



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**

**CARRERA INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**SEDE MANABÍ**

**TEMA:**

SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTO DE FONDO DE LA  
CUENCA DEL RÍO GARRAPATA EN EL SITIO GARRAPATA CANTÓN CHONE.

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN**

HIDROLOGÍA

**PREVIO AL TÍTULO DE:**

INGENIERO HIDRÁULICO

**AUTOR:**

BRYAN HERNAN ARMIJOS BRITO

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN:**

ING. ANDY GILER ORMAZA, M. Sc.

**PORTOVIEJO, ECUADOR**

2020

## **CERTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

En mi calidad de director de tesis certifico haber revisado el presente manuscrito de investigación, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Carrera de Ingeniería Hidráulica de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Manabí, cumpliendo los requisitos establecidos por la Dirección de Investigación; en consecuencia, es apto para su presentación y sustentación.

**SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTO DE FONDO DE LA CUENCA DEL RÍO GARRAPATA EN EL SITIO GARRAPATA CANTÓN CHONE.**

---

**ING. ANDY MIGUEL GILER ORMAZA, M. SC.**

**C.C.: 131282032-5**

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## **APROBACIÓN DEL TRIBUNAL**

El jurado examinador aprueba el presente manuscrito de investigación en nombre de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Manabí.

---

ING. ANDY GILER ORMAZA, M. Sc.

**PRIMER LECTOR**

**131282032-5**

---

ING. JOHN FÉLIX MERA, M. Sc.

**SEGUNDO LECTOR**

**131363436-0**

---

ING. JOSÉ RAMÓN ALARCÓN LOOR, M. Sc.

**TERCER LECTOR**

**131128820-1**

## **DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD**

Éste manuscrito no contiene ningún tipo de material que ha sido aceptado para la obtención de un título universitario en otra institución, excepto en forma de información de sustento que ha sido debidamente citada en mi trabajo. Este trabajo es de total responsabilidad del autor, quien declara bajo juramento que ninguna sección de esta tesis infringe los derechos de autor de nadie.

---

BRYAN HERNAN ARMIJOS BRITO

**C.C.: 070602609-3**

## **DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y CO-AUTORÍA**

Autorizo a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador a distribuir este manuscrito de investigación en medios físicos y electrónicos con el fin de promover la divulgación de mis resultados a la comunidad científica y a la sociedad en general. Adicionalmente autorizo el uso de los contenidos de esta investigación como bibliografía para fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, citando como fuente de información al autor de este trabajo.

---

BRYAN HERNAN ARMIJOS BRITO

**C.C.: 070602609-3**

## **DEDICATORIA.**

Todos los triunfos nacen cuando nos atrevemos a comenzar. Eugene Ware.

La familia es el soporte que brinda fortaleza en tiempos de incertidumbre, abrigo en los días fríos de desasosiego, calienta el alma cual combustible etéreo que permite avanzar, seguir, progresar, no desmayar. A ustedes dedico este logro académico, por el amor incondicional, infinito que se llenó con sus recuerdos mientras estuve lejos.

Y muy particularmente al apoyo irrestricto de mi abuelita, mi luz, mi vida. A usted le dedico este triunfo.

**Bryan Hernán Armijos Brito**

## **AGRADECIMIENTO**

La gratitud es la virtud más grande del ser humano.

Gracias imperecedera a todos y cada una de las personas que contribuyeron a la consecución del presente logro académico. Especialmente al Ing. Andy Miguel Giler Ormaza, M. Sc. por las indicaciones aportadas para que llegue a buen término el trabajo de titulación.

**GRACIAS.**

**Bryan Hernán Armijos Brito**

## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| <b>RESUMEN</b> .....                                 | ix |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                | x  |
| <b>1.- INTRODUCCIÓN</b> .....                        | 1  |
| <b>2.- MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....                | 4  |
| 2.1.- Materiales .....                               | 4  |
| 2.2.- Métodos.....                                   | 4  |
| <b>3.- METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....     | 5  |
| 3.1.- Generalidades del sector.....                  | 5  |
| 3.2.- Método de recolección de campo.....            | 6  |
| 3.3.- Métodos para la Simulación de sedimentos ..... | 13 |
| <b>4.- RESULTADOS</b> .....                          | 21 |
| <b>5.- DISCUSIÓN</b> .....                           | 29 |
| <b>6.- CONCLUSIONES</b> .....                        | 31 |
| <b>7. BIBLIOGRAFÍA</b> .....                         | 33 |
| <b>8.- ANEXOS</b> .....                              | 36 |

## RESUMEN

Esta investigación mixta pretendió simular el transporte de sedimento de fondo en la cuenca media del río Garrapata, en el cantón Chone, considerando que, pese a la importancia de este tipo de investigaciones en la gestión apropiada de una cuenca hídrica, son pocos los estudios en cuanto al arrastre de sedimentos realizados en este lugar. Debido a ello, en un tramo de 115 metros de esta cuenca, se generaron simulaciones del transporte de sedimento de fondo en el *software Hydrologic Engineering Center-River Analysis System (HEC-RAS)*, utilizando las fórmulas adoptadas por este programa. El trabajo de campo se efectuó desde octubre 2019 hasta enero 2020, realizándose 14 aforos de caudal sólido con el muestreador *Helley-Smith* y aforo de caudal líquido con el método de molinete, siendo la ecuación *Engelund-Hansen* la más favorable para generar las comparaciones de la concentración de sedimentos. Los resultados obtenidos proporcionaron cuatro valores, en donde la razón de discrepancia (R) comprende un rango de 1.212 a 6.190, sabiendo que los valores de margen de error van en un rango de 0.33 a 3 y 3 a 7. Los aforos dan como resultado un diámetro promedio de partículas entre 0.19 y 0.93, el cual está dentro de los rangos de fórmula. En efecto, este estudio cumple con una solución al problema planteado, y por ello se recomienda su implementación ya que su aporte a las cuencas hídricas resulta importante para su correcto uso y optimización, determinando el arrastre de sedimentos.

*Palabras clave:* simulación, cuenca hídrica, discrepancia, programas

## **ABSTRACT**

This mixed research study aimed to simulate bedload sediment transport in *Garrapata* River middle basin, in Chone Canton, because despite the importance of this type of research in the effective management of a river basin, there are few studies about river sediment discharge and dragging in this place. Therefore, there were generated simulations of bedload sediment transport in a 115-meter section of this basin, by using the Hydrologic Engineering Center-River Analysis System (HEC-RAS) software, as well as its equations. The fieldwork was carried out from October 2019 through January 2020, and there were performed 14 solid-flow gauging operations by the Helley-Smith sampler, as well as water flow gauging operations by the vane method, being the Engelund-Hansen equation the best to generate comparisons of sediment concentration. The findings give four different values, where the discrepancy ratio ( $r$ ) ranges between 1.212 and 6.190, as it is known that the margin of error ranges from 0.33 to 3, and 3 to 7. The gauging operation results show an average particle size ranging from 0.19 to 0.93, which is within the formula range. Definitely, this research study provides solutions for the stated problem, so that its implementation is recommended given that its contribution to water basins is important regarding its correct use and optimization, determining river sediment discharge and dragging.

*Keywords:* simulation, river basin, discrepancy, programs

## **1.- INTRODUCCIÓN**

Los ríos como producto de la acción ejercida por la fuerza de sus aguas generan una dinámica fluvial que genera erosión, sedimentación, procesos que son causantes de problemas que tienen mayor afectación alrededor del orbe. Ante ello, “las consecuencias de la erosión de los suelos abarcan efectos directos como la generación de sedimento, reducción de la capacidad productiva del suelo” (Restrepo, 2015).

Otro factor a tomar en consideración es la deforestación de la cuenca por parte de los agricultores para uso agrícola, algo que sucede también en ríos como el Magdalena en Colombia, y otros cursos de agua en otras latitudes.

Algo igual sucede con los cuerpos de aguas fluviales en Manabí, en el caso del río Garrapata el daño es más notorio por cuanto sirve para la navegación en la parte baja de cantón Chone, en su estuario. El crecimiento de la población se convierte en uno de los problemas principales con el tema tratado, esto aumenta los niveles de material sedimentario por las actividades propias emanadas de las actividades antrópicas, es decir, se cubren las necesidades propias de los habitantes (lavado de ropa, gua utilizada para las necesidades básicas).

Se puede nombrar además deslizamientos, colmatación de ríos que provocan inundaciones, con consecuencias lógicas sobre la seguridad y la salud de la población y sobre el sistema productivo. Como se aprecia los problemas que acarrea afectan a la población que vive a lo largo del río, causando contaminación al agua, quitando la barrera vegetal que ayuda a controlar las inundaciones.

En el proceso de arrastre, “los sólidos van en un solo sentido, de la gravedad, y no regresan jamás a las cabeceras de las cuencas o a las partes superiores de los cauces” (Martín-Vide, 2013), se asienta en el fondo. Para Hernández (2018) el espacio fluvial o territorio fluvial que ha sido modelado por el río con su propia dinámica, se ha desaprovechado, y en parte

ocupado por el hombre, pero de manera incorrecta, con poca valoración, lo cual conlleva a que se reduzca progresivamente el mismo, teniendo como consecuencia la disminución de los servicios ecológicos que brinda a los seres humanos.

Mientras que Camas, Turrent, Cortes, Livera, González, Villar, López, Espinoza y Cadena (2012) afirman que “La erosión del suelo es el principal problema que afecta la sustentabilidad de las tierras de ladera. Como resultado, los rendimientos y los ingresos son bajos y la calidad del suelo continúa disminuyendo”. Causando problemas no solo ambientales, también socioeconómicos porque se ven afectados quienes se benefician directa e indirectamente del río.

“En condiciones de disturbio mínimo, los suelos de los ecosistemas forestales tienen tasas de infiltración altas, por tanto, la magnitud de la escorrentía y la erosión es baja” (Vázquez, Ortiz, Palacio y Muñoz, 2018). Mientras que la acción de erosión provoca que millones de toneladas de sedimentos vayan a los ríos.

La gravedad hace posible que las partículas de sedimentos que poseen mayor concentración se decanten y concentren en el lecho, a esto se denomina, capacidad de transporte de sedimentos, o capacidad de transporte, misma que se define como, el volumen total de partículas de sedimento que son transportadas por unidad de tiempo. Esta tasa incluye el transporte de sedimentos por carga de lecho, suspensión y la carga de lavado (material flotante) (Cabrera y Montalvo, 2012).

Se distinguen dos tipos de sólidos transportados, sólidos de fondo, aquellos que se conforman por fracciones de mayor tamaño, se da por arrastre continuo, también por saltación. En tanto que los sólidos en suspensión, vienen a ser partículas de menor tamaño inmersas en un flujo. El desgaste producido en una cuenca se debe al transporte de sedimentos, causados de forma principal por la corriente fluvial, así son transportados y posteriormente dejados en un cuerpo de agua receptor con un mayor alcance.

Cuando el río desemboca en el océano se produce el fenómeno donde se retiene material sólido denominado colmatación, esto hace posible que las partículas en suspensión se vayan al fondo. Mientras mayor es el embalse mayor será la eficiencia de retención de los sedimentos. Por tanto, el agua es el agente para que pueda darse el arrastre y erosión de las cuencas, esto motivado por la efectividad que presenta causando desgaste en los taludes, arrastrado cantidades grandes de sedimentos, para ser luego depositados aguas abajo.

La hidráulica fluvial es clave para cuantificar y predecir el transporte de sedimentos, permite así implementar acciones para que se pueda mitigar, o paliar una buena parte de las descargas generadas por los cauces de los ríos.

El objetivo de esta investigación es simular el transporte de sedimento de fondo en la cuenca del río Garrapata en el sitio Garrapata, para lo cual es necesario seleccionar métodos para la simulación del transporte de sedimentos de fondo considerados idóneos para el área de estudio, efectuar la recolección de datos de campo en la zona donde se desarrolla el estudio, realizar simulaciones del transporte de sedimento de fondo en el área de estudio y finalmente comparar numéricamente la información de campo y las simulaciones que se efectuaron en el área de estudio.

La importancia de esta investigación radica a nivel investigativo en observar y comprobar cómo se da la sedimentación proveniente de la parte alta de la cuenca hacia la parte baja de la misma y así poder implementar acciones que mitiguen los efectos de las inundaciones.

## **2.- MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1.- Materiales**

Los materiales de oficina que fueron utilizados en el desarrollo de esta investigación son: Computadora portátil, lapiceros, resma de hojas bond A4, al igual que programas: HEC-RAS 5.0.7, AutoCAD Civil3D 2018, ArcGIS 10.5. En la investigación de campo los materiales que se utilizaron fueron: Helley Smith, RTK Trimble 8R, Drone, Equipo de aforo (molinete) y GPS.

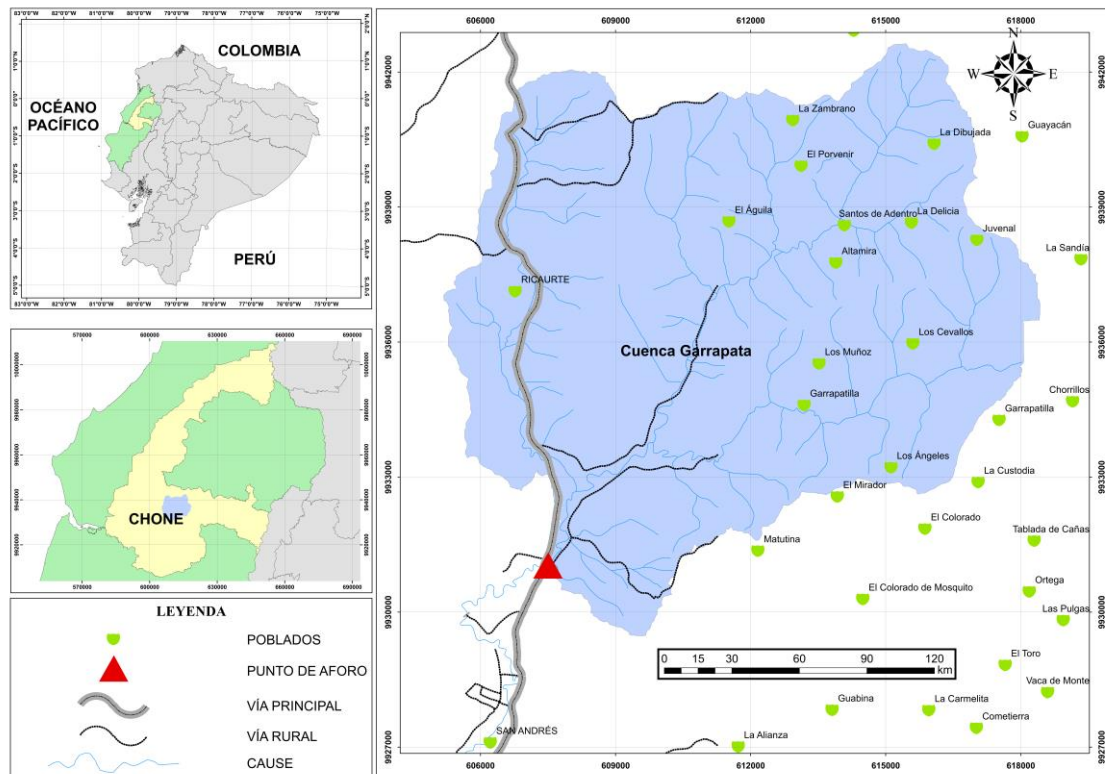
### **2.2.- Métodos**

En base a las características mostradas en la investigación se logró determinar que es una investigación de tipo cuantitativa, porque se siguió un proceso sistemático y metódico, principios básicos de la metodología cuantitativa.

### 3.- METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1.- Generalidades del sector

La zona de estudio está ubicada en el sitio Garrapata del río Garrapata cantón Chone, provincia de Manabí.



**Ilustración 1.** Área de estudio.

**Fuente:** El Autor.

#### 3.1.- Generalidades del sector

Las coordenadas de la zona son las siguientes.

Datum WGS84 y Proyección UTM.

**Este:** 607504.114

**Norte:** 9931044.015

**Elevación:** 26.97 msnm

La morfología de la cuenca hidrográfica presenta determinadas características físicas, entre las cuales puede nombrarse: relieve, forma, capa vegetal, tipos de suelos, red de drenaje, por nombrar unos cuantos. El cauce del río Garrapata tiene una longitud de 25.54 km. La cota donde nace este cauce es de aproximadamente 600 msnm, en tanto que la cota más baja es de 25 msnm. La cuenca hidrográfica citada se caracteriza por atravesar áreas montañosas, genera en su trayecto pendientes medias del 2% (Dominguez, 2012). La cuenca deja expuesta una topografía favorable a las temporadas invernales, es decir, se crean áreas inundables lo cual genera vulnerabilidad (GILER-ORMAZA, 2020). En las zonas altas suceden fenómenos erosivos que son altamente manifiestos, esto es debido a que hay una gran cantidad de movimientos de masas que generan sedimentos. |

**Tabla 1.** Características morfo-métricas de la cuenca.

| Área de drenaje (A) km <sup>2</sup> | Perímetro (P) Km | Longitud del Río (L.R) Km | Pendiente del Río (m/m) | Tiempo de concentración (Tc) h | Coefficiente de Compacidad (kc) | Factor de Forma (kf) |
|-------------------------------------|------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| 130,76                              | 54.36            | 25.54                     | 0.0174                  | 5.02                           | 1.33                            | 0.379                |

**Fuente:** (Vaca, 2012)

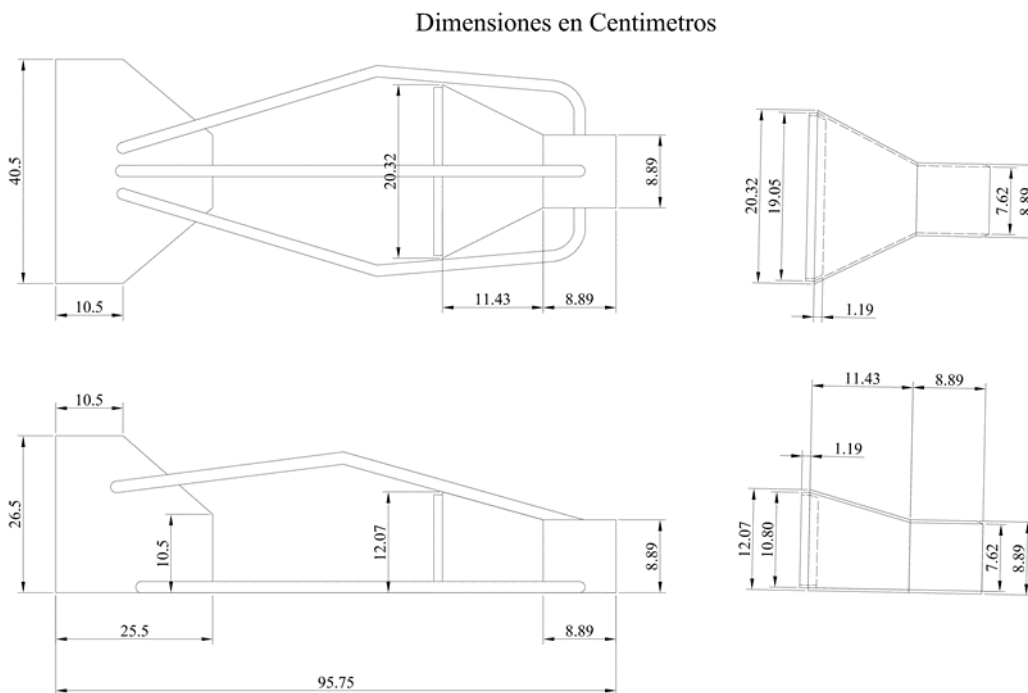
### 3.2.- Método de recolección de campo

#### Muestreador tipo trampa.

Para recolectar los datos *in situ* sobre el transporte de sedimentos de fondo se hará uso del muestreador tipo trampa Helley-Smith para tomar los sólidos transportados en el lecho del río. Este equipo es utilizado mucho para las mediciones de sedimentos de fondos, es de fácil manipulación: se ubica en el lecho del río y se toman muestras en algunas

verticales de la sección transversal (Minas et al., 2004). Presenta ventajas como la siguiente: definir el tiempo en que una represa puede sedimentarse y de esa manera se reduce su capacidad de embalse (Denmark A/S, 2018).

