



## **Caracterización granulométrica y mineralógica de los sedimentos de la cuenca del Atrato**

Dahana Caicedo Paredes

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniero de Materiales

Asesores,

Jairo Antonio Ruiz Córdoba, Magíster (MSc) en Ingeniería Metalúrgica

Alexis Castro Arriaga, Especialista (Esp) Manejo Integrado del Recurso Hídrico

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería de Materiales  
Medellín, Antioquia, Colombia  
2022

**Referencia**

- [1] D. Caicedo-Paredes, “Caracterización granulométrica y mineralógica de los sedimentos de la cuenca del Atrato”, Informe de práctica, Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Medellín, 2022.

Estilo IEEE (2020)



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano/Director:** Jesús Francisco Vargas Bonilla.

**Jefe departamento:** Francisco Javier Herrera Builes.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a toda mi familia, y de manera especial a mis padres, que son mi pilar y roca, sentaron en mí las bases para ser una gran persona, con excelentes valores y principios. A mi hermana Noraima, por ayudarme y apoyarme en todo momento y ser mi ejemplo a seguir, y a Dios por otorgarme la dicha de tener una gran familia, buenos amigos, excelentes profesores y por hacerme parte de mi amada Alma Mater.

## **Agradecimientos**

Gracias a cada una de las personas que me ayudaron en este proceso académico, mi familia, mis profesores, asesores y amigos. Gracias a CODECHOCÓ por brindarme la oportunidad de ser parte de su equipo de trabajo y compartir con personas maravillosas, a la Universidad de Antioquia por brindarme las herramientas para lograr este objetivo, y a Dios por permitirme gozar de esta experiencia

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
I. INTRODUCCIÓN	12
II. OBJETIVOS	14
A. Objetivo general	14
B. Objetivos específicos	14
III. MARCO TEÓRICO	15
Caracterización del área de estudio cuenca Atrato	16
Determinación de parámetros granulométricos estadísticos	18
Transporte de sedimentos	20
Ackers-White	20
Engelund-Hansen	21
Laursen (Copeland)	22
Meyer-Peter Müller	22
Toffaletti	23
Yang	24
IV. METODOLOGÍA	25
Caracterización granulométrica.	25
Modelación transporte de sedimento	27
Levantamiento Batimétrico de los puntos de monitoreo.	27
Recorte DEM utilizando el programa ArcGIS	28
Modelación en HEC-RAS 6.2.	30
Caracterización mineralógica	33

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS	35
Caracterización granulométrica	35
Resultados modelación del transporte de sedimentos mediante el software HEC-RAS.	44
Caracterización mineralógica	54
VI. CONCLUSIONES	56
REFERENCIAS	58

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla I.</b> Información puntos de muestreo .....	25
<b>Tabla II.</b> Batimetrías de puntos de toma de muestras de sedimento.....	27
<b>Tabla III.</b> Distribución granulométrica de los sedimentos para el punto 1, Antes Lloró. ....	35
<b>Tabla IV.</b> Distribución granulométrica de los sedimentos para el punto 4, Antes Samurindó. ....	38
<b>Tabla V.</b> Distribución granulométrica de los sedimentos para el punto 8, Salida Caraño. ....	41

## LISTA DE FIGURAS

<b>Fig. 1.</b> Cuenca del rio Atrato.....	16
<b>Fig. 2.</b> Tramo de estudio de la cuenca del Atrato .....	17
<b>Fig. 3.</b> Diagrama ternario obtenido por el método grafico de Folk y Ward.....	18
<b>Fig. 4.</b> Clasificación de sedimentos .....	19
<b>Fig. 5.</b> Preparación de muestra de sedimentos para tamizado .....	26
<b>Fig. 6.</b> Tamizado y pesaje de la muestra .....	27
<b>Fig. 7.</b> a) Archivo DEM mapa del Chocó, b) Archivo DEM zona de estudio .....	30
<b>Fig. 8.</b> Archivo DEM zona de estudio con puntos batimétricos. ....	30
<b>Fig. 9.</b> Archivo DEM zona de estudio cargado en el RasMapper.....	31
<b>Fig. 10.</b> Paso a paso de construcción de la geometría sobre el Archivo DEM recortado. ....	32
<b>Fig. 11.</b> Sección transversal del punto Antes Samurindó .....	33
<b>Fig. 12.</b> Equipo DRX ubicado en Ruta-N .....	34
<b>Fig. 13.</b> Curva de distribución granulométrica para el punto Antes Lloró. ....	36
<b>Fig. 14.</b> Diagrama ternario de Arcilla- Limo-Arena, para el punto 1 Antes Lloró. ....	37
<b>Fig. 15.</b> Diagrama ternario de Lodo- Arena-Grava, para el punto 1 Antes Lloró.....	38
<b>Fig. 16.</b> Grafica de distribución granulométrica punto 4, Antes Samurindó. ....	39
<b>Fig. 17.</b> Diagrama ternario de Arcilla- Limo-Arena, para el punto 4 Antes Samurindó. ....	40
<b>Fig. 18.</b> Diagrama ternario de Lodo- Arena-Grava, para el punto 4 Antes Samurindó. ....	41
<b>Fig. 19.</b> Grafica de distribución granulométrica punto 8, Salida Caraño.....	42
<b>Fig. 20.</b> Diagrama ternario de Arcilla- Limo-Arena, para el punto 8, Salida Caraño.....	43
<b>Fig. 21.</b> Diagrama ternario de Lodo- Arena-Grava, para el punto 8, Salida Caraño. ....	44
<b>Fig. 22.</b> Cambio del lecho para distintas fechas, obtenidos mediante las diferentes funciones de transporte de sedimentos de fondo .....	45
<b>Fig. 23.</b> Velocidad media de la parte móvil del lecho obtenidas mediante las diferentes funciones de transporte de sedimentos de fondo, para distintas fechas. ....	47
<b>Fig. 24.</b> Capacidad de transporte de carga del canal obtenidos mediante las diferentes funciones de transporte de sedimentos de fondo, para distintas fechas. ....	49

**Fig. 25.** Morfología de la sección transversal del punto Antes Lloró, obtenidos mediante las diferentes funciones de transporte de sedimentos de fondo, para distintas fechas. ....51

**Fig. 26.** Morfología de la sección transversal del punto Salida Caraño, obtenidos mediante las diferentes funciones de transporte de sedimentos de fondo, para distintas fechas. ....53

**Fig. 27.** Difactograma para las muestras de sedimento de los puntos: P1, P4 y P8.....54



## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>Esp.</b>	Especialista
<b>MSc</b>	Magíster
<b>CODECHOCÓ</b>	Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo Sostenible del Chocó
<b>UdeA</b>	Universidad de Antioquia
<b>Fig.</b>	Figura
<b>m</b>	Metro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>Km</b>	Kilometro
<b>µm</b>	Micrómetro
<b>Cc</b>	Coefficiente de curvatura
<b>Cu</b>	Coefficiente de uniformidad
<b>HEC-RAS</b>	Hydrological Engineering Center – River Analysis System
<b>ArcGIS</b>	Aeronautical Reconnaissance Coverage Geographic Information System.
<b>RasMapper</b>	Spatial data and mapping tools
<b>DEM</b>	Digital Elevation Model
<b>M-P-M</b>	Meyer-Peter Müller
<b>DRX</b>	Difracción de Rayos X
<b>ArcMap</b>	Aeronautical Reconnaissance Coverage Map

## RESUMEN

Los sedimentos se consideran granos no consolidados de minerales, materia orgánica o rocas preexistentes, que pueden ser transportados por el agua, el hielo o el viento, para luego ser depositados en un lugar determinado (el fondo de ríos, lagos u océanos) [1].

En este trabajo se llevó a cabo la caracterización granulométrica y mineralógica de los sedimentos provenientes de un tramo seleccionado de una de las principales cuencas del departamento del Chocó, la cuenca del Atrato, finalmente se realizó una modelación del transporte de fondo de los sedimentos mediante el programa HEC-RAS. Se presentan los resultados obtenidos para tres puntos seleccionados del tramo, los cuales fueron: Antes Lloró, Antes Samurindó y Salida Caraño. Los análisis granulométricos mostraron que el sedimento estaba conformado principalmente por grava y arena. Mediante la simulación se identificaron secciones en el tramo en las cuales hubo fenómeno de sedimentación y otras de erosión, además de la capacidad de carga de cada una de estas secciones. La caracterización mineralógica mostró que los sedimentos estaban compuestos principalmente por cuarzo y plagioclasas.

***Palabras clave* — sedimentos, modelación, caracterización granulométrica, transporte de sedimentos, caracterización mineralógica.**

## ABSTRACT

Sediments are considered unconsolidated grains of minerals, organic matter, or pre-existing rocks, which can be transported by water, ice, or wind, and then deposited at a particular location (the bottom of rivers, lakes, or oceans) [1].

In this work, the granulometric and mineralogical characterization of sediments from a selected section of one of the main river basin the department of Chocó, the Atrato basin was carried out, and finally a modeling of the sediment bottom transport was performed using the HEC-RAS program. The results obtained for three selected points of the section were shown: Before Lloró, After Samurindó and Exit Caraño. The granulometric analysis showed that the sediment consisted mainly of gravel and sand. Trough the simulation, sections in the section were identified in which there were sedimentation and erosion phenomena, as well as the load capacity of each of these sections. The mineralogical characterization showed that the sediments were mainly composed of quartz and plagioclase.

***Keywords* — sediments, modeling, granulometric characterization, sediment transport, mineralogical characterization.**

## I. INTRODUCCIÓN

CODECHOCÓ es una entidad encargada de administrar y manejar los recursos naturales y la oferta ambiental en su jurisdicción, fundamentándose en el desarrollo humano sostenible con participación comunitaria, gestionando y ejecutando planes, programas y proyectos que apunten hacia la búsqueda de una nueva cultura de desarrollo, el mejoramiento de la calidad de vida, la promoción de una producción limpia y el desarrollo de una acción ambiental sostenible. CODECHOCÓ como máxima autoridad ambiental en el Departamento, lidera la gestión y ejecución de los planes, programas y proyectos encaminados a manejar y administrar los recursos naturales y el ambiente de manera sostenible; proporcionando escenarios para la búsqueda de una nueva cultura del desarrollo, la concertación y la participación comunitaria y el concurso de las autoridades locales. Esta entidad, asume una posición de gestión ambiental para el desarrollo integral humano sostenible, donde los recursos naturales sean administrados y utilizados de manera racional, en armonía con la base natural que garantice la existencia de los ecosistemas y oferta ambiental, para beneficio y desarrollo de las generaciones presentes y futuras [2].

Entre las dependencias de esta entidad se encuentra la subdirección de calidad y control ambiental, la cual se encarga de dirigir los procesos relacionados con la administración y el desarrollo de políticas para el uso sostenible de los recursos naturales agua, suelo, aire y ambiente en la jurisdicción de la Corporación, de conformidad con la Política Nacional Ambiental y las Disposiciones del director general [3]. Esta dependencia está encargada del laboratorio ambiental en el cual se hacen pruebas para el control de la calidad del agua de las principales cuencas pertenecientes al departamento del Chocó. Otra importante labor de esta dependencia es realizar caracterización de los sedimentos provenientes de esas cuencas, ya que el estudio de sedimentos en distintos ambientes permite obtener información relacionada con su origen, distancia recorrida durante el transporte, mecanismos de transporte y ambientes de deposición [4].

Los sedimentos son partículas que pueden ser el resultado de la meteorización física y química de rocas, por lo que la caracterización mineralógica es importante para entender su origen y sus propiedades. Estos materiales se definen principalmente, por el tamaño de las partículas, su densidad y forma, las cuales determinan en gran medida la respuesta de los granos ante las fuerzas que tienden a moverlos ya sea en aire o en el agua y, a su vez, se relacionan de manera directa con variables como la velocidad de caída vertical, la porosidad y la dureza [5]. La medición de estos proporciona los datos necesarios para comprender los sistemas fluviales, y plantearse objetivos

asociados a la gestión de la cuenca basados en información cuantitativa y confiable. Entre otros usos, los datos de sedimentos permiten planificar la gestión del cauce, diseñar, gestionar y operar infraestructura hidráulica, determinar cuantitativamente los procesos de erosión, sedimentación y cuantificar el material que los ríos proporcionan a la costa, estudiar el transporte de contaminantes en fase sólida, y validar y calibrar modelos de predicción para estudios de caudales, transporte de sedimentos, y morfodinámica de ríos [6].

Por lo dicho anteriormente, es importante realizar una modelación que permita estimar cómo será el comportamiento del transporte de los sedimentos de fondos de un tramo de la cuenca de Atrato, además del análisis del cambio en la morfología de las secciones transversales de la cuenca estudiadas. Para eso, se haría uso del programa HEC-RAS 6.2. (Hydrological Engineering Center – River Analysis System), el HEC-RAS es una herramienta de modelización hidráulica. Nos permite simular flujos en cauces artificiales y cauces naturales para definir el nivel del agua. Por lo tanto, se trata de una herramienta fundamental para realizar estudios de inundabilidad, y modelización cauces. HEC-RAS también nos permite modelizar cuatro tipos de río: modelización de flujo en régimen permanente, modelización de flujo en régimen no permanente, modelización del transporte de sedimentos, análisis de calidad de aguas [7].

Ahora bien, para realizar una modelación del transporte de sedimentos de fondo, es importante realizar una caracterización granulométrica al material, la cual se hace por medio de ensayos de tamizado en seco regulados por las normas ASTM C 136-01 y ASTM C-117-95, los resultados estadísticos, obtenidos a partir de este ensayo, permiten interpretar y conocer la distribución del tamaño del grano y de esta forma determinar el tipo de sedimento de forma cualitativa y sus tamaños nominales.

## II. OBJETIVOS

### *A. Objetivo general*

Determinar la composición mineralógica cualitativa y granulométrica de muestras de sedimentos obtenidas de diferentes secciones del tramo Antes Lloró-Salida Caraño de la cuenca del río Atrato, para la posterior modelación del transporte del sedimento de fondo.

### *B. Objetivos específicos*

- Determinar la granulometría de las muestras de sedimentos tomadas, mediante análisis granulométrico por tamizado en seco mecánico y encontrar la distribución de tamaños de las muestras.
- Definir el tipo de sedimento de cada muestra a través de los resultados obtenidos en la caracterización granulométrica y clasificarlas según su procedencia.
- Modelar el transporte de los sedimentos del fondo del tramo de estudio, mediante el programa HEC-RAS.
- Determinar la composición mineralógica de las muestras representativas de los sedimentos de 3 puntos del tramo en estudio, mediante un análisis DRX.

---

### III. MARCO TEÓRICO

Un sedimento es la acumulación de material triturado y se obtienen a partir de procesos dinámicos en la superficie (meteorización física o mecánica y la meteorización química) de otras rocas (ígneas, metamórficas o antiguas sedimentarias), transporte (removidas de montañas y colinas a través de la acción de la gravedad, vientos y corrientes de agua) y finalmente depositadas en un lugar determinado (en el fondo de ríos, lagos u océanos) [8].

La caracterización mineralógica del sedimento permite una rápida identificación de los principales minerales presentes, existen varias técnicas de caracterización, pero la más común para este tipo de identificación es la difracción de rayos X, la cual se basa en la dispersión coherente del haz de rayos X por parte de la materia (se mantiene la longitud de onda de la radiación) y en la interferencia constructiva de las ondas que están en fase y que se dispersan en determinadas direcciones del espacio [9].

La información sobre el transporte de sedimentos y granulometría forma parte del conjunto de datos fundamentales para avanzar hacia la gestión integrada de cuencas, y el manejo de los cauces con una visión global de los procesos físicos, biológicos, y geoquímicos que ocurren en las cuencas, incluyendo los efectos sobre las desembocaduras y la costa [6]. En aguas corrientes naturales, los procesos de erosión y sedimentación se alternan constantemente y caracterizan el balance de escombros del tramo del lecho de río [10]. Conocer el transporte de los sedimentos es importante para comprender el régimen hídrico y la dinámica fluviomorfológica de los ríos, estimando de esta forma la magnitud del transporte de sedimentos en relación con los procesos de erosión y depósito observados, como así también las frecuencias y magnitudes asociadas a desbordes e inundaciones provocadas por las crecidas [11].

En el transporte de sedimentos, el movimiento de estos en las corrientes y ríos presenta dos formas:

- Sólidos suspendidos o en suspensión: estos hacen referencia al material particulado que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua superficial.

- Sólidos de fondo: estos hacen referencia al material que se encuentra en el fondo del lecho, los cuales son arrastrados por la corriente y son llamados también como arrastre de fondo. Generalmente son partículas de mayor tamaño que las que se encuentran en suspensión, como por ejemplo partículas de arena y grava. [12].

*Caracterización del área de estudio cuenca Atrato*

El río en estudio se encuentra en el departamento del Chocó, zona del Caribe. La cuenca del río Atrato tiene una extensión aproximadamente de 25.592 Km<sup>2</sup>, la **Fig. 1** muestra la cartografía de la cuenca del Atrato.



