

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**



Estimación de la erosión hídrica, el transporte de sedimentos y sus efectos en las estructuras hidráulicas de la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
CIVIL**

**AUTOR**

Pamela Deisy Polin Reyes

**ASESOR**

Maiquel López Silva

Lima, Perú

2024

**METADATOS COMPLEMENTARIOS****Datos del autor**

Nombres	Pamela Deisy
Apellidos	Polin Reyes
Tipo de documento de identidad	DNI
Número del documento de identidad	74815359
Número de Orcid (opcional)	

**Datos del asesor**

Nombres	Maiquel
Apellidos	Lopez Silva
Tipo de documento de identidad	DNI
Número del documento de identidad	49087489
Número de Orcid (obligatorio)	<a href="https://orcid.org/0000-0002-0946-6160">https://orcid.org/0000-0002-0946-6160</a>

**Datos del Jurado****Datos del presidente del jurado**

Nombres	Dayma Sadami
Apellidos	Carmenates Hernandez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número del documento de identidad	49086915

**Datos del segundo miembro**

Nombres	Félix Germán
Apellidos	Delgado Ramírez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número del documento de identidad	22264222

**Datos del tercer miembro**

Nombres	Víctor
Apellidos	Garcés Díaz
Tipo de documento de identidad	DNI
Número del documento de identidad	32860015

**Datos de la obra**

Materia*	Precipitaciones, transporte de sedimentos, erosión hídrica, estructura hidráulica y cuencas hidrográficas
Campo del conocimiento OCDE Consultar el listado: <a href="#">enlace</a>	<a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.00">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.00</a>
Idioma (Normal ISO 639-3)	SPA - español
Tipo de trabajo de investigación	Tesis
País de publicación	PE - PERÚ
Recurso del cual forma parte (opcional)	
Nombre del grado	Ingeniero Civil
Grado académico o título profesional	Título Profesional
Nombre del programa	Ingeniería Civil
Código del programa Consultar el listado: <a href="#">enlace</a>	732016

\*Ingresar las palabras clave o términos del lenguaje natural (no controladas por un vocabulario o tesoro).



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ACTA N° 060-2024-UCSS-FI/TPICIV**

**SUSTENTACION DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO CIVIL  
SEDE LIMA**

**Los Olivos, 06 de junio del 2024**

Siendo las 11:31 horas del 06 de junio del 2024, el jurado evaluador se reunió para presenciar el acto de sustentación en la Universidad Católica Sedes Sapientiae, se dio inicio a la sustentación de la Tesis:

**Estimación de la erosión hídrica, el transporte de sedimentos y sus efectos en las estructuras hidráulicas de la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo**

Por la Bachiller en Ciencias de la Ingeniería Civil:

**POLIN REYES, PAMELA DEISY**

Ante el Jurado calificador conformado por el:

Dra. CARMENATES HERNANDEZ, Dayma Sadami	Presidente
Dr. DELGADO RAMÍREZ, Félix German	Secretario
Mgr. GARCÉS DÍAZ, Víctor	Miembro

Siendo las 12:50 horas, habiendo sustentado y atendido las preguntas realizadas por cada uno de los miembros del jurado; y luego de la respectiva deliberación, el jurado le otorgó la calificación de:

**APROBADO**

En mérito a la calificación obtenida se expide la presente acta con la finalidad que el Consejo de Facultad considere se le otorgue al Bachiller POLIN REYES, PAMELA DEISY el Título Profesional de:

**INGENIERO CIVIL**

En señal de conformidad firmamos,

.....  
Mgr. GARCÉS DÍAZ, Víctor  
Miembro

.....  
Dr. DELGADO RAMÍREZ, Félix German  
Secretario

.....  
Dra. CARMENATES HERNANDEZ, Dayma Sadami  
Presidente

**Anexo 2**

**CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR(A) DE TESIS / INFORME ACADÉMICO/ TRABAJO DE INVESTIGACIÓN/ TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL CON INFORME DE EVALUACIÓN DEL SOFTWARE ANTIPLAGIO**

Lima, ..15.... de.....julio..... de 2024....

Señor(a),  
Víctor Garcés Díaz  
Jefe del Departamento de Investigación  
Facultad de Ingeniería - UCSS

Reciba un cordial saludo.

Sirva el presente para informar que la tesis / informe académico/ trabajo de investigación/ trabajo de suficiencia profesional, bajo mi asesoría, con título: Estimación de la erosión hídrica, el transporte de sedimentos y sus efectos en las estructuras hidráulicas de la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo, presentado por POLIN REYES, PAMELA DEISY (2018100970 y DNI 74815359) para optar el título profesional/grado académico de Ingeniero Civil ha sido revisado en su totalidad por mi persona y **CONSIDERO** que el mismo se encuentra **APTO** para ser publicado.

Asimismo, para garantizar la originalidad del documento en mención, se le ha sometido a los mecanismos de control y procedimientos antiplagio previstos en la normativa interna de la Universidad, **cuyo resultado alcanzó un porcentaje de similitud de 11. %** (poner el valor del porcentaje).\* Por tanto, en mi condición de asesor(a), firmo la presente carta en señal de conformidad y adjunto el informe de similitud del Sistema Antiplagio Turnitin, como evidencia de lo informado.

Sin otro particular, me despido de usted. Atentamente,

A handwritten signature in blue ink is positioned above a horizontal line. The signature appears to be 'López Silva'.

---

López Silva, Maiquel  
DNI N°: 49087489  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0946-6160>  
Facultad de Ingeniería - UCSS

\* De conformidad con el artículo 8°, del Capítulo 3 del Reglamento de Control Antiplagio e Integridad Académica para trabajos para optar grados y títulos, aplicación del software antiplagio en la UCSS, se establece lo siguiente:

Artículo 8°. Criterios de evaluación de originalidad de los trabajos y aplicación de filtros

El porcentaje de similitud aceptado en el informe del software antiplagio para trabajos para optar grados académicos y títulos profesionales, será máximo de veinte por ciento (20%) de su contenido, siempre y cuando no implique copia o indicio de copia.

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de investigación está dedicado a Dios por iluminar mi camino y ser mi fuente de sabiduría en un mundo de constante aprendizaje.

En especial, a mi mamita Eufracina Reyes Morales, mi ángel, por darme su amor, cariño y atenciones, siempre vivirás en mi corazón.

A mi querida madre Orfila Reyes Morales y mi adorado padre Ugo Polin Gonzales por ser ambos mis pilares para perseguir mis sueños.

A mi hermano Giovani y Jhack por su apoyo constante y motivación que me transmiten para alcanzar mis metas.

## AGRADECIMIENTO

Mi gratitud a Dios por brindarme la fortaleza para continuar en lo adverso y ayudarme a seguir cumpliendo mis sueños de niña.

A mis padres por su apoyo incondicional, los valores y la educación que me brindaron, quienes son mi ejemplo de perseverancia y esfuerzo para salir adelante.

También quiero agradecer a quienes me apoyaron y se involucraron con mi investigación, en especial, a mi abuelo Guido Polin por el cariño y apoyo con la elaboración del instrumento que fue parte fundamental de esta investigación. A mi abuelo Tiburcio Reyes por ser quien me inspiró y motivó a investigar en Cajatambo. A Jhack por su apoyo en todo momento desde un inicio hasta el final de mi tesis y darme palabras de aliento para continuar. A mi tío Eliazar Reyes que, a pesar de las dificultades, no dudó en acompañarme en la estadía en el río Tumac. Al Sr. Henoch Flores por el cariño a mi familia, su disposición en apoyarme con la investigación y motivación brindada. A mi tío Román Espejo por haberme acompañado en el recorrido de la cuenca y siempre haber estado dispuesto a apoyarme.

Mi agradecimiento a mi asesor, Dr. Maiquel López Silva por ser la persona que sembró en mí el interés por este tema, sus conocimientos y apoyo brindado.

Finalmente, a mis familiares y amistades que siempre han estado presente en mi vida y confiar en que lograría mis metas.

## RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo estimar la erosión hídrica y transporte de sedimentos en la cuenca del río Rapay, Provincia Cajatambo, Lima. Se aplicó la metodología del método de RUSLE para estimar la erosión hídrica, mientras que, el transporte de sedimentos se determinó por el método físico con el catador Helley Smith, correntómetro FP111 y el método convencional por 13 funciones matemáticas, además se utilizó instrumentos de investigación como cuadros de registros de las precipitaciones de 3 estaciones, fichas y guía de observación. Como principales resultados se clasificó la erosión hídrica por microcuencas que en su totalidad fue de 51,46 t/ha/año clasificado como muy severa. En relación al transporte de sedimentos se estimaron los de fondo, en suspensión y total para el cual el más preciso fue el modelo de Einstein con un valor de 0,011 kg/s con una relación respecto al caudal real del 7%. El modelo físico de Helley – Smith proporcionó un caudal real de sedimentos de 304 t/día. Además, se identificó que la central hidroeléctrica Cahua presenta elevada frecuencia de sedimentos que eleva los costos de operación y mantenimiento en el desarenador.

***Palabras claves:*** *Precipitaciones, transporte de sedimentos, erosión hídrica, estructura hidráulica y cuencas hidrográficas.*

## ABSTRACT

The objective of this research is to estimate water erosion and sediment transport in the Rapay River basin, Cajatambo Province, Lima. The methodology of the RUSLE method was applied to estimate water erosion, while the sediment transport was determined by the physical method with the Helley Smith taster, FP111 current meter and the conventional method by 13 mathematical functions, in addition, research instruments were used. such as rainfall record tables for 3 stations, sheets and observation guide. The main results were classified as water erosion by micro-basins, which in total was 51,46 t /ha/ year, classified as very severe. In relation to sediment transport, bottom, suspended and total sediment transport was estimated, for which the most accurate was the Einstein model with a value of 0,011 kg/s with a relationship to the real flow of 7%. The Helley-Smith physical model provided a real sediment flow rate of 304 t/day. In addition, it was identified that the Cahua hydroelectric plant has a high frequency of sediments that increases the operation and maintenance costs in the sand trap.