Se diseñó para la toma de muestras en condiciones de velocidades de 3 m/s y el tamaño de sedimentos de 2mm a 20mm óptimo para procesar los datos a realizarse (Emmett, 1849). Tiene las siguientes características del equipo: boquilla o entrada cuadrada de 3 pulgadas, contiene una bolsa de 46 cm para tomar la muestra, es una malla poliéster de porosidad 0.2 mm. Puede apreciarla en la **Ilustración 2**.



**Ilustración 2.** Características del Helley-Smith

**Elaborado por:** El Autor.

**Fuente:** (Emmett, 1849).

## **Cálculo del Caudal.**

El caudal es la cantidad de agua que atraviesa un lugar en un determinado tiempo, para su determinación de la cuenca objeto de estudio se hará uso de la terminación hidrometría, denominado también aforo. En lo atinente a obtener este dato hay varios métodos, siendo los de mayor precisión, los métodos directos porque se utilizan aparatos tecnológicos, miden de manera directa el gasto líquido. Para evaluar se hizo uso del método que a continuación se describe.

### **Aforo mediante el método de molinete.**

Este instrumento permite que se conozca la velocidad de flujo en el canal o corriente, desprende dos tipos: tipo copilla, gira alrededor del eje vertical y el tipo hélice que da vueltas sobre el eje horizontal. Ambos se accionan por el movimiento del agua. Está conectado a un sistema que registra para conocer el número de vueltas que produce la hélice en un tiempo determinado (Rodríguez, 2003) .

En la investigación el molinete tipo hélice será el que se utilice, procede a determinar la cantidad de caudal que tributa el cauce, mide la velocidad media de la corriente. Debe realizarse una división de la sección transversal en franjas, para lo cual, el área de las franjas tiene parecido a un rectángulo con un ancho y altura iguales en lados y altura.

El caudal en una franja es igual a la velocidad media en la franja multiplicada por el área; esta última se define en función de la velocidad puntual medida con el molinete (Kennedy, 1992). El molinete con que se efectuó los estudios de caudales tiene la marca OTT HydroMet (C31). Se describe a continuación el procedimiento:

### **Procedimiento**

- Se procede a colocar dos tubos de hierro en los extremos del espejo de agua, a continuación, se toma medida de la distancia.

- Con un cabo marcado cada medio metro un color, y cada metro otro color, el cual estaba sujeto a los extremos mediante los tubos de hierro.
- El molinete es armado siguiendo los pasos dados por el instructivo del equipo.
- Siguiendo el orden del muestreo se procede a medir de acuerdo a la profundidad del cauce cada metro.
- También se hace la medición de la profundidad cada medio metro del cabo, siempre y cuando no cumpla con una profundidad adecuada.
- La hélice comienza a 5 cm de altura del lecho del río, las demás alturas están acordes con la profundidad del río.
- El marcador del molinete pasa sumergido de 30 segundos, en cada revolución dada suena y en base a eso se toma lectura en función de la cantidad de vueltas.

La ecuación usada del molinete es de tipo:

$$\text{Ec.1. } V_1 = \text{COEF } 0.1157 * N + \text{COEF } 0.0241$$

**Donde:**

**V<sub>1</sub>**= Velocidad media del flujo (m/s).

**N**= Número de vueltas del molinete.

El equipo proporciona un programa creado en Excel 2010, para el ingreso de datos de identificación del aforo (hora y fecha), también datos del sitio donde se hizo el aforo (latitud, fuente, longitud, lugar/sitio, cota). Datos del autor, del auxiliar de aforo, por último, datos obtenidos con el molinete, esto en dependencia del número de franjas, revoluciones por altura, alturas tomadas.

Y para determinación del caudal se aplica la siguiente expresión:

$$\text{Ec.2. } Q = v * A$$

**Donde:**

A= área (m<sup>2</sup>).

Q= caudal (m<sup>3</sup>/s).

V= velocidad (m/s).

### **Levantamiento topográfico.**

Se realiza el levantamiento de datos haciendo uso del equipo topográfico RTK (Real Time Kinematic por sus siglas en inglés), conocido también como posicionamiento cinemático en tiempo real, el cual permite ubicar puntos con coordenadas a través del satélite, que es emitido hacia un módem de radio, teléfono y Tablet para obtener correcciones instantáneas. La topografía se hizo en base a los siguientes pasos:

1. Se ubica el receptor base en una zona alta donde se marca un punto que sirva de referencia.
2. Luego se enciende el equipo, esperando que se cargue, logrando determinarse automáticamente su posición y ubicación mediante satélite. Pasando 15 minutos se procede al levantamiento de los puntos de la topografía.
3. Se tomaron puntos de referencia de la calle que pasa cerca de las casas, árboles y puente cercanos al cauce del río.
4. Se realizó el levantamiento topográfico de la sección del río, la cual abarca los 115 metros longitudinales del cauce, se tomaron puntos del eje y bordes del cauce del río necesarios para la triangulación de la superficie, la cual ayudó a detallar cada 10 metros las secciones transversales.

5. Después de realizada la topografía se descargó en un archivo (Csv) el cual contenía los puntos levantados.
6. Con el archivo adquirido se procedió a importar dichos puntos al software CivilCAD 3D para generar una triangulación la cual permite obtener las secciones transversales, perfil longitudinal y la superficie.

### **Granulometría del lecho.**

En hidráulica fluvial los parámetros que se consideran de mucha importancia es la relativa a determinación del material del lecho en las cuencas fluviales con el consecuente análisis granulométrico para el estudio en torno a la dinámica de fluidos. Una vez obtenidos los datos se son estudiados y utilizados para el cálculo del transporte de sedimentos, movimiento de partículas, resistencia de flujo, reconstrucción hidrológica, entre otros (García & Vide, 2001).

Estos estudios requieren del muestreo, puede ser manual o con ayuda de equipos, las metodologías tienen que ser apropiadas partiendo del tamaño de partículas presentes en el lecho del río. La Institución AMERICAN GEOPHYSICAL UNION presenta una tabla con datos relativos al tamaño de partículas de sedimentos (**Revisar Anexo 1**).

Los cauces en la zona montañosa transportan material tales como arena, bolos. canto rodado, se presentan limitaciones en cuanto al tema de accesos ante la falta de senderos para llegar a zonas remotas. Para ello se necesitan equipos sofisticados para realizar muestreos en zonas sensibles donde es imposible la recolección de muestras voluminosas (Bunte, 2001).

Para efectuar el estudio de la cuenca hidrográfica se procederá a utilizar la metodología de conteo rocas. Para (Wolman, 1954) determinar el análisis de granulometría del lecho de río, está basado en el análisis relativo de tamaño de la partícula dependiendo del lugar.

Todo esto en función de los pesos relativos, para ello el método radica en los pasos que a continuación se detallan:

1. Cuando se alcanza el flujo deseado, se procede a establecer un sistema de cuadrícula, bien sea con líneas reales o ritmo, se determina el tamaño de la cuadrícula por la longitud que alcance la muestra que desea describir. De darse el caso de efectuar comparaciones entre alcances, la muestra tiene que ser consistente en cuanto a la elección de la longitud de alcance a incluir en la muestra.
2. Después de haber establecida la cuadrícula, quien manipula tiene que realizar medidas para recolectar muestras en el lecho, de esa manera cuantificar las muestras.
3. El último paso a desarrollar es la medición del eje mayor de las rocas. Hay limitaciones en cuanto a la medición de rocas pequeñas individuales (tamaños de arena que se tratan a continuación).

En cuanto al método de muestreo para determinar la granulometría del lecho es limitado por su antigüedad. Se considera que podría tener cierto grado de incertidumbre, ante ello es recomendable en estudios que se efectúen a futuro la utilización del muestreo a través de fotografías ortogonales a la superficie tal como indica Ibbeken & Schleyer (1986) en su estudio.

Los autores hicieron uso de esta metodología al realizar fotografías tomadas con un soporte de cámara. Las fotografías son verticales con escala constante, los soportes utilizados eran piramidales desmontables con el marco basal de 1,33 mx 2m, 2m x 3m. Los lentes son de 35 mm, altura de cámara corresponde al lado largo del marco basal, 2 ó 3 m. Para que pueda identificarse las fotografías, fecha del perfil y número de las fotografías hay medidas en el marco. **(Revisar Anexo 2)**

### **Cálculo del gasto sólido de fondo.**

Las muestras que se extraen con el Helley Smith se tomaron en una parte de la sección transversal en los tres puntos considerados críticos, mismas que se extrajeron para la realización del proceso de secado. Se llevaron a cabo pruebas en el laboratorio tal cual establece la investigación de (Muñoz, 2013). Las pruebas se llevaron a efecto en una estufa a 113°C durante 24 horas, luego se pesaban y podía determinarse la masa de las muestras individualizadas. El caudal sólido de fondo es obtenido por la expresión para el muestreador de fondo Helley-Smith (IROUMÉ, 2003):

$$\text{Ec.3. } Q_s = \frac{P*B}{n*t*b}$$

#### **Donde:**

**P**= Peso de la muestra (gr).

**B**= Distancia de lámina de agua (m).

**n**= Numero de submuestra.

**t**= Tiempo de muestreo (sg).

**b**= Ancho de boca del muestreador (m).

### **3.3.- Métodos para la Simulación de sedimentos**

#### **Software de estudio.**

Se procederá a efectuar una revisión metódica de las bases teóricas que permitan la aplicabilidad de la diversidad de métodos que permiten simular el transporte de sedimento de fondo. La utilización de modelos computacionales para la resolución de problemas enfocados al transporte hidrodinámico o de sedimentos, se consideran relativamente nuevos en lo relativo a los modelos físicos. Estos modelados se utilizan con la finalidad

de comprender de una mejor manera los procesos (Papanicolaou, Krallis, & Edinger, 2008). La innovación de la mecánica de fluidos ha permitido crear softwares que sirvan como herramientas para comprender los procesos en distintos entornos, v.g. ríos, lagos, al igual que áreas costeras.

En lo relativo a los paquetes de software se citan los HEC-RAS, Delft 2D, Mike; y, Delft 3D entre otros. Los más utilizados por la confiabilidad porque brindan información se dividen: modelo unidimensional 1D, bidimensional 2D y tridimensional 3D.

### **HEC-RAS.**

El software Hydrology Engineering Center - River Analysis System viene a formar parte de los más completos, debido que presenta diversas herramientas de modelados, debido que hace posible generar simulaciones para el transporte de sedimentos (investigación unidimensional 1D) partiendo de las ecuaciones. Permite ajustar las secciones de corte en función a la hidrodinámica y encauzar los sedimentos (S. Montoya, 2018). Son de amplia utilización los modelos 1D hidrodinámicos. Para (Crespo, 2015) se sustenta en la conservación de masa y momento, procede a calcular la superficie libre de flujos estacionarios y no estacionarios de los canales abiertos.

Mientras que el modelo hidráulico HEC-RAS se subdivide en un primer momento en alcances de sedimentos. Esto viene a ser un conjunto de secciones transversales que presentan propiedades hidráulicas, al igual que de sedimentos consistentes. Se promedian los parámetros hidráulicos en secciones transversales que llegan a tener un alcance de sedimento, se incluye un conjunto único de datos (Brunner, 2015). El software permite realizar el cálculo para la determinación del transporte de los sedimentos presentados en condiciones para la concentración, distribución granulométrica, así como la velocidad de caída de partículas ajustadas en función de aquello que desea simularse.

### **Selección del coeficiente de Manning.**

Se seleccionan los valores de Manning según la guía de (Arcement. & Verne R., 1989) para seleccionar Manning en llanuras de inundación y canales naturales. Se determina el valor de  $n$  a través de las tablas que muestra la guía. La tabla 1 ayuda a tener el valor de acuerdo al material del lecho del río y el diámetro mediano  $D_{50}$ , para lo cual se procede a seleccionar un  $n$  base de 0.22. También se transporta a la tabla 2 realizando el ajuste en relación a la variación de las secciones transversales ocurridas ocasionalmente, cuyo valor obtenido fue  $n_3 = 0.031$ . **Revisar Anexo 3 y 4.**

### **Modelado de sedimentos.**

El modelado del transporte de sedimentos es claramente difícil, por cuanto los datos son inciertos la teoría del transporte de sólidos es empírica, es altamente sensible a la extensa gama de las variables físicas, mientras que la cuantificación del modelado es difícil de estimar. Con datos buenos se realiza el modelado de sedimento valorado para la predicción de tendencias regionales en un largo plazo.

En este sentido, (Brunner, 2016) afirma que se genera información en la toma de decisión en la planificación para la evaluación de alternativas de los proyectos.

### **Hidrodinámica de sedimentos.**

Los modelados para transportar sólidos piden parámetros hidráulicos, algo que para (Brunner, 2016) el software en estudio genera cálculos hidráulicos en los espacios de tiempo antes de que se genere el sedimento o actualizar las secciones transversales del cauce. HEC –RAS procede a ajustar los cálculos del transporte de sedimentos con sistemas hidráulicos de flujos casi inestables o flujos inestables.

### **Flujo cuasi no permanente.**

(Brunner, 2016) afirma que, el flujo cuasi no permanente es la modelación que tiende a simplificar y facilitar la hidrodinámica, representando por un hidrograma continuo conformado por una serie de datos de flujo constante discretos. El HEC-RAS tiende a generar una estabilidad constante de flujo por cada registro de los datos, una vez que se calcula el transporte en torno a la duración del registro de flujo.

Los perfiles de flujo constante se muestran más estables que la solución matricial de las inestables ecuaciones de Saint-Venant, la aproximación del hidrograma de la serie de flujos no procede a ser explícito en cuanto el volumen.

Según el Manual Técnico de Referencia Hidráulico (Brunner, 2016) el gas del modelo de flujo casi inestable divide el tiempo en tres pasos.

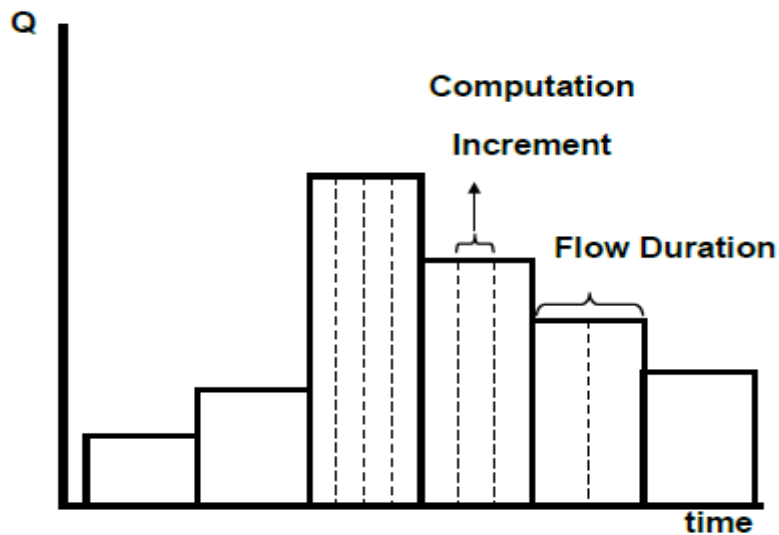
#### **Duración.**

Es un paso extenso, por cuanto el software asume que el flujo, etapa, temperatura o sedimento son constantes en tiempo que dura. (Brunner, 2016).

#### **Incremento computacional.**

Según el Manual de Referencia Hidráulica (Brunner, 2016), el aumento computacional se constituye en el primer proceso de tiempo para la generación de sedimentos, junto con la hidráulica de flujo casi inestable.

La permanencia del modelado suele ser sensible al incremento computacional, debido que el software indica que la hidráulica y geometría del lecho del son inconstantes. (Brunner, 2016) aduce que, si el fondo del río cambia muy rápido, los máximos aumentos del cómputo desmiembran la retroalimentación entre los procesos hidráulicos y de sedimento. Esto conduce a la degradación o erosión irrazonable, pudiendo provocar el bloqueo del modelado.



**Ilustración 3.** Serie de flujo cuasi no permanente.

**Fuente:** Manual de Referencia Hidráulica (Brunner, 2016)

### **Funciones del transporte de sedimento.**

El Manual de Referencia Hidráulica (Brunner, 2016) indica que debido al desarrollo de diversas funciones del transporte de sedimentos bajo diversas condiciones, puede esperarse un amplia espectro de resultados entre una función y otra.

Las funciones de transporte de sedimentos normalmente predicen tasas de transporte del conjunto emitido de parámetros hidráulicos del estado estacionario junto con las propiedades de sedimento. Muchas funciones permiten calcular el transporte de carga del lecho, y otras, la carga que presenta el material del lecho.

Las siguientes funciones de transporte de sedimentos están disponibles en HEC-RAS:

- *Ackers-White*
- *Engelund-Hansen*
- *Laursen (Copeland)*
- *Meyer-Peter-Muller*

- *Toffaleti*
- *Mpm Toffaleti*
- *Yang*
- *Wilcock-Crowe*

Meyer Petter - Müller es utilizado ampliamente desde hace décadas para el transporte de sedimentos de fondo (Wong & Parker, 2006), la fórmula es utilizada para medir el material de lecho mayor a 5mm (Yang, 1977). Las mediciones de aforo generarán incertidumbre (comparándolas con estaciones automáticas), por lo tanto, la ecuación adaptada a las condiciones de las zonas se realizó apoyadas en estudios, debido a la poca información existente. Se enfoca bastante en esfuerzos, la fórmula de MPM según HEC-RAS es:

$$\text{Ec.4. } \left(\frac{k_r}{k'_r}\right)^{3/2} \gamma R S = 0.047(\gamma_s - \gamma) d_m + 0.25 \left(\frac{\gamma}{g}\right)^{1/3} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s}\right)^{2/3} g_s^{2/3}$$

Dónde:

$g_s$ = Velocidad de transporte de sedimentos unitarios en peso / tiempo / ancho de unidad.

