

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**



**“ESTUDIO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA  
DEL RÍO RONQUILLO”.**

**TESIS**

Para optar el título profesional de:

**INGENIERO HIDRÁULICO**

Presentado por la Bachiller:

**DIANA VIOLETA DÍAZ LLATAS**

Asesorada por:

**Ph.D. OSWALDO ORTIZ VERA**

Co- Asesorada por:

**Ph.D. SERGIO BYRON MORERA JULCA**

**CAJAMARCA – PERU**

**2018**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Fondo Nacional de desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT), institución promotora y financiera en la realización del proyecto “Influencia de los ecosistemas andinos en la erosión y conservación de los suelos, e identificación de su rol en la regulación del recurso hídrico en grandes ciudades altoandinas”, al cual pertenece la presente investigación.

A mi Co-Asesor Ph.D. Sergio Byron Morera Julca, Investigador Científico Principal de la Unidad de Hidrología y Suelos del Instituto Geofísico del Perú, y coordinador del proyecto, ya que gracias su iniciativa de realizar investigación en Cajamarca pude llegar a formar parte de su equipo de trabajo, por su excelente asesoramiento y constante apoyo desde el inicio hasta la culminación de la presente investigación y por incentivar a todo el grupo de trabajo a realizar investigación científica. Agradecerle también al Ph.D. Santos Oswaldo Ortiz Vera por cumplir su labor de asesor.

A las instituciones que apoyaron con diversas actividades como lo son la Universidad Nacional de Cajamarca, E.P.S. SEDACAJ con su gerente general Ing. Oscar Santisteban Kaneko, equipo de logística y operadores y el Instituto Geofísico del Perú (IGP); quienes complementaron las labores necesarias para el proyecto.

A todo el equipo de trabajo que conforma el proyecto anteriormente mencionado, por su apoyo en diversas etapas del proyecto de investigación.

A mi familia quienes has sido un gran apoyo desde el inicio hasta la actualidad, a mis padres Gladis y Leoncio por su apoyo incondicional, por incentivarme siempre a lograr mis metas conservando la humildad.

## **DEDICATORIA**

La presente tesis va dedicada primeramente a Dios, porque es quien día a día guía mi camino y me permite enfrentar nuevos retos. A mi madre Gladis y mi padre Leoncio, por su cariño y apoyo incondicional en el logro de mis metas. A mis hermanos Javier, Henry, Werner, Marco, Lenin y Roxana quienes con su ejemplo me siguen enseñando que se pueden lograr grandes cosas.

**Diana Violeta Díaz Llatas**

## ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
1.2.	JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
1.3.	OBJETIVOS.....	3
	Objetivo general.....	3
	Objetivos específicos .....	3
II.	MARCO TEÓRICO.....	4
2.1.	ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	4
2.2.	BASES TEÓRICAS.....	7
a.	PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS DE UNA CUENCA .....	7
b.	CUENCA RONQUILLO .....	13
c.	CONCEPTOS GENERALES.....	21
d.	SEDIMENTOS DE FONDO Y MÉTODOS DE MEDICIÓN. ....	32
e.	SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN Y MÉTODOS DE MEDICIÓN. ....	35
f.	ESTIMACIÓN DE SEDIMENTO DE FONDO. ....	39
g.	ESTIMACIÓN DE SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN.....	44
III.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	47
3.1.	UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE ZONA DE ESTUDIO. ....	47
3.2.	METODOLOGÍA .....	47
a.	CARTOGRAFÍA DE LA CUENCA.....	49
b.	RECOPIACIÓN Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA Y SEDIMENTOLÓGICA. ....	50
c.	ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTO DE FONDO UTILIZANDO FÓRMULAS EMPÍRICAS. ....	58
d.	SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN.....	74
IV.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	77
4.1.	CARTOGRAFÍA .....	77
4.2.	INFORMACIÓN HIDROLÓGICA Y SEDIMENTOLÓGICA.....	78
a.	CAUDALES LÍQUIDOS.....	78
b.	VOLUMENES DE SEDIMENTOS MEDIDOS EN CAMPO. ....	80

c.	CONCENTRACIONES DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN.....	80
4.3.	ESTIMACIÓN DE VOLÚMENES DE SEDIMENTO UTILIZANDO FORMULAS EMPIRICAS.....	83
4.4.	COMPARACIÓN DE VOLÚMENES ESTIMADOS CON LOS MEDIDOS EN CAMPO.....	84
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	87
5.1.	CONCLUSIONES.....	87
5.2.	RECOMENDACIONES.....	88
VI.	BILBIOGRAFÍA.....	89
VII.	ANEXOS.....	93

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Formas de la Cuenca de acuerdo al Índice de Compacidad Kc.</i> .....	9
Tabla 2 <i>Clasificación de las cuencas de acuerdo a la pendiente promedio de laderas.</i> ...	11
Tabla 3. <i>Clasificación de Partículas Según su Tamaño en milímetros (mm).</i> .....	24
Tabla 4. <i>Valores utilizados por Cowan para la estimación del “n” de manning.</i> .....	29
Tabla 5. <i>Parámetros geomorfológicos calculados para la cuenca Ronquillo.</i> .....	50
Tabla 6. <i>Resumen de resultados para pendiente del cauce del río Ronquillo.</i> .....	62
Tabla 7. <i>Coefficiente de rugosidad para cauce de río Ronquillo.</i> .....	64
Tabla 8. <i>Porcentaje de material del cauce.</i> .....	66
Tabla 9. <i>Clasificación del material del lecho del río Ronquillo.</i> .....	67
Tabla 10. <i>Diámetros característicos de material del lecho sub - superficial del río Ronquillo.</i> .....	67
Tabla 11. <i>Densidad y peso específico del material del lecho del río Ronquillo.</i> .....	68
Tabla 12. <i>Diámetros característicos de material superficial del lecho del río Ronquillo.</i>	71
Tabla 13. <i>Fórmulas utilizadas para la estimación del volumen de sedimento acumulado.</i> .....	73
Tabla 14. <i>Principales parámetros geomorfológicos de la cuenca Ronquillo.</i> .....	77
Tabla 15. <i>Tabla comparativa de volúmenes acumulados de sedimentos de fondo estimados Vs volúmenes observados.</i> .....	84
Tabla 16 <i>Presupuesto para elaboración de tesis.</i> .....	96

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Sistema Fluvial de Una Cuenca. ....	7
<i>Figura 2.</i> Red hidrográfica en cuenca Ronquillo.....	14
<i>Figura 3.</i> Centros poblados ubicados en cuenca Ronquillo .....	15
<i>Figura 4.</i> Formaciones geológicas en cuenca Ronquillo.....	18
<i>Figura 5.</i> Morfología en sector Urubamba – Cuenca Ronquillo.....	20
<i>Figura 6.</i> Tipos de Transporte de Sedimentos.....	21
<i>Figura 7.</i> Corte Longitudinal Esquemático de un Cauce. ....	22
<i>Figura 8.</i> Ejemplo de grafica de curva de distribución granulométrica según su tamaño. .....	25
<i>Figura 9.</i> Vista transversal de un río que muestra el nivel de desborde del mismo. ....	31
<i>Figura 10.</i> Trampa de Arrastre de Fondo .....	33
<i>Figura 11.</i> Muestreador Tipo Canasta .....	34
<i>Figura 12.</i> Muestreador Tipo Canasta .....	34
<i>Figura 13.</i> Muestreador de profundidad integrada US D-77.....	36
<i>Figura 14.</i> Muestreador pasivo que toma muestras de agua mediante el sistema de sifonaje. .....	37
<i>Figura 15.</i> Muestreador de tiempo integrado. ....	38
<i>Figura 16.</i> Ubicación cuenca del río Ronquillo en el distrito de Cajamarca.....	47
<i>Figura 17.</i> Delimitación y topografía de cuenca Ronquillo, las elevaciones presentes en la cuenca varían desde los 2835 msnm hasta los 3986 msnm. ....	49
<i>Figura 18.</i> Piezómetro ubicado en estación Ronquillo, el cual registra los niveles de agua cada un periodo de tiempo determinado. ....	51
<i>Figura 19.</i> Vista en planta de captación Ronquillo y cortes de compuertas.....	53
<i>Figura 20.</i> Vista en planta de batimetría en época de estiaje de vaso de presa. ....	55
<i>Figura 21.</i> Vista en planta de batimetría de vaso de presa lleno. ....	56
<i>Figura 22.</i> Cuatro eventos monitoreados que llenaron el vaso de la presa durante el año 2016.....	57
<i>Figura 23.</i> Vista en planta y topografía de 200 m de río Ronquillo.....	59
<i>Figura 24.</i> Perfil longitudinal del cauce del río Ronquillo .....	60
<i>Figura 25.</i> Sección de control para obtención de parámetros hidráulicos en HecRas. ....	63
<i>Figura 26.</i> Curvas granulométricas de lecho sub - superficial de río Ronquillo.....	65

<i>Figura 27.</i> Porcentaje de material retenido (%) sub – superficial para cada punto de muestreo, respecto a su diámetro (mm). .....	66
<i>Figura 28.</i> Cuatro puntos de muestreo seleccionados en el lecho superficial del río Ronquillo.....	69
<i>Figura 29.</i> Curvas granulométricas de lecho superficial de río Ronquillo.....	70
<i>Figura 30.</i> Material retenido (%) en cada punto de muestreo del material lecho superficial .....	71
<i>Figura 31.</i> Concentraciones de sedimentos en suspensión (SSC) y caudales líquidos (Q) medidos en la estación Ronquillo. ....	76
<i>Figura 32.</i> Curva hipsométrica y de frecuencia de altitudes de la cuenca Ronquillo. ....	78
<i>Figura 33.</i> Eventos de caudales extremos que llenaron el barraje. ....	79
<i>Figura 34.</i> Serie temporal de concentraciones de sedimentos Vs. Caudales líquidos en la estación Ronquillo. ....	81
<i>Figura 35.</i> Correlación entre concentraciones de sedimentos en suspensión (SSC) y caudales líquidos (Q) medidos en la estación Ronquillo. ....	82
<i>Figura 36.</i> Volumen de sedimento acumulado (m <sup>3</sup> ) para cada evento de crecida utilizando las fórmulas empíricas. ....	83
<i>Figura 37.</i> Volúmenes acumulados de sedimentos de fondo Estimados y Observados....	85
<i>Figura 38.</i> Coeficiente de proporcionalidad entre volumen estimado (Ve) y volumen medido en campo (Vm). ....	86
<i>Figura 39.</i> (a) Levantamiento topográfico del cauce de río Ronquillo y (b) batimetría del vaso formado por el barraje de la captación Ronquillo. ....	93
<i>Figura 40.</i> (a) Material del lecho superficial y (b) material del lecho sub-superficial del río Ronquillo.....	93
<i>Figura 41.</i> (a) Tamizado de material sub-superficial, (b) Material para densidad de gruesos, (c) y (d) Ensayo para determinar densidad de material fino. ....	94
<i>Figura 42.</i> (a) Filtrado d muestras de sedimentos en suspensión, (b) Pesado de muestras filtros secos para obtención de concentración de sedimentos en suspensión.....	95



## RESUMEN

En la presente investigación se realizaron mediciones de sedimento de fondo y en suspensión. Para el sedimento en suspensión se realizaron muestreos puntuales para los cuales se obtuvieron caudales y concentraciones en el instante que se extrajo la muestra, ello permitió percibir la formación de 2 grupos de sedimentos en suspensión en cada uno de ellos con tendencias diferentes.

Respecto al sedimento de fondo se estableció una estrategia de monitoreo de sedimento de fondo, utilizando la presa formada por el vertedero de la estructura de captación como un acumulador o totalizador de sedimentos de capacidad de almacenamiento conocido, se registraron los periodos de llenado de este acumulador, caudales y tiempo involucrados. Con esta estrategia se registraron 4 volúmenes de sedimentos de fondo medidos durante el año 2016.

Se seleccionaron 4 fórmulas empíricas: Parker, Klingteman and McLean 1982 (P-K-Mc), Smart and Jaeggi 1983 (S-J), Bathurst (1987) y Meyer Peter y Muller 1948 (M-P-M), los resultados de cada una de ellas se compararon con el volumen de sedimento observado en campo, todas las fórmulas utilizadas sobre estimaron el volumen de sedimento de fondo real, siendo la que en menor cantidad sobre-estima la fórmula de Parker, Klingteman and McLean 1982 (P-K-Mc).

### **Palabras claves:**

Sedimento de fondo.

Sedimento en suspensión.

Río Ronquillo.

Volumen de sedimento de fondo.

Coefficiente de proporcionalidad.

## **ABSTRACT**

In the present investigation, measurements of bedload sediment and suspended sediment were performed. For the suspended sediments, specific samples were taken obtaining flows and concentrations at the moment the sample was extracted, this allowed to perceive the formation of 2 groups of sediments in suspension in each one of them with different tendencies.

Regarding the bedload sediment, a sediment monitoring strategy was established, using the dam formed by the weir of the catchment structure as an accumulator or totalizer of sediments of known storage capacity, the accumulator filling periods, flows and time involved were recorded. With this strategy, 4 volumes of bedload sediments measured during 2016 were recorded.

Four empirical formulas were selected: Parker, Klingteman and McLean 1982 (P-K-Mc), Smart and Jaeggi 1983 (S-J), Bathurst (1987) and Meyer Peter and Muller 1948 (M-P-M), the results of each of them were compared with the volume of sediment observed in the field, all formulas used over-estimated the volume of actual bottom sediment, the one that in smaller amount over-estimates the formula of Parker, Klingteman and McLean 1982 (P-K-Mc).

### **Keywords:**

Bedload Sediment.

Suspended Sediment.

Río Ronquillo.

Bedload Sediment Volume.

Proportionality coefficient.

## I. INTRODUCCIÓN

Los ríos de montaña están típicamente caracterizados como ríos que tienen gradientes longitudinales que oscilan entre 0.1% y 20% (PAPANICOLAOU, A. et al., 2004), sus lechos están compuestos de sedimentos gruesos y tienden a desarrollar procesos de acorazamiento o blindaje, los cuales ocasionan una alta variabilidad espacial y temporal en el arrastre de fondo (GRAY, J. et al., 2010).

La medición de sedimentos es una tarea compleja, ya que realizar la elección del sistema de medición más preciso es a menudo difícil porque depende de muchos parámetros (HABERSACK, H. et al., 2016), estos parámetros están relacionados con la gran variabilidad espacial y temporal del proceso de arrastre de fondo, limitaciones de los muestreadores, técnicas de muestreo y recursos para recolectar datos precisos y cuantificables de carga de lecho (GRAY, J. et al., 2010).

El área de estudio corresponde a la cuenca “Ronquillo” (41.7 Km<sup>2</sup>), ubicada en el norte del Perú, en la provincia de Cajamarca, cuenta con una topografía accidentada y altitudes que varían desde los 2835 hasta los 3986 msnm. Cuenca importante para la población Cajamarquina, ya que abastece de agua al 30% de la población.

A pesar de que la medición y cuantificación de los sedimentos en ríos de montaña viene siendo un gran reto, en la presente investigación se estableció una estrategia para monitorear el sedimento de fondo y en suspensión en la estación Ronquillo, ubicada en el punto emisor de la cuenca.

Se obtuvieron los primeros resultados de concentraciones de sedimentos en suspensión, mientras que los volúmenes de sedimentos de fondo observados en campo y estimados mediante las 4 fórmulas empíricas de Parker, Klingteman y McLean (1982), Smart y Jaeggi (1983), Bathurst (1987) y Meyer Peter y Muller (1948) se compararon, con la finalidad de identificar la fórmula empírica que se aproximó mejor al volumen de sedimento real observado.

## **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **Contexto del problema:**

El sedimento transportado en los ríos es muy difícil de monitorear y de estimar, para la estimación se aplican diversas fórmulas empíricas mediante las cuales se obtienen resultados que generalmente no se pueden comparar con datos reales y tomar la decisión de que fórmula es la que mejor se aproxima a los resultados reales de sedimentos.

### **Definición del problema:**

Estimar el transporte de sedimentos real en la cuenca Ronquillo.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

Las investigaciones realizadas hasta el momento muestran que los modelos hidráulicos, en este caso de transporte de sedimentos desarrollados sobre la base de la evidencia empírica en ríos de arena de suave pendiente no son aplicables a ríos de montaña de sedimento grueso, en consecuencia su aplicación en ríos de grava con lecho acorazado plantea diversas incertidumbres (en cuanto al diámetro característico del sedimento más adecuado para sustituir en las fórmulas, así como en lo concerniente al umbral de rotura o alteración de la coraza, y a las diversas fases de transporte).

La realización de la presente investigación permitirá estimar volúmenes de sedimento de fondo utilizando las fórmulas empíricas para posteriormente comparar, cada una de ellas con los datos observados en campo. Además se presentan resultados obtenidos del monitoreo de sedimentos en suspensión, que permite analizar la dinámica de aporte de sedimentos en suspensión en el punto de control.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **Objetivo general**

Estimar el transporte de sedimento de fondo y en suspensión en la cuenca del río Ronquillo.

#### **Objetivos específicos**

- Recopilar y procesar información cartográfica.
- Monitorear y procesar la información hidrológica y sedimentológica de sedimento de fondo y suspensión.
- Estimar el volumen de sedimento de fondo utilizando fórmulas empíricas.
- Comparar e identificar la fórmula empírica de sedimento de fondo cuyos resultados se aproximan al volumen de sedimento de fondo real observado.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

- (LÓPEZ, R. et al., 2015), realizaron la investigación “Evaluación de fórmulas de transporte de fondo en un río de grava acorazada”, en río Ebro (NE península Ibérica), se hicieron comparaciones entre predicciones realizadas con las fórmulas empíricas y las mediciones de la carga de fondo utilizando el muestreador Helley Smith, utilizaron 2 años hidrológicos (2002-2003 y 2003-2004, siendo los caudales medios para cada año de  $415 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  y  $465 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  respectivamente). Las fórmulas seleccionadas fueron las desarrolladas por Klingeman y McLean (1982) (P-K-M), Bathurst (2007) (B) y Recking (2010) (R). De acuerdo con los resultados, se recomiendan las fórmulas P-K-M y R para la predicción de la carga de fondo cuando se rompa o altere la coraza, y se desaconseja la fórmula B por su marcada tendencia a la infra-predicción. En cambio, para la predicción del umbral de rotura o alteración de la coraza se recomiendan las fórmulas B y R. Sin embargo, cabe advertir que en este caso ambas fórmulas tendieron a predecir umbrales bastante inferiores a los medidos.
- (OLAZÁBAL, J. 2015), desarrolló la tesis titulada "Estudio experimental del transporte de sedimentos en suspensión y fondo y comparación con fórmulas empíricas en los ríos Puyango-Tumbes y Zarumilla", en la cual, a partir de la caracterización del transporte del lecho fluvial de fondo mediante el uso del ADCP (Perfilador de Corriente acústico Doppler) y el muestreador Helley Smith se realizó una metodología de muestreo de sedimento de fondo. En la estación El Tigre, se obtuvo un gasto sólido total promedio histórico ( $Q_{st}$ ) igual a 1.6 millones de toneladas anuales, de los cuales el 98 % se transporta en suspensión (1.57 millones de toneladas anuales) y un 2% en fondo (0.032 millones de toneladas anuales). Para la cuenca Zarumilla en la estación La Coja, se obtuvo un gasto sólido total promedio histórico ( $Q_{st}$ ) igual a 0.1 millones de toneladas anuales de los cuales el 75 % se transportan en suspensión (0.075 millones de toneladas anuales) y un 25 % en fondo (0.025 millones de toneladas anuales). La fórmula de Yalin es la que mejor ajuste tiene respecto a los datos observados de gasto sólido de fondo. Esto se debe a que

la fórmula asume que el incremento de las tasas de transporte es debido al movimiento promedio de las partículas, relacionado directamente a la velocidad del flujo líquido. Lo cual contrasta con lo observado durante el periodo de monitoreo. Además, las constantes empíricas de la fórmula se desarrollaron en canales de aforo, conteniendo diversos tamaños de partículas de sedimento (0.78 a 28.6 mm) similares al tipo de granulometría obtenida en ambas cuencas. Sin embargo, este resultado todavía posee gran incertidumbre durante ocurrencia de grandes avenidas y la influencia de eventos extremos como El Niño.

- (RASCHER, E. et al., 2012), en el artículo “Comparando los resultados de las ecuaciones de transporte de carga de lecho con las mediciones de campo en un río alpino”, realizaron una selección de ecuaciones de transporte de sedimentos comparándose con conjuntos de datos de 50 observaciones de campo del río Partnach, en el Valle de Reintal, Alemania, en los años 2008-2011. En la salida de esta cuenca alpina, el lecho del canal se caracteriza por un gradiente del 2% y un tamaño medio de grano de 24 mm. Las muestras de carga de lecho se tomaron usando la muestra de Helley-Smith a tasas de flujo que variaban de 1,0 a 5,9 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. De acuerdo con estas evaluaciones de datos, se verificaron el rendimiento y la viabilidad de las ecuaciones de transporte para aplicaciones de campo. Hasta ahora, los resultados entre las tasas de transporte observadas y calculadas muestran una gran dispersión de más de varios órdenes de magnitud.
- (NITSCHKE, M. et al., 2011), desarrollaron la investigación titulada “Evaluación de las predicciones de transporte de carga utilizando ecuaciones de resistencia al flujo para explicar la macro-rugosidad en las corrientes montañosas empinadas”, en la que se trabajaron con datos de 13 arroyos de montaña ubicados en los Alpes Suizos y Prealpes. Las ecuaciones de transporte de carga y resistencia de flujo se combinaron para tener en cuenta la resistencia al flujo debido a los elementos de macro-rugosidad y los flujos poco profundos en corrientes empinadas. Para canales rugosos con una alta concentración de rocas, la ecuación de transporte de Rickenmann (2001) combinada con las ecuaciones de resistencia al flujo de Pagliara y Chiavaccini (2006), Yager (2006) y Whittaker et al. (1988) predijo al menos el 75% de los eventos dentro de un factor de 3 de los valores observados. El

rendimiento relativamente bueno del enfoque del esfuerzo de Yager (2006) para las corrientes con mayores concentraciones de roca indica que esta corrección basada en la física para la resistencia al flujo adicional es un paso adelante para una mejor caracterización de tales condiciones de corriente desde un punto de vista teórico.

- (BARRY, J. et al., 2008), en el artículo “Rendimiento de las ecuaciones de transporte de carga de la cama en relación con la importancia geomorfológica: predicción de la descarga efectiva y su tasa de transporte”. consideraron el rendimiento geomorfológico de cinco ecuaciones de transporte de carga de fondo en 22 ríos de grava en las cuencas montañosas del oeste de los Estados Unidos. El rendimiento se evaluó en términos de la precisión con la cual las ecuaciones son capaces de predecir la descarga efectiva y su tasa de transporte de carga de fondo. Encontrándose que el error medio en la predicción de la descarga efectiva es casi cero para todas las ecuaciones, lo que indica que las predicciones efectivas de descarga pueden no ser particularmente sensibles a la elección de la ecuación de transporte de carga de fondo. Sin embargo, la desviación estándar del error de predicción difiere entre ecuaciones "que van del 10% al 60%", al igual que su capacidad para predecir la tasa de transporte en la descarga efectiva. Errores medios de menos de 1 a casi 2.5 órdenes de magnitud.



## 2.2. BASES TEÓRICAS

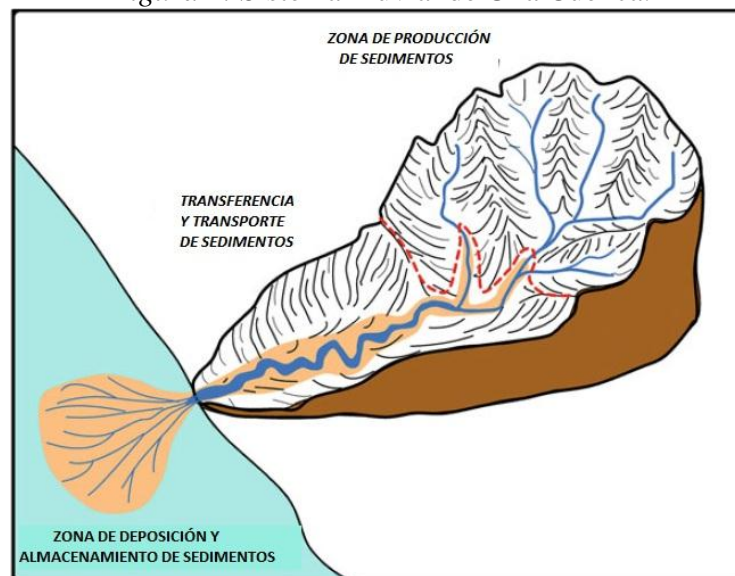
### a. PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS DE UNA CUENCA

Antes de detallar los parámetros geomorfológicos de una cuenca, es importante identificar los componentes de un sistema fluvial.

Un sistema fluvial se puede dividir en tres zonas, cada una de las cuales es un sistema de proceso de respuesta con sus propias entradas y salidas de sedimentos (Figura 1). Según (CHARLTON, R. 2007) estas zonas son:

“Zona de producción de sedimentos” ubicada en las regiones de cabeceras, en donde se origina la mayor parte de los sedimentos, de esta zona se suministran sedimentos a la red de ríos de las laderas que colinda a causa de los procesos de erosión y el movimiento de masas de material de roca erosionada. Este sedimento se mueve a través del canal la red en la “Zona de transferencia de sedimentos”, donde la producción de sedimentos no son tan fuertes. A medida que el río se acerca al océano, disminuye su gradiente y la energía disponible para el transporte de sedimentos se reduce en gran medida en la “zona de deposición de sedimentos”. Es sobre todo el sedimento más fino que llega hasta el océano, dado que el sedimento más grueso tiende a depositarse en una fase previa. De hecho, sólo una cierta proporción de todo el sedimento que se produce dentro de una cuenca de drenaje llegue realmente a la salida de la cuenca.

Figura 1. Sistema Fluvial de Una Cuenca.



Fuente: (MILLER, J. et al., 2015)

- **Área (A):**

El área de la cuenca es probablemente la característica geomorfológica más importante. Está definida como la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural (MIJARES, A. & MIJARES, F. 1989).

Dependiendo de la ubicación de la cuenca, su tamaño influye en mayor o menor grado en el aporte de escorrentía, tanto directa como de flujo de base o flujo sostenido (ORTIZ, O. 2004).

- **Factor de forma (F):**

Es la relación entre el área “A” de la cuenca y el cuadrado del máximo recorrido “L”. Este parámetro mide la tendencia de la cuenca hacia las crecidas, rápidas y muy intensas a lentas y sostenidas, según que su factor de forma tienda hacia valores extremos grandes o pequeños respectivamente (VILLÓN, M. 2002).

Es un parámetro adimensional que denota la forma redondeada o alargada de la cuenca (REYES, A. et al., 2010).

$$F = \frac{A}{L^2} \quad (1)$$

Donde:

A = Área de la cuenca.

L = longitud del máximo recorrido.

- **Coefficiente de Gravelius o índice de Compacidad (Kc).**

Este coeficiente es un parámetro adimensional que relaciona el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual áreas que el de la cuenca. Este parámetro, al igual que el anterior, describe la geometría de la cuenca y está estrechamente relacionado con el tiempo de concentración del sistema hidrológico (ORTIZ, O. 2004).

Las cuencas redondeadas tienen tiempo de concentración cortos con gastos pico muy fuertes y recesiones rápidas, mientras que las alargadas tienen gastos pico más atenuados y recesiones más prolongadas.

$$K_c = 0.28PA^{-0.5} \quad (2)$$

Donde:

P = Perímetro de la cuenca.

A = Área de la cuenca.

