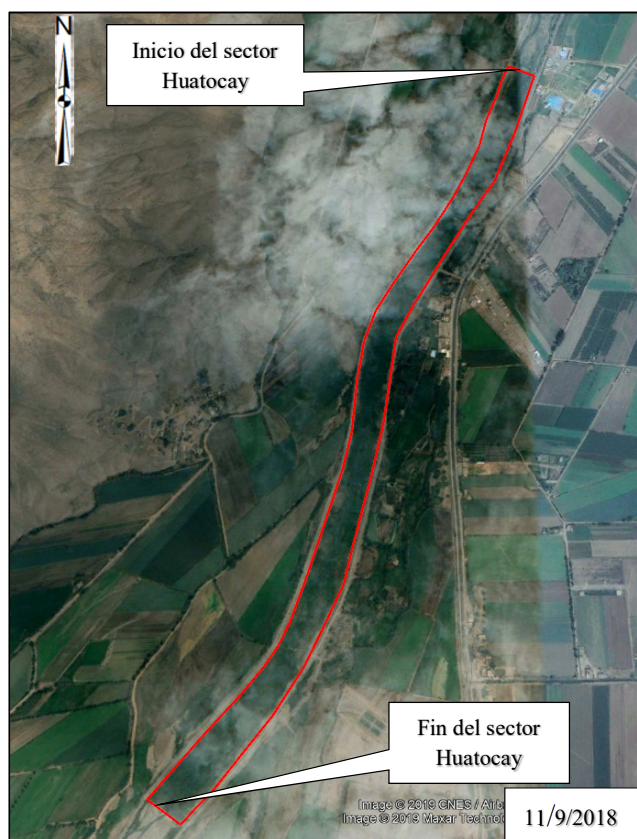


Figura 20: imagen satelital de la cobertura vegetal en el sector Huatocay del río Chillón  
Fuente: Google Earth (2018).

### 4.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El parámetro del modelo que se analiza es el factor de fricción, permitiendo obtener la sensibilidad de la variable tirante de agua. El modelo numérico considera un hidrograma, factor de fricción variable en el espacio y tiempo, por ello se analiza el tirante de agua de una celda de 0.5x0.5m para un intervalo de tiempo de simulación, como se muestra en la Figura 21.

La Figura 21 presenta un primer tramo donde la deformación del cauce no es significativa y otro donde si es significativo. Se analiza el segundo tramo por presentar una variación significativa de la variable tirante de agua. El segundo tramo con variación de caudal de 7.34 m<sup>3</sup>/s a 30.18 m<sup>3</sup>/s presenta un incremento del tirante de agua estimada entre 20% y 68% en el tiempo que se deforma el cauce. Estos porcentajes de incremento del tirante de agua no es solo por la variación del factor de fricción, también está influenciada por la deformación del cauce, es decir por la presencia de mesoformas. Para

la variación del factor de fricción de 0.032 a 0.040 (factores de fricción bajo) el valor del tirante de agua es alto. Pero para la variación del factor de fricción de 0.040 a 0.055 (factores de fricción alto) el valor de tirante de agua es bajo, es decir que la sensibilidad de la variable tirante de agua es media, si se varia el factor de fricción de alto a bajo.

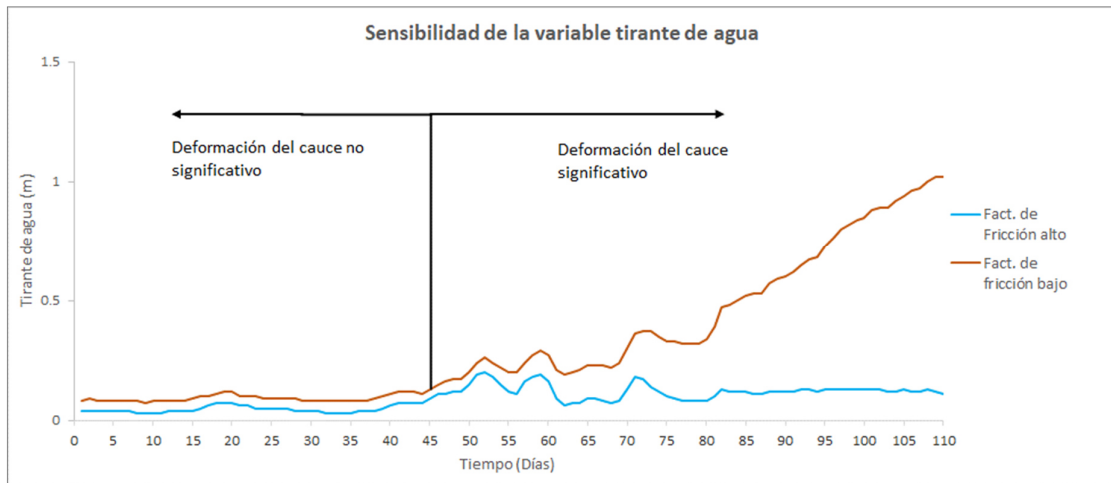


Figura 21: Sensibilidad del tirante de agua por la variación del factor de fricción.

#### 4.4. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

El objetivo principal de la realización de los aforos en campo con un ADCP es el de disponer de una medida de los campos de velocidad y profundidad de agua, en las secciones transversales de control Nro. 1 aforado el 7/2/2019 y Nro.2 aforado el 12/3/2019. Para poder luego contrastar con los resultados del modelamiento numérico, en el Anexo F mapa F.2 se presenta la ubicación de las secciones de control.

Realizado los aforos de campo se procedió al modelamiento numérico para el día 7/2/2019, en el Cuadro 8 se presenta la comparación de los resultados para la sección de control Nro. 1. De igual manera se realiza el modelamiento numérico para el día 12/3/2019, en el Cuadro 9 se presenta la comparación de los resultados para la sección de control Nro. 2.



Cuadro 8: Comparación de los parámetros obtenidos en el aforo del día 7/2/2019 en la sección de control Nro. 1 y la modelación  $t_{(Días)}=69$ .

Parámetros	ADCP	IBER	Error (%)
Caudal (m3/s)	9.44	10.73	13.67
Profundidad media de agua (m)	0.35	0.43	22.85
Velocidad máxima (m/s)	1.54	1.9	23.38

Cuadro 9: Comparación de los parámetros obtenidos en el aforo del día 12/3/2019 en la sección de control Nro. 2 y la modelación  $t_{(Días)}=102$ .

Parámetros	ADCP	IBER	Error (%)
Caudal (m3/s)	23.63	20.643	12.64
Profundidad media de agua (m)	0.65	0.7	7.69
Velocidad máxima (m/s)	3.45	2.9	25.64

En el proceso de validación se detectaron ligeras diferencias en los calados, velocidades, y caudal según el Cuadro 8 y Cuadro 9. En la Figura 22 y Figura 24 se presenta la comparación de los perfiles de velocidad obtenidos con el ADCP y la modelación en las secciones transversales de control Nro. 1 y 2 respectivamente.

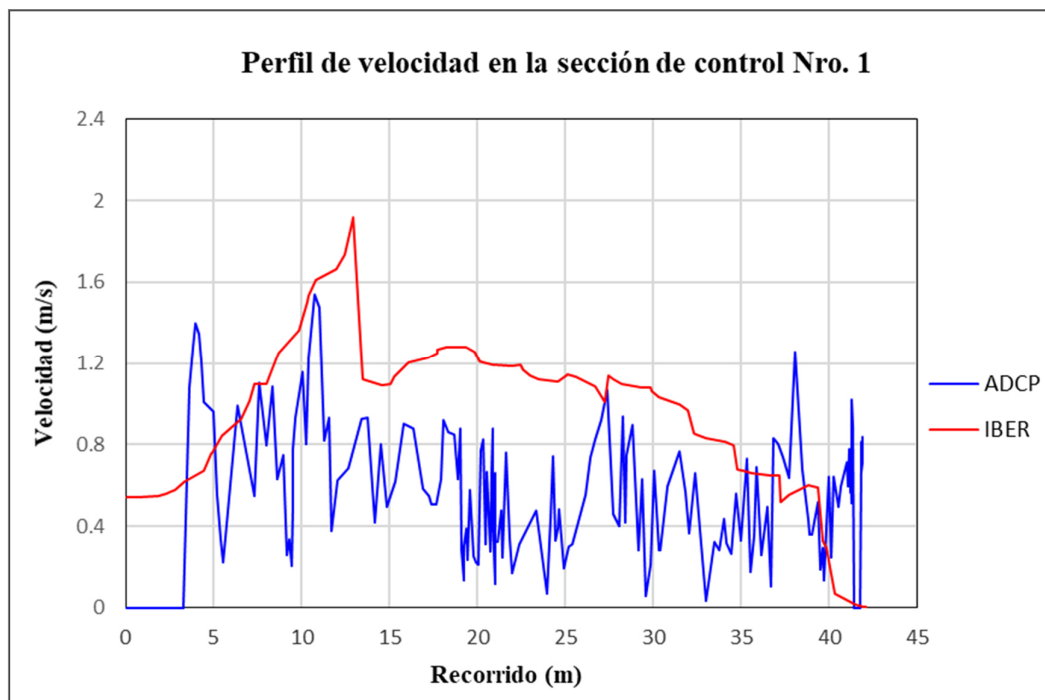


Figura 22: Comparación de los perfiles de velocidad en la sección de control Nro. 1.

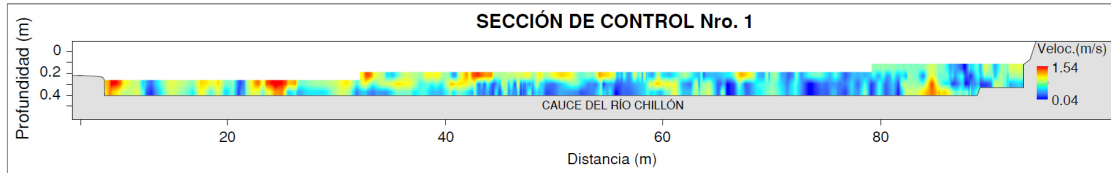


Figura 23: Campo de velocidades obtenidos en la sección de control Nro. 1 con el ADCP el día 7/2/2019,  $t_{(Días)}=69$ .

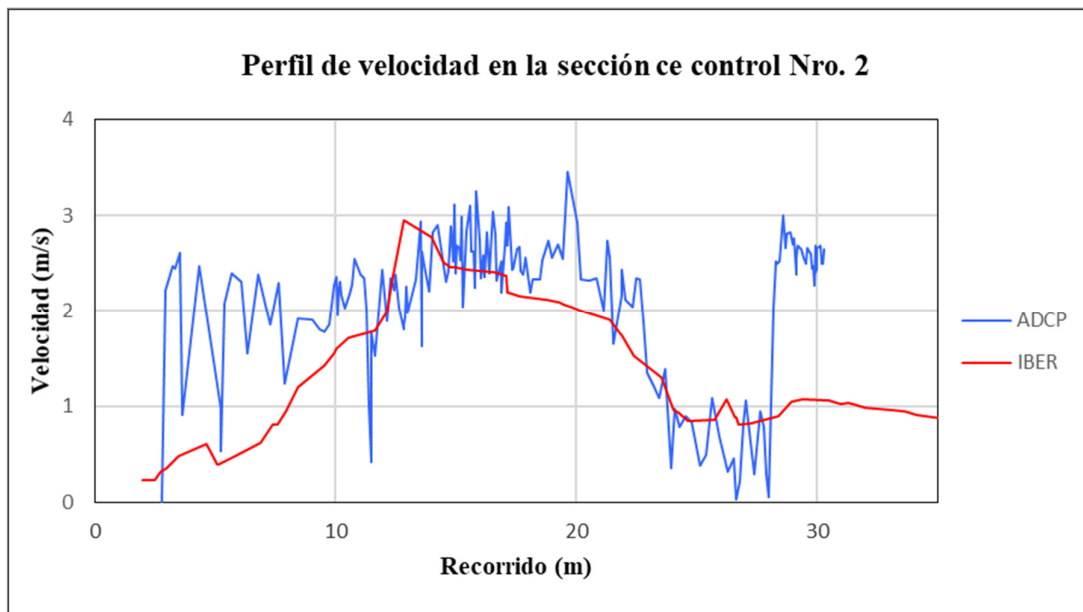


Figura 24: Comparación de los perfiles de velocidad en la sección de control Nro. 2.

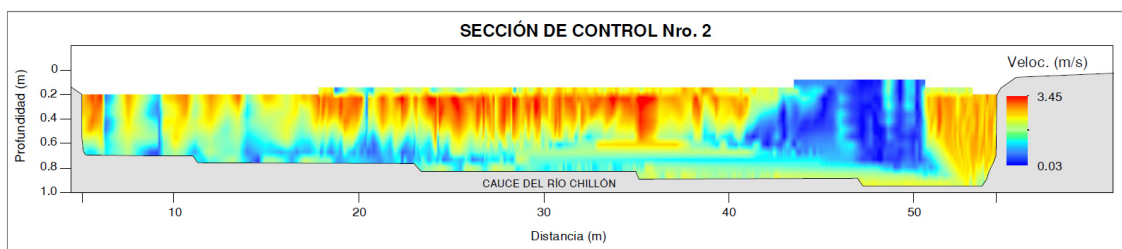


Figura 25: Campo de velocidades obtenidos en la sección de control Nro. 2 con el ADCP el día 12/3/2019,  $t_{(Días)}=102$ .

En la Figura 22 y Figura 24 se observa que los perfiles de velocidad obtenidos con el ADCP para la sección de control Nro. 1 y 2 respectivamente, donde la modelación se ajustan en los valores máximos. Además en la Figura 23 se muestra el campo de velocidades en las secciones de control Nro. 1, con un valor mínimo de 0.04 m/s y un máximo de 1.54 m/s asociado a un caudal de 8.88 m<sup>3</sup>/s del hidrograma escalonado. En la Figura 25 el campo de velocidades en las secciones de control Nro. 2 muestra un

valor mínimo de 0.03 m/s y un máximo de 3.45 m/s asociado a un caudal de 20.64 m/s del hidrograma escalonado.

Para la validación se compara el nivel topográfico medido en campo con el resultados del modelo numérico para el paso de tiempo 69 y 102, como se muestra en la Figura 26 y Figura 27 respectivamente.

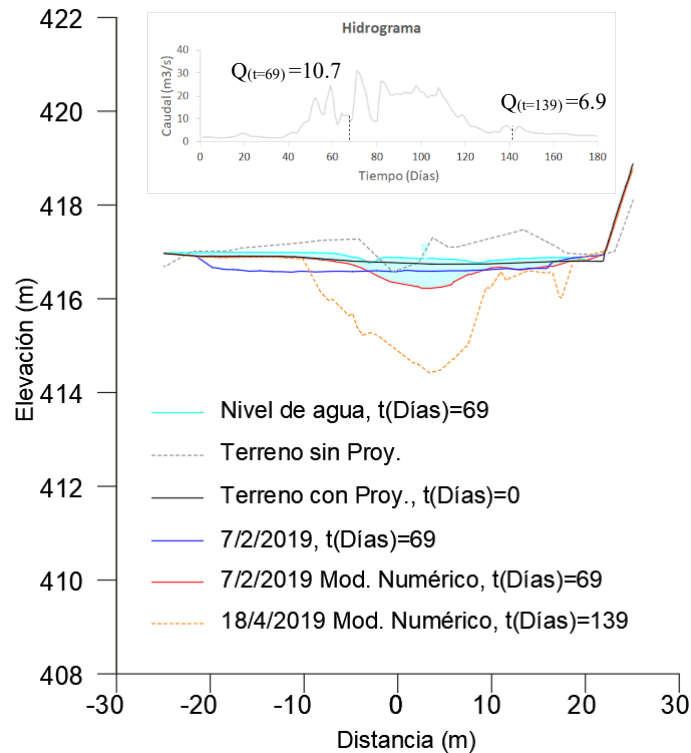


Figura 26: Comparación del nivel topográfico en la sección de control Nro. 1.

En la Figura 26 se muestra la variación temporal del terreno en el tiempo, para la sección de control Nro. 1. Para el paso de tiempo  $t_{(Días)}=69$  el resultado del modelo numérico se aproxima a lo medido, pero para el paso de tiempo  $t_{(Días)}=139$  difieren los resultados. De igual manera en la Figura 27 para la sección de control Nro. 2 y paso de tiempo  $t_{(Días)}=102$ , los resultados del modelo se ajustan a lo medido, pero para el paso de tiempo  $t_{(Días)}=139$  difieren los resultados. Esto indica que el modelo utilizado para el cálculo de la socavación está limitado a un rango de aplicación del nivel de agua, que es analizada en el capítulo de resultados.

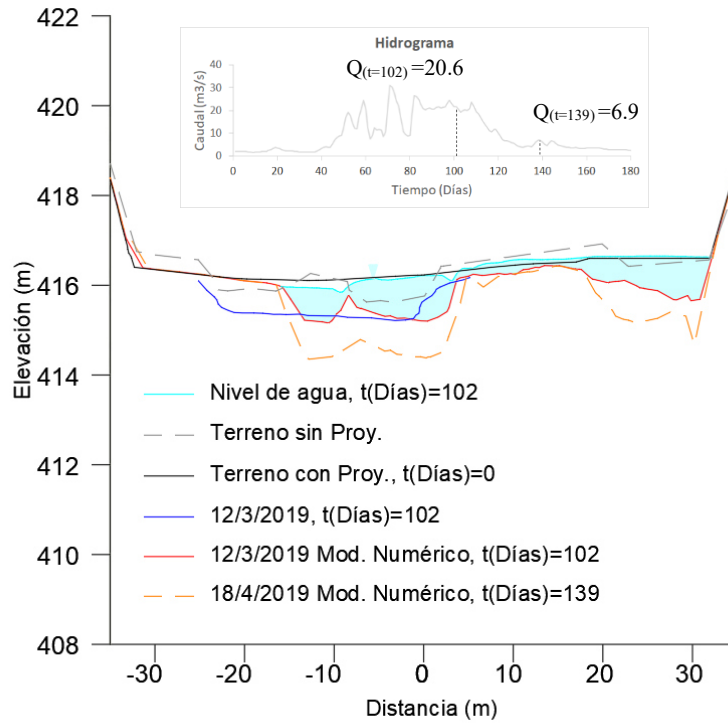


Figura 27: Comparación del nivel topográfico para en la sección de control Nro. 2.

#### 4.5. RESULTADOS

Finalizado los trabajos de descolmatación el 28/8/2018 en la zona de estudio del río Chillón, la morfología resultante es plana, luego se inició al periodo de lluvias representado por el hidrograma de la Figura 5. Durante el periodo de lluvias se presento una variabilidad morfológica en planta mostrado en la Figura 28-b, principalmente debido a la formación de mesoformas como la barra central MS-1 en el cauce entre las progresivas km 0+380 y km 0+420.

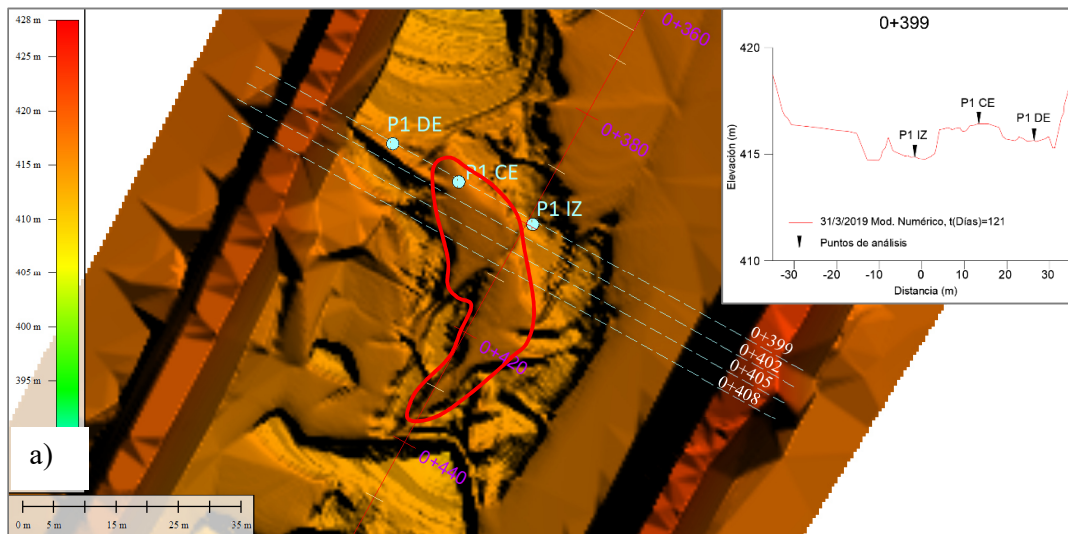


Figura 28: Variabilidad morfológica del río Chillón. (a) Resultados de la formación de la mesoforma MS-1 del modelo numérico, (b) Formación de la mesoforma MS-1 entre las progresivas km 0+380 y km 0+420.

En la Figura 28-a se muestra la formación de la barra central MS-1 determinado por el modelo numérico en el paso de tiempo  $t_{(Días)}=121$  (31/3/2019), el resultado numérico es aproximado a lo observado el 27/6/2019 en el río Chillón, mostrado en la Figura 28-b. Se analizan algunas secciones transversales de la barra central, en donde se aprecia lo aproximado de los resultados medidos en campo con el modelo numérico, presentados en la Figura 29. Se analiza la variación temporal del factor de fricción, para los puntos de análisis P1 margen izquierda (P1 IZ), centro (P1 CE) y derecha (P1 DE), ubicados en la sección transversal km 0+399 de la barra central mostrado en la Figura 30-b.

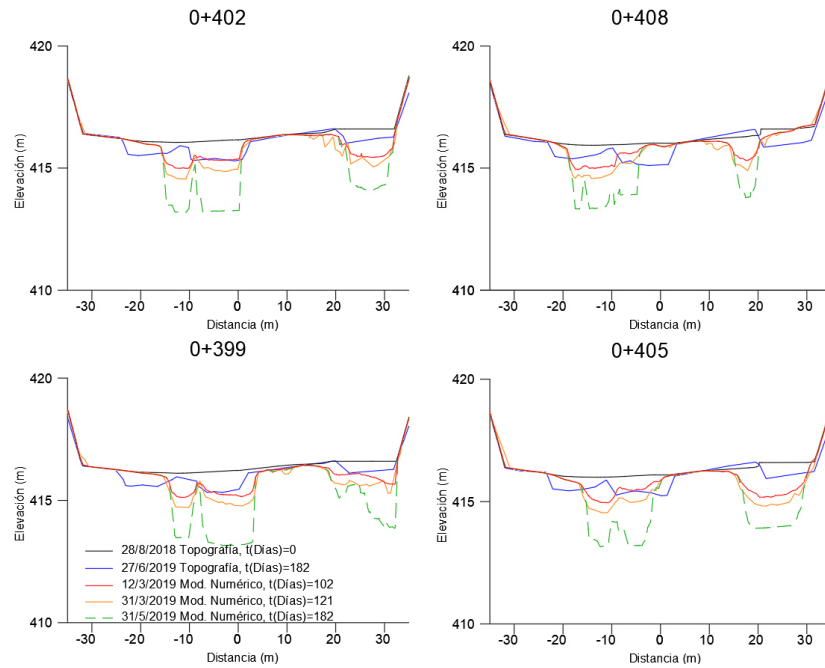


Figura 29: Variación temporal de la mesoforma MS-1 entre las progresivas km 0+380 y km 0+420.

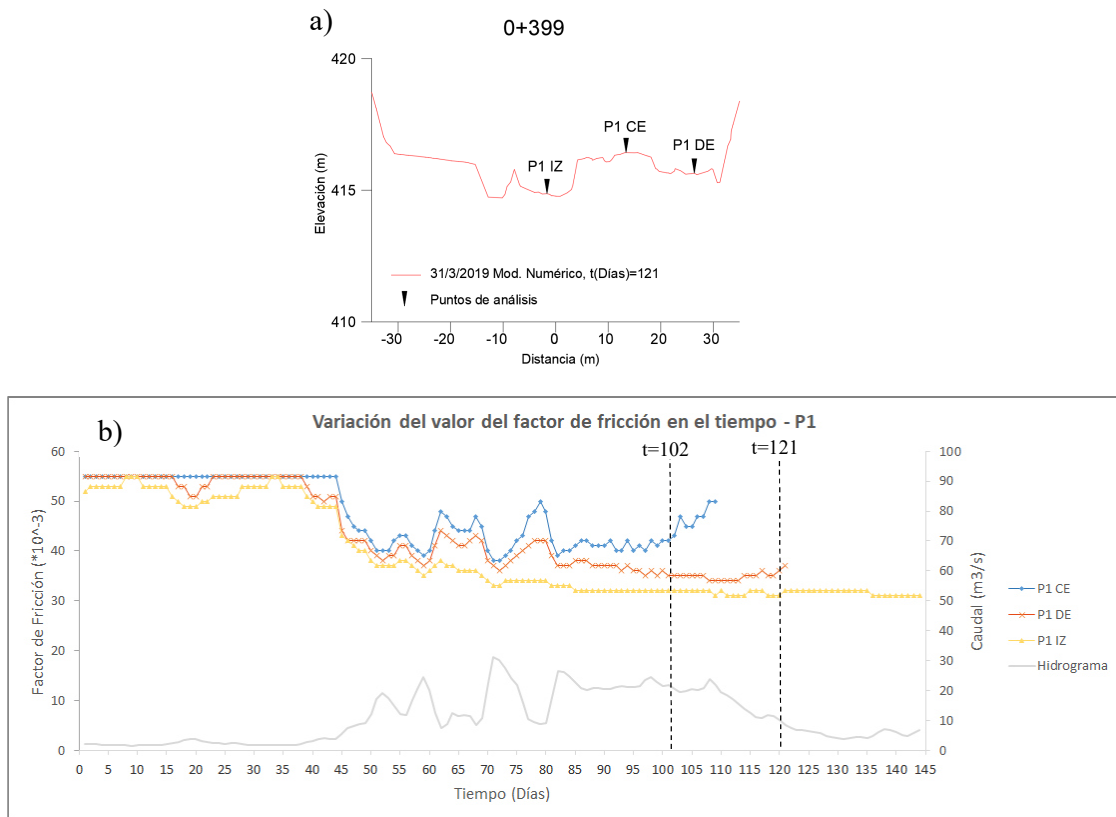


Figura 30: Variación temporal del factor de fricción del río entre las progresivas km 0+380 y km 0+420. (a) Ubicación de los puntos de análisis en la sección km 0+399 (b) Variación temporal del factor de fricción en los puntos de análisis, ubicados en la sección km 0+399 de la mesoforma MS-1.

En la Figura 30-b se observa valores altos del factor de fricción para el punto más alto de la barra central (P1 CE), desde el inicio de la rama ascendente hasta el inicio de la rama descendente del hidrograma. También se observa que los valores de factor de fricción para los puntos de análisis (P1 CE, P1 DE y P1 IZ) tienen una relación inversa con el caudal, en toda la rama ascendente, hasta el inicio de la rama descendente del hidrograma característico en ríos aluviales con lechos de sedimentos gruesos.

En la Figura 31 se muestra la mesoforma MS-1, rodeada por el campo de velocidades que genera los cambios morfológicos. La velocidad por la margen izquierda es mayor a 2 m/s y mucho menor en la margen derecha, para el paso de tiempo  $t_{(Días)}=120$ .