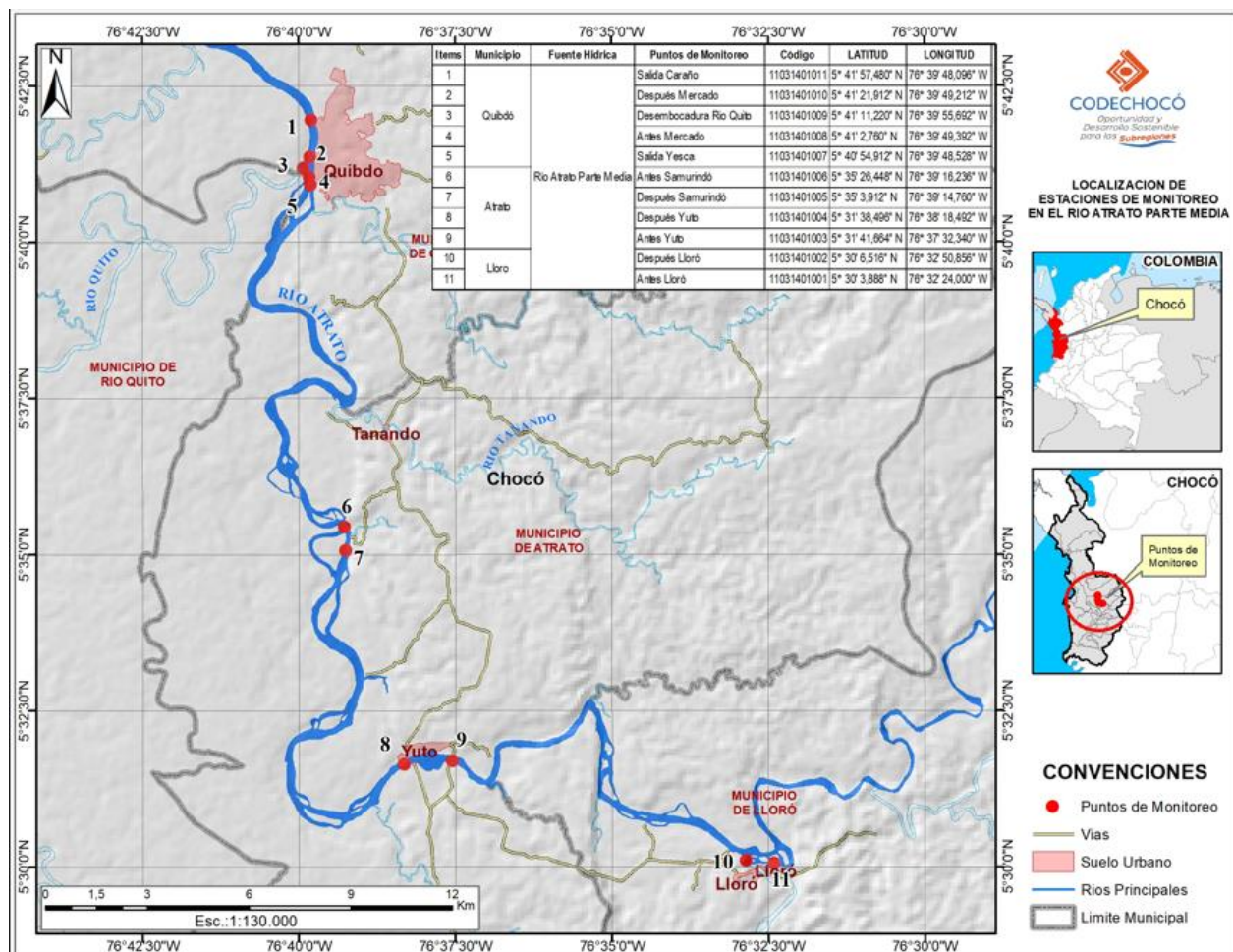
**Fig. 1.** Cuenca del río Atrato

*Nota.* Fuente [12].



En esta cuenca el clima es considerado AF: Ecuatorial, según la clasificación climática de Köppen-Geiger, el clima de la zona es súper húmedo de selva, con lluvias durante todo el año.

En general el área de estudio presenta un clima de tipo tropical caracterizado por pequeñas oscilaciones de temperatura durante todo el año. Los diferentes ascensos de aire, originados por múltiples causas que se dan en la zona de estudio, se unen para producir durante el año abundantes lluvias. En este caso, se propone como sección de estudio sobre el río Atrato, que abarca desde antes Lloró hasta la Salida Caraño, la cual tiene una longitud de aproximadamente 38 kilómetros [12]. La **Fig. 2**, muestra el tramo de la sección escogida para este estudio.



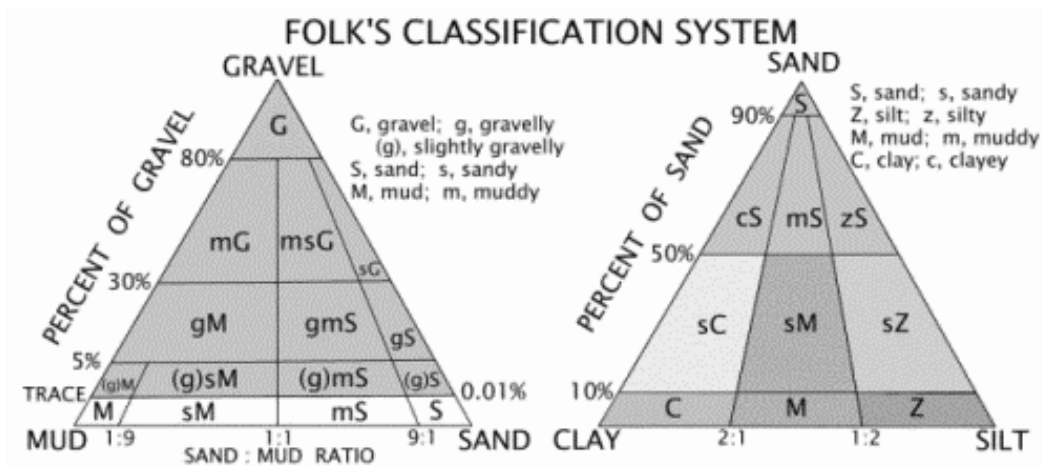
**Fig. 2.** Tramo de estudio de la cuenca del Atrato

*Nota.* Fuente [12].

### *Determinación de parámetros granulométricos estadísticos*

Los resultados de un análisis granulométrico pueden ser generalizados y correlacionados por modelos matemáticos que van a relacionar el tamaño de la partícula del material o apertura del tamiz, con un porcentaje en peso, que usualmente es el acumulado es el porcentaje en peso retenido o el pasante [13]. Este análisis granulométrico se puede realizar por medio de software, como por ejemplo GRADISTATv 9.1, este programa está escrito en Microsoft Visual Basic, es integrado en una hoja de cálculo de Microsoft Excel, lo que permite resultados tanto tabulares como gráficos. Este programa calcula parámetros estadísticos y granulométricos como lo son: Media, moda, grado de selección, asimetría, angulosidad, los tamaños nominales  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$ , además calcula  $D_{90}/D_{10}$ ,  $D_{90} - D_{10}$ ,  $D_{75}/D_{25}$  y  $D_{75} - D_{25}$ . Los parámetros de tamaño de grano se calculan aritméticamente y geométricamente (en micras) y logarítmicamente (usando la escala  $\Phi$  (phi)) [14].

En el programa GRADISTATv 9.1 se obtienen diferentes diagramas basados en la clasificación de sedimentos texturales modificada de Folk por Carter y Herzer, a partir de datos granulométricos. Las clases incluyen grava (G, g), arena (S, s), limo (Z, z), arcilla (C, c) y lodo (una mezcla de limo y clase de arcilla: M, m). Las mayúsculas indican el constituyente dominante, en la figura (**Fig. 3**), se puede observar este diagrama [15].



**Fig. 3.** Diagrama ternario obtenido por el método grafico de Folk y Ward.

*Nota.* Fuente: <https://www.scienceforums.net/topic/82727-folk-classification-system-of-sediments/>.

Para entender los resultados obtenidos mediante el programa GRADISTATv 9.1., es importante saber que los suelos pueden ser granulares o finos, se considera fino cuando por el tamiz N° 200 pasa más del 50%, de lo contrario el material es granular, grava o arena. Se considera Grava

cuando en el tamiz # 4 retiene el 50% o más del peso total, y se considera arena cuando pasa más de 50% por el tamiz N°4. Para una mayor definición de la granulometría se utiliza el coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura. [16]

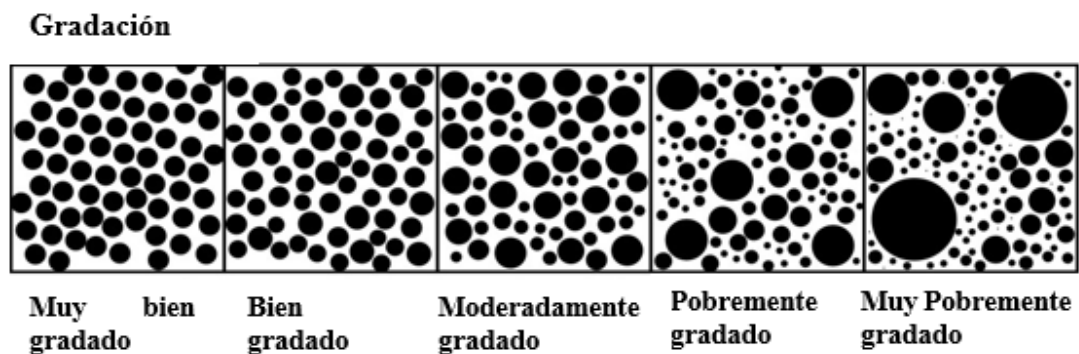
Coeficiente de uniformidad  $C_u$ : Se define como la relación entre el diámetro correspondiente al 60% del peso del material y el diámetro por el que pasa el 10% del material:  $C_u = d_{60}/d_{10}$ . Si el coeficiente de uniformidad es menor de 5 la granulometría es uniforme, si está comprendido entre 5 y 20 el suelo es poco uniforme y si es mayor de 20 se trata de un suelo con una alta distribución de tamaños. [16]

Coeficiente de curvatura  $C_c$ : Se define como  $C_c = ((D_{30})^2 / (D_{10} \cdot D_{60}))$  y mide el grado de curvatura de la granulometría. Un suelo bien gradado tendrá un porcentaje en huecos menor y por tanto tendrá una densidad mayor, serán suelos menos compresibles, más impermeables y fáciles de trabajar en obra. [16]

Para entender el concepto de gradación es importante definir los siguientes conceptos:

- Muy bien gradado: casi todos los granos tienen el mismo tamaño
- Bien gradado: la mayoría de los granos caen en una sola clase de tamaño de grano con pocos valores atípicos
- Moderadamente gradado: hay más de un tamaño de grano presente, pero uno prevalece.
- Mal gradado o pobremente gradado: varios tamaños de grano están presentes, ninguno de ellos prevalece
- Muy mal gradado o muy pobremente gradado: un amplio espectro de tamaños de grano de tamaños muy diferentes. [17]

La **Fig. 4**, muestra un esquema de cómo es la distribución de los tamaños para cada clasificación de sedimento, expuesto anteriormente.



**Fig. 4.** Clasificación de sedimentos

*Nota.* Fuente [17]

### *Transporte de sedimentos*

El cálculo de la capacidad de una corriente para el transporte de sedimentos de fondo requiere información sobre las características hidráulicas, geomorfológicas y granulométricas del cauce. El estado actual del conocimiento no permite establecer una ecuación dinámica general del transporte de sedimentos en un flujo de agua y sólidos por lo que se han ido proponiendo un gran número de ecuaciones de carácter empírico o semi empírico varias de forma aproximada para las condiciones experimentales bajo las que fueron desarrolladas [18].

En el modelo HEC-RAS la capacidad de transporte de sedimentos es calculada con una ecuación de un grupo de 9 funciones de transporte de sedimentos. Debido a que las diferentes funciones de transporte de sedimentos fueron desarrolladas bajo diferentes condiciones, se puede esperar un amplio rango de resultados de una función a otra. Normalmente, las funciones de transporte de sedimentos predicen las tasas de transporte de sedimentos a partir de un conjunto dado de parámetros hidráulicos en estado estacionario y propiedades de los sedimentos [19].

Las siguientes funciones de transporte de sedimentos fueron las que se utilizaron en este estudio, para comparar los resultados obtenidos, y observar la variación de estos resultados al cambiar de función

- Ackers-White
- Engelund-Hansen
- Laursen
- Meyer-Peter Müller
- Toffaleti
- Yang
- Wicker

#### *Ackers-White*

La función de transporte de Ackers-White es una función de carga total desarrollada bajo el supuesto de que el transporte de sedimentos finos está mejor relacionado con las fluctuaciones turbulentas en la columna de agua y el transporte de sedimentos gruesos está mejor relacionado con el cizallamiento neto de los granos con la velocidad media utilizada como variable representativa. La función de transporte se desarrolló en términos de tamaño de partícula, movilidad y transporte [19].

Se utiliza un parámetro de tamaño adimensional para distinguir entre los tamaños de los sedimentos finos, transitorios y gruesos. Esta función está desarrollada para tamaños de partículas entre gravas finas y limos gruesos. Los sedimentos finos son limos de menos de 0,04 mm y los gruesos son gravas de hasta 7mm. La ecuación general de transporte de la función Ackers-White para un tamaño de grano único se representa mediante [19]:

$$X = \frac{G_{gr} s d_s}{D \left( \frac{u_*}{V} \right)^n} \quad (1)$$

$$G_{gr} = C \left( \frac{F_{gr}}{A} - 1 \right) \quad (2)$$

Donde:  $X$  = Concentración de sedimentos

$G_{gr}$  = Parámetro de transporte de sedimentos

$s$  = Peso específico de los sedimentos

$d_s$  = Diámetro medio de las partículas

$D$  = Profundidad efectiva

$u_*$  = Velocidad de cizallamiento

$V$  = Velocidad media del canal

$n$  = Exponente de transición, según el tamaño del sedimento

$C$  = Coeficiente

$F_{gr}$  = Parámetro de movilidad de los sedimentos

$A$  = Parámetro crítico de movilidad de los sedimentos

### *Engelund-Hansen*

La función Engelund-Hansen es un predictor de carga total que da resultados adecuados para ríos arenosos con una carga suspendida importante. Se basa en datos de canal con tamaños de sedimentos entre 0,19 y 0,93 mm. Se ha probado ampliamente y se ha comprobado que es bastante coherente con los datos de campo. La ecuación general de transporte para la función Engelund-Hansen está representada por [19]:

$$g_s = 0.05 \gamma_s V^2 \sqrt{\frac{d_{50}}{g \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} \right)}} \left[ \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}} \right]^{3/2} \quad (3)$$

Donde:  $g_s$  = Unidad de transporte de sedimentos

$\gamma$  = Peso unitario del agua

$\gamma_s$  = Peso unitario de las partículas sólidas

$V$  = Velocidad media del canal

$\tau_0$  = Esfuerzo cortante a nivel del lecho

$d_{50}$  = Tamaño de partícula del que el 50% es menor

### *Laursen (Copeland)*

El método Laursen es un predictor de la carga total de sedimentos, derivado de una combinación de análisis cualitativos, experimentos originales y datos complementarios. El transporte de sedimentos se define principalmente en base a las características hidráulicas de la velocidad media del canal, la profundidad del flujo, el gradiente de energía, y en las características del sedimento de la gradación y la velocidad de caída [19].

Las contribuciones de Copeland amplían el rango de aplicabilidad a los sedimentos del tamaño de una grava. El rango de aplicabilidad es de 0,011 a 29 mm, diámetro medio de las partículas. La ecuación general de transporte de la función de Laursen (Copeland) para un solo tamaño de grano es representada por [19]:

$$C_m = 0.01\gamma_s \left(\frac{d_s}{D}\right)^{7/6} \left(\frac{\tau_0}{\tau_c} - 1\right) f\left(\frac{u_*}{\omega}\right) \quad (4)$$

Donde:  $C_m$  = Concentración de descarga de sedimentos, en peso/volumen

$d_s$  = Diámetro medio de las partículas

$D$  = Profundidad efectiva del flujo

$\tau_0$  = Esfuerzo cortante del lecho debida a la resistencia del grano

$\tau_c$  = Esfuerzo cortante crítico del lecho

$f\left(\frac{u_*}{\omega}\right)$  = Función de la relación entre la velocidad de cizallamiento y la velocidad de caída

### *Meyer-Peter Müller*

La función de transporte de cargas del lecho de Meyer-Peter Müller se basa principalmente en datos experimentales y ha sido ampliamente probada y utilizada para ríos con sedimentos relativamente gruesos. La tasa de transporte es proporcional a la diferencia entre el esfuerzo cortante medio que actúa sobre el grano y el esfuerzo cortante crítico [19].