$k_r$ = Un coeficiente de rugosidad.

$k'_r$ = Coeficiente de aflicción basado en granos.

$\gamma$ = Peso unitario de agua.

$\gamma_s$ = Peso unitario del sedimento.

$g$ = Aceleración de la gravedad.

$d_m$ = Diámetro medio de partícula.

$R$ = Radio hidráulico.

$S$ = gradiente de energía.

Para las simulaciones que se realiza en el área de estudio se implementó la metodología de Engelund y Hansen (1967), es un procedimiento para predecir las relaciones etapa-descarga y transporte de sedimentos en arroyos aluviales, específicamente para cubiertas de dunas en lechos de arroyos (United States Departament of Agriculture, 1983).

En la investigación se determinó que la metodología presenta mejor resultados proporcionando en lo respectivo al margen de error. La fórmula establecida en el Software HEC-RAS versión 5.0.7 es:

$$\text{Ec.5. } \mathbf{0,1} \left(\frac{1}{f}\right) \theta^{\frac{5}{2}} \gamma_w [(S_s - 1) g d_{50}^3]^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

$f$  =Factor de fricción.

$\theta$  = Régimen de transición.

$\gamma_w$  = Peso específico del agua.

$S_s$  = Gravedad especifica del sedimento.

$g$  = Aceleración de la gravedad.

$d_{50}$  = Diámetro medio de la partícula.

### **Comparaciones datos de Campo vs simulaciones**

Las comparaciones efectuadas entre simulaciones y los datos de campo pueden ser: Observaciones, cuantificación de volúmenes del material sólido por unidad de tiempo, y análisis estadístico de Error estándar, Error promedio absoluto, raíz del error promedio cuadrado (RMSE) (Giler, 2016). En la presente investigación se rige por los estudios

efectuados por el autor (Haddadchi, Omid, & Sdehghani, 2013) estableciendo un valor R equivalente a Radio de Discrepancia dado por la siguiente fórmula:

$$\text{Ec.6. } R = \frac{\text{Valor simulado}}{\text{Valor calculado}} = \frac{q.\text{simulada}}{q.\text{calculada}}$$

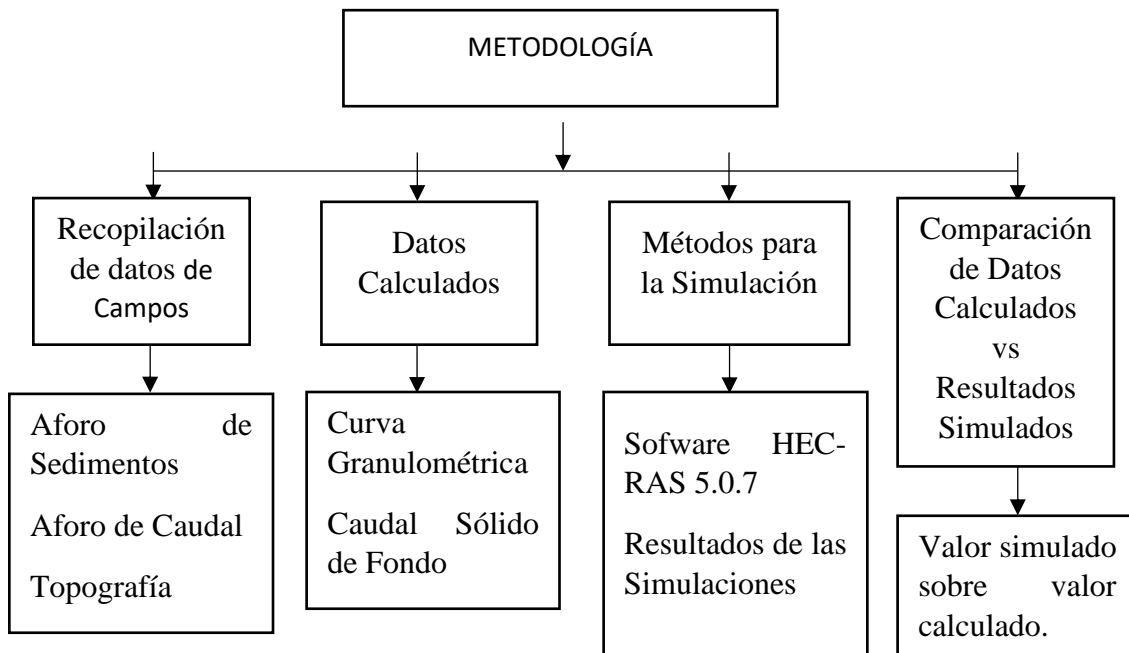
**Donde:**

**R** = Valor de discrepancia (adimensional).

**q. simulada** = Caudal sólido de fondo (ton/día).

**q. calculada** = Caudal sólido de fondo (ton/día).

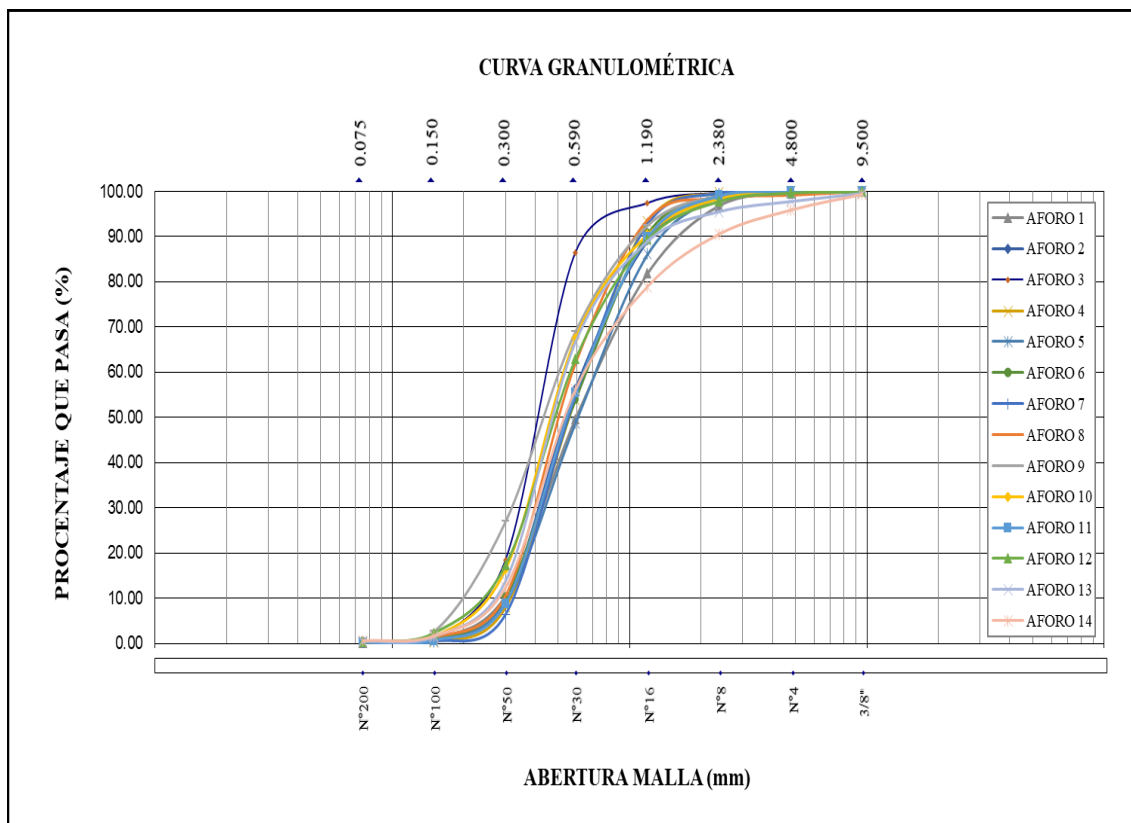
La metodología se divide en las siguientes partes:



#### 4.- RESULTADOS

Luego de finalizada la investigación se pudieron evidenciar los resultados, mismos que se proceden a detallar a continuación.

Se pudieron determinar las curvas granulométricas tomadas del lecho del río luego de recolectados los datos. Misma que mostró un D50 promedio de 0.533 mm, así se lograron generar las pertinentes simulaciones.



**Ilustración 4.** Curva Granulométrica del lecho del río.

**Elaborado por:** El Autor.

**Fuente:** SENAGUA/ El Autor.

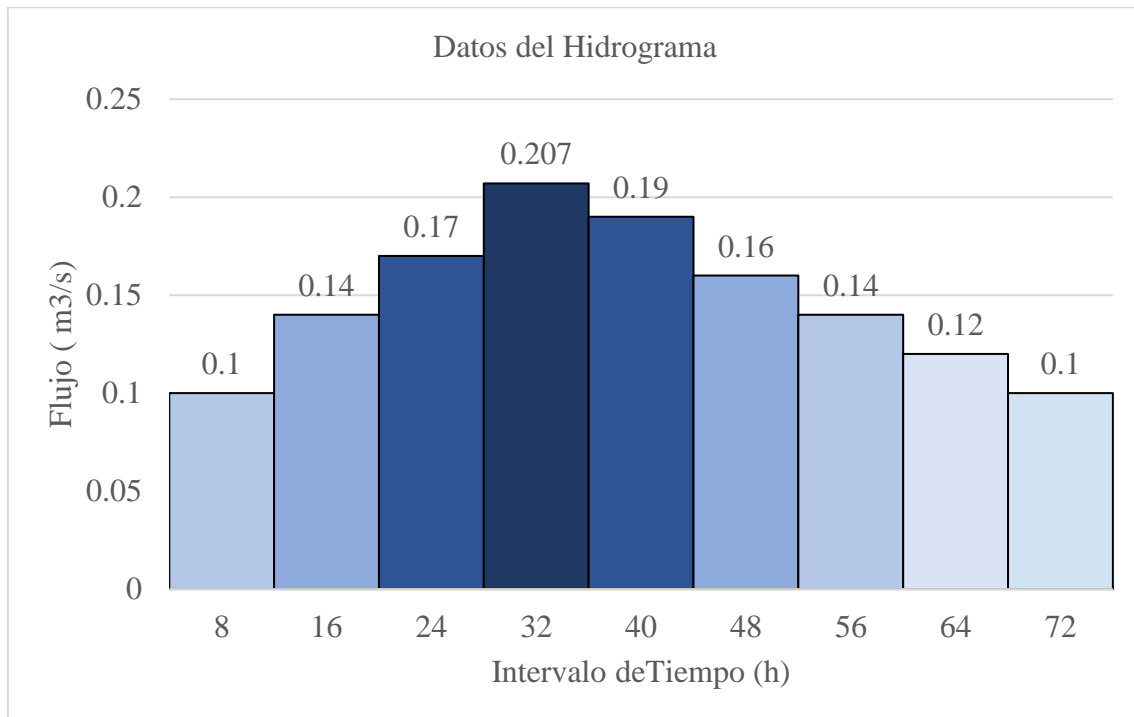
Luego de continuar con el trabajo se pudo realizar la toma de datos de campo en el lugar escogido para desarrollar el estudio, se obtuvo una muestra de sedimento en la parte transversal.

| <b>Datos de Aforos</b>      |            |                     |                       |                         |  |
|-----------------------------|------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|--|
| <b>Aforo</b>                |            | <b>Peso<br/>(P)</b> | <b>Caudal<br/>(Q)</b> | <b>Caudal<br/>(Qsf)</b> | <b>Concentración de<br/>Sedimentos<br/>(Qsf/Q)</b> |
| <b>Unidad de<br/>Medida</b> |            | <b>(gr)</b>         | <b>(m3/s)</b>         | <b>(ton/día)</b>        | <b>(mg/l)</b>                                      |
| <b>1</b>                    | 2/10/2019  | 269.560             | 0.207                 | 0.872                   | 4.214  |
| <b>2</b>                    | 17/10/2019 | 430.320             | 0.205                 | 1.236                   | 6.028  |
| <b>3</b>                    | 6/11/2019  | 298.010             | 0.210                 | 1.957                   | 9.321  |
| <b>4</b>                    | 20/11/2019 | 301.350             | 0.134                 | 0.971                   | 7.245  |
| <b>5</b>                    | 27/11/2019 | 326.300             | 0.239                 | 1.142                   | 4.783  |
| <b>6</b>                    | 4/12/2019  | 265.560             | 0.402                 | 0.506                   | 1.259  |
| <b>7</b>                    | 11/12/2019 | 60.190              | 0.205                 | 0.169                   | 0.828  |
| <b>8</b>                    | 18/12/2019 | 133.430             | 0.171                 | 0.425                   | 2.488  |
| <b>9</b>                    | 27/12/2019 | 189.850             | 0.416                 | 0.182                   | 0.437  |
| <b>10</b>                   | 3/1/2020   | 612.650             | 0.200                 | 1.266                   | 6.338  |
| <b>11</b>                   | 9/1/2020   | 377.040             | 0.230                 | 0.707                   | 3.071  |
| <b>12</b>                   | 15/01/2020 | 375.940             | 0.663                 | 1.125                   | 1.698  |
| <b>13</b>                   | 23/01/2020 | 2512.830            | 2.474                 | 14.924                  | 6.033  |
| <b>14</b>                   | 30/01/2020 | 2271.400            | 3.518                 | 18.194                  | 5.172  |

**Tabla 2.** Caudal observado en hora y media.

La presente tabla indica los resultados que se obtuvieron en las mediciones de campo, para lo cual se apoyó con el Helley-Smith, para la medir la granulometría, y la variación del caudal se implementó el método molinete para tener la medición de la variación del caudal.

Para obtener la simulación del transporte de sedimento de fondo en el área identificada, se procedió a la elaboración del Hidrograma quasi-no permanente para simular los caudales, eso incluye los incrementos computacionales.



**Ilustración 5.** Hidrograma flujo quasi-no permanente.

**Fuente:** El Autor.

Dentro del hidrograma se ubicó el caudal pico aforado con el método del molinete, tanto al inicio como al final del período de tiempo se ubicó un caudal mínimo para interpolar los valores de entre el pico y los mínimos. Ubicamos una duración de 8 horas para cada intervalo de flujo.

Para luego proceder a la comparación numérica obtenida in situ, mientras que las simulaciones efectuadas mostraron valores que son detallados en la tabla que a continuación se procede a indicar.

| <b>Río Garrapata</b>                |                                 |                         |                                  |                       |                    |               |
|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------|---------------|
| <b>Tipo de lecho: Arenoso</b>       |                                 |                         | <b>Pendiente del Lecho:0.002</b> |                       |                    |               |
| <b>Métodos de Cálculo (HEC-RAS)</b> | <b>Relación de Discrepancia</b> |                         |                                  |                       |                    |               |
|                                     | <b>R&lt;0.75</b>                | <b>0.75&lt;R&lt;1.5</b> | <b>0.5&lt;R&lt;2</b>             | <b>0.33&lt;R&lt;3</b> | <b>3&lt;R&lt;7</b> | <b>7&lt;R</b> |
| ACKERS-WHITE                        | 1                               | -                       | -                                | 1                     | 3                  | 9             |
| ENGELUND-HANSEN                     | -                               | 1                       | -                                | 3                     | 6                  | 5             |
| LAURSEN (COPELAND)                  | -                               | -                       | -                                | -                     | 2                  | 12            |
| MEYER-PETER-MULLER                  | 11                              | 2                       | 2                                | 3                     | -                  | -             |
| TOFFALETI                           | 9                               | -                       | -                                | -                     | 1                  | 4             |
| MPM-TOFFALETI                       | 10                              | -                       | 1                                | 2                     | -                  | 4             |
| YANG                                | 6                               | 1                       | 1                                | 2                     | 2                  | 4             |
| WILCOCK-CROWE                       | -                               | -                       | -                                | -                     | -                  | 14            |

**Tabla 3.** Fórmulas de carga total en términos de razón de discrepancia.

En la tabla precedente se procede a mostrar los datos de la relación existente entre el caudal sólido de fondo simulado y calculado apoyado en la metodología de relación de discrepancia. Se pudo observar que los resultados de la relación de discrepancia entre diferentes métodos de cálculo, nos estimó una gran parte de los aforos cerca de un rango

favorable de incertidumbre, el cual permitió elegir como el método de cálculo más favorabilidad, Engelund- Hansen, para un río de lecho arenoso.