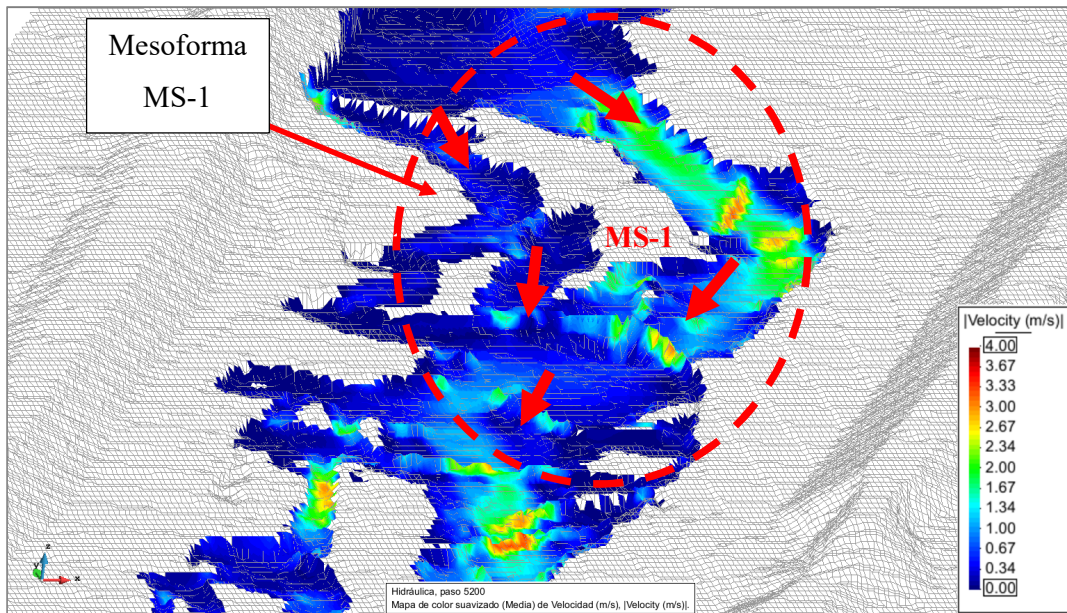


Figura 31: Campo de velocidad alrededor de la mesoforma MS-1 para  $t_{(Días)}=120$ .

La variabilidad morfológica en planta también se presentó en otra zona mostrada en la Figura 32-b, principalmente debido a la formación de mesoformas como la barra central MS-2 en el cauce, entre las progresivas km 0+620 y km 0+740. En la Figura 32-a se muestra la formación de la barra central determinado por el modelo numérico en el paso de tiempo  $t_{(Días)}=121$  (31/3/2019), el resultado numérico es aproximado a lo observado el 27/6/2019 en el río Chillón, mostrado en la Figura 32-b.

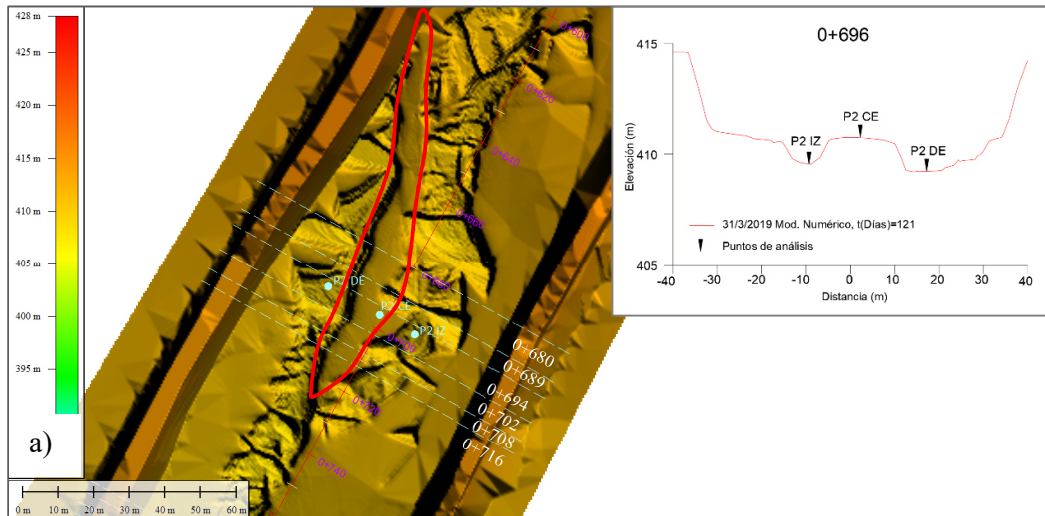


Figura 32: Variabilidad morfológica del río Chillón. (a) Resultados de la formación de la mesoforma MS-2 del modelo numérico, (b) Formación de la mesoforma MS-2 entre las progresivas km 0+620 y km 0+740.

Se analizan algunas secciones transversales de la barra central MS-2, en donde se aprecia lo aproximado de los resultados medidos en campo con el modelo numérico, presentados en la Figura 33.



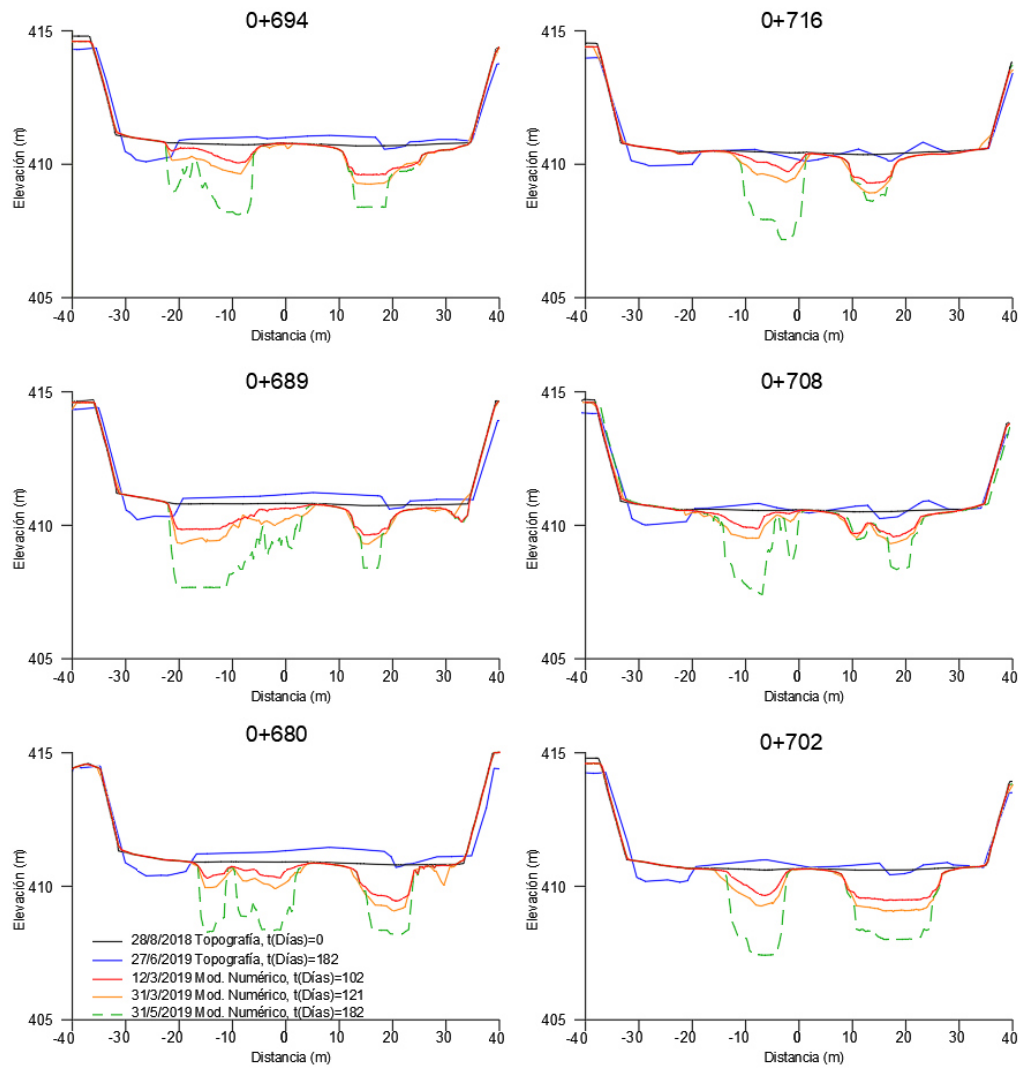


Figura 33: Variación temporal de la de la mesoforma MS-2 entre las progresivas km 0+620 y km 0+740

En la Figura 34-b se observa valores altos del factor de fricción en el punto más alto de la barra central (P2 CE), desde el inicio de la rama ascendente hasta el inicio de la rama descendente del hidrograma. También se observa que los valores de factor de fricción para los puntos de análisis (P2 CE, P2 DE y P2 IZ) tienen una relación inversa con el caudal, en toda la rama ascendente, hasta el inicio de la rama descendente del hidrograma.

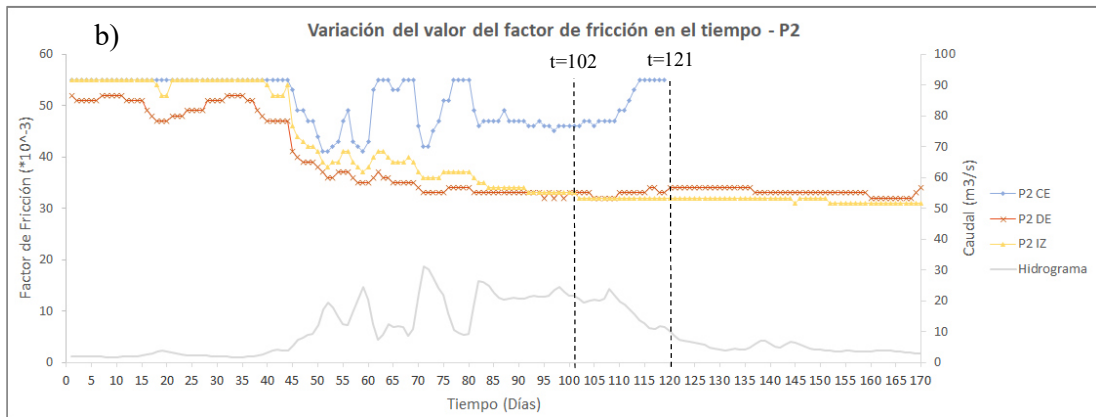
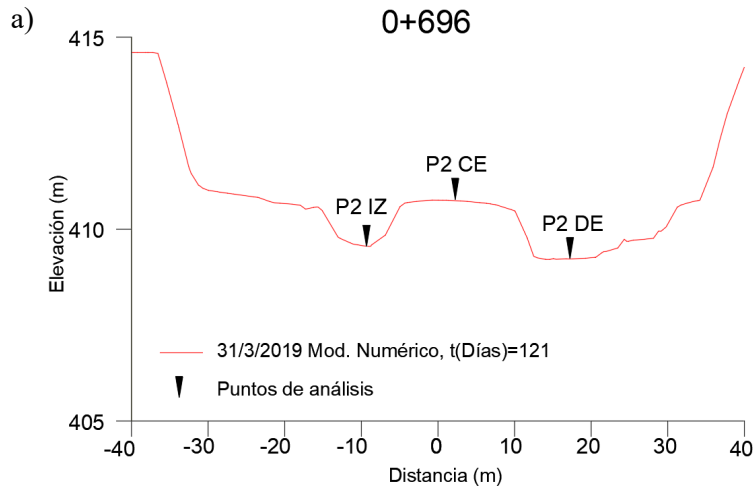


Figura 34: Variación temporal del factor de fricción del río entre las progresivas km 0+620 y km 0+740. (a) Ubicación de los puntos de análisis en la sección km 0+696 (b) Variación temporal del factor de fricción en los puntos de análisis, ubicados en la sección km 0+696 de la mesoforma MS-2.

En la Figura 35 se muestra la mesoforma MS-2, rodeada por el campo de velocidades que genera los cambios morfológicos. La velocidad por la margen izquierda es mayor a 1.4 m/s y mucho menor por la margen derecha, para el paso de tiempo  $t_{(Días)}=121$ .

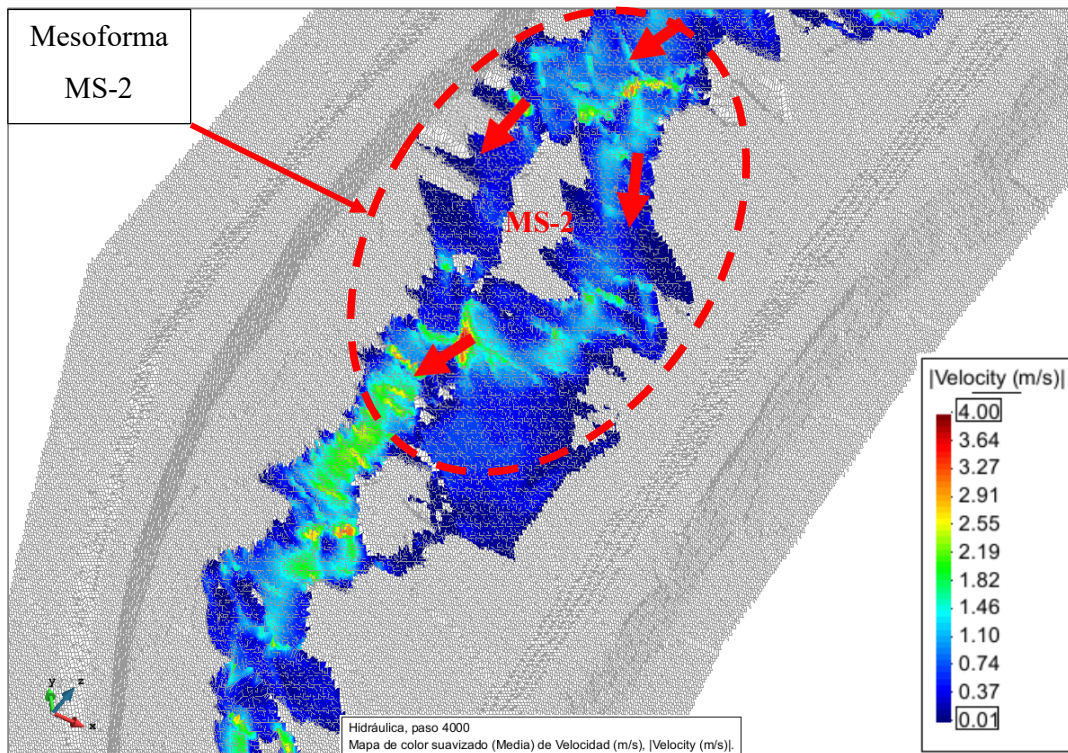


Figura 35: Campo de velocidad alrededor de la mesoforma MS-2 para  $t_{(\text{Días})}=121$ .

La variabilidad morfológica en planta también se presentó en otra zona mostrada en la Figura 36-b, principalmente debido a la formación de mesoformas como la barra lateral BL-1 en el cauce entre las progresivas km 0+900 y km 0+990.

En la Figura 36-a se muestra la formación de la barra lateral determinada por el modelo numérico en el paso de tiempo  $t_{(\text{Días})}=121$  (31/3/2019), el resultado numérico es aproximado a lo observado el 27/6/2019 en el río Chillón, mostrado en la Figura 36-b.

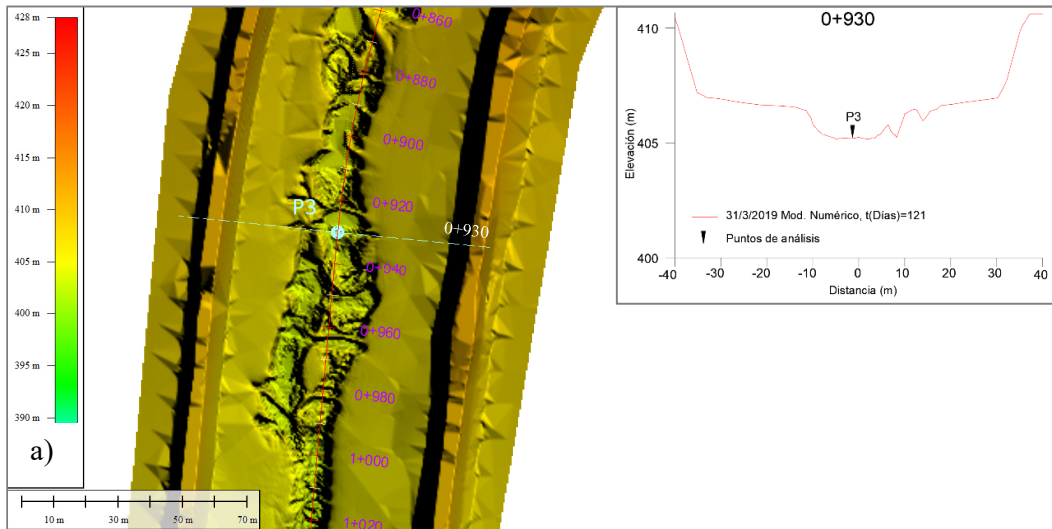


Figura 36: Variabilidad geomorfológica del río Chillón. (a) Resultados de la formación de mesoformas del modelo numérico, (b) Formación de la mesoforma BL-1 entre las progresivas km 0+740 y km 0+800.

Se analizan algunas secciones transversales de la barra lateral, en donde se aprecia lo aproximado de los resultados medidos en campo con el modelo numérico, presentados en la Figura 37.

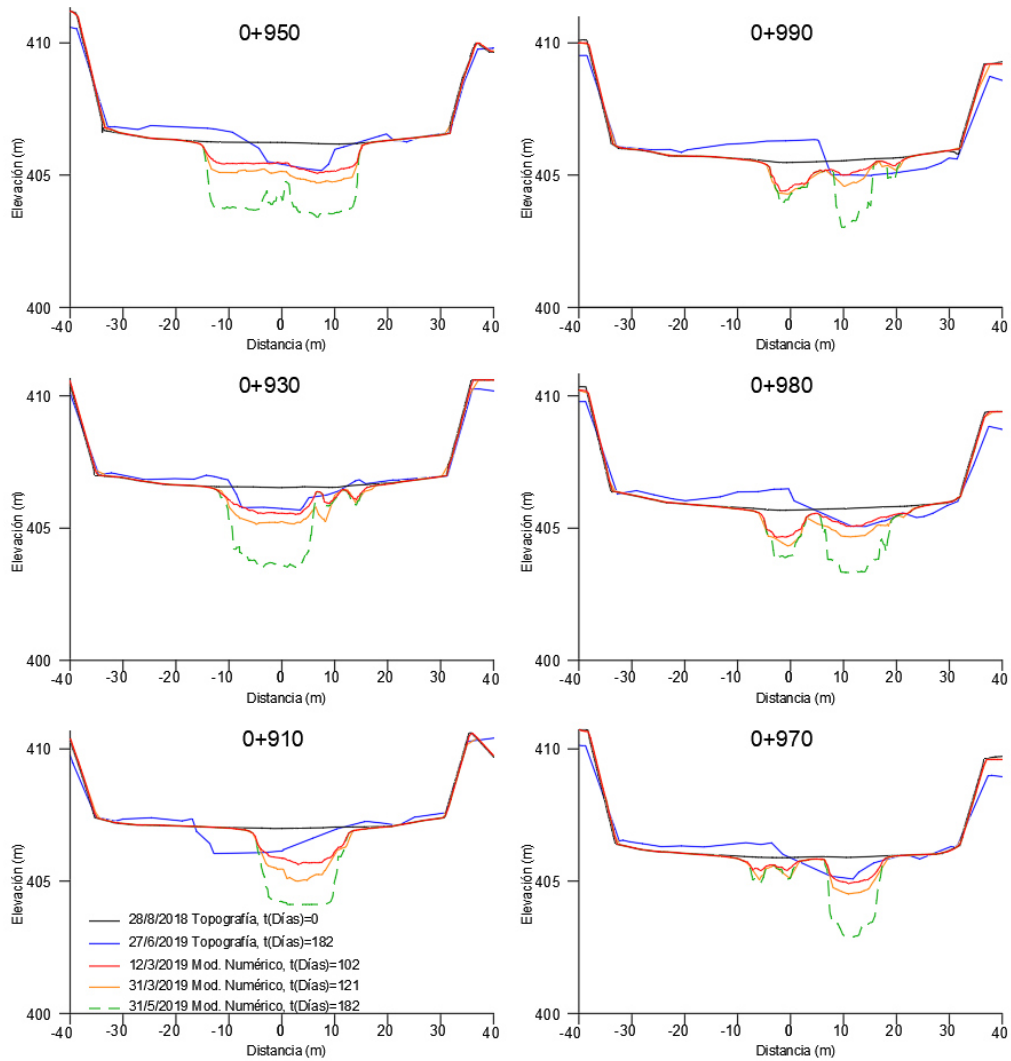


Figura 37: Variación temporal de la mesoforma BL-1 entre las progresivas km 0+740 y km 0+800.

Igual que los casos anteriores, en la Figura 38-b también se observa valores altos del factor de fricción desde el inicio de la simulación hasta el inicio de la rama ascendente del hidrograma, en el punto más bajo del cauce (P3). Desde el inicio de la rama ascendente hasta el pico del hidrograma su valor disminuye. Luego en la rama descendente hasta el fin de la simulación numérica, su valor permanece constante, debido al valor del tirante del flujo en el modelamiento numérico.

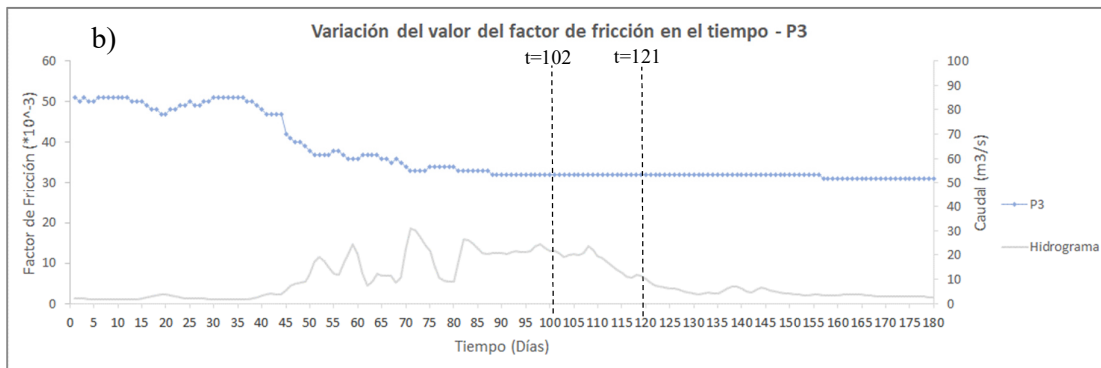
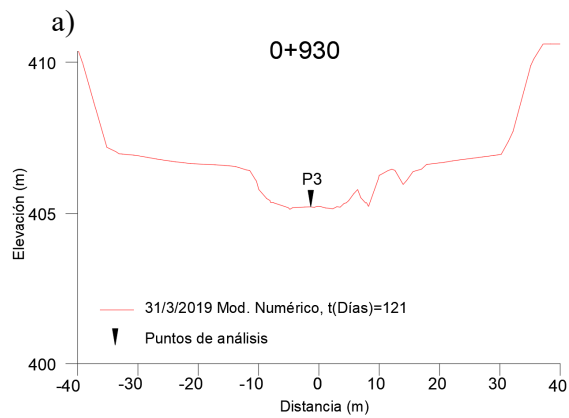


Figura 38: Variación temporal del factor de fricción del río entre las progresivas km 0+740 y km 0+800. (a) Ubicación de los puntos de análisis en la sección km 0+782 (b) Variación temporal del factor de fricción en los puntos de análisis, ubicados en la sección km 0+782 de la mesoforma.

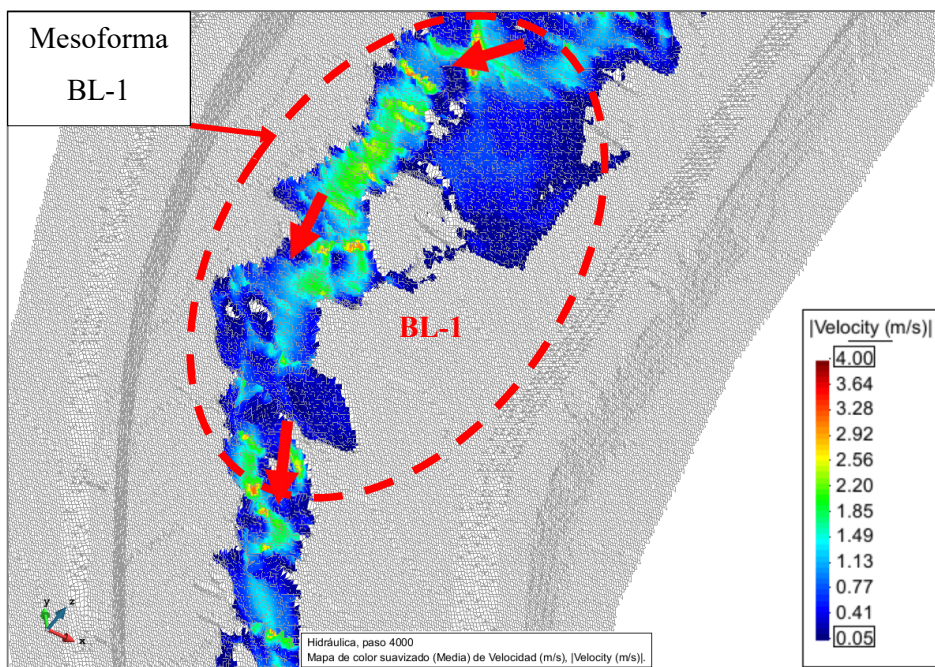


Figura 39: Campo de velocidad alrededor de la mesoforma BL-1 para  $t_{(Días)}=121$ .

En la Figura 39 en la margen izquierda del río se muestra la mesoforma BL-1, con velocidad mayor a 2.2 m/s genera los cambios morfológicos, para el paso de tiempo  $t_{(\text{Días})}=121$ .

Se presenta un resumen de la variación temporal del factor de fricción asociada al tirante del flujo en la Figura 40, Figura 41 y Figura 42 para algunos pasos de tiempo, el mapa del Anexo F y código F.3 presenta más resultados para mayor cantidad de pasos de tiempo.

El análisis temporal del factor de fricción inicia con un valor alto de 0.055 y disminuye hasta 0.030, lo contrario ocurre con el tirante del flujo que inicia con un valor de 0.01m y aumenta hasta un valor promedio de 1.2m. Esta relación inversa es característico en ríos aluviales con lechos de sedimentos gruesos.

De igual manera se presenta un resumen de la variación temporal del factor de fricción asociada a la socavación en la Figura 43, Figura 44 y Figura 45, el mapa del Anexo F y código F.4 presenta más resultados para mayor cantidad de pasos de tiempo.

El análisis temporal de la socavación inicia, con un valor de factor de fricción alto de 0.055 y disminuye hasta 0.03, lo contrario ocurre con la socavación que inicia con un valor de 0.01m y aumenta hasta un valor promedio de 1.8m. Además, se observa que la socavación se intensifica para valores bajos de factor de fricción alrededor de 0.03.

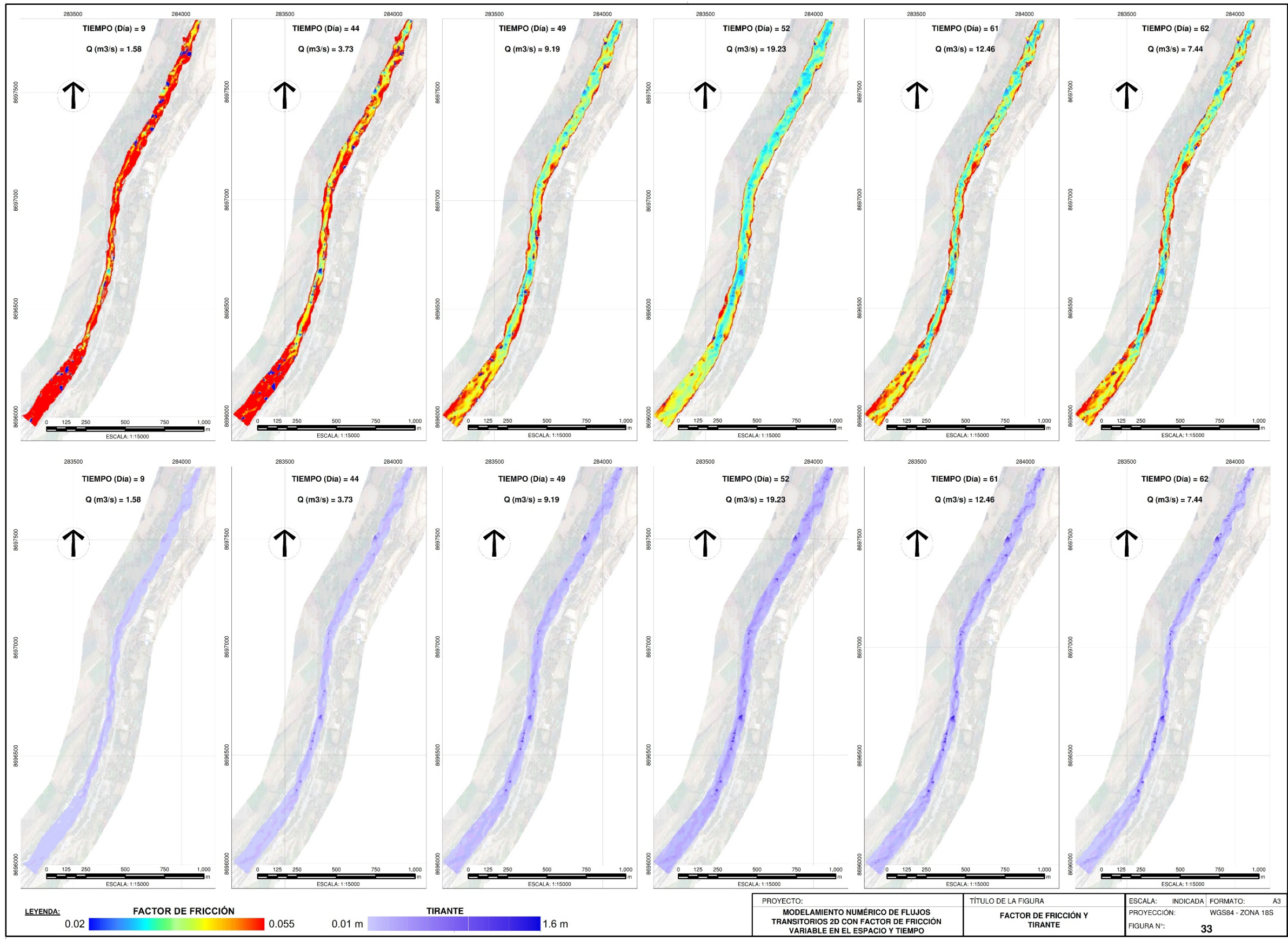


Figura 40: Variabilidad temporal del factor de fricción y el tirante del flujo para el rango de tiempo (Días) 9 – 62.