Las formas de la cuenca, en concordancia con los valores que adopte los índices de compacidad, de muestra en la Tabla 1.

Tabla 1

*Formas de la Cuenca de acuerdo al Índice de Compacidad  $K_c$ .*

Clase de Forma	Índice de compacidad $K_c$	Forma de la Cuenca
Clase I	1.0 a 1.25	Casi redonda a oval – redonda
Clase II	1.26 a 1.50	Oval redonda a -oval oblonga
Clase III	1.51 a 1.75	Oval – oblonga a rectangular - oblonga

Fuente: (ORTIZ, O. 2004).

- **Altitud media (H):**

Es el parámetro ponderado de las altitudes de la cuenca obtenidas en el mapa topográfico. En cuencas andinas este parámetro está relacionado con la magnitud de la lámina de precipitación, variación lineal muy importante en estudios regionales donde la información local es escasa (ORTIZ, O. 2004).

$$H = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n H_i * A_i \quad (3)$$

Donde:

H = Altitud media (msnm)

Hi = Altura correspondiente al área acumulada Ai encima de la curva Hi.

A = Área de la Cuenca.

N = Número de áreas parciales.

- **Pendiente de Laderas o Pendiente de la Cuenca (Sc):**

Es el promedio de las pendientes de la cuenca, es un parámetro muy importante que determina el tiempo de concentración y su influencia en las máximas crecidas y en el potencial de degradación de la cuenca, sobre todo en terrenos desprotegidos de cobertura vegetal. Existen diversos métodos, tanto gráficos como analíticos, que permiten estimar la pendiente de la cuenca.

Dentro de los métodos gráficos, la más recomendada por su grado de aproximación es el método de Horton y dentro de las analíticas la que se expresa mediante la siguiente ecuación (ORTIZ, O. 2004).

$$S_c = \frac{C}{A} \sum_{i=1}^n l_i \quad (4)$$

Donde:

Sc = Pendiente de la cuenca.

C = Equidistancia entre curvas de nivel.

A = Áreas de la cuenca.

Li = Longitud de cada curva de nivel.

La clasificación de las cuencas según la pendiente de laderas, se aprecia en la Tabla 2.

Tabla 2

*Clasificación de las cuencas de acuerdo a la pendiente promedio de laderas.*

<b>Pendiente Media %</b>	<b>Tipo de Relieve</b>	<b>Símbolo</b>
0 – 3	Plano	P1
3 – 7	Suave	P2
7 – 12	Mediano	P3
20 – 35	Accidentado	P4
35 – 50	Fuerte	P5
50 – 75	Muy Fuerte	P6
50 – 75	Escarpado	P7
> 75	Muy escarpado	P8

Tabla de valores del coeficiente de compacidad “Kc”.

Fuente: (ORTIZ, O. 2004).

- **Pendiente del cauce principal (S<sub>o</sub>):**

Este es un parámetro importante, ya que permite ver el comportamiento del recurso hídrico, como por ejemplo, para la determinación de las características óptimas de su aprovechamiento hidroeléctrico, o en la solución de problemas de inundaciones (VILLÓN, M. 2002).

Taylor y Schwarz recomiendan utilizar la siguiente ecuación:

$$S_o = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{l_i}{S_i}}} \right]^2 \quad (5)$$

Donde:

S<sub>o</sub> = Pendiente del cauce principal.

n = Número de tramos de similar pendiente.

l<sub>i</sub> = Longitud del tramo i.

S<sub>i</sub> = Pendiente del tramo i.

- **Longitud del máximo recorrido (L)**

Es la medida de la mayor trayectoria de las partículas del flujo comprendida entre el punto más bajo del colector común conocido como punto emisor, y el punto más alto o inicio del recorrido sobre la línea de divortio aquarum. Este parámetro tiene relación directa con el tiempo de concentración de la cuenca, el mismo que depende de la geometría de la cuenca, de la pendiente del recorrido y de la cobertura vegetal (ORTIZ, O. 2004).

- **Tiempo de concentración “Tc”:**

Este parámetro, llamado también tiempo de equilibrio, es el tiempo que toma la partícula, hidráulicamente más lejana, en viajar hasta en punto emisor. Para ello se supone que el tiempo de duración de la lluvia es de por lo menos igual al tiempo de concentración y que se distribuye uniformemente en toda la cuenca. Este parámetro tiene estrecha relación con el gasto pico y con el tiempo de recesión de la cuenca, tiempos de concentración muy cortos tienen gastos pico intensos y recesiones muy rápidas, en cambio los tiempos de concentración más largos determinan gastos pico más atenuados y recesiones mucho más sostenidas (VILLÓN, M. 2002).

Existen muchas fórmulas empíricas para estimar el tiempo de concentración de la cuenca, siendo una de las más completas la siguiente:

$$T_c = C \left( \frac{L * L_c}{\sqrt{S}} \right)^{0.38} \quad (6)$$

Donde:

$T_c$  = Tiempo de concentración, en horas.

L = Longitud de máximo recorrido, en Km.

$L_c$  = Longitud de centroide, en Km.

S = Pendiente media del máximo recorrido.

C = Coeficiente de escorrentía.

- **Coefficiente Orográfico (Co):**

Es la relación entre el cuadrado de la altitud media del relieve y la superficie proyectada sobre un plano horizontal. Este parámetro expresa el potencial de degradación de la cuenca, crece mientras que la altura media del relieve aumentad y la proyección del área de la cuenca disminuye. Por esta razón toma valores bastante grandes para micro cuencas pequeñas y montañosas, disminuyendo en cuencas extensas y de baja pendiente (ORTIZ, O. 2004).

$$C_o = \frac{H^2}{A} \quad (7)$$

Donde:

$C_o$  = Coeficiente Orográfico, adimensional.

H = Altitud media del Relieve.

A = Área de la cuenca.

**b. CUENCA RONQUILLO**

- **Red hidrográfica**

La cuenca Ronquillo está conformada por los ríos Balconcillo, Manzana, Cushunga, Tres Ríos, a continuación se describen con mayor detalle.

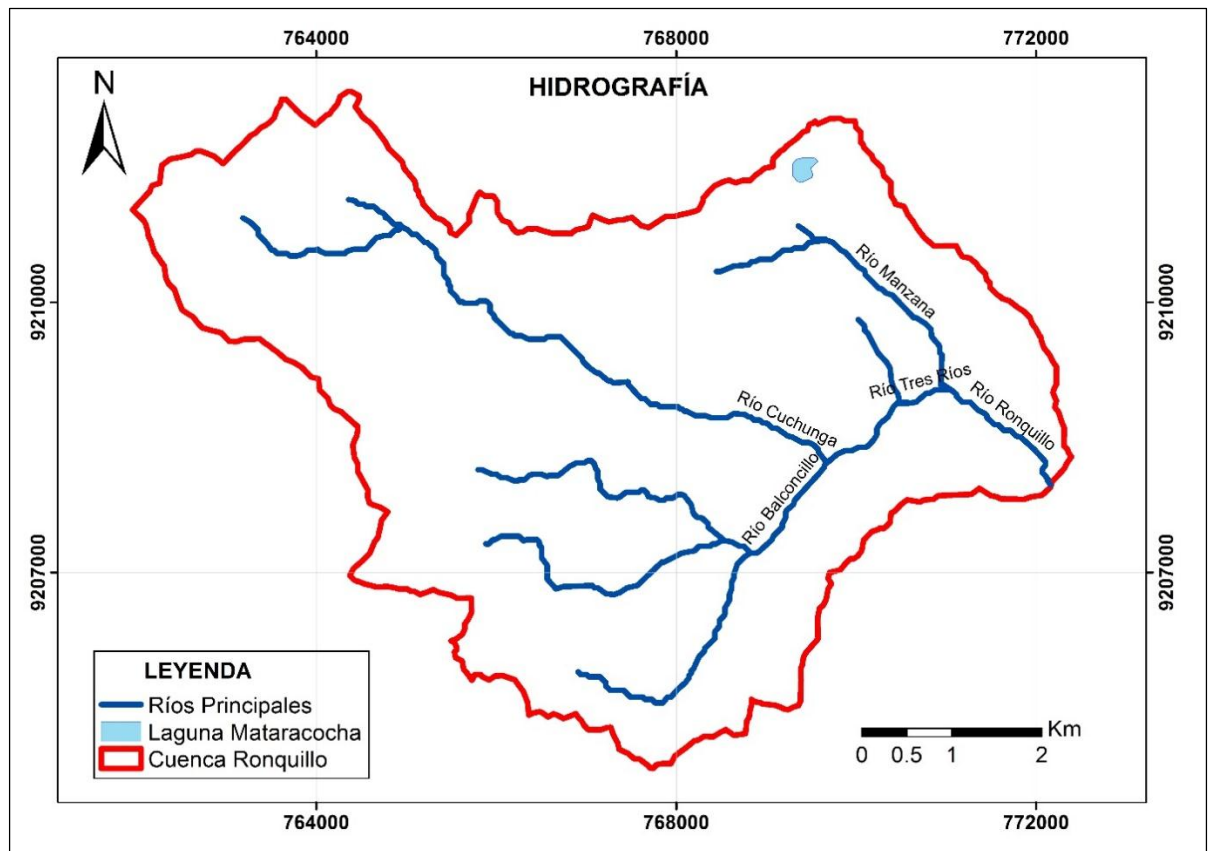
La unión de los ríos Balconcillo y Cushunga y Manzana forman el río Tres Ríos, el cual metros más abajo, toma el nombre de Río Ronquillo, debido a que adopta el nombre de la zona (Ronquillo).

El río Balconcillo se forma después de recibir los aportes de la quebrada Conga. El río Cushunga se origina de la unión de las quebradas Portachuelo y Poroporo, y corriente abajo recibe los aportes de Garbanzo Pampa y Sacchayoc (BENAVIDES, I. et al., 2007).

El río Manzana se forma de la confluencia de las quebradas Choro Mayo y Carhuacasha Corral Blanco (BENAVIDES, I. et al., 2007).

El río Ronquillo es la fuente que abastece del recurso hídrico a la captación Ronquillo, el agua captada se conduce hasta la Planta de Tratamiento de Agua Potable Santa Apolonia, la cual abastece al 30% de la población Cajamarquina.

Figura 2. Red hidrográfica en cuenca Ronquillo

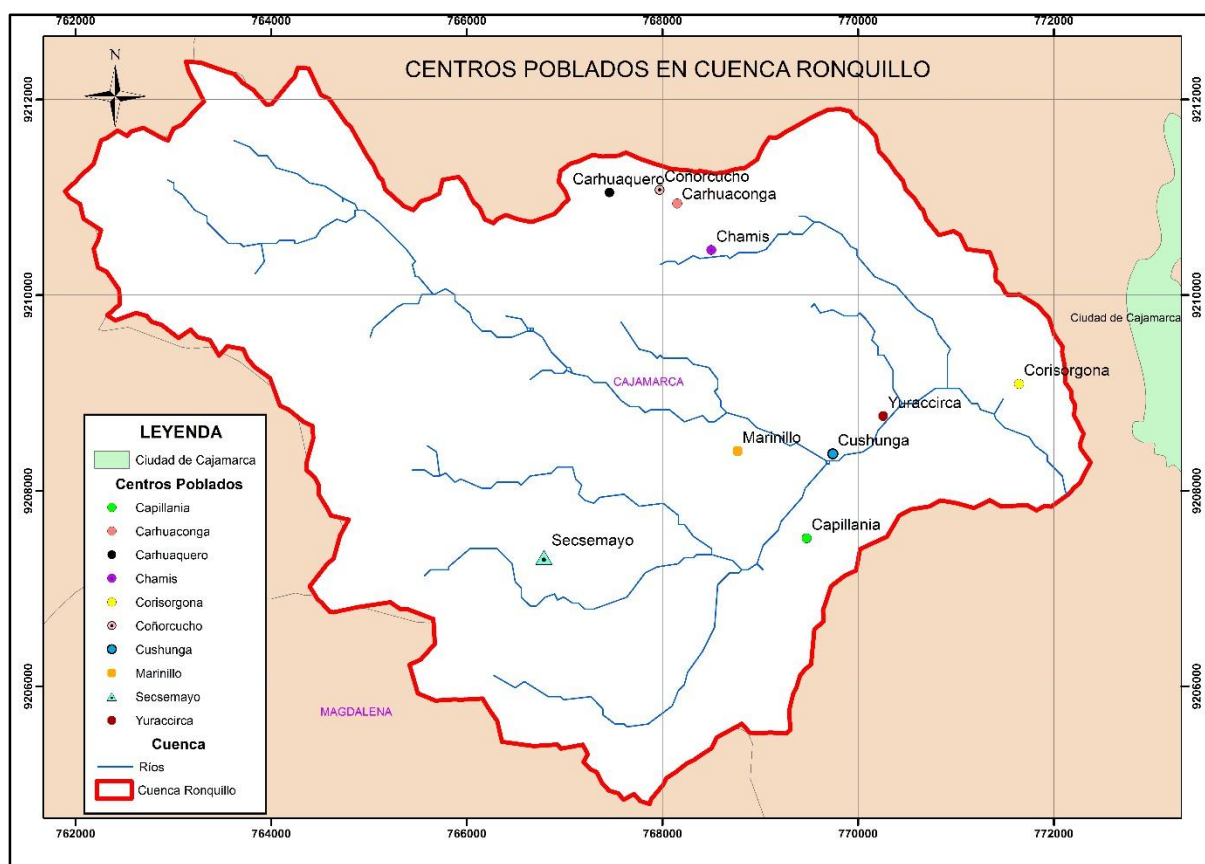




- **Demografía en cuenca ronquillo.**

Dentro de la cuenca Ronquillo se ubican 10 centros poblados los cuales son: Carhuaquero, Coñorcucho, Chamis, Corisorgona, Yuraccirca, Cushunga, Merinillo, Capillania, Secsemayo (lote I y II) y Carhuaconga. Figura 3.

*Figura 3. Centros poblados ubicados en cuenca Ronquillo*



- **Geología de cuenca ronquillo.**

En el “Estudio de Geología” realizado por el Gobierno regional de Cajamarca cuyo autor es el Ing. M.Sc. Gilberto Cruzado Vásquez y el encargado de la modificación del documento es el Ing. Mirton E. Crisólogo Rodríguez se puede encontrar los grupos y formaciones que se encuentran en toda la región Cajamarca.

En la cuenca Ronquillo se encuentran las siguientes formaciones geológicas que en (VÁSQUEZ, G. & RODRÍGUEZ, M. 2011) las describen de la siguiente manera.

#### **Formación Farrat (Ki- f)**

Esta formación está formada por areniscas blancas de grano medio a grueso, tiene un grosor promedio de 500 m. en algunos lugares se observa estratificación cruzada y marcas de oleaje.

La formación Farrat suprayace con aparente concordancia a la formación Carhuaz e infrayace con la misma relación, a la formación Inca, dando la impresión en muchos lugares de tratarse de un paso gradual.

#### **Formación Inca (Ki – in)**

Consta de la intercalación de areniscas calcáreas, lutitas ferruginosas dando en superficie un matiz amarillento. En los alrededores de Cajamarca es de coloración rojiza. Su grosor aproximado es de 100 m. Infrayace concordantemente a la formación Chúlec y suprayace con la misma relación a la formación Farrat.

#### **Formación Chulec (Ki – chu)**

Esta formación consiste en una secuencia fosilífera de calizas arenosas, lutitas calcáreas y margas, las que por intemperismo adquieren un color crema amarillento. Su aspecto terroso amarillento es una característica para distinguirla en el campo. Generalmente los bancos de margas se presentan muy nodulosos y las calizas frescas muestran colores gris parduzcos algo azulados. Su grosor varía de 200 a 250 m.

#### **Formación Pariatambo (Ki – pa)**

Consiste en una alternancia de lutitas con delgados lechos de calizas bituminosas negruzcas, estratos calcáreos con nódulos silíceos (chert) y dolomíticos, con un característico olor fétido al fracturarlas. Su espesor varía entre 150 a 200 m.

Esta formación yace concordantemente sobre la formación Chúlec e infrayace con suave discordancia a la formación Yumagual, relación observable en la cuenca de Pullucana, en la carretera Cajamarca- La Encañada, al este de los Baños del Inca. Edad y correlación.- la formación Pariatambo contiene restos de moluscos, estas especies son típicamente

pelágicas del Albiano medio. Se correlaciona con la parte superior de la formación Crisnejas y con la formación Yacu Ushco. Se extiende ampliamente en los andes centrales del Perú.

#### **Formación Yumagual (Ks – yu)**

Consiste en una secuencia de margas y calizas gris parduzcas en bancos más o menos uniformes, destacando un miembro medio lutáceo margoso, amarillento, dentro de un conjunto homogéneo presenta escarpas debido a su dureza uniforme. En algunos horizontes se observan nodulaciones calcáreas. Tiene un grosor aproximado de 700 m.

#### **Formación Quilquiñan - Mujarrum (Ks – qm)**

Descansa concordantemente sobre la formación Yumagual, mientras que la parte superior (Fm. Quilquiñán), infrayace con discordancia paralela a la formación Cajamarca. La base consiste en una secuencia de calizas nodulares, seguida de una intercalación de margas y lutitas amarillentas con abundantes elementos del género *Exogyra*. Continúan delgados lechos de calizas nodulares con margas de color pardo amarillento, también fosilíferas. Finalmente se encuentran bancos de calizas claras con lutitas arenosas y margas delgadas con abundantes fósiles. Alcanza un espesor aproximado de 500 m.

#### **Formación Cajamarca (Ks– ca)**

Esta formación consiste de calizas gris oscuras o azuladas, con delgados lechos de lutitas y margas. Las calizas se presentan en bancos gruesos con escasos fósiles. Esta formación yace concordantemente sobre la formación Quilquiñán y con la misma relación infrayace a la formación Celendín. Su grosor varía entre los 600 y 700 m.

#### **Volcánico San Pablo (Po- vsp)**

Esta unidad consiste en gruesos estratos de rocas volcánicas, intercaladas en la base con areniscas rojizas y en la parte superior de una espesa secuencia de aglomerados y piroclásticos bien estratificados. Alcanza un espesor de 900 m.

El volcánico san pablo yace con suave discordancia erosional al volcánico Chilete e infrayace al volcánico Huambos en igual relación.

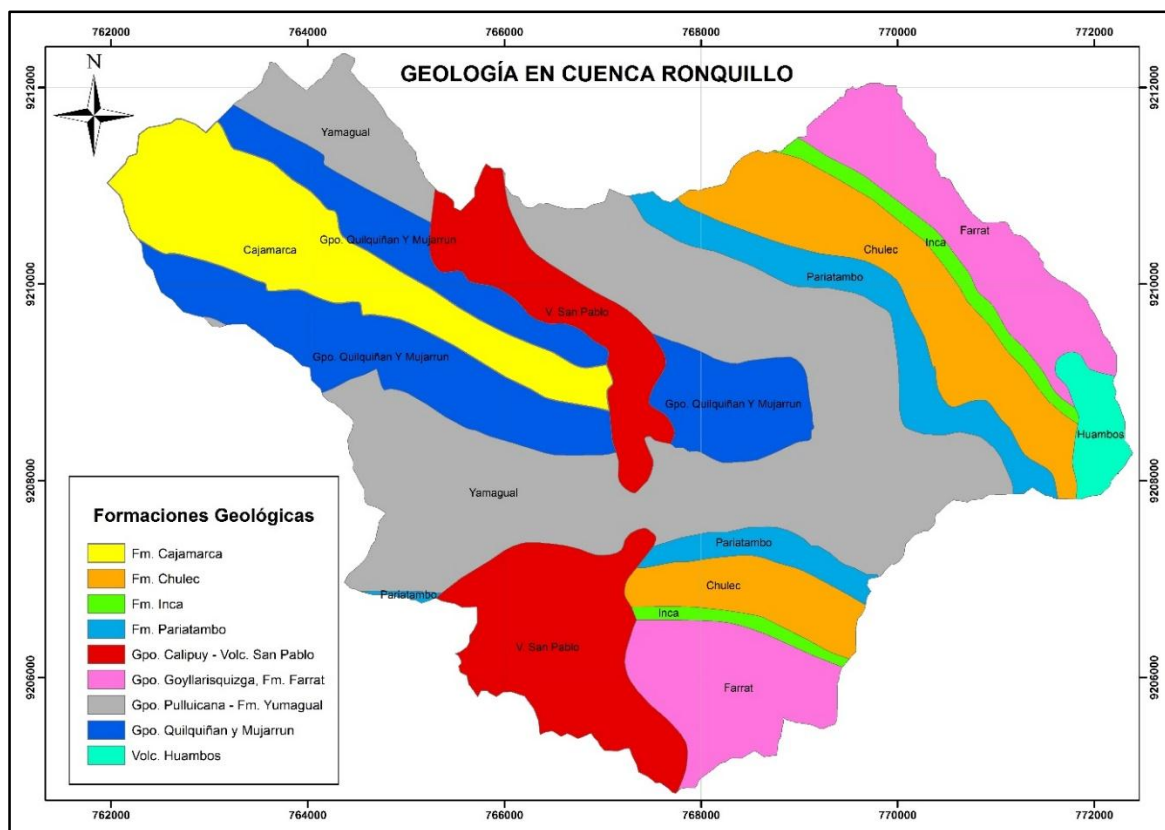
#### **Volcánico Huambos (Nm- vh)**

En casi todo el sector andino del departamento y en ambos lados de la divisoria continental se encuentra aflorando una unidad de tobas ácidas, en los alrededores del pueblo del mismo

nombre. La topografía del volcánico Huambos es bastante característica, generalmente forma llanuras delimitadas por farallones o escarpas donde se aprecia la estratificación, sobre estas superficies se ha desarrollado un sistema dendrítico de drenaje

Respecto a la litología y grosor, el volcánico Huambos está compuesto por tobas y brechas de composición ácida. La litología común muestra fragmentos de cuarzo hasta de 3 mm. de diámetro y cristales de biotita en una matriz feldespática que probablemente corresponde a una toba dacítica. Se encuentran brechas dacíticas compuestas por bloques grandes de toba envueltos por una matriz tobácea, esta litología se observa en el cuadrángulo de Chota. En la mayoría de los casos los piroclásticos del volcánico Huambos están bien estratificados en capas medianas a gruesas, parcialmente compactadas con escasos niveles de toba soldada o ignimbrita. El volcánico Huambos tiene un grosor promedio de 50 a 100 m. y un máximo de aproximadamente 400 en la localidad de Huambos.

Figura 4. Formaciones geológicas en cuenca Ronquillo.



Fuente: INGEMET.

## - **Actividades socioeconómicas.**

### **Ganadería**

Los pobladores de la cuenca en estudio, en mayoría crían ganado ovino del cual provechan su lana para sus tejidos y su carne para su alimentación, en menor cantidad podemos encontrar ganado vacuno y avícola.

En 60 % del total de las familias poseen sus yuntas para la preparación de los terrenos, las cuales venden posteriormente para solventar los gastos de alimentación y educación de sus hijos u otras necesidades. La ganadería no es una actividad de mucha importancia por falta de pasturas (CHUQUIRUNA, M. et al., 2008).

### **Agricultura**

El sistema de producción agrícola en la zona se caracteriza por ser mayormente de un ritmo estacional, al estar determinado por las condiciones climáticas especialmente por la presencia o ausencia de lluvias. Los principales productos cultivados en la zona son: papa, olluco, oca, mashua, centeno, trigo, chocho, haba, avena y pastos como el rey grass (CHUQUIRUNA, M. et al., 2008).

## - **Geomorfología**

El relieve característico de la zona del sector Urubamba - Ronquillo, está vinculado a los procesos tectónicos y a las modificaciones bioclimática que se han generado desde el inicio de su aparición. Las condicionantes morfológicas como la inestabilidad, vulnerabilidad y riesgo, siempre han condicionado el uso y ocupación del territorio. En términos generales, la geomorfología es muy favorable a la concentración de flujos asociados a sólidos, por lo que es frecuente los procesos de geodinámica externa, esto es ayudado por la presencia de pendientes empinadas, presencia del canal de escurrimiento principal, la frecuencia de litologías poco consistentes y una cierta proporción de terrenos sometidos a condiciones semiáridas, climática y ausencia de cobertura vegetal, estas condiciones aumentan las acciones erosivas de las cuencas y la gran presencia de fenómenos de remoción de masas de suelos y de rocas.

Como parte del relieve andino de Cajamarca es su elevada tasa de erosión actual, con predominio de acciones erosivas ligadas al escurrimiento difuso y concentrado en surcos y cárcavas, motivadas tanto por causas naturales como por labores agrícolas en terrenos altamente susceptibles a la erosión. Según lo apreciado, los Peligros Naturales y Antrópico que inciden sobre el núcleo urbano de zona del sector Urubamba – Ronquillo y su entorno inmediato son de origen Geológico (Sismicidad), origen climático (Inundaciones generadas por la acción pluvial) y de origen geológicos-climáticos (Deslizamientos) (MPC, 2012).

*Figura 5. Morfología en sector Urubamba – Cuenca Ronquillo*



Fuente: (CRUZADO)

La morfología dominante son las terrazas en la parte central. Más hacia el frente la pendiente es más fuerte y se ubican escarpes viejos (parcialmente cubiertos por vegetación) de hundimientos.

### c. CONCEPTOS GENERALES

#### - Tipos de transporte de sedimentos.

La mayoría de sedimentos suministrados a los cauces del río varía mucho en tamaño, desde las partículas microscópicas de arcilla a grandes rocas. Como es de conocimiento, existen diferentes mecanismos implicados en el transporte de sedimentos gruesos y finos dentro de los cauces fluviales. Estos se ilustran en la Figura 6 y tienen importantes implicaciones para la forma en que los sedimentos de diferentes tamaños se transfieren a través del sistema. (CHARLTON, R. 2007).

Figura 6. Tipos de Transporte de Sedimentos.



Fuente: (CHARLTON, R. 2007)

El material grueso, típicamente arenas gruesas, gravas finas y las partículas más grandes, se mueve a lo largo del lecho del canal como carga de fondo. Las partículas están en contacto continuo o regular al lecho del canal y se mueven por rodamiento, deslizamiento o en una serie de movimientos de salto llamados saltación. (CHARLTON, R. 2007).

#### - Umbral o principio del movimiento.

El conocimiento de las condiciones de iniciación del movimiento permite calcular el gasto sólido de fondo (el arrastre) así como dimensionar canales estables, diseñar sistemas de protección contra la erosión y resolver numerosos problemas de Hidráulica Fluvial (ROCHA, A. 1998).

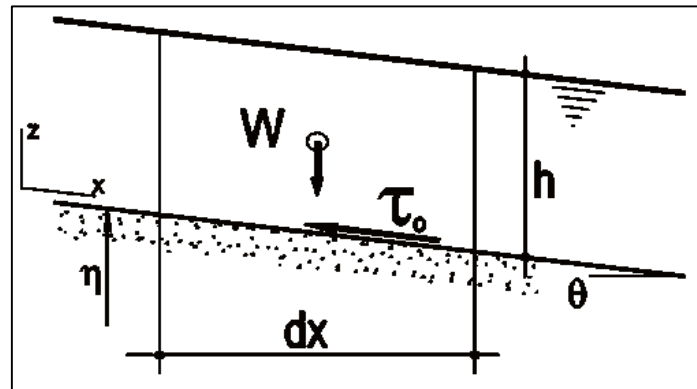
La acción del agua sobre el fondo puede caracterizarse por una tensión cortante en el fondo “ $\tau$ ”. La resistencia de la partícula a ser movida puede relacionarse con su peso sumergido, el cual es función de peso específico sumergido  $(\gamma_s - \gamma)$ , y del diámetro “D” que caracteriza el volumen de la partícula. Con estas tres variables puede formarse el parámetro adimensional de Shield o tensión c3rtate  $\bar{\tau}$  (VIDE, J. 2007):

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma)D} \quad (8)$$

Esta relaci3n compara la fuerza que tiende a producir el movimiento (acci3n de arrastre proporcional a  $\tau_o D^2$ ) con la fuerza que procura estabilizarlo o mantenerlo en reposo (acci3n del peso proporcional a  $(\gamma_s - \gamma)D^3$ ).