Los tamaños de partícula aplicables van de 0,4 a 29 mm con un rango de gravedad específica del sedimento de 1,25 hasta más de 4,0. Este método puede utilizarse para sedimentos bien graduados y condiciones de flujo que producen formas de lecho no planas. El factor de fricción Darcy-Weisbach se utiliza para definir la resistencia del lecho. Los resultados pueden ser cuestionables cerca del umbral de movimiento incipiente para los canales de lecho de arena como demostraron Amin y Murphy. M-P-M es mayormente exitosa en el rango de las gravas. Esta función tiende a subestimar el transporte de materiales finos. La ecuación general de transporte para la función Meyer-Peter Müller está representada por [19]:

$$\left(\frac{k_r}{k'_r}\right)^{3/2} \gamma R S = 0.047(\gamma_s - \gamma)d_m + 0.25 \left(\frac{\gamma}{g}\right)^{1/3} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s}\right)^{2/3} g_s^{2/3} \quad (5)$$

$g_s$  = Tasa de transporte de sedimentos unitaria en peso/tiempo/ancho unitario

$k_r$  = Coeficiente de rugosidad A

$k'_r$  = Coeficiente de rugosidad A basado en los granos

$\gamma$  = Peso unitario del agua

$\gamma_s$  = Peso unitario del sedimento

$g$  = Aceleración de la gravedad

$d_m$  = Diámetro medio de las partículas

$R$  = Radio hidráulico

$S$  = Gradiente de energía

### *Toffaleti*

El método de Toffaleti es una función de carga total de Einstein modificada que divide la distribución de la carga en suspensión en zonas verticales, reproduciendo el movimiento bidimensional de los sedimentos. Se utilizan cuatro zonas para definir la distribución de sedimentos. Son la zona superior, la zona media, la zona inferior y la zona del lecho. El transporte de sedimentos se calcula independientemente para cada zona y se suma para obtener el transporte total de sedimentos [19].

Este método se ha desarrollado a partir de una recopilación exhaustiva de datos de canal y de campo. En los experimentos de canal se utilizaron partículas de sedimentos con diámetros medios que oscilaban entre 0,3 y 0,93 mm, aunque las aplicaciones exitosas del método de Toffaleti sugieren que son aceptables diámetros medios de partículas tan bajos como 0,095 mm. Las

ecuaciones generales de transporte de la función de Toffaleti para un tamaño de grano único están representadas por [19]:

$$g_{ssL} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{1+n_v-0.756z} - (2d_m)^{1+n_v-0.756z}}{1+n_v-0.756z} \quad (6)$$

$$g_{ssM} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{0.244z} \left[ \left(\frac{R}{2.5}\right)^{1+n_v-z} - \left(\frac{R}{11.24}\right)^{1+n_v-z} \right]}{1+n_v-z} \quad (7)$$

$$g_{ssU} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{0.244z} \left(\frac{R}{2.5}\right)^{0.5z} \left[ R^{1+n_v-1.5z} - \left(\frac{R}{2.5}\right)^{1+n_v-1.5z} \right]}{1+n_v-1.5z} \quad (8)$$

$$g_{sb} = M(2d_m)^{1+n_v-0.756z} \quad (9)$$

$$M = 43.2C_L(1+n_v)VR^{0.756z-n_v} \quad (10)$$

$$g_s = g_{ssL} + g_{ssM} + g_{ssU} + g_{sb} \quad (11)$$

Donde:  $g_{ssL}$  = Transporte de sedimentos en suspensión en la zona inferior, en toneladas/día/pie

$g_{ssM}$  = Transporte de sedimentos en suspensión en la zona media, en toneladas/día/pie

$g_{ssU}$  = Transporte de sedimentos en suspensión en la zona superior, en toneladas/día/pie

$g_{sb}$  = Transporte de sedimentos en el lecho, en toneladas/día/pies

$g_s$  = Transporte total de sedimentos en toneladas/día/pies

$M$  = Parámetro de concentración de sedimentos

$C_L$  = Concentración de sedimentos en la zona inferior

$R$  = Radio hidráulico

$d_m$  = Diámetro medio de las partículas

$z$  = Exponente que describe la relación entre el sedimento y las características hidráulicas

$n_v$  = Exponente de la temperatura

### Yang

Es una ecuación que se desarrolla bajo la premisa de que la potencia de la corriente unitaria es el factor dominante en la determinación de la concentración total de sedimentos. La función fue desarrollada y probada sobre una variedad de aforadores y datos de campo. La ecuación está compuesta por dos relaciones separadas de transporte de arenas y gravas. La transición entre arena y grava es suavizada con el fin de evitar grandes discontinuidades. Yang tiende a ser muy sensible



a la velocidad de la corriente y es más sensible a la velocidad de caída que todas las demás ecuaciones. Las ecuaciones generales de transporte para arena y grava utilizando la función de Yang para un solo tamaño de grano es representada por [19]:

$$\log C_t = 5.435 - 0.286 \log \frac{\omega d_m}{v} - 0.457 \log \frac{u_*}{\omega} + \left( 1.799 - 0.409 \log \frac{\omega d_m}{v} - 0.314 \log \frac{u_*}{\omega} \right) \log \left( \frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr} S}{\omega} \right) \quad \text{para arenas } d_m < 2mm \quad (12)$$

$$\log C_t = 6.681 - 0.633 \log \frac{\omega d_m}{v} - 4.816 \log \frac{u_*}{\omega} + \left( 2.784 - 0.305 \log \frac{\omega d_m}{v} - 0.282 \log \frac{u_*}{\omega} \right) \log \left( \frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr} S}{\omega} \right) \quad \text{para gravas } d_m \geq 2mm \quad (13)$$

Donde:  $C_t$  = Concentración total de sedimentos

$v$  = Viscosidad cinemática

$u_*$  = Velocidad de cizallamiento

$S$  = Gradiente de energía

$\omega$  = Velocidad de caída de las partículas

$V$  = Velocidad media del canal

$d_m$  = Diámetro medio de las partículas

#### IV. METODOLOGÍA

##### *Caracterización granulométrica.*

Para la toma de muestra de los sedimentos de los diferentes puntos se siguió el “INSTRUCTIVO DE TOMA Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS SEDIMENTOS Y AGUA SUPERFICIAL PARA LA RED DE MONITOREO DE CALIDAD DEL IDEAM”, la **Tabla I** muestra la ubicación geográfica de estos puntos.

**Tabla I.** Información puntos de muestreo

Municipio	Fuente Hídrica	Puntos de Monitoreo	Coordenadas Geográficas		Criterio de selección
			N	W	
Atrato	Rio Atrato Parte Media	1. Antes LLORÓ	5° 30' 1.13"	76° 32' 25.72"	Punto estratégico para conocer incidencia actividades antrópicas (minería, agricultura, explotación maderera), asentamiento poblacional e industrial
		2. Después LLORÓ	5° 30' 14.34"	76° 32' 59.16"	Punto estratégico por que se encuentra población asentada y descole de alcantarillado municipal
		3. Después YUTO	5° 31' 35.99"	76° 38' 21.74"	Punto estratégico por que se encuentra población asentada y descole de alcantarillado municipal
		4. Antes SAMURINDÓ	5° 32' 55.74"	76° 39' 6.10"	Punto intermedio para conocer la influencia de los asentamientos de la población sobre la fuente
		5. Antes La Paloma	5° 39' 59.61"	76° 40' 16.86"	Punto estratégico por que se encuentra población asentada

6.Después La Paloma	5° 40' 56.26"	76° 39' 53.61"	Punto estratégico por que se encuentra población asentada y descole de alcantarillado municipal
7.Antes MERCADO	5° 41' 12.27"	76° 39' 46.42"	Punto intermedio para conocer la influencia de los asentamientos de la población sobre la fuente
8.Salida CARAÑO	5° 42' 1.71"	76° 39' 45.32"	Punto estratégico por que se encuentra población asentada y descole de alcantarillado municipal

En el análisis granulométrico del material de fondo, se siguió la metodología especificada en la Norma “ASTM C 136-01: Método estándar de ensayo para análisis por tamizado de agregados fino y grueso”, el método de ensayo mostrado en esta norma se utiliza para determinar la distribución por tamaño de las partículas de los áridos finos y gruesos mediante el uso de tamices. Como para nuestros cálculos debíamos conocer o determinar la cantidad total de material más fino que el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (N.º 200) por lavado y tamizado seco manual, para esto se sigue la metodología mostrada en la norma “ASTM C-117-95: Método de Ensayo Estándar para material más fino que la Malla No. 200 (75  $\mu\text{m}$ ) en Agregado Mineral por lavado”. En la figura 5 (**Fig. 5**) se muestra el proceso de selección de la muestra representativa mediante cuarteo, luego el lavado del material por el tamiz malla 200 para lavado y el posterior proceso de secado en la mufla.



**Fig. 5.** Preparación de muestra de sedimentos para tamizado

La **Fig. 6**, muestra el material seco y listo para tamizar, el arreglo de tamices que se usó para el ensayo y el posterior proceso de pesaje del material retenido en cada tamiz



**Fig. 6.** Tamizado y pesaje de la muestra

La distribución granulométrica se hizo mediante el programa GRADISTATv, en el cual se ingresaban los pesos del material retenido en cada tamiz, y este programa arroja los parámetros estadísticos y gráficos asociados a esa granulometría.

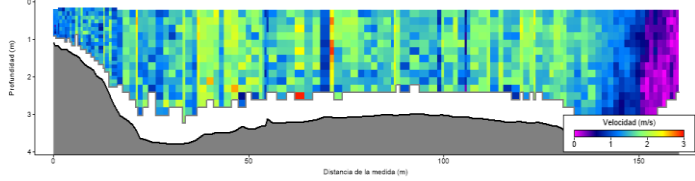
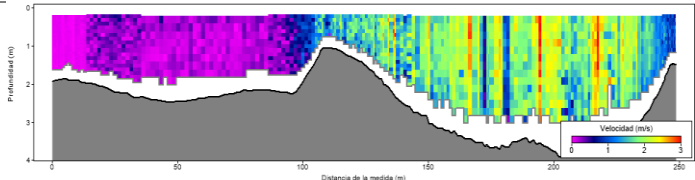
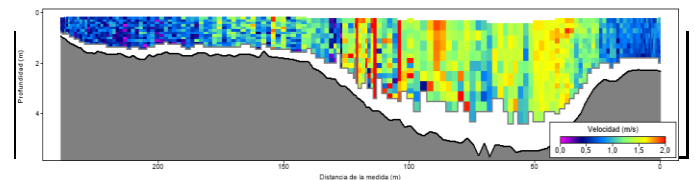
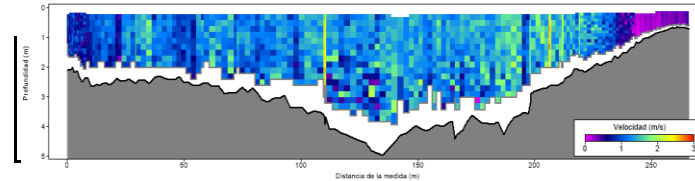
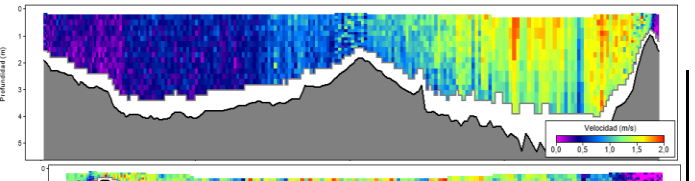
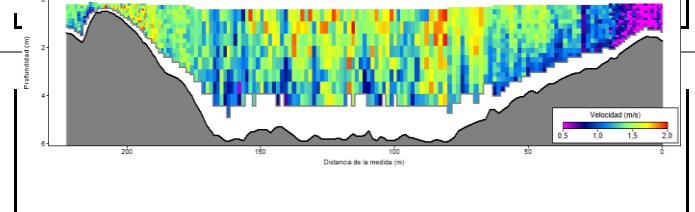
*Modelación transporte de sedimento*

*Levantamiento Batimétrico de los puntos de monitoreo.*

En la **Tabla II**, se muestra el levantamiento batimétrico (levantamiento topográfico del relieve de superficies del terreno cubierto por el agua, es decir, cartografía de los fondos de los diferentes cuerpos de agua) de los puntos donde se tomaron muestras de sedimentos, esto se realizó por medio del equipo SonTek HydroSurveyor M9. Se pueden observar el caudal total, la velocidad y profundidad promedio y además la distancia de la sección. Es importante mencionar que se hizo levantamientos batimétricos en otros puntos además de los mostrados en la **Tabla II**, esto con el fin de tener una mayor información de la morfología del tramo del cauce a estudiar.

**Tabla II.** Batimetrías de puntos de toma de muestras de sedimento.

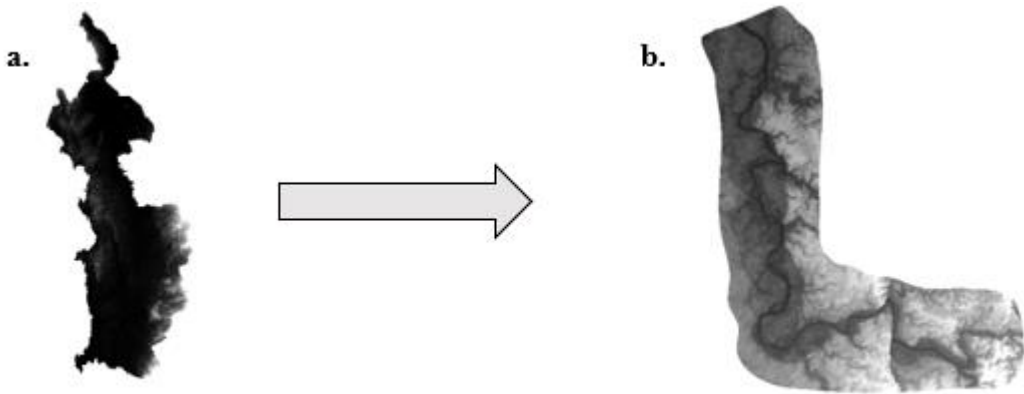
Punto	Perfil	Parámetros/Unidad	Resultado
1. Antes Lloró		Q. medio (m3/s)	155.72
		Velocidad promedio (m/s)	0.94
		Profundidad promedio (m)	3.24
		Distancia DMG (m)	91.74
2. Después Lloró		Q. medio (m3/s)	179.51
		Velocidad promedio (m/s)	1.5
		Profundidad promedio (m)	2.29

		Distancia DMG (m)	94.83
<b>3. Después Yuto</b>		Q. medio (m3/s)	281.55
		Velocidad promedio (m/s)	1.3
		Profundidad promedio (m)	2.94
		Distancia DMG (m)	147.51
<b>4. Antes Samurindó</b>		Q. medio (m3/s)	203.63
		Velocidad promedio (m/s)	1.04
		Profundidad promedio (m)	2.41
		Distancia DMG (m)	206.97
<b>5. Antes La Paloma</b>		Q. medio (m3/s)	313.39
		Velocidad promedio (m/s)	0.92
		Profundidad promedio (m)	2.85
		Distancia DMG (m)	210.35
<b>6. Después La Paloma</b>		Q. medio (m3/s)	441.45
		Velocidad promedio (m/s)	0.92
		Profundidad promedio (m)	2.4
		Distancia DMG (m)	249.6
<b>7. Antes Mercado</b>		Q. medio (m3/s)	713.81
		Velocidad promedio (m/s)	0.68
		Profundidad promedio (m)	3.13
		Distancia DMG (m)	371.27
<b>8. Salida Caraño</b>		Q. medio (m3/s)	616.37
		Velocidad promedio (m/s)	1.19
		Profundidad promedio (m)	3.43
		Distancia DMG (m)	204.62

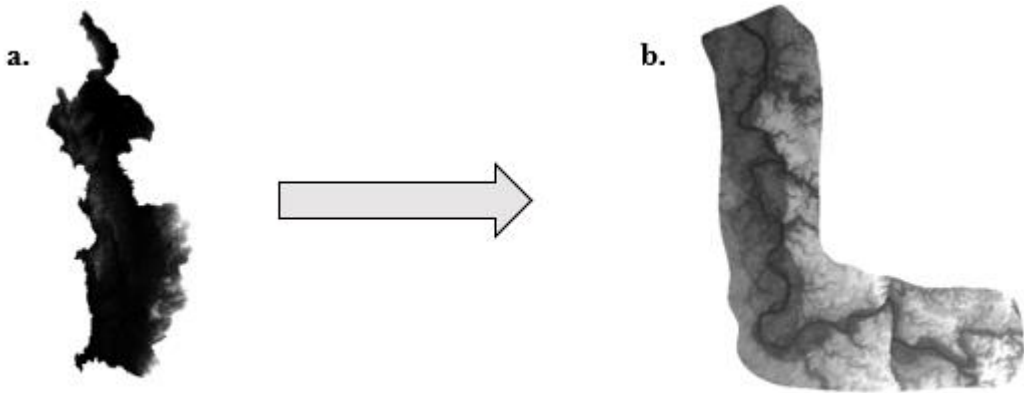
### *Recorte DEM utilizando el programa ArcGIS*

El ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Para el recorte de la zona de estudio de esta modelación se utilizó una extensión de ArcGIS llamada ArcMap. De esta manera se pasó de un

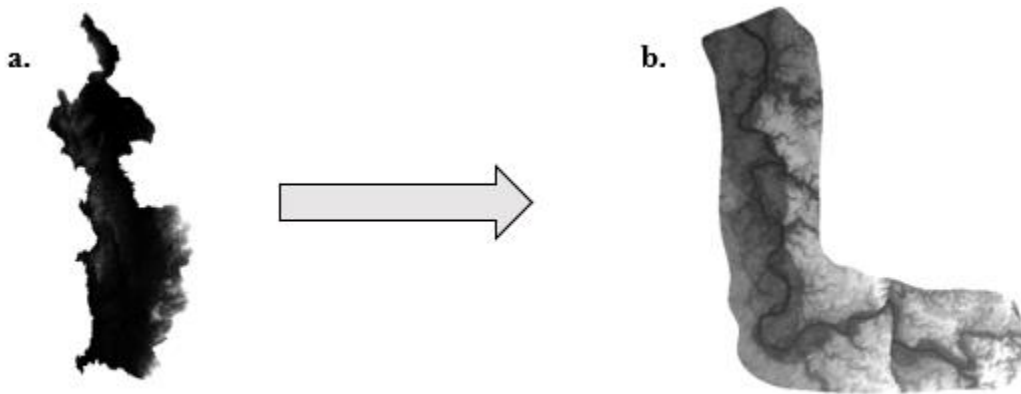
archivo DEM, el cual es un modelo digital de elevación, como se muestra en la



**Fig. 7a,** a uno como se muestra en la

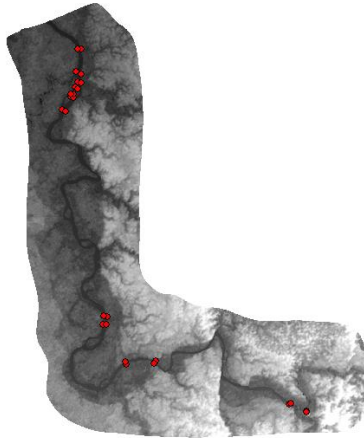


**Fig. 7b,** en donde se dejó solo el área de estudio, la cual abarca el río Atrato, desde el municipio de Lloró, hasta el municipio de Quibdó, del departamento del Chocó. Este recorte se hizo con el fin de obtener un archivo DEM menos pesado y sobre el cual se pudiera trabajar en el programa HEC-RAS 6.2, utilizando la extensión RasMapers.