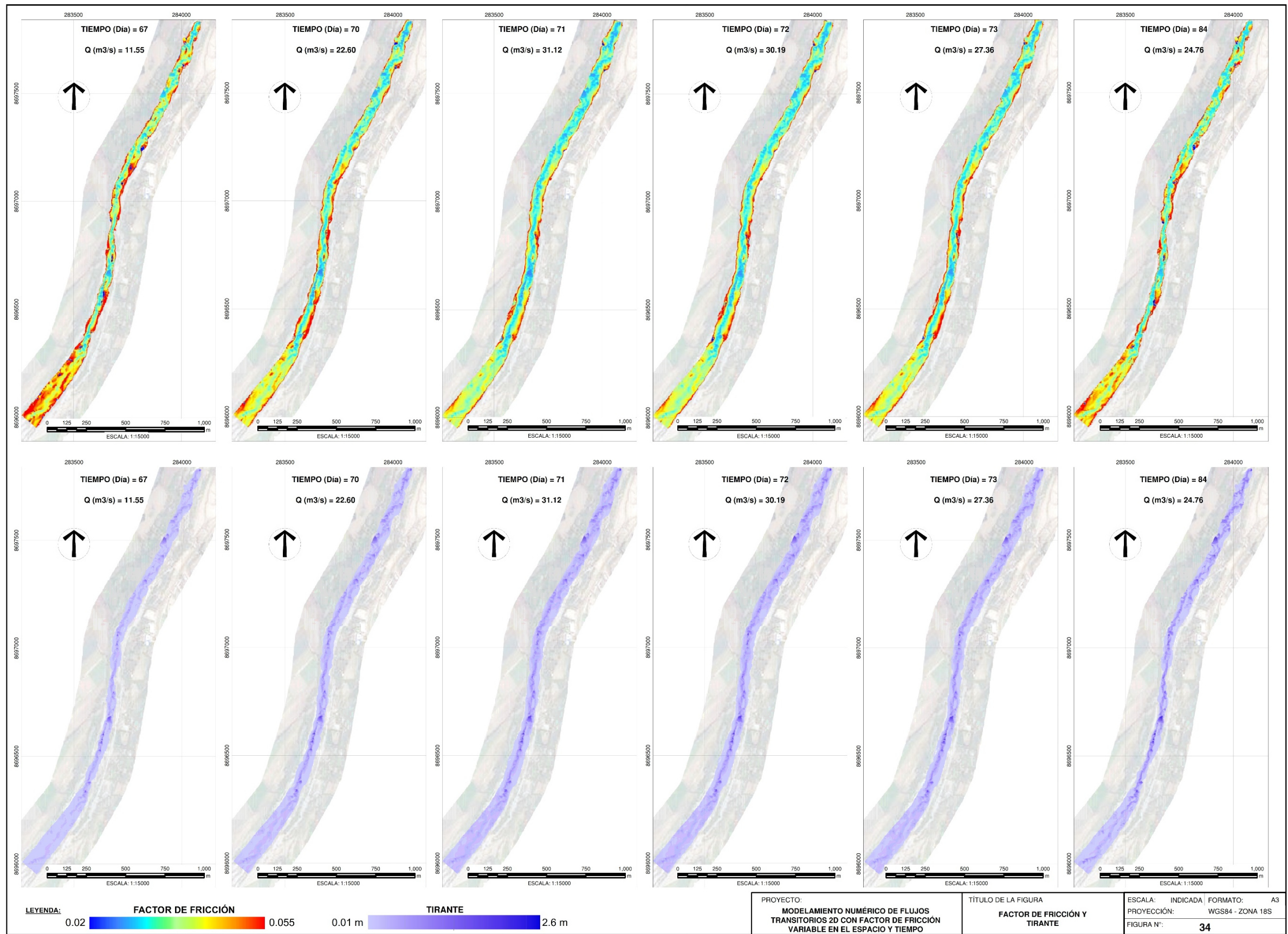


Figura 41: Variabilidad temporal del factor de fricción y el tirante del flujo para el rango de tiempo (Días) 67 – 84.

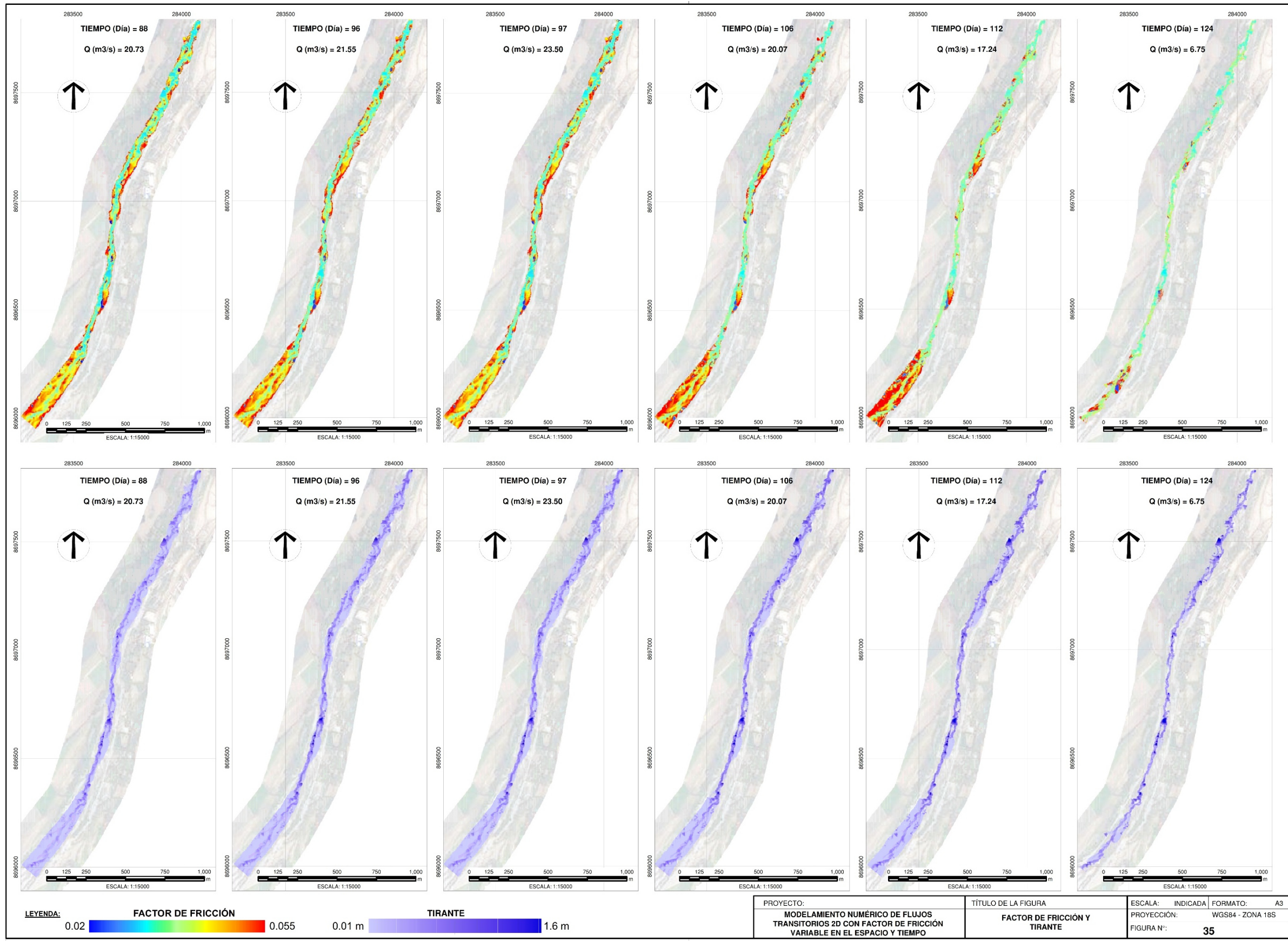


Figura 42: Variabilidad temporal del factor de fricción y el tirante del flujo para el rango de tiempo (Días) 88 – 124.

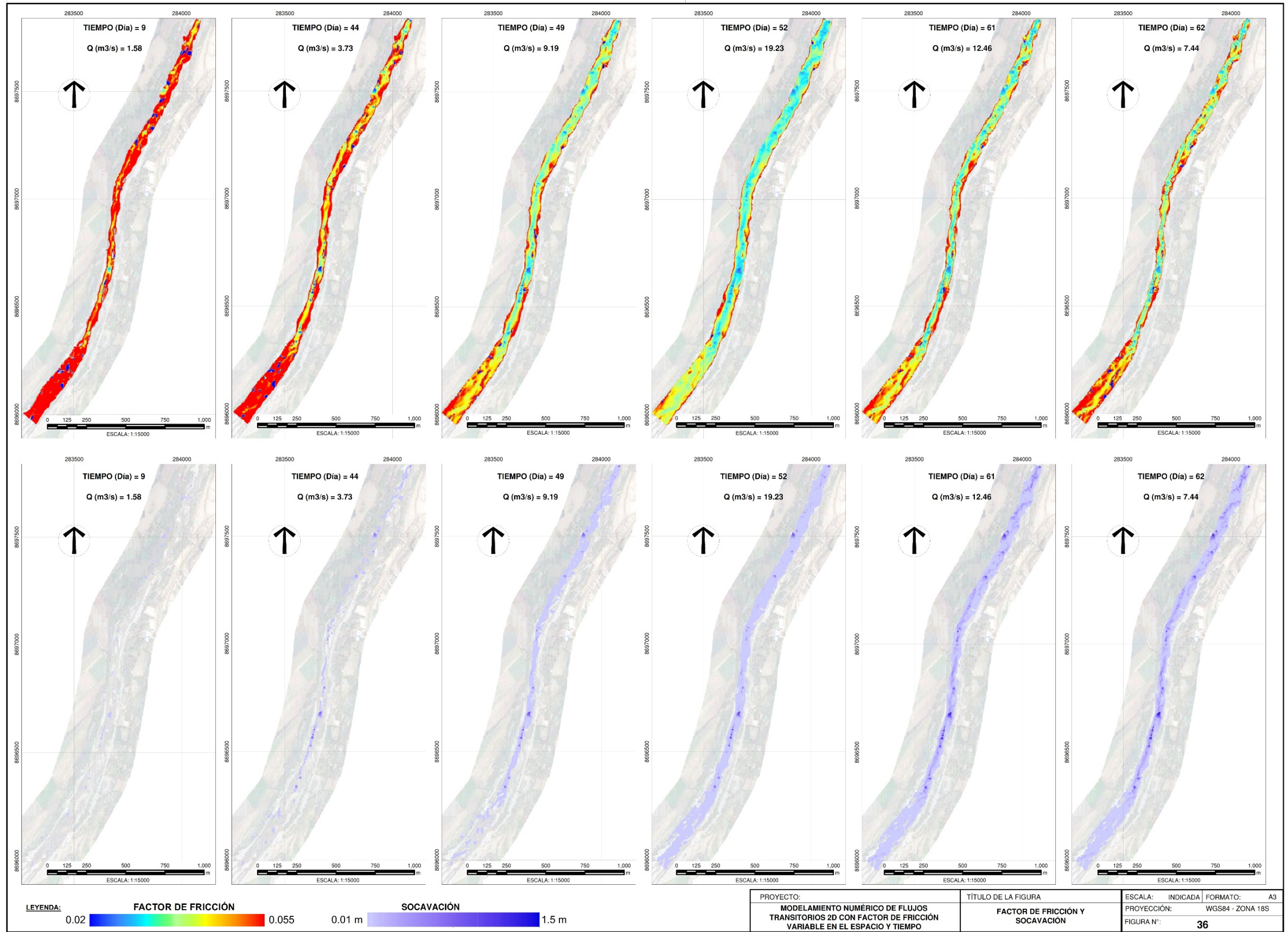


Figura 43: Variabilidad temporal del factor de fricción y la socavación para el rango de tiempo (Día) 9 – 62.

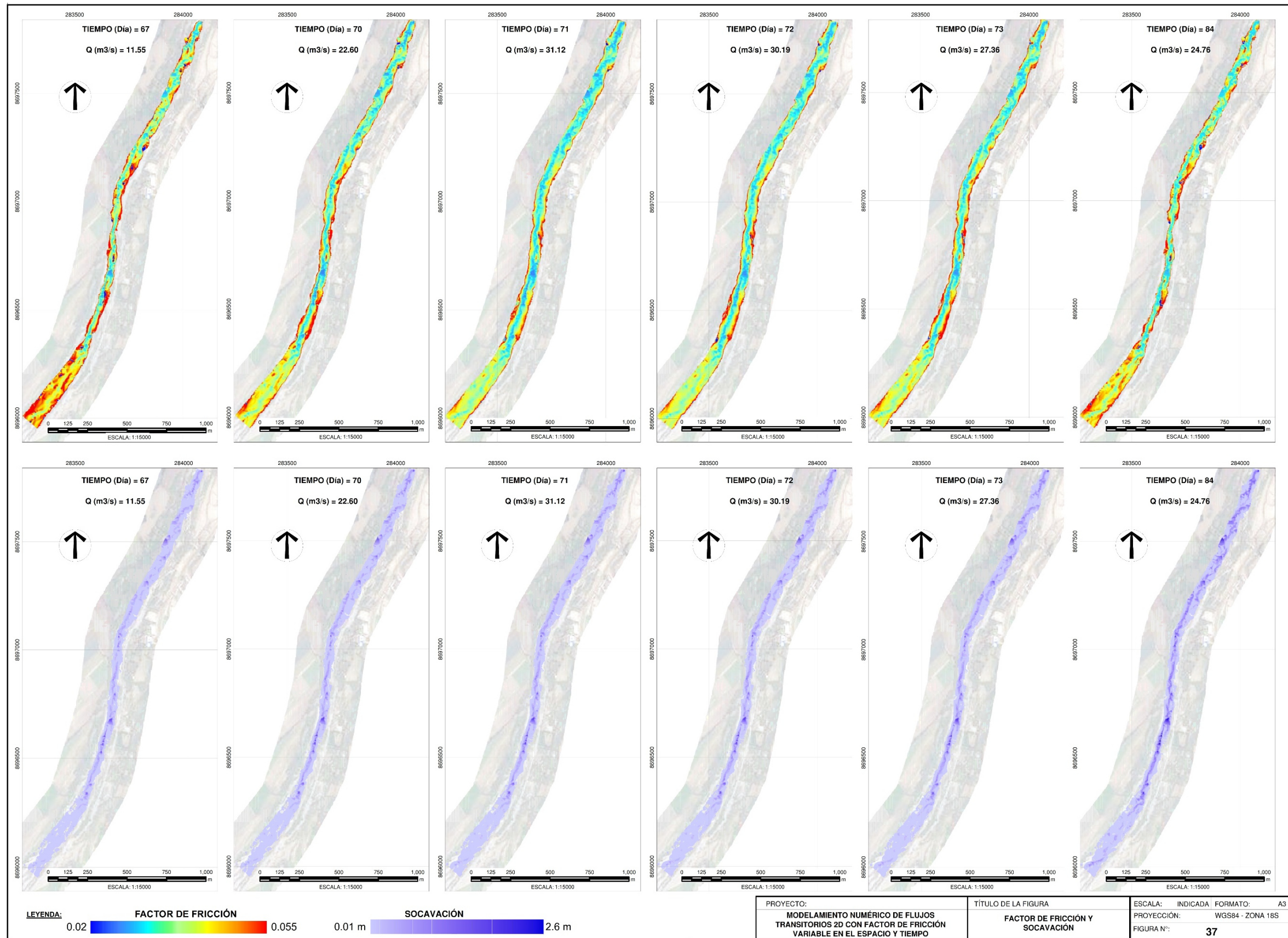


Figura 44: Variabilidad temporal del factor de fricción y la socavación para el rango de tiempo (Día) 67 – 84.

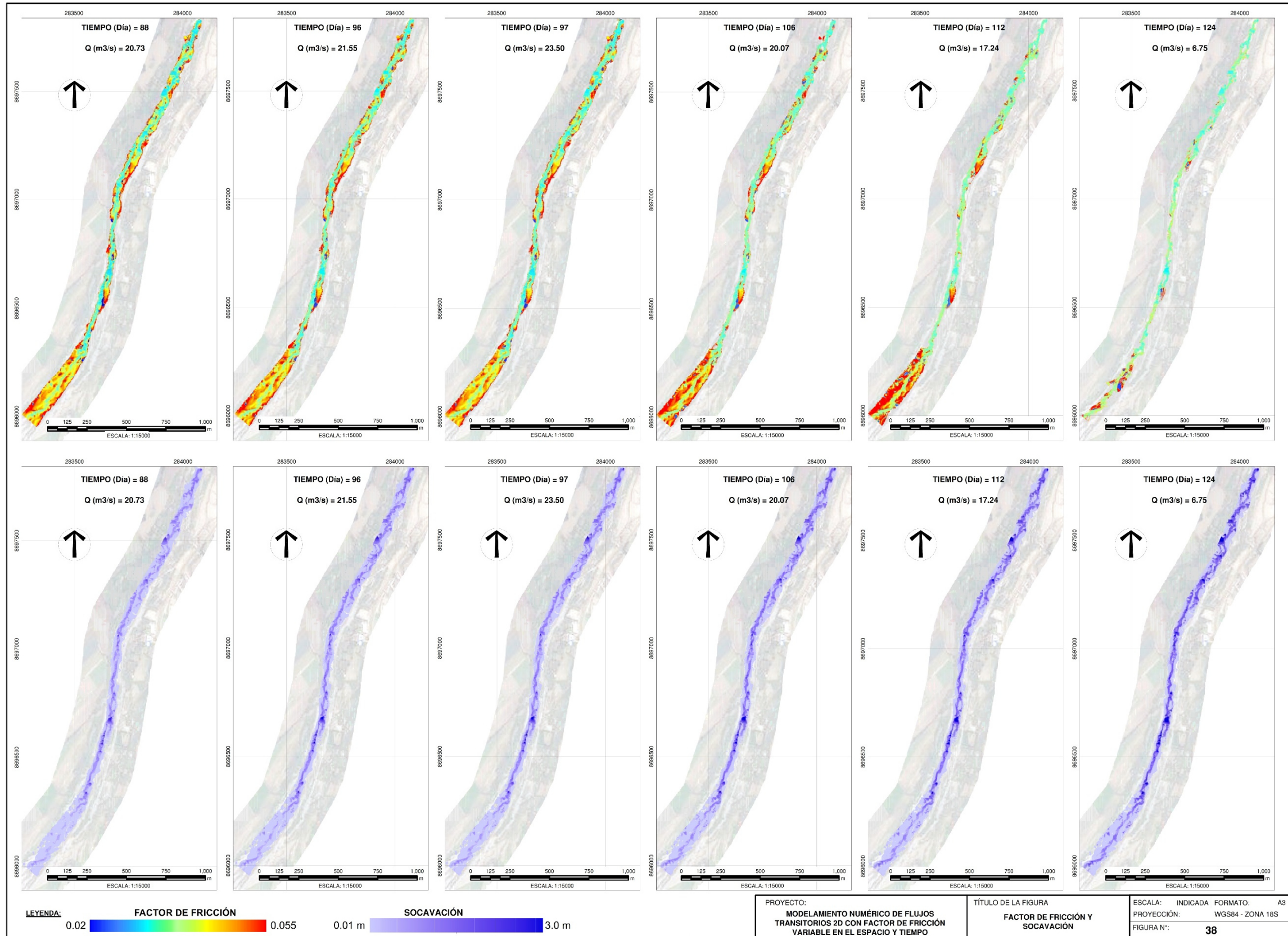


Figura 45: Variabilidad temporal del factor de fricción y la socavación para el rango de tiempo (Días) 88 – 124.

En la Figura 46 se presenta las secciones y el punto P donde se analizará el valor del tirante del flujo. En la Figura 47 se presenta el resultado del análisis temporal del tirante del flujo, para el punto P en distintas secciones transversales.

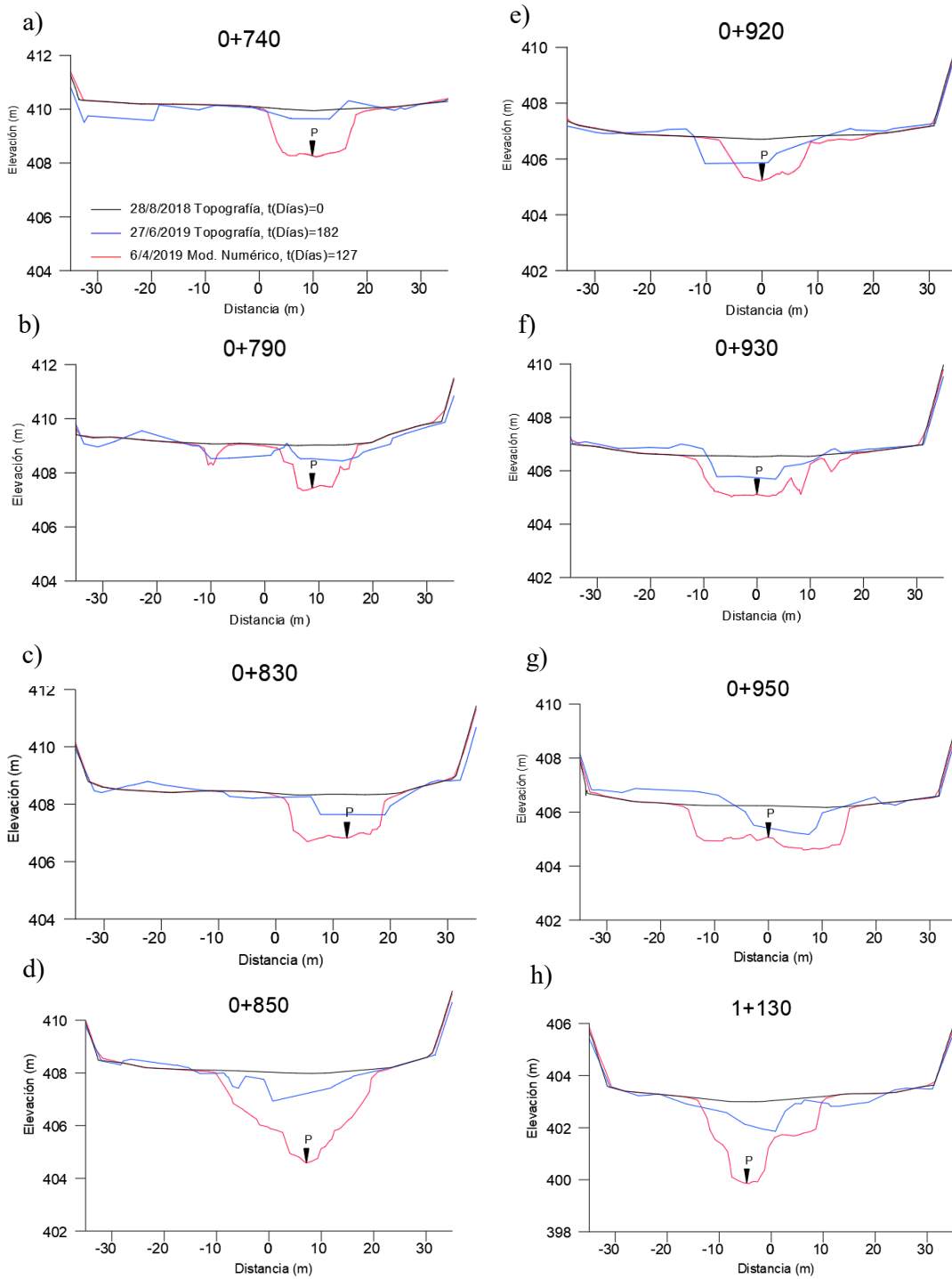


Figura 46: Secciones de análisis del valor del tirante del flujo en el punto P.

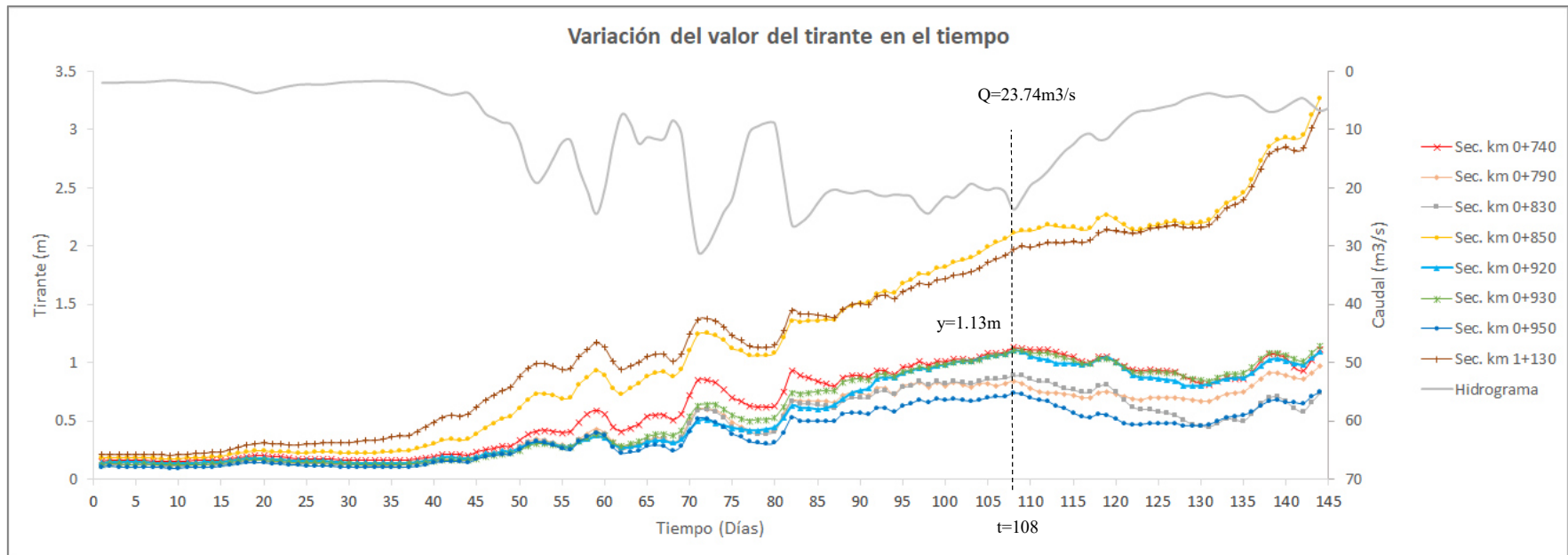


Figura 47: Análisis temporal del valor del tirante del flujo, en el punto P para distintas secciones.