**Tabla de comparación de resultados**

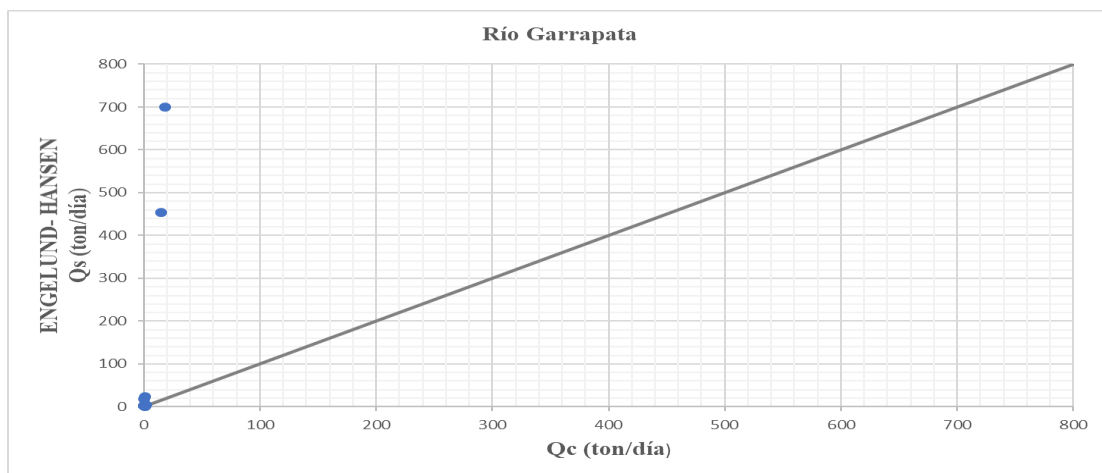
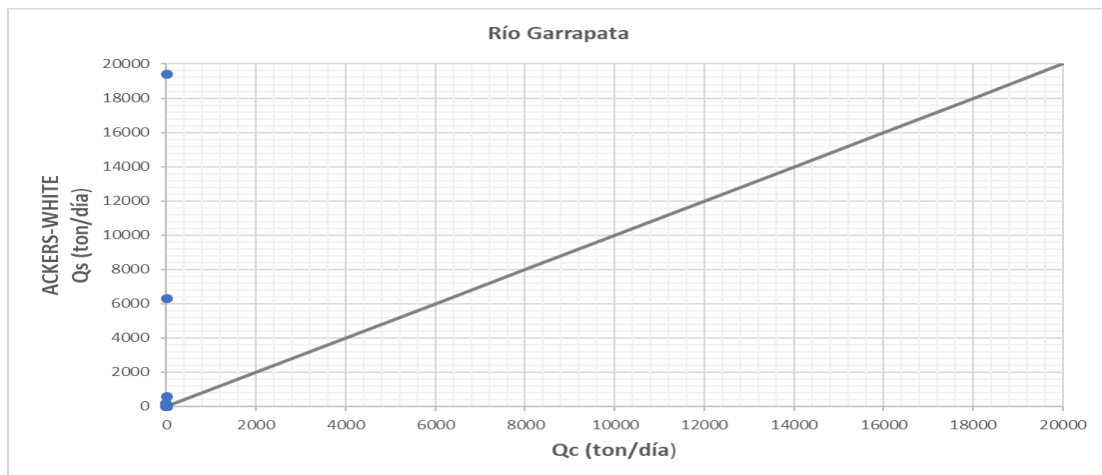
| <b>Comparación de Resultado</b>                 |            |                     |                     |                              |
|---|------------|---------------------|---------------------|------------------------------|
| <b>Método Engelud-Hansen vs Datos de Aforos</b> |            |                     |                     |                              |
| <b>Aforo</b>                                    |            | <b>Helley-Smith</b> | <b>HEC-RAS</b>      | <b>Razón de Discrepancia</b> |
|   |            | <b>Caudal (Qsf)</b> | <b>Caudal (Qsf)</b> |                              |
| <b>Unidad de Medida</b>                         |            | <b>(qc)</b>         | <b>(qs)</b>         | <b>(qs/qc)</b>               |
| <b>Unidad de Medida</b>                         |            | <b>(ton/día)</b>    | <b>(ton/día)</b>    | <b>Adimensional</b>          |
| <b>1</b>  | 2/10/2019  | 0.872               | 2.948               | 3.379                        |
| <b>2</b>  | 17/10/2019 | 1.236               | 3.379               | 2.734                        |
| <b>3</b>  | 6/11/2019  | 1.957               | 4.958               | 2.533                        |
| <b>4</b>  | 20/11/2019 | 0.971               | 1.177               | 1.212                        |
| <b>5</b>  | 27/11/2019 | 1.142               | 3.995               | 3.499                        |
| <b>6</b>  | 4/12/2019  | 0.506               | 2.674               | 5.284                        |
| <b>7</b>  | 11/12/2019 | 0.169               | 3.053               | 18.012                       |
| <b>8</b>  | 18/12/2019 | 0.425               | 2.511               | 5.909                        |
| <b>9</b>  | 27/12/2019 | 0.182               | 18.943              | 104.241                      |
| <b>10</b>                                       | 3/1/2020   | 1.266               | 3.911               | 3.090                        |
| <b>11</b>                                       | 9/1/2020   | 0.707               | 4.378               | 6.190                        |
| <b>12</b>                                       | 15/01/2020 | 1.125               | 23.965              | 21.299                       |
| <b>13</b>                                       | 23/01/2020 | 14.924              | 453.737             | 30.402                       |
| <b>14</b>                                       | 30/01/2020 | 18.194              | 699.929             | 38.471                       |

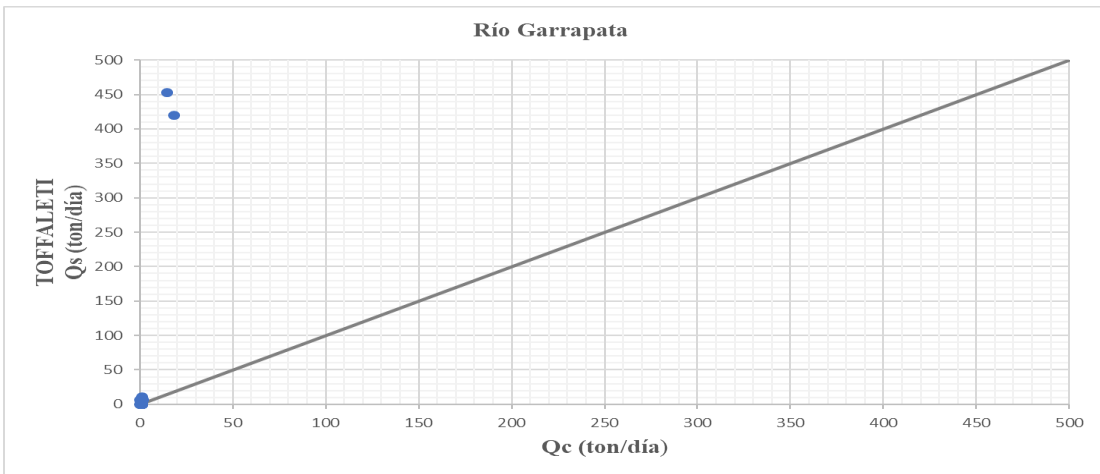
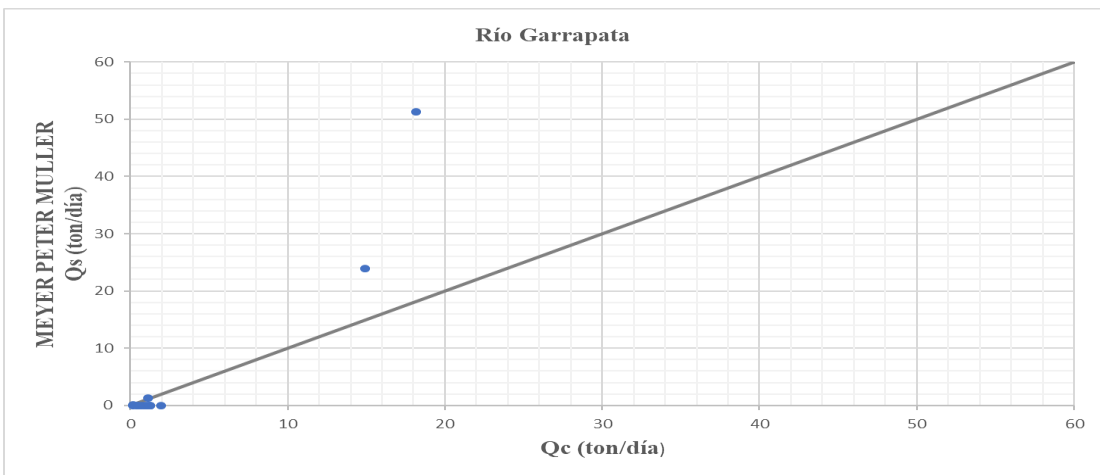
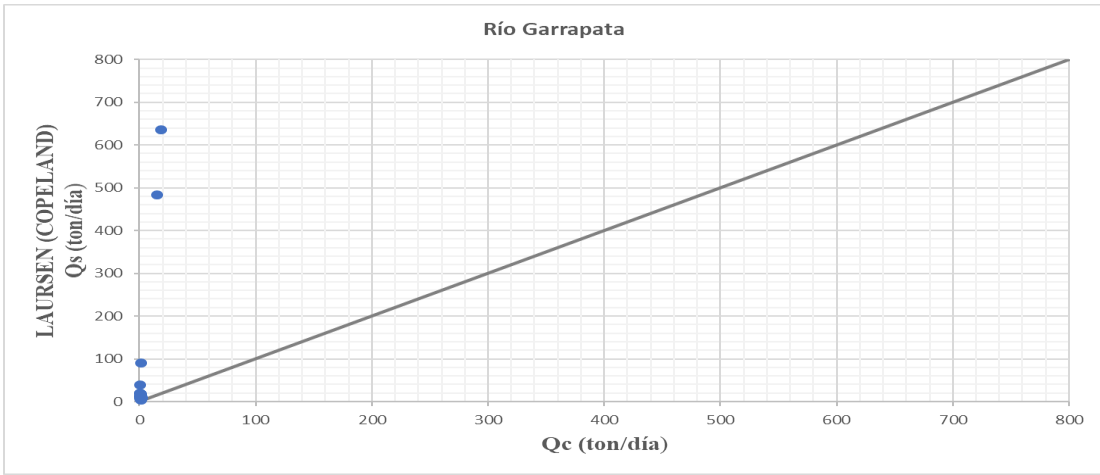
**Tabla 4.** Valores con el método (Razón de discrepancia)

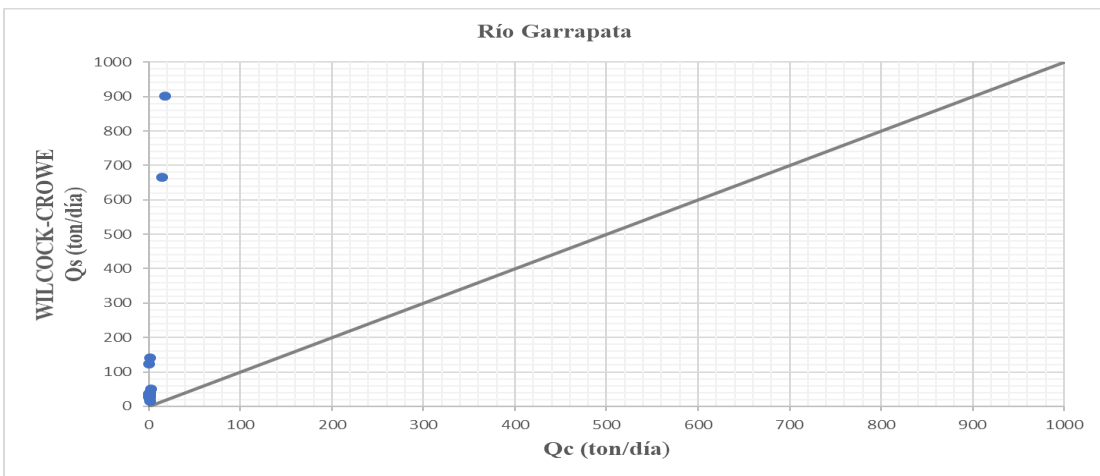
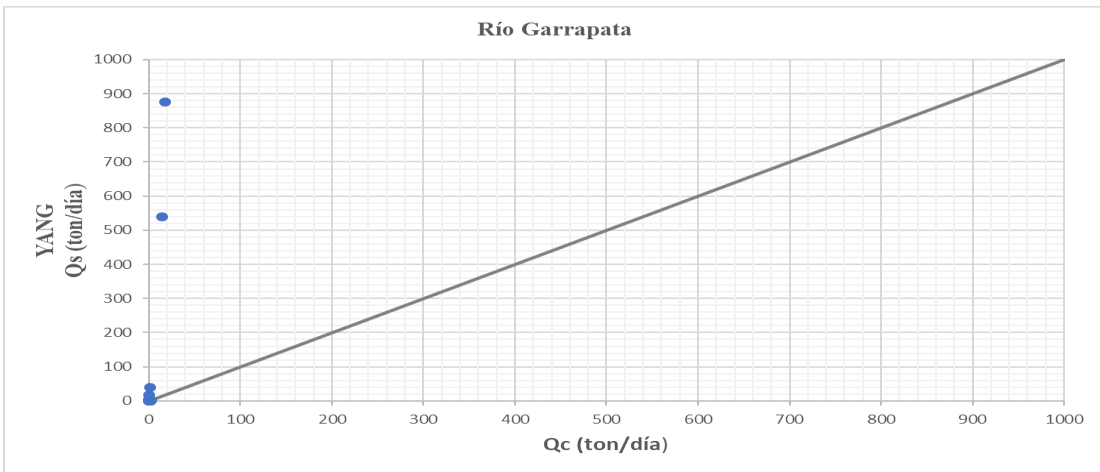
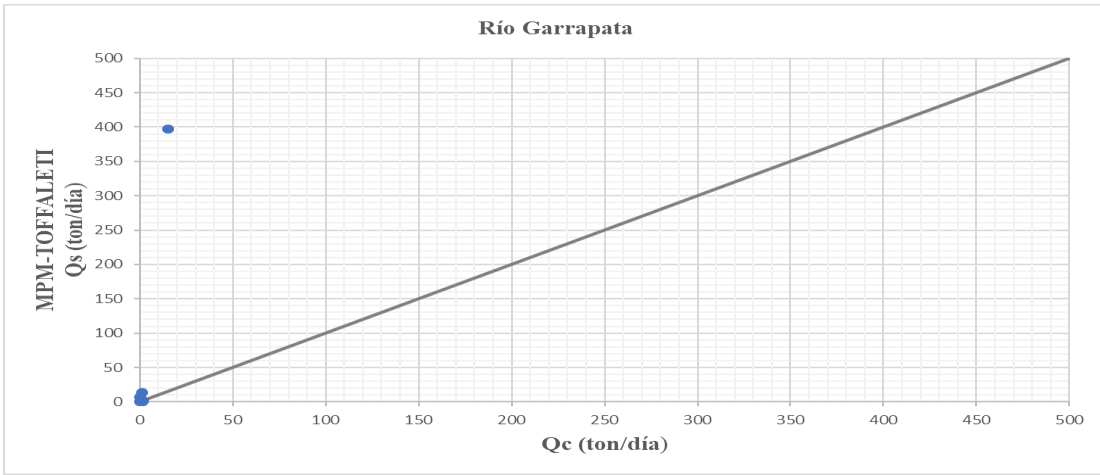
Los datos de la tabla reflejan la comparación de resultados producto de las simulaciones efectuadas en base a la granulometría del lecho, puede visualizarse claramente el valor de la Razón de Discrepancia (R).

Estos valores tienen un margen de error aceptable entre 0.33 a 7. Los valores presentados que se encuentran resaltados de color turquesa equivalen a los valores que se ajustaron de mejor manera al valor de error admisible. Queda así evidenciada la similitud en cuanto al grado de orden del valor de discrepancia y magnitud numérica.

Se procede a mostrar los gráficos obtenidos en función de los diversos métodos empleados en referencia al caudal sólido de fondo (ton/días).







## 5.- DISCUSIÓN

Para realizar la toma del muestreo de sedimentos de fondos se cuentan con muchos equipos para la realización de esta práctica, pero resulta algo complejo llegar a alcanzar una muestra representativa. Esto motiva a que la obtención de datos genere cierto grado de incertidumbre para tener esa información, debido que los equipos o muestreadores de campo suelen presentar ciertas desventajas. Aportes de (Hudson, 1993) en torno al caso del equipo Helley-Smith (con el cual se efectuó el muestreo) presenta una desventaja principal, genera perturbación en el flujo por la armadura del equipo, por tanto, cambian las condiciones hidráulicas, además existe otra desventaja, produce excavaciones en el lecho del afluente. Por su parte, en nuestro estudio se presenta perturbación en el flujo y excavación debido a que la morfología del lecho es arenosa.

En lo que concierne a la función del transporte de sedimentos fue escogida para el estudio del simulado, la ecuación generada por los autores *Engelund-Hansen* (1967), misma que es un procedimiento para la predicción de las relaciones etapa-descarga, al igual que el transporte de sedimentos en arroyos aluviales. Dichos principios de similitud hidráulica permiten desarrollar una hipótesis de trabajo para la descripción del total de resistencia al flujo, específicamente para cubiertas de dunas en lechos de arroyos, así como de descarga en el lecho de materiales. En efecto, los tamaños medios que se utilizaron entre 0,19 a 0,93 mm (*United States Department of Agriculture*, 1983), Esto genera cierto grado de incertidumbre ante los resultados que se alcanzaron en la simulación, motivada por la granulometría obtenida. En este sentido, la velocidad de caída de los sedimentos Toffaleti tiene un factor de forma 0.9, con una fuerza gravitatoria de 2.65 veces superior a la fuerza del agua (Brunner, 2016).

Se sugiere que, para futuras investigaciones, revisar literatura en torno a los estudios nombrados, por lo que también, se menciona, que puede ponerse a prueba la ecuación de

Ruby, debido que se considera idónea para arenas, limos y piedras. Apoyado en la simulación los autores (Wilcock, Pitlick, & Cui, 2009), quienes indican que, el transporte de sedimento tiene una tasa que depende directamente de la granulometría del lecho, a pesar de aquello, no puede determinarse si el sedimento proviene del lecho del río estudiado, puede darse que venga de aguas arriba. En función a los datos indicados en las simulaciones se pueden salir de los rangos del tramo de estudio, eso hace que los estudios de la materia tratada presentan un alto valor de incertidumbre.

## 6.- CONCLUSIONES

- Se procedió a la selección basado en la revisión de literatura y del software HEC-RAS con la finalidad de generar simulaciones hidrodinámicas que permita la determinación del caudal sólido transportado en el sector objeto de estudio.
- Se hizo uso del muestreador Helley-Smith para recolectar datos de campo (como es el caso de sedimento de fondo), para lo cual se recolectaron 14 muestras de material sólido. A dichas muestras se procedió a realizar ciertos procesos, como es el secado en laboratorio de suelo junto con el tamizado. El proceso consistió en tomar los pesos para realizar la curva granulométrica individuales de las muestras para efectuar las simulaciones. En este sentido, se efectuaron 14 tomas de aforo líquido apoyado en el método de molinete para determinar el caudal.
- La comparación de campo obtenidas frente a los simulados (en total 112 simulaciones con HEC-RAS), donde se hizo uso de los métodos (*Ackers-White*, *Engelund-Hansen*, *Laursen Copeland*, *Meyer Peter-Muller*, *Toffaleti*, *Mpm-Toffaleti*, *Yang* y *Wilcock-Crowe*) y se evaluaron con el ajuste basado en la razón discrepancia (Razón de Discrepancia R). Fueron considerados rangos entre (0.3 y 39) y (3 y 7) con la finalidad de discriminar los resultados aceptables de ajuste (observado y simulado). Se obtuvieron mejores resultados a través de la combinación del método Engelud-Hansen con la granulometría del lecho del río junto con el hidrograma combinado. Para el caudal sólido de fondo (ton/día) la razón de Discrepancia permitió apreciar que 9 de los 14 resultados están en un rango R de 1.212 y 6.190.
- Por último, los resultados obtenidos de las diversas simulaciones fueron pocos satisfactorios, esto permite reflejar las dificultades analizadas para la discusión de resultados. Se cita que en el caso de Helley Smith, la variación de esfuerzos cortantes la sección transversal; además, hay la necesidad de que se asuman hidrogramas para

desarrollar las simulaciones; también, los errores relacionados con la granulometría del fondo del río (material que es transportado al fondo no provenga probablemente del tramo del río estudiado, más bien proviene de secciones aguas arribas del río, puede ser de la misma cuenca). Todo esto reflejaría datos favorables, sin embargo, es factible de considerar a la granulometría del lecho tomada como base para realizar los cálculos.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Arcement., G., & Verne R., S. (1989). *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*. U.S. GEOL, 1–44. <https://doi.org/Report No. FHWA-TS-84-204>
- Bravo-Espinosa, M. Osterkamp, R. Lopes, V. (2004). Transporte de sedimentos en corrientes naturales: Revisión técnica de ecuaciones empíricas de predicción del arrastre de sedimentos de fondo Terra Latinoamericana, vol. 22, núm. 3, julio-septiembre, 2004, pp. 377-386 Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57322315.pdf>
- Brunner, G. W. (2015). *HEC-RAS 5.0 User's Manual* (p. 962). p. 962.
- Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. 539.
- Cabrera. J. Montalvo, C. (2012). Estudio de los procesos de transporte de sedimento en suspensión para el Proyecto de Generación Hidroeléctrica HIDRO-SANBARTOLO, mediante un modelo físico de lecho móvil. Universidad de Cuenca. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/781/1/ti906.pdf>
- Camas, R. Turrent, A Cortes, J. Livera, M. González, A. Villar, B. López, J. Espinoza, N. Cadena, P. (2012). Erosión del suelo, escurrimiento y pérdida de nitrógeno y fósforo en laderas bajo diferentes sistemas de manejo en Chiapas, México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc* vol.3 no.2 Texcoco mar./abr. 2012. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342012000200002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000200002)
- Cataño-Álvarez, S. Vélez-Upegui, J. (2016). Modelo conceptual agregado de transporte de sedimentos para cuencas de montaña en Antioquia- Colombia *Boletín de Ciencias de la*