Analizando el equilibrio de fuerzas Wn un tramo de cauce de longitud diferente en el sentido de la corriente, la componente del peso del volumen de control es contrarrestada por la fuerza de rozamiento en su contorno como se aprecia en la Figura 15.

Figura 7. Corte Longitudinal Esquemático de un Cauce.



Fuente: (OLAZÁBAL, J. 2015)

Para un cauce prismático, el peso del líquido “W” es igual al producto del peso específico por volumen de control  $W = \gamma \cdot A \cdot dx$  donde “A” es el área transversal del cauce. La componente en la direcci3n del flujo  $W_x = \gamma \cdot A \cdot dx \cdot \text{sen } \theta$ . Si el ángulo “ $\theta$ ” es peque3no  $\text{sen } \theta \cong \text{tg } \theta \cong S$  siendo “S” la pendiente del tramo de cauce analizado (OLAZÁBAL, J. 2015).



Por otro lado, existe una fuerza de fricción aplicada en todo el contorno del cauce que se opone al escurrimiento  $\tau_o.P.dx$ , donde “P” es el perímetro mojado del cauce. Analizando el equilibrio de ambas fuerzas  $\tau_o.P.dx = \gamma.A.S.dx$  resulta la Ec. 16 (OLAZÁBAL, J. 2015).

$$\tau_o = \gamma R_h S \quad (9)$$

Donde:

$\tau$ : Tensión en el fondo	(Kgf.m <sup>-3</sup> )
R: Radio hidráulico	(m)
S: Pendiente media de la cuenca.	-
$\gamma_s$ : Peso específico del suelo	(Kgf.m <sup>-3</sup> )
$\gamma$ : Peso específico del agua	(Kgf.m <sup>-3</sup> )

- **Características de las partículas.**

**Tamaño de partículas**

Las partículas que conforman los suelos varían en un amplio rango de tipos como son: grava, arena, limo o arcilla, dependiendo del tamaño predominante de partículas.

Varias organizaciones han desarrollado límites de las partículas según su tamaño los cuales podemos observar en la Tabla 3.

Tabla 3. *Clasificación de Partículas Según su Tamaño en milímetros (mm).*

<b>Nombre de organización</b>	<b>Grava (Haddadchi, Omid, &amp; Dehghani)</b>	<b>Arena (Haddadchi et al.)</b>	<b>Limo (Haddadchi et al.)</b>	<b>Arcilla (Haddadchi et al.)</b>
Instituto tecnológico de Massachusetts (Smith & Owens)	> 2 mm	2 a 0.06 mm	0.06 a 0.002 mm	< 0.002 mm
Departamento de agricultura de Estados Unidos (USDA)	> 2 mm	2 a 0.05 mm	0.05 a 0.002 mm	< 0.002 mm
Asociación Americana de Funcionarios del Transporte y Carreteras Estatales (AASHTO)	76.2 a 2 mm	2 a 0.075 mm	0.075 a 0.002 mm	< 0.002 mm
Sistema unificado de clasificación de suelos (U.S. Army Corps of Engineers; U.S. Burneau of Reclamation; American Society for Testing and Materials)	76.2 a 4.75 mm	4.75 a 0.075 mm	Finos (es decir, limos y arcillas < 0.075 mm )	
American Society for Testing and Materials (ASTM)	> 2 mm	2 - 0.075 mm	0.075 - 0.005 mm	< 0.005 mm

Fuente: (DAS, B. 2001).

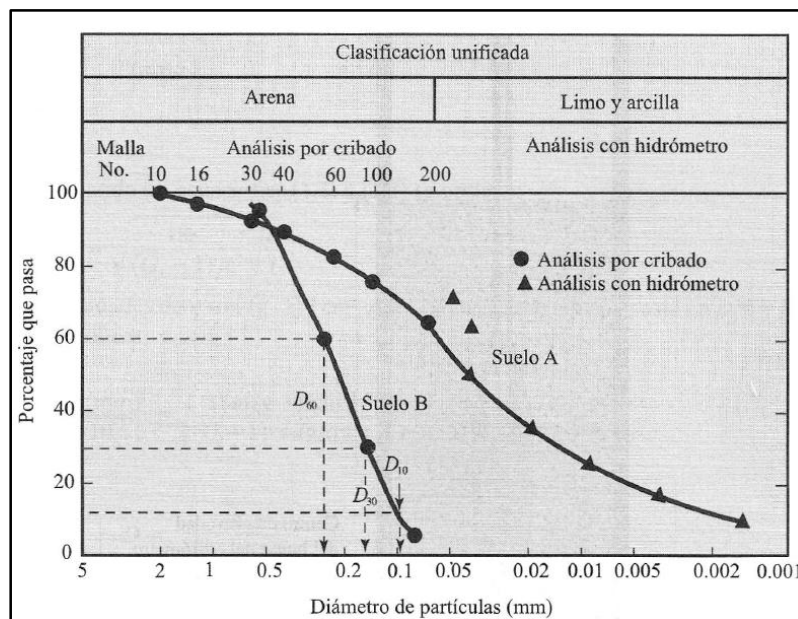
- **Distribución granulométrica de las partículas.**

Según (DAS, B 2001) Para la clasificación de las partículas se realiza un análisis granulométrico o también llamado análisis por cribado, el cual consiste en sacudir la muestra de suelo a través de un conjunto de mallas que tienen aberturas progresivamente más pequeñas.

Primero el suelo se seca en el horno, y luego todos los grumos se disgregan en partículas pequeñas antes de ser pasados por la malla. Una vez que pasan las mallas, se determina la masa del suelo retenida en cada malla. Cuando se analizan suelos cohesivos, resulta difícil disgregar los grumos en partículas individuales. En tal caso, el suelo se mezcla con agua para formar una lechada que luego se lava a través de las mallas. Las porciones retenidas en cada malla se recolectan por separado y se secan en horno antes de que la masa retenida en cada malla sea determinada.

Una vez terminado el análisis por cribado, sus resultados se presentan generalmente en graficas semi-logarítmicas como curvas de distribución granulométrica (o de tamaño de grano). Los diámetros de las partículas se grafican en escala logarítmica y el porcentaje correspondiente de finos en escala aritmética. Por ejemplo, las curvas de distribución de suelos se muestran en la Figura 8.

Figura 8. Ejemplo de grafica de curva de distribución granulométrica según su tamaño.



Fuente: (DAS, B. 2001)

- **Diámetros característicos de las partículas**

Se definen los siguientes diámetros característicos de las partículas:

**D<sub>35</sub>**: Diámetro de la malla por donde pasan el 35 por ciento de los sedimentos de la muestra. Es el diámetro característico propuesto por Einstein para representar el diámetro de la muestra.

**D<sub>40</sub>**: Diámetro usado por Schoklitsch para representar la muestra.

**D<sub>50</sub>**: Diámetro que en muchos casos representa el diámetro medio. Shields utilizó este diámetro para su estudio del inicio del movimiento.

**D<sub>65</sub>**: Diámetro utilizado por Einstein para representar la rugosidad de granos.

**D<sub>84</sub>**: Diámetro derivado de un análisis probabilístico. Se utiliza para definir la graduación del material.

**D<sub>m</sub>**: Diámetro medio aritmético. Se puede obtener de:

$$D_m = \frac{\Delta_1 D_1 + \Delta_2 D_2 + \Delta_3 D_3 + \dots + \Delta_n D_n}{100} = \sum \frac{A_i D_i}{100} \quad (10)$$

Dónde:

$\Delta_i$ : Representa una porción del porcentaje del gráfico de distribución granulométrica

$D_i$ : Valor medio del diámetro que corresponde a  $\Delta_i$ .

- **Densidad y peso específico de una partícula**

La densidad  $\rho_s$  es la masa que se tiene por unidad de tiempo. Existen tablas con valores aproximados de los sólidos según su composición mineralógica, pero los valores reales se determinan directamente en laboratorio. (DAS, B. 2001).

$$\rho_s = \frac{M}{V} \quad (11)$$

Donde:

$\rho_s$ : Densidad de la partícula (Kg.m<sup>-3</sup>)

$M$ : Masa (Kg)

$V$ : Volumen (m<sup>3</sup>)

El peso específico, es la relación entre el peso de la partícula y su volumen, o lo que es igual, el producto de la densidad y la aceleración de la gravedad.

$$\gamma_s = \frac{P}{V} \quad (12)$$

$$\gamma_s = \rho_s * g \quad (13)$$

Donde:

$\gamma_s$ : Peso específico de la partícula. (Kg.s-m<sup>2</sup>) o (N.m<sup>-2</sup>)

$P$ : Peso de la partícula. (N)

$g$ : Aceleración de la gravedad. (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)

- **Coefficiente de rugosidad o manning.**

Seleccionar un valor de “n” significa estimar la resistencia al flujo en un canal determinado, para poder elegir el valor correcto de este coeficiente debemos tener los siguientes criterios:

- Entender los factores que afectan al valor de “n” con el fin de adquirir conocimientos básicos del problema y disminuir el rango de incertidumbres.
- Consultar una tabla de valores comunes de n para diferentes tipos de canales o cauces.
- Examinar y familiarizarse con la apariencia de canales o cauces comunes cuyos coeficientes de manning se conocen.

Existen los siguientes métodos para estimar el coeficiente de Manning:

### **Método de Cowan:**

A partir del reconocimiento de varios factores primordiales que afectan el coeficiente de rugosidad, (COWAN, W. 1956) desarrolló un procedimiento para estimar el valor de “n”. Mediante este procedimiento el valor de “n” puede estimarse utilizando la siguiente fórmula:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5 \quad (14)$$

Donde:

$n_0$ : Es un valor básico de “n” para un canal recto, uniforme y liso en los materiales naturales involucrados.

$n_1$ : Rugosidad adicional debida a irregularidades superficiales del perímetro mojado a lo largo del tramo en estudio.

$n_2$ : Rugosidad adicional equivalente debida a variación de forma y de dimensiones de las secciones a lo largo del tramo en estudio.

$n_3$ : Rugosidad equivalente debida a obstrucciones existentes en el cauce.

$n_4$ : Rugosidad adicional equivalente debida a la presencia de vegetación.

$m_5$ : Factor de corrección para incorporar efecto de sinuosidad del cauce o presencia de meandros.

Estos valores pueden seleccionarse en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores utilizados por Cowan para la estimación del “n” de manning.

Condiciones del canal		Valores
Material involucrado.	Tierra	0.020
	Corte de tierra	0.025
	Grava fina	0.024
	Grava gruesa	0.028
Grado de irregularidad.	Suave	0.000
	Menor	0.005
	Moderado	0.010
	Severo	0.020
Variación de la sección transversal.	Gradual	0.000
	Ocasionalmente	0.005
	alternante	$n_2$
	Frecuentemente alternante	0.010 – 0.015
Efecto relativo de las obstrucciones.	Insignificante	0.000
	Menor	0.010 – 0.015
	Apreciable	$n_3$
	Severo	0.020 – 0.030
Vegetación.	Baja	0.040 – 0.060
	Media	0.005 – 0.010
	Alta	$n_4$
	Muy alta	0.010 – 0.025
Grado de los efectos por meandros.	Menor	0.025 – 0.050
	Apreciable	$m_5$
	Severo	0.050 – 0.100
		1.000
		1.150
		1.300

Fuente: (CHOW, V.T. 1983)

### **Método de Strickler:**

Cuando los lechos de los cauces naturales están constituidos por material pedregoso, donde el sedimento es representado por un diámetro medio, se recomienda el uso de la ecuación de Strickler para la estimación de  $n_o$ .

$$n_o = 0.038D^{1/6} \quad (15)$$

Donde:

D: Diámetro representativo de la rugosidad superficial (m)

El diámetro “D” es equivalente al diámetro  $D_{65}$ ,  $D_{90}$  o  $D_{95}$  dependiendo del acorazamiento del lecho. Particularmente cuando los sedimentos ofrecen una granulometría gruesa y extendida, el diámetro medio de la coraza es cercano al  $D_{90}$  o  $D_{95}$  obtenido de la curva granulométrica original del lecho. (CHOW, V.T. 1983)

### **Coefficiente de rugosidad en cauces naturales conocidos:**

Dentro de las publicaciones técnicas de la USGS se tiene la publicación Roughness Characteristics of Natural Channels, realizada por (BARNES, H. 1967) la cual presenta fotografías de diferentes corrientes naturales, y cada fotografía indica un coeficiente de rugosidad de Manning calibrado con mediciones de campo para cada caso mostrado.

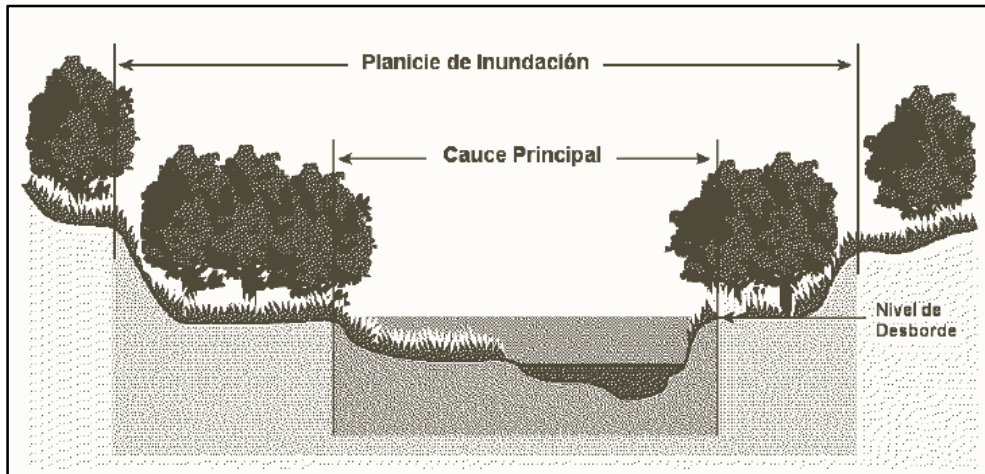
#### **- Caudal líquido dominante.**

Existen muchos conceptos para definir el caudal dominante que a continuación veremos.

Considerando la geometría, se define al caudal dominante al caudal que llena el cauce a rebosar (Caudal de desborde), puesto que este caudal desarrolla la más importante acción modeladora sobre el cauce (VIDE, J. 2007).



Figura 9. Vista transversal de un río que muestra el nivel de desborde del mismo.



Fuente: (FARIAS, H, 2005)

Muchos autores han propuesto diversas fórmulas para poder estimar este caudal entre los cuales, siendo la que mayor se ajusta a las características del río Ronquillo es la de Williams 1978, esta fórmula se encuentra dentro del libro de (ALONSO, R. 2004).

Williams propuso una ecuación para estimar la capacidad máxima del cauce utilizando 233 datos de caudal y realizando una ecuación de regresión múltiple obtuvo la Ec. 16.

$$Q = 4.0A^{1.21}S^{0.28} \quad (16)$$

Los parámetros de aplicación que menciona el autor corresponden a  $0.5 \leq Q \text{ (m}^3\text{/s)} \leq 28320$ ,  $0.000041 \leq S \leq 0.0810$  y  $0.00019 \leq d_{50} \text{ (m)} \leq 0.19$ .

#### **d. SEDIMENTOS DE FONDO Y MÉTODOS DE MEDICIÓN.**

Se denomina Capacidad de Transporte a la máxima cantidad de material sólido de fondo de una cierta granulometría que una corriente puede transportar con un gasto dado. La capacidad de transporte constituye un máximo que un río no siempre alcanza (ROCHA, A. 1998).

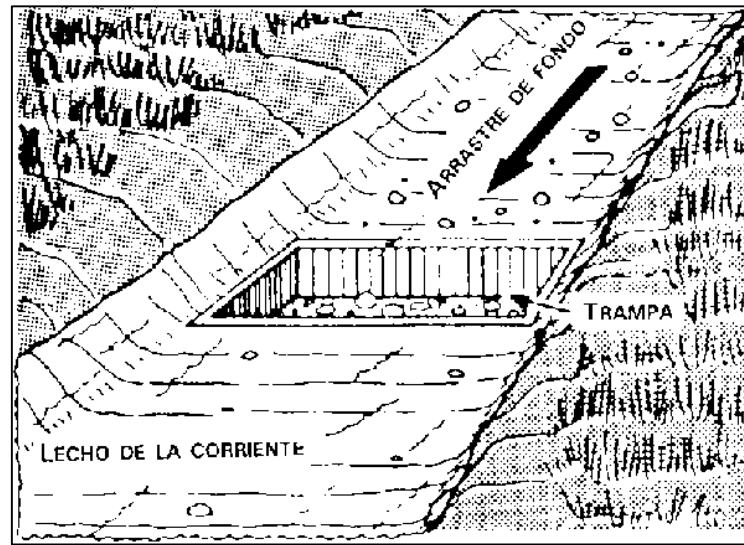
El gasto sólido que lleva un río en un momento determinado puede ser menor que su capacidad de transporte. Así, un río que escurre sobre un fondo constituido por piedras de gran tamaño puede tener como consecuencia de su velocidad una gran capacidad de transporte, pero en realidad pudiera no haber transporte sólido (debido al gran tamaño de las piedras que constituyen el lecho). En un caso como éste se dice que el río se encuentra en estado de erosión latente. Este caso es frecuente en ciertos torrentes. Cuando un río transporta su máxima capacidad de sólidos se dice que se halla en estado aluvional o de saturación (ROCHA, A. 1998).

La medición del sedimento de fondo se realiza utilizando diversos métodos, (HUDSON, N. 1997), menciona los siguientes métodos de medición:

##### **- Medición directa:**

La trampa de sedimentos es la forma más sencilla de calcular el arrastre de fondo consiste en cavar un agujero en el lecho de la corriente como en la Figura 10 y en retirar y pesar el material que cae en él. La cuenca aguas arriba de un vertedero o canal de aforo puede actuar análogamente como una trampa de sedimentos, pero es posible que no se sepa si se ha recogido todo el arrastre de fondo. En los lugares con grandes cargas de arrastre, este procedimiento puede necesitar mucho tiempo y resultar engorroso.

Figura 10. Trampa de Arrastre de Fondo



Fuente: (HUDSON, N. 1997)

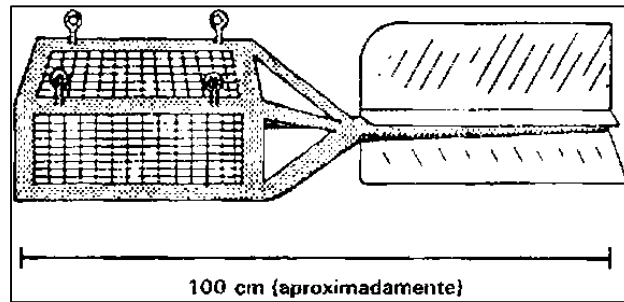
- **Muestreadores:**

El cálculo del arrastre de fondo se puede efectuar a partir de muestras recogidas por un dispositivo que está situado por debajo del lecho de la corriente durante un tiempo determinado y que luego son extraídas para pesarlas. Se han utilizado numerosos dispositivos y su variedad demuestra la dificultad que existe para tomar una muestra exacta y representativa. Los problemas que plantean los muestreadores del arrastre de fondo son:

- El muestreador perturba la corriente y modifica las condiciones hidráulicas en su punto de entrada.
- El muestreador tiene que descansar en el lecho de la corriente y tiende a hundirse en él al producirse una socavación en torno suyo.
- Para mantenerse estable en el fondo tiene que ser pesado, lo que dificulta su uso cuando se lo baja desde puentes o desde torres construidas con ese fin.
- Un muestreador tiene que reposar sobre un lecho razonablemente liso y no estar apoyado encima de piedras o cantos rodados.

La forma más sencilla es una cesta de alambre con una aleta estabilizadora como se ilustra en la Figura 11. El material que toma este modelo es reducido porque interfiere con la corriente y cierta cantidad de materia cada vez mayor a medida que la cesta se llena, se desvía en torno al muestreador.

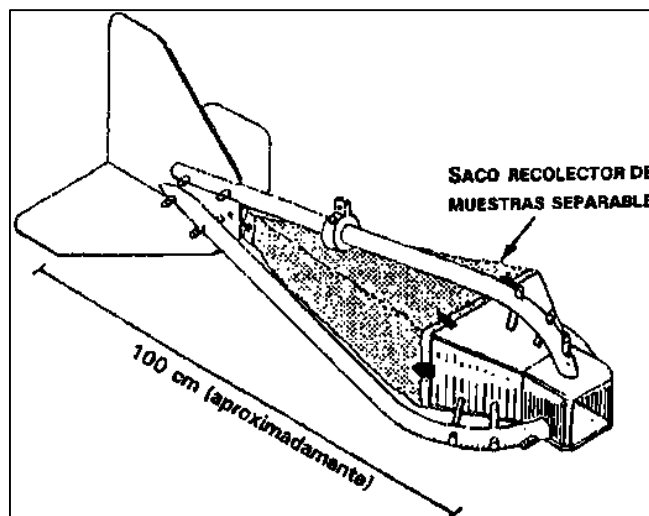
Figura 11. Muestreador Tipo Canasta



Fuente: (HUDSON, N. 1997)

El muestreador Helley-Smith es un equipo de alta eficiencia que se emplea para la recolección de carga o sedimentos de fondo. Es de gran utilidad para la determinación de la composición granulométrica del material recolectado y la rugosidad del lecho. Consiste en una tobera, una bolsa para muestras y un bastidor. Sus aletas traseras y su colar corredizo permiten orientarlo y balancearlo de acuerdo con las condiciones de flujo. Existen varias versiones para diferentes condiciones de campo.

Figura 12. Muestreador Tipo Canasta



Fuente: (HUDSON, N. 1997)

#### **e. SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN Y MÉTODOS DE MEDICIÓN.**

El material fino en los ríos se transporta en dos formas, como material sólido y en solución, el límite para diferenciarlos es el diámetro de sus partículas, siendo las partículas con diámetros menores a  $0,45 \mu\text{m}$  (micras) para el material en solución (OWENS, P. et al., 2005).

Al material fino transportado en suspensión se denomina la carga de sedimentos en suspensión (OWENS, P. et al., 2005), generalmente incluye arcillas, limos y arenas (CHARLTON, R. 2007) y en un determinado momento se transportan junto con el flujo principal con velocidades similares o iguales a este y gracias a la turbulencia (RUBIO, T. 2011).

Las técnicas de muestreo se pueden clasificar en muestreo manual y muestreo automático:

##### **- Muestreo manual**

El medio más eficaz y directo de obtener una muestra de sedimento en suspensión es a través de muestreo manual del río. Este es considerado el estándar contra el cual se compara la exactitud de los métodos automatizados e indirectos (WREN, D. et al., 2000).

Para poder realizar este tipo de muestreo se tienen que tener las siguientes consideraciones:

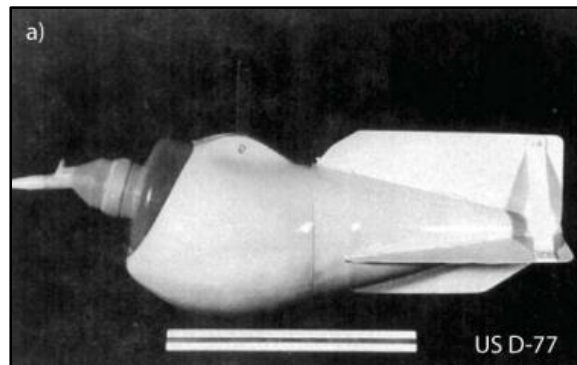
- El acceso seguro durante los fuertes flujos debe ser garantizada.
- Las limitaciones financieras y de tiempo asociados con los viajes hacia y desde el sitio ya que estas pueden limitar la frecuencia de visitas.
- Los flujos de tormentas importantes son poco frecuentes y, a menudo difíciles de predecir.

Dentro de este tipo de muestreo se presentan diversas formas de realizarlo como pueden ser:

### **Muestreador de profundidad integrado.**

Este método es capaz de proporcionar muestras representativas verticalmente cuando el muestreador se baja hasta el lecho de la corriente y la eleva a una velocidad uniforme.

*Figura 13.* Muestreador de profundidad integrada US D-77.



*Fuente:* (VANONI, V. 2006)

Este muestreador consta de un recipiente, una boquilla, un orificio para permitir la salida de aire o una válvula de control, por el que una única muestra de material compuesto de descarga, se recoge moviendo el dispositivo de muestreo verticalmente a través de la corriente (VANONI, V. 2006).

### **Punto único**

Si bien es la mejor práctica para tomar muestras a través de la sección transversal del flujo, se reconoce que esto no siempre es posible, especialmente cuando el río está crecido.

Se ha observado que las muestras representativas individuales se pueden obtener a poca profundidad en corrientes bien mezcladas, donde el sedimento suspendido es uniformemente y es distribuido a lo largo de los planos verticales y horizontales (PERKS, M. 2014).

## - Muestreo automático

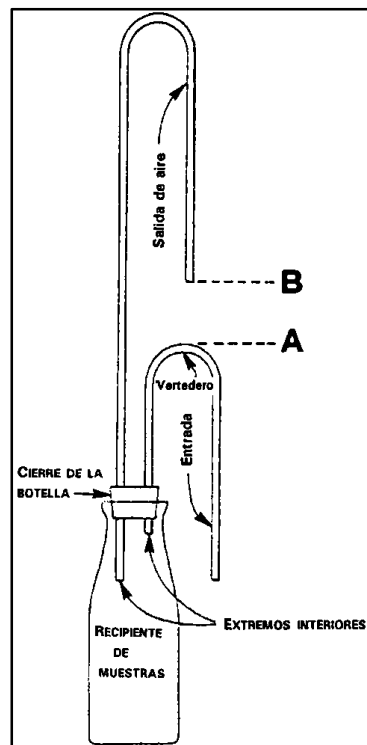
Una alternativa al muestreo realizado manualmente en el río es desplegar un aparato capaz de recoger automáticamente una muestra sin la presencia de un operador de campo. Esto es posible por medio de muestreadores pasivos básicos, muestreadores de bombeo más avanzados, o dispositivos de muestreo de tiempo de integración. Cada uno es evaluado en las siguientes secciones.

### Pasivo

El muestreador de una sola etapa, también conocido como un muestreador de sifón, es un ejemplo de un dispositivo de muestreo pasivo, que se fija a la altura en la que se toma la muestra. El agua entra en el tubo de admisión ya que el nivel del río sube. La muestra a continuación, entra en el cuerpo de muestras debido a la creación de un sifón, cuando el nivel de agua supera la altura del bucle de tubo de entrada (Figura 14) (PERKS, M. 2014).

Estos muestreadores se colocan especialmente en lugares remotos.

Figura 14. Muestreador pasivo que toma muestras de agua mediante el sistema de sifonaje.



Fuente: (PERKS, M. 2014).