**Keywords:** *Precipitation, sediment transport, water erosion, hydraulic structure and watersheds.*

## ÍNDICE

Dedicatoria.....	2
Agradecimiento.....	3
Resumen.....	4
Abstract.....	5
Índice de tablas.....	10
Índice de figuras.....	13
Introducción.....	18
Planteamiento del problema.....	21
Formulación del problema.....	21
Problema general.....	24
Problemas específicos.....	24
Objetivos de la investigación.....	25
Objetivo general.....	25
Objetivos específicos.....	25
Justificación e importancia de la investigación.....	25
Delimitación del área de investigación.....	28
Limitaciones de la investigación.....	31
Marco teórico.....	32

Antecedentes nacionales e internacionales.....	32
Antecedentes internacionales.....	32
Antecedentes nacionales.....	33
Bases teóricas.....	34
Sistemas fluviales.....	34
Parámetros morfométricos.....	36
Hidráulica fluvial.....	38
Tipos de erosión.....	38
Erosión hídrica.....	41
Factores de la erosión hídrica.....	41
Métodos de estimación de la erosión.....	42
Transporte de sedimentos.....	51
Tipos de transporte de sedimentos.....	52
Modelos matemáticos de estimación del transporte de sedimentos.....	54
Métodos numéricos para la estimación de sedimentos.....	56
Definición de términos básicos.....	64
Hipótesis y variables de la investigación.....	66
Hipótesis.....	66
Variables e indicadores.....	67

Operacionalización de variables .....	68
Diseño de la investigación .....	70
Diseño de ingeniería .....	70
Métodos y técnicas del proyecto.....	71
Enfoque de la investigación.....	71
Alcance de la investigación.....	71
Diseño de la investigación.....	72
Población.....	72
Muestra.....	72
Técnicas y herramientas estadísticas.....	73
Técnicas para la investigación.....	73
Instrumentos para recolección de datos.....	73
Tabla de actividades.....	74
Tablas de matriz de consistencia.....	75
Desarrollo experimental.....	78
Parámetros morfométricos .....	78
Estimación de la erosión hídrica mediante modelos matemáticos.....	79
Medición para el aforo del caudal líquido del río .....	84
Estimación de los sedimentos .....	85

Resultados .....	97
Parámetros morfométricos de la cuenca.....	97
Cuantificación de la erosión hídrica mediante la metodología rusle.....	102
Determinación del transporte de sedimentos.....	117
Influencia del transporte de sedimentos en la central hidroeléctrica Cahua.....	153
Contrastación de hipótesis .....	156
Contrastación de hipótesis general.....	156
Contrastación de hipótesis específicas.....	156
Conclusiones .....	158
Recomendaciones .....	160
Referencias bibliográficas.....	161
Anexos .....	167
Anexo 1. Registro de precipitaciones de la estación Cajatambo .....	167
Anexo 2. Registro de precipitaciones de la estación laguna Surasaca.....	170
Anexo 3. Registro de precipitaciones de la estación Gorgor .....	173
Anexo 4. 176Resultados de los ensayos de las 17 muestras de sedimentos .....	176

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Parámetros geomorfológicos</i> .....	37
<b>Tabla 2</b> <i>Operacionalización de variables</i> .....	68
<b>Tabla 3</b> <i>Tabla de actividades</i> .....	74
<b>Tabla 4</b> <i>Matriz de consistencia general</i> .....	75
<b>Tabla 5</b> <i>Matriz de consistencia específico</i> .....	76
<b>Tabla 6</b> <i>Parámetros morfométricos de la cuenca</i> .....	78
<b>Tabla 7</b> <i>Clasificación de niveles de pérdida de suelo</i> .....	79
<b>Tabla 8</b> <i>Clasificación del factor R anual</i> .....	80
<b>Tabla 9</b> <i>Valores del factor K</i> .....	81
<b>Tabla 10</b> <i>Valores de la cobertura vegetal factor C</i> .....	83
<b>Tabla 11</b> <i>Resumen de los parámetros morfométricos de las microcuencas</i> .....	100
<b>Tabla 12</b> <i>Factor de erosividad (R)</i> .....	107
<b>Tabla 13</b> <i>Factor de erodabilidad (K)</i> .....	108
<b>Tabla 14</b> <i>Factor Topográfico (LS)</i> .....	110
<b>Tabla 15</b> <i>Factor de Cobertura (C)</i> .....	112
<b>Tabla 16</b> <i>Factor Prácticas de conservación (P)</i> .....	114
<b>Tabla 17</b> <i>Resultados de la erosión hídrica</i> .....	116
<b>Tabla 18</b> <i>Velocidades al 20% y 80% de tirante en la sección I</i> .....	123

<b>Tabla 19</b> <i>Velocidades en la sección II</i> .....	124
<b>Tabla 20</b> <i>Parámetros del laboratorio sección I</i> .....	124
<b>Tabla 21</b> <i>Resultados del laboratorio sección II</i> .....	125
<b>Tabla 22</b> <i>Parámetros hidráulicos de las dovelas en la sección I</i> .....	126
<b>Tabla 23</b> <i>Parámetros hidráulicos de la dovela en la sección II</i> .....	127
<b>Tabla 24</b> <i>Caudales sólidos de fondo por dovelas</i> .....	129
<b>Tabla 25</b> <i>Comportamiento estadístico de los caudales sólidos físicos</i> .....	129
<b>Tabla 26</b> <i>Resumen de los parámetros en la sección I</i> .....	131
<b>Tabla 27</b> <i>Resumen de los parámetros en la sección II</i> .....	132
<b>Tabla 28</b> <i>Resultados de los métodos empíricos de cálculo <math>Q_s</math> sección I</i> .....	133
<b>Tabla 29</b> <i>Análisis estadístico del tramo I</i> .....	134
<b>Tabla 30</b> <i>Caudal real de fondo vs Caudal sólido de la sección I</i> .....	135
<b>Tabla 31</b> <i>Resultados de los métodos empíricos de cálculo <math>Q_s</math> sección II</i> .....	137
<b>Tabla 32</b> <i>Caudal real de fondo vs Caudal sólido de la sección II</i> .....	138
<b>Tabla 33</b> <i>Caudal sólido suspensión del tramo I</i> .....	140
<b>Tabla 34</b> <i>Caudal sólido suspensión del tramo II</i> .....	140
<b>Tabla 35</b> <i>Análisis estadístico del Caudal Total - Tramo I</i> .....	141
<b>Tabla 36</b> <i>Caudal Sólido Total del Tramo I</i> .....	145
<b>Tabla 37</b> <i>Caudal Sólido Total del Tramo II</i> .....	145

<b>Tabla 38</b> <i>Análisis estadístico del Caudal Total - Tramo II</i> .....	146
<b>Tabla 39</b> <i>Caudal líquido total del tramo I y II</i> .....	150
<b>Tabla 40</b> <i>Resultados estadísticos con el programa Trend</i> .....	151
<b>Tabla 41</b> <i>Caudal máximo en diferentes tiempos de retorno</i> .....	151
<b>Tabla 42</b> <i>Resultados máximos y mínimos de los caudales y sedimentos</i> .....	153

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Ubicación de la cuenca Rapay - Cajatambo</i> .....	30
<b>Figura 2</b> <i>Sistema fluvial</i> .....	35
<b>Figura 3</b> <i>Tipos de ríos según el número de canales</i> .....	36
<b>Figura 4</b> <i>Erosión eólica</i> .....	38
<b>Figura 5</b> <i>Erosión antrópica</i> .....	39
<b>Figura 6</b> <i>Erosión pluvial</i> .....	40
<b>Figura 7</b> <i>Erosión fluvial</i> .....	40
<b>Figura 8</b> <i>Erosión hídrica</i> .....	41
<b>Figura 9</b> <i>Pérdida de suelo en el modelo de Morgan, Morgan y Finney</i> .....	44
<b>Figura 10</b> <i>Procesos de la erosión hídrica según Meye y Wischmeier, 1969</i> .....	45
<b>Figura 11</b> <i>El transecto y las secciones de una cárcava</i> .....	47
<b>Figura 12</b> <i>Sección transversal de la Cárcava en U.</i> .....	48
<b>Figura 13</b> <i>Sección de una Cárcava en forma de V</i> .....	48
<b>Figura 14</b> <i>Método de Clavos y rondanas modificado</i> .....	50
<b>Figura 15</b> <i>Pérdida de suelo en milímetros</i> .....	51
<b>Figura 16</b> <i>Tipos de Transporte de Sedimentos</i> .....	54
<b>Figura 17</b> <i>Flujograma de diseño de ingeniería</i> .....	70
<b>Figura 18</b> <i>Correntómetro FP111</i> .....	85

<b>Figura 19</b> <i>Tamices y curva de distribución de tamaños de las partículas</i> .....	95
<b>Figura 20</b> <i>Mapa de las microcuencas</i> .....	99
<b>Figura 21</b> <i>Mapa de Pendientes MC1</i> .....	102
<b>Figura 22</b> <i>Mapa de Pendientes MC2</i> .....	103
<b>Figura 23</b> <i>Mapa de Pendientes MC4</i> .....	103
<b>Figura 24</b> <i>Mapa de Pendientes MC3</i> .....	104
<b>Figura 25</b> <i>Mapa de Pendientes MC5</i> .....	104
<b>Figura 26</b> <i>Mapa de Pendientes MC6</i> .....	105
<b>Figura 27</b> <i>Mapa Factor R</i> .....	106
<b>Figura 28</b> <i>Mapa Factor K</i> .....	108
<b>Figura 29</b> <i>Mapa Factor LS</i> .....	109
<b>Figura 30</b> <i>Mapa Factor C</i> .....	111
<b>Figura 31</b> <i>Mapa Factor P</i> .....	113
<b>Figura 32</b> <i>Categoría de priorización de las microcuencas</i> .....	115
<b>Figura 33</b> <i>Clasificación de prioridad de las microcuencas</i> .....	116
<b>Figura 34</b> <i>Muestreador Helley - Smith</i> .....	117
<b>Figura 35</b> <i>Dimensiones del muestreador Helley Smith</i> .....	118
<b>Figura 36</b> <i>Muestreador Helley Smith en el río Rapay</i> .....	119
<b>Figura 37</b> <i>Mediciones con el muestreador Helley- Smith</i> .....	120

<b>Figura 38</b> <i>Sección del ancho de río - Sección I</i> .....	121
<b>Figura 39</b> <i>Sección del ancho de río - Sección II</i> .....	121
<b>Figura 40</b> <i>Correntómetro FP111 en el río Rapay</i> .....	122
<b>Figura 41</b> <i>Toma de medidas con el correntómetro FP111</i> .....	123
<b>Figura 42</b> <i>Curva granulométrica de sedimentos de fondo- método Helley-Smith</i> .....	126
<b>Figura 43</b> <i>Relación del caudal real de fondo y el caudal sólido empírico – tramo I</i> .....	136
<b>Figura 44</b> <i>Relación del caudal real de fondo y el caudal sólido empírico - tramo II</i> .....	139
<b>Figura 45</b> <i>Histograma de frecuencia de Garde y Pande (Tramo I)</i> .....	142
<b>Figura 46</b> <i>Histograma de frecuencia de Samaga (Tramo I)</i> .....	143
<b>Figura 47</b> <i>Histograma de frecuencia de Benedict y Vanuni (Tramo I)</i> .....	144
<b>Figura 48</b> <i>Histograma de frecuencia Ackes White (Tramo II)</i> .....	147
<b>Figura 49</b> <i>Histograma de frecuencia Garde y Datiri (Tramo II)</i> .....	148
<b>Figura 50</b> <i>Histograma de frecuencia de Engelund y Hansen (Tramo II)</i> .....	149
<b>Figura 51</b> <i>Caudal de fondo vs Caudal en suspensión</i> .....	150
<b>Figura 52</b> <i>Caudal real vs Sedimentos</i> .....	152
<b>Figura 53</b> <i>Desarenadores</i> .....	154
<b>Figura 54</b> <i>Influencia de los sedimentos en la central hidroeléctrica Cahua</i> .....	155
<b>Figura 55</b> <i>Resultados de ensayos de la muestra 1- tramo 1</i> .....	176
<b>Figura 56</b> <i>Resultados de ensayos de la muestra 2- tramo 1</i> .....	177