- Tierra, núm. 39, enero, 2016, pp. 38-48 Universidad Nacional de Colombia Medellín, Colombia. <https://www.redalyc.org/pdf/1695/169543502005.pdf>
- Dominguez, L. (2012). *Análisis de Vulnerabilidades a nivel Municipal del cantón Chone. 1*, 115. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Vaca, A. (2012). *Estudio Hidrológico de inundaciones en la cuenca alta del río Chone (Subcuencas: Garrapata, Mosquito y Río Grande)*. Retrieved from <https://issuu.com/inamhi/docs/chone>
- Emmett, W. W. (1849). *Sediment-Trapping Characteristics of the Helley-Smith Bedload Sampler*. (Geological Survey professional paper; 1139), 1–54. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/pp/1139/report.pdf>
- Engelund, F. Hansen, E. (1967). Sediment transport in alluvial streams. Technical University of Denmark
- Haddadchi, A., Omid, M. H., & Sdeghani, A. A. (2013). Total load transport in gravel bed and sand bed rivers case study: Chelichay watershed. *International Journal of Sediment Research*, 28(1), 46–57. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(13\)60017-7](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(13)60017-7)
- Hernández, N. (2018). El río y su territorio. Espacio de libertad: un concepto de gestión. Terra Nueva Etapa. ISSN: 1012-7089 <https://www.redalyc.org/jatsRepo/721/72157132006/72157132006.pdf>
- Hudson, N. W. (1993). *Field measurement of soil erosion and runoff*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/T0848E/t0848e00.htm#TopOfPage>
- Martín-Vide, J. (2013). Erosión, sedimentación y restauración de ríos. Ejemplos de ingeniería e investigación Tecnología y Ciencias del Agua, vol. IV, núm. 5, noviembre-diciembre,

- 2013, pp. 5-18 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Morelos, México  
<https://www.redalyc.org/pdf/3535/353531985001.pdf>
- Minas, F. De, Medellín, S., Investigación, G. De, Hídrico, R., Cidera, A., Ingeniería, F. De, ...  
Autónoma, C. (2004). *Lilian Posada García XVI Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología Sociedad Colombiana de Ingenieros Sociedad de Ingenieros del Quindío Universidad del Quindío*. 1–10.
- Papanicolaou, A. N. T., Krallis, G., & Edinger, J. (2008). Sediment Transport Modeling Review — Current and. *Journal of Hydraulic Engineering*, (January), 1–14.  
<https://doi.org/10.1093/geront/gnp138>
- Restrepo, J. (2015). El impacto de la deforestación en la erosión de la cuenca del río Magdalena (1980-2010). *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 39(151):250-267, abril-junio de 2015. <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v39n151/v39n151a10.pdf>
- United States Department of Agriculture. (1983). SCS National Engineering Handbook, Section 3, Sedimentation, Chapter 4: Transmission of Sediment by Water.  
<https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=18375.wba>
- Vázquez, A. Ortiz, A. Palacio, A. Muñoz, C. (2018). Escorrentía y producción de sedimentos en encinares incendiados de la Sierra Madre Oriental, México. *Revista mexicana de ciencias forestales volumen 9 numero 48 México julio/agosto. 2018.*  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-11322018000400004](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322018000400004)
- Wilcock, P., Pitlick, J., & Cui, Y. (2009). Estimating Bed-Material Transport in Gravel-bed Rivers. *United States Department of Agriculture*, (1), 78.

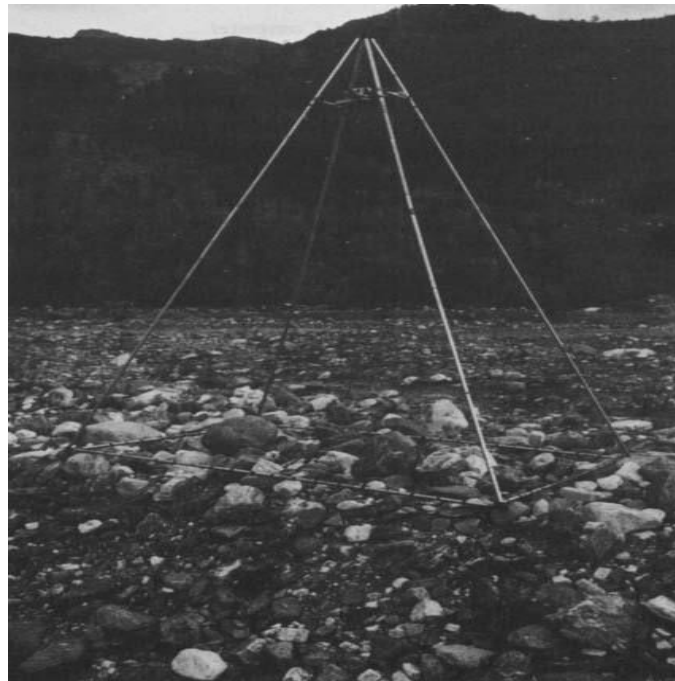
## 8.- ANEXOS

### Anexo 1.

| Sediment Material  | Grain Diameter Range(mm) | Geometric Median Diameter (mm) |
|--------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Clay               | 0.002-0.004              | 0.003                          |
| Very Fine Silt     | 0.004-0.008              | 0.008                          |
| Fine Silt          | 0.008-0.016              | 0.011                          |
| Medium Silt        | 0.016-0.032              | 0.023                          |
| Coarse Silt        | 0.032-0.0625             | 0.045                          |
| Very Fine Sand     | 0.0625-0.125             | 0.088                          |
| Fine Sand          | 0.125-0.250              | 0.177                          |
| Medium Sand        | 0.250-0.5                | 0.354                          |
| Coarse Sand        | 0.5-1.0                  | 0.707                          |
| Very Coarse Sand   | 1-2                      | 1.41                           |
| Very Fine Gravel   | 2-4                      | 2.83                           |
| Fine Gravel        | 4-8                      | 5.66                           |
| Medium Gravel      | 8-16                     | 11.3                           |
| Coarse Gravel      | 16-32                    | 22.6                           |
| Very Coarse Gravel | 32-64                    | 45.3                           |
| Small Cobbles      | 64-128                   | 90.5                           |
| Large Cobbles      | 128-256                  | 181                            |
| Small Boulders     | 256-512                  | 362                            |
| Medium Boulders    | 512-1024                 | 724                            |
| Large Boulders     | 1024-2048                | 1448                           |

Clasificación de tamaño de grano del material de sedimento

### Anexo 2.



Soporte para cámara pequeña, marco basal 1,33 x 2 m, marcas de 10 cm.

Anexo 3.

| Bed material                     | Median size of bed material (in millimeters) | Base <i>n</i> value                   |                             |
|----------------------------------|--|---------------------------------------|-----------------------------|
|                                  |  | Straight uniform channel <sup>1</sup> | Smooth channel <sup>2</sup> |
| Sand channels                    |  |                                       |                             |
| Sand <sup>3</sup> .....          | 0.2  | 0.012                                 | —                           |
|                                  | .3   | .017                                  | —                           |
|                                  | .4   | .020                                  | —                           |
|                                  | .5   | .022                                  | —                           |
|                                  | .6   | .023                                  | —                           |
|                                  | .8   | .025                                  | —                           |
|                                  | 1.0  | .026                                  | —                           |
| Stable channels and flood plains |  |                                       |                             |
| Concrete .....                   | —  | 0.012–0.018                           | 0.011                       |
| Rock cut .....                   | —  | —                                     | .025                        |
| Firm soil .....                  | —  | 0.025–0.032                           | .020                        |
| Coarse sand .....                | 1–2  | 0.026–0.035                           | —                           |
| Fine gravel .....                | —  | —                                     | .024                        |
| Gravel .....                     | 2–64   | 0.028–0.035                           | —                           |
| Coarse gravel .....              | —  | —                                     | .026                        |
| Cobble .....                     | 64–256                                       | 0.030–0.050                           | —                           |
| Boulder .....                    | >256   | 0.040–0.070                           | —                           |

**Tabla 1.** Valores Base de la *n* del Coeficiente de Manning.

## Anexo 4.

| Channel conditions                           |                          | $n$ value adjustment <sup>1</sup> | Example  |
|--|--------------------------|-----------------------------------|--|
| Degree of irregularity ( $n_1$ )             | Smooth                   | 0.000                             | Compares to the smoothest channel attainable in a given bed material.  |
|  | Minor                    | 0.001–0.005                       | Compares to carefully dredged channels in good condition but having slightly eroded or scoured side slopes.  |
|  | Moderate                 | 0.006–0.010                       | Compares to dredged channels having moderate to considerable bed roughness and moderately sloughed or eroded side slopes.  |
|  | Severe                   | 0.011–0.020                       | Badly sloughed or scalloped banks of natural streams; badly eroded or sloughed sides of canals or drainage channels; unshaped, jagged, and irregular surfaces of channels in rock.   |
| Variation in channel cross section ( $n_2$ ) | Gradual                  | 0.000                             | Size and shape of channel cross sections change gradually.   |
|  | Alternating occasionally | 0.001–0.005                       | Large and small cross sections alternate occasionally, or the main flow occasionally shifts from side to side owing to changes in cross-sectional shape.   |
|  | Alternating frequently   | 0.010–0.015                       | Large and small cross sections alternate frequently, or the main flow frequently shifts from side to side owing to changes in cross-sectional shape.   |
| Effect of obstruction ( $n_3$ )              | Negligible               | 0.000–0.004                       | A few scattered obstructions, which include debris deposits, stumps, exposed roots, logs, piers, or isolated boulders, that occupy less than 5 percent of the cross-sectional area.  |
|  | Minor                    | 0.005–0.015                       | Obstructions occupy less than 15 percent of the cross-sectional area, and the spacing between obstructions is such that the sphere of influence around one obstruction does not extend to the sphere of influence around another obstruction. Smaller adjustments are used for curved smooth-surfaced objects than are used for sharp-edged angular objects.   |
|  | Appreciable              | 0.020–0.030                       | Obstructions occupy from 15 to 50 percent of the cross-sectional area, or the space between obstructions is small enough to cause the effects of several obstructions to be additive, thereby blocking an equivalent part of a cross section.  |
|  | Severe                   | 0.040–0.050                       | Obstructions occupy more than 50 percent of the cross-sectional area, or the space between obstructions is small enough to cause turbulence across most of the cross section.  |
| Amount of vegetation ( $n_4$ )               | Small                    | 0.002–0.010                       | Dense growths of flexible turf grass, such as Bermuda, or weeds growing where the average depth of flow is at least two times the height of the vegetation; supple tree seedlings such as willow, cottonwood, arrowweed, or saltcedar growing where the average depth of flow is at least three times the height of the vegetation.  |
|  | Medium                   | 0.010–0.025                       | Turf grass growing where the average depth of flow is from one to two times the height of the vegetation; moderately dense stemmy grass, weeds, or tree seedlings growing where the average depth of flow is from two to three times the height of the vegetation; brushy, moderately dense vegetation, similar to 1- to 2-year-old willow trees in the dormant season, growing along the banks, and no significant vegetation is evident along the channel bottoms where the hydraulic radius exceeds 2 ft. |
|  | Large                    | 0.025–0.050                       | Turf grass growing where the average depth of flow is about equal to the height of the vegetation; 8- to 10-year-old willow or cottonwood trees intergrown with some weeds and brush (none of the vegetation in foliage) where the hydraulic radius exceeds 2 ft; bushy willows about 1 year old intergrown with some weeds along side slopes (all vegetation in full foliage), and no significant vegetation exists along channel bottoms where the hydraulic radius is greater than 2 ft.                  |
|  | Very large               | 0.050–0.100                       | Turf grass growing where the average depth of flow is less than half the height of the vegetation; bushy willow trees about 1 year old intergrown with weeds along side slopes (all vegetation in full foliage), or dense cattails growing along channel bottom; trees intergrown with weeds and brush (all vegetation in full foliage).   |
| Degree of meandering <sup>2</sup> ( $m$ )    | Minor                    | 1.00                              | Ratio of the channel length to valley length is 1.0 to 1.2.  |
|  | Appreciable              | 1.15                              | Ratio of the channel length to valley length is 1.2 to 1.5.  |
|  | Severe                   | 1.30                              | Ratio of the channel length to valley length is greater than 1.5.  |

<sup>1</sup> Adjustments for degree of irregularity, variations in cross section, effect of obstructions, and vegetation are added to the base  $n$  value (table 1) before multiplying by the adjustment for meander.

<sup>2</sup> Adjustment values apply to flow confined in the channel and do not apply where downvalley flow crosses meanders.

**Tabla 2.** Valores de ajuste para factores que afectan la rugosidad de un canal.

**Anexo 5.**



Equipo para la medición de caudal (Molinete).

**Anexo 6.**



Medición de Aforo líquido superficial (método Molinete).

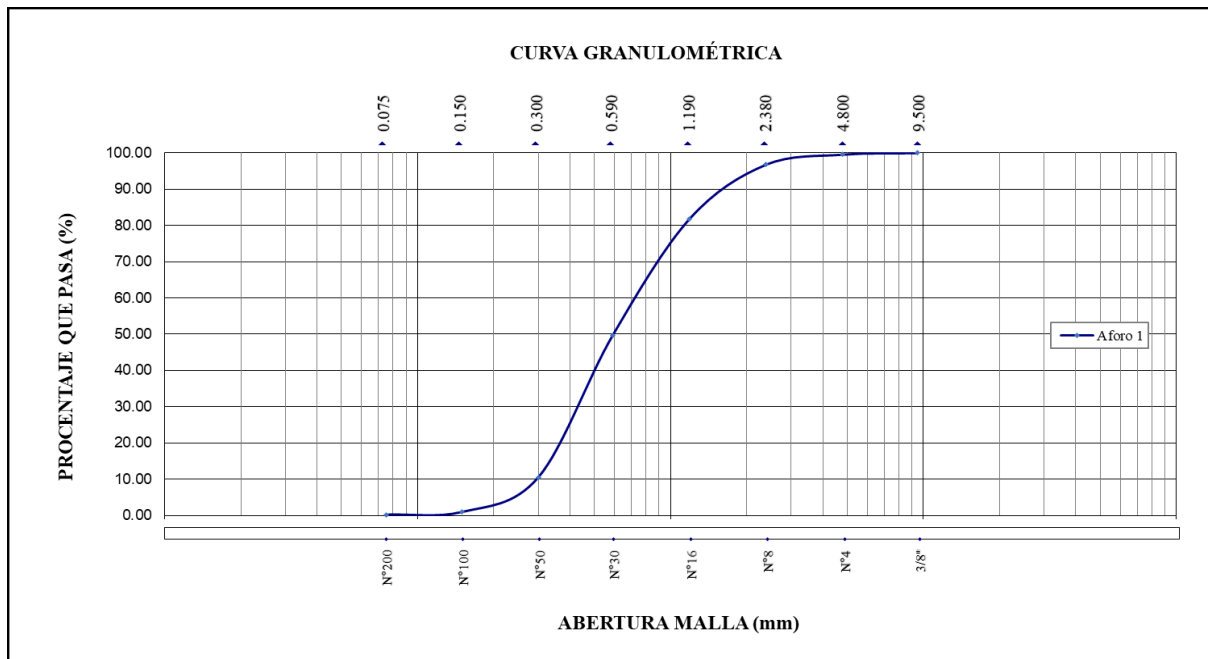
## Anexo 7.



Tamices utilizados para determinar la granulometría del sedimento.

**Anexo 8.**

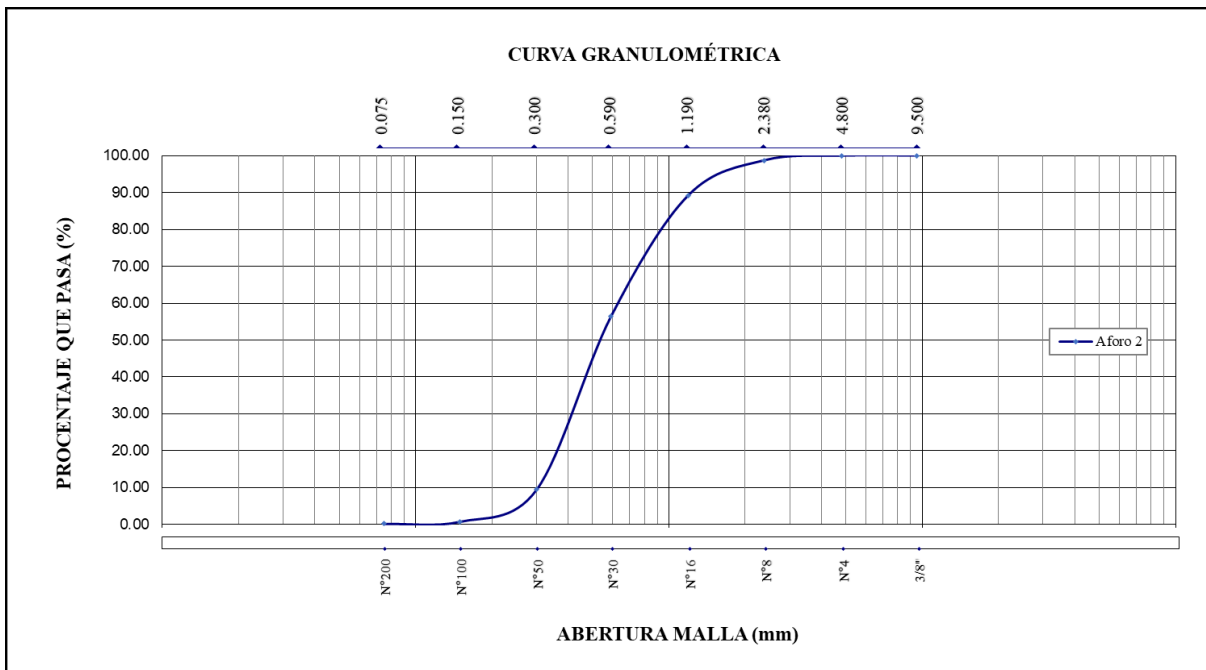
| <b>Granulometría</b> |                      |                                    |                                     |                               |                 |
|----------------------|----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| <b>Tamiz</b>         | <b>Apertura (mm)</b> | <b>Masa del Suelo Retenido (g)</b> | <b>Masa del Suelo Retenido (kg)</b> | <b>Retenido Acumulado (%)</b> | <b>Pasa (%)</b> |
| <b>3/8"</b>          | 9.500                | -                                  | -                                   | -                             | <b>100.00</b>   |
| <b>N°4</b>           | 4.800                | 1.120                              | 0.0011                              | <b>0.42</b>                   | <b>99.58</b>    |
| <b>N°8</b>           | 2.380                | 7.630                              | 0.0076                              | <b>2.83</b>                   | <b>96.75</b>    |
| <b>N°16</b>          | 1.190                | 40.170                             | 0.0402                              | <b>14.90</b>                  | <b>81.85</b>    |
| <b>N°30</b>          | 0.590                | 86.800                             | 0.0868                              | <b>32.20</b>                  | <b>49.65</b>    |
| <b>N°50</b>          | 0.300                | 105.420                            | 0.1054                              | <b>39.11</b>                  | <b>10.54</b>    |
| <b>N°100</b>         | 0.150                | 25.850                             | 0.0259                              | <b>9.59</b>                   | <b>0.95</b>     |
| <b>N°200</b>         | 0.075                | 2.040                              | 0.0020                              | <b>0.76</b>                   | <b>0.20</b>     |
| <b>FONDO</b>         | ≥0.075               | 0.530                              | 0.0005                              | <b>0.20</b>                   |                 |
| <b>TOTAL</b>         |                      | 269.560                            | 0.2696                              |                               |                 |



Granulometría de la primera muestra recolectada.