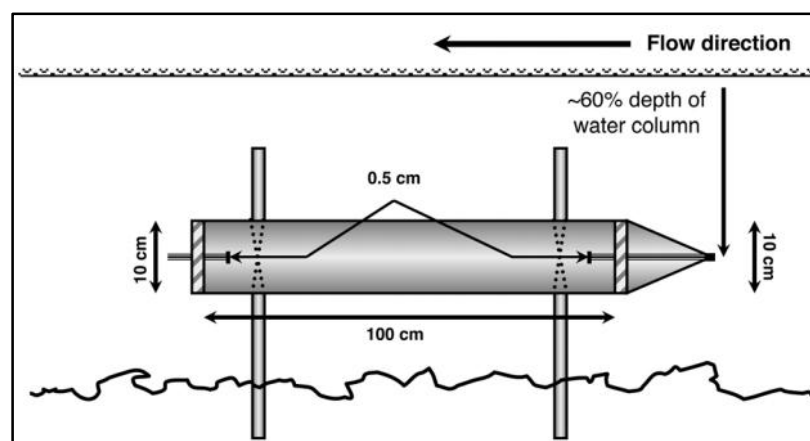
## Bomba automatizada

La colecta de muestras de sedimentos en suspensión se ha hecho mucho más fácil en los últimos años a partir de la disponibilidad comercial de muestreadores automáticos de la bomba. Estos consisten en una toma, distribuidor de la muestra, la bomba, el base o botella y sistema de activación (GRAY, J. & SIMÕES, F. 2008), mediante el cual un volumen de la muestra se extrae desde el canal a través de la creación de un vacío parcial. Estas muestras se han convertido eficaz, ligero y asequible, y controlado por un ordenador, lo que permite que el muestreo sea disparado a distancia (por ejemplo a través de SMS) o mediante dispositivos de activación externa (por ejemplo, en respuesta a los cambios en el caudal del río). Esta activación a distancia ha permitido una mayor precisión y frecuencia de muestreo durante las tormentas. Sin embargo puede haber problemas con respecto al mantenimiento de estos equipos debido a los diversos problemas que se puedan presentar y el costo de mantenimiento.

## Muestreador de tiempo integrado.

El muestreador Phillips está diseñado para recoger muestras de sedimentos en suspensión transportados activamente (es decir, arcilla, limo y arena fina-media) en el entorno fluvial. El cuerpo principal de la toma de muestras (Figura 15) se compone de cloruro de polivinilo disponible (PVC) del tubo (diámetro interno de 9,8 cm [di.] x longitud 100 cm) comercialmente con sellos de tapas roscadas en ambos extremos de la tubería cilíndrica. Semi-rígida tubería neumática nylon (0,4 cm x 150 mm) proporcionar los tubos de entrada y de salida y están roscados a través de cada tapa de extremo, y hecho (SMITH, T. & OWENS, P. 2014)

Figura 15. Muestreador de tiempo integrado.



Fuente: (PHILLIPS, J. et al., 2000).



En este muestreador la velocidad de flujo dentro de la cámara principal de la toma de muestras se reduce por un factor de alrededor de 600 en comparación con el flujo de ambiente (PHILLIPS, J. et al., 2000).

#### **f. ESTIMACIÓN DE SEDIMENTO DE FONDO.**

Para poder estimar el transporte de fondo se presentan las siguientes fórmulas empíricas:

Las fórmulas que mayormente se utilizadas para la estimación del gasto sólido de fondo, son las siguientes:

##### **- Ecuación de Meyer –Peter y Muller (M-P-M)**

Meyer-Peter (1883-1969) fue director del antiguo Laboratorio de Hidráulica del Politécnico de Zurich. En este laboratorio se han realizado durante muchos años importantes investigaciones y estudios en modelo hidráulico sobre diversos problemas de transporte sólido en ríos de fuerte pendiente, entre ellos, varios para el Perú.

Es una ecuación empírica obtenida en suiza a partir de ensayos de laboratorio y muy usada en Europa. Cubre hasta pendientes de 2% y hasta tamaños de material de 30 mm (VIDE, J. 2007) y tirante de 0.01 a 1.20 m. Los experimentos se condujeron con materiales naturales y sintéticos cuyo diámetro osciló entre 0.4 y 30 mm.

$$g_B = 8\gamma_s \left( g \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} D_m^3 \right) \right)^{0.5} \left[ \left( \frac{n_s}{n} \right)^{1.5} \tau_* - 0.047 \right]^{1.5} \quad (17)$$

$n_s$  es el coeficiente de manning debido a la partícula y se calcula utilizando la Ec. 18.

$$n_s = \frac{D_{90}^{1/6}}{26} \quad (18)$$

Donde:

$g_B$ : Gasto sólido (Kgf/m)

$\gamma_s$ : Peso específico del suelo (Kgf/m<sup>3</sup>)

$\gamma$ : Peso específico del agua (Kgf/m<sup>3</sup>)

$D_m$ : Diámetro medio (m)

$\tau_*$ : Número adimensional de Shields.

$n_s$ : Coeficiente de Manning debido a la partícula.

$n$ : Coeficiente de Manning.

$g$ : Aceleración debido a la gravedad ( $m^2/s$ )

D90: Diámetro de la partícula ( $D=D_{90}$ ) de sedimento superficial.

- **Sub-sustrato basado en la ecuación de Parker, Klingeman y McLean 1982 (P-K-Mc).**

La fórmula de (PARKER, G. et al., 1982) difiere del resto de fórmulas en que se basa única y exclusivamente en datos de campo. Estas fórmulas son de las más completas y fiables (GARCÍA, C. & SALA, M. 1998).

La ecuación Parker-Klingeman-McLean (PARKER, G. et al., 1982) calcula las cantidades de transporte sobre la base de un único tamaño de grano del tamaño de grano medio del sustrato,  $D_{50sub}$ . La ecuación Parker, Klingeman, y McLean se basa en varios supuestos que incluyen:

- 1.- Todos los tamaños disponibles de las partículas, gruesas y finas, son aproximadamente igual de móviles en el movimiento inicial y durante el transporte.
2. Las distribuciones de tamaño de partículas de la carga de fondo son los mismos que se encuentran en el material del lecho y no cambian con la etapa de flujo.
3. Una superficie de material gravoso está presente durante flujo alto, así como durante flujo bajo.
4. La cantidad de transporte de grava se predice por el tamaño medio de las partículas del sedimento sub-superficial.
5. Las partículas de varios tamaños son arrastradas a aproximadamente la misma tensión de cizallamiento.
6. La distribución del tamaño no es importante.
7. Este modelo puede ser adecuado para pequeñas y medianas canales que tienen tamaños de partícula entre 0,6 a 102 mm, con pendientes medias, y que no están dominados por la carga de arena

Esta ecuación presenta las siguientes 3 componentes:

$$W^* \begin{cases} 11.2 \left(1 - \frac{0.822}{\phi_{50}}\right)^{4.5} & \phi_{50} > 1.65 \\ 0.0025 \exp[14.2(\phi_{50} - 1) - 9.28(\phi_{50} - 1)^2] & 0.95 \leq \phi_{50} \leq 1.65 \\ 0.0025 \phi_{50}^{14.2} & 0.95 < \phi_{50} \end{cases} \quad (19)$$

Donde  $\phi_{50}$  es Parámetro adimensional en base a tensión de corte necesario para movilizar partículas de tamaño D50 y  $\tau_{50}^*$  es la tensión de referencia de Shield que toma un valor de 0.0876.

$$\phi_{50} = \frac{\tau_{50}^*}{\tau_{r50}^*} \quad (20)$$

$$\tau_{50}^* = \frac{u_*^2}{(s - 1) \cdot g \cdot D_{50sub}} \quad (21)$$

Todos los parámetros se relacionan para calcular la tasa de transporte de sedimento por medio de la ecuación:

$$Q_b = \frac{W^* \cdot B \cdot u_*^3 \cdot \rho_s}{(s - 1)g} \quad (22)$$

- **Smart y Jaeggi 1983 (S-J).**

También presentada por Smart (1984), basada en experimentos en canales con 77 datos propios del laboratorio y 137 de Meyer Peter y Müller (1948) (LÓPEZ, R. 2003).

Esta relación permite predecir el transporte en función de la pendiente, el coeficiente adimensional de Chézy “C”, del esfuerzo cortante adimensional “ $\tau^*$ ” y del exceso de

esfuerzo cortante adimensional sobre el valor crítico, las relaciones propuestas por Smart y Jaeggi corresponden a una versión más completa de la ecuación de transporte de Meyer Peter y Müller (AGUIRRE, J. et al., 2000), válidos para diámetros mayores a 0.4 mm y pendientes entre 0.4% y 20% (SMART, G. 1984), en la forma:

$$\Phi^* = 4 \left[ \frac{D_{90}}{D_{30}} \right]^{0.2} S^{0.6} C^* \tau^{*0.5} [\tau^* - \tau_{cj}^*] \quad (23)$$

Donde:

$D_{90}$  y  $D_{30}$  representan los diámetros del 90% y 30% del material respectivamente y  $\tau_{cj}^*$  es el esfuerzo cortante crítico dado por:

$$\tau_{cj}^* = \tau_c^* \cos(\arctan S) \left[ 1 - \frac{S}{\tan \phi} \right] \quad (24)$$

Dónde  $\tau_c^*$  es el esfuerzo cortante crítico,  $S$  es la pendiente del cauce y  $\phi$  es el ángulo de fricción interna de las partículas.

- **Bathurst (1987).**

Esta relación expresa el transporte de sedimentos en función de la pendiente y el caudal en exceso de caudal crítico dada por la expresión propuesta por Schoklisch 1962 (Aguirre-Pe et al., 2000). Válida para pendientes desde 0.4% hasta 4% y cumple la condición  $0.3 \leq d/D_{84} \leq 50$ , donde “d” corresponde al tirante de agua (ELSITDIÉ, L. et al., 2009), esta relación se expresa de la siguiente forma:

$$\Phi^* = \frac{2.5 S^{3/2}}{(\Delta + 1) D_{50} \sqrt{(g \Delta D_{50})}} (q - q_c) \quad (25)$$

De la cual  $D_{50}$  es el diámetro del 50% del material sólido,  $q$  es el caudal de agua por unidad de ancho y  $q_c$  es el caudal crítico y se obtiene de la siguiente expresión:

Para  $D_{50}$  de la capa subsuperficial del lecho:

$$\frac{q_c}{\sqrt{gD_{50}^3}} = 0.15 S^{-1.12} \quad (26)$$

Para  $D_{16}$ , este deberá ser tomado de la capa superficial del lecho, y es de la forma:

$$\frac{q_c}{\sqrt{gD_{16}^3}} = 0.21 S^{-1.12} \quad (27)$$

El transporte de sedimentos, en volumen por unidad de tiempo y unidad de ancho  $q_s$ , puede expresarse en forma adimensional como:

$$\Phi^* = \frac{q_s}{D\sqrt{g\Delta D}} \quad (28)$$

Para obtener el volumen de sedimento de fondo acumulado se utilizaron los siguientes criterios:

- **Volumen acumulado de sedimentos**

El volumen de sedimento depositado se estimará utilizando las ecuaciones 29 y 30 la cuales fueron utilizadas por (ORTIZ, M. et al., 2003) para estimar el volumen de sedimento en un intervalo de tiempo.

$$V_s = \int_0^t Q_s(t) * d(t) \quad (29)$$

$$Q_s(t) = \frac{q_s(t) * L}{\rho_s} \quad (30)$$

Donde:

$V_s$ : Volumen de sedimento en un intervalo de tiempo ( $L^3$ ).

$Q_s$ : Volumen de sedimento por unidad de tiempo ( $L^3T^{-1}$ ).

$q_s(t)$ : Gasto de sedimento por unidad de longitud ( $M L^{-1}T^{-1}$ )

L: Ancho de cauce (L).

$\rho_s$ : Densidad de material depositado ( $M L^3$ )

Al volumen estimado se realizará la corrección por porosidad obteniendo la siguiente ecuación:

$$V_{sc} = \frac{V_s}{(1 - n)} \quad (31)$$

Donde:

$V_{sc}$ : Volumen de sedimento en un intervalo de tiempo corregido por porosidad ( $L^3$ ).

$V_s$ : Volumen de sedimento en un intervalo de tiempo ( $L^3$ ).

$n$ : Porosidad de sedimento acumulado (-).

#### **g. ESTIMACIÓN DE SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN**

Los flujos de sedimentos en suspensión se pueden estimar a partir de datos de concentración periódicas o poco frecuentes, basadas en algoritmos de estimación de cargas mediante interpolaciones o extrapolaciones. Estos pueden implicar el uso de los registros de descarga de alta frecuencia para el período investigado (PHILLIPS, J. et al., 1999).

La relación entre el sedimento en suspensión y el caudal líquido, es representada por medio de curvas. Las curvas de transporte de sedimentos diarios, mensuales, estacionales, anuales y de inundación usualmente se definen y expresan como sedimentos promedio (toneladas por día) y descargas de agua (pies cúbicos por segundo o metros cúbicos por segundo) por períodos de días, meses, años o periodos de tormentas (GLYSSON, G. 1987).

En el artículo de (PHILLIPS, J. et al., 1999), podemos encontrar 22 métodos utilizados en la representación del sedimento en suspensión y caudal líquidos, siendo el mayormente utilizado la curva de gasto.

- **Curva de gasto**

En este método se deriva una relación entre los valores de concentración y el caudal de los ríos en el momento del muestreo por una transformada logarítmica y regresión de mínimos cuadrados (WALLING, D. & WEBB, B. 1981, 1988; WEBB, B. et al., 1997).

$$C = aQ^b \quad (32)$$

C: Valor instantáneo estimado de la concentración.

Q: Descargas instantáneas asociada con C.

“a, b”: Son coeficientes que describen la relación única entre la descarga y la concentración de sedimentos para cada sección transversal del río.

**Palabras claves:**

- *Sedimento de fondo.*- Es el material grueso, típicamente arenas gruesas, gravas finas y las partículas más grandes, se mueve a lo largo del lecho del canal como carga de fondo.
- *Sedimento en suspensión.*- Es el material fino en los ríos de transporta en dos formas, como material sólido y en solución.
- *Río Ronquillo.*- Es el tramo final de río Tres Ríos, conocido con el nombre de río Ronquillo ya que adopta el nombre de la zona por el que pasa.
- *Volumen de sedimento de fondo:* Cantidad de sedimento acumulado en un intervalo de tiempo " $\Delta t$ ".
- *Coefficiente de proporcionalidad:* Coeficiente obtenido al dividir un valor estimado entre un valor real.

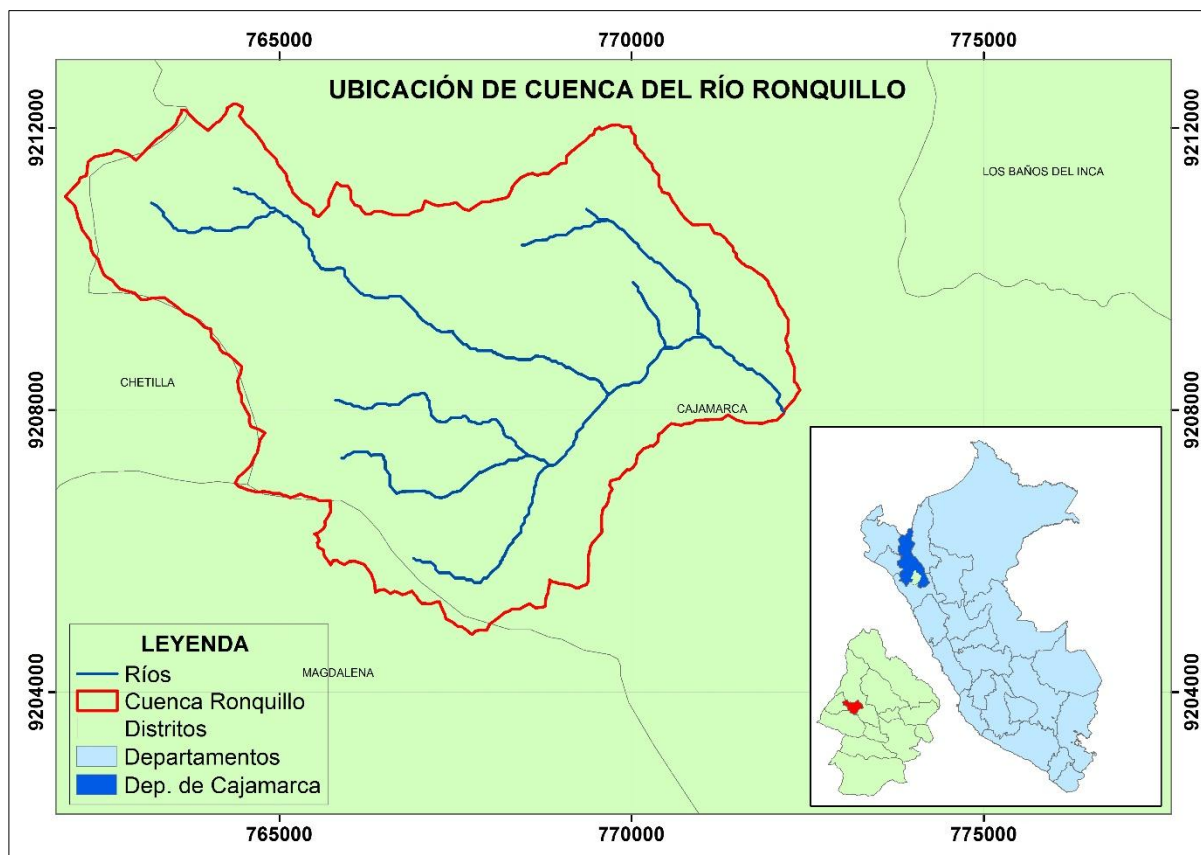


### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE ZONA DE ESTUDIO.

El área de estudio corresponde a la cuenca “Ronquillo”, la cual se encuentra ubicada en el norte del Perú, en el departamento, provincia y distrito de Cajamarca, al oeste de la ciudad de Cajamarca.

Figura 16. Ubicación cuenca del río Ronquillo en el distrito de Cajamarca.

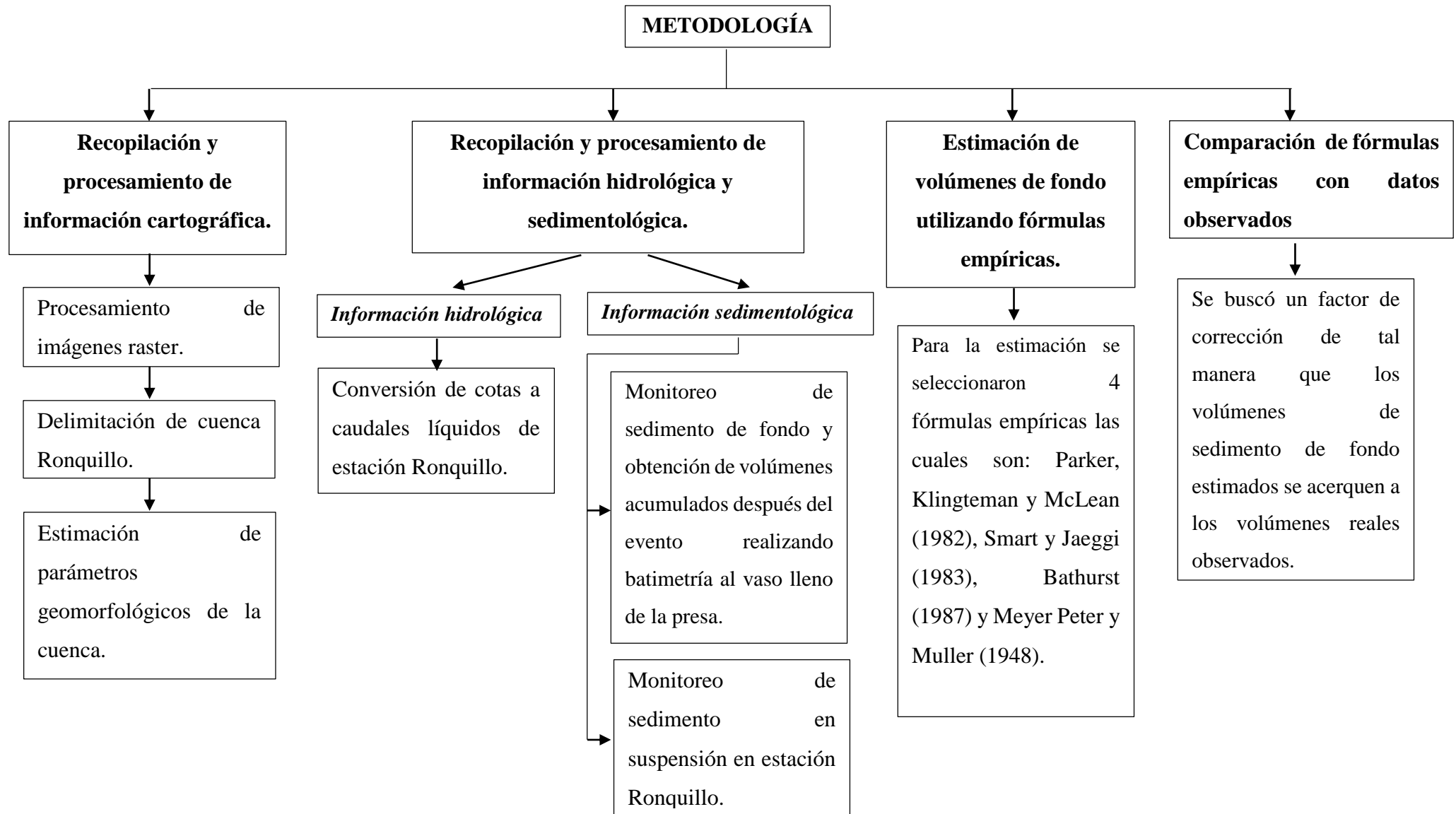


La investigación se llevó a cabo con la información hidrométrica y sedimentológica obtenida durante el año de monitoreo 2016.

La secuencia aplicada en la presente investigación se presenta a continuación:

#### 3.2. METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos mencionados, se realizó la siguiente metodología



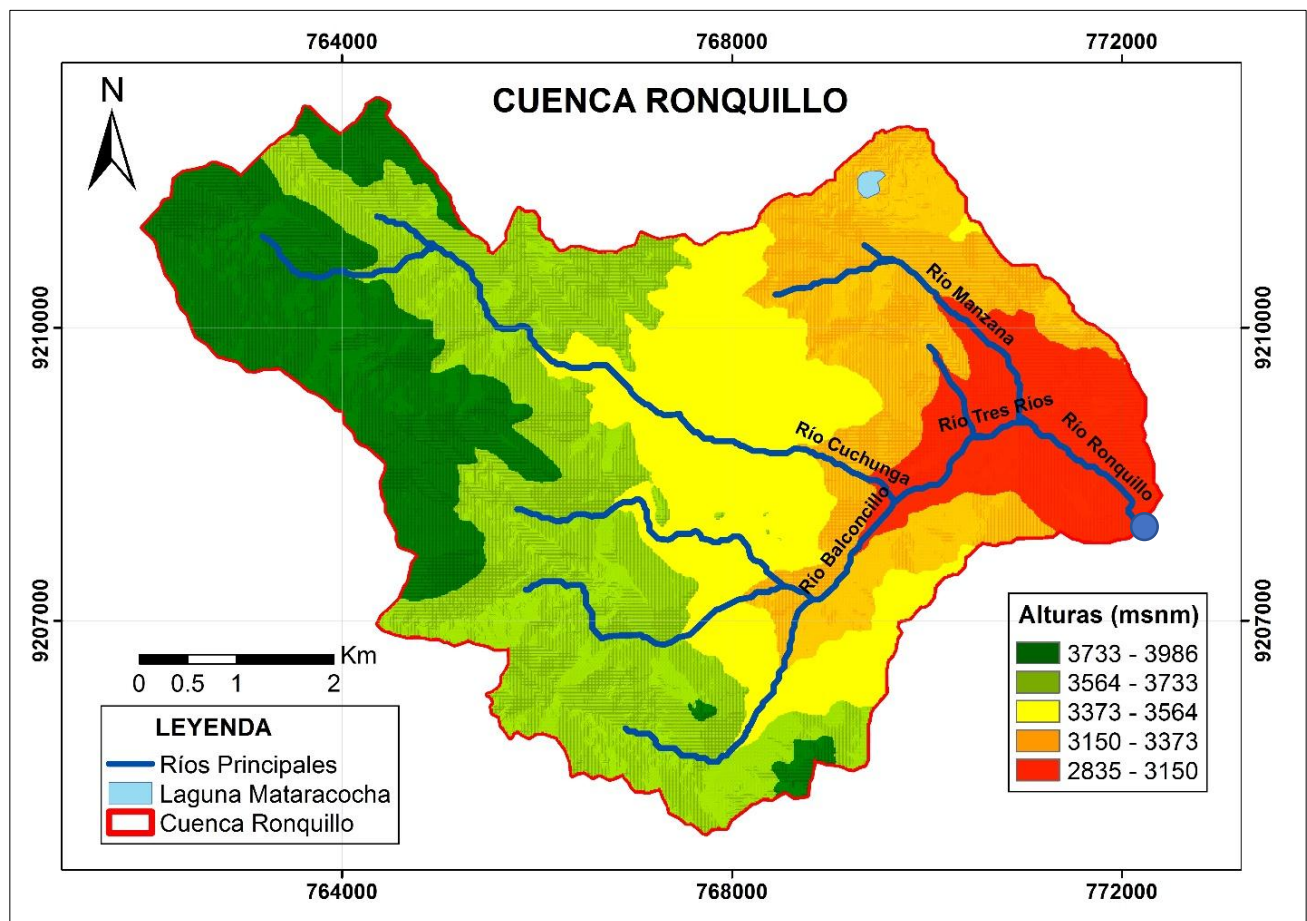
## a. CARTOGRAFÍA DE LA CUENCA

### PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS DE CUENCA RONQUILLO.

Para obtener los parámetros geomorfológicos de la cuenca se utilizaron imágenes del radar Alos Palsar de topografía con una resolución de 12.5 m correspondiente a la zona de interés, las imágenes se procesaron utilizando el software QGis.

El resultado de la delimitación se observa en la Figura 14, en la cual se aprecia la red hidrográfica de la cuenca (líneas de color azul), laguna Mataracocha (Sombreado celeste), y el punto emisor correspondiente a la captación Ronquillo (Punto azul).

*Figura 17.* Delimitación y topografía de cuenca Ronquillo, las elevaciones presentes en la cuenca varían desde los 2835 msnm hasta los 3986 msnm.



En la Tabla 5 se presentan algunos parámetros geomorfológicos de la cuenca después de realizar la delimitación.

Tabla 5. *Parámetros geomorfológicos calculados para la cuenca Ronquillo.*

<b>Parámetro Geomorfológicos</b>	<b>Valor</b>
1.- Área (A)	41.7 Km <sup>2</sup>
2.- Perímetro (P)	34.50 Km
3.- Factor de Forma (F)	0.24
4.- Coeficiente de Gravelius o Índice de Compacidad (Kc)	1.50
5.- Altitud Media (Hm)	3508 m.s.n.m
6.- Pendiente de Ladera o Pendiente de la Cuenca	27.92%
7.- Pendiente del Máximo Recorrido	6.15%
8.- Longitud de Máximo Recorrido (L)	13.20 Km
10.- Tiempo de Concentración (Tc)	235 min.
11.- Longitud al centroide (Lc)	5.92 Km

## **b. RECOPIACIÓN Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA Y SEDIMENTOLÓGICA.**

### **CAUDALES LÍQUIDOS DE ESTACIÓN RONQUILLO.**

En la captación Ronquillo se encuentra ubicado un piezómetro el cual registra los niveles de agua (cotas) en intervalos de tiempo de 15 minutos.

Luego de haber realizado el análisis de consistencia del registro de niveles de agua, se obtiene los caudales para la estación, el cálculo de los caudales se realizó mediante la aplicación de la fórmula de Poleni (PATT, H. & JÜPNER, R. 2013)(Ecuación 33).

$$Q = \frac{2}{3} \times \mu \times \sqrt{2g} \times w \times h^{3/2} \quad (33)$$

De la ecuación anterior, “Q” representa el caudal ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), “ $\mu$ ” representa un valor empírico adimensional para describir la forma de la presa ( $\mu = 0,75$ ), g representa la gravedad terrestre ( $\text{m}/\text{s}^2$ ), “w” representa el ancho de la cresta de la presa ( $w = 6,95 \text{ m}$ ) y “h” representa el nivel del agua (m) sobre la cresta de la presa.