<b>Figura 57</b> <i>Resultados de ensayos de la muestra 3- tramo 1</i> .....	178
<b>Figura 58</b> <i>Resultados de ensayos de la muestra 4- tramo 1</i> .....	179
<b>Figura 59</b> <i>Resultados de ensayos de la muestra 5- tramo 1</i> .....	180
<b>Figura 60</b> <i>Resultados de ensayos de la muestra 6- tramo 1</i> .....	180
<b>Figura 61</b> <i>Resultados de ensayos de la muestra 7- tramo 1</i> .....	180
<b>Figura 62</b> <i>Resultados de ensayos de la muestra 8- tramo 1</i> .....	180
<b>Figura 63</b> <i>Resultados de ensayos de la muestra 1- tramo 2</i> .....	180
<b>Figura 64</b> <i>Resultados de ensayos de la muestra 2- tramo 2</i> .....	180
<b>Figura 65</b> <i>Resultados de ensayos de la muestra 3- tramo 2</i> .....	180
<b>Figura 66</b> <i>Resultados de ensayos de la muestra 4- tramo 2</i> .....	180
<b>Figura 67</b> <i>Resultados de ensayos de la muestra 5- tramo 2</i> .....	180
<b>Figura 68</b> <i>Resultados de ensayos de la muestra 6- tramo 2</i> .....	180
<b>Figura 69</b> <i>Resultados de ensayos de la muestra 7- tramo 2</i> .....	180
<b>Figura 70</b> <i>Resultados de ensayos de la muestra 8- tramo 2</i> .....	180
<b>Figura 71</b> <i>Resultados de ensayos de la muestra 9- tramo 2</i> .....	180
<b>Figura 72</b> <i>Resultados de granulometría de la muestra 1- tramo 1</i> .....	180
<b>Figura 73</b> <i>Resultados de granulometría de la muestra 2- tramo 1</i> .....	180
<b>Figura 74</b> <i>Resultados de granulometría de la muestra 3- tramo 1</i> .....	180
<b>Figura 75</b> <i>Resultados de granulometría de la muestra 4- tramo 1</i> .....	180

<b>Figura 76</b> <i>Resultados de granulometría de la muestra 5- tramo 1</i> .....	180
<b>Figura 77</b> <i>Resultados de granulometría de la muestra 6- tramo 1</i> .....	180
<b>Figura 78</b> <i>Resultados de granulometría de la muestra 7- tramo 1</i> .....	180
<b>Figura 79</b> <i>Resultados de granulometría de la muestra 8- tramo 1</i> .....	180
<b>Figura 80</b> <i>Resultados de granulometría de la muestra 1- tramo 2</i> .....	180
<b>Figura 81</b> <i>Resultados de granulometría de la muestra 2- tramo 2</i> .....	180
<b>Figura 82</b> <i>Resultados de granulometría de la muestra 3- tramo 2</i> .....	180
<b>Figura 83</b> <i>Resultados de granulometría de la muestra 4- tramo 2</i> .....	180
<b>Figura 84</b> <i>Resultados de granulometría de la muestra 5- tramo 2</i> .....	180
<b>Figura 85</b> <i>Resultados de granulometría de la muestra 6- tramo 2</i> .....	180
<b>Figura 86</b> <i>Resultados de granulometría de la muestra 7- tramo 2</i> .....	180
<b>Figura 87</b> <i>Resultados de granulometría de la muestra 8- tramo 2</i> .....	180
<b>Figura 88</b> <i>Resultados de granulometría de la muestra 9- tramo 2</i> .....	180

## INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica y el transporte de sedimentos a lo largo de la historia ha ocasionado problemas en el suelo y en la calidad de agua de los ríos. El cual repercute daños a las estructuras hidráulicas. La problemática se ha ido incrementando debido a las altas precipitaciones que alteran a la morfología de la cuenca. La provincia de Cajatambo, localizada en el departamento de Lima en el Perú no está exento a estos problemas de calidad de suelo, productividad y la contaminación del agua con la sedimentación. Por lo antes expuesto, se propone estimar la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo, el cual a su vez puede ser aplicado en diversas cuencas.

En el primer capítulo se menciona el problema general sobre cuál sería la cantidad de erosión hídrica y sedimentos transportados en la cuenca Rapay para la eficiente operación de las estructuras hidráulicas. Respecto a los objetivos, la investigación propone estimar la erosión hídrica y transporte de sedimentos de la mencionada cuenca, para lo cual se tiene que determinar los parámetros morfométricos y definir un modelo que se ajuste a las características de la cuenca. Como aporte social es que beneficiará a los pobladores de la provincia de Cajatambo y zonas aledañas ya que tendrán un previo estudio para futuras obras hidráulicas donde se van a prevenir fallas. Como aporte ambiental, se genera el estudio para mejorar la calidad de los cauces de los ríos de la cuenca, prevenir la alteración del ecosistema y evitar la pérdida de productividad de las tierras agrícolas.

En el segundo capítulo se expresa el antecedente internacional, donde en la cuenca Alta de México realizaron un estudio de las variaciones desde el año 1980 hasta 2005 que vieron resultados relevantes de transporte de sedimentos y de erosión hídrica debido al tipo de cobertura vegetal y las intensas lluvias. Como antecedente nacional, realizaron el estudio al río Cumbaza en el

departamento de San Martín donde usaron la metodología USLE para determinar las 13 áreas más vulnerables y proponer la reforestación con sistemas agroforestales. En las bases teóricas se propusieron las metodologías y principios a utilizar en el estudio. Además, se propusieron una lista de términos para comprender los conceptos más utilizados de la investigación.

En el tercer capítulo se planteó las hipótesis donde se estimaron que la erosión es 51,46 t/ha/año y el transporte de sedimentos es superior a 0,950 t/día. También, se especificaron las variables e indicadores operacionalizadas para la presente investigación.

En el cuarto capítulo se especifica las 3 etapas que consta la investigación. En la primera etapa con el uso del ArcMap 10.8 y datos proporcionados por Senamhi y PeruSat se obtuvo la morfometría de la cuenca. En la segunda etapa, con la metodología RUSLE se evaluó la erosión de la cuenca. En la tercera etapa, con la recolección de muestras del instrumento Helley - Smith y ecuaciones empíricas se evaluaron estadísticamente y se obtuvo el modelo que mejor se ajusta a la cuenca.

En el quinto capítulo, se expone a detalle las etapas anteriormente mencionadas. Donde se inicia con la modelación de los parámetros morfométricos de la cuenca en el software ArcMap 10.8. Después se obtuvo el registro de precipitaciones por 58 años que fueron datos para la aplicación de la metodología RUSLE. Posteriormente, se realizaron ensayos de 17 muestras obtenidas en el río Rapay para ser usado de datos en las diferentes ecuaciones empíricas, en el cual se implementó el análisis estadístico.

En el sexto capítulo se presenta los resultados obtenidos de los parámetros morfométricos. Respecto al modelo RUSLE, se exponen los mapas de los cinco factores. También se muestra el diseño estructural del instrumento Helley - Smith, la toma del aforo de la velocidad del caudal con el correntómetro FP111, las comparaciones de los modelos empíricos y los resultados estadísticos.

También se muestra en un diagrama la influencia de los sedimentos en una estructura hidráulica. Además, se explicaron los resultados obtenidos y se realizó la contrastación de las hipótesis en el cual se aceptaron 2 hipótesis previamente propuestas. Referente a las conclusiones, se obtuvo que la cuenca presenta un relieve fuertemente accidentado que es propenso a sufrir de erosión y transporte de sedimentos. Respecto a la erosión presentó valores que oscilan desde 722,29 a 908 Mj mm /ha/ año considerado como una zona de precipitaciones elevadas. Por otro lado, se obtuvo 303,72 t/día de sedimento transportado. Finalmente, se recomendó implementar nuevas tecnologías de estimación y contribuir con nuevas investigaciones.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### Formulación del Problema

En la actualidad la erosión hídrica es una problemática a nivel mundial porque es la principal causa para que ocurra la degradación de suelos, que comprende del desprendimiento de la capa superficial del suelo y del transporte de partículas que involucran a diferentes agentes erosivos. (Raza et al., 2021)

La erosión del suelo es causante de aproximadamente el 85% de la degradación a nivel mundial. Esta pérdida de suelo provocado por la erosión hídrica es un problema para el ecosistema y las personas. En el país de Argelia, la erosión hídrica viene afectando aproximadamente 7 millones de hectáreas de suelo. (Djoukbala et al., 2020)

La erosión, es entendida como la remoción, transporte y deposición de partículas de suelo, materia orgánica y nutriente soluble que provoca en consecuencia el desequilibrio de la estabilidad armónica a nivel de cuencas hidrográficas. La erosión es causada principalmente por las lluvias y los escurrimientos que por lo general obstruyen las obras hidráulicas a su paso como presas, bocatomas, desarenadores entre otros. La producción de sedimentos es poco medido y monitoreado en el Perú (SENHAMI, 2017).

El transporte de sedimentos surge desde las cabeceras de las cuencas, los cuales en el transcurso del río va alterando la geomorfología, calidad de agua, vegetación y biología e inclusive altera al periodo de vida de las infraestructuras hidráulicas, puesto que el impacto de los sedimentos lo deterioran. (Restrepo et al., 2000)

El volumen del agua de los ríos, debido a la fuerza de la corriente puede ocasionar el desprendimiento, transportación y deposición de sedimentos en el fondo del río como en la

superficie, donde ocurre el proceso de erosión y sedimentación. (Rocha Felices , 2011). El país de España presenta un problema mayor en el transporte de sedimentos que son erosionados en las laderas de los ríos, lo que ocasiona la pérdida de la calidad de agua y la degradación de la biología marina. (Sánchez et al., 2018).

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú ha contribuido con la mejora del conocimiento acerca de la erosión hídrica, la variabilidad en el espacio y tiempo. Puesto que realizaron la cuantificación de la tasa de pérdida del suelo a nivel nacional. (Sabino et al., 2017)

En las construcciones de puentes y otras estructuras que están ubicados en las orillas de los ríos son más propensos de sufrir daños de sedimentación. En las máximas avenidas se incrementa el transporte de sedimentos, debido al aumento del caudal. En el cual, si no se realiza un estudio de sedimentos perjudicaría elevadamente a las estructuras (Vásquez, 2018). El transporte de sedimentos influye en la seguridad de las represas, además reduce la producción, el almacenamiento, la capacidad de descarga de caudales y atenuación de las máximas avenidas, así como la producción de las centrales. El cual, genera el aumento de las cargas en la represa, compuertas, por lo que afecta a los equipos mecánicos y causa daños ambientales. Además, los daños pueden representar más del 70% del costo de construcción del embalse. Es por eso que la sostenibilidad del negocio de generación de energía hidroeléctrica depende de la implementación de alternativas de gestión de sedimentos (Schleiss et al., 2016; Polanco y Ramírez, 2017; George et al., 2017; Polanco, 2018).

En particular, la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2015) realiza una investigación sobre la evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca de Pativilca. En una de las secciones generalizaron que la erosión hídrica de la cuenca del sector alto, las pérdidas de suelo son altas de 50 a 200 t/ha/año y puntualmente muy altas mayor a 200 t/ha/año a causa, principalmente, de la

precipitación media. Factor por el cual, la central hidroeléctrica Cahua ubicada dentro de la región y en particular la cuenca Rapay presente frecuentes problemas de sedimentos. Al respecto, ha existido solo una investigación por Maita (2016) en búsqueda de posibles soluciones.

No obstante, la producción de sedimentos se ha estimado en cuencas priorizadas de Empresas Prestadoras de Servicio (EPS) y en la época de 1984 a 2019 y 2036 a 2065 a partir de 3 modelos de cambio climático. Como resultados existe una alta incertidumbre entre los modelos, lo que permite inferir que no hay una certeza en la señal hacia el incremento o la disminución de la producción de sedimentos para el futuro (Nota Técnica N° 002, 2017). Otras investigaciones como Guyot et al. (2007) estimó  $450 \times 10^6$  t/año para la cuenca amazónica, mientras que, Armijos et al. (2013) estimó  $541 \times 10^6$  t/año, en fin, el 70% de erosión hídrica es generada por la cuenca amazona del Perú.