**Anexo 9.**

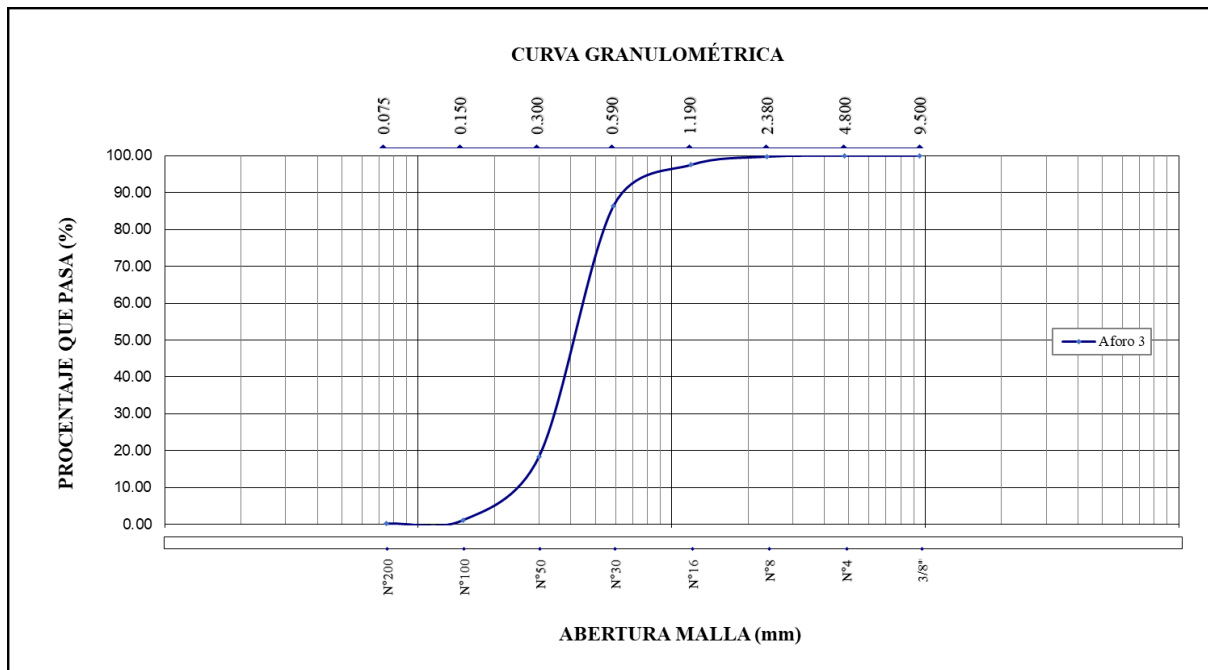
| GRANULOMETRÍA |               |                             |                              |                        |          |
|---------------|---------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------|----------|
| Tamiz         | Apertura (mm) | Masa del Suelo Retenido (g) | Masa del Suelo Retenido (kg) | Retenido Acumulado (%) | Pasa (%) |
| 3/8"          | 9.500         | -                           | -                            | -                      | 100.00   |
| N°4           | 4.800         | 0.190                       | 0.0002                       | 0.04                   | 99.96    |
| N°8           | 2.380         | 5.370                       | 0.0054                       | 1.25                   | 98.71    |
| N°16          | 1.190         | 40.920                      | 0.0409                       | 9.51                   | 89.20    |
| N°30          | 0.590         | 141.110                     | 0.1411                       | 32.79                  | 56.41    |
| N°50          | 0.300         | 201.980                     | 0.2020                       | 46.94                  | 9.47     |
| N°100         | 0.150         | 37.250                      | 0.0373                       | 8.66                   | 0.81     |
| N°200         | 0.075         | 2.620                       | 0.0026                       | 0.61                   | 0.20     |
| FONDO         | ≥0.075        | 0.880                       | 0.0009                       | 0.20                   |          |
| TOTAL         |               | 430.320                     | 0.4303                       |                        |          |



Granulometría de la segunda muestra recolectada.

**Anexo 10.**

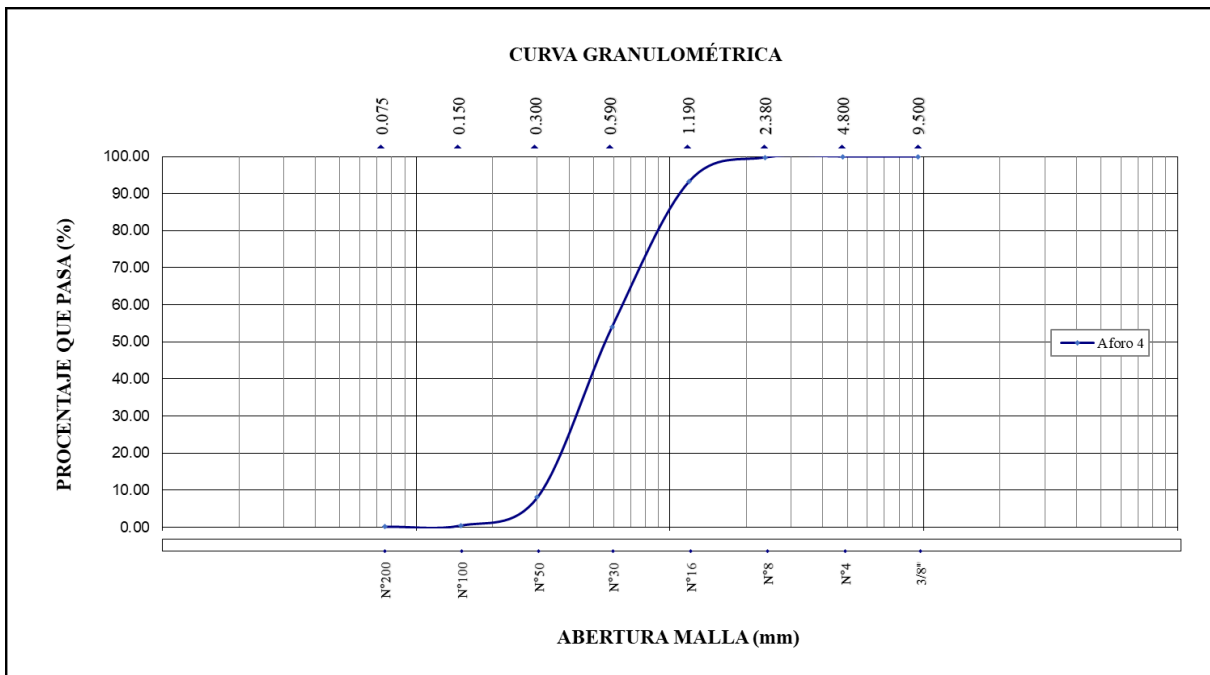
| GRANULOMETRÍA |               |                             |                              |                        |          |
|---------------|---------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------|----------|
| Tamiz         | Apertura (mm) | Masa del Suelo Retenido (g) | Masa del Suelo Retenido (kg) | Retenido Acumulado (%) | Pasa (%) |
| 3/8"          | 9.500         | -                           | -                            | -                      | 100.00   |
| N°4           | 4.800         | -                           | -                            | -                      | 100.00   |
| N°8           | 2.380         | 0.770                       | 0.0008                       | 0.26                   | 99.74    |
| N°16          | 1.190         | 6.640                       | 0.0066                       | 2.23                   | 97.51    |
| N°30          | 0.590         | 33.020                      | 0.0330                       | 11.08                  | 86.43    |
| N°50          | 0.300         | 202.740                     | 0.2027                       | 68.03                  | 18.40    |
| N°100         | 0.150         | 51.590                      | 0.0516                       | 17.31                  | 1.09     |
| N°200         | 0.075         | 2.650                       | 0.0027                       | 0.89                   | 0.20     |
| FONDO         | ≥0.075        | 0.600                       | 0.0006                       | 0.20                   |          |
| TOTAL         |               | 298.010                     | 0.2980                       |                        |          |



Granulometría de la tercera muestra recolectada.

**Anexo 11.**

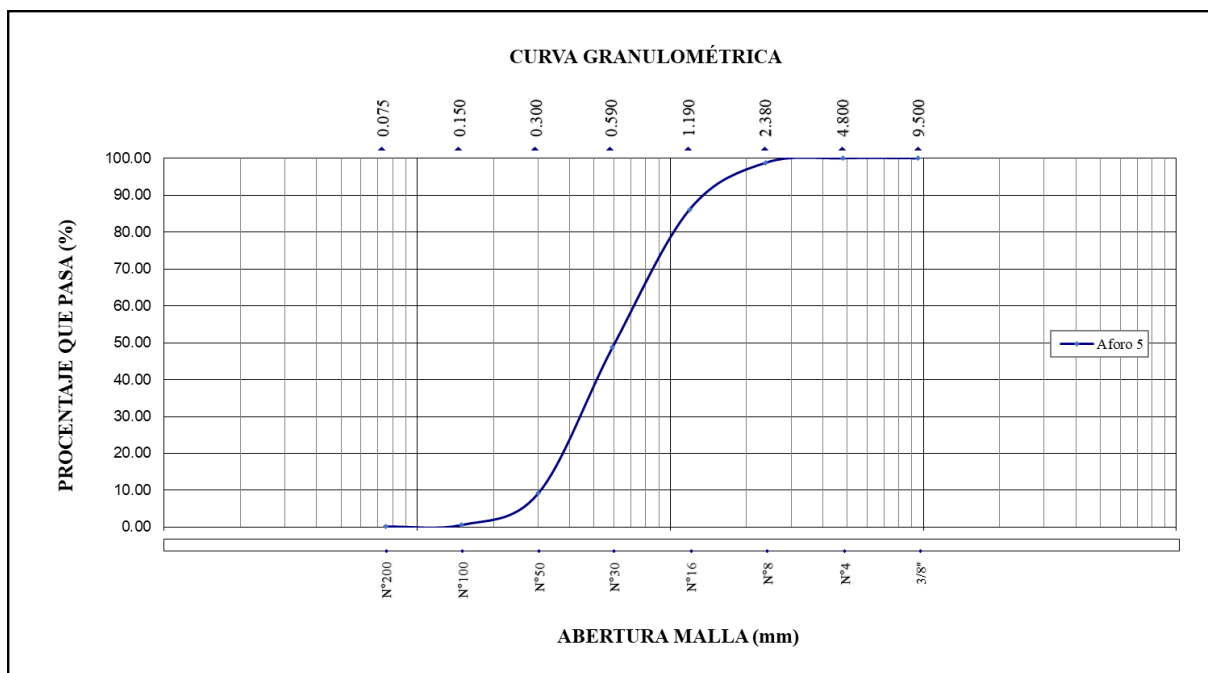
| GRANULOMETRÍA |               |                             |                              |                        |          |
|---------------|---------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------|----------|
| Tamiz         | Apertura (mm) | Masa del Suelo Retenido (g) | Masa del Suelo Retenido (kg) | Retenido Acumulado (%) | Pasa (%) |
| 3/8"          | 9.500         | -                           | -                            | -                      | 100.00   |
| N°4           | 4.800         | -                           | -                            | -                      | 100.00   |
| N°8           | 2.380         | 0.810                       | 0.0008                       | 0.27                   | 99.73    |
| N°16          | 1.190         | 19.380                      | 0.0194                       | 6.43                   | 93.30    |
| N°30          | 0.590         | 118.370                     | 0.1184                       | 39.28                  | 54.02    |
| N°50          | 0.300         | 138.410                     | 0.1384                       | 45.93                  | 8.09     |
| N°100         | 0.150         | 23.080                      | 0.0231                       | 7.66                   | 0.43     |
| N°200         | 0.075         | 0.900                       | 0.0009                       | 0.30                   | 0.13     |
| FONDO         | ≥0.075        | 0.400                       | 0.0004                       | 0.13                   |          |
| TOTAL         |               | 301.350                     | 0.3014                       |                        |          |



Granulometría de la cuarta muestra recolectada.

**Anexo 12.**

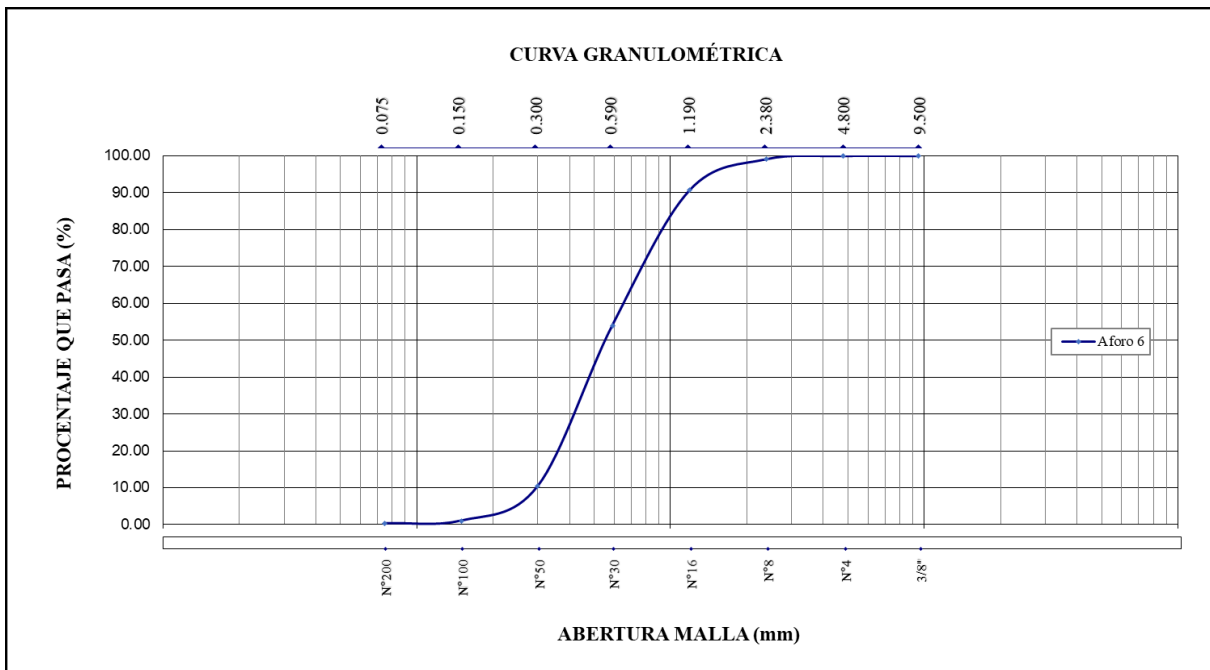
| GRANULOMETRÍA |               |                             |                              |                        |          |
|---------------|---------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------|----------|
| Tamiz         | Apertura (mm) | Masa del Suelo Retenido (g) | Masa del Suelo Retenido (kg) | Retenido Acumulado (%) | Pasa (%) |
| 3/8"          | 9.500         | -                           | -                            | -                      | 100.00   |
| N°4           | 4.800         | -                           | -                            | -                      | 100.00   |
| N°8           | 2.380         | 4.020                       | 0.0040                       | 1.23                   | 98.77    |
| N°16          | 1.190         | 41.220                      | 0.0412                       | 12.63                  | 86.14    |
| N°30          | 0.590         | 122.040                     | 0.1220                       | 37.40                  | 48.73    |
| N°50          | 0.300         | 129.200                     | 0.1292                       | 39.60                  | 9.14     |
| N°100         | 0.150         | 27.770                      | 0.0278                       | 8.51                   | 0.63     |
| N°200         | 0.075         | 1.460                       | 0.0015                       | 0.45                   | 0.18     |
| FONDO         | ≥0.075        | 0.590                       | 0.0006                       | 0.18                   |          |
| TOTAL         |               | 326.300                     | 0.3263                       |                        |          |



Granulometría de la quinta muestra recolectada.