El análisis temporal del valor del tirante del flujo en el punto P para las distintas secciones es mostrada en la Figura 47, presenta dos comportamientos distintos, es decir para tirantes de flujo menores a 1.13m las secciones como resultados del modelo numérico (Figura 46-b, 46-c, 46-e, 46-f, 46-g) se aproxima a lo medido en campo. Para tirantes de flujo mayores a 1.13m aumentan significativamente la diferencia entre las secciones del resultado del modelo numérico y medido, mostrados en la Figura 46-a, 46-d, 46-h.



## V. DISCUSIÓN

Las ecuaciones de resistencia al flujo, para baja y grandes rugosidades permitió encontrar una variación esperada del comportamiento del factor de fricción respecto al tirante del flujo. La variación temporal del factor de fricción inicia con un valor alto de 0.055 al inicio de la rama ascendente, luego disminuye hasta 0.030 en el pico del hidrograma para valores altos del tirante del flujo, con una menor variabilidad respecto a la variabilidad del tirante del flujo. Sin embargo para valores bajos del tirante del flujo, da valores altos de factor de fricción con alta variabilidad respecto a la variabilidad del tirante del flujo. La variabilidad alta o baja del factor de fricción respecto a la variabilidad del tirante del flujo en el tiempo, tiene una relación inversa característico en ríos aluviales con lechos de sedimentos gruesos (Ferguson 2010).

Los resultados muestran una relación inversa entre de la socavación y el factor de fricción. Del análisis bidimensional se encontró que la socavación se intensifica para valores bajos de factor de fricción aproximado de 0.03. Para Morvan *et al.* 2008 el valor determinado por el modelo numérico bidimensional, es menos riguroso en cuanto a su definición y valor que el modelo numérico tridimensional, ya que el factor de fricción varía entre los modelos numéricos bidimensionales y tridimensionales.

El modelamiento numérico permite estudiar el comportamiento morfológico transitorio en la rama ascendente hasta el paso de tiempo 69, y en el pico para el paso de tiempo 102 para tirante del flujo menor a 0.7 m. Estos resultados sugieren que el modelamiento numérico permite estudiar el comportamiento morfológico transitorio, para bajos valores de tirante del flujo y solo en la rama ascendente, disminuyendo la incertidumbre en la estimación tradicional del factor de fricción y que según Powell (2014) resulta en una sobreestimación del tirante del flujo e incertidumbre en la velocidad al considerar un factor de fricción constante.

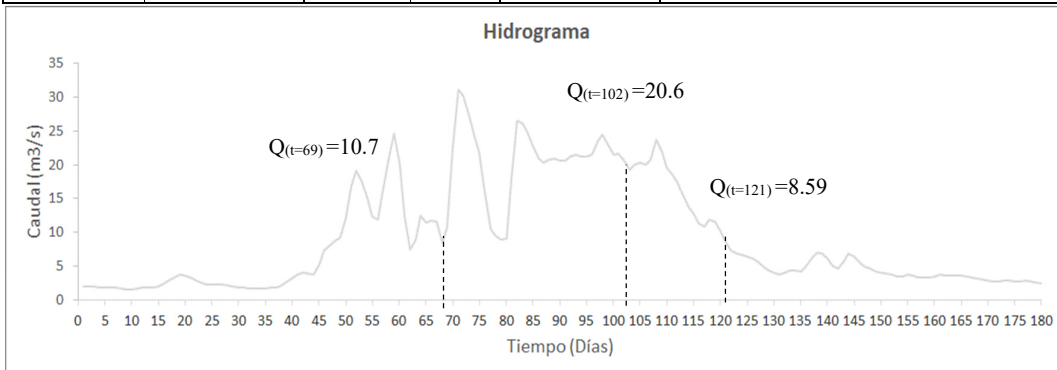
En el pico del hidrograma para el paso de tiempo 102, con tirante del flujo mayor 0.89 m el modelamiento numérico no permite estudiar el comportamiento morfológico transitorio en las mesoformas, pero los resultados en sus secciones analizadas son aproximados a lo medido al final del modelamiento el 31/5/2019 para el paso de tiempo 182. Es decir, los resultados del modelamiento permiten estudiar el comportamiento morfológico no transitorio en las mesoformas.

Los resultados del modelamiento numérico para la rama descendente y paso de tiempo 121 con tirante del flujo mayor a 0.83m, sobrestima la deformación vertical, por lo tanto los resultados no son confiables para estudiar el comportamiento morfológico transitorio y no transitorio.

En el Cuadro 10 se muestra los tramos del hidrograma, donde el comportamiento transitorio de la variación morfológica es reflejado por el modelo numérico.

Cuadro 10: Comportamiento transitorio de la variación morfológica.

Hidrograma	Sección de Medición	Tirante del flujo (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Coincidencia temporal	¿Resultado numérico se Aprox. a lo observado en la sección transversal?
<b>Rama ascendente (t=69)</b>	Sección de control Nro. 1	0.43	10.7	Si para t=69	Si, para el análisis transitorio en la sección transversal (ST).
<b>Pico (t=102)</b>	Sección de control Nro. 2	0.7	20.64	Si para t=102	Si, para el análisis transitorio en la sección transversal (ST).
<b>Pico (t=102)</b>	MS-1	0.89	20.64	No	No, para el análisis transitorio en la ST Si, para el análisis no transitorio en la ST
	MS-2	0.87		No	No, para el análisis transitorio en la ST Si, para el análisis no transitorio en la ST
	BL-1	0.94		No	No, para el análisis transitorio en la ST Si, para el análisis no transitorio en la ST
<b>Rama descendente (t=121)</b>	MS-1	0.83	8.59	No	No, Pierde precisión para el análisis transitorio y no transitorio en la ST
	MS-2	0.79		No	No, Pierde precisión para el análisis transitorio y no transitorio en la ST
	BL-1	0.98		No	No, Pierde precisión para el análisis transitorio y no transitorio en la ST



## VI. CONCLUSIONES

1. La metodología propuesta permite desarrollar un modelamiento numérico de flujos transitorios 2D, considerando coeficientes de fricción variable en el espacio y tiempo. Los resultados obtenidos permitieron encontrar rangos para estudiar la variabilidad morfológica en el espacio y tiempo del cauce.
2. El modelamiento numérico permite estudiar la variabilidad morfológica en el espacio y tiempo del cauce, para el valor de tirante del flujo menor a 0.7 m y en la rama ascendente del hidrograma. Para valores de tirante del flujo entre 0.7m y 1.13m en el pico del hidrograma, el modelamiento numérico permite estudiar el comportamiento morfológico no transitorio en las mesoformas. Los resultados no son confiables para estudiar el comportamiento morfológico transitorio y no transitorio en la rama descendente.
3. La metodología ha sido aplicada al río Chillón en el periodo 1/12/2018 a 31/8/2020 a escala diaria, donde se observó que el proceso hidro-morfológico que experimentó el río, estuvo fuertemente dominado por la socavación en ciertos tramos y de notables procesos de sedimentación en otros.
4. En efecto se observó que la evolución temporal, del fuerte proceso de socavación que experimentó el fondo del cauce, estuvo básicamente controlada por el tirante del flujo y el factor de fricción.
5. Del análisis del tirante del flujo, factor de fricción y socavación mostrados en los mapas con código F.3 y F.4 del Anexo F, y resultados del análisis en los puntos P1, P2 y P3 en las barras centrales del río Chillón, se manifiesta claramente el efecto producido al disminuir el factor de fricción, aumentando el valor del

tirante del flujo y socavación, por consiguiente, la disminución de la resistencia del lecho.

6. También se observó en los resultados que la socavación se intensifica para valores bajos de factor de fricción alrededor de 0.03. Formando las mesoformas, que son unos de los factores que propician la deformación planimétrica y altimétrica en ríos aluviales con lechos de sedimentos gruesos.
7. Se ha ilustrado la aplicación práctica del método de Lischtvan & Levediev al río Chillón, en los que se muestran las discrepancias obtenidas en las profundidades de socavación calculadas. Obteniendo resultados aceptables en la deformación vertical del cauce con lecho de sedimentos gruesos para el tirante del flujo menor a 1.13m.
8. Para un modelamiento numérico de flujos transitorios, el método de Lischtvan & Levediev debe ser afectado por un factor de corrección máximo del orden de 10% para caudales altos. Los factores de corrección asumidos sugieren redefinir el método de Lischtvan & Levediev. Es decir, reemplazar la velocidad media por un perfil de velocidad tipo logarítmica o potencial, que permita obtener el valor de la velocidad lo más cercana al fondo del cauce.
9. La metodología usada en el modelamiento hidráulico en el río Chillón es aplicable solo a cauces con lecho de sedimentos gruesos. Por lo tanto, se puede aplicar a otros ríos de la costa peruana por tener cauces con lecho de sedimentos gruesos cerca de su desembocadura.

## VII. RECOMENDACIONES

1. Seguir una línea de investigación en el estudio geomorfológico, de los ríos de la costa peruana para un mejor entendimiento de los procesos de sedimentación.
2. Se propone una metodología, para calcular el factor de fricción variable en espacio y tiempo en lechos de sedimentos gruesos, y otra metodología para determinar su diámetro característico de la curva granulometría global.
3. El uso de la velocidad media incrementa exponencialmente la socavación, para el modelamiento numérico de flujos transitorios con factor de fricción variable en el espacio y tiempo, se debe investigar perfiles de velocidad tipo logarítmica o potencial, que permitan obtener el valor de la velocidad lo más cercana al fondo del cauce. El uso de modelos numéricos tridimensionales es una alternativa para continuar en esta línea de investigación.
4. Todavía es necesario trabajar en la calibración y validación en más secciones de control y en varios instantes de tiempo, fundamentales para este tipo de simulaciones. Este es un punto débil de este tipo de modelos, ya que difícilmente se dispone de datos de campo durante eventos importantes de crecida, donde la medición en campo es extremadamente compleja.

## VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✓ Alonso, R. L. 2005. Resistencia al flujo de ríos de montaña Desarrollo de ecuaciones de predicción.
- ✓ Bao, W., Zhou, J., Xiang, X., Jiang, P., & Bao, M. 2018. A Hydraulic Friction Model for One-Dimensional Unsteady Channel Flows with Experimental Demonstration. *Water*, 10(1), 43. <https://doi.org/10.3390/w10010043>.
- ✓ Bathurst, J. C. 2002. At-a-site variation and minimum flow resistance for mountain rivers. *Journal of Hydrology*, 269(1–2), 11–26. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00191-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00191-9)
- ✓ Bathurst, J. C. 1985. Flow Resistance Estimation in Mountain Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(4), 625–643. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1985\)111:4\(625\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1985)111:4(625)).
- ✓ Bathurst, J. C., R.-M. Li, and D. B. Simons. 1981, Resistance equation for Large-scale roughness, *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 107, 1593–1613.
- ✓ Bladé, E., & M. Gomez. 2006. Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado en una y dos dimensiones. Barcelona: Monografía CIMNE.
- ✓ Chalov, S. R., & Alexeevsky, N. I. 2015. Braided rivers: Structure, types and hydrological effects. *Hydrology Research*, 46(2), 258–275. <https://doi.org/10.2166/nh.2013.023>.
- ✓ E.V. Richardson, D.B. Simons, P. F. L. 2001. River engineering for highway encroachments. *Highways in the River Environment*.
- ✓ Ferguson, R. I. 1993. Understanding braiding processes in gravel-bed rivers: Progress and unsolved problems. *Geological Society Special Publication*, 75, 73–87. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1993.075.01.03>.
- ✓ Graf, W. H., & Song, T. 1995. Bed-shear stress in non-uniform and unsteady open-channel flows. *Journal of Hydraulic Research*, 33(5), 699–704. <https://doi.org/10.1080/0022168950949856>.

- ✓ Haizhou, T., & Graf, W. H. 1993. Friction in unsteady open-channel flow over gravel beds. *Journal of Hydraulic Research*, 31(1), 99–110. <https://doi.org/10.1080/00221689309498863>.
- ✓ Higuera, C. H. & Pérez G. 1989. *Socavación en Puentes. Análisis, Prevención y Rehabilitación. Tomos I y II. Ministerio de Obras Públicas y Transporte - Universidad del Cauca. Colombia.*
- ✓ Limerinos, J. T. 1970. Determination of the Manning Coefficient From Measured Bed Roughness in Natural Channels. USGS Water-Supply Paper 1898-B, (1898B), 53.
- ✓ López, R., Barragán, J., & Colomer, M. À. 2007. Flow resistance equations without explicit estimation of the resistance coefficient for coarse-grained rivers. *Journal of Hydrology*, 338(1–2), 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.02.027>.
- ✓ Meile, T. 2010. Unsteady flow in a channel with large scale bank roughness, (1865).
- ✓ Morvan, H; Knight, D; Wright, N; Tang, X; Crossley, A. 2008. The concept of roughness in fluvial hydraulics and its formulation in 1D, 2D and 3D numerical simulation models. *Journal of Hydraulic Research* 46(2).
- ✓ Mrokowska, MM, Rowiński, PM, Kalinowska, MB. 2014. Notes on the estimation of resistance to flow during flood wave propagation (en línea). *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 11(12):13311-13352. DOI: <https://doi.org/10.5194/hessd-11-13311-2014>.
- ✓ Nicholas, A. P. 2000. Modelling bedload yield braided gravel bed rivers. *Geomorphology*, 36(1–2), 89–106. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(00\)00050-7](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(00)00050-7).
- ✓ Pathirana, K., & Ranasinghe, P. 2006. Bed Shear Stress in Unsteady Open Channel Flow Over Rough Beds. *Engineer*, 7–12.
- ✓ Powell, D. M. 2014. Flow resistance in gravel-bed rivers: Progress in research. *Earth-Science Reviews*, 136, 301–338. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.06.001>.
- ✓ Romero, M., Revollo, N., & Molina, J. 2010. Flow resistance in steep mountain rivers in Bolivia. *Journal of Hydrodynamics*, 22(5 SUPPL. 1), 679–684. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(10\)60018-2](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(10)60018-2).



- ✓ Rubio, T. O. 2017. Hidrología hidráulica y socavación en puentes. (Ecoe, Ed.) (Primera). Bogotá.
- ✓ Shamloo, H; Norooz, R; Mousavifard, M. 2015. A review of one-dimensional unsteady friction models for transient pipe flow (en línea). Cumhuriyet Science Journal 36(3):2278-2288. DOI: <https://doi.org/10.17776/csj.81031>.
- ✓ Ugarte, A., & Madrid, M. 1994. Roughness coefficient in mountain rivers. American Society of Civil Engineering, Hydraulics Engineering, New York, August(1), 1–8.

## **ANEXOS**

**Anexo 1:** Galería de fotos de los trabajos de descolmatación y encauzamiento



Foto 1 Trabajos de descolmatación y encauzamiento en la progresiva km 0+420



Foto 2 Trabajos de descolmatación y encauzamiento en la progresiva km 0+780



Foto 3 Trabajos de descolmatación y encauzamiento en la progresiva km 1+100

**Anexo 2:** Galería de fotos y vista aérea de la topografía antes y después del tránsito de la avenida.



Foto 1 topografía del cauce antes del tránsito de la avenida en la progresiva km 0+200



Foto 2 topografía del cauce antes del tránsito de la avenida en la progresiva km 0+680



Foto 3 topografía del cauce antes del tránsito de la avenida en la progresiva km 0+900



Foto 4 topografía del cauce antes del tránsito de la avenida en la progresiva km 1+200



Foto 5 topografía del cauce antes del tránsito de la avenida en la progresiva km 1+300



Foto 6 topografía del cauce antes del tránsito de la avenida en la progresiva km 1+620



Foto 7 vista aérea del cauce antes del tránsito de la avenida en la progresiva km 0+200



Foto 8 vista aérea del cauce antes del tránsito de la avenida en la progresiva km 0+800



Foto 9 vista aérea del cauce antes del tránsito de la avenida en la progresiva km 1+4000



Foto 10 topografía del cauce después del tránsito de la avenida en la progresiva km 0+000



Foto 11 topografía del cauce después del tránsito de la avenida en la progresiva km 0+500



Foto 12 topografía del cauce después del tránsito de la avenida en la progresiva km 0+820



Foto 13 topografía del cauce después del tránsito de la avenida en la progresiva km 0+880



Foto 14 topografía del cauce después del tránsito de la avenida en la progresiva km 0+990



Foto 15 topografía del cauce después del tránsito de la avenida en la progresiva km 1+160



Foto 16 topografía del cauce después del tránsito de la avenida en la progresiva km 1+380



Foto 17 topografía del cauce después del tránsito de la avenida en la progresiva km 1+710



**Anexo 3:** Galería de fotos de la cobertura vegetal antes y después del tránsito de la avenida



Foto 1 cobertura de vegetación antes del tránsito de la avenida en la progresiva km 0+400



Foto 2 cobertura de vegetación antes del tránsito de la avenida en la progresiva km 0+5000



Foto 3 cobertura de vegetación antes del tránsito de la avenida en la progresiva km 0+760



Foto 4 cobertura de vegetación después del tránsito de la avenida en la progresiva km 0+220



Foto 5 cobertura de vegetación después del tránsito de la avenida en la progresiva km 0+320



Foto 6 cobertura de vegetación después del tránsito de la avenida en la progresiva km 1+400

**Anexo 4:** Campaña de extracción de muestras y elaboración de curva granulométrica







 <p>A top-down view of a rectangular area marked on a dirt and gravel surface with white chalk. The area is approximately 1 meter by 1 meter.</p>	 <p>A person is kneeling on the ground, using a yellow measuring tape to measure a large, dark, circular sample of material (bolonería) placed on a white plastic bag. A digital scale is visible next to the sample.</p>
<p>Foto 1 marcación del área para realizar la calicata de dimensión 1x1m.</p>	<p>Foto 4 registro de las dimensiones de las muestras de la bolonería en el cauce del río.</p>
 <p>A person wearing a blue jacket and cap is using a shovel to dig a hole in the ground. A blue tarp is laid out on the ground nearby, and a river is visible in the background.</p>	 <p>A person is kneeling on the ground, using a yellow measuring tape to measure a large, dark, circular sample of material (bolonería) placed on a white plastic bag. A digital scale is visible next to the sample.</p>
<p>Foto 2 excavación de la calicata para extraer muestras del material depositado por el río en su cauce</p>	<p>Foto 5 registro del peso de la bolonería extraída del cauce del río.</p>
 <p>A large pile of rocks and gravel is shown on a blue tarp. A white sign is placed on the tarp, and a blue tarp is also visible in the background.</p>	 <p>A person is kneeling on the ground, separating a sample of gravel from a pile of rocks and gravel. A white sign with the word "Muestra" is placed on the ground, and a blue tarp is visible in the background.</p>
<p>Foto 3 Separación de la muestra de bolonería mayor a 3" colocada sobre una cubierta plastificada.</p>	<p>Foto 6 separación de una muestra de grava de la calicata, para el análisis granulométrico integral</p>



Foto 7 Separación de muestras de aproximadamente 5 kg de grava más material fino de la calicata, para posteriormente realizar el análisis granulométrico integral

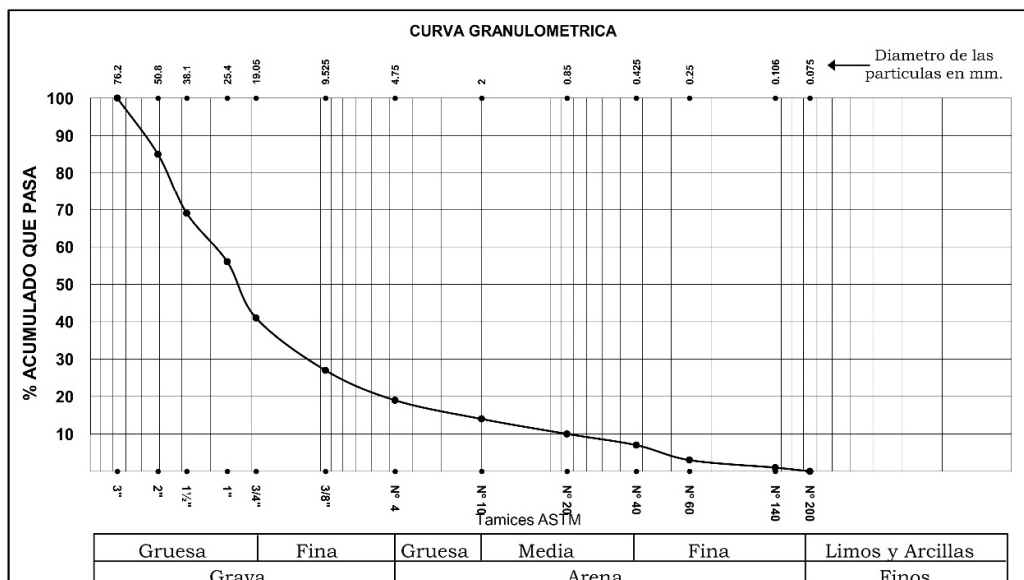
# Análisis granulométrico integral de la muestra calicata 1



**Universidad Nacional Agraria la Molina**  
DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y CONSTRUCCIÓN  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
DOT.C - LMS 117/2018

<b>Solicitante</b> :	SAMUEL ISMAEL QUISCA ASTOCAHUANA	<b>Calicata</b> :	<b>C - 1</b>
<b>Proyecto</b> :	Descolmatación y encausamiento del cause del Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Muestra</b> :	<b>MAB</b>
<b>Ubicación</b> :	Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Profundidad</b> :	-
<b>Fecha</b> :	La Molina 10 de septiembre de 2018	<b>Tec.</b> :	-

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	ASTM - D 427 / D 4318	
3"	76.20	100	Limite liquido (%)	-
2"	50.80	85	Limite plastico (%)	-
1 1/2"	38.10	69	Indice plastico (%)	-
1"	25.40	56	Limite de contraccion (%)	-
3/4"	19.05	41	<b>Resultados: ASTM - D 2487 / D 3282</b>	
3/8"	9.525	27	<b>Coefficiente de :</b>	
Nº 4	4.750	19	-Uniformidad	-
Nº 10	2.000	14	-Curvatura	-
Nº 20	0.850	10	<b>Material :</b>	
Nº 40	0.425	7	-Grava %	81
Nº 60	0.250	3	-Arena %	19
Nº 140	0.106	1	-Finos %	0
Nº 200	0.075	0	<b>Clasificacion :</b>	
			-AASHTO	-
			-SUCS	-
			<b>Nombre de grupo:</b>	
			<b>CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216</b>	
			Humedad natural (%)	-



**NOTA:** La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

## Análisis granulométrico global de la muestra calicata 1

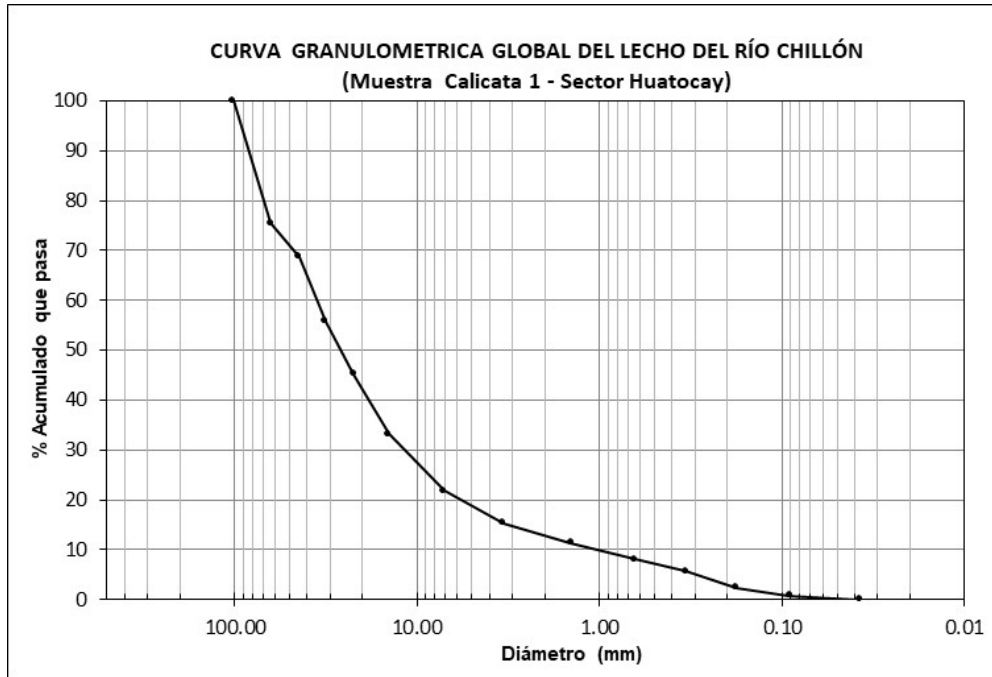


Foto 1 calicata 1 (C-1) para extraer muestras del material depositado por el río en su cauce.

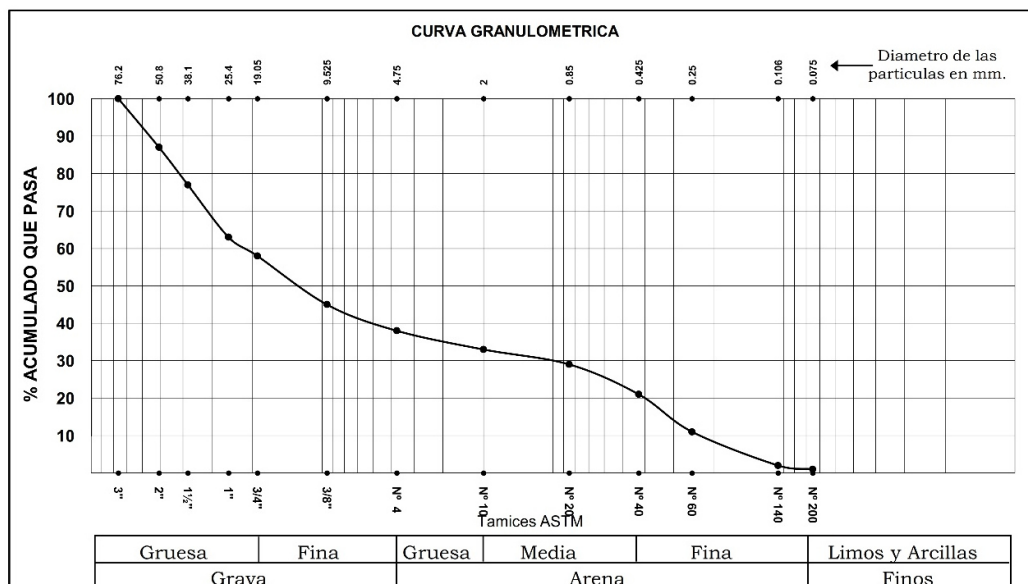
## Análisis granulométrico integral de la muestra calicata 2



**Universidad Nacional Agraria la Molina**  
 DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y CONSTRUCCIÓN  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
 DOT.C - LMS 117/2018

<b>Solicitante</b> :	SAMUEL ISMAEL QUISCA ASTOCAHUANA	<b>Calicata</b> :	<b>C - 2</b>
<b>Proyecto</b> :	Descolmatación y encausamiento del cause del Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Muestra</b> :	<b>MAB</b>
<b>Ubicación</b> :	Río Chillon, Sector Huatocay	<b>Profundidad</b> :	-
<b>Fecha</b> :	<b>La Molina</b> <b>10 de septiembre de 2018</b>	<b>Tec.</b> :	-

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	Limite liquido (%)	-
3"	76.20	<b>100</b>	Limite plastico (%)	-
2"	50.80	<b>87</b>	Indice plastico (%)	-
1 1/2"	38.10	<b>77</b>	Limite de contraccion (%)	-
1"	25.40	<b>63</b>	<b>ASTM - D 2487 / D 3282</b>	
3/4"	19.05	<b>58</b>	<i><b>Coefficiente de :</b></i>	
3/8"	9.525	<b>45</b>	-Uniformidad	90.55
Nº 4	4.750	<b>38</b>	-Curvatura	1.10
Nº 10	2.000	<b>33</b>	<i><b>Material :</b></i>	
Nº 20	0.850	<b>29</b>	-Grava %	62
Nº 40	0.425	<b>21</b>	-Arena %	37
Nº 60	0.250	<b>11</b>	-Finos %	1
Nº 140	0.106	<b>2</b>	<i><b>Clasificacion :</b></i>	
Nº 200	0.075	<b>1</b>	-AASHTO	-
			-SUCS	-
			<b>Nombre de grupo:</b>	
			<b>CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216</b>	
			Humedad natural (%)	-



**NOTA:** La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

## Análisis granulométrico global de la muestra calicata 2

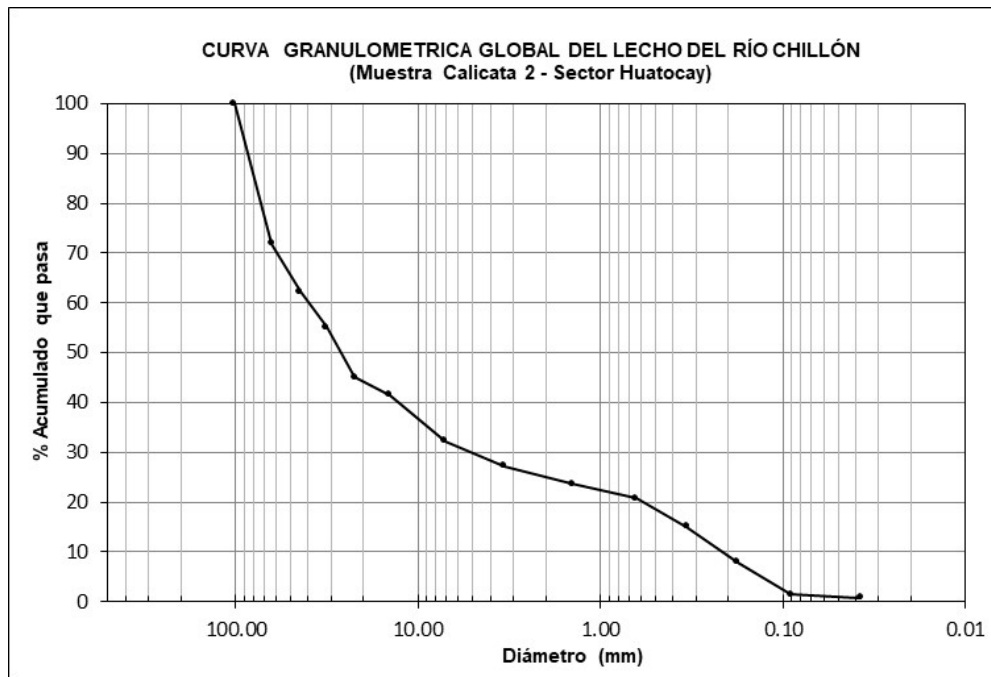


Foto 2 calicata 2 (C-2) para extraer muestras del material depositado por el río en su cauce.