Orbegoso Y Rodríguez (2015) erosión hídrica en la sub cuenca río Urpay utilizando el método del perfil en, Huaraz logrando obtener pérdidas de suelo varían en el rango de: 10.69, 14.97 y 12.83, en t/ha/año, para las pendientes de 4-15%, 15-25% y 25-50%, respectivamente. Sin embargo, el método más preciso utilizando la tecnología GIS es el RUSLE según demuestran en sus estudios Orbegoso et al., (2018), Camacho et al., (2019), Escobar et al., (2019), Sánchez et al., (2018), Expedito et al., (2020), Gutiérrez et al., (2021).

En la cabecera de las cuencas andinas del Perú, específicamente en el departamento de Tacna, presenta la problemática de la no existencia de tasas de erosión ni el cálculo del volumen de los sedimentos que se transportan por el río, que permitan la viabilidad de los proyectos futuros como bocatomas, represas, entre otros. (Laqui, 2022).

Todo ello, lleva consigo que los peligros en los ríos de la provincia de Cajatambo suelen ser asociada a eventos como del Fenómeno El Niño, los huaycos o flujos de detritos son un proceso

natural para la evacuación de materiales sólidos de la subcuenca del Río Rapay. Cuando se originan las lluvias torrenciales en la provincia después de un periodo de sequía encuentran al suelo en condiciones precarias. El caudal sólido del río aumenta producto a la carga por erosión debido a caídas de materiales donde transportan bloques rocosos que tienen una elevada fuerza que no puede ser detenido. (Autoridad Nacional del Agua, 2015). Por lo tanto, el estudio del transporte de sedimentos y erosión hídrica es importante para generar métodos adecuados para el planeamiento, diseño, proyecto, construcción, operación y mantenimiento de obras de estructura hidráulica, los cuales aprovechan los recursos hídricos que ofrece la zona. (Basile P. , 2018)

### ***Problema General***

¿Cuál es la erosión hídrica y los sedimentos que se transportan en la cuenca del río Rapay para el planeamiento, diseño y operación eficiente de las estructuras hidráulicas?

### ***Problemas Específicos***

¿Cuáles son las características morfométricas de la cuenca Rapay?

¿Cuál es la erosión hídrica en la cuenca Rapay?

¿Cuál es el modelo de predicción de transporte de sedimentos más preciso en el río Rapay?

## **Objetivos de la Investigación**

### ***Objetivo General***

Estimar la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo.

### ***Objetivos Específicos***

Determinar los parámetros morfométricos de la cuenca del río Rapay.

Estimar la erosión hídrica mediante la teledetección y sistema de información geográfica acoplado al método de RUSLE.

Definir el modelo del transporte de sedimentos por métodos físicos y empíricos más precisos en el río Rapay y su influencia en la central hidroeléctrica Cahua.

## **Justificación e Importancia de la Investigación**

### ***Justificación Teórica***

En esta investigación se procura comparar teorías, métodos, técnicas estadísticas y modelos empíricos para definir las subcuencas más vulnerables a la erosión hídrica y transporte de sedimentos. Partiendo de los análisis estadísticos multivariado de los parámetros morfométricos, componentes principales, análisis de sumas ponderadas y gráficos de conglomerados. Como segunda etapa de la investigación se aplicarían los métodos empíricos de la erosión hídrica como el modelo RUSLE integrado a los sistemas de información geográfica y estimado en el software ARCMAP 10.8. En la tercera etapa la estimación de los sedimentos se desarrollará de forma física

con el muestreador Helley Smith y los métodos matemáticos y se llevará a cabo el análisis de la influencia en las estructuras hidráulicas. Por todo lo explicado la investigación proporcionará la teoría sólida, concisa que más se adapta a la cuenca Rapay en la estimación de la erosión y transporte de sedimentos el cual repercute en el diseño y operación de las estructuras hidráulicas.

### ***Justificación Práctica***

El resultado de esta investigación procura generar formas de predicción de la erosión hídrica y transporte de sedimentos en la cuenca del río Rapay, que tiene un área aproximada de 732,42 km<sup>2</sup>, el cual repercutirá en las siguientes etapas de un proyecto hidráulico: Balance hídrico, planificación, diseño, construcción y operación. También, en un óptimo manejo de la presa Viconga que se encuentra ubicada en la cabecera de la cuenca Rapay, de la central hidroeléctrica Cahua, puente Tumac y de futuras obras que pueden existir, tales como, represas, bocatomas, canales y pozos. Además, de un buen desarrollo agrícola que conservará el suelo para una óptima producción agrícola en la provincia de Cajatambo. También, se podrá predecir la activación de las quebradas que son las generadoras de los huaycos y que transportan los sedimentos.

### ***Justificación Social***

La investigación tiene beneficio social pues es un estudio que beneficiará a 11 poblados que son Cajatambo, Copa, Astobamba, Puquian, Huayllapa, Uramasa, Utcas, Chucchi, Cajamarquilla, Palpas y Llocchi. Los cuales, ocuparan su población alrededor de más de 10 250 habitantes y se procura dar mejores beneficios de su producción agrícola que abarcan alrededor de 32 520 hectáreas y la ganadería de los pueblos que repercute en un incremento económico, mejoras

de los hogares y progreso de los pobladores. Además, se va a brindar una investigación previa para futuras obras hidráulicas de pequeña, mediana y largo plazo que nunca tendrán posibles fallas y así no afectarán a los habitantes.

### ***Justificación Ambiental***

La investigación tiene beneficio ambiental puesto que es un aporte para los lugares más propensos del río Rapay a ser erosionados y se evaluará el material que es transportado en la escorrentía, para el aprovechamiento de los recursos hídricos en futuras obras hidráulicas. La erosión hídrica se entiende como un problema a nivel mundial puesto que afecta a la calidad del agua, altera los ecosistemas y provoca la pérdida de la productividad de las tierras agrícolas, por acción de las precipitaciones o el cauce de los ríos. Se estima que la cantidad de sedimentos transportados en la cuenca de estudio según (Autoridad Nacional del Agua, 2015) es de 2 335 513,83 t/año y se estima que en los próximos años aumente a 8 563 786,31 t/año. Además, los ríos, cuando tienen una alta carga de sedimentos, pierden oxígeno y los animales como la trucha mueren, afectando el desarrollo de la vida acuática.

### ***Importancia***

El estudio planteado es muy importante para la población de la provincia de Cajatambo, en el que se plantea la predicción de la erosión hídrica y transporte de sedimentos en la cuenca del río Rapay, para ello se utilizará la metodología RUSLE en el cálculo de la erosión mediante el programa ArcMap 10.8 y el análisis de modelos empíricos y físico con el muestreador Helley Smith para obtener resultados de los sedimentos transportados en el área de estudio. Así se

conocerá el método más cercano a la realidad. Además, la investigación es importante para el desarrollo y durabilidad en cada etapa de proyecto de las diferentes obras hidráulicas, tales como represas, centrales hidroeléctricas, bocatomas, canales y pozos. Asimismo, es importante para el progreso de los pobladores ya que se beneficiará la producción agrícola y la crianza ganadera que repercute en el incremento de la economía de las familias, también favoreciendo al cuidado de la calidad del agua, vida acuática y finalmente evitar un desastre natural, con la predicción de la activación de las quebradas que generan los huaicos.

## **Delimitación del Área de Investigación**

### ***Delimitación del Contenido***

#### **Línea de Investigación**

La línea de la presente investigación son las estructuras, geotecnia y los recursos hídricos. El cual, tiene de objetivo innovar en el diseño de las estructuras que procuren una mayor productividad en los procesos constructivos, generar ahorros y la protección de los recursos hídricos.

#### **Campo de Investigación**

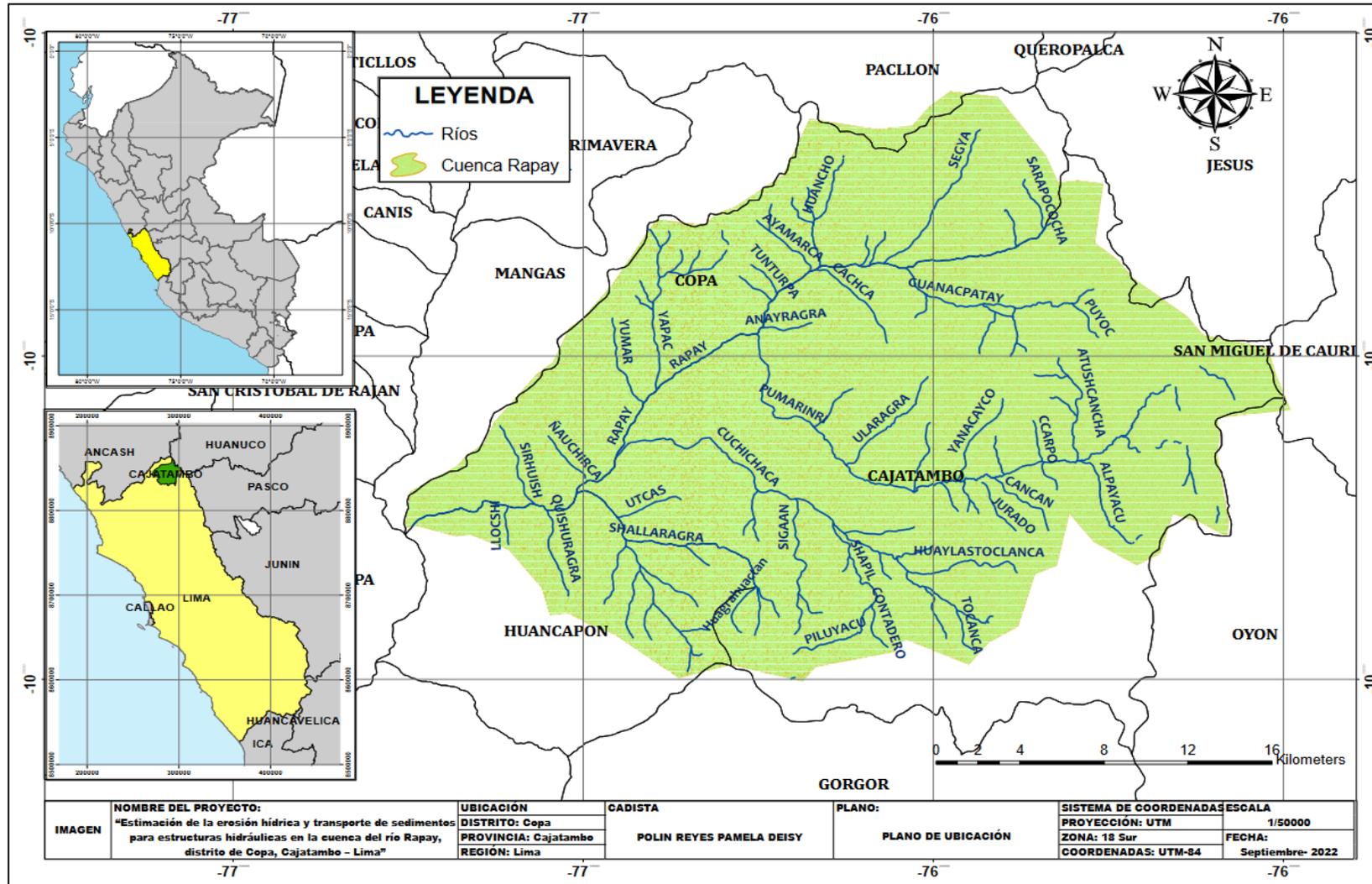
El campo del presente estudio son las obras hidráulicas y el objetivo general es estimar la erosión hídrica y el transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo.