**Anexo 13.**

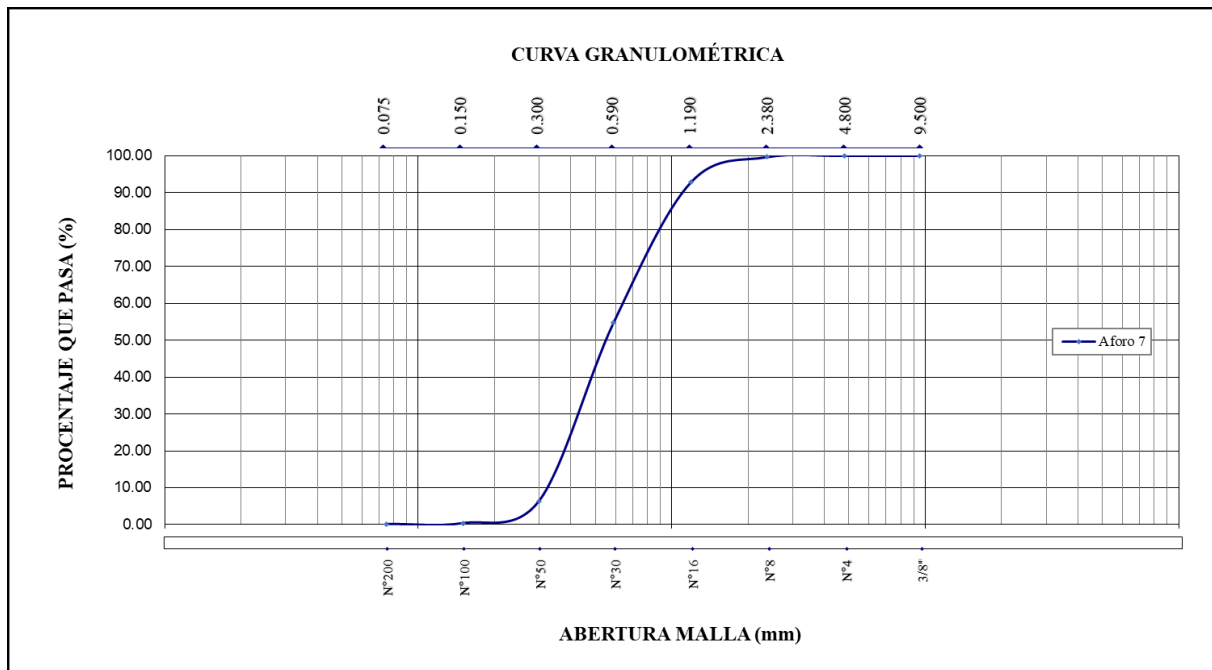
| GRANULOMETRÍA |               |                             |                              |                        |          |
|---------------|---------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------|----------|
| Tamiz         | Apertura (mm) | Masa del Suelo Retenido (g) | Masa del Suelo Retenido (kg) | Retenido Acumulado (%) | Pasa (%) |
| 3/8"          | 9.500         | -                           | -                            | -                      | 100.00   |
| N°4           | 4.800         | -                           | -                            | -                      | 100.00   |
| N°8           | 2.380         | 2.330                       | 0.0023                       | 0.88                   | 99.12    |
| N°16          | 1.190         | 22.380                      | 0.0224                       | 8.43                   | 90.70    |
| N°30          | 0.590         | 97.660                      | 0.0977                       | 36.78                  | 53.92    |
| N°50          | 0.300         | 115.720                     | 0.1157                       | 43.58                  | 10.34    |
| N°100         | 0.150         | 24.750                      | 0.0248                       | 9.32                   | 1.02     |
| N°200         | 0.075         | 1.920                       | 0.0019                       | 0.72                   | 0.30     |
| FONDO         | ≥0.075        | 0.800                       | 0.0008                       | 0.30                   |          |
| TOTAL         |               | 265.560                     | 0.2656                       |                        |          |



Granulometría de la sexta muestra recolectada.

**Anexo 14.**

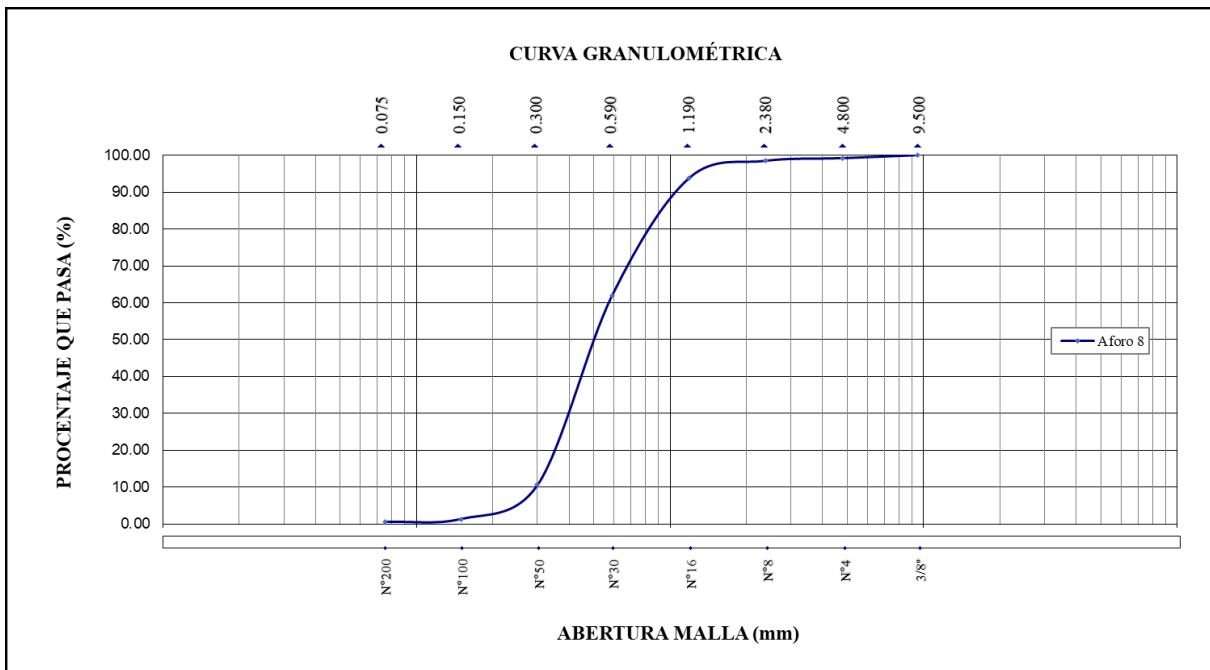
| GRANULOMETRÍA |               |                             |                              |                        |          |
|---------------|---------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------|----------|
| Tamiz         | Apertura (mm) | Masa del Suelo Retenido (g) | Masa del Suelo Retenido (kg) | Retenido Acumulado (%) | Pasa (%) |
| 3/8"          | 9.500         | -                           | -                            | -                      | 100.00   |
| N°4           | 4.800         | -                           | -                            | -                      | 100.00   |
| N°8           | 2.380         | 0.200                       | 0.0002                       | 0.33                   | 99.67    |
| N°16          | 1.190         | 4.110                       | 0.0041                       | 6.83                   | 92.84    |
| N°30          | 0.590         | 22.930                      | 0.0229                       | 38.10                  | 54.74    |
| N°50          | 0.300         | 29.100                      | 0.0291                       | 48.35                  | 6.40     |
| N°100         | 0.150         | 3.640                       | 0.0036                       | 6.05                   | 0.35     |
| N°200         | 0.075         | 0.140                       | 0.0001                       | 0.23                   | 0.12     |
| FONDO         | ≥0.075        | 0.070                       | 0.0001                       | 0.12                   |          |
| TOTAL         |               | 60.190                      | 0.0602                       |                        |          |



Granulometría de la séptima muestra recolectada.

**Anexo 15.**

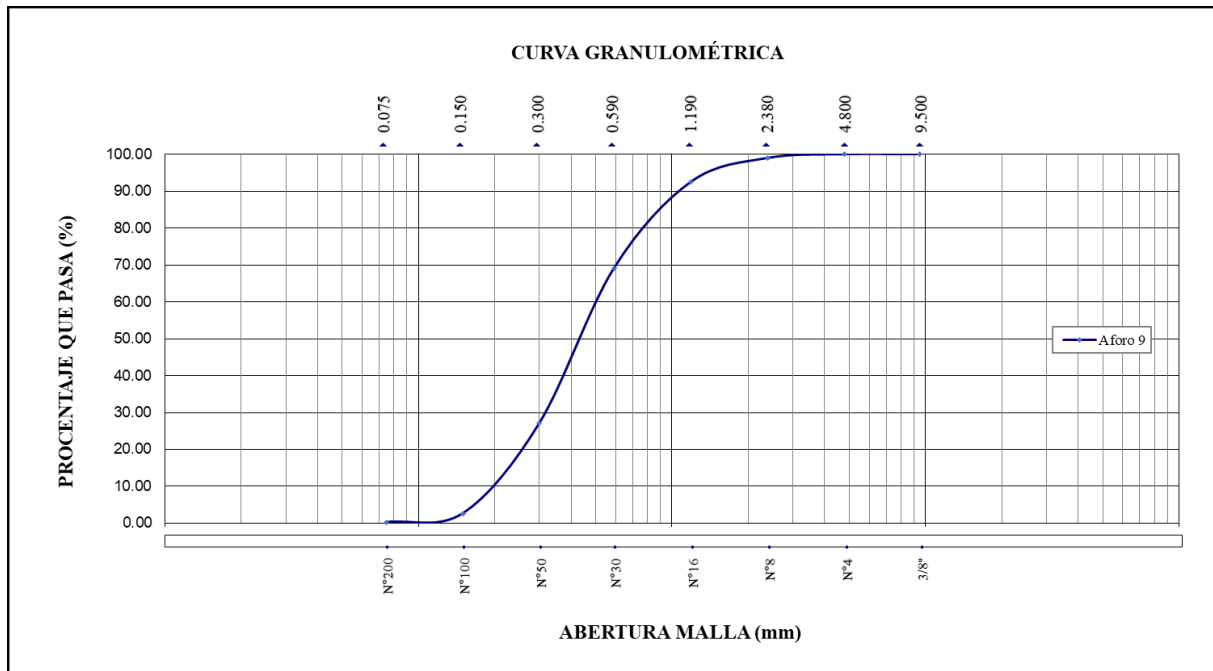
| GRANULOMETRÍA |               |                             |                              |                        |          |
|---------------|---------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------|----------|
| Tamiz         | Apertura (mm) | Masa del Suelo Retenido (g) | Masa del Suelo Retenido (kg) | Retenido Acumulado (%) | Pasa (%) |
| 3/8"          | 9.500         | -                           | -                            | -                      | 100.00   |
| N°4           | 4.800         | 1.090                       | 0.0011                       | 0.82                   | 99.18    |
| N°8           | 2.380         | 0.950                       | 0.0010                       | 0.71                   | 98.47    |
| N°16          | 1.190         | 6.220                       | 0.0062                       | 4.66                   | 93.81    |
| N°30          | 0.590         | 42.550                      | 0.0426                       | 31.89                  | 61.92    |
| N°50          | 0.300         | 68.460                      | 0.0685                       | 51.31                  | 10.61    |
| N°100         | 0.150         | 12.370                      | 0.0124                       | 9.27                   | 1.34     |
| N°200         | 0.075         | 1.090                       | 0.0011                       | 0.82                   | 0.52     |
| FONDO         | ≥0.075        | 0.700                       | 0.0007                       | 0.52                   |          |
| TOTAL         |               | 133.430                     | 0.1334                       |                        |          |



Granulometría de la octava muestra recolectada.

**Anexo 16.**

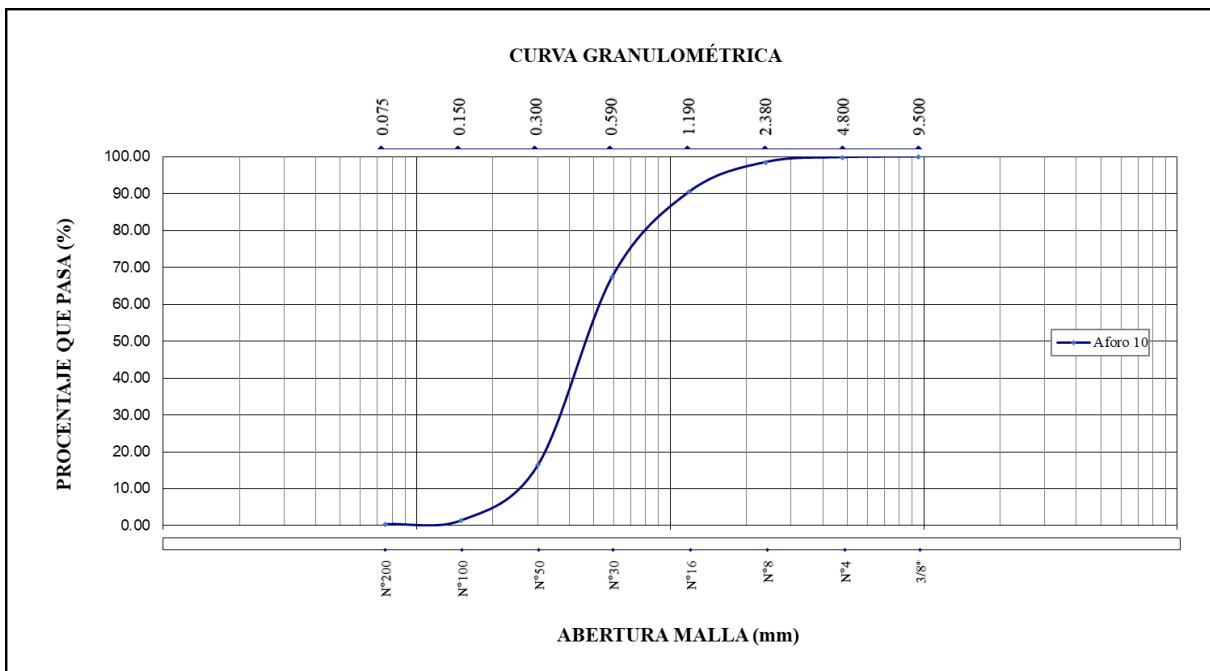
| Granulometría |               |                             |                              |                        |          |
|---------------|---------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------|----------|
| Tamiz         | Apertura (mm) | Masa del Suelo Retenido (g) | Masa del Suelo Retenido (kg) | Retenido Acumulado (%) | Pasa (%) |
| 3/8"          | 9.500         | -                           | -                            | -                      | 100.00   |
| N°4           | 4.800         | -                           | -                            | -                      | 100.00   |
| N°8           | 2.380         | 1.960                       | 0.0020                       | 1.03                   | 98.97    |
| N°16          | 1.190         | 12.240                      | 0.0122                       | 6.45                   | 92.52    |
| N°30          | 0.590         | 44.710                      | 0.0447                       | 23.55                  | 68.97    |
| N°50          | 0.300         | 79.680                      | 0.0797                       | 41.97                  | 27.00    |
| N°100         | 0.150         | 46.260                      | 0.0463                       | 24.37                  | 2.63     |
| N°200         | 0.075         | 4.550                       | 0.0046                       | 2.40                   | 0.24     |
| FONDO         | ≥0.075        | 0.450                       | 0.0005                       | 0.24                   |          |
| TOTAL         |               | 189.850                     | 0.1899                       |                        |          |



Granulometría de la novena muestra recolectada.

**Anexo 17.**

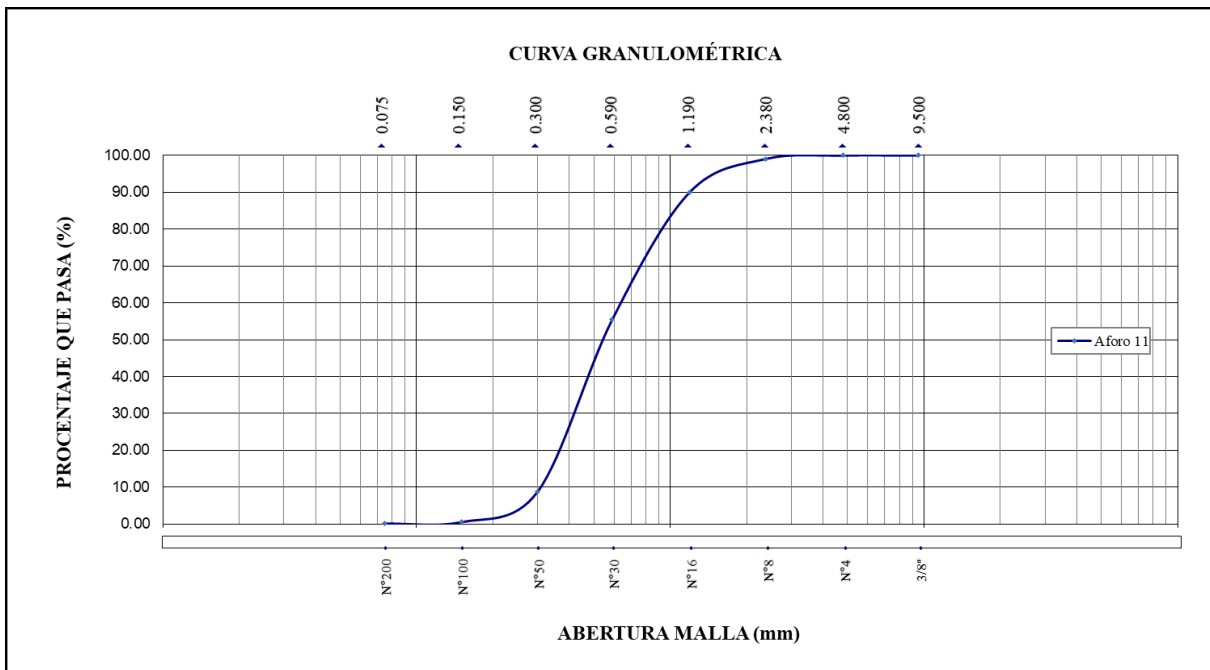
| Granulometría |               |                             |                              |                        |          |
|---------------|---------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------|----------|
| Tamiz         | Apertura (mm) | Masa del Suelo Retenido (g) | Masa del Suelo Retenido (kg) | Retenido Acumulado (%) | Pasa (%) |
| 3/8"          | 9.500         | -                           | -                            | -                      | 100.00   |
| N°4           | 4.800         | 0.850                       | 0.0009                       | 0.14                   | 99.86    |
| N°8           | 2.380         | 7.980                       | 0.0080                       | 1.30                   | 98.56    |
| N°16          | 1.190         | 48.760                      | 0.0488                       | 7.96                   | 90.60    |
| N°30          | 0.590         | 141.050                     | 0.1411                       | 23.02                  | 67.58    |
| N°50          | 0.300         | 313.310                     | 0.3133                       | 51.14                  | 16.44    |
| N°100         | 0.150         | 91.620                      | 0.0916                       | 14.95                  | 1.48     |
| N°200         | 0.075         | 6.570                       | 0.0066                       | 1.07                   | 0.41     |
| FONDO         | ≥0.075        | 2.510                       | 0.0025                       | 0.41                   |          |
| TOTAL         |               | 612.650                     | 0.6127                       |                        |          |



Granulometría de la décima muestra recolectada.