**Fig. 7.** a) Archivo DEM mapa del Chocó, b) Archivo DEM zona de estudio

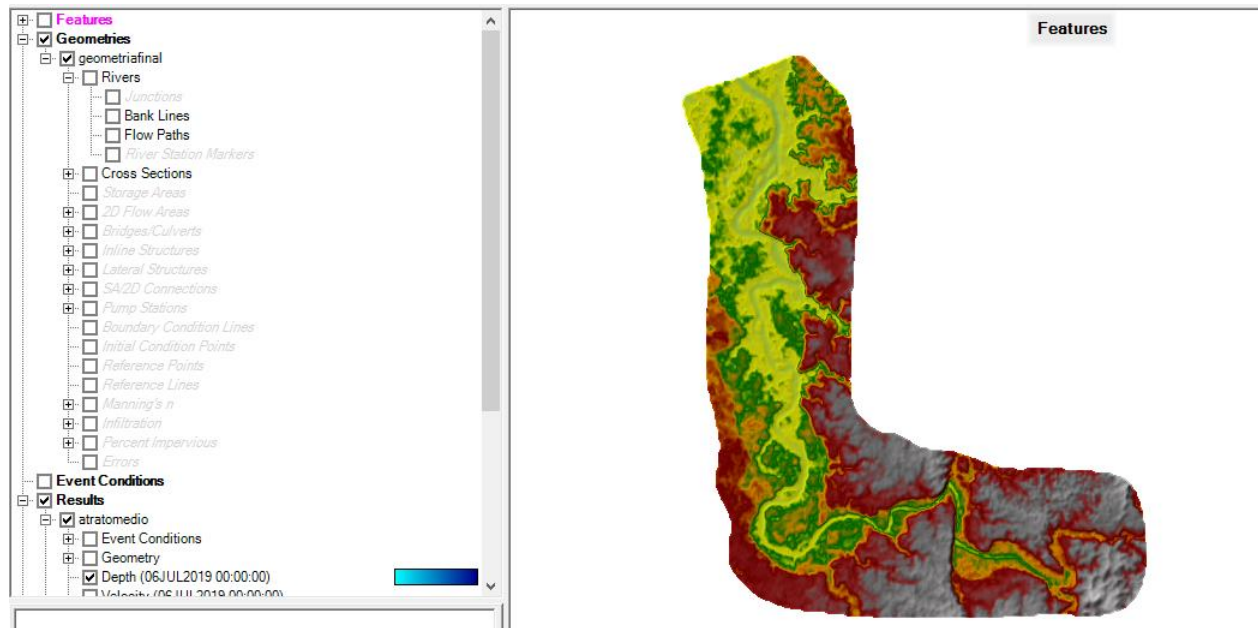
Una vez se obtuvo el archivo DEM recortado, mediante la extensión ArcMap, se subieron las coordenadas geográficas de los puntos en donde se hicieron levantamientos batimétricos, estos puntos incluyen los de toma de muestra de sedimentos. En la **Fig. 8**, se pueden observar los puntos batimétricos sobre la zona de estudio. Después de este paso, se pasó a realizar la modelación en HEC.RAS 6.2.



**Fig. 8.** Archivo DEM zona de estudio con puntos batimétricos.

#### *Modelación en HEC-RAS 6.2.*

Para iniciar con la modelación, lo primero que se debe hacer es construir la geometría del tramo de estudio, para esto, se utiliza el recorte DEM de la figura 7b (**Fig. 7b**), y se carga en la extensión RasMapper, la cual es una interfaz a la que se accede desde el programa HEC-RAS. El RAS Mapper está destinado a proporcionar visualización de los resultados de la simulación HEC-RAS junto con datos geospaciales pertinentes para ayudar a los usuarios a mejorar los modelos hidráulicos [20]. La **Fig. 9**, muestra cómo se observa el DEM recortado, cargado al RasMapper.

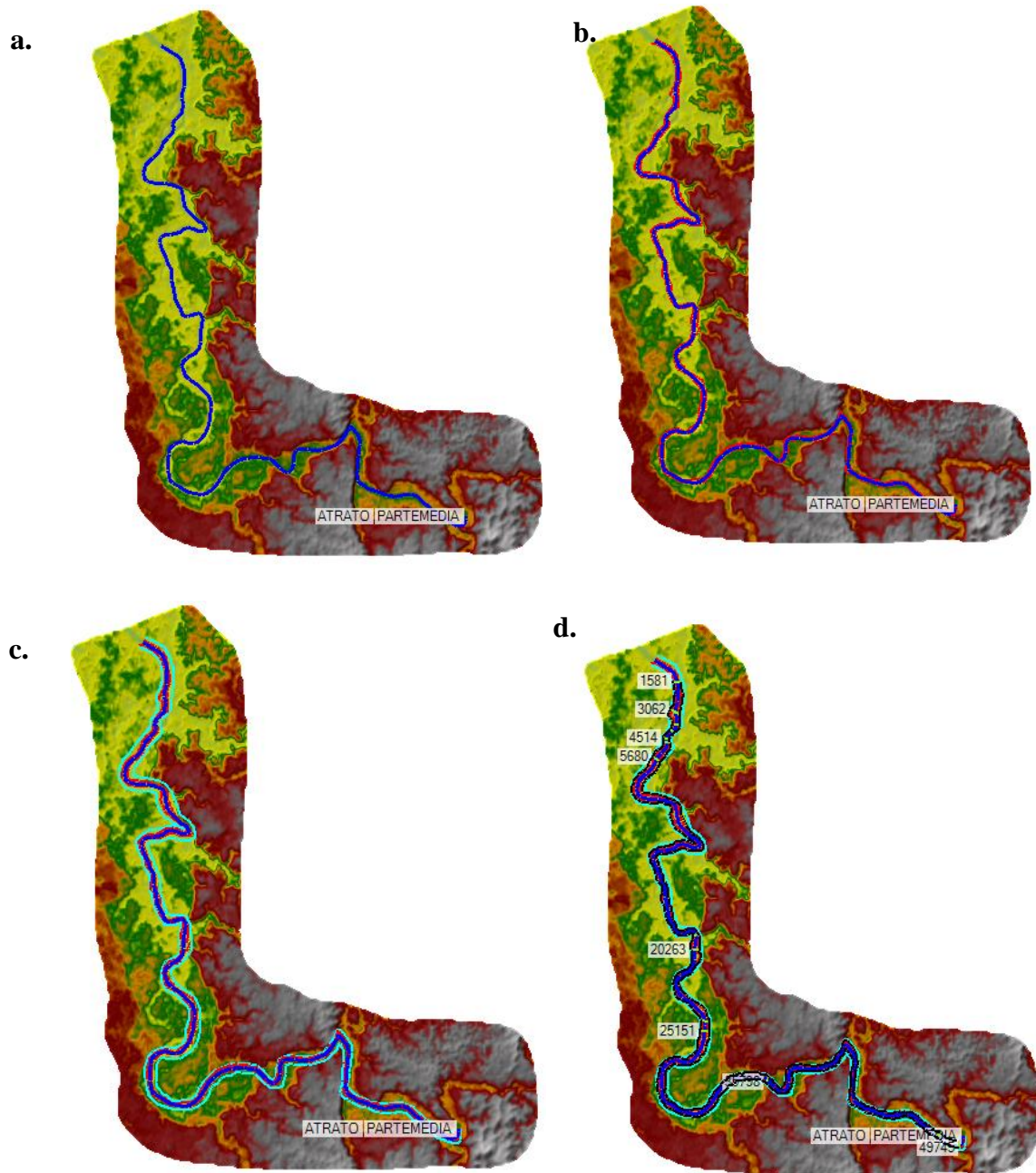


**Fig. 9.** Archivo DEM zona de estudio cargado en el RasMapper

Para establecer la geometría de la zona de estudio, se debe trazar el río, las líneas de banca y de inundación, además se deben trazar las secciones transversales en donde se realizaron las batimetrías, sobre el DEM recortado. El paso a paso se muestran en la siguiente figura. En la **Fig. 10a**, se muestra el trazado de la curva azul que hace referencia a la forma del río, esta curva se debe trazar siempre en sentido del flujo del agua del río, es decir, en dirección de aguas abajo.

En la **Fig. 10b**, se muestra la construcción de las líneas de banca tanto a la derecha como a la izquierda de la línea del río, líneas rojas, estas líneas se utilizan para definir los bancos de los canales principales para una sección transversal, si están líneas no se definen entonces no se establecerán los extremos de las secciones transversales, también se deben de trazar en dirección del flujo. En la **Fig. 10c**, se muestra el trazado de las líneas de ruta de flujo, líneas de color aguamarina, estas se utilizan para calcular las longitudes de alcance entre las secciones transversales en ambos márgenes, se deben dibujar después de las líneas de banca, en la misma dirección y no pueden cruzarse con las líneas de ríos ni las de banca.

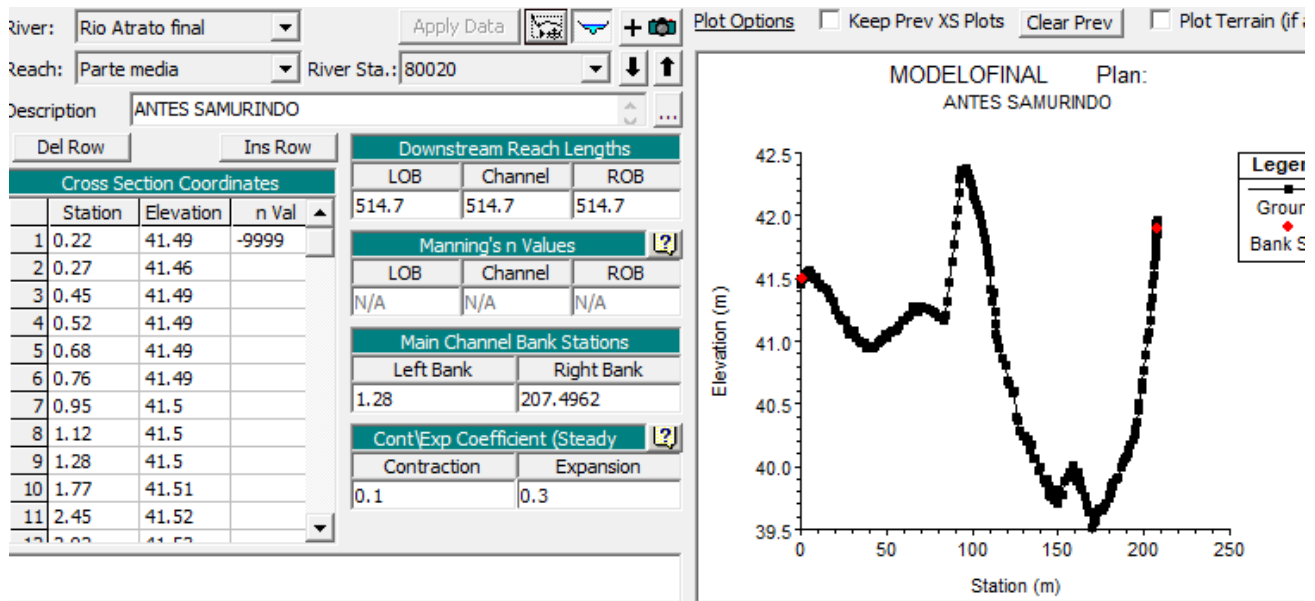
Por último, la **Fig. 10d**, muestra las secciones transversales trazadas, las cuales se identifican con una serie de números, en los puntos donde se realizaron levantamientos batimétricos, estas líneas se deben de trazar de derecha a izquierda en dirección de aguas abajo hacia aguas arriba.



**Fig. 10.** Paso a paso de construcción de la geometría sobre el Archivo DEM recortado.



Los datos obtenidos en las batimetrías de las secciones transversales para cada punto se pasan de forma manual al programa. La **Fig. 11**, muestra la sección transversal de un punto batimétrico ingresado al software.



**Fig. 11.** Sección transversal del punto Antes Samurindó

### *Caracterización mineralógica*

La caracterización mineralógica permite una rápida identificación de los principales minerales presentes, esta se hizo por medio de la difracción de rayos X.

Para esta caracterización, se dispuso del equipo de difracción de rayos X de Ruta-N (**Fig. 12**), la encargada de realizar la prueba fue la estudiante de doctorado, Liliana Trinidad López Chalarca, y los parámetros utilizados en el ensayo fueron: rango de barrido entre ( $5 - 85^\circ$ ) este rango se escogió porque de acuerdo a la literatura las principales fases presentes en muestras de sedimentos se podían observar en este rango, la velocidad con la que se hizo el barrido fue de 0.01  $2\theta$ /seg, para obtener una excelente resolución en el espectro. Para este ensayo se requirió 3 gramos de la muestra de sedimento pasante malla N° 200.



**Fig. 12.** Equipo DRX ubicado en Ruta-N

El análisis del difactograma se realizó por medio del software HighScore Plus, el cual se trata de un software de análisis para experimentos de difracción de rayos X en polvo. Cubre una amplia gama de métodos de análisis, desde la identificación cualitativa de fases hasta ajustes de perfil y ajustes de fase (Rietveld) para determinaciones cuantitativas, desde comparaciones gráficas hasta la solución de estructuras cristalinas inorgánicas, desde determinaciones de celdas unitarias hasta evaluaciones estadísticas como agrupamiento, PLSR y t-SNE [21].

## V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados que se muestran a continuación son para tres puntos del tramo de estudio seleccionado, los puntos que se escogieron fueron: Antes Lloró, Salida Caraño y Antes Samurindó, estos puntos están ubicados en los extremos y parte media del tramo de estudio, respectivamente. A estos tres puntos se les realizaron caracterización granulométrica y mineralógica, además se les analizaron los resultados obtenidos en la modelación.