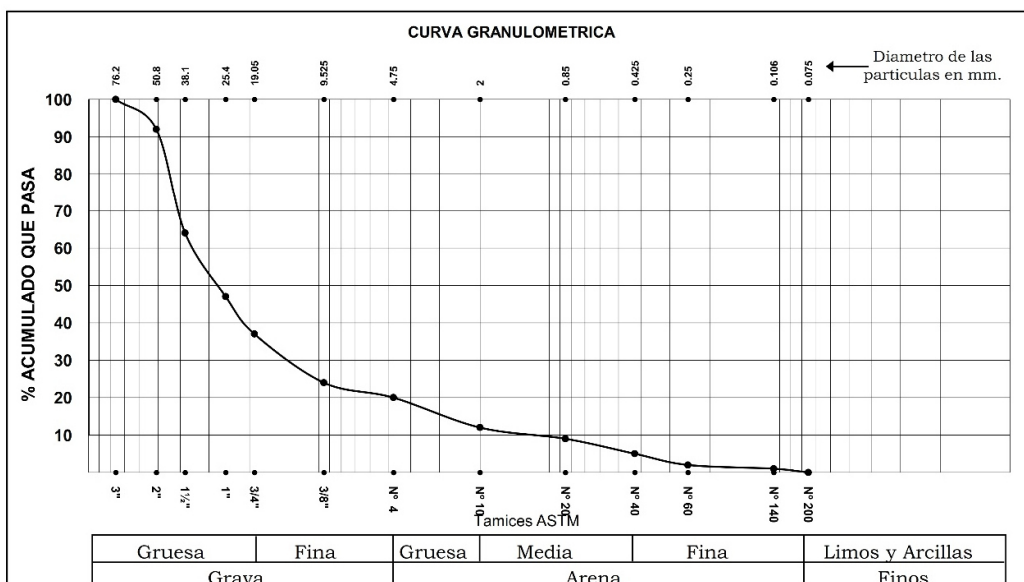
## Análisis granulométrico integral de la muestra calicata 3



**Universidad Nacional Agraria la Molina**  
 DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y CONSTRUCCIÓN  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
 DOT.C - LMS 117/2018

<b>Solicitante :</b>	SAMUEL ISMAEL QUISCA ASTOCAHUANA	<b>Calicata :</b>	<b>C - 3</b>
<b>Proyecto :</b>	Descolmatación y encausamiento del cause del Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Muestra :</b>	<b>MAB</b>
<b>Ubicación :</b>	Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Profundidad :</b>	-
<b>Fecha :</b>	<b>La Molina</b> 10 de septiembre de 2018	<b>Tec. :</b>	-

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	ASTM - D 2487 / D 3282	
3"	76.20	<b>100</b>	Limite liquido (%)	-
2"	50.80	<b>92</b>	Limite plastico (%)	-
1 1/2"	38.10	<b>64</b>	Indice plastico (%)	-
1"	25.40	<b>47</b>	Limite de contraccion (%)	-
3/4"	19.05	<b>37</b>	<b>ASTM - D 2487 / D 3282</b>	
3/8"	9.525	<b>24</b>	<b>Coefficiente de :</b>	
Nº 4	4.750	<b>20</b>	-Uniformidad	15.60
Nº 10	2.000	<b>12</b>	-Curvatura	1.96
Nº 20	0.850	<b>9</b>	<b>Material :</b>	
Nº 40	0.425	<b>5</b>	-Grava %	80
Nº 60	0.250	<b>2</b>	-Arena %	20
Nº 140	0.106	<b>1</b>	-Finos %	0
Nº 200	0.075	<b>0</b>	<b>Clasificación :</b>	
			-AASHTO	-
			-SUCS	-
			<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216</b>				
			Humedad natural (%)	-



**NOTA:** La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

### Análisis granulométrico global de la muestra calicata 3

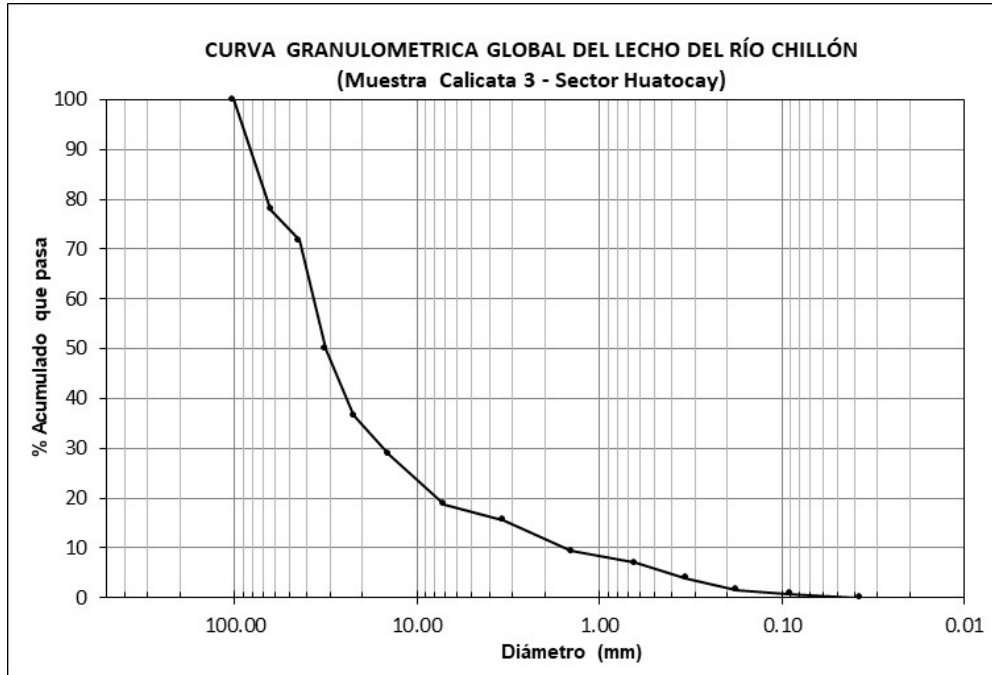


Foto 3 calicata 3 (C-3) para extraer muestras del material depositado por el río en su cauce.

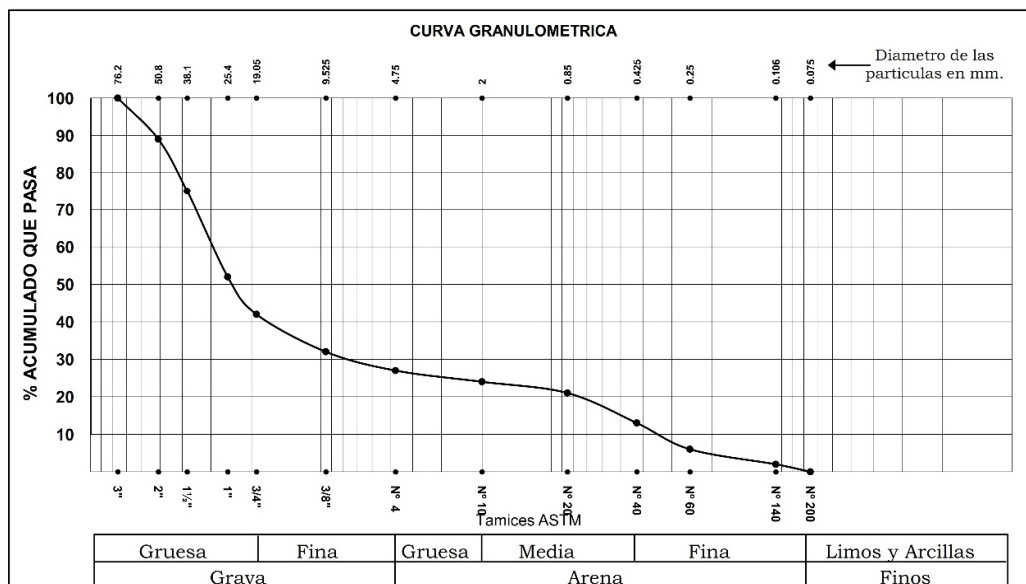
## Análisis granulométrico integral de la muestra calicata 4



**Universidad Nacional Agraria la Molina**  
 DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y CONSTRUCCIÓN  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
 DOT.C - LMS 117/2018

<b>Solicitante :</b>	SAMUEL ISMAEL QUISCA ASTOCAHUANA	<b>Calicata :</b>	<b>C - 4</b>
<b>Proyecto :</b>	Descolmatación y encausamiento del cause del Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Muestra :</b>	<b>MAB</b>
<b>Ubicación :</b>	Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Profundidad :</b>	-
<b>Fecha :</b>	<b>La Molina</b> <b>10 de septiembre de 2018</b>	<b>Tec. :</b>	-

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	Límite líquido (%)	-
3"	76.20	<b>100</b>	Límite plástico (%)	-
2"	50.80	<b>89</b>	Índice plástico (%)	-
1 1/2"	38.10	<b>75</b>	Límite de contracción (%)	-
1"	25.40	<b>52</b>	<b>ASTM - D 2487 / D 3282</b>	
3/4"	19.05	<b>42</b>	<b>Coefficiente de :</b>	
3/8"	9.525	<b>32</b>	-Uniformidad	-
Nº 4	4.750	<b>27</b>	-Curvatura	-
Nº 10	2.000	<b>24</b>	<b>Material :</b>	
Nº 20	0.850	<b>21</b>	-Grava %	73
Nº 40	0.425	<b>13</b>	-Arena %	27
Nº 60	0.250	<b>6</b>	-Finos %	0
Nº 140	0.106	<b>2</b>	<b>Clasificación :</b>	
Nº 200	0.075	<b>0</b>	-AASHTO	A-1a (0)
			-SUCS	SP con grava
			<b>Nombre de grupo:</b>	
			<b>CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216</b>	
			Humedad natural (%)	-



**NOTA:** La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

## Análisis granulométrico global de la muestra calicata 4

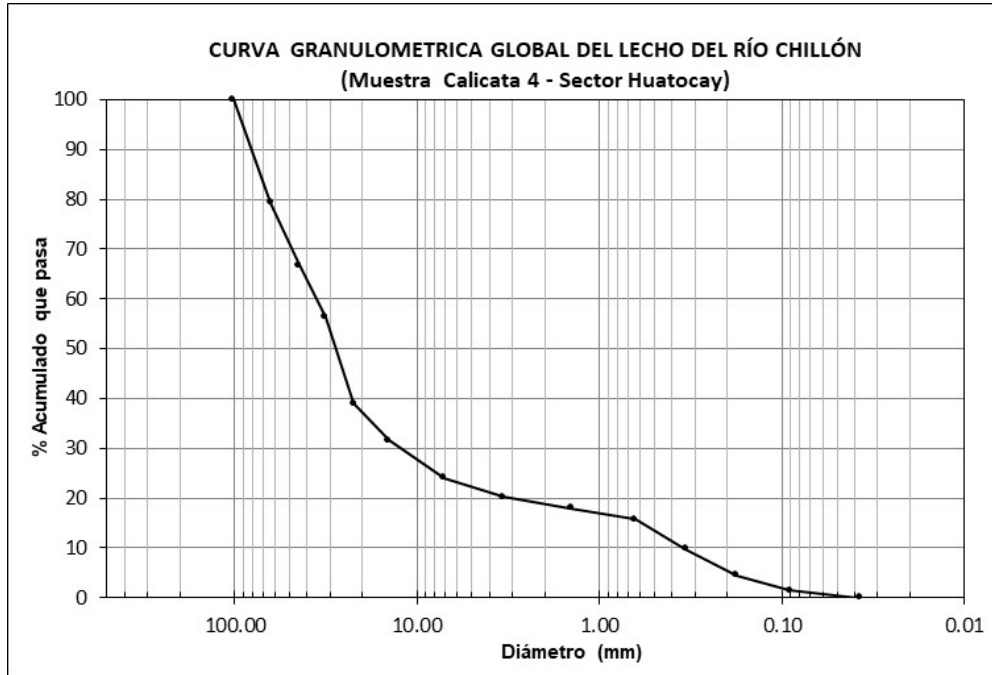


Foto 4 calicata 4 (C-4) para extraer muestras del material depositado por el río en su cauce.

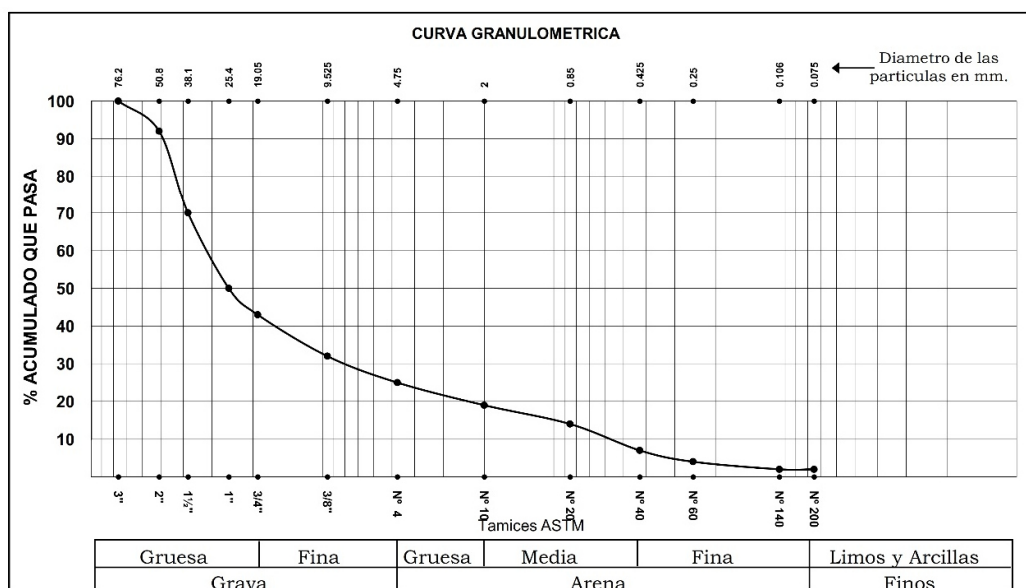
## Análisis granulométrico integral de la muestra calicata 5



**Universidad Nacional Agraria la Molina**  
 DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y CONSTRUCCIÓN  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
 DOT.C - LMS 117/2018

<b>Solicitante :</b>	SAMUEL ISMAEL QUISCA ASTOCAHUANA	<b>Calicata :</b>	<b>C - 5</b>
<b>Proyecto :</b>	Descolmatación y encausamiento del cause del Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Muestra :</b>	<b>MAB</b>
<b>Ubicación :</b>	Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Profundidad :</b>	-
<b>Fecha :</b>	<b>La Molina 10 de septiembre de 2018</b>	<b>Tec. :</b>	-

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	ASTM - D 427 / D 4318	
3"	76.20	<b>100</b>	Límite líquido (%)	-
2"	50.80	<b>92</b>	Límite plástico (%)	-
1 1/2"	38.10	<b>70</b>	Índice plástico (%)	-
1"	25.40	<b>50</b>	Límite de contracción (%)	-
3/4"	19.05	<b>43</b>	<b>ASTM - D 2487 / D 3282</b>	
3/8"	9.525	<b>32</b>	<b>Coefficiente de :</b>	
Nº 4	4.750	<b>25</b>	-Uniformidad	53.64
Nº 10	2.000	<b>19</b>	-Curvatura	3.45
Nº 20	0.850	<b>14</b>	<b>Material :</b>	
Nº 40	0.425	<b>7</b>	-Grava %	75
Nº 60	0.250	<b>4</b>	-Arena %	23
Nº 140	0.106	<b>2</b>	-Finos %	2
Nº 200	0.075	<b>2</b>	<b>Clasificación :</b>	
			-AASHTO	-
			-SUCS	-
			<b>Nombre de grupo:</b>	
			<b>CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216</b>	
			Humedad natural (%)	-



**NOTA:** La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

## Análisis granulométrico global de la muestra calicata 5

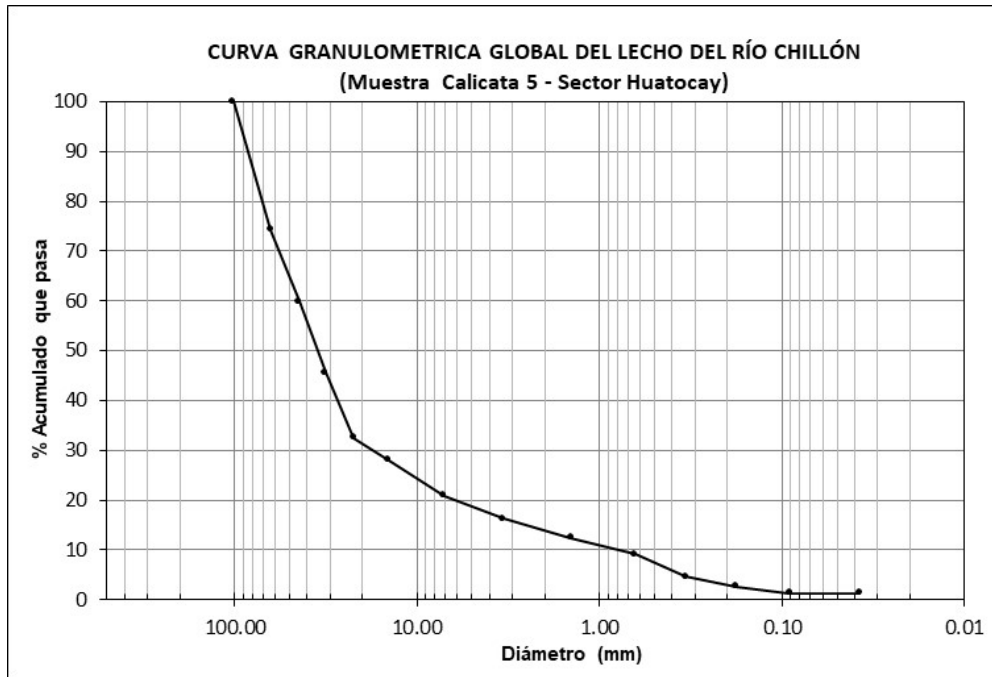


Foto 5 calicata 5 (C-5) para extraer muestras del material depositado por el río en su cauce.

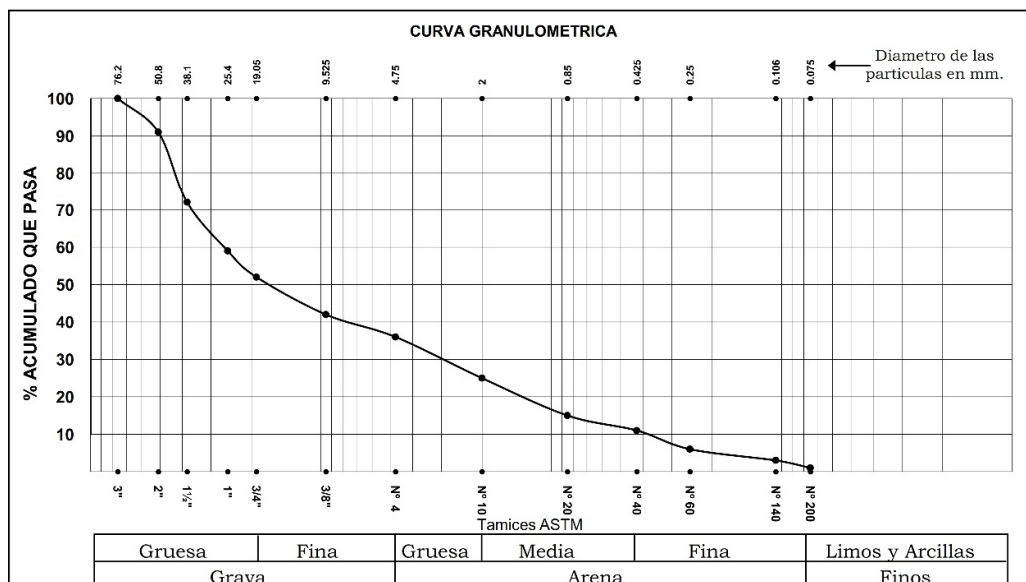
## Análisis granulométrico integral de la muestra calicata 6



**Universidad Nacional Agraria la Molina**  
 DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y CONSTRUCCIÓN  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
 DOT.C - LMS 117/2018

<b>Solicitante :</b>	SAMUEL ISMAEL QUISCA ASTOCAHUANA	<b>Calicata :</b>	<b>C - 6</b>
<b>Proyecto :</b>	Descolmatación y encausamiento del cause del Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Muestra :</b>	<b>MAB</b>
<b>Ubicación :</b>	Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Profundidad :</b>	-
<b>Fecha :</b>	<b>La Molina 10 de septiembre de 2018</b>	<b>Tec. :</b>	-

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	ASTM - D 2487 / D 3282	
3"	76.20	<b>100</b>	Limite liquido (%)	-
2"	50.80	<b>91</b>	Limite plastico (%)	-
1 1/2"	38.10	<b>72</b>	Indice plastico (%)	-
1"	25.40	<b>59</b>	Limite de contraccion (%)	-
3/4"	19.05	<b>52</b>	<b>ASTM - D 2487 / D 3282</b>	
3/8"	9.525	<b>42</b>	<b>Coefficiente de :</b>	
Nº 4	4.750	<b>36</b>	-Uniformidad	68.33
Nº 10	2.000	<b>25</b>	-Curvatura	1.55
Nº 20	0.850	<b>15</b>	<b>Material :</b>	
Nº 40	0.425	<b>11</b>	-Grava %	64
Nº 60	0.250	<b>6</b>	-Arena %	35
Nº 140	0.106	<b>3</b>	-Finos %	1
Nº 200	0.075	<b>1</b>	<b>Clasificación :</b>	
			-AASHTO	-
			-SUCS	-
			<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216</b>				
			Humedad natural (%)	-



**NOTA:** La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

## Análisis granulométrico global de la muestra calicata 6

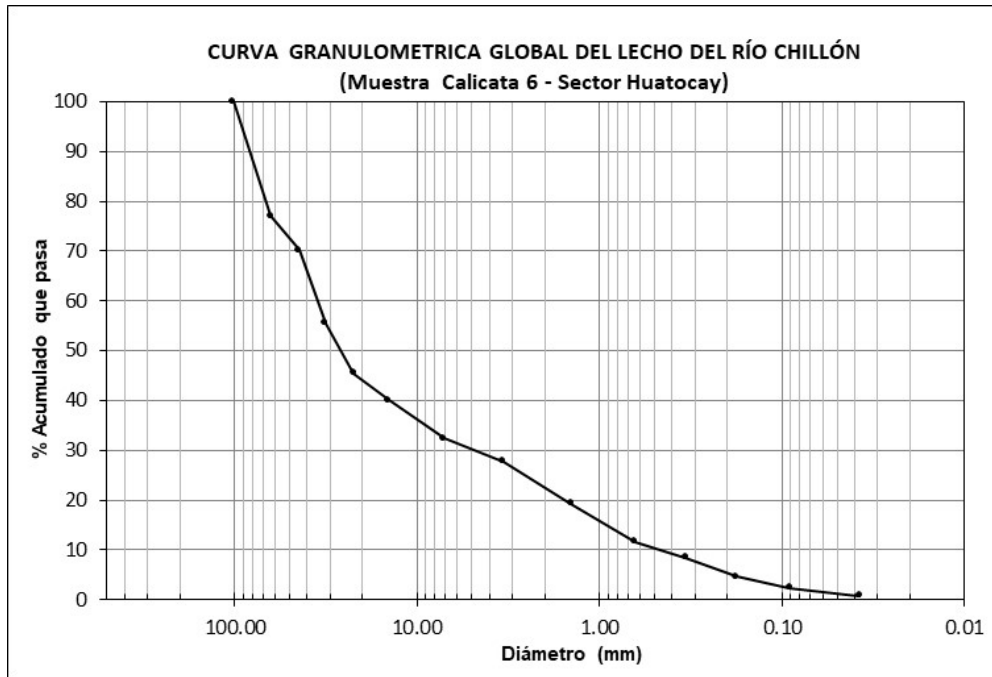


Foto 6 calicata 6 (C-6) para extraer muestras del material depositado por el río en su cauce.