*Figura 18.* Piezómetro ubicado en estación Ronquillo, el cual registra los niveles de agua cada un periodo de tiempo determinado.



## **VOLÚMENES DE SEDIMENTOS DE FONDO MEDIDO EN CAMPO.**

En la presente investigación, se estableció una estrategia de monitoreo de sedimento de fondo, utilizando la presa formada por el vertedero de la estructura de captación como un acumulador de sedimentos.

Para estimar el volumen acumulado en la presa se realizaron 2 batimetrías considerando el vaso de la presa hasta 16 m aguas arriba del barraje de la estructura, la primera batimetría se realizó en época de estiaje, con la finalidad de obtener la información del vaso vacío de la presa, la segunda batimetría se realizó con el vaso lleno de sedimentos. Teniendo como base la batimetría del vaso vacío se obtuvo el volumen del vaso lleno de la presa.

Se registraron los eventos que llenaron la presa, el caudal que se tomó como base para considerar que se inició el transporte de fondo fue el caudal dominante estimado, a partir de ello se registró el tiempo de duración del evento y los caudales líquidos involucrados.

Para entender mejor cómo funciona el sistema de monitoreo de sedimento de fondo en la estación ronquillo, se detalla el manejo de las compuertas presentes en ella y la función que cumplieron.

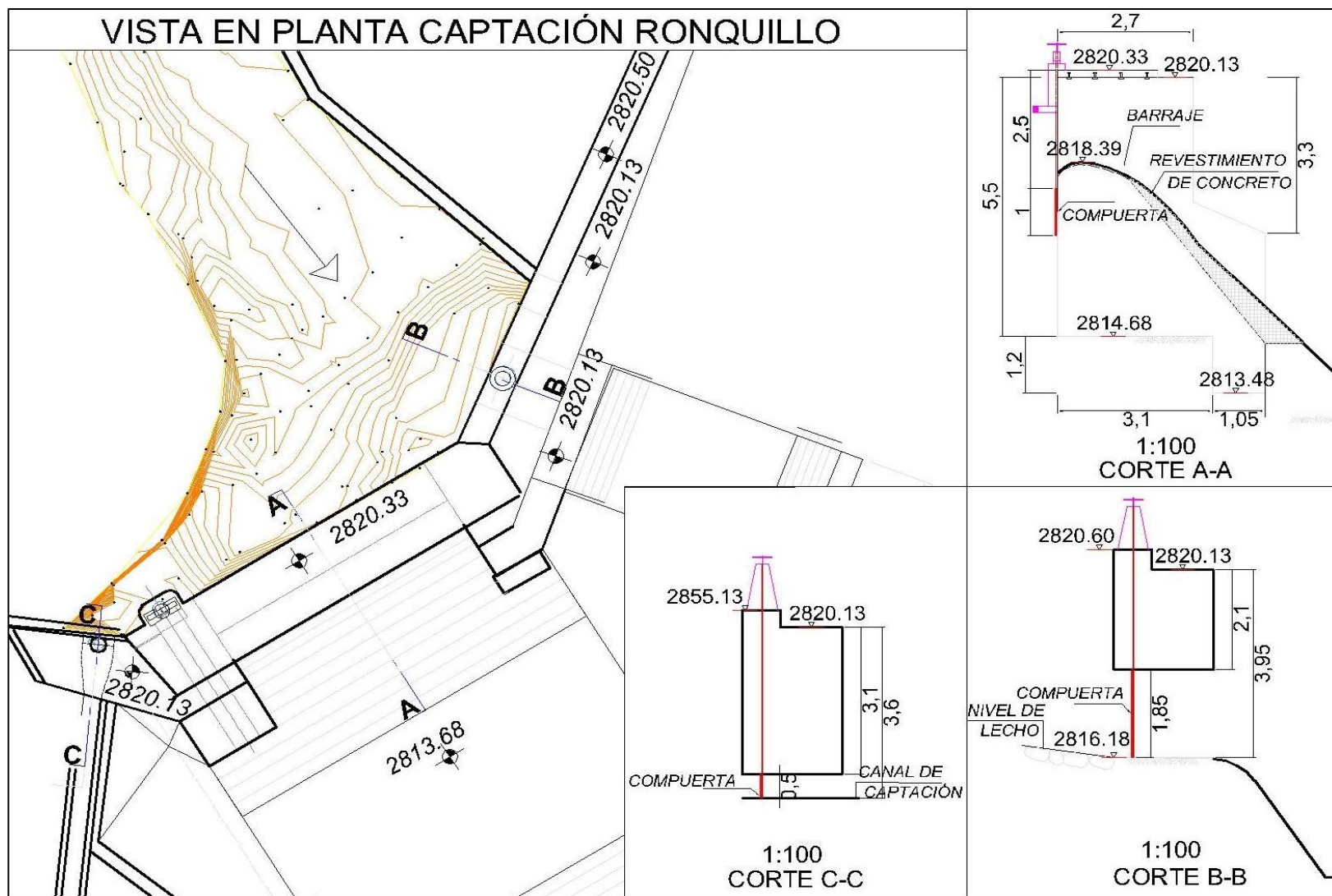
### **- Manejo de compuertas en captación Ronquillo:**

En la estructura de captación se ubican 3 compuertas, como se muestran en la Figura 19, estas se muestran en los cortes C-C, A-A y B-B.

La compuerta ubicada en el corte C-C corresponde a la del canal de captación, es utilizada para la regulación del caudal captado.

Las compuertas que se observan en los cortes A-A y B-B se utilizan para hacer la limpieza del vaso de la presa, estas se abren cuando el vaso de la presa se llena de sedimentos para poder realizar la limpieza, cuando la presa se ha quedado sin sedimento, las compuertas se cierran hasta un próximo evento.

Figura 19. Vista en planta de captación Ronquillo y cortes de compuertas.



Fuente: Modificado de EPS SEDACAJ.



- **Batimetría del vaso de la presa las estructuras de captación Ronquillo (acumulador).**

Para determinar el volumen de almacenamiento en el totalizador (vaso de la presa) se realizó batimetrías, para ello se utilizó un equipo topográfico conformado por una estación total, prisma y winchas.

Como se mencionó anteriormente, la batimetría se realizó en el vaso de la presa, hasta 16 m aguas arriba del barraje de la captación Ronquillo, ya que en la visita a campo se identificó que hasta esa distancia de almacenaban los sedimentos.

Después de realizar el trabajo de campo se procedió a realizar el trabajo de gabinete, con la información obtenida con el equipo topográfico y utilizando el software Civil 3D 2014 se obtuvo la información del totalizador vacío y por diferencia, se estimó el volumen cuando el totalizador está lleno de sedimento.

En las Figuras 20 y 21 se muestran los resultados de las batimetrías del totalizador o vaso de la presa vacío y lleno respectivamente, los colores en cada una de las figuras representan las elevaciones en metros sobre el nivel del mar (msnm). En las tablas de sus leyendas los colores van enumerados desde el uno hasta seis, siendo uno el punto con sedimento más bajo y seis el más alto.



Figura 20. Vista en planta de batimetría en época de estiaje de vaso de presa.

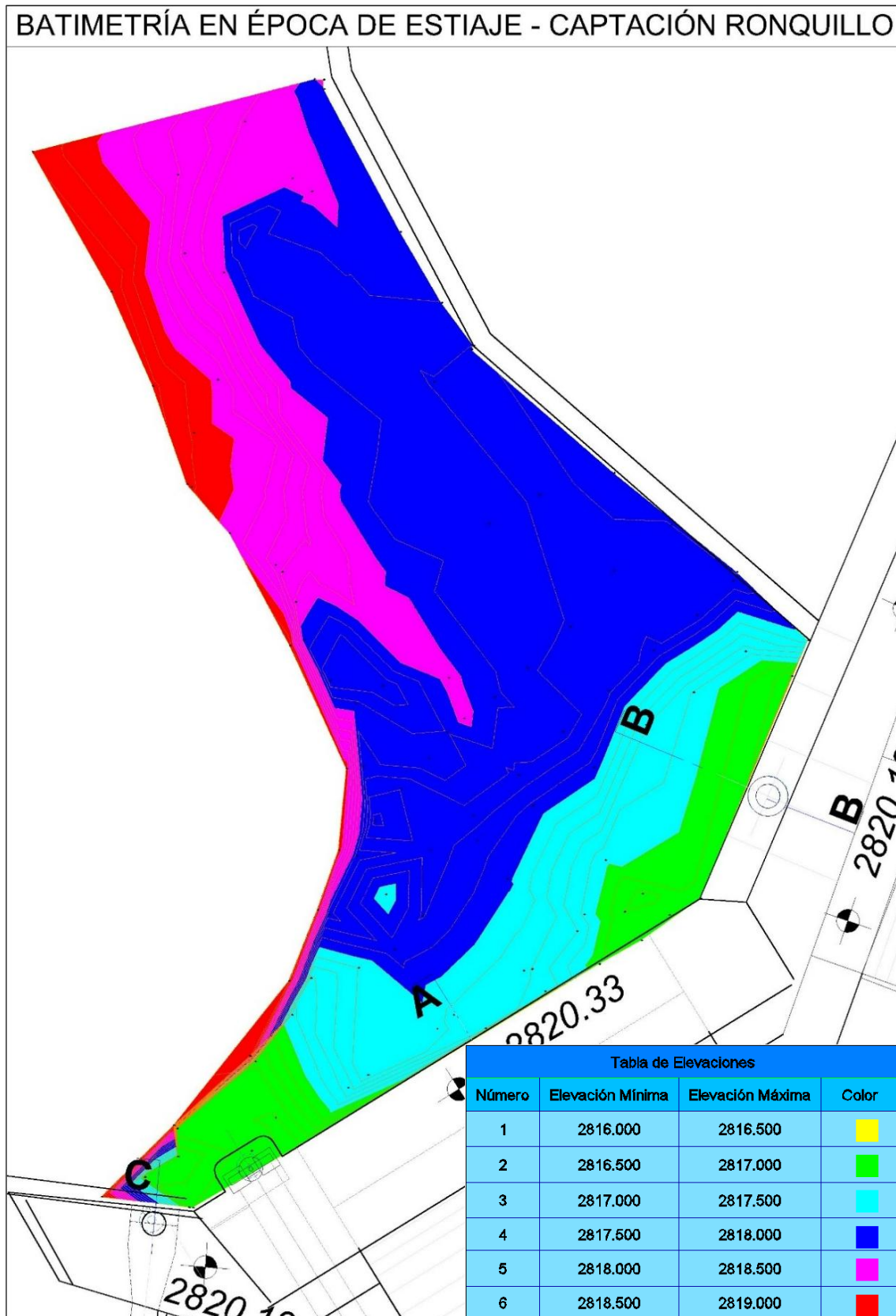
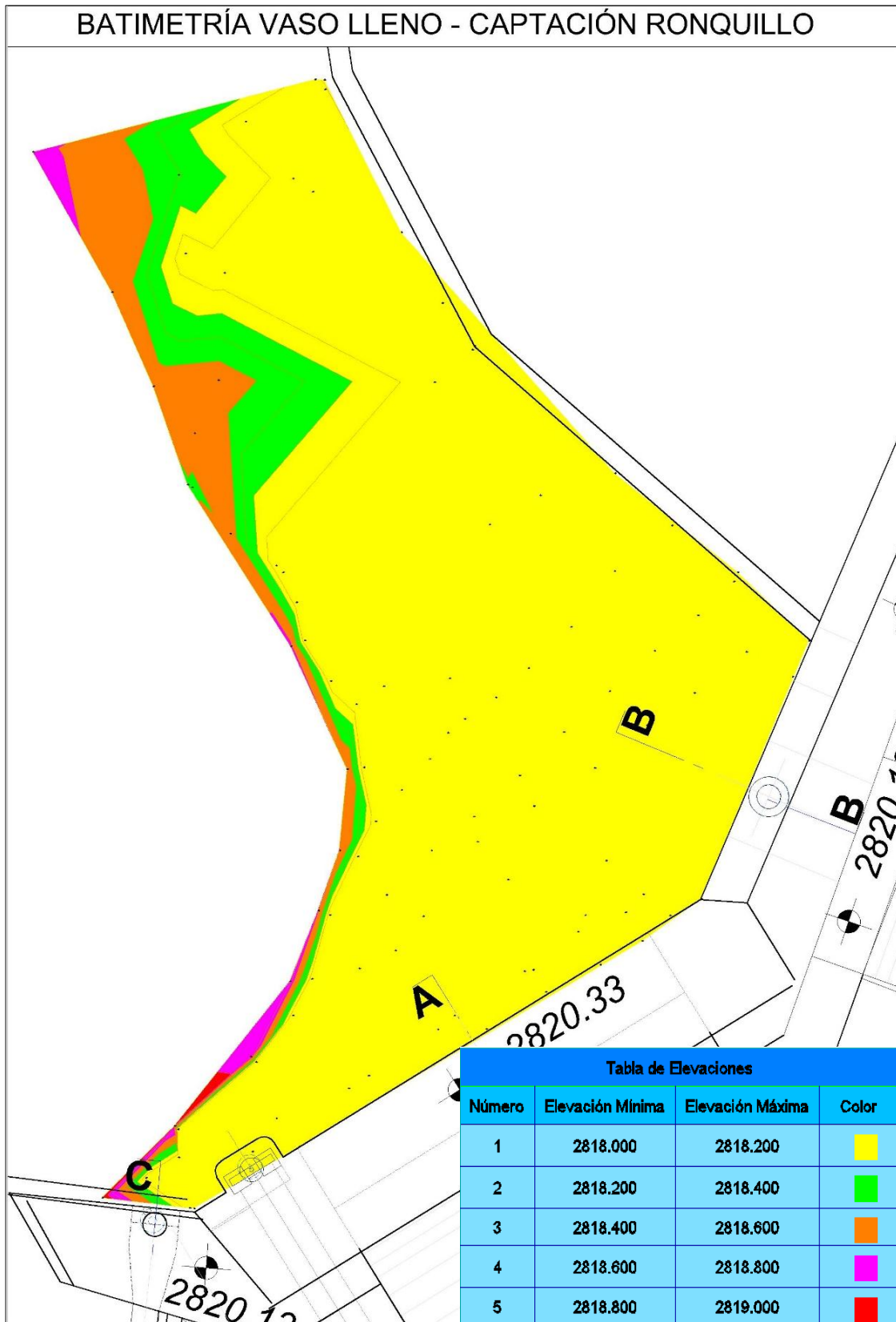


Figura 21. Vista en planta de batimetría de vaso de presa lleno.



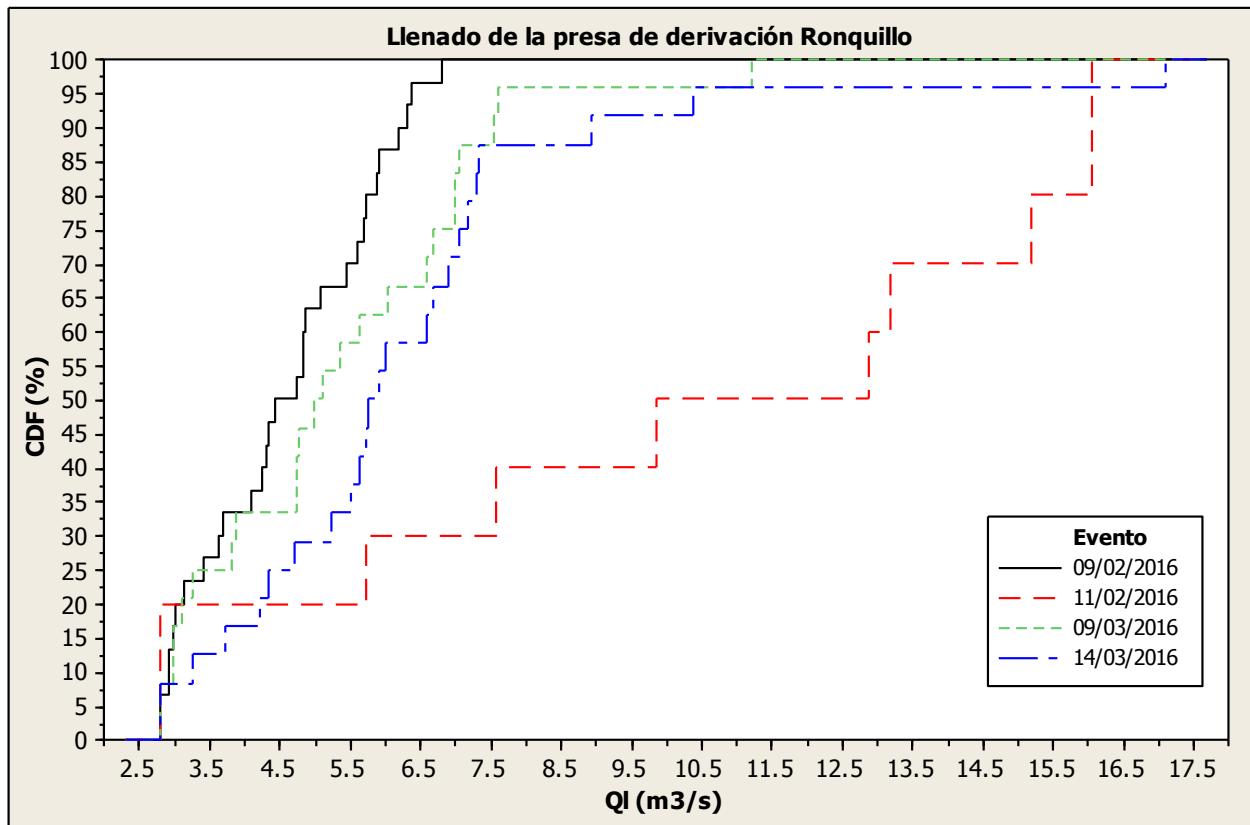
- **Volumen de sedimentos de fondo observado.**

La capacidad de almacenamiento de la presa formada por el barraje en la captación ronquillo se estimó teniendo el plano del vaso de la presa vacía y llena, la diferencia de las dos superficies nos permitió obtener el volumen de almacenamiento del vaso.

La capacidad de almacenamiento cuando se llena corresponde a  $68.2 \text{ m}^3$ , hay que tener en cuenta que el volumen estimado con las batimetrías incluyen sedimentos y poros.

Fueron 4 los eventos que llenaron el vaso de la presa, es decir, para cada uno de los cuatro eventos se observó  $68.2 \text{ m}^3$  de sedimento acumulado. A continuación se presenta un gráfico de frecuencias acumuladas, el cual nos permite observar el llenado del vaso de la presa y la dinámica de los caudales involucrados en cada evento.

Figura 22. Cuatro eventos monitoreados que llenaron el vaso de la presa durante el año 2016.



En la Figura 23, el eje “y” representa al llenado de la presa 100% representa que la presa ya se llenó (68.2 m<sup>3</sup>) y en el eje “x” se presenta los caudales involucrados en cada evento.

Los cuatro eventos monitoreados presentan comportamiento diferentes, debido a la gran variabilidad de sus caudales y tiempo de duración del evento total, siendo el más rápido el ocurrido el 09/02/2016 y el más lento en llenar el vaso de la presa el ocurrido el 11/02/2016. Las medianas de los caudales en los eventos son: para el evento (1) ocurrido el 09/02/2016 de 4.5 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, (2) 11/02/2016 de 13.0 m<sup>3</sup>/s, (3) 09/03/2016 de 5.0 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> y (4) 14/03/2016 de 6.0 m<sup>3</sup>/s. Analizando las medianas de cada evento se observan que los eventos (1), (3) y (4) tienen valores similares, mientras que el valor de mediana del evento (2) mucho más alto.

### **c. ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTO DE FONDO UTILIZANDO FÓRMULAS EMPÍRICAS.**

Para la estimación de sedimento de fondo se realizaron trabajos de campo y gabinete previos, se describen a continuación:

#### **- LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE RÍO RONQUILLO.**

La estimación del transporte de fondo a partir de fórmulas empíricas requiere información como la pendiente del tramo del río a estudiar y ancho del cauce.

Para obtener la longitud del tramo con el que se trabajará se realizó una visita de campo en la zona, observando las características del río Ronquillo se decidió trabajar con los 200 m del río ubicados aguas arriba de la captación, ya que se consideró un tramo representativo tanto para estimar el ancho promedio del río, pendiente y granulometría.

El levantamiento topográfico se realizó utilizando un quipo topográfico conformado por una estación total, prisma y winchas. Los resultados obtenidos se observan en la Figura 23.

La línea azul central representa el alineamiento trazado para obtener la pendiente del cauce, las progresivas del alineamiento tienen su punto de inicio en la progresiva 0+00 ubicada en la captación Ronquillo y van aumentando aguas arriba de la captación Ronquillo finalizando en la progresiva 0+200 Km.



Figura 23. Vista en planta y topografía de 200 m de río Ronquillo

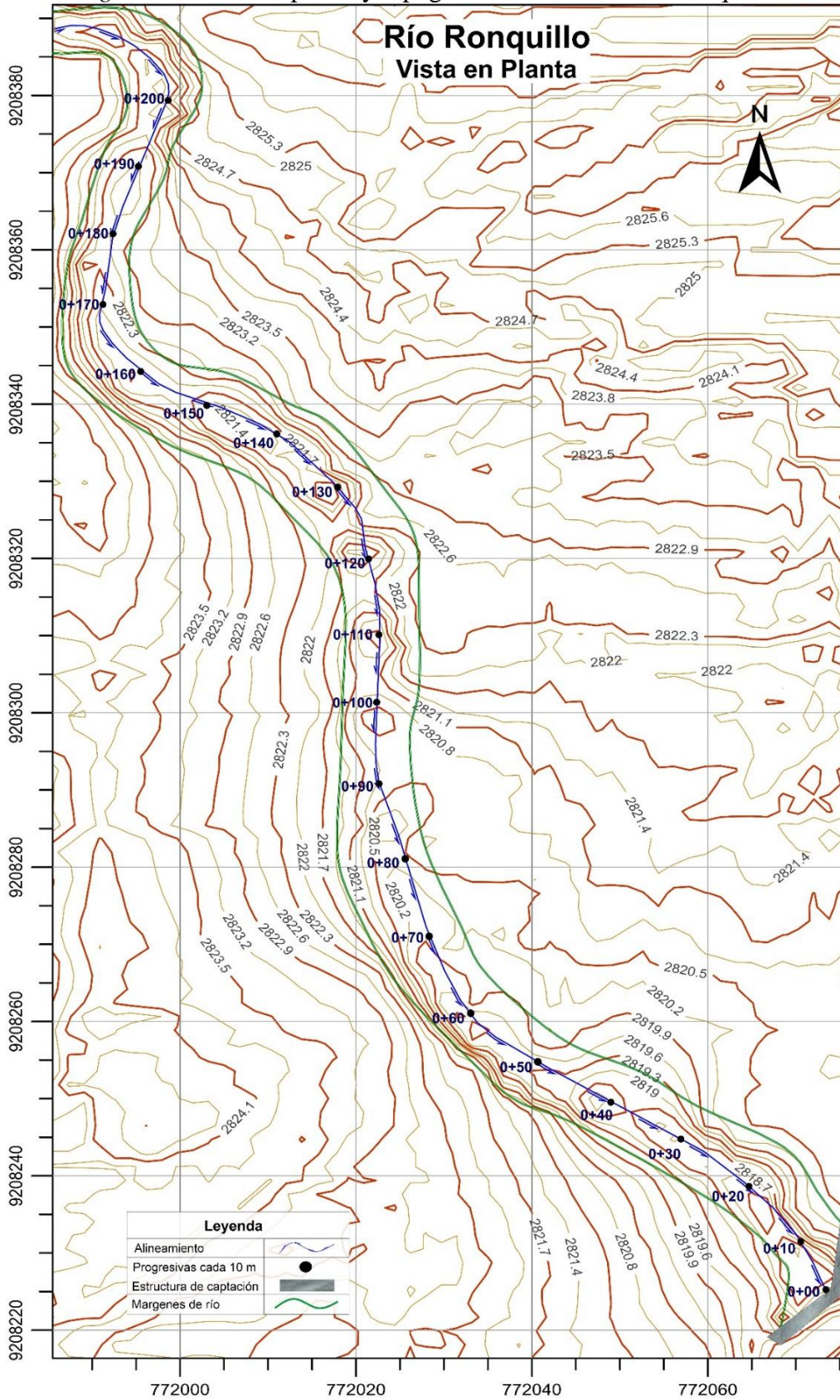
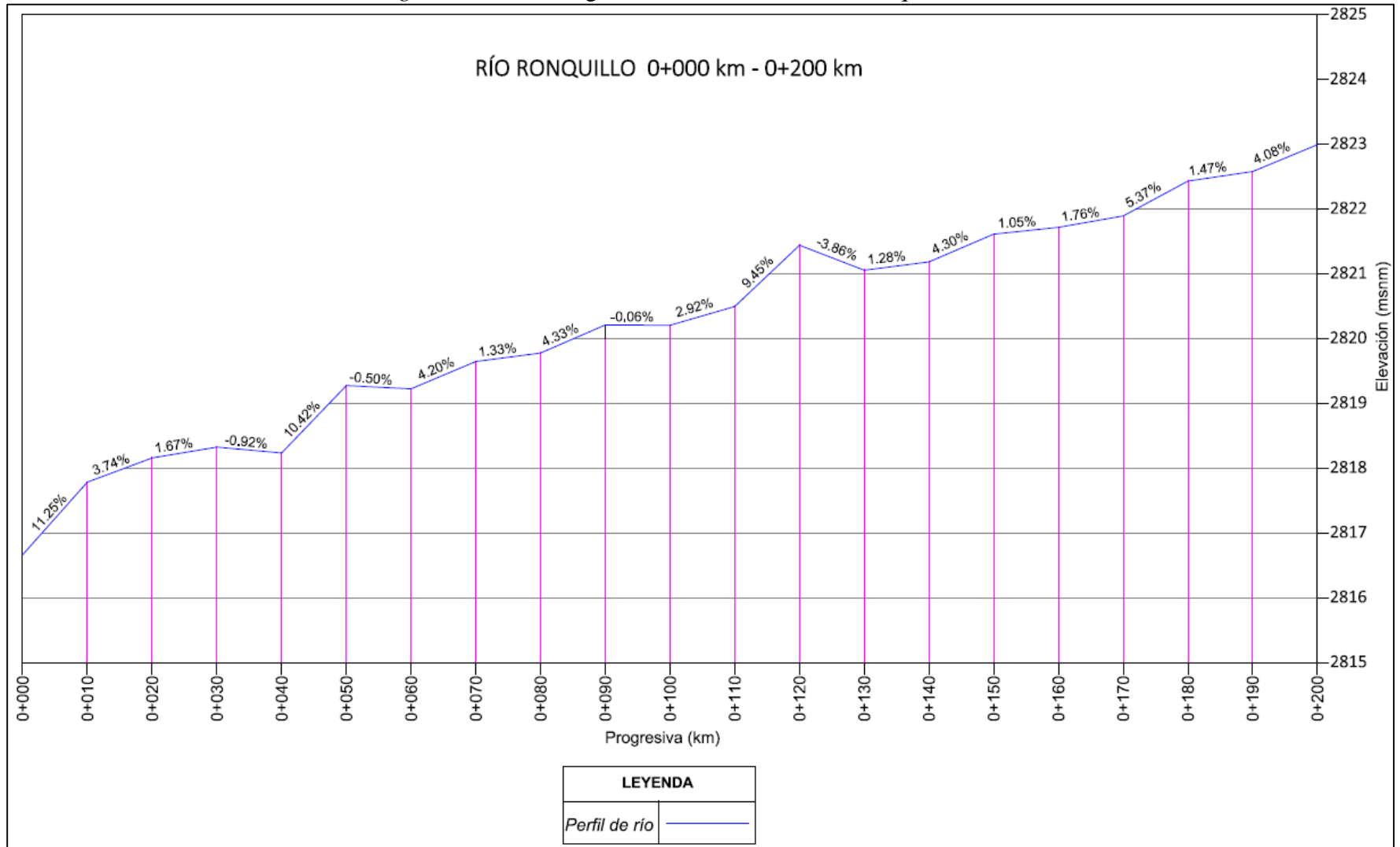


Figura 24. Perfil longitudinal del cauce del río Ronquillo



La figura 24 corresponde al perfil longitudinal de río Ronquillo realizado a partir del alineamiento mostrado en la Figura 26, el cual tiene un ancho promedio de 6.60 m, se presentan las progresivas cada 10 m en el eje “x” y las pendientes de tramos entre progresivas, además las cotas de elevación cada 1 metro en el eje “y”.