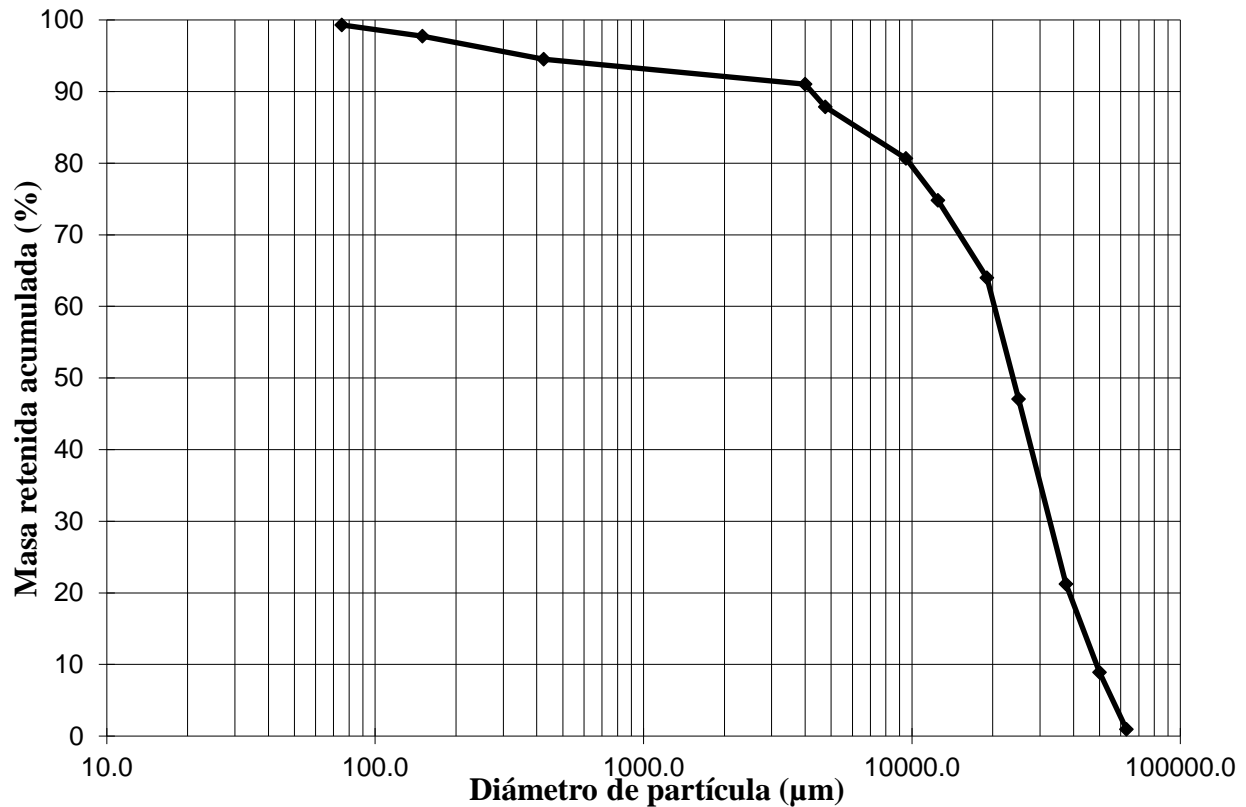
### *Caracterización granulométrica*

La **Tabla III**, muestra los resultados del ensayo de tamizaje en seco para el punto Antes Lloró, en donde se encontraron los porcentajes de: material retenido, retenido acumulado y el pasante para cada tamiz.

**Tabla III.** Distribución granulométrica de los sedimentos para el punto 1, Antes Lloró.

Tamiz		Peso material (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante
(mm)	#				
63	2 1/2"	20.11	0.7	0.7	99.3
50	2	459.00	15.0	15.7	84.3
37.5	1 1/2"	253.30	8.3	23.9	76.1
25.0	1"	876.00	28.6	52.6	47.4
19.0	3/4"	311.85	10.2	62.8	37.2
12.5	1/2"	235.30	7.7	70.5	29.5
9.50	3/8 "	70.83	2.3	72.8	27.2
4.75	4	73.79	2.4	75.2	24.8
4.0	10	107.73	3.5	78.7	21.3
0.425	40	447.92	14.6	93.4	6.6
0.150	100	164.43	5.4	98.7	1.3
0.075	200	28.97	0.9	99.7	0.3
0.000	Bandeja	9.34	0.3	100.0	0.0
Total		3058.57			

Utilizando el programa GRADISTATV 9.1Tv se obtuvieron los siguientes resultados:



**Fig. 13.** Curva de distribución granulométrica para el punto Antes Lloró.

La **Fig. 13**, muestra un diagrama semilogarítmico, donde se representan los tamaños en el eje X (en una escala logarítmica de base 10), y en el eje Y una escala aritmética del 0 al 100 %, lo cual nos muestra claramente como es la distribución granulométrica del sedimento para ese punto. La pendiente de la curva indica que hay una baja uniformidad en los datos, pero una mayor distribución o dispersión de estos, ya que esta pendiente tiene una muy elevada inclinación. Se puede observar que el tamiz N°4 pasó menos del 50%, lo cual me indica que el sedimento está conformado principalmente por grava.

Los diámetros nominales encontrados a partir de la curva y la tabla 2, fueron:

D10= 1.69mm

D30 = 12.97mm

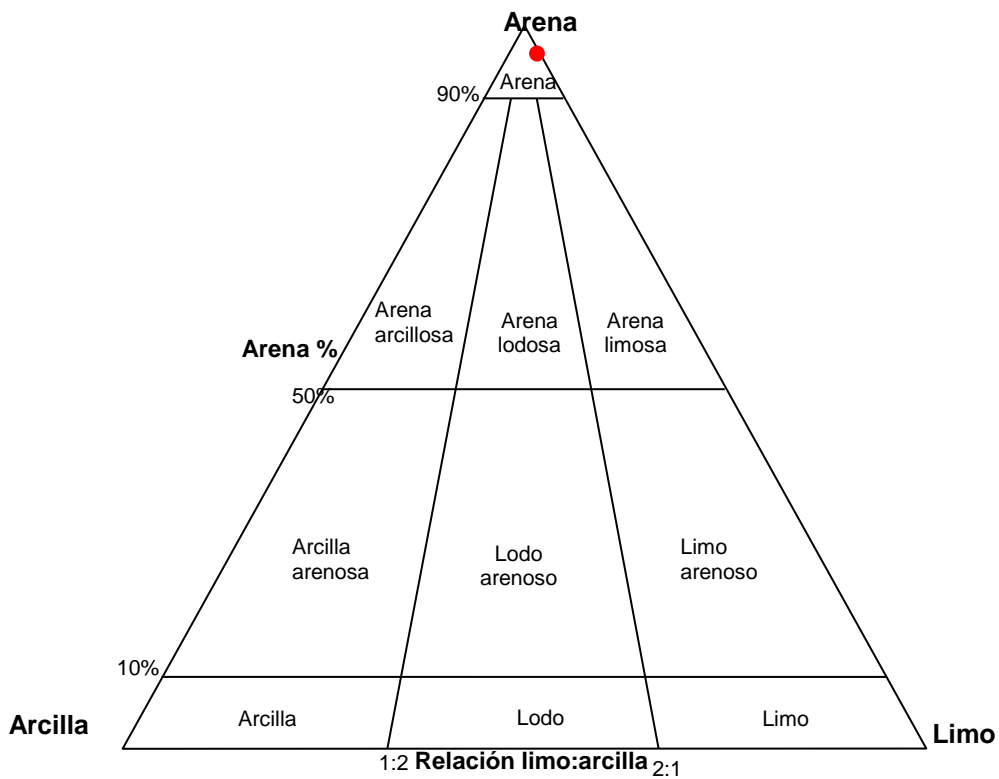
D60=31.22mm

D50=26.41mm

D90= 55.19mm

Los coeficientes calculados serían  $Cu=18.4$  y  $Cc=3.18$ , lo cual indica que se trata de un sedimento pobremente gradado, esto quiere decir que, el material presenta diferentes tamaños de grano, pero ninguno de ellos prevalece.

En la **Fig. 14**, se muestra el diagrama ternario de arcilla-limo-arena, podemos observar que la muestra de sedimento (punto rojo en el diagrama), está conformada principalmente por arena, con un contenido de aproximadamente 99.8% de arenas (la grava está presente en este contenido), y no hay presencia de material arcilloso



**Fig. 14.** Diagrama ternario de Arcilla- Limo-Arena, para el punto 1 Antes Lloró.

En la **Fig. 15**, se muestra que el sedimento, posee un grupo textural de grava muy gruesa, ya que dentro del grupo de la grava el 35.1% es grava muy gruesa. En general, el sedimento tiene un contenido de 16.5 % de arena, 83.3% de grava y solo un 0.3% de lodo.

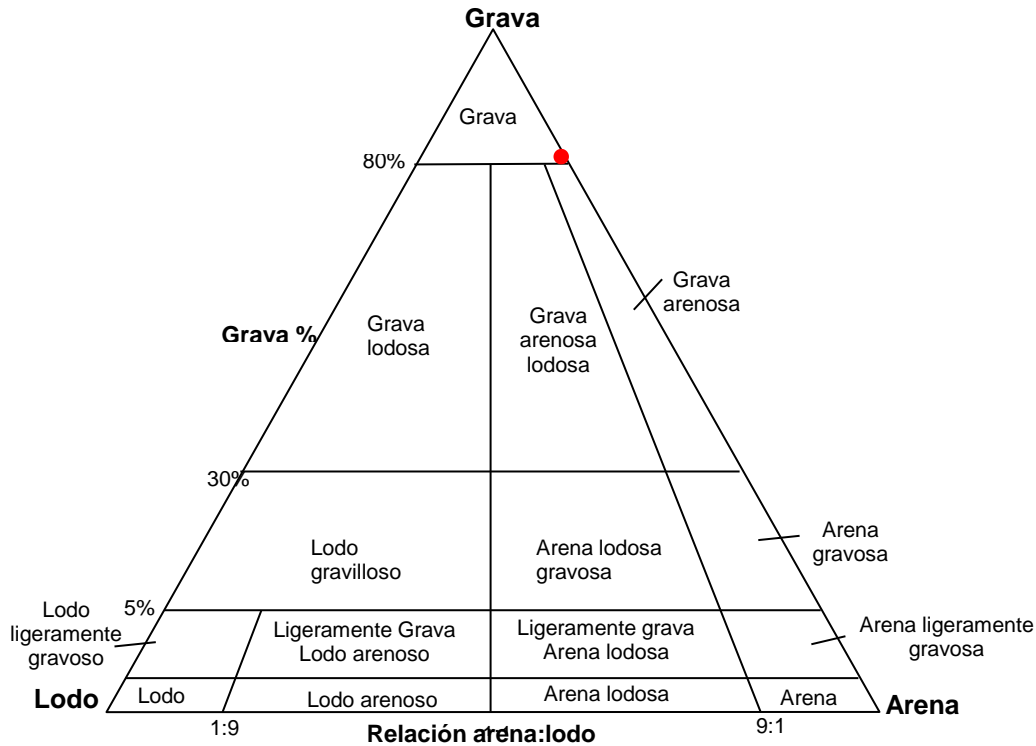


Fig. 15. Diagrama ternario de Lodo- Arena-Grava, para el punto 1 Antes Lloró

La **Tabla IV**, muestra resultados del ensayo de tamizaje en seco para el punto Antes Samurindó, en donde se encontraron los porcentajes de: material retenido, retenido acumulado y el pasante para cada tamiz.

**Tabla IV.** Distribución granulométrica de los sedimentos para el punto 4, Antes Samurindó.

Tamiz (mm)	#	Peso material (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante
63	2 1/2"	32.62	0.9	0.9	99.1
50	2	277.53	8.0	8.9	91.1
37.5	1 1/2"	429.77	12.3	21.2	78.8
25.0	1"	898.68	25.8	47.1	52.9
19.0	3/4"	589.67	16.9	64.0	36.0
12.5	1/2"	377.05	10.8	74.8	25.2
9.50	3/8 "	204.12	5.9	80.7	19.3
4.75	4	249.48	7.2	87.8	12.2
4.0	10	110.56	3.2	91.0	9.0
0.425	40	121.90	3.5	94.5	5.5
0.150	100	111.93	3.2	97.7	2.3
0.075	200	54.62	1.6	99.3	0.7
0.000	Bandeja	24.09	0.7	100.0	0.0
Total		3482.01			

Utilizando el programa GRADISTATV 9.1 se obtuvieron los siguientes resultados:

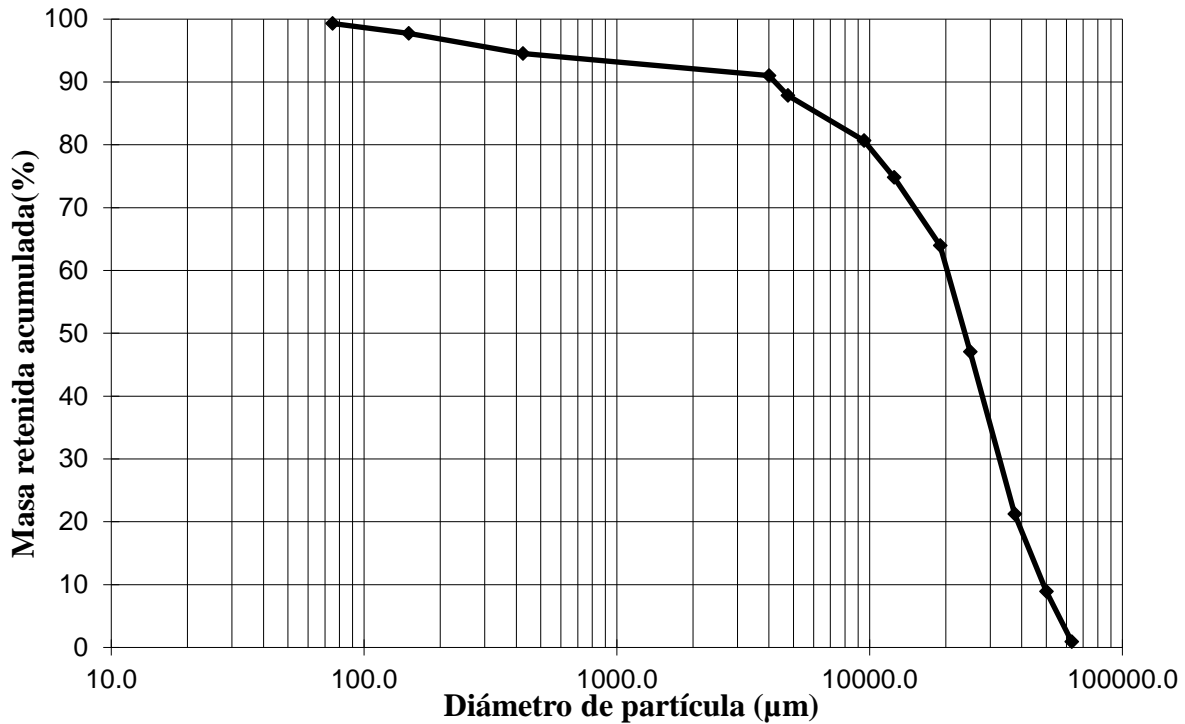


Fig. 16. Grafica de distribución granulométrica punto 4, Antes Samurindó.

La Fig. 16, muestra la distribución granulométrica del sedimento para ese punto. La pendiente de la curva indica que hay una baja uniformidad en los datos, además se puede observar que el sedimento se compone principalmente por grava, ya que por tamiz malla 4 no pasa más del 50%.

Los diámetros nominales encontrados a partir de la curva y la tabla 5, fueron:

D10= 4.26 mm

D30 = 16.68 mm

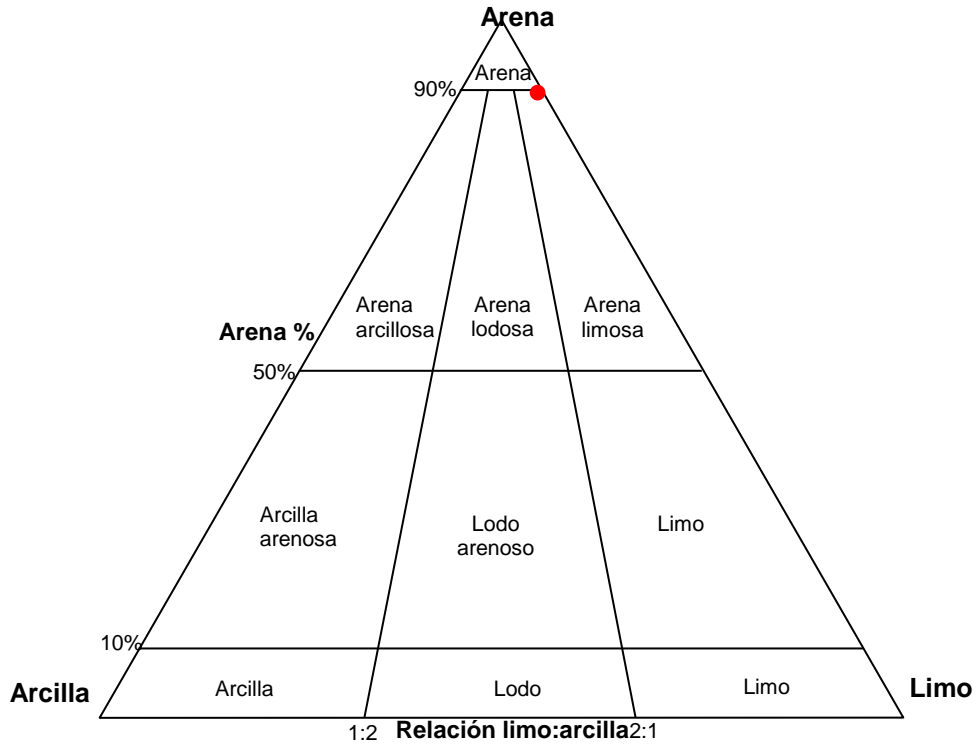
D60=28.95 mm

D50=24.12 mm

D90= 48.95 mm

Los coeficientes calculados serían  $C_u=6.80$  y  $C_c=2.26$ , lo cual indica que posee un poco uniformidad de los tamaños, es decir, una alta distribución de tamaños.