### ***Delimitación Espacial***

La cabecera de la cuenca del río Rapay nace en la Cordillera de Huayhuash, se encuentra en la provincia de Cajatambo, en el departamento de Lima. El área de estudio se encuentra en la proyección UTM WGS - Zona 18S (272974.46E; 8847263.96S), en aproximadamente 3582.00 m.s.n.m.

**Figura 1**

*Ubicación de la cuenca Rapay - Cajatambo*



Nota. Elaboración propia

### ***Delimitación Temporal***

El presente estudio se lleva a cabo en el año 2022 y 2023, Perú; con un tiempo de realización de aproximadamente 13 meses, desde inicios del mes de noviembre del 2022 hasta finales del mes de diciembre del 2023.

### **Limitaciones de la Investigación**

Una de las limitaciones de la presente investigación es la estación hidrométrica, ya que no se encuentra muy cercana al área de estudio, lo que dificultará la recopilación de los datos de series históricas de las escorrentías de la cuenca Rapay.

## MARCO TEÓRICO

### **Antecedentes Nacionales e Internacionales**

#### *Antecedentes Internacionales*

Sánchez et al., (2018) en su artículo sobre el cálculo del volumen de sedimentos erosionados en la cuenca vertiente del Jerte, publicado en la Revista Sociedad Geológica de España, tuvieron como resultados fundamentales que la cuenca Jerte tiene un riesgo muy alto de erosión con valores de 60 a 259 t/ha/año. Además, comprueba que las zonas de matorrales y pastizales son más propensas a la erosión, habiendo aplicado la metodología USLE - RUSLE2 el cual consideran las más precisa. Sin embargo, les faltó hacer uso de otras metodologías de estudio en campo para la erosión hídrica, como el método de clavos y rondanas que hubiera aportado un resultado significativo al estudio.

Expedito et al., (2020) en su artículo sobre el modelado de la erosión hídrica por el Método del Potencial de Erosión y la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo revisada: un análisis comparativo, publicado en la Revista Ambiente & Água, obtuvieron como principales resultados para la subcuenca del Arroyo José Lúcio que el EPM tuvo un 15.27 % de pérdida de suelo, en cambio RUSLE resultó un 19.08%, con lo cual concluyeron que la EPM es la metodología que más se aproxima en precisión al sedimento de la subcuenca. Por otro lado, RUSLE tuvo mejores resultados en indicar las áreas que son más propensas a la erosión. No obstante, estas metodologías no pueden medir la tasa real de erosión tampoco el tipo de erosión del suelo. Es necesario aplicar el criterio e interpretación del profesional que evalúe los resultados. Además, se debe realizar pruebas en campo que demuestren la veracidad y aproximación de ambos métodos.

Gutiérrez et al., (2021) realizaron un artículo sobre la estimación de la erosión hídrica y el transporte de sedimentos en la Cuenca Alta del Río Cuxtepeques, Chiapas, México. En la Revista EIA. Sus resultados fundamentales fueron presentar las variaciones en la erosión hídrica y transporte de sedimentos que ha sufrido la cuenca desde 1980 hasta 2005 mediante el USLE, que han sido afectados por dos factores, los cuales son las intensas lluvias y la cobertura vegetal que ha cambiado en cada año. No obstante, se limitaron a realizar el estudio actualizado en campo. El cual, hubiera sido importante para realizar una comparación actualizada con los diferentes resultados de cada año en la cuenca Alta.

### *Antecedentes Nacionales*

Orbegoso et al., (2018) realizaron un artículo sobre la erosión hídrica en la subcuenca río Urpay utilizando el método del perfil, Huaraz. En la Revista Tzhoecoen. Sus resultados fundamentales para la subcuenca fueron el nivel de la erosión hídrica que según la FAO va desde leve a moderada, el cual ha sido analizada con el método de Perfil y en campo. Sin embargo, se limitaron a utilizar la metodología de USLE, mejorado de USLE, entre otros, para comparar y tener resultados aproximados. Por ello, es necesario realizar un exhaustivo estudio con diferentes métodos.

Camacho et al., (2019) realizaron un artículo sobre la erosión hídrica por lluvias máximas en diferentes tiempos de retorno en la subcuenca Cumbaza – Región San Martín. En la Revista Cátedra Villarreal. Alcanzaron como principal resultado la identificación de 13 áreas de vulnerabilidad de erosión hídrica que van desde moderadamente alta a alta con el Modelo USLE, a lo cual propone como una alternativa de disminución de la erosión, la reforestación con Sistemas Agroforestales. No obstante, señalan que solo utilizaron el Modelo USLE porque son manejados

en diferentes revistas indexadas, a lo cual se limitaron el uso de diferentes métodos empíricos para que puedan llegar a resultados más próximos.

Escobar et al., (2019) realizaron una tesis titulada “Mitigación de la Erosión Hídrica para la conservación del suelo en la subcuenca Del Río Ichu, Huancavelica” para optar el grado académico de Magíster de Gestión Integral de cuencas hidrográficas en la Universidad Nacional Agraria La Molina. Los principales resultados obtenidos mediante la ecuación de RUSLE fueron que la subcuenca presenta en cuatro escenarios, buen número de hectáreas con la tasa de erosión moderada, el cual necesita una práctica de conservación del suelo y control de la erosión para disminuir la tasa de erosión. Sin embargo, se limitaron a realizar la investigación con otros modelos tal como Método de Perfil y Modelo de Meller, método de Clavos. Además, no realizó el estudio en físico para el cálculo del transporte de sedimentos.

## **Bases Teóricas**

### ***Sistemas Fluviales***

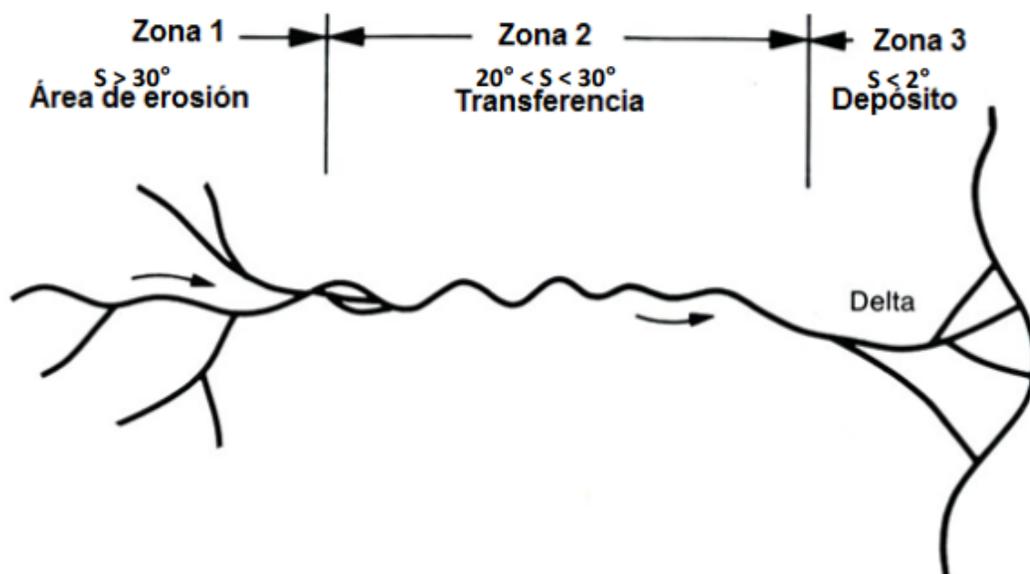
El sistema fluvial lo conforman los ríos que desembocan en el mar. (Guzmán, 2020)

Zonas: Existen tres zonas geomorfológicas (Rocha, 2016):

Área de erosión: El río se encuentra erosionado por los laterales del valle y parte del sustrato, donde se transporta el sedimento río abajo.

Zona de transferencia: Los sedimentos del río siguen su camino hacia abajo y no surge una erosión activa. Puesto que la pendiente disminuye.

Zona de sedimentación: Los sedimentos en esta zona son depositados, puesto que es el área más bajo del sistema.

**Figura 2***Sistema fluvial*

*Nota.* La figura muestra el sistema fluvial en tres zonas diferentes que están dadas por el grado de la pendiente. Tomado de Scumm, (1977)

Tipos de sistema fluvial: Existen los siguientes tipos de sistema fluvial (Rocha, 2016):

Recto: No posee barras, es de línea recta.

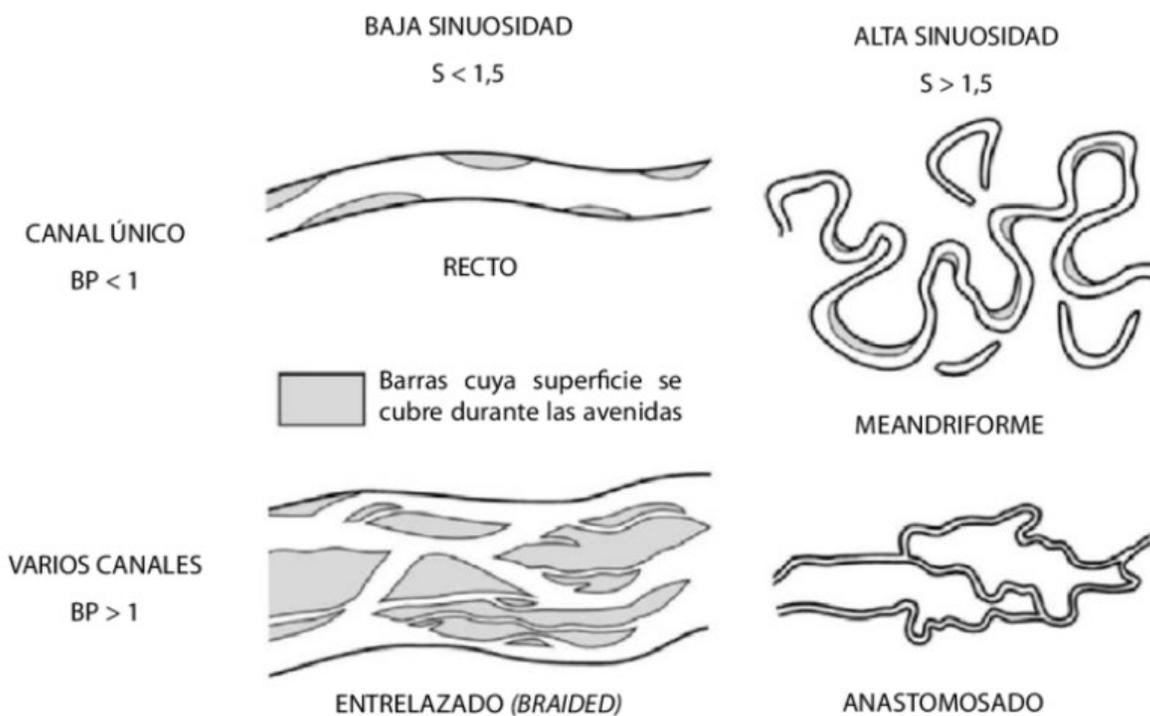
Anastomosado: Posee múltiples canales conectados, pero que se encuentran separados por planicies de inundación.

Meandrosos: Posee barras en el lado interno de las curvas del río.

Entrelazado: Tiene barras en el medio del río, que cubre cuando aumenta el cauce.

### Figura 3

*Tipos de ríos según el número de canales*



*Nota.* La figura muestra los tipos de ríos según el número de sinuosidad y canales. Tomado de Miall, (1977).