**Anexo 18.**

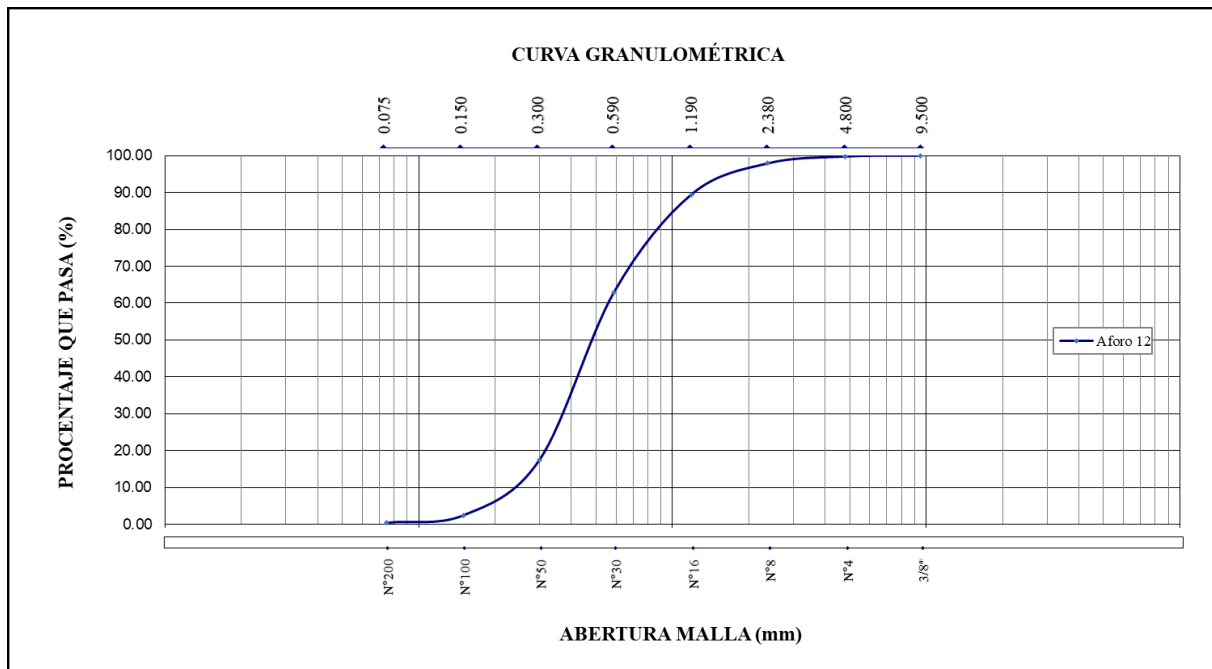
| <b>Granulometría</b> |                      |                                    |                                     |                               |                 |
|----------------------|----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| <b>Tamiz</b>         | <b>Apertura (mm)</b> | <b>Masa del Suelo Retenido (g)</b> | <b>Masa del Suelo Retenido (kg)</b> | <b>Retenido Acumulado (%)</b> | <b>Pasa (%)</b> |
| <b>3/8"</b>          | 9.500                | -                                  | -                                   | -                             | <b>100.00</b>   |
| <b>N°4</b>           | 4.800                | -                                  | -                                   | -                             | <b>100.00</b>   |
| <b>N°8</b>           | 2.380                | 3.480                              | 0.0035                              | <b>0.92</b>                   | <b>99.08</b>    |
| <b>N°16</b>          | 1.190                | 34.290                             | 0.0343                              | <b>9.09</b>                   | <b>89.98</b>    |
| <b>N°30</b>          | 0.590                | 130.290                            | 0.1303                              | <b>34.56</b>                  | <b>55.43</b>    |
| <b>N°50</b>          | 0.300                | 175.710                            | 0.1757                              | <b>46.60</b>                  | <b>8.82</b>     |
| <b>N°100</b>         | 0.150                | 30.990                             | 0.0310                              | <b>8.22</b>                   | <b>0.60</b>     |
| <b>N°200</b>         | 0.075                | 1.510                              | 0.0015                              | <b>0.40</b>                   | <b>0.20</b>     |
| <b>FONDO</b>         | ≥0.075               | 0.770                              | 0.0008                              | <b>0.20</b>                   |                 |
| <b>TOTAL</b>         |                      | 377.040                            | 0.3770                              |                               |                 |



*Granulometría de la décima primera muestra recolectada.*

**Anexo 19.**

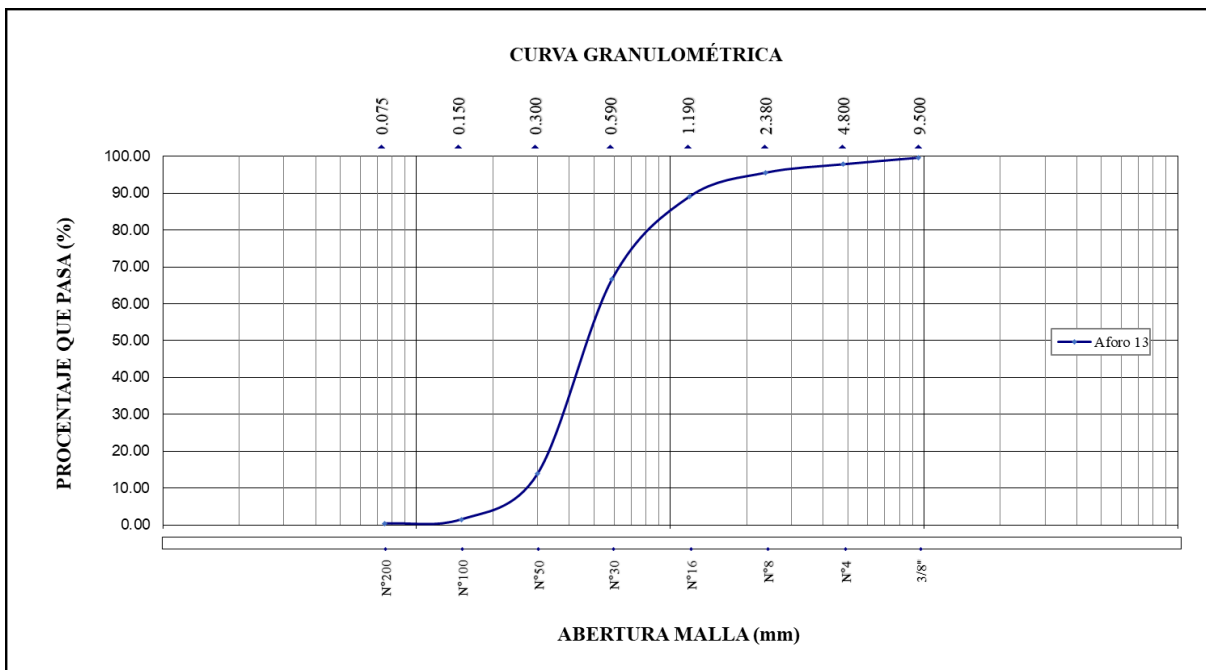
| MALLA |                  | GRANULOMETRÍA                        |                                       |                              |             |
|-------|------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|-------------|
| SERIE | Apertura<br>(mm) | Masa del<br>Suelo<br>Retenido<br>(g) | Masa del<br>Suelo<br>Retenido<br>(kg) | Retenido<br>Acumulado<br>(%) | Pasa<br>(%) |
| 3/8"  | 9.500            | -                                    | -                                     | -                            | 100.00      |
| N°4   | 4.800            | 0.940                                | 0.0009                                | 0.25                         | 99.75       |
| N°8   | 2.380            | 6.980                                | 0.0070                                | 1.86                         | 97.89       |
| N°16  | 1.190            | 31.710                               | 0.0317                                | 8.43                         | 89.46       |
| N°30  | 0.590            | 99.520                               | 0.0995                                | 26.47                        | 62.99       |
| N°50  | 0.300            | 171.190                              | 0.1712                                | 45.54                        | 17.45       |
| N°100 | 0.150            | 56.680                               | 0.0567                                | 15.08                        | 2.37        |
| N°200 | 0.075            | 7.400                                | 0.0074                                | 1.97                         | 0.40        |
| FONDO | ≥0.075           | 1.520                                | 0.0015                                | 0.40                         |             |
| TOTAL |                  | 375.940                              | 0.3759                                |                              |             |



*Granulometría de la décima segunda muestra recolectada.*

**Anexo 20.**

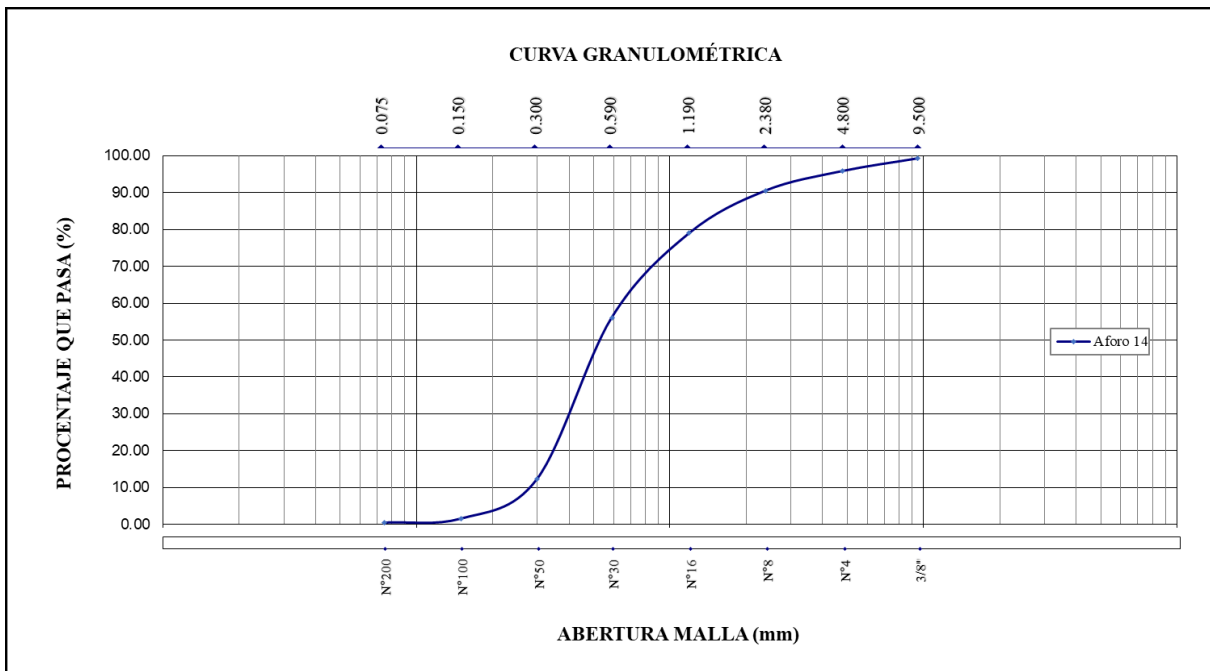
| <b>Granulometría</b> |                      |                                    |                                     |                               |                 |
|----------------------|----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| <b>Tamiz</b>         | <b>Apertura (mm)</b> | <b>Masa del Suelo Retenido (g)</b> | <b>Masa del Suelo Retenido (kg)</b> | <b>Retenido Acumulado (%)</b> | <b>Pasa (%)</b> |
| <b>3/8"</b>          | 9.500                | 9.370                              | 0.0094                              | <b>0.37</b>                   | <b>99.63</b>    |
| <b>N°4</b>           | 4.800                | 44.580                             | 0.0446                              | <b>1.77</b>                   | <b>97.85</b>    |
| <b>N°8</b>           | 2.380                | 57.280                             | 0.0573                              | <b>2.28</b>                   | <b>95.57</b>    |
| <b>N°16</b>          | 1.190                | 163.110                            | 0.1631                              | <b>6.49</b>                   | <b>89.08</b>    |
| <b>N°30</b>          | 0.590                | 562.950                            | 0.5630                              | <b>22.40</b>                  | <b>66.68</b>    |
| <b>N°50</b>          | 0.300                | 1326.950                           | 1.3270                              | <b>52.81</b>                  | <b>13.87</b>    |
| <b>N°100</b>         | 0.150                | 311.530                            | 0.3115                              | <b>12.40</b>                  | <b>1.47</b>     |
| <b>N°200</b>         | 0.075                | 28.170                             | 0.0282                              | <b>1.12</b>                   | <b>0.35</b>     |
| <b>FONDO</b>         | ≥0.075               | 8.890                              | 0.0089                              | <b>0.35</b>                   |                 |
| <b>TOTAL</b>         |                      | 2512.830                           | 2.5128                              |                               |                 |



*Granulometría de la décima tercera muestra recolectada*

**Anexo 21.**

| <b>Granulometría</b> |                      |                                    |                                     |                               |                 |
|----------------------|----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| <b>Tamiz</b>         | <b>Apertura (mm)</b> | <b>Masa del Suelo Retenido (g)</b> | <b>Masa del Suelo Retenido (kg)</b> | <b>Retenido Acumulado (%)</b> | <b>Pasa (%)</b> |
| <b>3/8"</b>          | 9.500                | 15.810                             | 0.0158                              | <b>0.70</b>                   | <b>99.30</b>    |
| <b>N°4</b>           | 4.800                | 77.850                             | 0.0779                              | <b>3.43</b>                   | <b>95.88</b>    |
| <b>N°8</b>           | 2.380                | 121.270                            | 0.1213                              | <b>5.34</b>                   | <b>90.54</b>    |
| <b>N°16</b>          | 1.190                | 262.220                            | 0.2622                              | <b>11.54</b>                  | <b>78.99</b>    |
| <b>N°30</b>          | 0.590                | 519.320                            | 0.5193                              | <b>22.86</b>                  | <b>56.13</b>    |
| <b>N°50</b>          | 0.300                | 992.510                            | 0.9925                              | <b>43.70</b>                  | <b>12.43</b>    |
| <b>N°100</b>         | 0.150                | 244.810                            | 0.2448                              | <b>10.78</b>                  | <b>1.66</b>     |
| <b>N°200</b>         | 0.075                | 24.440                             | 0.0244                              | <b>1.08</b>                   | <b>0.58</b>     |
| <b>FONDO</b>         | $\geq 0.075$         | 13.170                             | 0.0132                              | <b>0.58</b>                   |                 |
| <b>TOTAL</b>         |                      | 2271.400                           | 2.2714                              |                               |                 |



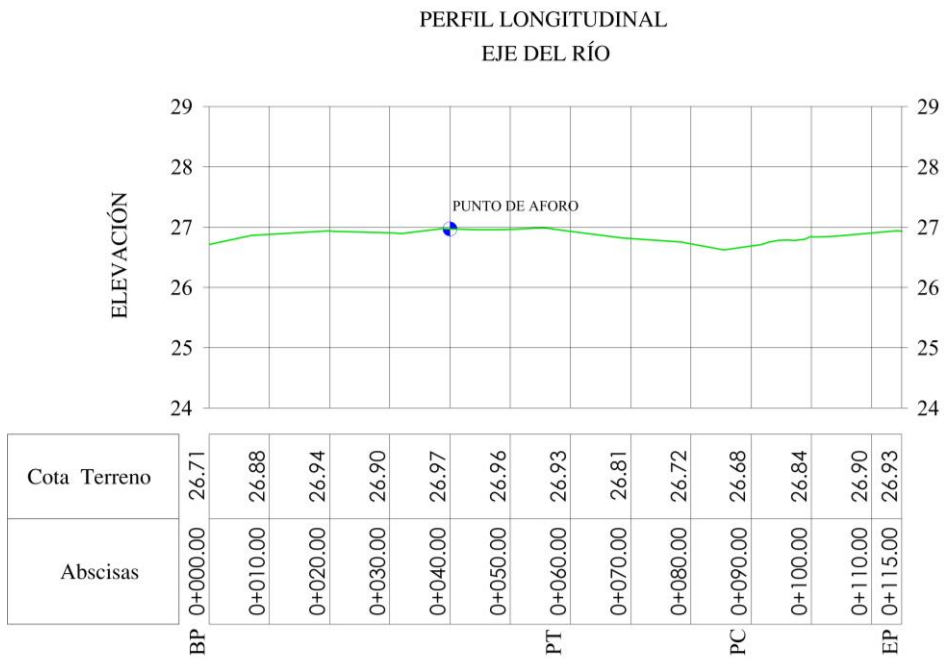
Granulometría de la décima cuarta muestra recolectada.

**Anexo 22.**



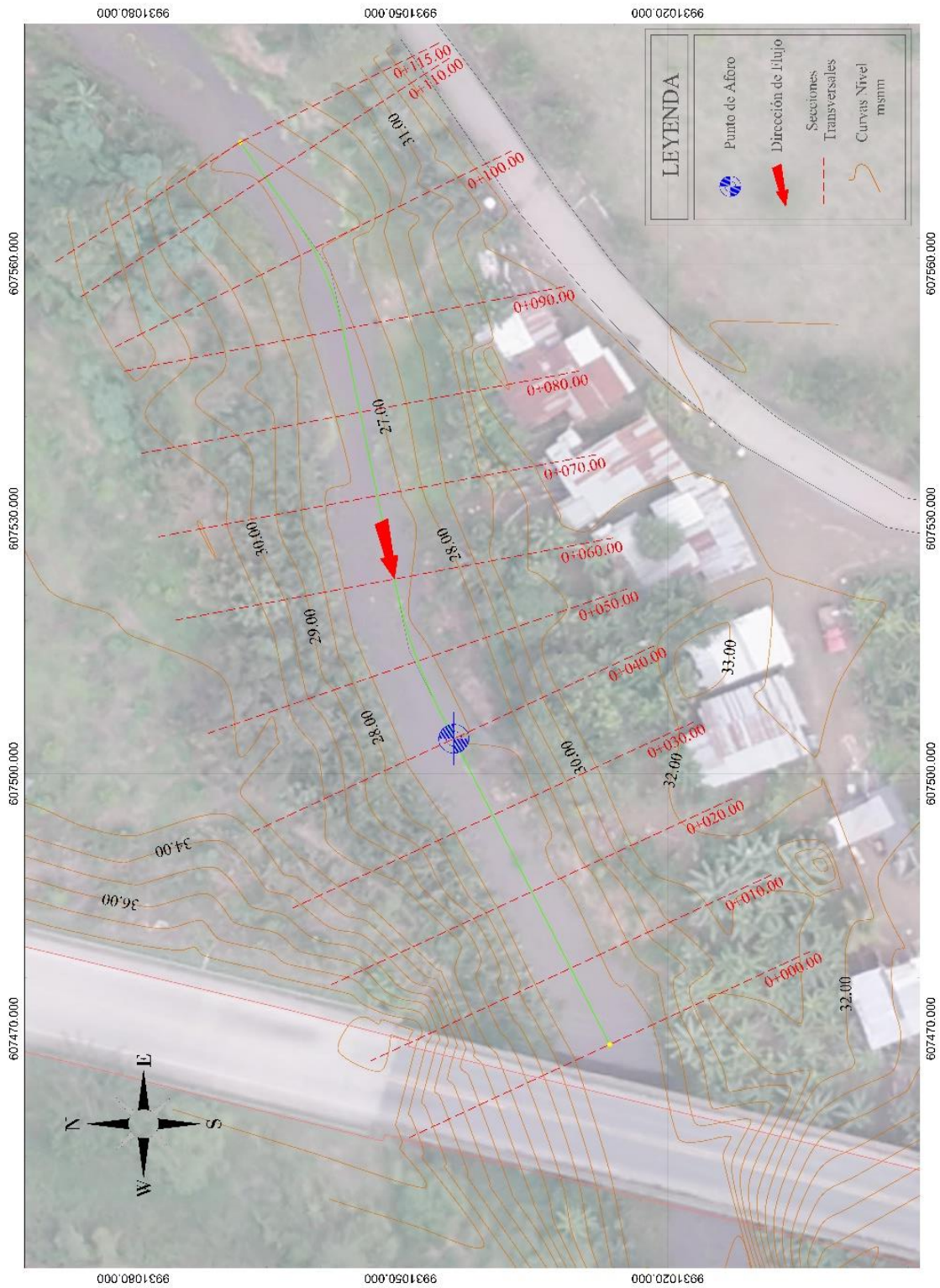
Levantamiento topográfico del tramo de estudio.

**Anexo 23.**



Perfil Longitudinal del cauce.

Anexo 24.



Vista en planta de la topografía del cauce.