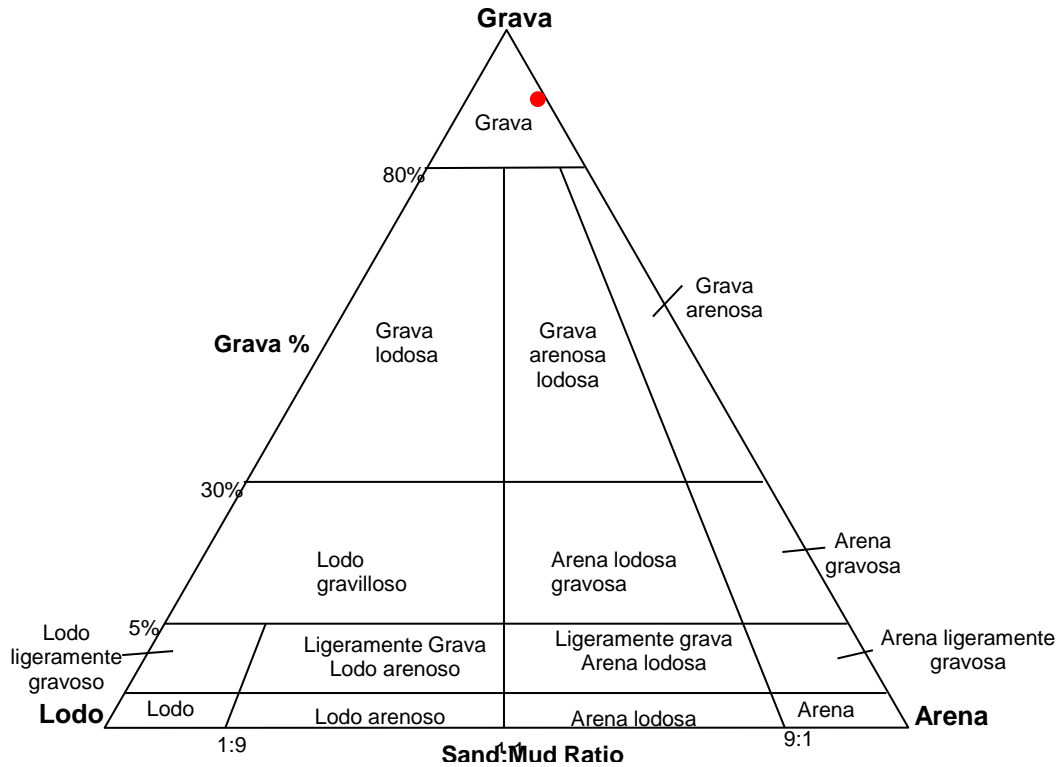
En la Fig. 17, se muestra el diagrama ternario de arcilla-limo-arena, el punto rojo representa la muestra de sedimento, se puede observar que el sedimento está conformado principalmente por arenas (la grava está presente en este contenido), y hay presencia en menor cantidad de material arcilloso y de limo. El sedimento está entrando al grupo de arena limosa.



**Fig. 17.** Diagrama ternario de Arcilla- Limo-Arena, para el punto 4 Antes Samurindó.

En el diagrama de la **Fig. 18**, se muestra que el sedimento, posee un grupo textural de grava gruesa, ya que, dentro del grupo de la grava, la grava gruesa se encuentra en mayor proporción con un 28.2%. El sedimento en general presenta, un contenido de 7.2 % de arena, 92.1% de grava y solo un 0.7% de lodo.





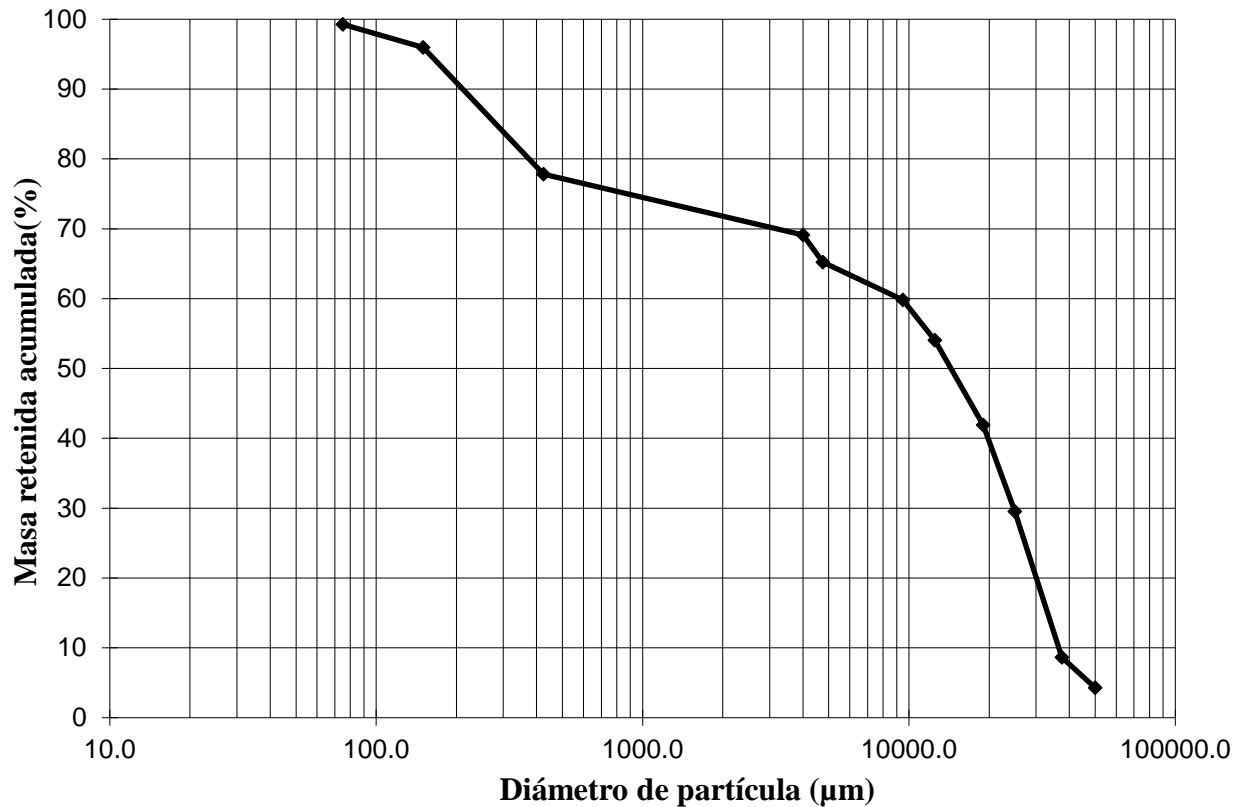
**Fig. 18.** Diagrama ternario de Lodo- Arena-Grava, para el punto 4 Antes Samurindó.

Los resultados del ensayo de tamizaje en seco se plasmaron en la **Tabla V**, en donde se encontraron los porcentajes de: material retenido, retenido acumulado y el pasante para cada tamiz.

**Tabla V.** Distribución granulométrica de los sedimentos para el punto 8, Salida Caraño.

Tamiz (mm)	#	Peso material (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante
50.0	2	110.00	4.3	4.3	95.7
37.5	1 1/2"	111.00	4.3	8.6	91.4
25.0	1"	535.93	20.9	29.5	70.5
19.0	3/4"	317.51	12.4	41.9	58.1
12.5	1/2"	311.84	12.2	54.1	45.9
9.5	3/8 "	147.42	5.7	59.8	40.2
4.75	4	138.91	5.4	65.2	34.8
4.0	10	99.22	3.9	69.1	30.9
0.425	40	223.96	8.7	77.8	22.2
0.150	100	464.93	18.1	96.0	4.0
0.075	200	84.98	3.3	99.3	0.7
0.000	Bandeja	18.71	0.7	100.0	0.0
	Total	2564.40			

Utilizando el programa GRADISTATV 9.1 se obtuvieron los siguientes resultados:



**Fig. 19.** Grafica de distribución granulométrica punto 8, Salida Caraño.

La **Fig. 19**, muestra la distribución granulométrica del sedimento para ese punto. Se puede observar una alta dispersión de los tamaños de grano del sedimento, lo cual indica una baja uniformidad de estos.

Los diámetros nominales encontrados a partir de la curva y la tabla 7, fueron:

D10= 0.30 mm

D30 = 3.68 mm

D60=20.00 mm

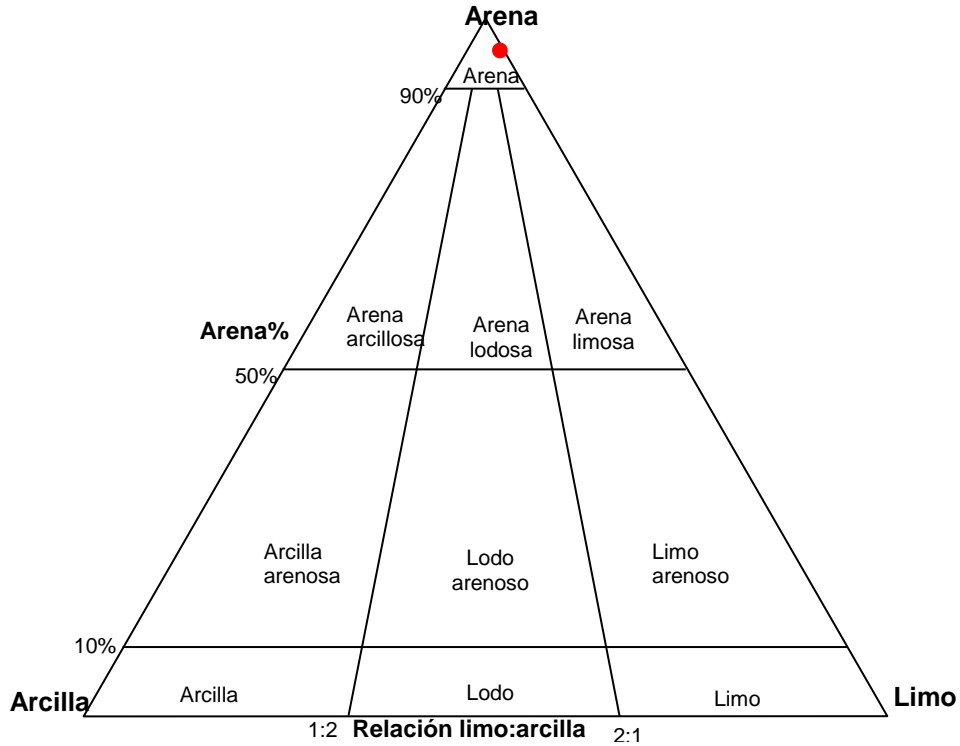
D50=16.64 mm

D90= 36.76 mm

Los coeficientes calculados serían  $Cu=67$  y  $Cc=2.26$ , lo cual indica un sedimento muy poco uniforme, muy pobremente gradado.

En la **Fig. 20**, se muestra el diagrama ternario de arcilla-limo-arena, se puede observar que la muestra de sedimento (punto rojo en el diagrama) está conformada principalmente por arenas

(la grava está presente en este contenido), hay una mínima presencia de material arcilloso y de limo.



**Fig. 20.** Diagrama ternario de Arcilla- Limo-Arena, para el punto 8, Salida Caraño.

En el diagrama de la **Fig. 21**, se muestra que el sedimento, se encuentra dentro del grupo de grava arenosa con un mayor porcentaje en grava gruesa en un 30.1%. El sedimento presenta un contenido de 27.5 % de arena, 71.8 % de grava y solo un 0.7% de lodo

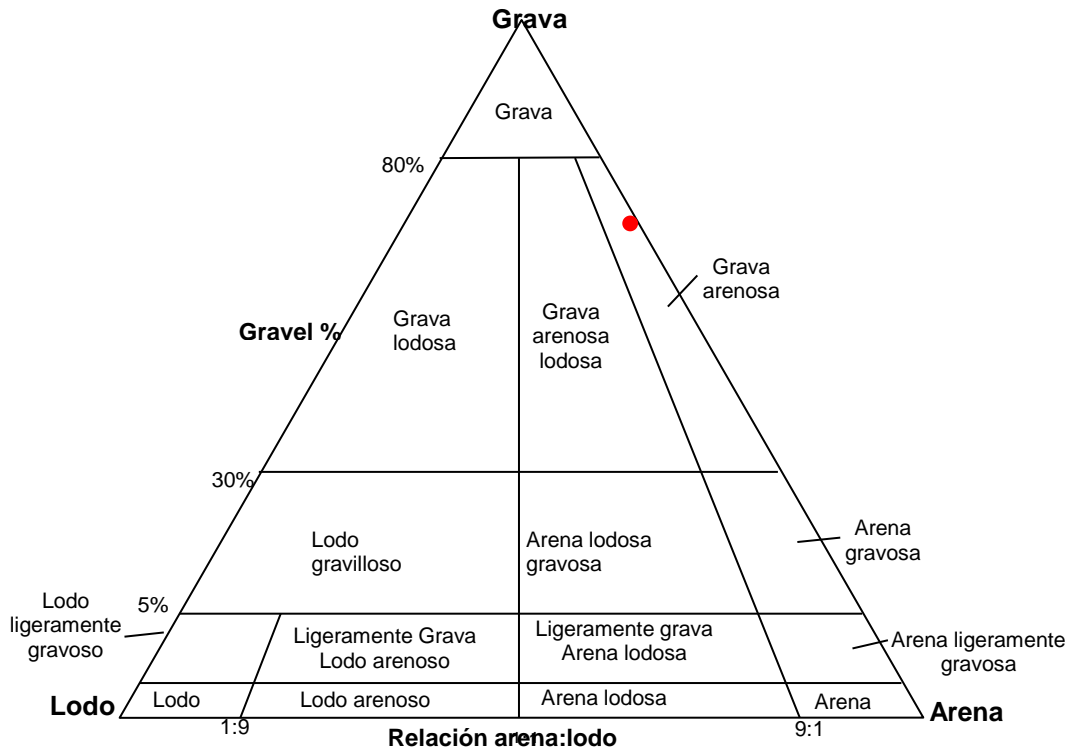
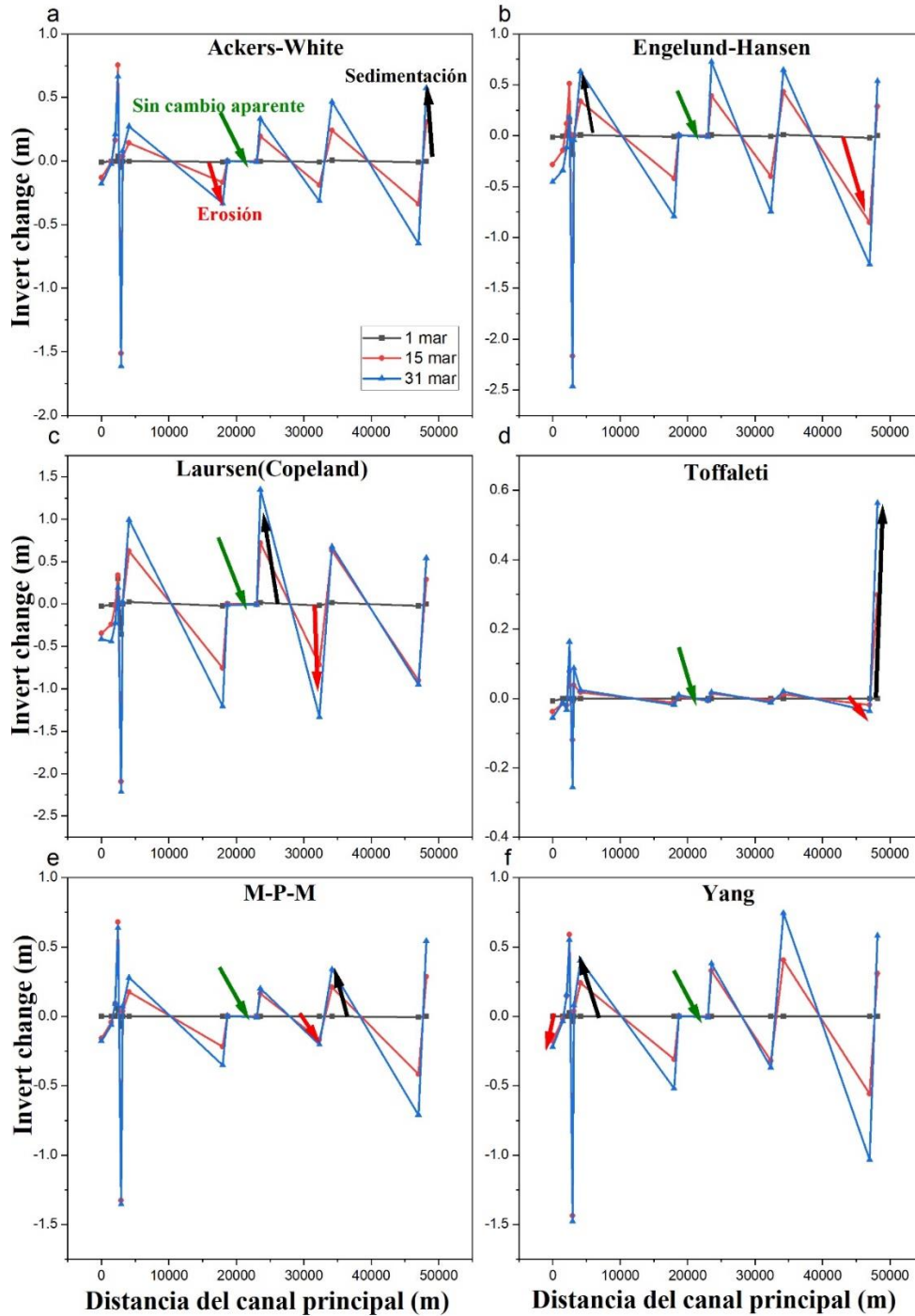


Fig. 21. Diagrama ternario de Lodo- Arena-Grava, para el punto 8, Salida Caraño.