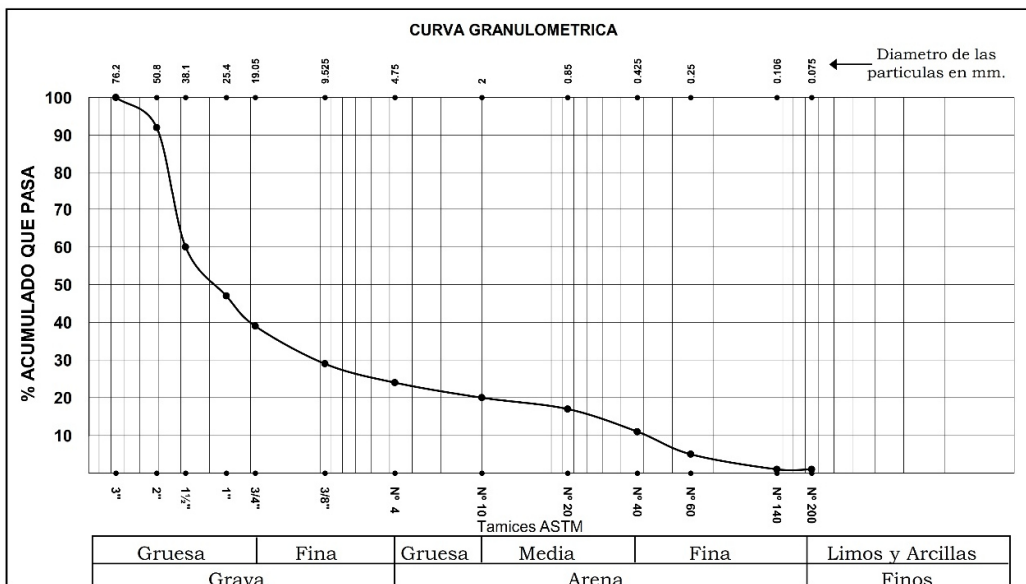
## Análisis granulométrico integral de la muestra calicata 7



**Universidad Nacional Agraria la Molina**  
 DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y CONSTRUCCIÓN  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
 DOT.C - LMS 117/2018

<b>Solicitante :</b>	SAMUEL ISMAEL QUISCA ASTOCAHUANA	<b>Calicata :</b>	<b>C - 7</b>
<b>Proyecto :</b>	Descolmatación y encausamiento del cause del Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Muestra :</b>	<b>MAB</b>
<b>Ubicación :</b>	Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Profundidad :</b>	-
<b>Fecha :</b>	La Molina 10 de septiembre de 2018	<b>Tec. :</b>	-

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	Limite liquido (%)	-
3"	76.20	<b>100</b>	Limite plastico (%)	-
2"	50.80	<b>92</b>	Indice plastico (%)	-
1 1/2"	38.10	<b>60</b>	Limite de contraccion (%)	-
1"	25.40	<b>47</b>	<b>ASTM - D 2487 / D 3282</b>	
3/4"	19.05	<b>39</b>	<b>Coefficiente de :</b>	
3/8"	9.525	<b>29</b>	-Uniformidad	99.51
Nº 4	4.750	<b>24</b>	-Curvatura	7.39
Nº 10	2.000	<b>20</b>	<b>Material :</b>	
Nº 20	0.850	<b>17</b>	-Grava %	76
Nº 40	0.425	<b>11</b>	-Arena %	23
Nº 60	0.250	<b>5</b>	-Finos %	1
Nº 140	0.106	<b>1</b>	<b>Clasificacion :</b>	
Nº 200	0.075	<b>1</b>	-AASHTO	-
			-SUCS	-
			<b>Nombre de grupo:</b>	
			<b>CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216</b>	
			Humedad natural (%)	-



**NOTA:** La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

## Análisis granulométrico global de la muestra calicata 7

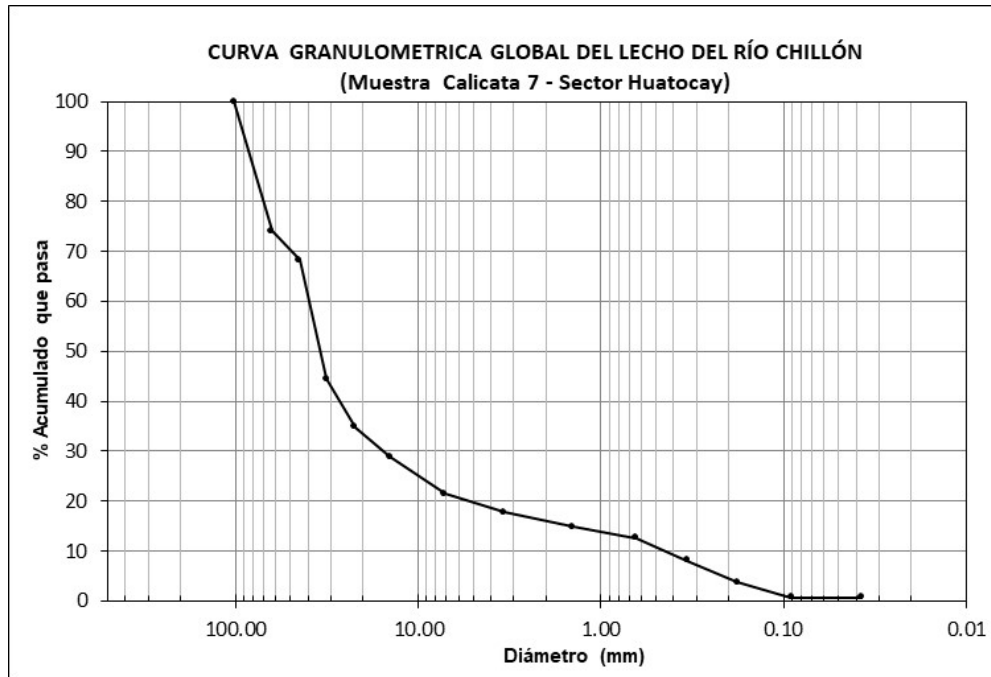


Foto 7 calicata 7 (C-7) para extraer muestras del material depositado por el río en su cauce.

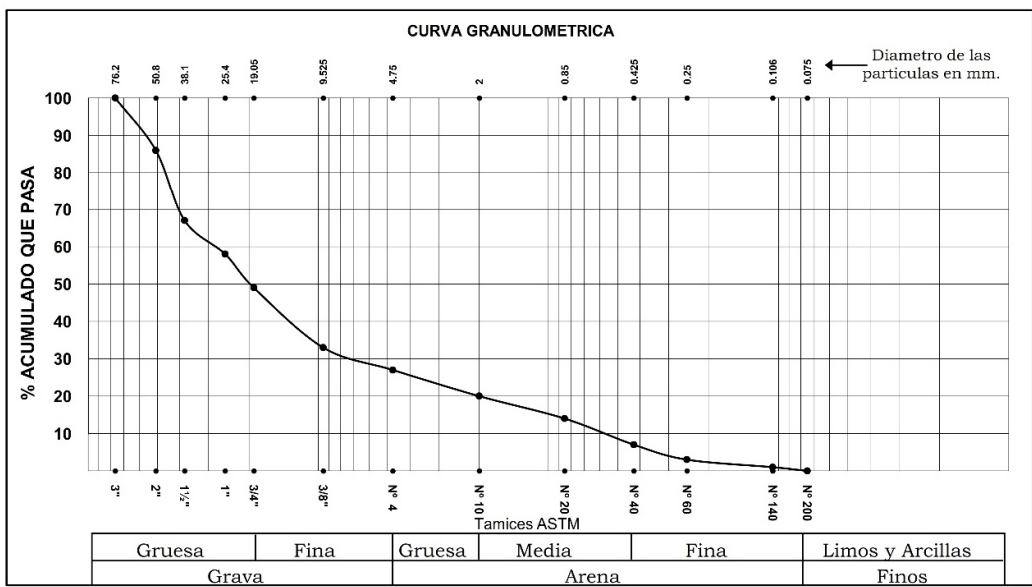
## Análisis granulométrico integral de la muestra calicata 8



**Universidad Nacional Agraria la Molina**  
 DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y CONSTRUCCIÓN  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
 DOT.C - LMS 117/2018

<b>Solicitante :</b>	SAMUEL ISMAEL QUISCA ASTOCAHUANA	<b>Calicata :</b>	<b>C - 8</b>
<b>Proyecto :</b>	Descolmatación y encausamiento del cause del Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Muestra :</b>	<b>MAB</b>
<b>Ubicación :</b>	Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Profundidad :</b>	-
<b>Fecha :</b>	<b>La Molina</b> <b>10 de septiembre de 2018</b>	<b>Tec. :</b>	-

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA		
3"	76.20	<b>100</b>	Limite liquido (%)	-
2"	50.80	<b>86</b>	Limite plastico (%)	-
1 1/2"	38.10	<b>67</b>	Indice plastico (%)	-
1"	25.40	<b>58</b>	Limite de contraccion (%)	-
3/4"	19.05	<b>49</b>	<b>ASTM - D 2487 / D 3282</b>	
3/8"	9.525	<b>33</b>	<u>Coefficiente de :</u>	
Nº 4	4.750	<b>27</b>	-Uniformidad	47.04
Nº 10	2.000	<b>20</b>	-Curvatura	2.38
Nº 20	0.850	<b>14</b>	<u>Material :</u>	
Nº 40	0.425	<b>7</b>	-Grava %	73
Nº 60	0.250	<b>3</b>	-Arena %	27
Nº 140	0.106	<b>1</b>	-Finos %	0
Nº 200	0.075	<b>0</b>	<u>Clasificacion :</u>	
			-AASHTO	-
			-SUCS	-
			<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216</b>				
			Humedad natural (%)	-



**NOTA:** La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

## Análisis granulométrico global de la muestra calicata 8

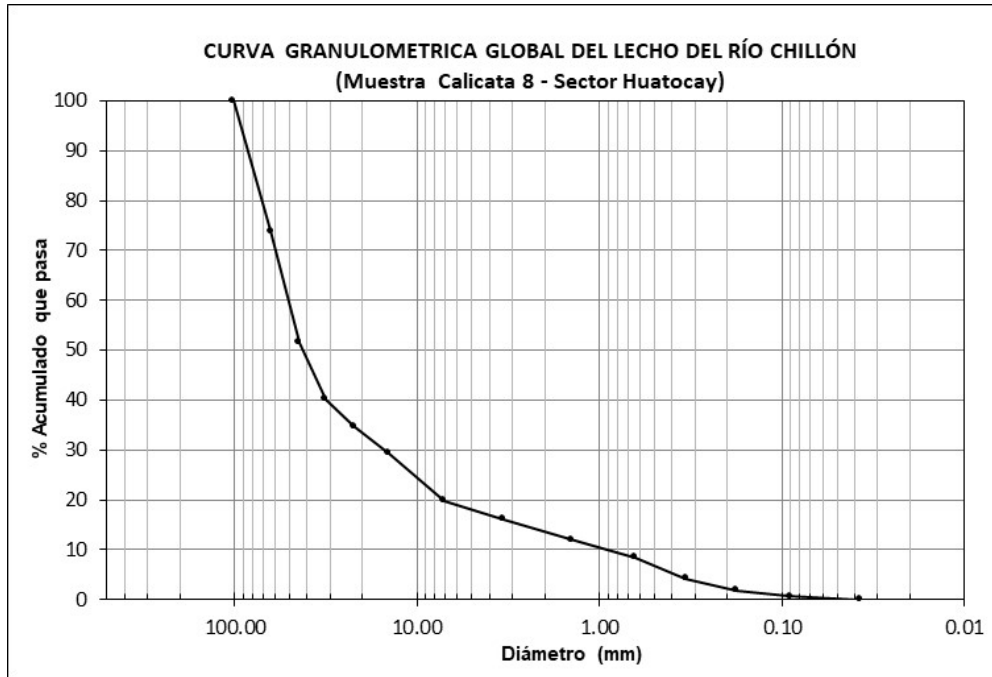


Foto 8 calicata 8 (C-8) para extraer muestras del material depositado por el río en su cauce.

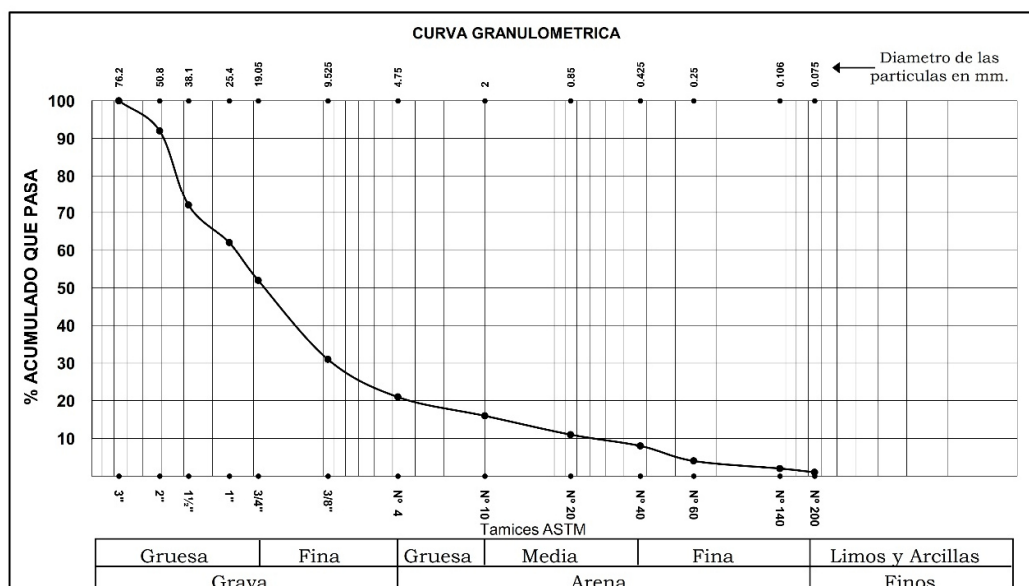
## Análisis granulométrico integral de la muestra calicata 9



**Universidad Nacional Agraria la Molina**  
 DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y CONSTRUCCIÓN  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
 DOT.C - LMS 117/2018

<b>Solicitante :</b>	SAMUEL ISMAEL QUISCA ASTOCAHUANA	<b>Calicata :</b>	<b>C - 9</b>
<b>Proyecto :</b>	Descolmatación y encausamiento del cause del Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Muestra :</b>	<b>MAB</b>
<b>Ubicación :</b>	Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Profundidad :</b>	-
<b>Fecha :</b>	La Molina 10 de septiembre de 2018	<b>Tec. :</b>	-

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	ASTM - D 427 / D 4318	
3"	76.20	<b>100</b>	Limite liquido (%)	-
2"	50.80	<b>92</b>	Limite plastico (%)	-
1 1/2"	38.10	<b>72</b>	Indice plastico (%)	-
1"	25.40	<b>62</b>	Limite de contraccion (%)	-
3/4"	19.05	<b>52</b>	<b>ASTM - D 2487 / D 3282</b>	
3/8"	9.525	<b>31</b>	<b>Coefficiente de :</b>	
Nº 4	4.750	<b>21</b>	-Uniformidad	34.49
Nº 10	2.000	<b>16</b>	-Curvatura	4.67
Nº 20	0.850	<b>11</b>	<b>Material :</b>	
Nº 40	0.425	<b>8</b>	-Grava %	79
Nº 60	0.250	<b>4</b>	-Arena %	20
Nº 140	0.106	<b>2</b>	-Finos %	1
Nº 200	0.075	<b>1</b>	<b>Clasificacion :</b>	
			-AASHTO	-
			-SUCS	-
			<b>Nombre de grupo:</b>	
			<b>CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216</b>	
			Humedad natural (%)	-



**NOTA:** La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

## Análisis granulométrico global de la muestra calicata 9

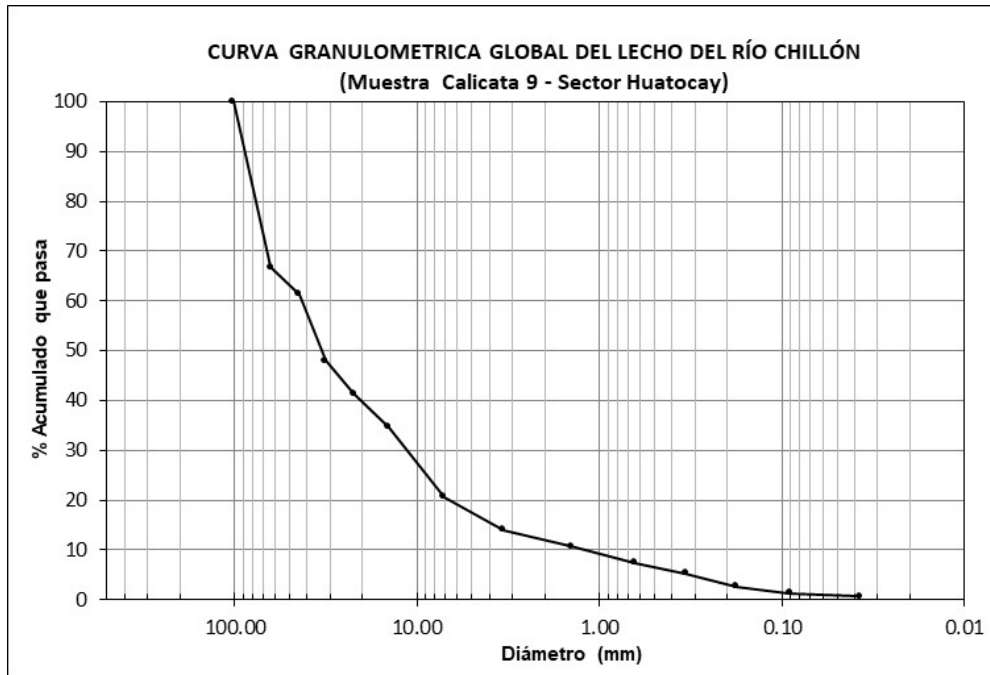


Foto 9 calicata 9 (C-9) para extraer muestras del material depositado por el río en su cauce.

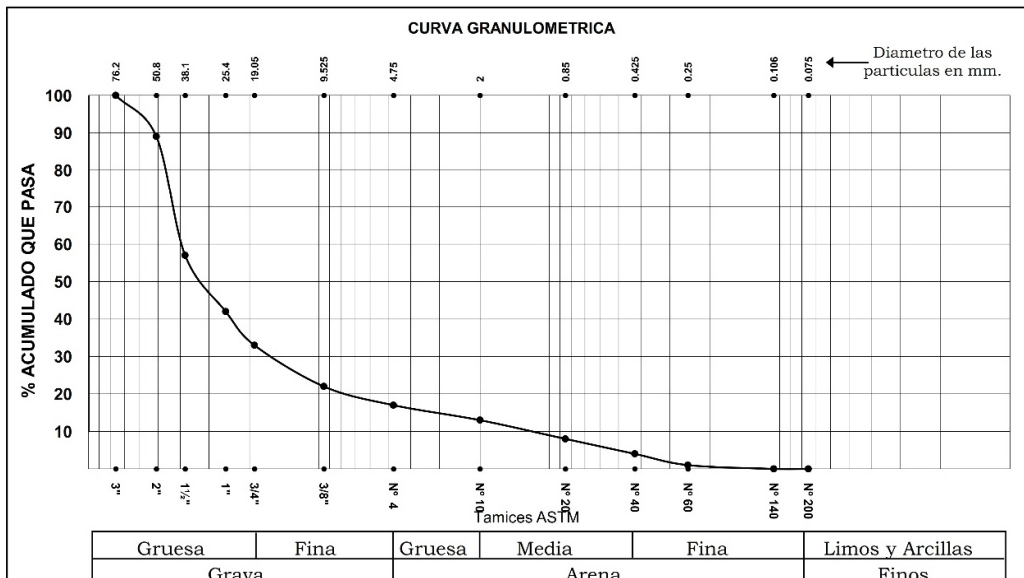
## Análisis granulométrico integral de la muestra calicata 10



**Universidad Nacional Agraria la Molina**  
 DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y CONSTRUCCIÓN  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
 DOT.C - LMS 117/2018

<b>Solicitante :</b>	SAMUEL ISMAEL QUISCA ASTOCAHUANA	<b>Calicata :</b>	<b>C - 10</b>
<b>Proyecto :</b>	Descolmatación y encausamiento del cause del Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Muestra :</b>	<b>MAB</b>
<b>Ubicación :</b>	Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Profundidad :</b>	-
<b>Fecha :</b>	<b>La Molina</b> <b>10 de septiembre de 2018</b>	<b>Tec. :</b>	-

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	ASTM - D 2487 / D 3282	
3"	76.20	<b>100</b>	Limite liquido (%)	-
2"	50.80	<b>89</b>	Limite plastico (%)	-
1 1/2"	38.10	<b>57</b>	Indice plastico (%)	-
1"	25.40	<b>42</b>	Limite de contraccion (%)	-
3/4"	19.05	<b>33</b>	<b>ASTM - D 2487 / D 3282</b>	
3/8"	9.525	<b>22</b>	<b>Coefficiente de :</b>	
Nº 4	4.750	<b>17</b>	-Uniformidad	15.55
Nº 10	2.000	<b>13</b>	-Curvatura	2.49
Nº 20	0.850	<b>8</b>	<b>Material :</b>	
Nº 40	0.425	<b>4</b>	-Grava %	83
Nº 60	0.250	<b>1</b>	-Arena %	17
Nº 140	0.106	<b>0</b>	-Finos %	0
Nº 200	0.075	<b>0</b>	<b>Clasificación :</b>	
			-AASHTO	-
			-SUCS	-
			<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216</b>				
			Humedad natural (%)	-



**NOTA:** La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

## Análisis granulométrico global de la muestra calicata 10

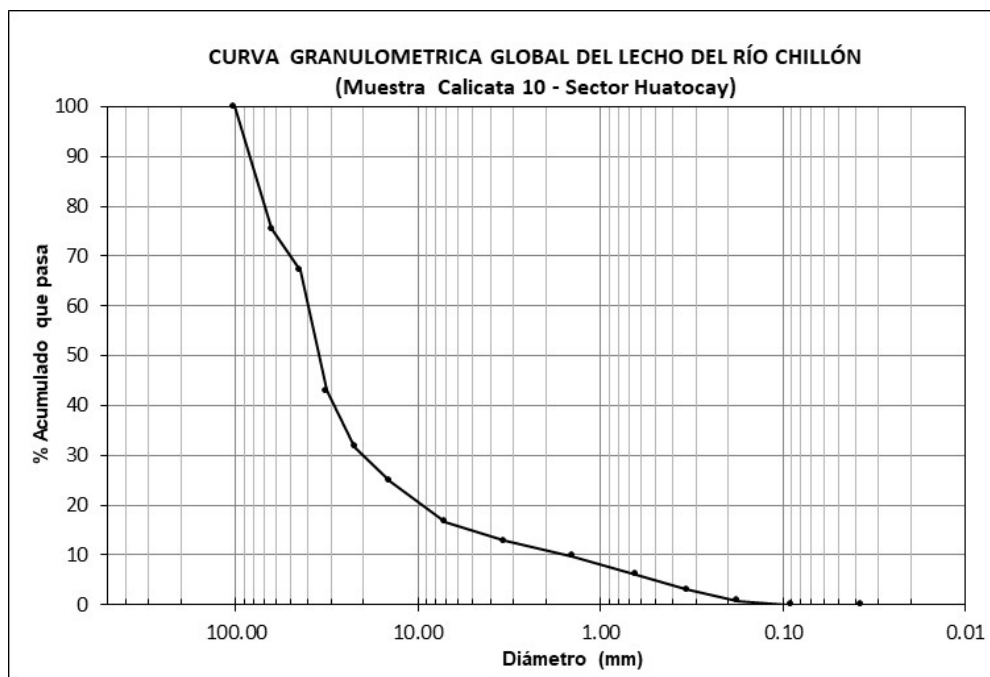


Foto 10 calicata 10 (C-10) para extraer muestras del material depositado por el río en su cauce.



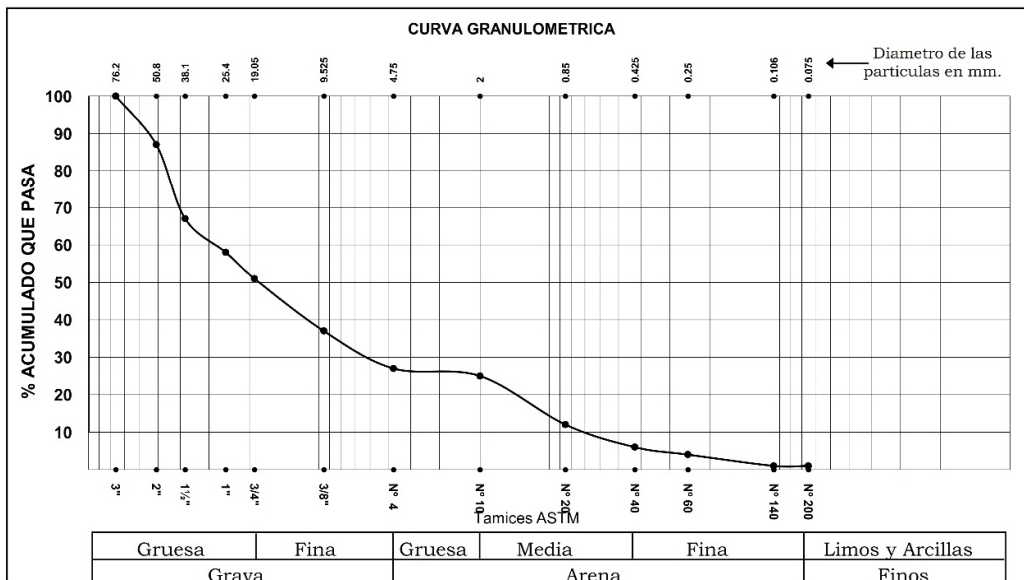
## Análisis granulométrico integral de la muestra calicata 11



**Universidad Nacional Agraria la Molina**  
 DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y CONSTRUCCIÓN  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
 DOT.C - LMS 117/2018

<b>Solicitante</b> :	SAMUEL ISMAEL QUISCA ASTOCAHUANA	<b>Calicata</b> :	<b>C - 11</b>
<b>Proyecto</b> :	Descolmatación y encausamiento del cause del Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Muestra</b> :	<b>MAB</b>
<b>Ubicación</b> :	Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Profundidad</b> :	-
<b>Fecha</b> :	<b>La Molina</b> <b>10 de septiembre de 2018</b>	<b>Tec.</b> :	-

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	ASTM - D 2487 / D 3282	
3"	76.20	<b>100</b>	Limite liquido (%)	-
2"	50.80	<b>87</b>	Limite plastico (%)	-
1 1/2"	38.10	<b>67</b>	Indice plastico (%)	-
1"	25.40	<b>58</b>	Limite de contraccion (%)	-
3/4"	19.05	<b>51</b>	<b>ASTM - D 2487 / D 3282</b>	
3/8"	9.525	<b>37</b>	<b>Coefficiente de :</b>	
Nº 4	4.750	<b>27</b>	-Uniformidad	40.32
Nº 10	2.000	<b>25</b>	-Curvatura	1.65
Nº 20	0.850	<b>12</b>	<b>Material :</b>	
Nº 40	0.425	<b>6</b>	-Grava %	73
Nº 60	0.250	<b>4</b>	-Arena %	26
Nº 140	0.106	<b>1</b>	-Finos %	1
Nº 200	0.075	<b>1</b>	<b>Clasificación :</b>	
			-AASHTO	-
			-SUCS	-
			<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216</b>				
			Humedad natural (%)	-



**NOTA:** La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

## Análisis granulométrico global de la muestra calicata 11

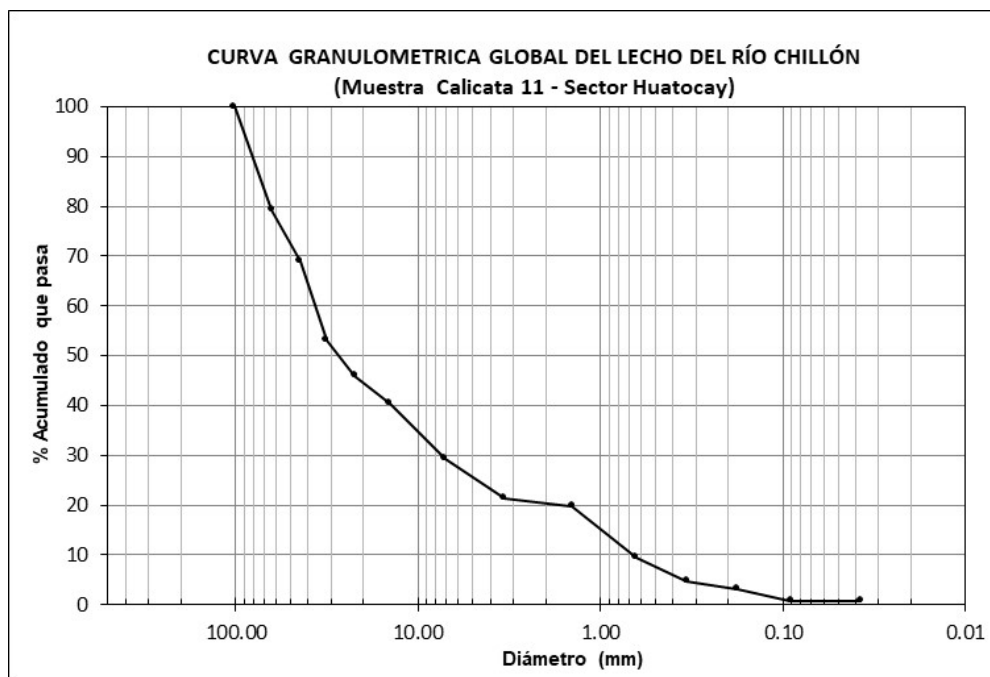


Foto 11 calicata 11 (C-11) para extraer muestras del material depositado por el río en su cauce.