### *Parámetros morfométricos*

Los parámetros morfométricos que se analizan en la cuenca se dividen en relieve, forma y drenaje, como se muestran en la siguiente tabla a continuación:

**Tabla 1***Parámetros morfométricos*

<b>Parámetros de relieve</b>	<b>Parámetros de forma</b>	<b>Parámetros de drenaje</b>
Área	Factor de forma	Orden de las corrientes
Perímetro	Índice de compacidad	Densidad de drenaje
Longitud de la cuenca	Factor de circularidad	Constante de estabilidad del río
Altitud media	Relación de elongación	Densidad de corriente
Ancho de la cuenca		Número total de cauces
Coordenadas del centroide		Pendiente del río principal
Pendiente media de la cuenca		Longitud del río principal
Cota de origen y cierre del cauce		Longitud media de la corriente
Cota mayor y menor de la cuenca		Relación de bifurcación
Altitud más frecuente		Relación media de bifurcación
Altitud de frecuencia media		Frecuencia de flujo
Integral hipsométrica		Textura de drenaje
Coefficiente de masividad		Longitud media del flujo
Coefficiente orográfico		Constante de mantenimiento

*Nota.* Elaboración propia

## ***Hidráulica Fluvial***

En las últimas cinco décadas, la hidráulica fluvial ha realizado esfuerzos para comprender el mecanismo de la dinámica de sedimentos en las corrientes de agua, para aplicarlos en la protección de obras hidráulicas y control de cauces. La hidráulica fluvial ha identificado como temática medular, u origen de la problemática fluvial, la morfología de ríos, los sedimentos y sus propiedades, el transporte de sedimentos, la estabilidad de los cauces y la socavación. (Apacla, 2014)

## ***Tipos de Erosión***

La erosión se clasifica de la siguiente manera (INEGI, 2014):

La erosión eólica: El agente causal de este tipo de erosión es el viento, que, en sus formas más extremas, como tolvaneras, remolinos y tornados puede contribuir enormemente a la pérdida de la capa fértil del suelo. Al igual que en el caso de la erosión hídrica, la presencia de vegetación ayuda a proteger el suelo de este tipo de erosión (Ortiz y Estrada, 1993).

### **Figura 4**

*Erosión eólica*



*Nota.* Tomado de Ropero (2020).

La erosión antrópica: Este tipo de erosión es consecuencia de las actividades humanas que modifican el suelo de manera intensa, y muchas veces definitiva, mediante la construcción de obras de infraestructura (Bolaños-González et al., 2016; Ortiz-Solorio y Estrada Berg Wolf, 1993). Esta erosión fue cuantificada en una investigación realizado por INEGI, el cual afecta a 238 750 hectáreas, el 0,12% de la superficie en estudio.

### **Figura 5**

*Erosión antrópica*



*Nota.* Tomado de Fdez (2019).

La erosión pluvial: En este tipo de erosión, las gotas de la lluvia remueven las partículas sueltas del suelo, los cuales son arrastrados por las corrientes.

**Figura 6***Erosión pluvial*

*Nota.* Tomado de Rodas (2017).

La erosión fluvial: Los ríos arrastran rocas o partículas de distintos tamaños, los cuales desgastan las partes elevadas del relieve y rellena las partes bajas.

**Figura 7***Erosión fluvial*

*Nota.* Tomado de Bordino (2021).

## ***Erosión Hídrica***

Este tipo de erosión es afectado principalmente por el agua, el cual arrastra y rompe las partículas que conforman el suelo, como las rocas, los cuales son golpeados directamente por la lluvia y el riego en campos agrícolas. La vegetación protege al suelo del efecto erosivo del agua, por ello es muy importante su conservación. (Ares et al., 2016)

### **Figura 8**

#### ***Erosión hídrica***



*Nota.* Tomado de Novillo (2019).

### ***Factores de la Erosión Hídrica***

Existen cinco factores que intervienen en la erosión hídrica. (Fernández, 2016)

**Precipitación:** La precipitación y la energía cinética son los factores principales para que ocurra la erosión hídrica. (D'Amario Fernández , 2016) Por otro lado, el impacto de las gotas de lluvia al suelo es lo que provoca la erosión; además de que el flujo laminar de la superficie da inicio al transporte de sedimentos. (Dumas, 2012)

Topografía: La topografía es un factor fundamental debido a la longitud e inclinación de la pendiente; puesto que a mayor longitud e inclinación es más propensa la erosión. (Dumas, 2012)

Suelo: La textura, estructura y permeabilidad del suelo es susceptible al desprendimiento de la capa superficial del suelo y transporte debido a la erosión. (Cisneros et al., 2012) (2012)

Vegetación: La vegetación disminuye a la erosión, puesto que protege a la capa superficial del suelo. (Dumas, 2012)

Uso del suelo o sistema de producción: Indica que el cultivo de un área podría condicionar la erosión a gran medida. (Dumas, 2012)

### ***Métodos de Estimación de la Erosión***

Los siguientes modelos empíricos son para la estimación de la erosión hídrica. (De Regoyos, 2003)

### **Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (USLE)**

La nueva ecuación para evaluar las pérdidas de suelo en área más pequeñas (Wischmeier, et al. 1978).

$$A = R K L S C P$$

Donde A es la pérdida anual del suelo (t/ha año), R el índice de erosividad pluvial (MJ. mm /ha h), K es el factor de erosionabilidad del suelo (t ha h/ha MJ mm), L es el factor de longitud de la pendiente (adimensional), S es el factor pendiente (adimensional), C es el factor manejo del cultivo, P es el factor de prácticas de control de la erosión.

El índice de erosividad pluvial se expresa de la siguiente forma:

$$R = EI_{30}/1000$$

Donde E es la energía cinética de la lluvia ( $J/m^2$ ),  $I_{30}$  la intensidad máxima en 30 minutos (mm/h).

Los factores de longitud y grado de pendiente se pueden expresar en la siguiente ecuación:

$$LS = \left(\frac{x}{22.13}\right)^n (0.065 + 0.045s + 0.0065s^2)$$

Donde x es la longitud de la ladera (m), s la pendiente (%), n el valor cambia con la pendiente.

### **Fournier**

Fournier (1960) realizó la siguiente ecuación:

$$\log Q_s = 2.65 \log \frac{p^2}{P} + 0.46 (\log H)(\text{tg } S) - 1.56$$

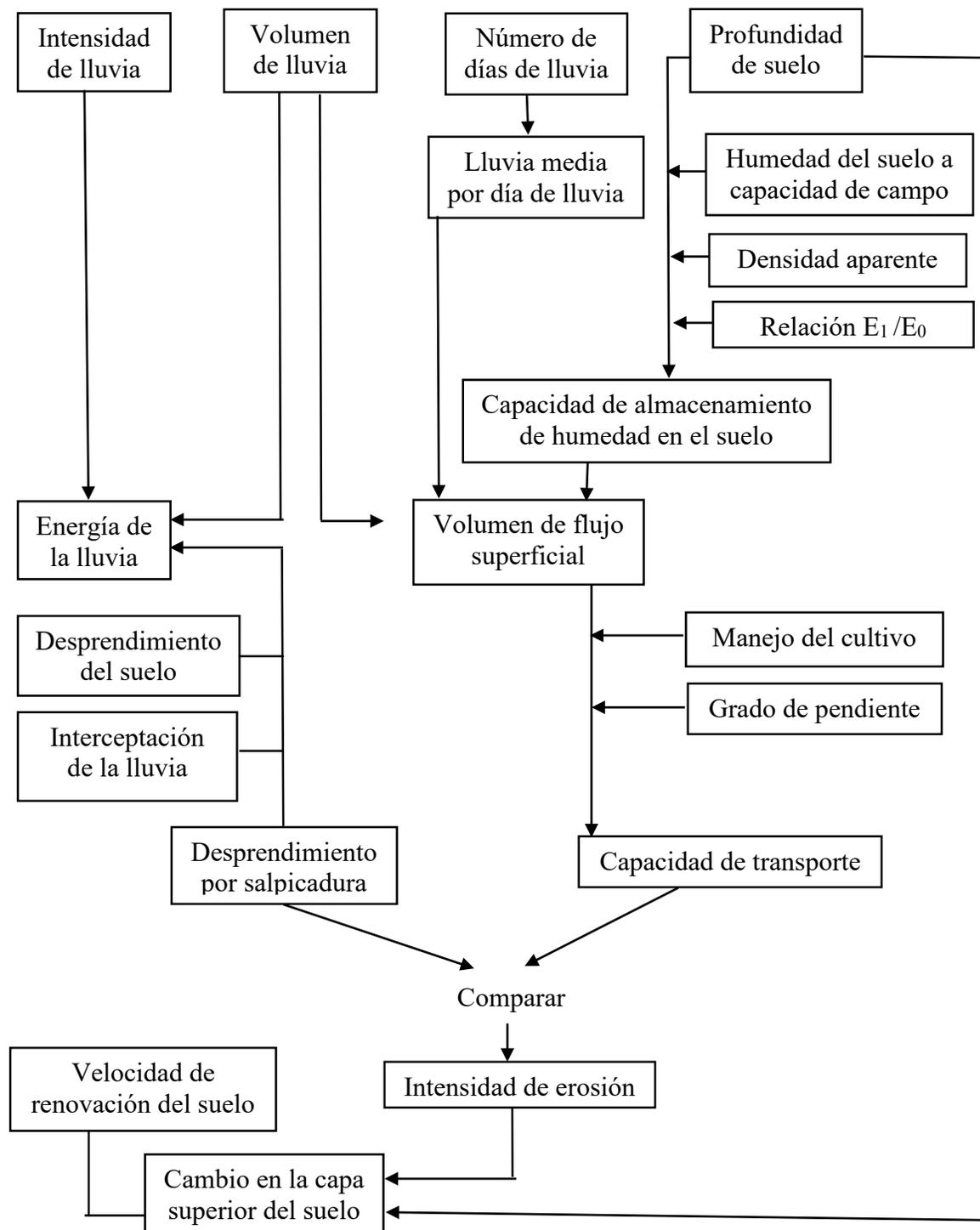
Donde Q la producción media anual de sedimentos ( $g/m^2$ ), p la mayor precipitación media mensual, P la precipitación media anual,  $\frac{p^2}{P}$  el índice de concentración de la precipitación en un solo mes, H la altitud media (m), S la pendiente de la media de la cuenca (grados)

### **Método Morgan, Morgan y Finney**

Morgan, et al. (1984) presentaron un modelo para predecir las pérdidas anuales en parcelas de áreas limitadas. El cual, divide el proceso en dos fases, siendo la fase hidráulica y la fase de sedimentación.