*Resultados modelación del transporte de sedimentos mediante el software HEC-RAS.*

La Fig. 22, muestra el cambio en el lecho del río (invert change) simulados mediante las distintas funciones de transporte de sedimento. Se puede evidenciar la variación en el lecho a lo largo de todo el tramo de estudio, desde el punto Salida Caraño hasta el punto antes Lloró, para diferentes fechas del mes de marzo, estas fechas se escogieron porque presentan distintos niveles de caudales, se presenta el mayor caudal el 1 de marzo y el menor el 31 del mismo mes, el 15 de marzo presenta un caudal medio. Se pueden observar procesos de sedimentación o erosión a lo largo del tramo de estudio, los valores positivos indican condiciones de sedimentación mientras que los valores negativos indican condiciones de erosión, además hay secciones en las que no ocurrieron estos procesos de manera significativa, esto se pudo dar porque no hubo una variación considerable en el caudal al pasar el tiempo en dichas secciones. La sedimentación y la erosión están directamente relacionados con el flujo del caudal y el por el ancho de dichas secciones, a mayores condiciones de flujo, menor sedimentación y por ende mayor erosión.

Todas las gráficas de la **Fig. 22**, mantiene la misma tendencia para todas las funciones estudiadas con algunos cambios en magnitud. Estos cambios en la magnitud se deben a los rangos de tamaños de sedimentos que utiliza cada función.



**Fig. 22.** Cambio del lecho para distintas fechas, obtenidos mediante las diferentes funciones de transporte de sedimentos de fondo

En la **Fig. 23**, se muestra la variación de la velocidad media con la que se mueven las partículas de sedimentos a lo largo del tramo de estudio, en tres diferentes fechas, para cada una de las funciones de transporte de sedimentos estudiadas. Se puede observar que los resultados obtenidos a partir de diferentes metodologías de transporte de sedimentos poseen la misma tendencia en las secciones de estudio, con leves diferencias en las magnitudes de los valores de las velocidades.

Como era de esperarse, en las secciones con procesos de erosión se presentan las mayores velocidades de movimiento de la parte móvil del lecho, debido al alto caudal de agua presentes en estas secciones, ya que son secciones que presentan canales más estrechos. Esta velocidad del transporte de los sedimentos disminuye con el tiempo, debido a la disminución del caudal de agua de entrada a medida que aumentan los días.

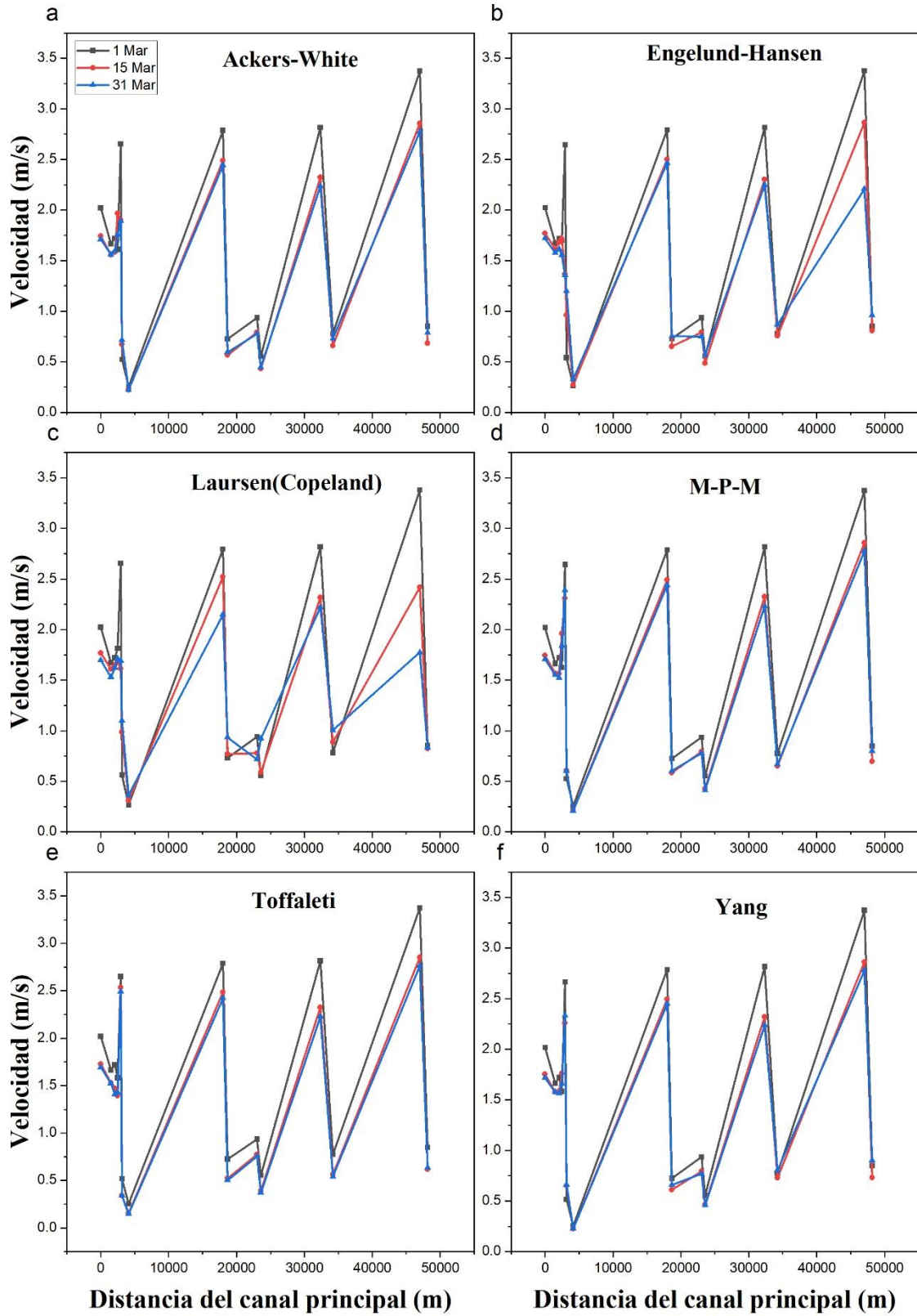


Fig. 23. Velocidad media de la parte móvil del lecho obtenidas mediante las diferentes funciones de transporte de sedimentos de fondo, para distintas fechas.

---

La **Fig. 24**, muestra la capacidad de transporte de carga a lo largo del tramo de estudio, obtenidos mediante las diferentes funciones de transporte de sedimentos de fondo, para distintas fechas. Los mayores valores de transporte de sedimentación se dan en los puntos en los que se presenta erosión, por ende, se da en las secciones con mayores valores de flujo y de velocidad de transporte.

La disminución y el aumento de la capacidad de transporte en cualquiera de las funciones estudiadas coincide con los picos de velocidad y sedimentación/erosión, mostrados en las **Fig. 22** y **Fig. 23**. Las funciones de Akcers-White, **Englang-Hansen** y Yang, basadas en la potencia de la corriente, muestran coincidencia en la tendencia de las curvas. La función de Laursen y la de Meyer-Peter Müller, basadas en el esfuerzo cortante, muestran también coincidencia en la tendencia de las curvas. La función de Toffaleti, que divide la distribución de la carga en suspensión en zonas verticales, reproduciendo el movimiento bidimensional de los sedimentos, por su parte posee una tendencia única, para la fecha el 1 marzo del año 2022.

Es importante mencionar que existe una gran diferencia en la capacidad de carga encontrada, la cual puede ser hasta de 30 órdenes de magnitud, por ejemplo, al comparar las metodologías de Ackers-White y M-P-M. Para tener una menor incertidumbre de cual función usar, se debe tener en cuenta el rango de tamaño de grano bajo el cual trabaja cada función de transporte.



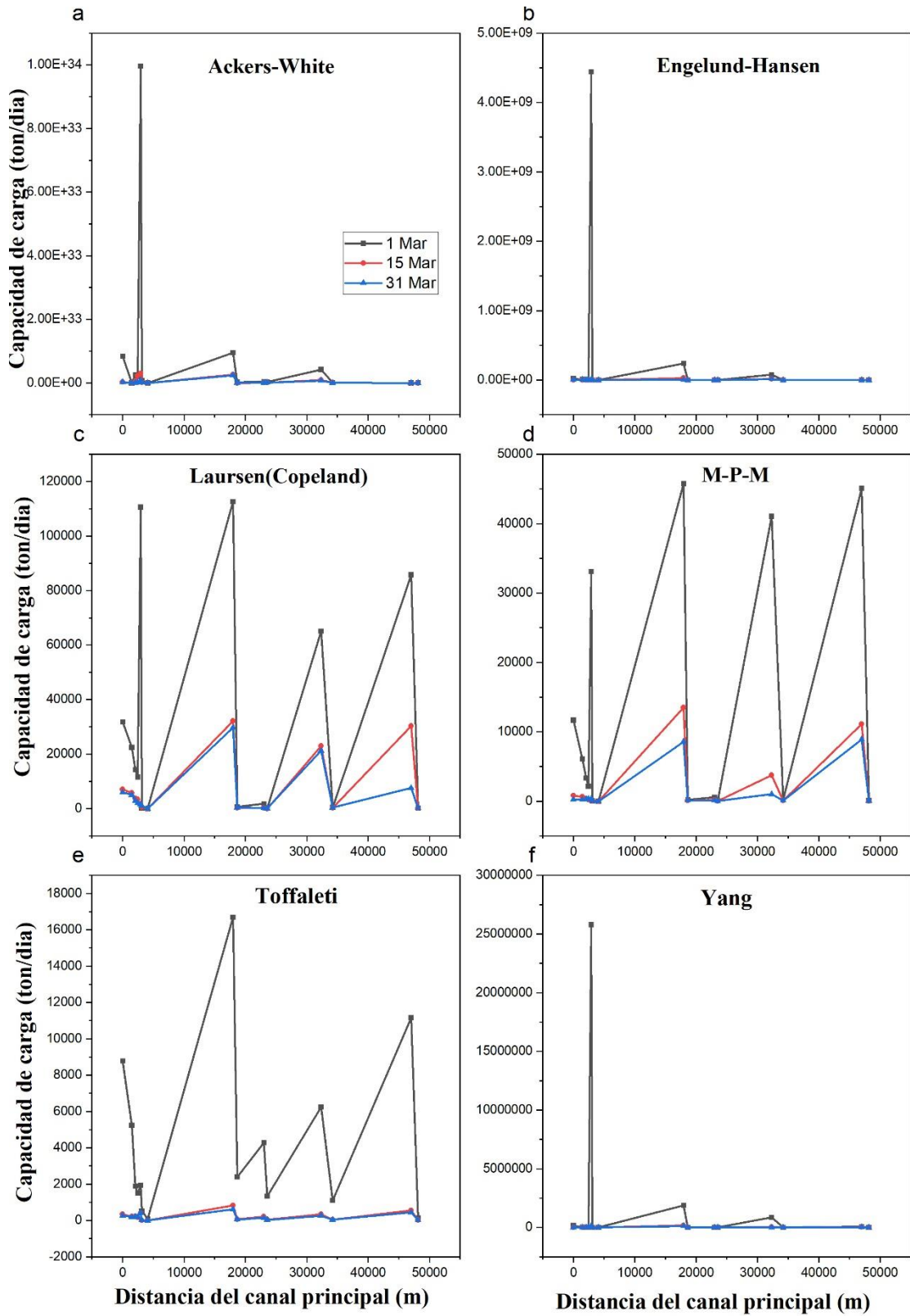
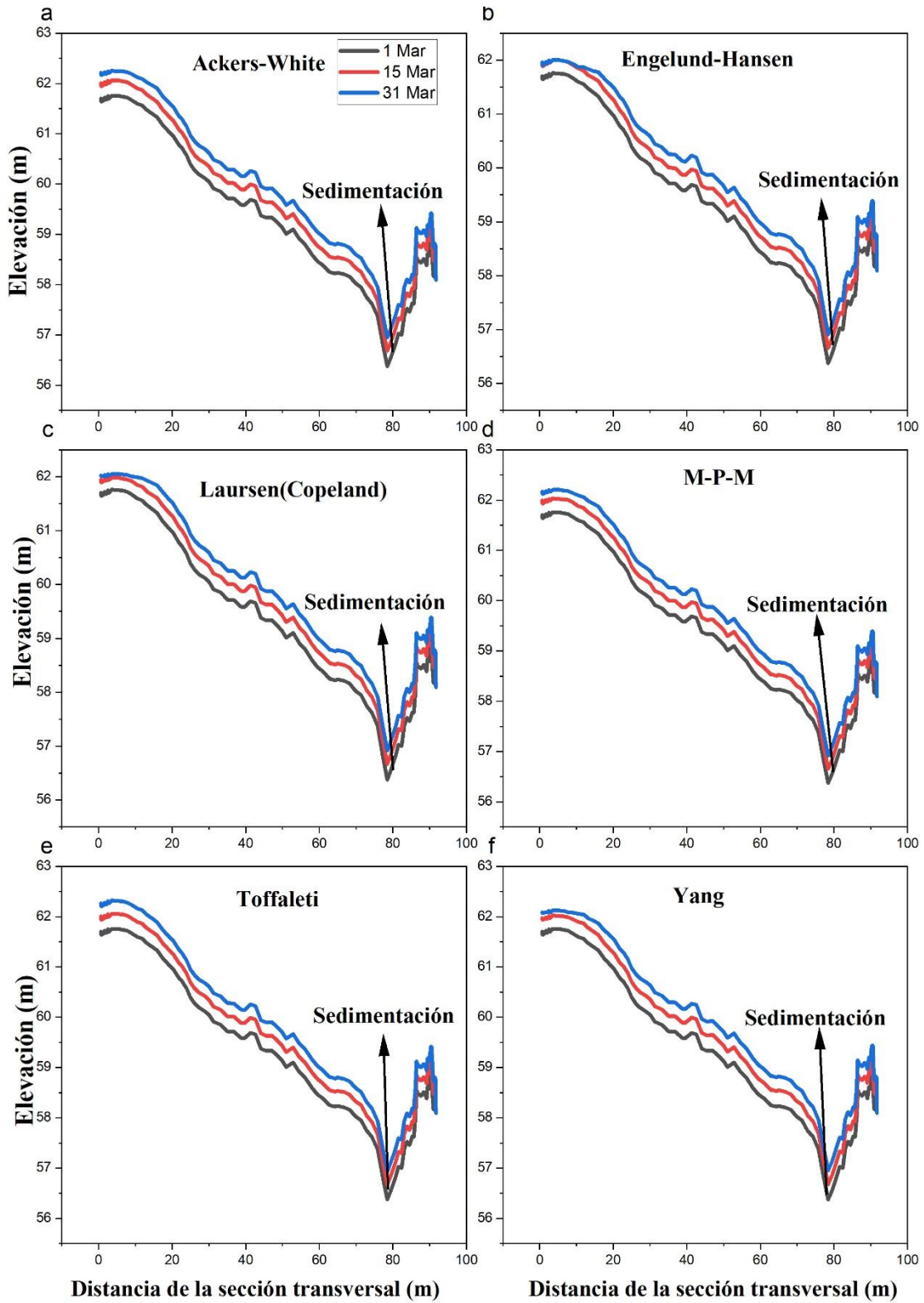


Fig. 24. Capacidad de transporte de carga del canal obtenidos mediante las diferentes funciones de transporte de sedimentos de fondo, para distintas fechas.