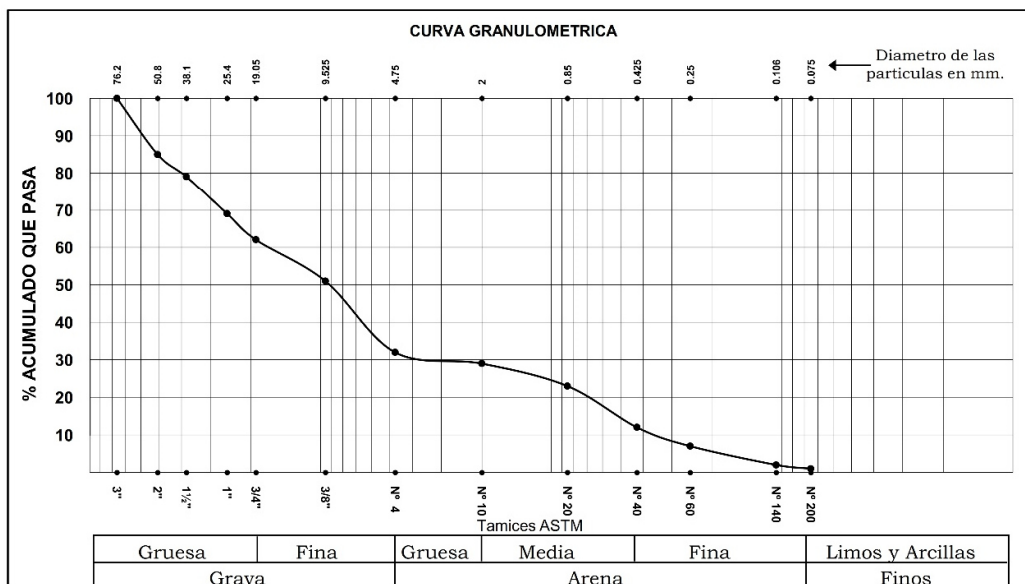
## Análisis granulométrico integral de la muestra calicata 12



**Universidad Nacional Agraria la Molina**  
DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y CONSTRUCCIÓN  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
DOT.C - LMS 117/2018

<b>Solicitante :</b>	SAMUEL ISMAEL QUISCA ASTOCAHUANA	<b>Calicata :</b>	<b>C - 12</b>
<b>Proyecto :</b>	Descolmatación y encausamiento del cause del Rio Chillón, Sector Huatocay	<b>Muestra :</b>	<b>MAB</b>
<b>Ubicación :</b>	Río Chillon, Sector Huatocay	<b>Profundidad :</b>	-
<b>Fecha :</b>	<b>La Molina 10 de septiembre de 2018</b>	<b>Tec. :</b>	-

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	Limite liquido (%)	-
3"	76.20	<b>100</b>	Limite plastico (%)	-
2"	50.80	<b>85</b>	Indice plastico (%)	-
1 1/2"	38.10	<b>79</b>	Limite de contraccion (%)	-
1"	25.40	<b>69</b>	<b>ASTM - D 2487 / D 3282</b>	
3/4"	19.05	<b>62</b>	<b>Coefficiente de :</b>	
3/8"	9.525	<b>51</b>	-Uniformidad	47.65
Nº 4	4.750	<b>32</b>	-Curvatura	2.91
Nº 10	2.000	<b>29</b>	<b>Material :</b>	
Nº 20	0.850	<b>23</b>	-Grava %	68
Nº 40	0.425	<b>12</b>	-Arena %	31
Nº 60	0.250	<b>7</b>	-Finos %	1
Nº 140	0.106	<b>2</b>	<b>Clasificacion :</b>	
Nº 200	0.075	<b>1</b>	-AASHTO	-
			-SUCS	-
			<b>Nombre de grupo:</b>	
			<b>CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216</b>	
			Humedad natural (%)	-



**NOTA:** La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

## Análisis granulométrico global de la muestra calicata 12

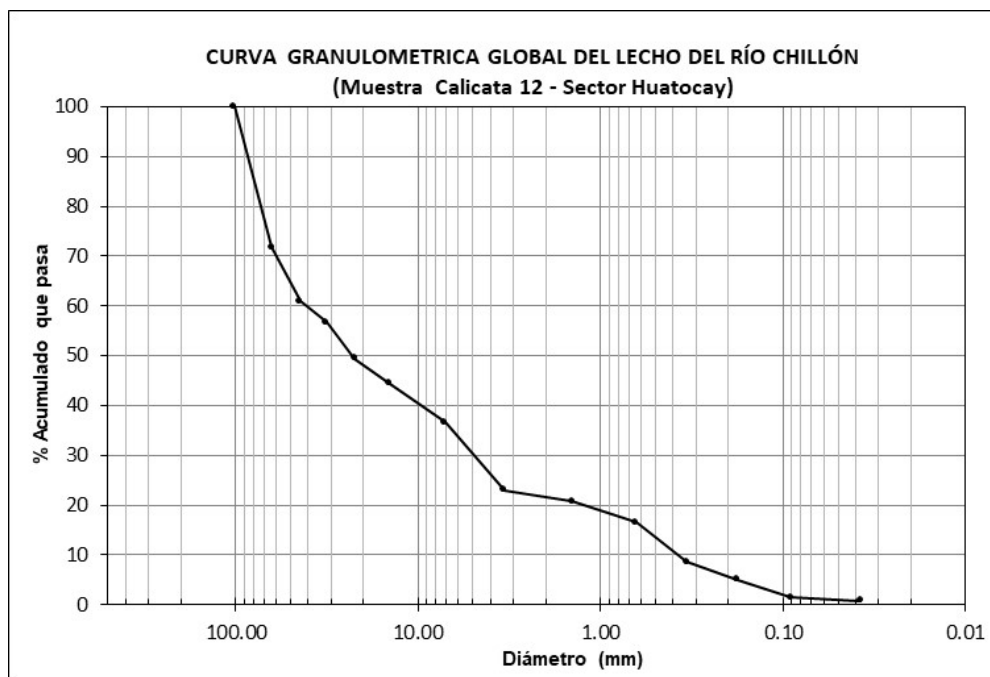


Foto 12 calicata 12 (C-12) para extraer muestras del material depositado por el río en su cauce.

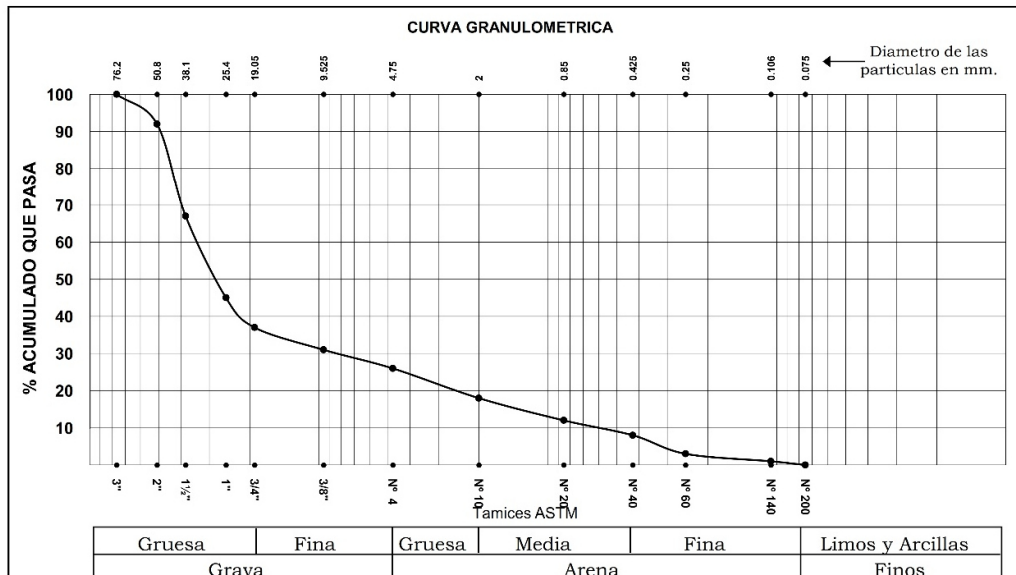
## Análisis granulométrico integral de la muestra calicata 13



**Universidad Nacional Agraria la Molina**  
DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y CONSTRUCCIÓN  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
DOT.C - LMS 117/2018

<b>Solicitante :</b>	SAMUEL ISMAEL QUISCA ASTOCAHUANA	<b>Calicata :</b>	<b>C - 13</b>
<b>Proyecto :</b>	Descolmatación y encausamiento del cause del Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Muestra :</b>	<b>MAB</b>
<b>Ubicación :</b>	Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Profundidad :</b>	-
<b>Fecha :</b>	<b>La Molina 10 de septiembre de 2018</b>	<b>Tec. :</b>	-

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	ASTM - D 2487 / D 3282	
3"	76.20	<b>100</b>	Limite liquido (%)	-
2"	50.80	<b>92</b>	Limite plastico (%)	-
1 1/2"	38.10	<b>67</b>	Indice plastico (%)	-
1"	25.40	<b>45</b>	Limite de contraccion (%)	-
3/4"	19.05	<b>37</b>	<b>ASTM - D 2487 / D 3282</b>	
3/8"	9.525	<b>31</b>	<b>Coefficiente de :</b>	
Nº 4	4.750	<b>26</b>	-Uniformidad	54.06
Nº 10	2.000	<b>18</b>	-Curvatura	3.17
Nº 20	0.850	<b>12</b>	<b>Material :</b>	
Nº 40	0.425	<b>8</b>	-Grava %	74
Nº 60	0.250	<b>3</b>	-Arena %	26
Nº 140	0.106	<b>1</b>	-Finos %	0
Nº 200	0.075	<b>0</b>	<b>Clasificacion :</b>	
			-AASHTO	-
			-SUCS	-
			<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216</b>				
			Humedad natural (%)	-



**NOTA:** La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

## Análisis granulométrico global de la muestra calicata 13

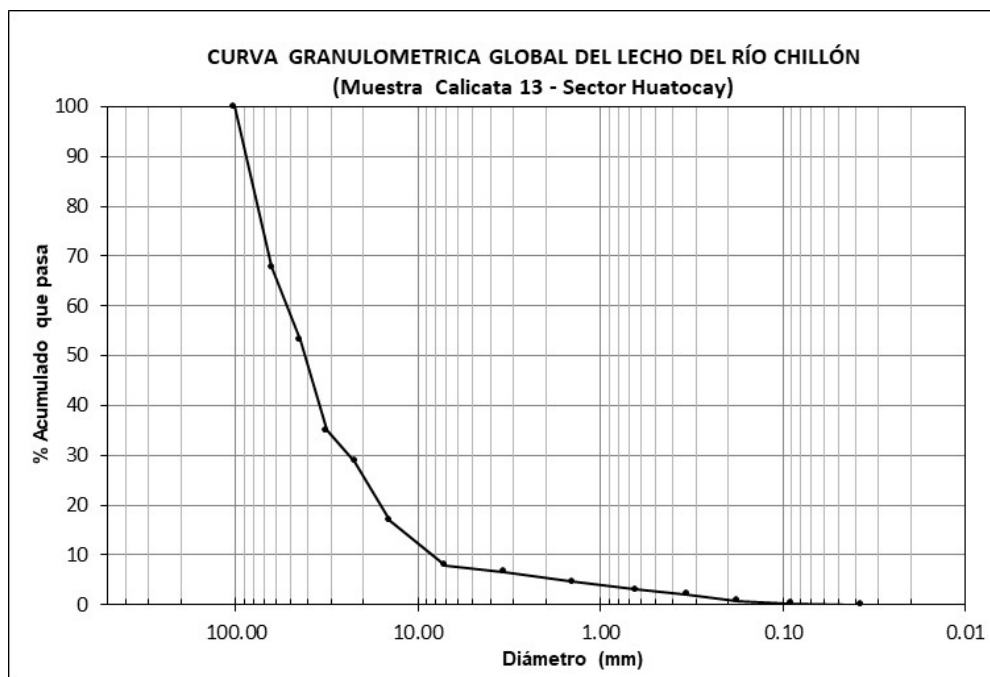


Foto 13 calicata 13 (C-13) para extraer muestras del material depositado por el río en su cauce.

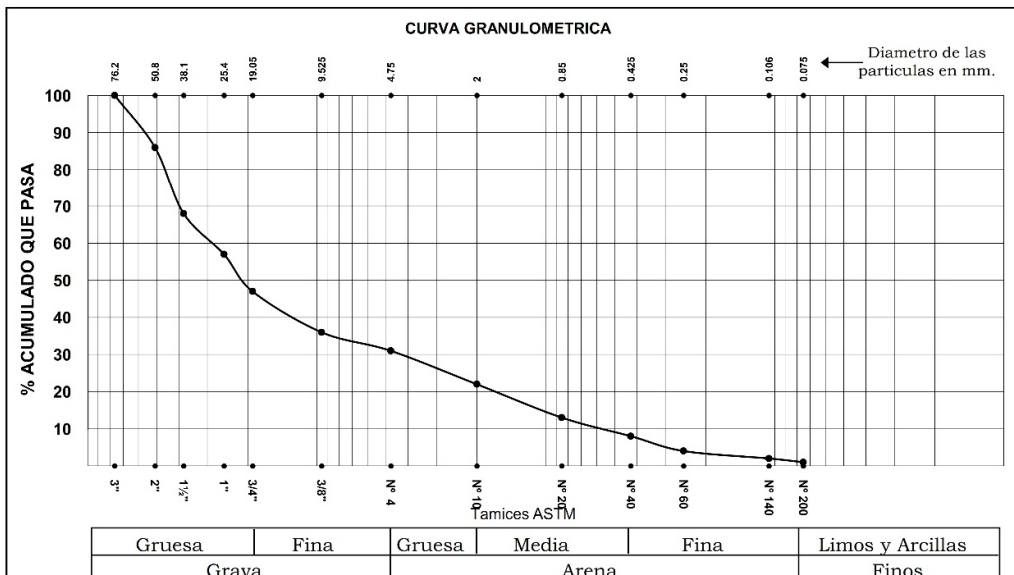
## Análisis granulométrico integral de la muestra calicata 14



**Universidad Nacional Agraria la Molina**  
 DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y CONSTRUCCIÓN  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
 DOT.C - LMS 117/2018

<b>Solicitante :</b>	SAMUEL ISMAEL QUISCA ASTOCAHUANA	<b>Calicata :</b>	<b>C - 14</b>
<b>Proyecto :</b>	Descolmatación y encausamiento del cause del Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Muestra :</b>	<b>MAB</b>
<b>Ubicación :</b>	Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Profundidad :</b>	-
<b>Fecha :</b>	La Molina 10 de septiembre de 2018	<b>Tec. :</b>	-

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	Limite liquido (%)	-
3"	76.20	100	Limite plastico (%)	-
2"	50.80	86	Indice plastico (%)	-
1 1/2"	38.10	68	Limite de contraccion (%)	-
1"	25.40	57	<b>ASTM - D 2487 / D 3282</b>	
3/4"	19.05	47	<b>Coefficiente de :</b>	
3/8"	9.525	36	-Uniformidad	49.09
Nº 4	4.750	31	-Curvatura	1.25
Nº 10	2.000	22	<b>Material :</b>	
Nº 20	0.850	13	-Grava %	69
Nº 40	0.425	8	-Arena %	30
Nº 60	0.250	4	-Finos %	1
Nº 140	0.106	2	<b>Clasificación :</b>	
Nº 200	0.075	1	-AASHTO	-
			-SUCS	-
			<b>Nombre de grupo:</b>	
			<b>CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216</b>	
			Humedad natural (%)	-



**NOTA:** La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

## Análisis granulométrico global de la muestra calicata 14

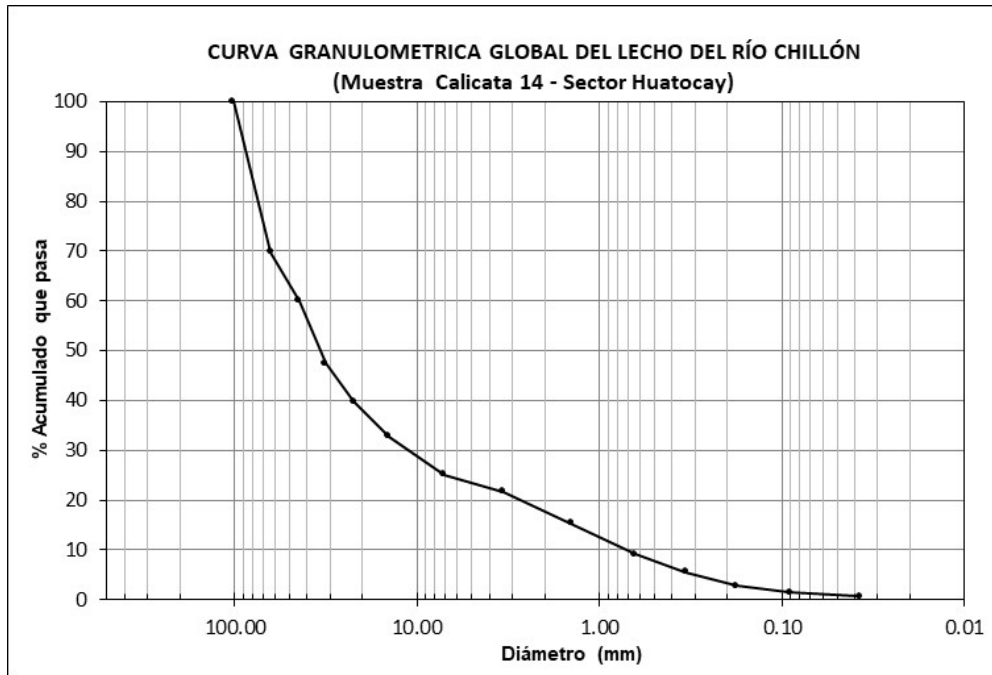


Foto 14 calicata 14 (C-14) para extraer muestras del material depositado por el río en su cauce.



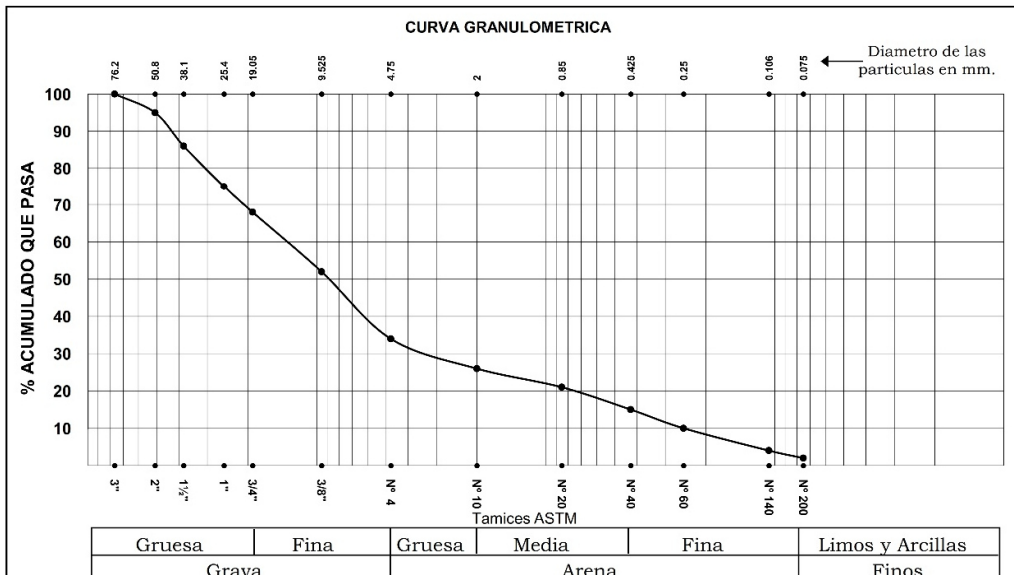
## Análisis granulométrico integral de la muestra calicata 15



**Universidad Nacional Agraria la Molina**  
 DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y CONSTRUCCIÓN  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
 DOT.C - LMS 117/2018

<b>Solicitante :</b>	SAMUEL ISMAEL QUISCA ASTOCAHUANA	<b>Calicata :</b>	<b>C - 15</b>
<b>Proyecto :</b>	Descolmatación y encausamiento del cause del Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Muestra :</b>	<b>MAB</b>
<b>Ubicación :</b>	Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Profundidad :</b>	-
<b>Fecha :</b>	<b>La Molina 10 de septiembre de 2018</b>	<b>Tec. :</b>	-

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	Límite líquido (%)	-
3"	76.20	<b>100</b>	Límite plástico (%)	-
2"	50.80	<b>95</b>	Índice plástico (%)	-
1 1/2"	38.10	<b>86</b>	Límite de contracción (%)	-
1"	25.40	<b>75</b>	<b>ASTM - D 2487 / D 3282</b>	
3/4"	19.05	<b>68</b>	<b>Coefficiente de :</b>	
3/8"	9.525	<b>52</b>	-Uniformidad	50.80
Nº 4	4.750	<b>34</b>	-Curvatura	4.82
Nº 10	2.000	<b>26</b>	<b>Material :</b>	
Nº 20	0.850	<b>21</b>	-Grava %	66
Nº 40	0.425	<b>15</b>	-Arena %	32
Nº 60	0.250	<b>10</b>	-Finos %	2
Nº 140	0.106	<b>4</b>	<b>Clasificación :</b>	
Nº 200	0.075	<b>2</b>	-AASHTO	-
			-SUCS	-
			<b>Nombre de grupo:</b>	
			<b>CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216</b>	
			Humedad natural (%)	-



**NOTA:** La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

## Análisis granulométrico global de la muestra calicata 15

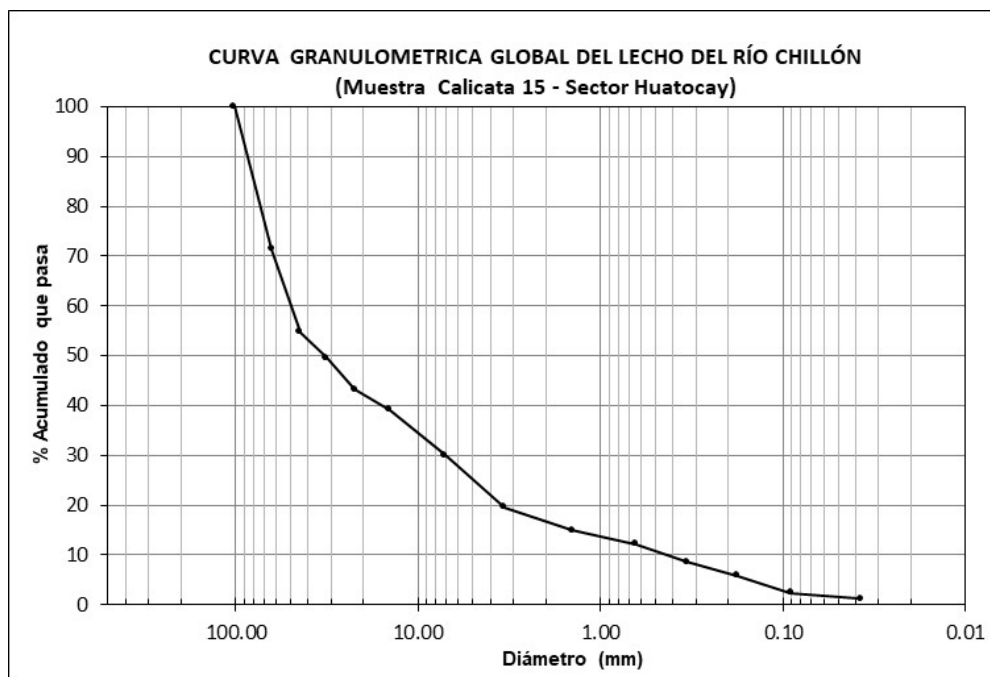


Foto 15 calicata 15 (C-15) para extraer muestras del material depositado por el río en su cauce.

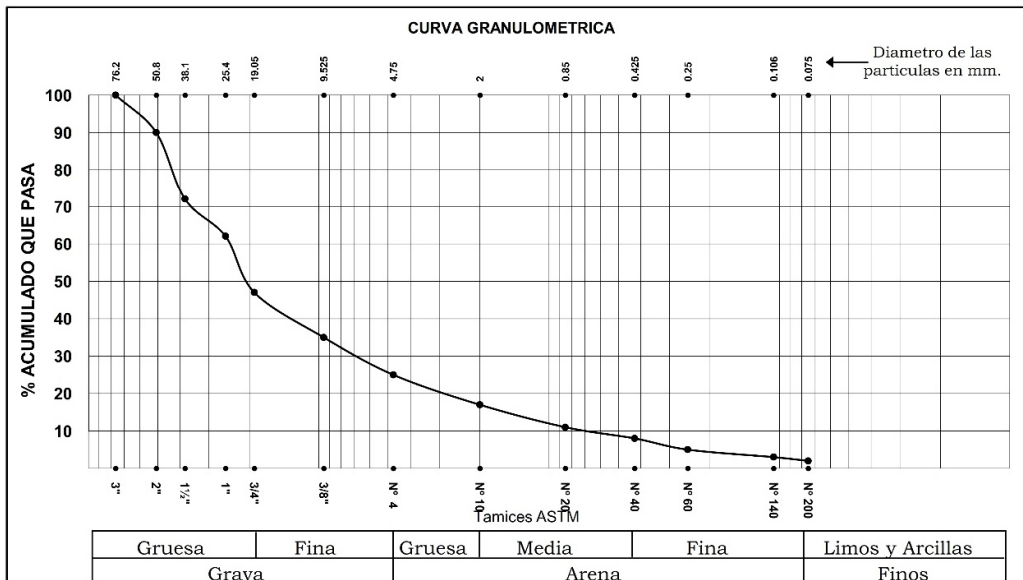
## Análisis granulométrico integral de la muestra calicata 16



**Universidad Nacional Agraria la Molina**  
 DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y CONSTRUCCIÓN  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
 DOT.C - LMS 117/2018

<b>Solicitante :</b>	SAMUEL ISMAEL QUISCA ASTOCAHUANA	<b>Calicata :</b>	<b>C - 16</b>
<b>Proyecto :</b>	Descolmatación y encausamiento del cause del Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Muestra :</b>	<b>MAB</b>
<b>Ubicación :</b>	Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Profundidad :</b>	-
<b>Fecha :</b>	La Molina 10 de septiembre de 2018	<b>Tec. :</b>	-

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	Límite líquido (%)	-
3"	76.20	<b>100</b>	Límite plástico (%)	-
2"	50.80	<b>90</b>	Índice plástico (%)	-
1 1/2"	38.10	<b>72</b>	Límite de contracción (%)	-
1"	25.40	<b>62</b>	<b>ASTM - D 2487 / D 3282</b>	
3/4"	19.05	<b>47</b>	<b>Coefficiente de :</b>	
3/8"	9.525	<b>35</b>	-Uniformidad	35.09
Nº 4	4.750	<b>25</b>	-Curvatura	2.35
Nº 10	2.000	<b>17</b>	<b>Material :</b>	
Nº 20	0.850	<b>11</b>	-Grava %	75
Nº 40	0.425	<b>8</b>	-Arena %	23
Nº 60	0.250	<b>5</b>	-Finos %	2
Nº 140	0.106	<b>3</b>	<b>Clasificación :</b>	
Nº 200	0.075	<b>2</b>	-AASHTO	-
			-SUCS	-
			<b>Nombre de grupo:</b>	
			<b>CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216</b>	
			Humedad natural (%)	-



**NOTA:** La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

## Análisis granulométrico global de la muestra calicata 16

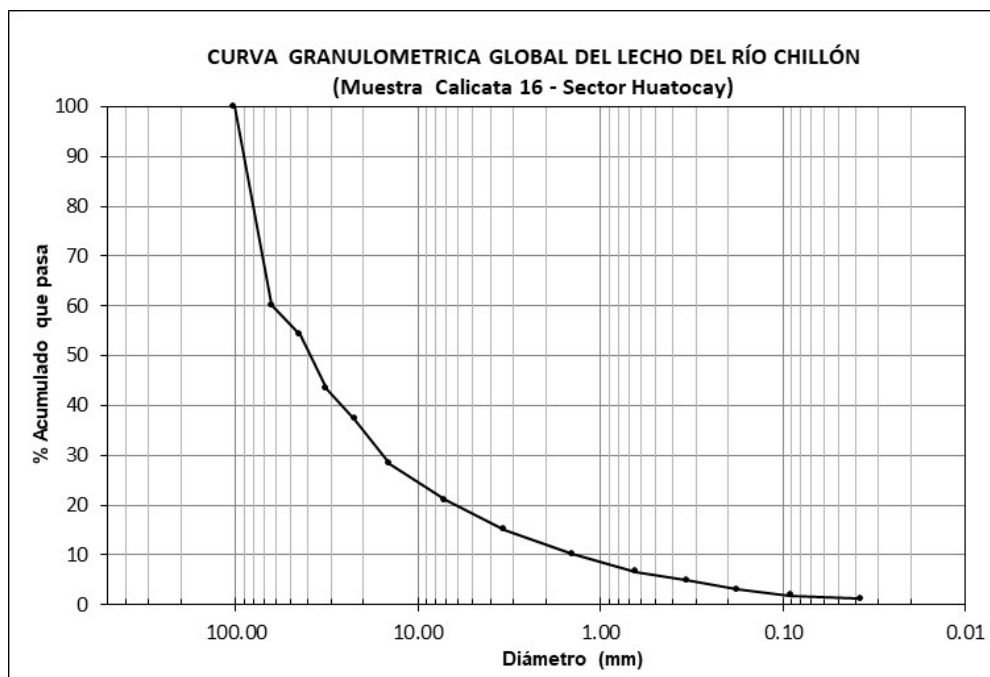


Foto 16 calicata 16 (C-16) para extraer muestras del material depositado por el río en su cauce.