- **ANCHO PROMEDIO DE CAUCE.**

El cálculo de este parámetro se realizó analizando los perfiles transversales de cada progresiva obteniéndose un resultado de 6.60 m.

- **PENDIENTE PROMEDIO DEL CAUCE: PARA EL CÁLCULO DE ESTE PARÁMETRO SE UTILIZARON LOS SIGUIENTES CRITERIOS:**

Pendiente Uniforme.- El cual utiliza la siguiente fórmula.

$$Pendiente = \frac{H_{m\acute{a}x} - H_{m\grave{i}n}}{Longitud} \quad (34)$$

Donde:

*H<sub>máx</sub>*: Altura máxima.

*H<sub>mín</sub>*: Altura mínima.

*Longitud*: Longitud del tramo.

Utilizando este criterio se obtuvo una pendiente de 3.161 %.

Método de Taylor y Schwarz:

$$Sf = \left[ \frac{n}{\frac{1}{\sqrt{Sf1}} + \frac{1}{\sqrt{Sf2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{Sfn}}} \right]^2 \quad (35)$$

Donde:

$n$  = Número de intervalos iguales.

$S_{fn}$  = Pendiente en intervalo “ $n$ ”.

$S_f$  = Pendiente promedio total.

Utilizando este método se obtuvo una pendiente de 3.163 %

Promedio ponderado: Se realizó el promedio ponderado considerando las pendientes entre cada progresiva obteniéndose una pendiente de 3.162%.

Tabla 6. *Resumen de resultados para pendiente del cauce del río Ronquillo.*

<b>Método</b>	<b>Pendiente</b>
Pendiente uniforme	3.161 %
Método de Taylor y Schwarz	3.163 %
Promedio ponderado	3.162 %
<b>Pendiente promedio</b>	<b>3.162 %</b>

#### - **PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL RÍO.**

Para la obtención de los parámetros hidráulicos del río como son el área, perímetro mojado y tirante del agua, se utilizó el software HEC-RAS.

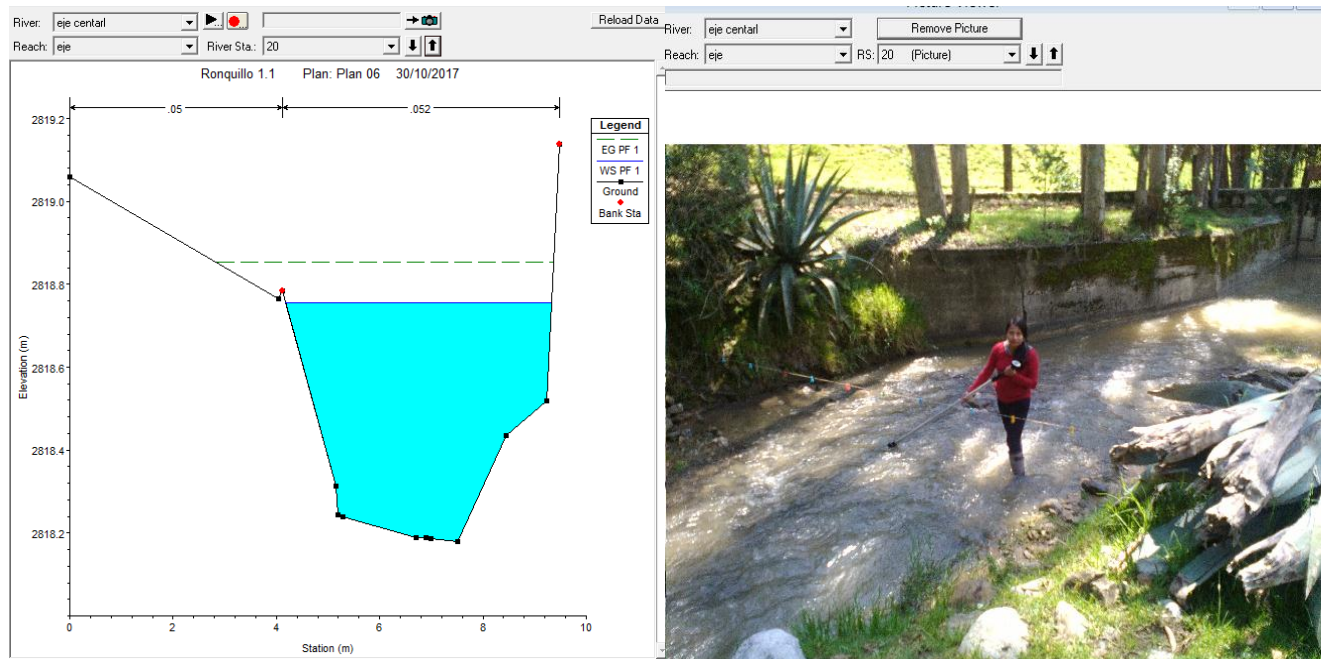
Como primer paso se realizó la importación de la información obtenida con el levantamiento topográfico, posteriormente se ingresó la información de los caudales medidos y de los que se requería obtener sus parámetros hidráulicos, para ello se ubicó la sección en donde se realizaron los aforos (sección de aforo).

La calibración de la información obtenida con hec-ras se obtuvo realizando ajustes con el coeficiente de rugosidad y comparando el tirante de agua obtenido observado en los aforos y el obtenido con el software.



Una vez realizada la calibración de la información, se ingresaron los caudales de los 4 eventos monitoreados y se obtuvieron sus respectivos parámetros.

Figura 25. Sección de control para obtención de parámetros hidráulicos en HecRas.



- **COEFICIENTE DE RUGOSIDAD (n).**

Se utilizó el método propuesto por Cowan (1956) con el cual se estimó un valor inicial del coeficiente de rugosidad, considerando los siguientes valores:

- $n_0$ : 0.028 (Material involucrado: Grava gruesa).
- $n_1$ : 0.01 (Grado de irregularidad de la superficie: Moderado)
- $n_2$ : 0.011 (Variación de la sección transversal: Frecuentemente alternante)
- $n_3$ : 0.010 (Efecto relativo de las obstrucciones: Menor)
- $n_4$ : 0.025 (Vegetación: Media)
- $n_5$ : 1 (Grado de efectos por meandros: Menor)

Aplicando la Ecuación de Cowan se obtuvo un coeficiente de rugosidad inicial de  $n=0.084$

Para calibrar el valor del coeficiente de manning se utilizó el programa HEC RAS, teniendo caudales medidos y simulados con la topografía del río se realizaron variaciones de coeficiente de manning, obteniéndose un coeficiente de rugosidad mostrado en la Tabla 7.

Tabla 7.  
*Coefficiente de rugosidad para cauce de río Ronquillo.*

<b>Coefficiente de rugosidad</b>
n= 0.052

**- GRANULOMETRÍA DE MATERIAL SUB-SUPERFICIAL DE LECHO DE RÍO RONQUILLO.**

Muestreo de sedimento sub-superficial.

El muestreo para este tipo de material se realizó utilizando el método volumétrico, este método es el más completo de todos y consiste en tomar del lecho un cierto volumen de material sub-superficial, con ese propósito se retira primero la capa superficial en un espesor comparable al tamaño de la mayor partícula observada en la superficie. El volumen que se toma a continuación debe ser representativo del material granular del cauce, para lo cual debe seguirse el criterio de la mayor partícula observada la cual no represente más del 1% en peso total de la muestra utilizando la siguiente fórmula (Vide, 2007).

$$P = D_{m\acute{a}x} * 10 \quad (36)$$

Donde:

P: Peso a extraer en (Kg.)

$D_{m\acute{a}x}$ : Diámetro máximo observado (cm)

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se observó que el diámetro mayor fue de 47 cm aproximadamente, lo cual nos indica que se deben extraer 470 Kg del lecho sub-superficial.

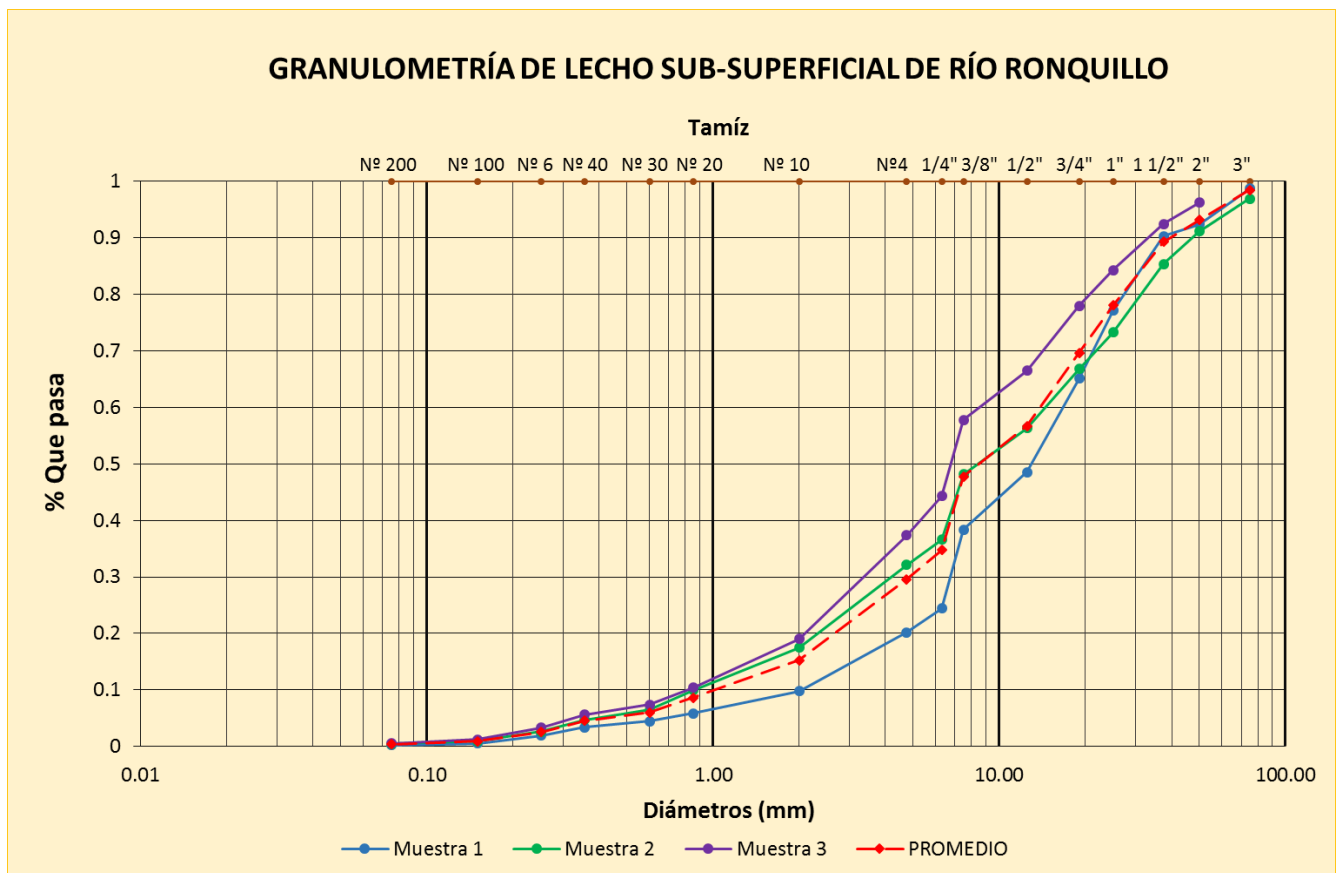
Para la presente tesis se ubicaron 3 puntos de muestreo a lo largo de los 200 m del río Ronquillo para la cual se realizó su respectiva curva granulométrica.

Análisis granulométrico de muestras extraídas de lecho sub-superficial.

El método utilizado para este análisis fue el de tamizado, se utilizaron los tamices recomendados por la Norma ASTM D-422.

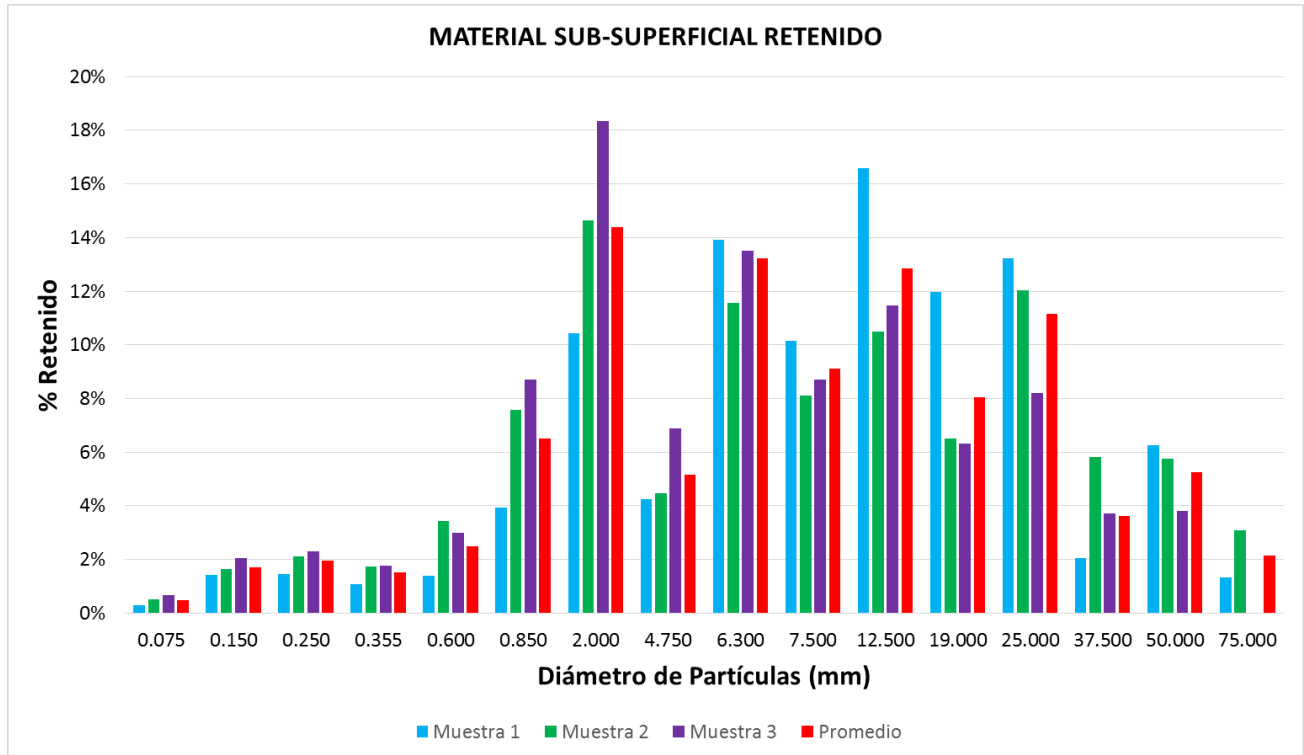
Se obtuvieron 3 curvas granulométricas (una por punto de muestreo), a partir de ellas se ha trazado una curva promedio a partir de la cual se obtuvo los datos utilizados en las fórmulas empíricas.

Figura 26. Curvas granulométricas de lecho sub - superficial de río Ronquillo.



Para el análisis del material extraído del cauce del río Ronquillo, se utilizaron los tamices desde el de 3” hasta el tamiz N° 200 como se observa en el eje secundario “x”.

*Figura 27. Porcentaje de material retenido (%) sub – superficial para cada punto de muestreo, respecto a su diámetro (mm).*



En la figura 28 se muestra el material gravoso (diámetro mayor a 2 mm), observándose la predominancia de los diámetros desde 2 mm hasta los 25 mm, y en un menor porcentaje grava de diámetro mayor a 37.5 mm. Respecto a las arenas, existe la mayor predominancia de arenas de diámetro de 0.850 mm y en un menor porcentaje de arenas menores a 0.355 mm.

Tabla 8.  
*Porcentaje de material del cauce.*

Material	Porcentaje
Finos	0.40%
Arenas	37.90%
Suelo Gravoso	

Tabla 9.  
*Clasificación del material del lecho del río Ronquillo.*

<b>Coefficiente</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
C. Uniformidad	Cu	13.002
C. Curvatura	Cc	1.542

Suelo Bien Gradado  
**Grava Bien Gradada con Arena**

El análisis nos da como resultado que el lecho del río Ronquillo es un lecho gravoso con arenas y material bien gradado. Predominan en mayor cantidad las gravas con diámetros desde 2 mm hasta los 25 mm y en un menor porcentaje las gravas de diámetro mayor a 37.5 mm. Respecto a las arenas, existe la mayor predominancia de arenas de diámetro de 0.850 mm y en un menor porcentaje de arenas menores a 0.355 mm.

De la curva granulométrica promedio se obtuvo los siguientes diámetros característicos y desviación estándar:

Tabla 10.  
*Diámetros característicos de material del lecho sub - superficial del río Ronquillo.*

<b>Diámetros característicos</b>		<b>Valor</b>
D <sub>16</sub>	16%	2.1 mm
D <sub>50</sub>	50%	8.8 mm
D <sub>84</sub>	84%	31.6 mm
D <sub>90</sub>	90%	39.8 mm
D <sub>m</sub>		10.95 mm

### Densidad y peso específico:

Para determinar la densidad del material fino y grueso (material que pasa la malla número 4 y el material que se retiene en la malla número 4 respectivamente) se realizó tomando en cuenta los procedimientos recomendados en la norma ASTM C 127, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 11.

*Densidad y peso específico del material del lecho del río Ronquillo.*

<b>Densidad y Peso Específico de material</b>	
Densidad del material	$\rho_s = 2,529.25 \text{ Kg/m}^3$
Peso específico promedio del materia	$\gamma_s = 24,811.99 \text{ N/m}^3$

#### - **Material superficial de lecho del río Ronquillo.**

### Muestreo de sedimento superficial.

Para el muestreo del material superficial se utilizó el método fotográfico (RAMÍREZ, C. et al., 2011), el cual es uno de los métodos utilizados cuando el material presente corresponde a diámetros muy grandes y se hace complicado su traslado hacia el laboratorio.

Para ello se utilizó un marco cuadrado de 1 m x 1 m de lados, el método consiste en relacionar el área total ocupada por un material de un tamaño pre-establecido al área total del muestreo (RAMÍREZ, C. et al., 2011). Para este muestreo se realizaron 6 puntos de muestreo, seleccionando solo 4 de ellos considerando que eran los más representativos (Figura 28).



Figura 28. Cuatro puntos de muestreo seleccionados en el lecho superficial del río Ronquillo



(a)



(b)



(c)



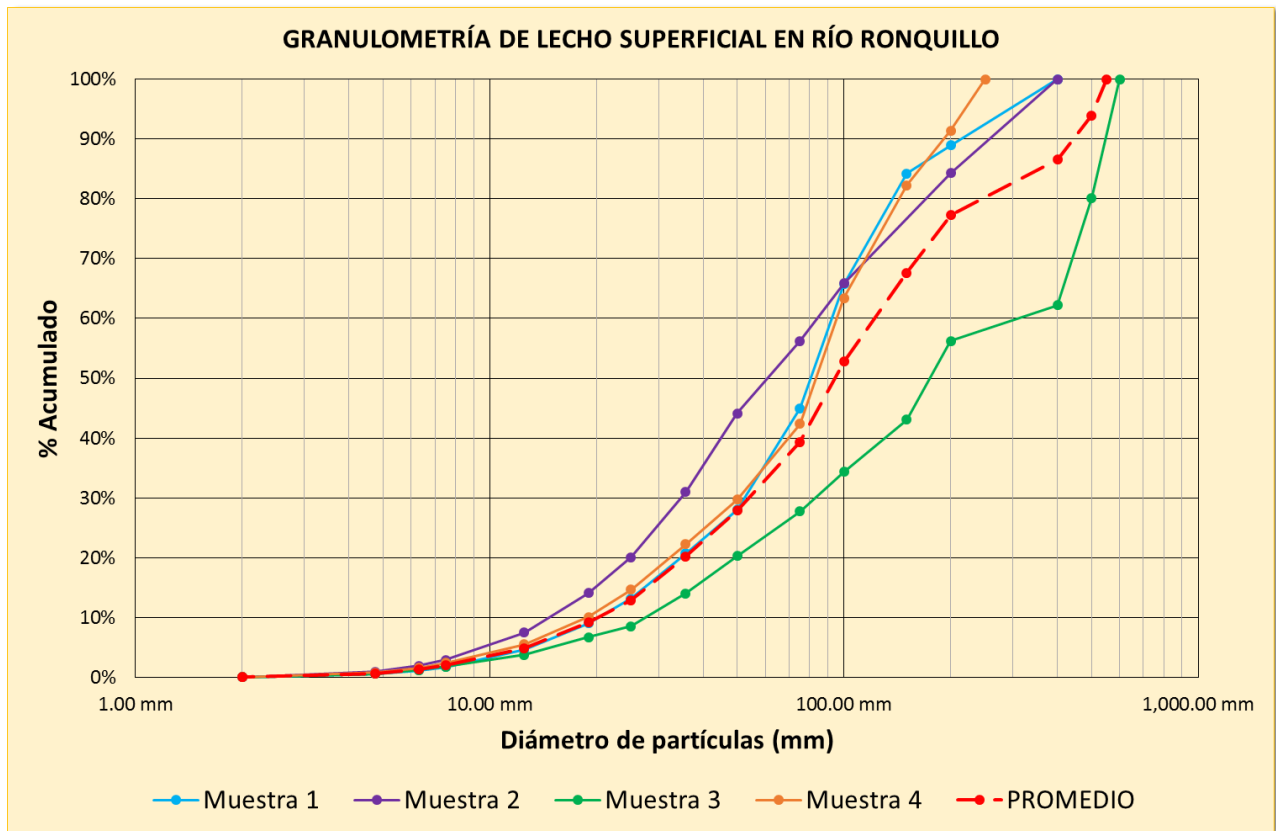
(d)

Las figuras (a), (b), (c) y (d) corresponden a los puntos de muestreo seleccionados de los 6 realizados a los cuales llamaremos punto de muestreo 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

Análisis granulométrico del material del lecho superficial.

Para la clasificación de este tipo de material se consideraron los siguientes diámetros: menores 4.75 mm, 6.30 mm, 7.50 mm, 12.50 mm, 19.00 mm, 25 mm, 35.70 mm, 50 mm, 75 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm, 400 mm y mayores a 500 mm. Después del cálculo de las áreas del material analizado se obtuvo los siguientes resultados.

Figura 29. Curvas granulométricas de lecho superficial de río Ronquillo.



Se observa que el punto de muestreo 3 presenta mayor tamaño de diámetros mientras que los puntos 1,2 y 5 tienen diámetros parecidos.

En la Figura 29 la línea entre cortada representa la curva promedio a partir de la cual se obtuvieron los diámetros característicos del lecho superficial.



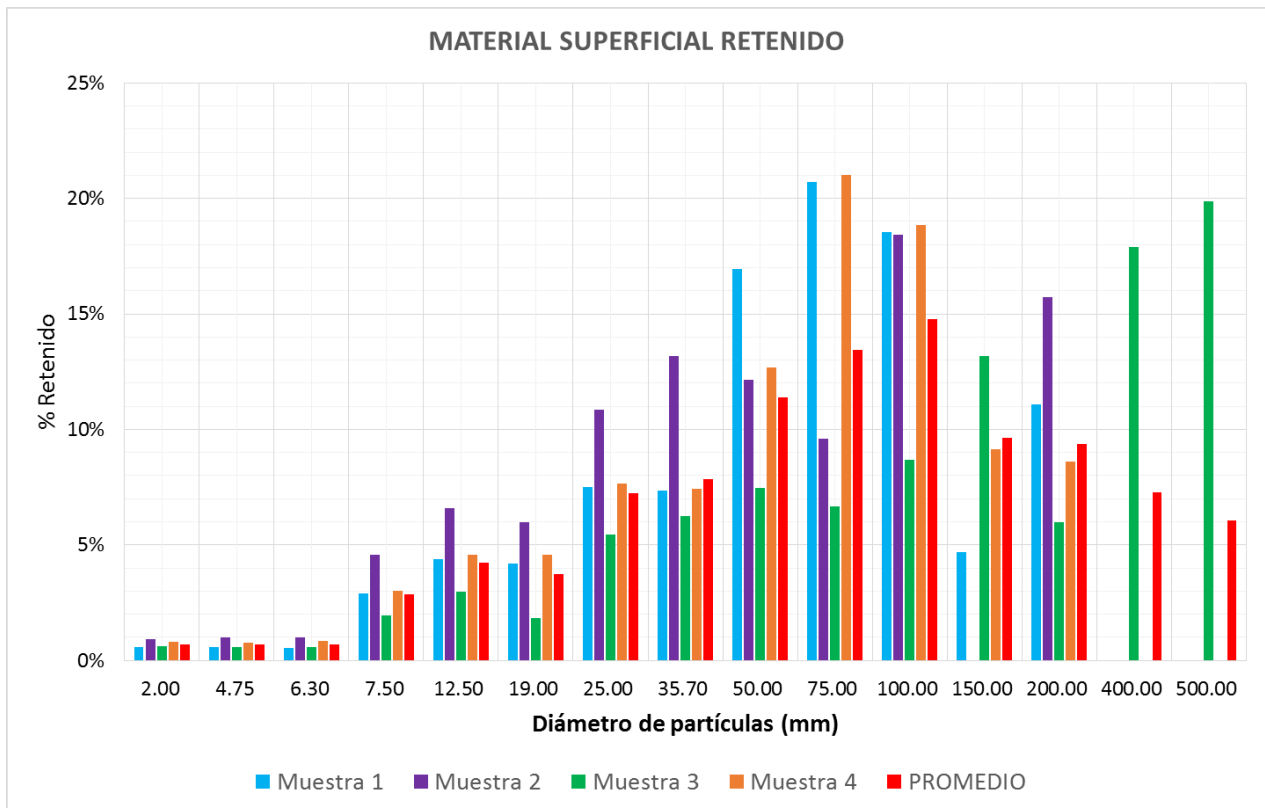
Tabla 12.

*Diámetros característicos de material superficial del lecho del río Ronquillo.*

Diámetros característicos		Valor
D <sub>10</sub>	10%	20.34 mm
D <sub>16</sub>	16%	29.59 mm
D <sub>50</sub>	50%	94.73 mm
D <sub>84</sub>	84%	343.84 mm
D <sub>90</sub>	90%	446.22 mm
D <sub>m</sub>		129.48 mm

Se observa que el diámetro promedio del material del lecho superficial de lecho es de 130 mm aproximadamente.