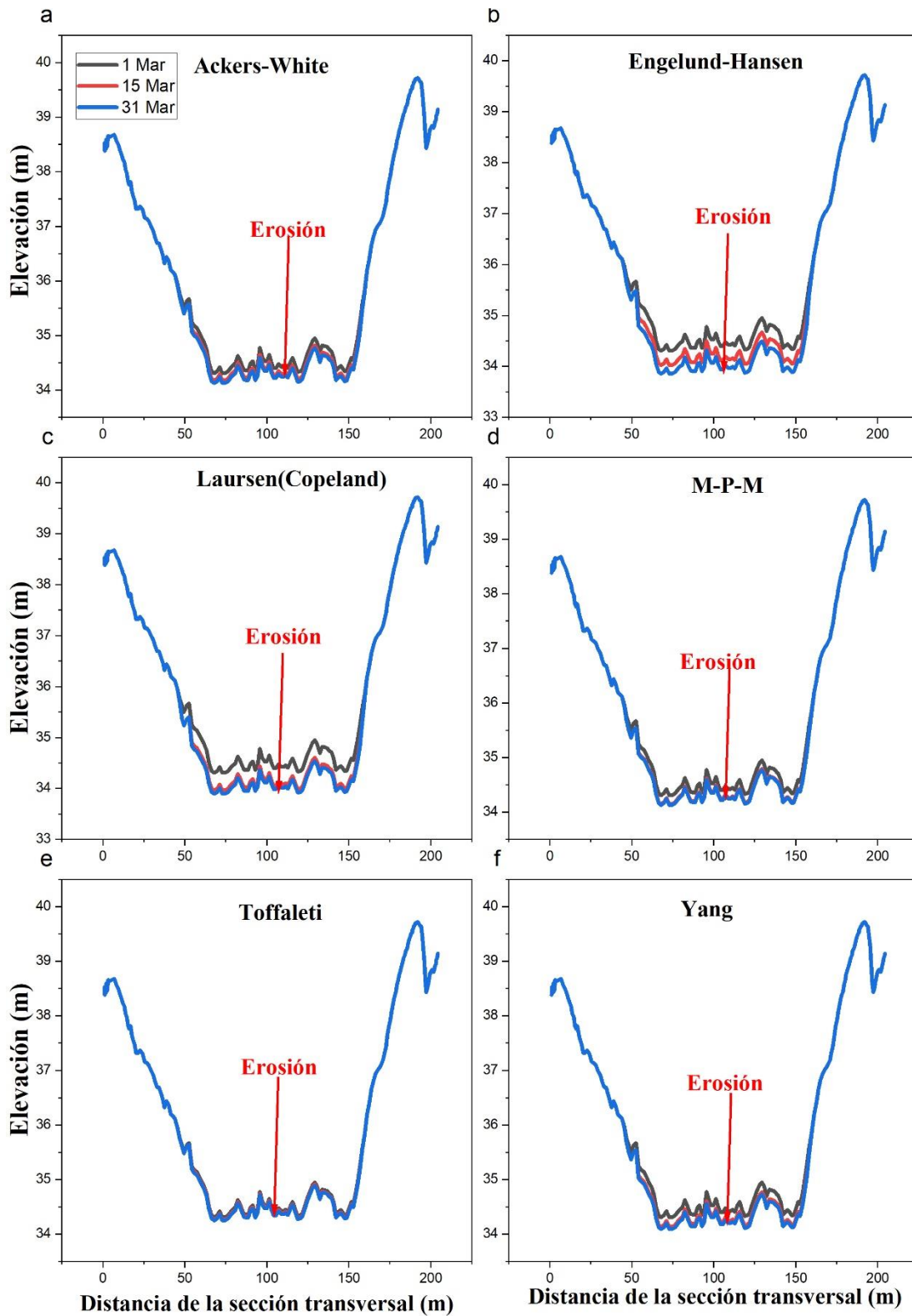
Por último, se analizaron los cambios en la morfología del lecho para las secciones, antes Lloró y Salida Caraño, que son los puntos extremos del tramo del río estudiado, se evaluarán los procesos de erosión o sedimentación, para cada función de transporte en los tres días seleccionados. En el punto medio, correspondiente a Antes Samurindó, no se observaron cambios aparentes en la morfología de la sección transversal del río en las fechas elegidas, por lo tanto, no hay cambios en la morfología para analizar.

En la **Fig. 25**, se puede observar que para todas las funciones se observan los mismos cambios en la sección transversal al pasar de un día a otro en el punto Antes Lloró, aunque presentan leves diferencias en los valores de agregación de material. Esta sección según la **Fig. 23** y **Fig. 24**, presenta una velocidad de transporte de sedimentos baja, por lo tanto, posee una baja capacidad de transporte, estas condiciones se reflejarían como un aumento de carga que será agregado al lecho de esta sección, por lo tanto, se dará un proceso de sedimentación al pasar los días.



**Fig. 25.** Morfología de la sección transversal del punto Antes Lloró, obtenidos mediante las diferentes funciones de transporte de sedimentos de fondo, para distintas fechas.

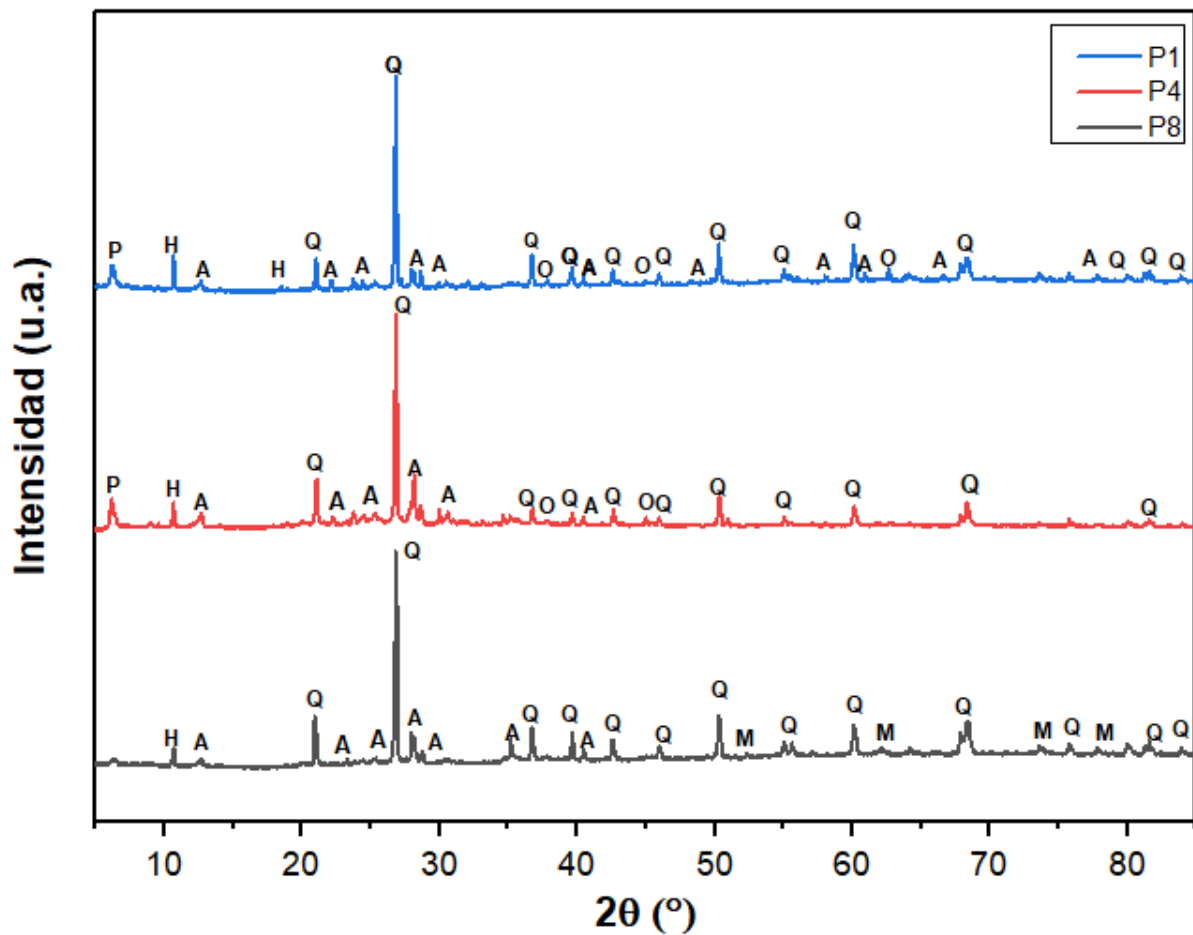
En la **Fig. 26**, se puede observar que para todas las funciones se observan los mismos cambios en la sección transversal al pasar de un día a otro en el punto Salida Caraño, aunque presentan leves diferencias en los valores de erosión del material. Debido a que en esta sección se dan mayores caudales, por ende, habrá una mayor velocidad de transporte de sedimentos y una mayor capacidad de carga esto se evidencia en la **Fig. 23** y **Fig. 24**, se puede observar que al aumentar los días disminuye la cantidad de material de fondo, por lo tanto, se presenta un proceso de erosión.



**Fig. 26.** Morfología de la sección transversal del punto Salida Caraño, obtenidos mediante las diferentes funciones de transporte de sedimentos de fondo, para distintas fechas.

### Caracterización mineralógica

La **Fig. 27**, muestran los resultados obtenidos por DRX, para los tres puntos seleccionados: P1(Antes Lloró), P4(Antes Samurindó) y P8(Salida Caraño). Se pueden evidenciar la presencia de fases de minerales de procedencia del entorno como lo son: Cuarzo(Q), Albita(A), Oro(O), Aluminosilicatos de Plata(P), Magnesioferrita(M), el cual se trata de magnetita con exceso de magnesio en su estructura, también se evidencia presencia de Hidrocarburos(H). Los minerales de oro, son muy comunes en esa zona, ya que se trata de una zona altamente minera.



**Fig. 27.** Difactograma para las muestras de sedimento de los puntos: P1, P4 y P8.

Se puede observar que en todas las muestras hay presencia de albita y cuarzo. La albita, es un mineral de feldespato común, un aluminosilicato de sodio, que se encuentra más ampliamente en pegmatitas y rocas ígneas félsicas como los granitos. También se puede encontrar en rocas metamórficas de bajo grado y como albita autigénica en ciertas variedades sedimentarias. La albita

suele formar cristales vítreos quebradizos que pueden ser incoloros, blancos, amarillos, rosados, verdes o negros. Se utiliza en la fabricación de vidrio y cerámica, pero su principal importancia geológica es como mineral formador de rocas [22].

La presencia del cuarzo y albita revelado en todos los difactogramas, confirma la composición mineralógica de las arenas que constituyen el área de estudio. El cuarzo proviene de la erosión físico-mecánica y la erosión de las rocas sedimentarias cretácicas, terciarias; no obstante, su origen también está relacionado con las rocas metamórficas gnéissicas, esquistos y rocas graníticas [23].

---

## VI. CONCLUSIONES

La caracterización granulométrica de los sedimentos es sumamente importante para comprender los fenómenos asociados con el transporte de sedimentos de fondo, ya que la granulometría del lecho define el rango de acción de las funciones que rigen el comportamiento de transporte y es un parámetro importante para conocer la capacidad del agua para transportar este material. En este estudio, la caracterización granulométrica que se hizo por medio de un tamizaje en seco y un posterior análisis en el software GRADISTATv 9.1, determinó que las muestras de los sedimentos tomados en los diferentes puntos están conformadas principalmente por grava y arena.

Se logró la modelación del transporte de sedimentos, a través del programa HEC-RAS, utilizando diferentes funciones que rigen este comportamiento, se observaron los cambios en la morfología del lecho asociados con los fenómenos de erosión y sedimentación de las secciones en el tramo de estudio.

Al comparar los resultados obtenidos por medio de las diferentes funciones de transporte de sedimentos, se evidenciaron valores notoriamente diferentes, por lo que la incertidumbre de cual función es la adecuada es enorme. Por lo tanto, para decidir cuál metodología usar, se debe realizar una revisión detallada de las condiciones hidráulicas del río y los parámetros granulométricos del sedimento, por lo tanto, se recomienda obtener una serie histórica de datos granulométricos de sedimento a lo largo del tramo, de esta forma se determinaría la función que mejor se ajusta a los datos observados.

La caracterización mineralógica evidenció la presencia principalmente de minerales como: cuarzo, albita, magnetita, oro, aluminosilicatos de plata.



## VII. RECOMENDACIONES

Actualmente no se poseen estudios sobre la caracterización mineralógica de los sedimentos del tramo de estudio ni del transporte de estos, por lo tanto, este estudio es un primer paso encaminado a definir e impulsar acciones de identificación granulométrica, mineralógica o composicional de los sedimentos transportados en el fondo del río, ya que la presencia de minerales preciosos como lo son el oro y la plata en esta fuente, puede implicar el uso de elementos contaminantes para su obtención, que se pueden transportar por el lecho del río. Por lo tanto, se recomienda a CODECHOCÓ ampliar este estudio para las diferentes cuencas del departamento del Chocó, realizando campañas de monitoreos que involucren la toma de sedimentos de fondo, para conocer con más detalle los fenómenos de transporte de estos sedimentos y la composición mineralógica de este material de fondo.

## REFERENCIAS

- [1] Schlumberger, «Energy Glossary en Español,» 2022. [En línea]. Available: <https://glossary.oilfield.slb.com/es/terms/s/sediment>.
- [2] CODECHOCÓ, «Entidad – CODECHOCÓ,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.codechoco.gov.co/entidad/>.
- [3] CODECHOCÓ, «Entidad – CODECHOCO,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.codechoco.gov.co/historia-funciones-y-deberes>.
- [4] Z. M. Orlando González, «Granulometría de los sedimentos fluviales del canal principal y llanura aluvial del río Portuguesa, Venezuela,» *Scielo*, pp. 1-19, 2016.
- [5] L. V. Montoya, «MODELACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL GOLFO DE URABÁ, COLOMBIA,» 2013. [En línea]. Available: [https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/1268/VelasquezMontoya\\_Liliana\\_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/1268/VelasquezMontoya_Liliana_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [6] DICTUC S.A., «ANÁLISIS CRÍTICO DE LA RED DE SEDIMENTOS DE LA DGA,» Santiago de Chile, 2020.
- [7] GEASIG, «¿Qué es HEC-RAS y para qué sirve?,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.geasig.com/que-es-hec-ras-y-para-que-sirve/>.
- [8] L. O. Suarez-Burgoa, «Rocas sedimentarias,» 2017.
- [9] M. D. Milton, X-Ray Diffraction and the identification and analysis of clay minerals., Oxford University Press, 1997.
- [10] Gunt Hambur, «Fundamentos del transporte de sedimentos,» *Ingeniería hidráulica*, pp. 157-163, 2018.
- [11] COBINABE, Generación y transporte de sedimentos en la Cuenca Binacional del Río Bermejo. Caracterización y análisis, Bolivia, 2010.
- [12] CODECHOCÓ, «CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL RIO ATRATO,» Quibdó, 2021.

- 
- [13] N. C. Tobón Arroyave, A. F. Cerón y L. F. Garcés Giraldo, «Análisis y modelamiento de la granulometría en la cáscara del café (*Coffea arabica* L.) variedad Castillo,» *SciELO Colombia*, pp. 80-91, 2015.
- [14] S. J. Blott y K. Pye, «GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments,» *Earth Surface Processes and Landforms*, pp. 1237-1248, 2001.
- [15] . D. E. Hart, I. D. Marsden, D. J. Todd y W. J. Vries, Mapping of the Bathymetry, Soft Sediments and Biota of the Seabed of Upper Lyttelton Harbour, University of Canterbury Estuarine Research , 2008, pp. 08-35.
- [16] GEOTECNIA, 2022. [En línea]. Available: <https://geotecniafacil.com/granulometria-de-suelos-por-tamizado/>.
- [17] G. i. t. way, «Geology is the way,» 2022. [En línea]. Available: <https://geologyistheway.com/sedimentary/sorting>.
- [18] R. L. Alonso, «Fórmulas para el cálculo aproximado de la capacidad de transporte de sedimentos en ríos de montañas,» *CIMBRA*, pp. 32-36.
- [19] G. W. Brunner, HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual” US ARMY CORPS OF ENGINEERS HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (HEC), US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, 2016.
- [20] HEC-RAS, «HEC-RAS Mapper User's Manual,» [En línea]. Available: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rmum/6.0/overview>. [Último acceso: 2022 08 19].
- [21] T. Degen, E. Bron , M. Sadki, B. PANalytical y A. Netherlands, «INTRODUCTION TO HIGHSCORE PLUS,» Malvern Panalytical, 2017.
- [22] The Editors of Encyclopaedia Britannica , «Britannica,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/science/albite>.
- [23] O. J. González Clemente, M. Bezada Díaz y Z. D. V. Millán Boadas, «Caracterización de las arenas y arcillas minerales de los depósitos de canal y planicie de inundación del río Portuguesa, Venezuela» Characterization of sands and mineral clays in channel and

floodplain deposits of Portuguesa river, Venezuela.,» *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, pp. 18-32, 2014.