**Figura 9**

*Pérdida de suelo en el modelo de Morgan, Morgan y Finney*

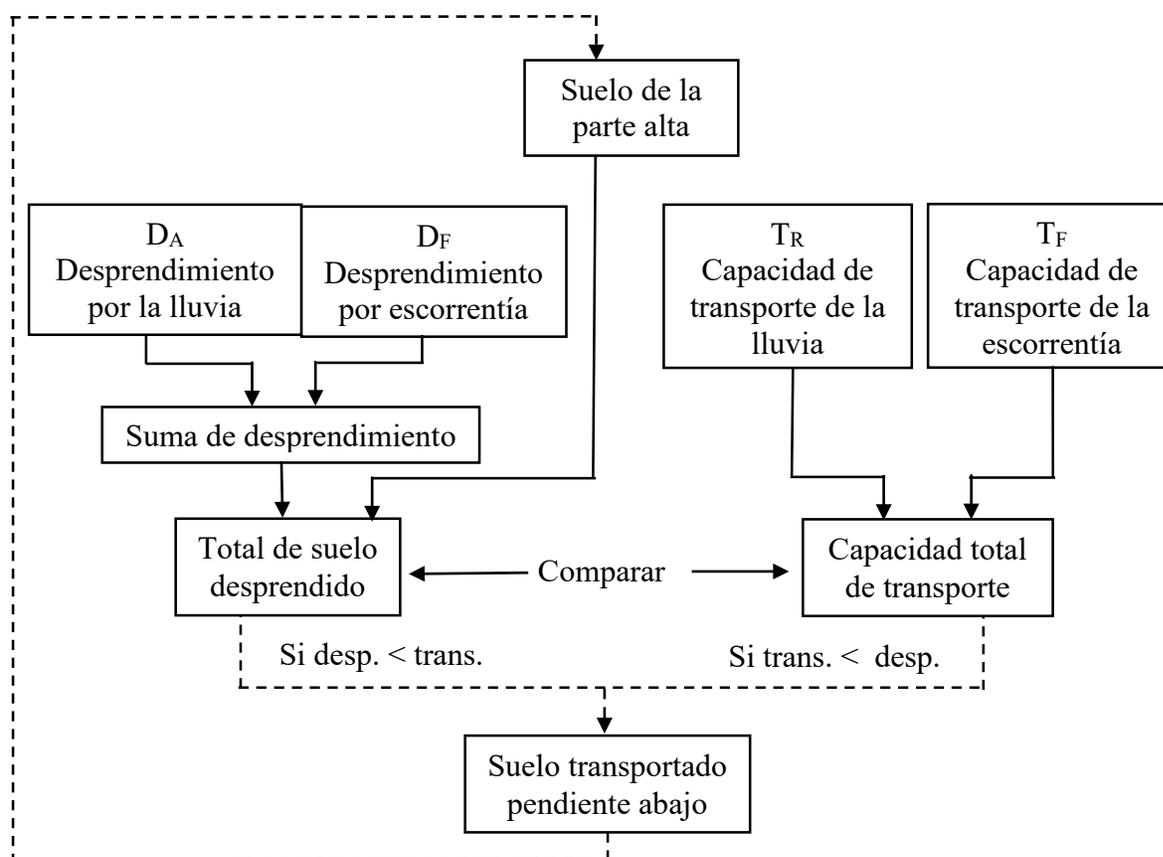


*Nota.* Adaptado de Metodología para la evaluación de la erosión hídrica con modelos informáticos.

Tomado de Regoyos, 2003.

**Figura 10**

*Procesos de la erosión hídrica según Meye y Wischmeier, 1969*



*Nota.* Adaptado de Metodología para la evaluación de la erosión hídrica con modelos informáticos. Tomado de Regoyos, 2003.

En el modelo se utilizan quince parámetros de entrada:

Fase hidráulica:

$$E = R(11.9 + 8.7 \log I)$$

$$Q = R \exp(-R_c/R_0)$$

$$R_c = 1000 MS BD RD (E_t/E_0)^{0.5}$$

$$R_0 = R/R_n$$

Fase de sedimentación:

$$F = K (E e^{-\alpha A})^b \cdot 10^{-3}$$

$$G = CQ^4 \text{ sen } S \cdot 10^{-3}$$

Donde E la energía cinética de la lluvia ( $J/m^2$ ), Q el volumen de flujo superficial (mm), F la tasa de desprendimiento del suelo por impacto de las gotas de lluvia ( $kg/m^2$ ), G la capacidad de transporte por flujo superficial ( $kg/m^2$ ), R la precipitación anual (mm), I intensidad de una lluvia erosiva (mm/h),  $R_n$  el número de días de lluvia al año, MS el contenido de humedad del suelo de 0 a 1/3 bar de presión, RD la profundidad de enraizamiento (m), BD la densidad aparente del horizonte superior del suelo ( $t/m^3$ ), SD la profundidad total del suelo (m), K el índice de desprendimiento del suelo (g/J), W la tasa de aumento del espesor del suelo por meteorización de la interfase suelo – roca (mm/a), S la pendiente de terreno ( $^\circ$ ), v la tasa de aumento del espesor del filtro de raíces (mm/a), A el porcentaje de lluvia interceptada que fluye por los tallos,  $E_t / E_0$  la relación de la evaporación real y potencial, C el factor de manejo del cultivo de cobertura, N el número de años para los que opera el modelo.

### **Soil Loss Estimator for Southern Africa (SLEMSA)**

La ecuación evalúa la erosión que resulta en diversos sistemas agrícolas. Además, recomienda las medidas adecuadas para la conservación del suelo. Es utilizado en los países del Sur de África.

$$Z = K C$$

Donde Z es la pérdida media anual de suelo (t/ha), K la pérdida media anual de suelo (t/ha), C el factor adimensional que depende del manejo del cultivo.

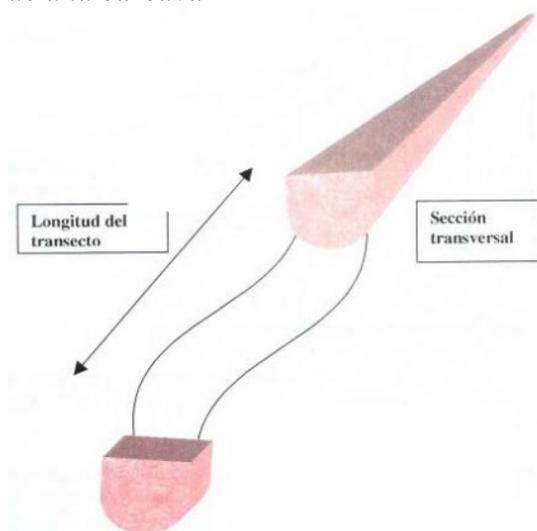
Además, se señala los siguientes métodos para la estimación de la erosión. (Somarriva-Chang., 2005)

## Transecto de Cárcavas

Según Somarriba et al., (2005), consiste en medir la cárcava que se evaluará y dividirla en transectos de igual dimensión. El límite de los transectos es marcado con estacas, que están en una longitud de la orilla de la cárcava de 3.0 – 2.5 metros en ambos lados.

### Figura 11

*El transecto y las secciones de una cárcava*



*Nota.* Tomado de Somarriba – Chang (2005)

### Cálculo del área transversal

Se tiene que identificar la forma de la cárcava para elegir la ecuación adecuada.

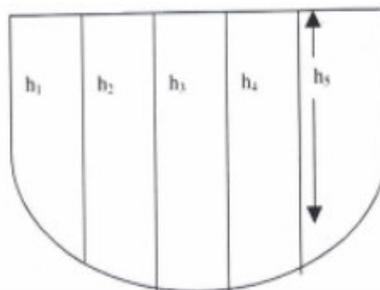
Área de la Cárcava en forma U:

$$A = d \sum h_i$$

Donde A el área de la sección transversal, d la distancia constante (0,5 m),  $h_i$  la profundidad de la marca i.

**Figura 12**

*Sección transversal de la Cárcava en U.*



*Nota.* Tomado de Somarriba – Chang (2005)

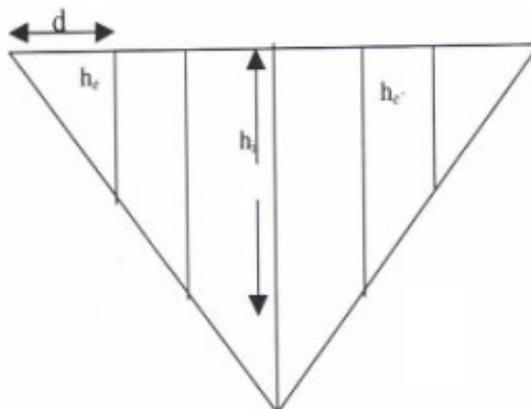
Área de la Cárcava en forma de V:

$$A = d \sum \left( h_e/2 + \sum h_i + h_{e'}/2 \right)$$

Donde A el área de la sección transversal, d la distancia constante (0,5 m),  $h_e$  la profundidad de primera marca,  $h_i$  la profundidad del resto de las marcas,  $h_{e'}$  la profundidad de la última marca.

**Figura 13**

*Sección de una Cárcava en forma de V*



*Nota.* Tomado de Somarriba – Chang (2005)

### Cálculo de la pérdida de suelo

Es la diferencia del área entre el primer momento antes de las lluvias y el segundo momento, al terminar la época de lluvias o según el objetivo de cada investigación.

El cálculo del volumen de suelo perdido se expresa en la siguiente fórmula:

$$V_{sp} = A_d \cdot L_t$$

Donde  $V_{sp}$  el volumen de suelo perdido,  $A_d$  el valor de diferencia del área de la sección transversal,  $L_t$  la longitud del transecto.

El valor de sueño perdido medio se expresa en la siguiente fórmula:

$$V_{sm} = \sum V_{sp} / N_t$$

Donde  $V_{sp}$  el volumen de suelo perdido,  $N_t$  el número de transectos sumados.

### Método del Perfil

Según Somarriba et al., (2005), consiste en la comparación morfológicas de color y textura en cada horizonte de los suelos estudiados. Para ello, se utiliza los siguientes criterios en la descripción del perfil patrón.

Se selecciona un lugar que tenga una topografía dominante y evidencias de erosión.

El lugar debe estar protegido con vegetación y no tenga efectos de sobrepastoreo.

Se describe los estratos, como el espectro, textura, color de acuerdo a la tabla de Munsell.

Se identifica el uso de la tierra y las prácticas de su conservación.

Se realiza la calicata para medir el espesor de los horizontes de acuerdo a sus características.

Finalmente, se analiza los resultados de la calicata para obtener las pérdidas acumuladas de los suelos.

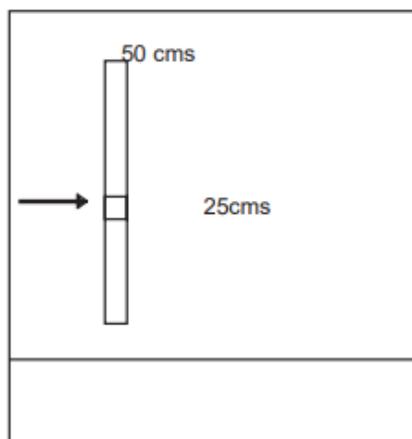
### **Método de clavos y rondanas**

Consiste en el uso de clavos con rondanas, los cuales son colocados a lo largo de un transecto en intervalos regulares. En este método menciona que la rondana debe ser colocado sobre la superficie del suelo y que toque ligeramente la cabeza del clavo. La rondana marca con cortes el terreno erosionado y mide el espesor de la capa de suelo que se perdió.

Se utilizaron varillas de hierro liso de 3/8" y 50 cm de largo. En el centro de la varilla se coloca un anillo blanco de 3 cm de ancho. La varilla se coloca en la tierra hasta los 20 cm de altura. Además, se colocan a distancias de 1 m donde se forma un transecto.

### **Figura 14**

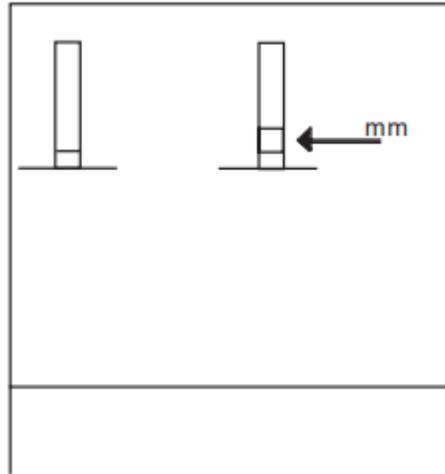
*Método de Clavos y rondanas modificado*



*Nota.* Tomado de Somarriba – Chang (2005)

### **Figura 15**

*Pérdida de suelo en milímetros*



*Nota.* Tomado de Somarriba – Chang (2005)

La cuantificación de pérdidas se expresa en la siguiente ecuación:

$$P = H A DAP$$

Donde P la pérdida de suelo, H la altura de la lámina pérdida, A el área medida, DAP la densidad aparente.