*Figura 30. Material retenido (%) en cada punto de muestreo del material lecho superficial*



En la Figura 31 se observa que el material predominante en el lecho superficial del río varía entre los 35 mm hasta los 150 mm, es por ello que para este tipo de sedimento se seleccionó el método fotográfico el cual nos permitió realizar su clasificación.

Una vez obtenida la información mediante los trabajos de campo y de gabinete se procedió a la aplicación de las fórmulas empíricas para la estimación del sedimento de fondo.

- **ESTIMACIÓN DE VOLUMEN DE SEDIMENTO ACUMULADO.**

Como primer paso se estimaron los caudales sólidos para cada uno de los cuatro eventos utilizando las siguientes fórmulas:

- Sub-sustrato basado en la ecuación de Parker, Klingteman y McLean 1982 (P-K-Mc).
- Smart y Jaeggi 1983 (S-J).
- Bathurst (1987).
- Meyer –Peter y Muller (M-P-M).

Tabla 13.

*Fórmulas utilizadas para la estimación del volumen de sedimento acumulado.*

<b>FÓRMULA</b>	<b>SIGLAS</b>	<b>DIÁMETROS</b>	<b>RESTRICCIONES</b>
Sub-sustrato basado en la ecuación de Parker, Klingteman y McLean 1982	P-K-Mc	$D_{50sub}$	Adecuado para pequeñas y medianos canales que tienen tamaños de partícula entre 0,6 a 102 mm, con pendientes medias
Smart y Jaeggi 1983	S-J	$D_{90sub}$ , $D_{30sub}$	Válida para diámetros mayores a 0.4 mm y pendientes entre 0.4% y 20%
Bathurst 1987	Bathurst	$D_{50sub}$ ó $D_{16sup}$	Válida para pendientes desde 0.4% hasta 4% y cumple la condición $0.3 \leq d/D_{84} \leq 50$
Meyer –Peter y Muller	M-P-M	$D_m$ , $D_{90sup}$	Válida para diámetro medio entre 0.4 y 30 mm

Donde:

$D_{50sub}$ : Diámetro 50 del material sub - superficial.

$D_{30sub}$ : Diámetro 30 del material sub- superficial.

$D_{90sub}$ : Diámetro 90 del material sub - superficial.

$D_{16sup}$ : Diámetro 16 del material superficial.

$D_{90sup}$ : Diámetro 90 del material superficial.

$D_m$ : Diámetro media del material sub - superficial.

Posteriormente se estimaron los volúmenes utilizando la Ecuación 29 y se procedió a corregir el volumen obtenido por porosidad utilizando la Ecuación 31.

Para estimar la porosidad del material se realizó en campo 3 puntos de muestreo a partir de los cuales se obtuvo un valor promedio correspondiente al 30%, el cual se utilizó para realizar la corrección por porosidad como se mencionó en el párrafo anterior.

#### **d. SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN.**

### **MONITOREO**

Se realizó utilizando el protocolo del proyecto SO HYBAM ("Geodynamical, hydrological and biogeochemical control of erosion/alteration and material transport in the Amazon, Orinoco and Congo basins")

Para el monitoreo de sedimento en suspensión se utilizaron botellas de plástico de medio litro, a las cuales se las etiquetó con el nombre de la estación, nivel de agua, hora y fecha en que se tomaron del río.

El monitoreo se realizó en todos los puntos en donde están ubicadas la estación hidrométrica Ronquillo, el trabajo de muestreo fue realizado por cada observador designado y debidamente capacitado.

### **PROCESAMIENTO DE MUESTRAS**

Al igual que para el monitoreo de sedimentos en suspensión, para el procesamiento de las muestras también se utilizó el protocolo del proyecto SO HYBAM, el cual cuenta con un laboratorio debidamente equipado para el procesamiento de este tipo de muestras

El procedimiento realizado en laboratorio se describe a continuación:

- Pesado de la botella más contenido de sedimentos y líquido (muestra extraída en campo); la densidad del líquido se considera 1 ml/g, entonces convertimos el peso a volumen.
- Se preparó el equipo de filtrado (embudos y bomba de vacío), en el cual se colocó un filtro de celulosa de 45 $\mu$ m de porosidad previamente pesado en la balanza analítica.
- Colocamos el contenido de la botella en los embudos de filtración para obtener solo el sedimento retenido en el filtro de celulosa.

- Luego de terminar el filtrado, se pesa la botella vacía y el filtro con sedimentos se coloca a la estufa a una temperatura de 70 °C, por 24 horas.
- Una vez seco el filtro y sedimento, se pesó en la balanza analítica, después de ello se realiza el inventariado de los filtros para obtener las concentraciones de sedimentos en gramos por litro (g/l ó mg/l).

### **ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIONES DE SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN**

El método que se aplicó es el de “Curva de gasto”, en este método se deriva una relación entre los valores de concentración y el caudal del río en el momento del muestreo por una transformada logarítmica y regresión de mínimos cuadrados (WALLING, D. & WEBB, B. 1981, 1988; WEBB, B. et al., 1997).

$$C = aQ^b \quad (37)$$

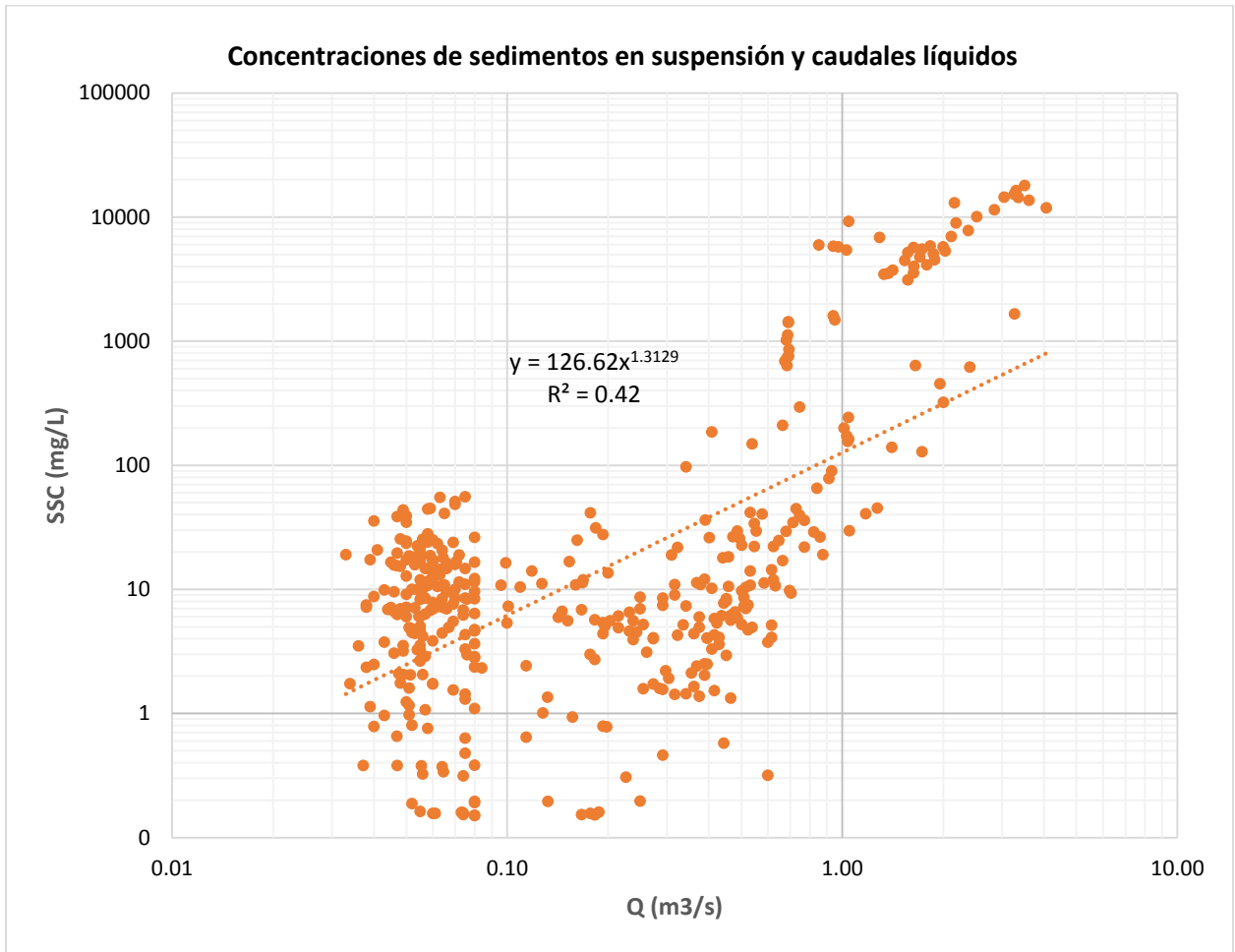
C: Valor instantáneo estimado de la concentración.

Q: Descargas instantáneas asociada con C.

“a, b”: Son coeficientes que describen la relación única entre la descarga y la concentración de sedimentos para cada sección transversal del río.

A partir de este método se han desarrollado diversas variantes que consisten básicamente en el agrupamiento de los datos teniendo en cuenta la estación, año, meses, etc.

Figura 31. Concentraciones de sedimentos en suspensión (SSC) y caudales líquidos (Q) medidos en la estación Ronquillo.



Al analizar las concentraciones de sedimentos en suspensión versus los caudales líquidos se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.42 con un coeficiente  $a=126.62$  y  $b=1.3129$ .

## IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. CARTOGRAFÍA

La cuenca en estudio tiene un área correspondiente a 41.7 km<sup>2</sup>, con una variación de alturas desde los 3508 msnm hasta los 3986 msnm, tiene una pendiente de laderas promedio de 29% y la pendiente promedio del cauce del río Ronquillo corresponde es de 3.2%.

Tabla 14.

*Principales parámetros geomorfológicos de la cuenca Ronquillo.*

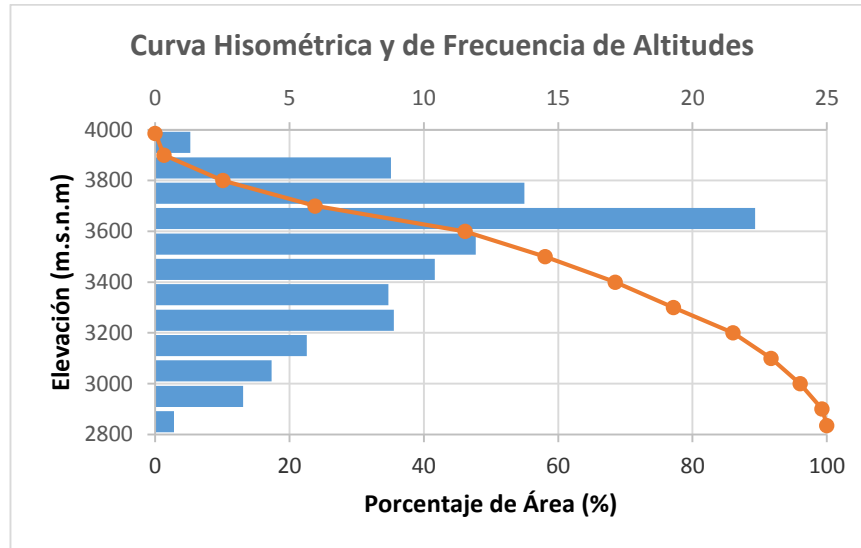
<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
Área de la cuenca, Km <sup>2</sup>	41.7
Perímetro de la cuenca, Km	34.5
Pendiente promedio de la cuenca, %	29.0
Elevación máxima, msnm	3986.0
Elevación media, msnm	3508.0
Elevación mínima, msnm	2835.0
Tiempo de concentración, mín	235.0
Longitud del máximo recorrido, Km	13.2
Pendiente media del río ubicado aguas arriba de la captación, %	3.2
Precipitación anual, mm	1280
Descarga máxima medida, m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	33.7
Descarga media medida, m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	0.2
Descarga mínima medida, m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	0.1

- Según la pendiente media de la cuenca y tomando como referencia los valores de la Tabla 2, podemos definirla como una cuenca con relieve accidentado.
- Según la pendiente del cauce de río ubicado aguas arriba de la captación Ronquillo y tomando en cuenta que los ríos de montaña que tienen gradientes longitudinales que

oscilan entre 0.1% y 20% (PAPANICOLAOU, A. et al., 2004), se puede considerar al río Ronquillo como un río de montaña.

Se presenta a continuación la curva hipsométrica y la curva de frecuencia de altitudes correspondientes a la cuenca del río Ronquillo.

Figura 32. Curva hipsométrica y de frecuencia de altitudes de la cuenca Ronquillo.



- Según la frecuencia de altitudes se observa que el área de mayor predominancia es la correspondiente a 3600 msnm y la de menor predominancia es la de 2800 msnm.
- La curva hipsométrica presentada es una curva sinusoidal, según este tipo de curva se puede interpretar y caracterizar a la cuenca como una cuenca que se encuentra en equilibrio y se encuentra en fase de madures.

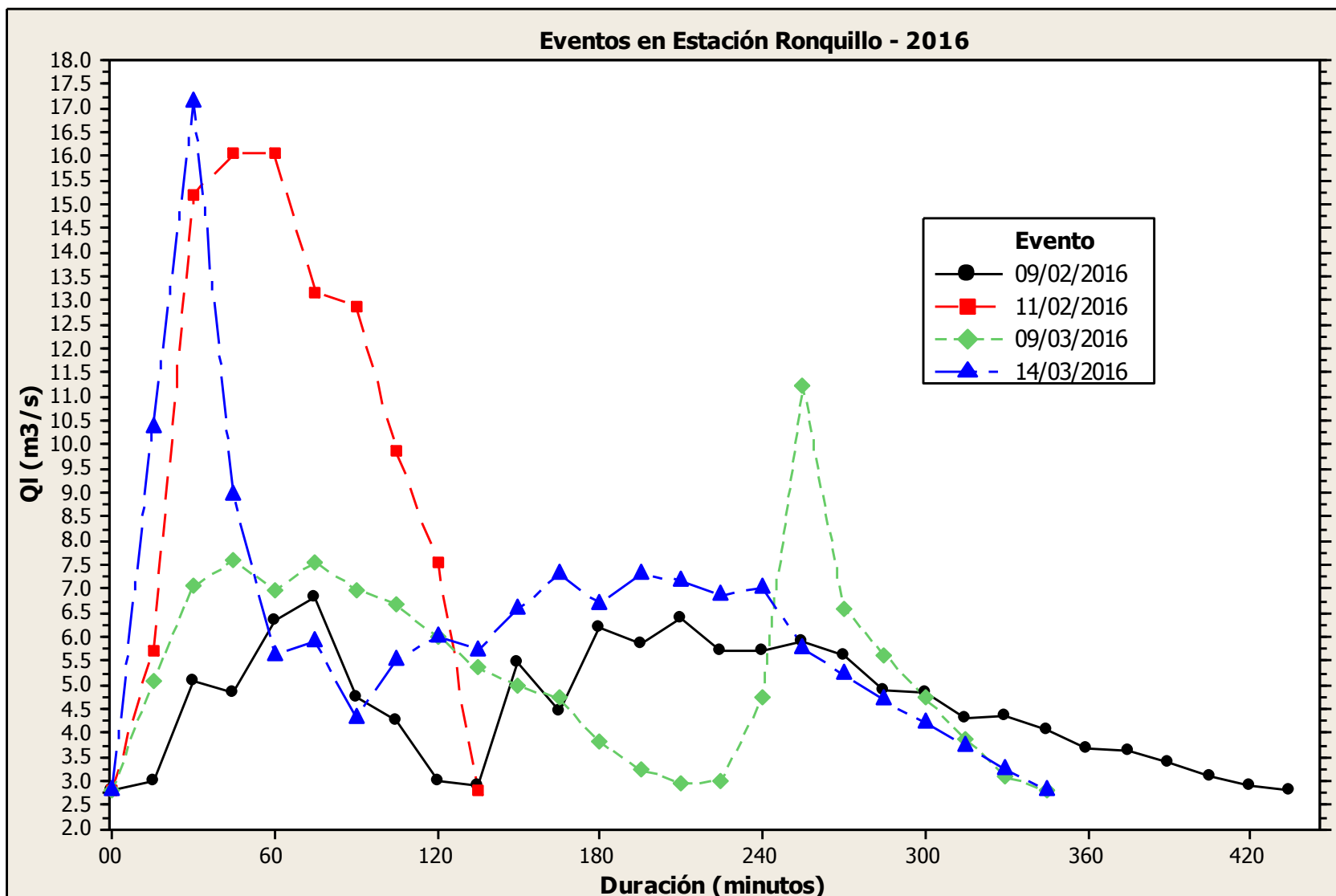
## 4.2. INFORMACIÓN HIDROLÓGICA Y SEDIMENTOLÓGICA

### a. CAUDALES LÍQUIDOS.

Los 4 eventos monitoreados son considerados como eventos extremos en el año 2016, ya que lograron llenar el vaso de la presa (totalizador) con el sedimento transportado durante su ocurrencia.



Figura 33. Eventos de caudales extremos que llenaron el barraje.



De los cuatro eventos presentados se observa que los que ocurrieron en las fechas de 11/02/16 y 14/03/16 presentan los picos más altos, mientras los ocurridos el 09/02/16 y 09/03/16 presentan picos menores y comportamientos similares.

#### **b. VOLÚMENES DE SEDIMENTOS MEDIDOS EN CAMPO.**

La capacidad de almacenamiento del vaso de la presa formada por el barraje en el cual se consideró hasta 16 m aguas arriba del mismo corresponde a  $68.2 \text{ m}^3$ , ellos se obtuvo gracias a las batimetrías realizadas durante las campañas de campo.

#### **c. CONCENTRACIONES DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN.**

Conocer los aportes de sedimentos en suspensión de la cuenca obteniendo una relación entre las concentraciones de sedimentos en suspensión y los caudales líquidos es un gran aporte, es un gran reto, debido a la aleatoriedad de las variables involucradas. Sin embargo en la cuenca Ronquillo se han obtenido los primeros resultados del monitoreo puntual en la estación Ronquillo.

La Figura 34 muestra la variación de las concentraciones monitoreadas respecto a los caudales líquidos medidos en el mismo instante del muestreo. El periodo de monitoreo de los meses febrero, marzo, abril y mayo presentó mayor variabilidad de las concentraciones de sedimentos en suspensión respecto a los caudales líquidos, mientras que en los meses restantes se puede decir que la variación entre ambas variables siguen tendencias similares.

Para analizar la curva de gasto entre las concentraciones de sedimentos en suspensión y caudales líquidos (Figura 35), se separaron en dos grupos, siendo el límite caudales “Q” iguales a  $0.10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Figura 34. Serie temporal de concentraciones de sedimentos Vs. Caudales líquidos en la estación Ronquillo.

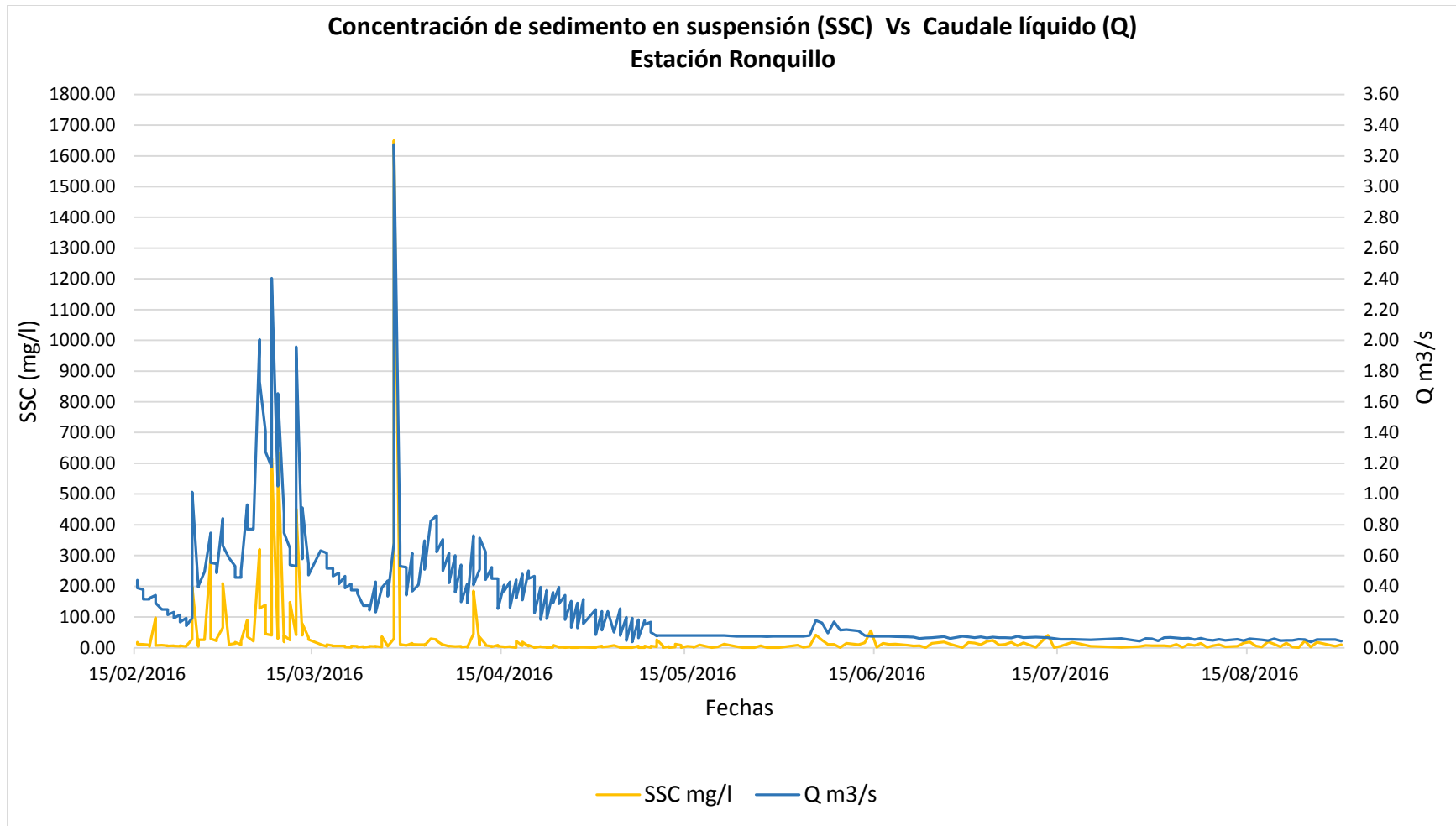
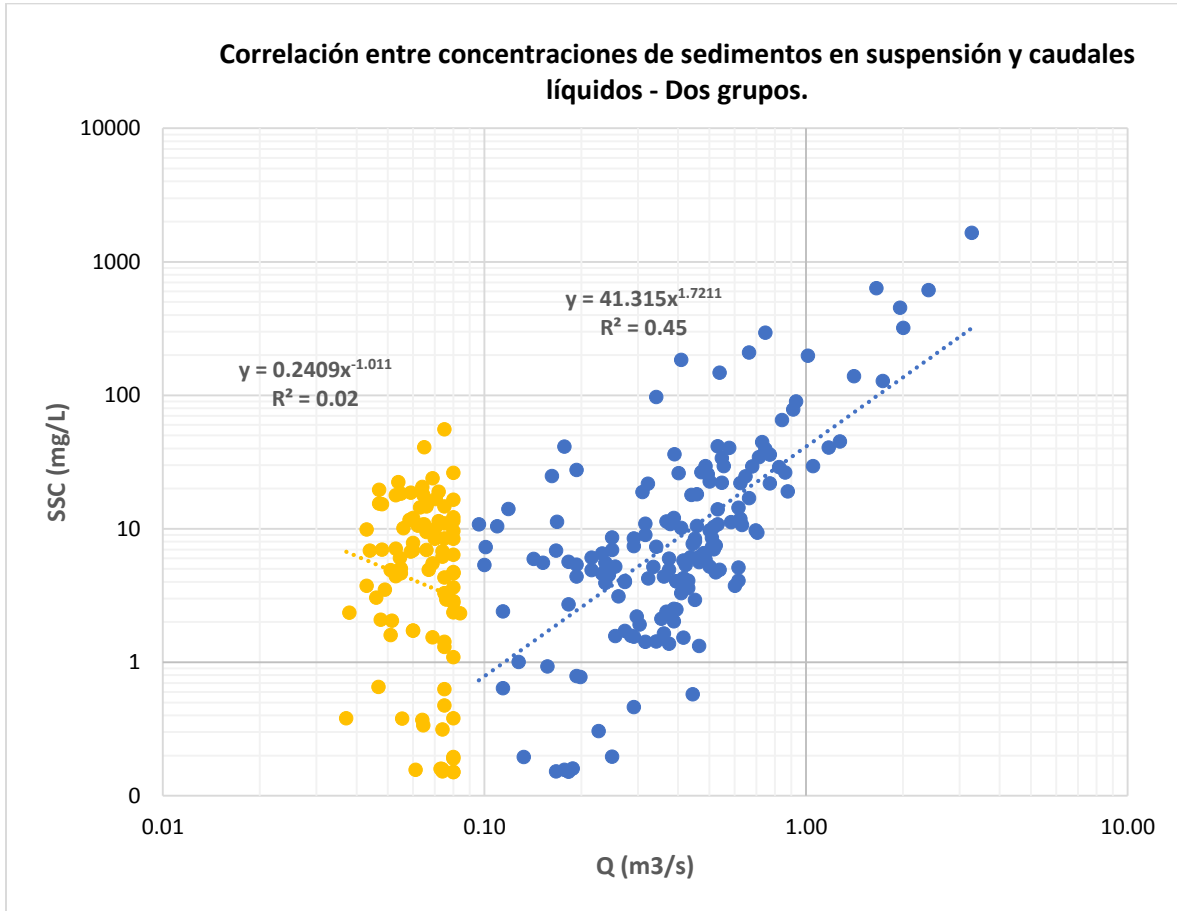


Figura 35. Correlación entre concentraciones de sedimentos en suspensión (SSC) y caudales líquidos (Q) medidos en la estación Ronquillo.



Para los caudales iguales o mayores a  $0.10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  se presenta un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.45$  con coeficientes  $a = 41,315$  y  $b = 1,72$ ; el coeficiente “a” es la constante de la ecuación, mientras que “b” representa la intensidad de las fuerzas erosivas, para el presente caso el exponente “b” es mayor que 1, ello indica que las concentraciones crecen cuando las descargas se incrementan (efecto de purga).