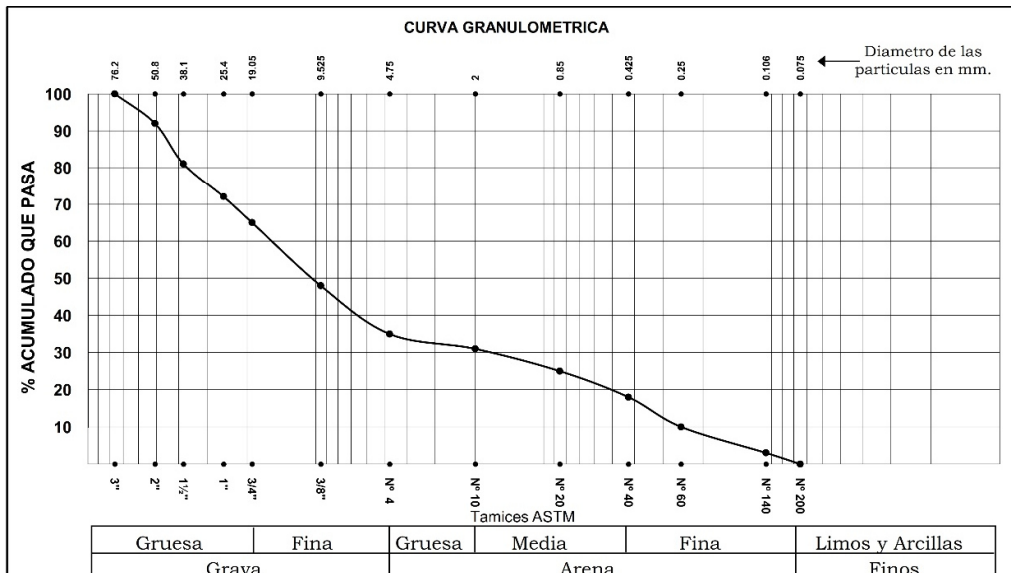
## Análisis granulométrico integral de la muestra calicata 17



**Universidad Nacional Agraria la Molina**  
 DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y CONSTRUCCIÓN  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
 DOT.C - LMS 117/2018

<b>Solicitante :</b>	SAMUEL ISMAEL QUISCA ASTOCAHUANA	<b>Calicata :</b>	<b>C - 17</b>
<b>Proyecto :</b>	Descolmatación y encausamiento del cause del Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Muestra :</b>	<b>MAB</b>
<b>Ubicación :</b>	Río Chillón, Sector Huatocay	<b>Profundidad :</b>	-
<b>Fecha :</b>	<b>La Molina 10 de septiembre de 2018</b>	<b>Tec. :</b>	-

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	Límite líquido (%)	-
3"	76.20	<b>100</b>	Límite plástico (%)	-
2"	50.80	<b>92</b>	Índice plástico (%)	-
1 1/2"	38.10	<b>81</b>	Límite de contracción (%)	-
1"	25.40	<b>72</b>	<b>ASTM - D 2487 / D 3282</b>	
3/4"	19.05	<b>65</b>	<b>Coefficiente de :</b>	
3/8"	9.525	<b>48</b>	-Uniformidad	61.34
Nº 4	4.750	<b>35</b>	-Curvatura	2.98
Nº 10	2.000	<b>31</b>	<b>Material :</b>	
Nº 20	0.850	<b>25</b>	-Grava %	65
Nº 40	0.425	<b>18</b>	-Arena %	35
Nº 60	0.250	<b>10</b>	-Finos %	0
Nº 140	0.106	<b>3</b>	<b>Clasificación :</b>	
Nº 200	0.075	<b>0</b>	-AASHTO	-
			-SUCS	-
			<b>Nombre de grupo:</b>	
			<b>CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216</b>	
			Humedad natural (%)	-



**NOTA:** La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

## Análisis granulométrico global de la muestra calicata 17

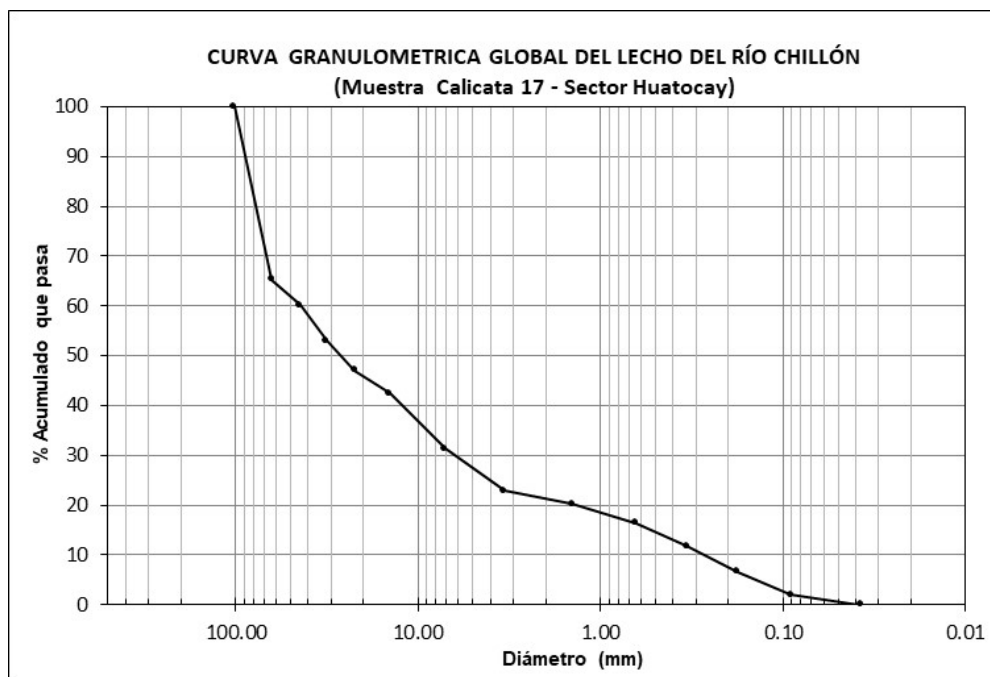


Foto 17 calicata 17 (C-17) para extraer muestras del material depositado por el río en su cauce.

**Anexo 5:** Resultados y mediciones con el perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP) “RiverSurveyor S5”

	
A	D
	
B	E
	
C	F
<p>Foto 1 instalación del ADCP Sontek HydroBoard II. A) Plataforma móvil. B) Cable para conectar la antena. C) Perfilador ADCP S5, fuente de poder PCM y antenas GPS D) Equipamiento del ADCP Sontek HydroBoard II. E) Instalación de la estación base RTK. F) Equipo portátil para la toma de datos conectado al dispositivo bluetooth.</p>	



Foto 2 sección de control Nro. 1



Foto 3 aguas abajo sección de control Nro. 1



Foto 4 aguas arriba sección de control Nro. 1





Foto 5 ADCP en movimiento obteniendo datos en la margen izquierda de la sección de control Nro. 1 en el río Chillón.



Foto 6 ADCP en movimiento obteniendo datos en el centro de la sección de control Nro. 1 en el río Chillón.



Foto 7 ADCP en movimiento obteniendo datos en la margen derecha de la sección de control Nro. 1 en el río Chillón.



Foto 8 sección de control Nro. 2



Foto 9 ADCP en movimiento obteniendo datos en la margen izquierda de la sección de control Nro. 2 en el río Chillón.



Foto 10 ADCP en movimiento obteniendo datos en el centro de la sección de control Nro. 2 en el río Chillón.



Foto 11 ADCP en movimiento, obteniendo datos en la margen derecha de la sección de control Nro. 2 en el río Chillón.

#### **Anexo 6:** Análisis estadístico de datos hidrológicos.

La distribución de Valores Tipo I conocida como Distribución Gumbel o Doble Exponencial, tiene como función de distribución de probabilidades la siguiente expresión:

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}}}$$

Válido para:  $-\infty < x < \infty$

Donde:

$0 < \alpha < \infty$ , es el parámetro de escala

$-\infty < \mu < \infty$ , es el parámetro de posición, llamado también valor central o moda

La serie hidrológica de caudal medio es ajustada a la distribución Gumbel, para ello aplicamos el programa Hidroesta 2. Los resultados se presentan en la Figura 48, donde se observa a la distribución Gumbel representa mejor a los valores altos de caudal.

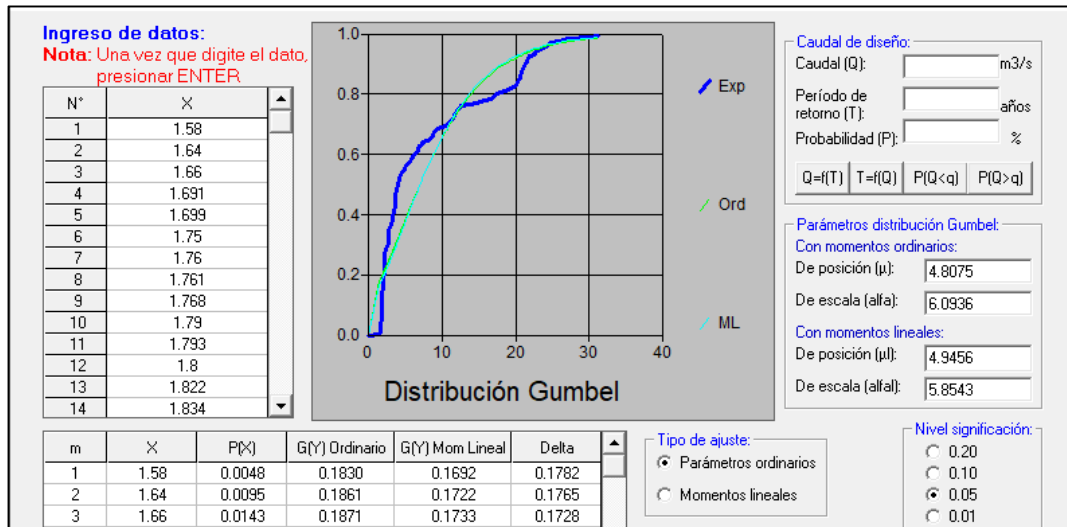


Figura 48: Resultados de la serie ajustadas a la distribución Gumbel.

Ajuste de una serie de datos a la distribución Gumbel:

N°	X
1	1.58
2	1.64
3	1.66
4	1.691
5	1.699
6	1.75
7	1.76
8	1.761
9	1.768
10	1.79
11	1.793
12	1.8
13	1.822
14	1.834
15	1.836
16	1.837
17	1.847
18	1.85
19	1.853
20	1.856
21	1.863
22	1.88
23	1.887
24	1.89

N°	X
25	1.891
26	1.9
27	1.902
28	1.92
29	1.925
30	1.938
31	1.939
32	1.97
33	2
34	2.02
35	2.021
36	2.063
37	2.08
38	2.087
39	2.095
40	2.108
41	2.127
42	2.14
43	2.148
44	2.152
45	2.154
46	2.163
47	2.17
48	2.174
49	2.18
50	2.181
51	2.185
52	2.191
53	2.195
54	2.208
55	2.213
56	2.264
57	2.292
58	2.295
59	2.324
60	2.438
61	2.469
62	2.57
63	2.653
64	2.693
65	2.785
66	2.793
67	2.794

N°	X
68	2.805
69	2.812
70	2.819
71	2.828
72	2.832
73	2.852
74	2.861
75	2.873
76	2.971
77	3.122
78	3.194
79	3.263
80	3.304
81	3.339
82	3.344
83	3.373
84	3.381
85	3.454
86	3.485
87	3.503
88	3.506
89	3.629
90	3.641
91	3.671
92	3.676
93	3.677
94	3.691
95	3.7
96	3.731
97	3.754
98	3.76
99	3.767
100	3.788
101	3.823
102	3.866
103	3.952
104	4.026
105	4.05
106	4.102
107	4.111
108	4.193
109	4.266

N°	X
110	4.288
111	4.394
112	4.429
113	4.607
114	4.644
115	4.882
116	4.904
117	4.969
118	5.156
119	5.293
120	5.561
121	5.716
122	5.727
123	6.059
124	6.092
125	6.112
126	6.375
127	6.389
128	6.748
129	6.795
130	6.831
131	6.852
132	6.98
133	7.34
134	7.362
135	7.437
136	8.094
137	8.454
138	8.592
139	8.828
140	8.879
141	8.956
142	9.113
143	9.185
144	9.472
145	10.072
146	10.508
147	10.704
148	10.75
149	11.191
150	11.351
151	11.547

N°	X
152	11.582
153	11.661
154	11.786
155	11.916
156	12.036
157	12.26
158	12.446
159	12.455
160	12.613
161	13.773
162	14.892
163	15.451
164	15.875
165	16.862
166	17.036
167	17.243
168	17.63
169	17.945
170	18.597
171	19.226
172	19.347
173	19.63
174	19.99
175	20.074
176	20.253
177	20.323
178	20.418
179	20.593
180	20.643
181	20.655
182	20.667
183	20.727
184	20.756
185	20.937
186	20.981
187	21.211
188	21.248
189	21.306
190	21.489
191	21.548
192	21.556
193	21.739



N°	X
194	21.794
195	21.905
196	22.596
197	22.698
198	22.957
199	23.496
200	23.742
201	24.167
202	24.465
203	24.546
204	24.763
205	26.075
206	26.454
207	27.36
208	30.186
209	31.122

Cálculos del ajuste Smirnov Kolmogorov:

m	X	P(X)	G(Y) Ordinario	G(Y) Mom Lineal	Delta
1	1.58	0.0048	0.183	0.1692	0.1782
2	1.64	0.0095	0.1861	0.1722	0.1765
3	1.66	0.0143	0.1871	0.1733	0.1728
4	1.691	0.019	0.1887	0.1749	0.1696
5	1.699	0.0238	0.1891	0.1753	0.1653
6	1.75	0.0286	0.1917	0.178	0.1632
7	1.76	0.0333	0.1923	0.1785	0.1589
8	1.761	0.0381	0.1923	0.1786	0.1542
9	1.768	0.0429	0.1927	0.1789	0.1498
10	1.79	0.0476	0.1938	0.1801	0.1462
11	1.793	0.0524	0.194	0.1802	0.1416
12	1.8	0.0571	0.1943	0.1806	0.1372
13	1.822	0.0619	0.1955	0.1818	0.1336
14	1.834	0.0667	0.1961	0.1824	0.1295
15	1.836	0.0714	0.1962	0.1825	0.1248
16	1.837	0.0762	0.1963	0.1826	0.1201
17	1.847	0.081	0.1968	0.1831	0.1159
18	1.85	0.0857	0.197	0.1833	0.1112
19	1.853	0.0905	0.1971	0.1834	0.1066
20	1.856	0.0952	0.1973	0.1836	0.102
21	1.863	0.1	0.1976	0.1839	0.0976
22	1.88	0.1048	0.1985	0.1849	0.0938
23	1.887	0.1095	0.1989	0.1852	0.0894

m	X	P(X)	G(Y) Ordinario	G(Y) Mom Lineal	Delta
24	1.89	0.1143	0.1991	0.1854	0.0848
25	1.891	0.119	0.1991	0.1854	0.0801
26	1.9	0.1238	0.1996	0.1859	0.0758
27	1.902	0.1286	0.1997	0.186	0.0711
28	1.92	0.1333	0.2007	0.187	0.0673
29	1.925	0.1381	0.2009	0.1873	0.0628
30	1.938	0.1429	0.2016	0.188	0.0587
31	1.939	0.1476	0.2017	0.188	0.054
32	1.97	0.1524	0.2033	0.1897	0.0509
33	2	0.1571	0.2049	0.1913	0.0478
34	2.02	0.1619	0.206	0.1924	0.0441
35	2.021	0.1667	0.206	0.1924	0.0394
36	2.063	0.1714	0.2083	0.1947	0.0368
37	2.08	0.1762	0.2092	0.1956	0.033
38	2.087	0.181	0.2096	0.196	0.0286
39	2.095	0.1857	0.21	0.1965	0.0243
40	2.108	0.1905	0.2107	0.1972	0.0202
41	2.127	0.1952	0.2117	0.1982	0.0165
42	2.14	0.2	0.2124	0.1989	0.0124
43	2.148	0.2048	0.2128	0.1994	0.0081
44	2.152	0.2095	0.2131	0.1996	0.0035
45	2.154	0.2143	0.2132	0.1997	0.0011
46	2.163	0.219	0.2137	0.2002	0.0054
47	2.17	0.2238	0.214	0.2006	0.0098
48	2.174	0.2286	0.2142	0.2008	0.0143
49	2.18	0.2333	0.2146	0.2011	0.0188
50	2.181	0.2381	0.2146	0.2012	0.0235
51	2.185	0.2429	0.2148	0.2014	0.028
52	2.191	0.2476	0.2152	0.2017	0.0324
53	2.195	0.2524	0.2154	0.2019	0.037
54	2.208	0.2571	0.2161	0.2027	0.041
55	2.213	0.2619	0.2164	0.2029	0.0455
56	2.264	0.2667	0.2191	0.2058	0.0475
57	2.292	0.2714	0.2207	0.2073	0.0508
58	2.295	0.2762	0.2208	0.2075	0.0554
59	2.324	0.281	0.2224	0.2091	0.0585
60	2.438	0.2857	0.2287	0.2155	0.057
61	2.469	0.2905	0.2304	0.2173	0.06
62	2.57	0.2952	0.2361	0.223	0.0592
63	2.653	0.3	0.2407	0.2278	0.0593
64	2.693	0.3048	0.243	0.2301	0.0618
65	2.785	0.3095	0.2482	0.2354	0.0614
66	2.793	0.3143	0.2486	0.2359	0.0657

m	X	P(X)	G(Y) Ordinario	G(Y) Mom Lineal	Delta
67	2.794	0.319	0.2487	0.2359	0.0704
68	2.805	0.3238	0.2493	0.2366	0.0745
69	2.812	0.3286	0.2497	0.237	0.0789
70	2.819	0.3333	0.2501	0.2374	0.0832
71	2.828	0.3381	0.2506	0.2379	0.0875
72	2.832	0.3429	0.2508	0.2382	0.092
73	2.852	0.3476	0.252	0.2393	0.0956
74	2.861	0.3524	0.2525	0.2399	0.0999
75	2.873	0.3571	0.2532	0.2406	0.104
76	2.971	0.3619	0.2588	0.2463	0.1031
77	3.122	0.3667	0.2675	0.2553	0.0992
78	3.194	0.3714	0.2717	0.2596	0.0998
79	3.263	0.3762	0.2757	0.2637	0.1005
80	3.304	0.381	0.2781	0.2662	0.1029
81	3.339	0.3857	0.2801	0.2683	0.1056
82	3.344	0.3905	0.2804	0.2686	0.1101
83	3.373	0.3952	0.2821	0.2703	0.1131
84	3.381	0.4	0.2826	0.2708	0.1174
85	3.454	0.4048	0.2869	0.2752	0.1179
86	3.485	0.4095	0.2887	0.2771	0.1208
87	3.503	0.4143	0.2898	0.2782	0.1245
88	3.506	0.419	0.2899	0.2784	0.1291
89	3.629	0.4238	0.2972	0.2859	0.1266
90	3.641	0.4286	0.2979	0.2866	0.1307
91	3.671	0.4333	0.2997	0.2884	0.1337
92	3.676	0.4381	0.3	0.2888	0.1381
93	3.677	0.4429	0.3	0.2888	0.1428
94	3.691	0.4476	0.3009	0.2897	0.1468
95	3.7	0.4524	0.3014	0.2902	0.151
96	3.731	0.4571	0.3032	0.2921	0.1539
97	3.754	0.4619	0.3046	0.2935	0.1573
98	3.76	0.4667	0.305	0.2939	0.1617
99	3.767	0.4714	0.3054	0.2943	0.1661
100	3.788	0.4762	0.3066	0.2956	0.1696
101	3.823	0.481	0.3087	0.2978	0.1722
102	3.866	0.4857	0.3113	0.3004	0.1744
103	3.952	0.4905	0.3164	0.3058	0.1741
104	4.026	0.4952	0.3208	0.3103	0.1744
105	4.05	0.5	0.3223	0.3118	0.1777
106	4.102	0.5048	0.3254	0.3151	0.1794
107	4.111	0.5095	0.3259	0.3156	0.1836
108	4.193	0.5143	0.3308	0.3207	0.1834
109	4.266	0.519	0.3352	0.3253	0.1838

m	X	P(X)	G(Y) Ordinario	G(Y) Mom Lineal	Delta
110	4.288	0.5238	0.3366	0.3266	0.1873
111	4.394	0.5286	0.3429	0.3333	0.1856
112	4.429	0.5333	0.345	0.3355	0.1883
113	4.607	0.5381	0.3558	0.3466	0.1823
114	4.644	0.5429	0.358	0.3489	0.1848
115	4.882	0.5476	0.3724	0.3639	0.1752
116	4.904	0.5524	0.3737	0.3653	0.1787
117	4.969	0.5571	0.3776	0.3693	0.1795
118	5.156	0.5619	0.3889	0.3811	0.173
119	5.293	0.5667	0.3972	0.3897	0.1695
120	5.561	0.5714	0.4133	0.4065	0.1582
121	5.716	0.5762	0.4225	0.4162	0.1537
122	5.727	0.581	0.4232	0.4168	0.1578
123	6.059	0.5857	0.4429	0.4374	0.1428
124	6.092	0.5905	0.4449	0.4395	0.1456
125	6.112	0.5952	0.4461	0.4407	0.1492
126	6.375	0.6	0.4615	0.4569	0.1385
127	6.389	0.6048	0.4624	0.4577	0.1424
128	6.748	0.6095	0.4832	0.4795	0.1263
129	6.795	0.6143	0.4859	0.4823	0.1284
130	6.831	0.619	0.488	0.4845	0.131
131	6.852	0.6238	0.4892	0.4857	0.1346
132	6.98	0.6286	0.4965	0.4934	0.132
133	7.34	0.6333	0.5169	0.5146	0.1165
134	7.362	0.6381	0.5181	0.5159	0.12
135	7.437	0.6429	0.5223	0.5203	0.1206
136	8.094	0.6476	0.5581	0.5576	0.0895
137	8.454	0.6524	0.5771	0.5774	0.0752
138	8.592	0.6571	0.5843	0.5848	0.0729
139	8.828	0.6619	0.5963	0.5974	0.0656
140	8.879	0.6667	0.5989	0.6	0.0678
141	8.956	0.6714	0.6028	0.6041	0.0687
142	9.113	0.6762	0.6106	0.6122	0.0656
143	9.185	0.681	0.6141	0.6159	0.0668
144	9.472	0.6857	0.6281	0.6303	0.0577
145	10.072	0.6905	0.6561	0.6593	0.0344
146	10.508	0.6952	0.6754	0.6793	0.0198
147	10.704	0.7	0.6839	0.688	0.0161
148	10.75	0.7048	0.6858	0.69	0.0189
149	11.191	0.7095	0.7041	0.7089	0.0054
150	11.351	0.7143	0.7106	0.7155	0.0037
151	11.547	0.719	0.7183	0.7234	0.0008
152	11.582	0.7238	0.7197	0.7248	0.0042
153	11.661	0.7286	0.7227	0.7279	0.0059

m	X	P(X)	G(Y) Ordinario	G(Y) Mom Lineal	Delta
154	11.786	0.7333	0.7275	0.7328	0.0058
155	11.916	0.7381	0.7324	0.7378	0.0057
156	12.036	0.7429	0.7369	0.7424	0.006
157	12.26	0.7476	0.745	0.7508	0.0026
158	12.446	0.7524	0.7516	0.7575	0.0007
159	12.455	0.7571	0.752	0.7578	0.0052
160	12.613	0.7619	0.7575	0.7635	0.0044
161	13.773	0.7667	0.7948	0.8014	0.0282
162	14.892	0.7714	0.826	0.8329	0.0546
163	15.451	0.7762	0.84	0.8469	0.0638
164	15.875	0.781	0.8499	0.8568	0.0689
165	16.862	0.7857	0.8708	0.8776	0.0851
166	17.036	0.7905	0.8742	0.8809	0.0837
167	17.243	0.7952	0.8782	0.8848	0.0829
168	17.63	0.8	0.8852	0.8918	0.0852
169	17.945	0.8048	0.8907	0.8971	0.0859
170	18.597	0.8095	0.9012	0.9075	0.0917
171	19.226	0.8143	0.9104	0.9165	0.0961
172	19.347	0.819	0.9121	0.9181	0.0931
173	19.63	0.8238	0.9159	0.9218	0.0921
174	19.99	0.8286	0.9206	0.9263	0.092
175	20.074	0.8333	0.9216	0.9273	0.0883
176	20.253	0.8381	0.9238	0.9294	0.0857
177	20.323	0.8429	0.9246	0.9302	0.0818
178	20.418	0.8476	0.9257	0.9313	0.0781
179	20.593	0.8524	0.9278	0.9333	0.0754
180	20.643	0.8571	0.9283	0.9338	0.0712
181	20.655	0.8619	0.9285	0.934	0.0666
182	20.667	0.8667	0.9286	0.9341	0.0619
183	20.727	0.8714	0.9293	0.9347	0.0578
184	20.756	0.8762	0.9296	0.935	0.0534
185	20.937	0.881	0.9316	0.937	0.0506
186	20.981	0.8857	0.9321	0.9374	0.0463
187	21.211	0.8905	0.9345	0.9398	0.044
188	21.248	0.8952	0.9349	0.9401	0.0396
189	21.306	0.9	0.9355	0.9407	0.0355
190	21.489	0.9048	0.9373	0.9425	0.0326
191	21.548	0.9095	0.9379	0.943	0.0284
192	21.556	0.9143	0.938	0.9431	0.0237
193	21.739	0.919	0.9398	0.9448	0.0207
194	21.794	0.9238	0.9403	0.9453	0.0165
195	21.905	0.9286	0.9413	0.9463	0.0128
196	22.596	0.9333	0.9475	0.9521	0.0141
197	22.698	0.9381	0.9483	0.9529	0.0102

m	X	P(X)	G(Y) Ordinario	G(Y) Mom Lineal	Delta
198	22.957	0.9429	0.9504	0.9549	0.0075
199	23.496	0.9476	0.9545	0.9588	0.0069
200	23.742	0.9524	0.9563	0.9605	0.0039
201	24.167	0.9571	0.9591	0.9632	0.002
202	24.465	0.9619	0.9611	0.965	0.0008
203	24.546	0.9667	0.9616	0.9655	0.0051
204	24.763	0.9714	0.9629	0.9667	0.0085
205	26.075	0.9762	0.97	0.9733	0.0062
206	26.454	0.981	0.9717	0.9749	0.0092
207	27.36	0.9857	0.9756	0.9785	0.0101
208	30.186	0.9905	0.9846	0.9867	0.0059
209	31.122	0.9952	0.9868	0.9886	0.0085

Parámetros de la distribución Gumbel:

Con momentos ordinarios:

Parámetro de posición ( $\mu$ )= 4.8075

Parámetro de escala (alfa)= 6.0936

Con momentos lineales:

Parámetro de posición ( $\mu_l$ )= 4.9456

Parámetro de escala (alfal)= 5.8543

**Anexo 7:** Lista de mapas.

Mapa de ubicación de calicatas y valores del  $D_m$ ,  $D_{84}$  y  $D_{95}$ : código F.1

Mapa de ubicación de secciones de control Nro. 1 y 2: código F.2

Mapa de factor de fricción y tirante del flujo: código F.3

Mapa de factor de fricción y socavación: código F.4