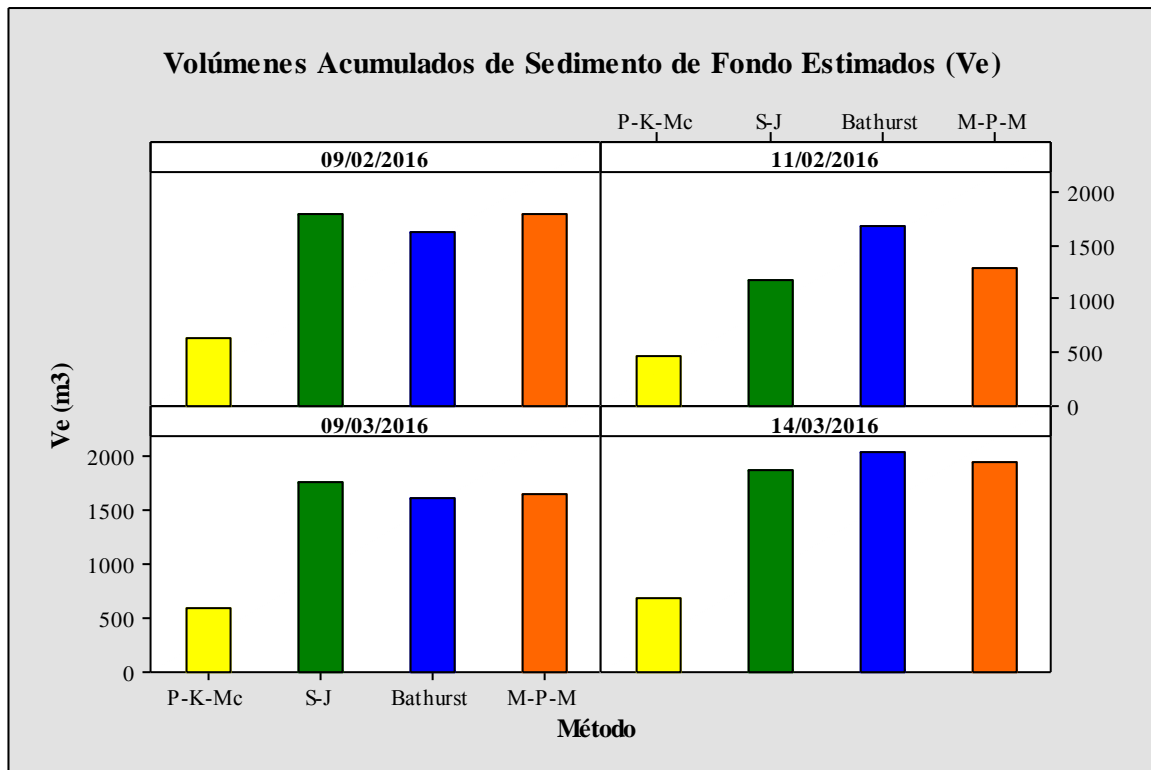
En el grupo correspondiente a caudales menores a  $0.10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , el coeficiente de determinación es muy bajo, esto se debe a la dispersión de la información obtenida y el coeficiente es negativo, ello significa que se está produciendo un efecto de conservación, ya que las

concentraciones decrecen rápido con el incremento en la descarga, por lo tanto el transporte declina cuando la descarga aumenta.

#### 4.3. ESTIMACIÓN DE VOLÚMENES DE SEDIMENTO UTILIZANDO FÓRMULAS EMPIRICAS.

Los volúmenes obtenidos utilizando las fórmulas empíricas para cada evento de crecida se pueden observar en la Figura 36.

Figura 36. Volumen de sedimento acumulado ( $m^3$ ) para cada evento de crecida utilizando las fórmulas empíricas.



Los resultados obtenidos muestran que la formula con la que se obtienen los valores más bajos de volúmenes de sedimentos en los cuatro eventos monitoreados es la de P-K-Mc “Substrato basado en la ecuación de Parker, Klingteman y McLean”.

En cuanto a las fórmulas con la que se estimó los valores más altos, varían de acuerdo al evento. Se presentan 2 grupos bien marcados, para los eventos ocurridos el 9 de febrero y 9 de marzo los volúmenes estimados más altos corresponden a las fórmulas de S-J (Smart y Jaeggi) y M-P-M (Meyer Peter y Muller), mientras que en los eventos ocurridos el 11 de febrero y 14 de marzo, los valores más altos se obtuvieron con la fórmula de Bathurst.

La variación de resultados obtenidos con cada fórmula se debe a que los eventos monitoreados son distintos (caudales, tiempo de duración), lo que nos permite observar la sensibilidad de cada fórmula aplicada.

#### 4.4. COMPARACIÓN DE VOLÚMENES ESTIMADOS CON LOS MEDIDOS EN CAMPO.

Los valores de los volúmenes acumulados obtenidos tanto estimados como observados, muestras en la Tabla 15, a partir de ella se aprecia la gran variabilidad de los resultados obtenidos mediante fórmulas empíricas respecto al valor medido en campo.

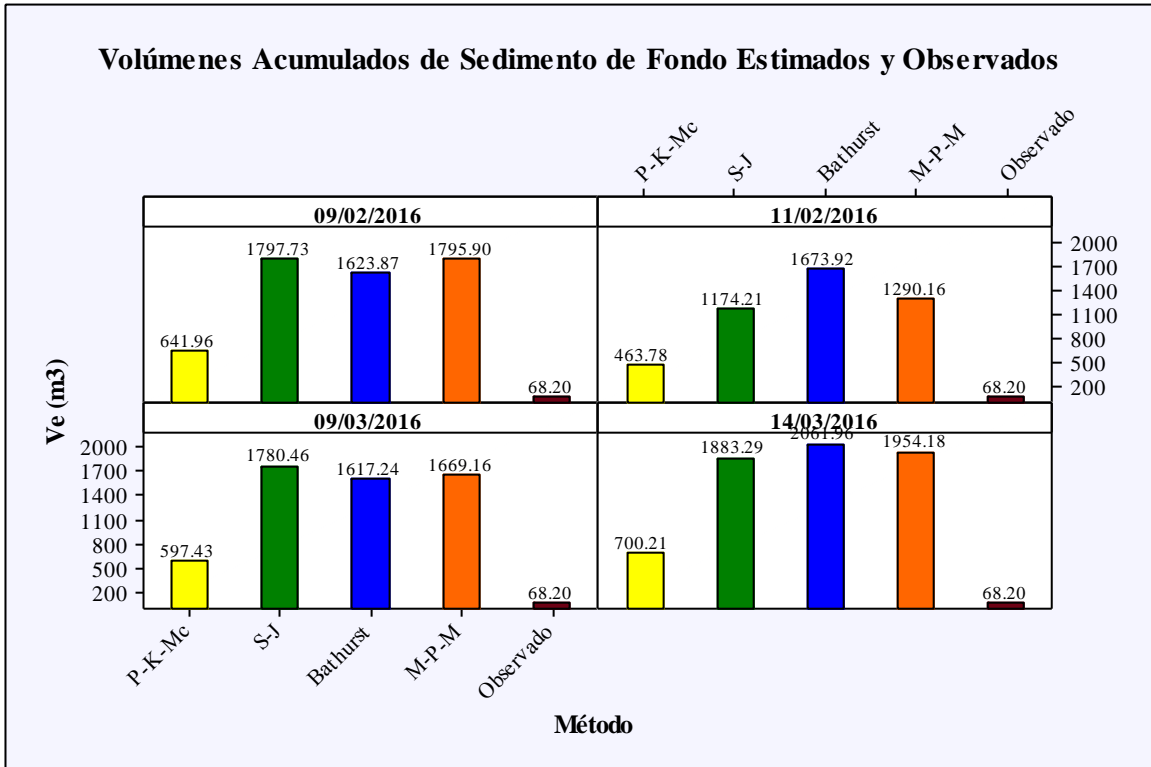
Tabla 15.

*Tabla comparativa de volúmenes acumulados de sedimentos de fondo estimados Vs volúmenes observados.*

Evento Método	Volumen de Sedimento de fondo m <sup>3</sup>			
	09/02/2016	11/02/2016	09/03/2016	14/03/2016
<b>P-K-Mc</b>	641.96	463.78	597.43	700.21
<b>S-J</b>	1797.73	1174.21	1780.46	1883.29
<b>Bathurst</b>	1623.87	1673.92	1617.24	2061.96
<b>M-P-M</b>	1795.90	1290.16	1669.16	1954.18
<b>Observado</b>	68.20	68.20	68.20	68.20

Gráficamente (Figura 37) se aprecia que para los eventos monitoreados las fórmulas están sobre-estimando los volúmenes reales.

Figura 37. Volúmenes acumulados de sedimentos de fondo Estimados y Observados.



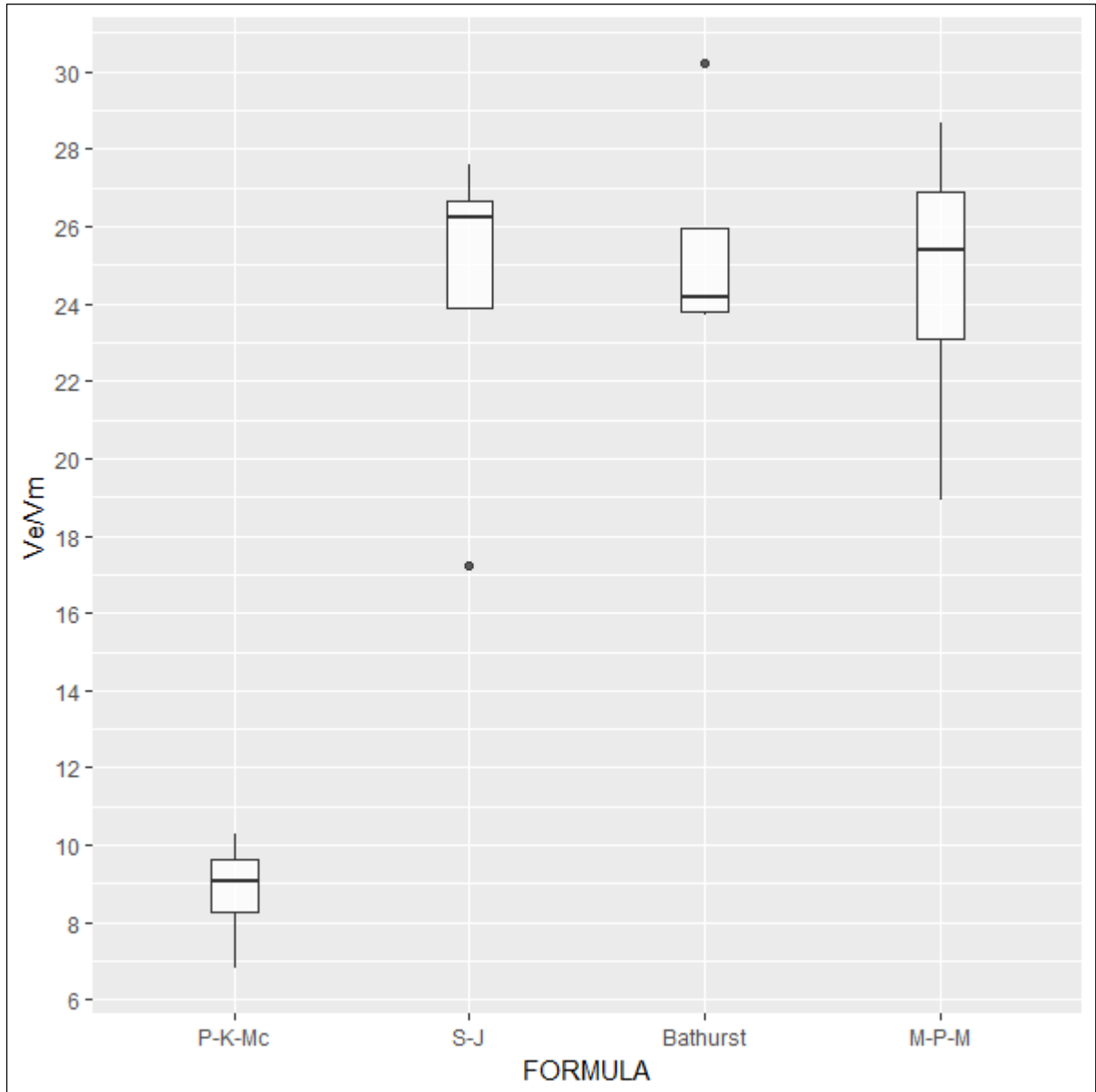
Para poder estimar cuanto es la cantidad que sobre estima cada fórmula empírica se analizó los coeficientes de proporcionalidad para cada una de las 4 fórmulas (Figura 38).

La fórmula empírica que sobre estima en menor cantidad al volumen de sedimento de fondo observado corresponde a la fórmula de P-K-Mc “Sub-sustrato basado en la ecuación de Parker, Klingteman y McLean”, con una mediana de 9.1, es decir que esta fórmula está estimando 9.1 veces el volumen de sedimento de fondo observado.

En las fórmulas de S-J (Smart y Jaeggi) y Bathurst se están presentando valores extremos, ello representa la sensibilidad de estas fórmulas en cuanto a la variación de caudales (caudales extremos y duración del evento).

La fórmula de M-P-M (Meyer Peter y Muller), presenta una mediana de 26.3 veces la sobre-estimación del sedimento de fondo y una amplia distribución de los valores obtenidos

Figura 38. Coeficiente de proporcionalidad entre volumen estimado (Ve) y volumen medido en campo (Vm).



Valor	P-K-Mc	S-J	Bathurst	M-P-M
Mediana	9.1	26.2	24.1	26.3



## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 5.1. CONCLUSIONES.

- La cuenca ronquillo tiene un área de  $41.7 \text{ km}^2$ , con una variación de alturas desde los 2835 msnm hasta los 3986 msnm, la pendiente de laderas promedio es de 27.92% y pendiente promedio del tramos del cauce del río Ronquillo seleccionado es de 3.16%. Por la magnitud de la pendiente promedio del río, este es considerado como un río de montaña y según la pendiente promedio de ladera se considera que es una cuenca con relieve accidentado.
- Para el sedimento de fondo se monitorearon 4 eventos de crecidas que lograron llenar el vaso de la presa que tiene una capacidad de almacenamiento de  $68.2 \text{ m}^3$ . El sedimento en suspensión monitoreado presentó 2 grupos con tendencias diferentes, el primer grupo con caudales menores a  $0.10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  cuyo coeficiente de determinación no fue significativo, mientras que para el grupo 2 se obtuvo un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.45$  y exponente  $b = 1,7$  que por ser mayor a 1, este nos indica que que las concentraciones crecen cuando las descargas se incrementan.
- La estimación se vio influenciada por el tiempo de duración y caudales de cada evento, obteniéndose siempre los valores más bajos con la fórmula de Parker, Klingteman y McLean 1982 (P-K-Mc), mientras que para los volúmenes más altos estimados no se obtuvo una única fórmula, ya que los resultados variaron según el tiempo de duración y caudales del evento.
- La comparación de los volúmenes de sedimento de fondo estimados con el observado, permitió observar que todas las fórmulas están sobre estimando el sedimento de fondo real, siendo la que en menor cantidad sobrestima la fórmula de Parker, Klingteman y McLean 1982 (P-K-Mc), con una mediana de 9.1 veces.

## 5.2. RECOMENDACIONES.

- Se debe tener en consideración que con eventos que presenten caudales mayores al caudal dominante ( $2.8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) pueden presentarse problemas de colmatación por arrastre de sedimentos de fondo en la captación Ronquillo.
- Se debe tener en cuenta que los valores de sobre estimación de las fórmulas empíricas utilizadas en el presente estudio solo son válidas para eventos similares a los mostrados, ya que para eventos extremos los resultados pueden variar.
- Para el uso de la estrategia de monitoreo de sedimento de fondo utilizada en el presente estudio, se recomienda realizar batimetrías continuas con el fin de poder obtener una curva de niveles versus volumen de sedimentos acumulados, ello con la finalidad de poder analizar mejor la influencia de las variables en cada eventos en el transporte de sedimentos de fondo.
- Se recomienda implementar el monitoreo de sedimento de fondo y en suspensión en la cuenca Ronquillo con un sistema indirecto que permita obtener mediciones y datos continuos de sedimentos.
- Se recomienda realizar este tipo de estudios en otras cuencas con la finalidad de entender la dinámica del transporte de sedimentos en cada una de ellas.

## **VI. BIBLIOGRAFÍA**

### **6.1. LIBROS**

- Alonso, R. L. (2004). Problemas resueltos de ingeniería hidráulica forestal (Vol. 47): Universitat de Lleida.
- Charlton, R. (2007). Fundamentals of fluvial geomorphology: Routledge.
- Chow, V. T. (1983). Hidráulica de Canales Abiertos: ISBN 968-13-1327.
- Das, B. M. (2001). Fundamentos de ingeniería geotécnica: Thomson Learning.
- Juan Pedro Martín, V., & Upc Edicions, U. (2007). Ingeniería de ríos (Vol. 9): Univ. Politéc. de Catalunya.
- Mijares, A., & Mijares, F. J. F. J. A. (1989). Fundamentos de hidrología de superficie: Limusa.
- Miller, J. R., Mackin, G., & Miller, S. M. O. (2015). Application of geochemical tracers to fluvial sediment: Springer.
- Reyes, A., Barroso, F. U., & Carvajal, Y. (2010). Guía Básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas: Programa Editorial UNIVALLE.
- Rocha, A. (1998). Introducción a la hidráulica fluvial: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil.
- Rubio, T. O. (2011). Hidráulica de ríos y procesos morfológicos: Ecoe ediciones.
- Vide, J. P. M. (2007). Ingeniería de ríos (Vol. 9): Univ. Politéc. de Catalunya.
- Villón, M. (2002). Hidrología. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Hudson, N. (1997). Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía (Vol. 68): Food & Agriculture Org.

### **6.2. ARTÍCULOS**

- Aguirre-Pe, J., Olivero, M., & Moncada, A. (2000). Transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente. Ingeniería del agua, 7(4), 353-365.
- Barnes, H. H. (1967). Roughness characteristics of natural channels: US Govt. Print. Off.
- Barry, J. J., Buffington, J. M., Goodwin, P., King, J. G., & Emmett, W. W. (2008). Performance of bed-load transport equations relative to geomorphic significance: Predicting effective

- discharge and its transport rate. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(5), 601-615. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:5\(601\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:5(601))
- Cowan, W. L. (1956). Estimating hydraulic roughness coefficients. *Agricultural Engineering*, 37(7), 473-475.
- Elsitdié, L. G. C., Vide, J. P. M., & Martín, M. D. M. (Writers). (2009). Coeficientes de resistencia, transporte de sedimentos y caudal dominante en regiones semiáridas, Todo sobre Coeficientes de resistencia, transporte de sedimentos y caudal dominante en regiones semiáridas.
- Farias, H. D. (2005). Análisis del concepto de caudal dominante en ríos aluviales y evaluación de metodologías de cálculo. Paper presented at the Segundo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos.
- García, C., & Sala, M. (1998). Aplicación de fórmulas de transporte de fondo a un río de gravas: comparación con las tasas reales de transporte obtenidas en el río Tordera. *Ingeniería del agua*, 5(1), 59-72.
- Glysson, G. D. (1987). Sediment-transport curves: US Geological Survey.
- Gray, J. R., Laronne, J. B., Osterkamp, W., & Vericat, D. (2010). Bed Load Research International Cooperative—BRIC. US Geological Survey Scientific Investigations Report, 5091, 208-217.
- Gray, J. R., & Simões, F. J. (2008). Estimating sediment discharge *Sedimentation engineering: Processes, measurements, modeling, and practice* (pp. 1067-1088).
- Habersack, H., Kreisler, A., Rindler, R., Aigner, J., Seitz, H., Liedermann, M., & Laronne, J. B. (2016). Integrated automatic and continuous bedload monitoring in gravel bed rivers. *Geomorphology*, 291, 80-93. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.10.020>
- Haddadchi, A., Omid, M. H., & Dehghani, A. A. (2013). Bedload equation analysis using bed load-material grain size. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 61(3), 241-249.
- López, R. (2003). Fórmulas para el cálculo aproximado de la capacidad de transporte de sedimentos en ríos de montaña. *Cimbra*, 2003, núm. 351, p. 32-36.
- López, R., Vericat, D., & Batalla, R. J. (2015). Evaluación de fórmulas de transporte de fondo en un río de gravas acorazado. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(2), 5-20.
- Nitsche, M., Rickenmann, D., Turowski, J. M., Badoux, A., & Kirchner, J. W. (2011). Evaluation of bedload transport predictions using flow resistance equations to account for

- macro-roughness in steep mountain streams. *Water Resources Research*, 47(8). doi: 10.1029/2011WR010645
- Ortiz, M., Huerta-Tamayo, L., & Hinojosa, A. (2003). Transporte de sedimento por tracción de marea en el Estero de Punta Banda, Baja California, México. *GEOS*, 23(3), 283-294.
- Owens, P., Batalla, R., Collins, A., Gomez, B., Hicks, D., Horowitz, A., Peacock, D. (2005). Fine-grained sediment in river systems: environmental significance and management issues. *River research and applications*, 21(7), 693-717. doi: 10.1002/rra.878
- Papanicolaou, A., Bdour, A., & Wicklein, E. (2004). One-dimensional hydrodynamic/sediment transport model applicable to steep mountain streams. *Journal of Hydraulic Research*, 42(4), 1-19. doi: 10.1080/00221686.2004.9728402
- Parker, G., Klingeman, P. C., & McLean, D. G. (1982). Bedload and size distribution in paved gravel-bed streams. *Journal of the Hydraulics Division*, 108(4), 544-571.
- Patt, H., & Jüpner, R. (2013). *Hochwasser-Handbuch. Auswirkungen und Schutz*, Berlin, Heidelberg. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-28191-4>
- Perks, M. T. (2014). *Suspended Sediment Sampling*. British Society for Geomorphology.
- Phillips, J., Webb, B., Walling, D., & Leeks, G. (1999). Estimating the suspended sediment loads of rivers in the LOIS study area using infrequent samples. *Hydrological processes*, 13(7), 1035-1050.
- Phillips, J. M., Russell, M. A., & Walling, D. E. (2000). Time-integrated sampling of fluvial suspended sediment: a simple methodology for small catchments. *Hydrological Processes*, 14(14), 2589-2602.
- Ramírez, C., García, J. L., Ramirez, C. A., & Bocanegra, R. A. (2011). Caracterización de los materiales del lecho del río Cauca. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 1(1), 10-17.
- Rascher, E., Baewert, H., Schmidt, K.-H., & Morche, D. (2012). Comparing the results of bed load transport equations to field measurements in an Alpine river. Paper presented at the EGU General Assembly Conference Abstracts.
- Smart, G. M. (1984). Sediment transport formula for steep channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(3), 267-276. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:3(267)

- Smith, T. B., & Owens, P. N. (2014). Flume and field based evaluation of a time-integrated suspended sediment sampler for the analysis of sediment properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(9), 1197-1207.
- Vanoni, V. A. (2006). *Sedimentation Engineering: Theory, Measurements, Modeling, and Practice, Manuals and Reports on Engineering Practice* (54).
- Wren, D. G., Barkdoll, B. D., Kuhnle, R. A., & Derrow, R. W. (2000). Field techniques for suspended-sediment measurement. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(2), 97-104.

### **6.3. OTROS**

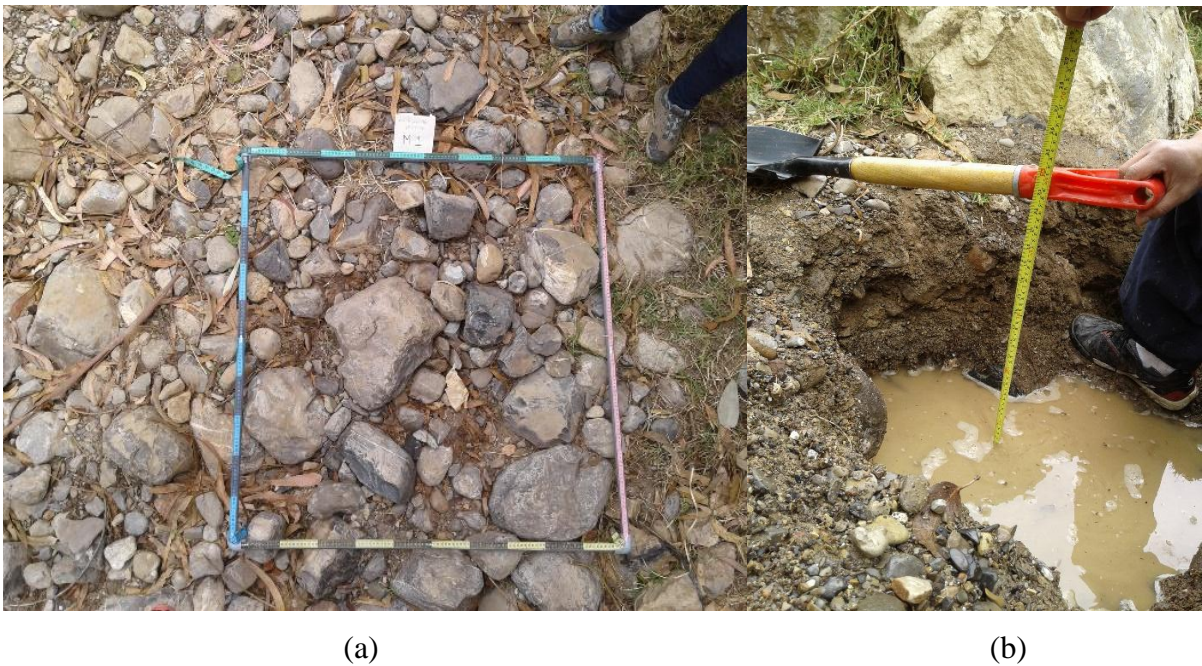
- Benavides, I., Ángeles, I., Salazar, E., & Abásolo, J. (2007). *Inventario de Fuentes de Agua Superficial de la Cuenca del Mashcon*.
- Cruzado, G. *Proyecto Gestión de Riesgo de Deslizamiento del Ronquillo, Urubamba y Corisorgona*.
- Chuquiruna, M., Cotrina, S., & Sánchez, I. (2008). *Diagnóstico Socio Ecológico de Nuestra Jalca en Microcuenca en Ronquillo. Proyecto Páramo Andino*.
- Municipalidad Provincial de Cajamarca. (2012). *Estudio de Evaluación de Riesgo de desastres del Sector Crítico Urbano: Urubamba-Ronquillo. Municipalidad Provincial de Cajamarca*.
- Ortiz, O. (2004). Evaluación hidrológica. *Revista Hidrored*, 2-7.
- Olazábal, J. B. Q. (2015). *Estudio experimental del transporte de sedimentos en suspensión y fondo y comparación con fórmulas empíricas en los ríos Puyango-Tumbes y Zarumilla. [TESIS]*.
- Vásquez, G. C., & Rodríguez, M. E. C. (2011). *Estudio de Geología. Gobierno Regional de Cajamarca*.

**VII. ANEXOS.**

**ANEXO 1: CAMPAÑAS DE CAMPO.**



*Figura 39. (a) Levantamiento topográfico del cauce de río Ronquillo y (b) batimetría del vaso formado por el barraje de la captación Ronquillo.*



*Figura 40. (a) Material del lecho superficial y (b) material del lecho sub-superficial del río Ronquillo.*



**ANEXO 2: TRABAJOS DE LABORATORIO.**



(a)



(b)



(c)



(d)

*Figura 41. (a) Tamizado de material sub-superficial, (b) Material para densidad de gruesos, (c) y (d) Ensayo para determinar densidad de material fino.*





(a)



(b)

*Figura 42. (a) Filtrado d muestras de sedimentos en suspensión, (b) Pesado de muestras filtros secos para obtención de concentración de sedimentos en suspensión.*

### ANEXO 3: PRESUPUESTO.

Tabla 16  
Presupuesto para elaboración de tesis.

Rubro	Cantidad	Costo (S/.)	Costo total (S/.)
<b>1. Tesista</b>	20	1000	20000
Sub total (S/.)			20000
<b>3. Movilidad y alimentación</b>			
Pasajes	60	10	600
Alimentación	60	12	720
Sub total (S/.)			1320
<b>4. Materiales e insumos</b>			
<b>4.1 Monitoreo de caudales</b>			
Sensor de nivel de agua "Levelogger y Barologger"	1	8000	8000
Regla graduada para niveles de río	1	70	70
Candados para protección de estación	2	50	100
Mejoramiento de estación	1	80	80
Sub total (S/.)			8250
<b>4.2 Trabajos de campo</b>			
Levantamiento topográfico de cauce y batimetría	3	100	300
Herramientas para extracción de muestras de fondo	1	120	120
Marco 1*1 para lecho superficial	1	30	30
Traslado de muestras a laboratorio de suelos UNC	1	40	40
Personal de apoyo en campo	2	150	300
Sub total (S/.)			790
<b>Total (S/.)</b>			<b>30360</b>