Además, se tiene que considerar el registro de las precipitaciones que se dieron en el tiempo de la investigación.

### ***Transporte de Sedimentos***

Según Hudson (1997) menciona que la pérdida de suelo se calcula a medida que los sedimentos presentan movimientos en las corrientes de los ríos, pero tiene varios problemas. Puesto que medirlo resulta caro y toma tiempo; además, que la precisión podría ser bajo. No

obstante, podría ser útil realizar comparaciones de los movimientos en los diferentes tiempos del año, o diferentes corrientes, o en diferentes cuencas hidrográficas.

### ***Tipos de transporte de sedimentos***

Los tipos de transporte de sedimentos para (Basile, 2018) son los siguientes:

Transporte de fondo. El cual está relacionado al transporte y el otro al flujo. Por ello, la siguiente fórmula se denomina el transporte adimensional de Einstein (Einstein, 1950):

$$\phi = \frac{q_b}{\sqrt{(s-1)gd^3}}$$

Donde  $q_b$  el transporte de fondo volumétrico (es el volumen sólido sin vacíos) por unidad de ancho de las partículas de diámetro,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $d$  el diámetro,  $s$  la gravedad específica del sedimento ( $s=\rho_s/\rho$ ),  $\rho_s$  la densidad del sedimento,  $\rho$  la densidad del agua.

Por otro lado, relacionado con el flujo hídrico se tiene el parámetro de Shields o también conocido como tensión de corte adimensional, el cual se presenta en la siguiente fórmula:

$$\tau_* = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho)gd} = \frac{u_*^2}{(s-1)gd}$$

Donde  $\tau_b$  la tensión de corte sobre el fondo,  $u_*$  es la velocidad de corte.

Por ello, el transporte adimensional es una cierta función de la tensión de corte adimensional:

$$\phi = f(\tau_*)$$

Transporte en suspensión. El transporte en suspensión está sujeto a procedimientos de difusión a causa de la turbulencia del flujo. La siguiente ecuación de advección-difusión de

sedimentos en suspensión 3D, promediada en el período de la turbulencia, se expresa como (García y Parker, 1991):

$$\frac{\partial \bar{c}_s}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u} \bar{c}_s}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v} \bar{c}_s}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w} \bar{c}_s}{\partial z} - \frac{\partial \bar{w}_s \bar{c}_s}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'c'_s}) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{v'c'_s}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{w'c'_s})$$

Donde:

$w_s$  la velocidad de caída de la partícula de sedimento,  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{w}$  y  $\bar{c}_s$  las velocidades de flujo y la concentración volumétrica de sedimentos en suspensión, promediadas en el período de la turbulencia.,  $\overline{u'c'_s}$ ,  $\overline{v'c'_s}$ ,  $\overline{w'c'_s}$  el producto de las fluctuaciones turbulentas de velocidad y concentración en x, y, z, respectivamente, promediado en el período de la turbulencia.

Transporte total. El transporte total de sedimentos se calcula mediante la suma del transporte de suspensión y transporte de fondo:

$$q_t = q_b + q_s$$

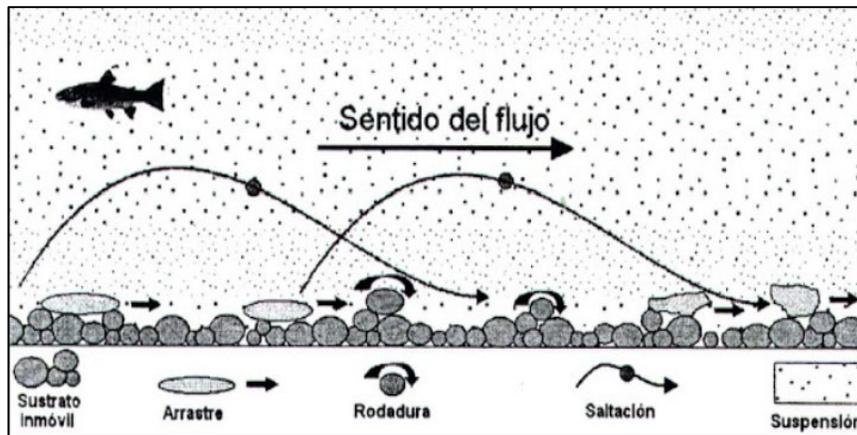
Además, existen dos tipos más de transporte de sedimentos: (Mendoza Baldwin, 2013)

Transporte longitudinal. Ocurre mediante movimientos a lo largo de la línea de la costa. Puesto que las olas con las corrientes verticales y horizontales generan los movimientos de las partículas. Los cuales, los sedimentos pueden acomodarse en las crestas o valles, o puede producirse la formación de pequeñas cúspides rítmicas a lo largo de la costa.

Transporte transversal. El cual ocurre mediante el acarreo de las partículas de sedimentos hacia fuera de la playa o hacia la playa, que pueden ocurrir en tiempo de tormentas o de oleaje respectivamente.

**Figura 16**

*Tipos de Transporte de Sedimentos*



*Nota.* Tomado de Paolo Billi y Enzo Salemi (2004)

### ***Modelos Matemáticos de Estimación del Transporte de Sedimentos***

Se estima los siguientes casos de continuidad de sedimentos (Basile, 2002)

Continuidad de sedimentos en el estrato de transporte en suspensión. El transporte de sedimentos en suspensión se encuentra en desequilibrio. El almacenamiento se considera en la columna de agua. La ecuación para el transporte de suspensión es la siguiente:

$$\frac{\partial(q_{si}/v)}{\partial t} + \frac{\partial q_{si}}{\partial x} + \Phi_{si} = 0$$

Donde  $t$  la coordenada temporal,  $x$  representa a la coordenada espacial,  $q_{si}$  el transporte en suspensión efectivo,  $v$  la velocidad media de la corriente hídrica,  $\Phi_{si}$  representa al flujo de sedimentos de la clase  $i$ -ésima entre el estrato de transporte en suspensión y el estrato de transporte de fondo.

$$\Phi_{si} = \frac{1}{\lambda_{*i}}(q_{si} - q_{se i})$$

Donde  $q_{sei}$  es la capacidad de transporte en suspensión,  $\lambda_{*i}$  es la longitud de adaptación de la clase  $i$ -ésima que se transporta en suspensión.

Ecuación de la longitud de adaptación de la clase  $i$ -ésima transportada en suspensión (Armanini et al. ,1989)

$$\lambda_{*i} = \frac{h_s v}{w_{si}} \left( \frac{a}{h_s} + \left(1 - \frac{a}{h_s}\right) \exp \left[-1.5 \left(a/h_s\right)^{-1/6} (w_{si}/u_*)\right] \right)$$

Donde  $w_{si}$  la velocidad de caída asociada a la clase  $i$ -ésima,  $u_*$  la velocidad de corte,  $a$  la altura del estrato de transporte de fondo,  $h_s$  la rugosidad equivalente de Nikuradse.

Continuidad de sedimentos en el transporte de fondo. El transporte de sedimentos en fondo se rige de los parámetros hidrodinámicos y sedimentológicos. Por ello, el transporte de fondo efectivo y la capacidad de transporte son iguales. La ecuación del transporte de fondo es: (Basile, 2002)

$$\frac{\partial q_{bi}}{\partial x} + \Phi_{bi} - \Phi_{si} = 0$$

Donde  $q_{bi} = q_{bci}$  la capacidad de transporte de fondo por unidad de ancho correspondiente a la clase  $i$ -ésima,  $\Phi_{bi}$  el flujo de sedimentos de la clase  $i$ -ésima entre el estrato de transporte de fondo y el estrato de mezcla.

Continuidad de sedimentos en el estrato de mezcla En el estrato de mezcla se producen flujos verticales por la erosión y sedimentación, que origina cambios en la composición granulométrica. (Basile, 1999):

$$(1 - p) \left[ \frac{\partial (f_i/\delta)}{\partial t} + \Phi_{ei} \right] = \Phi_{bi}$$

$$\Phi_{ei} = f_{ei} \frac{\partial(z_b - \delta)}{\partial t}$$

Donde  $P$  la porosidad del sedimento,  $f_i$  la fracción de la clase  $i$ -ésima presente en el estrato de mezcla,  $\Phi_{ei}$  el flujo de sedimentos de la clase  $i$ -ésima entre el estrato de mezcla y el estrato de sedimentos no perturbados o substrato,  $z_b$  la cota del fondo,  $f_{ei} = f_i =$  En un determinado intervalo de tiempo la superficie de separación entre dichos estratos. Se desplaza hacia arriba,  $z_b - \delta$  la cota,  $f_{ei} = f_{npi}$  la superficie que desplaza hacia abajo.

### ***Métodos numéricos para la estimación de sedimentos***

Hay diversos métodos numéricos para cuantificar el arrastre en la capa de fondo de los sedimentos, los cuales son: (Maza et al., 1196)

Método de DuBoys. DuBoys (1879), establece por primera vez la fórmula para estimar el arrastre de material sólido en el fondo de un canal o río. En el cual consideró que el material se mueve en una serie de  $n$  capas superpuestas, en el cual cada una tiene un espesor  $\epsilon$  que tiene el mismo orden de magnitud del diámetro de las partículas que lo forman, y supone un diámetro uniforme. También, consideró que la variación de las velocidades entre capas adyacentes es  $\Delta V$ . Por ello, la velocidad de la capa inferior es cero, la segunda es  $\Delta V$  y la superior es  $(n-1) \Delta V$ .

$$g_B = \frac{\gamma_s \Delta V (n-1) n \epsilon}{2}$$

Donde  $g_B$  el sólido transportado,  $\Delta V$  la velocidad media,  $\Delta V (n-1)$  la velocidad capa superior,  $\epsilon$  el espesor,  $\gamma_s$  el peso específico de las partículas.

Sin embargo, Straub (1935) propuso a los valores de X en función del diámetro de las partículas, por lo que se obtiene la fórmula DuBoys – Straub para la estimación del arrastre unitario en el fondo:

$$g_B = \frac{0.01003}{D^{\frac{3}{4}}} \tau_o (\tau_o - \tau_c)$$

Donde  $g_B$  está expresado en kg f/s m,  $\tau_o$  y  $\tau_c$  expresado en kg f / m<sup>2</sup>, D en N / s m

Si se utiliza el sistema internacional de medida, el coeficiente 0.01003 cambiaría a 0.001023;  $\tau_o$  y  $\tau_c$  expresado en N / m<sup>2</sup>, D en m, y  $g_B$  expresado en N / s m.

Cuando el material no es uniforme se utiliza el diámetro representativo:

$$D = D_{50}$$

Del cual, su límite de aplicación es  $0.0001 \leq D_{84} \leq 0.004$  m.

La fórmula modificada se expresa de la siguiente forma:

$$g_B = 0.01003 (\gamma_s - \gamma)^2 D_{50}^{5/4} \tau_* (\tau_* - \tau_c)$$

Donde:

$$\tau_* = \frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma) D_{50}} = \frac{\gamma R S}{(\gamma_s - \gamma) D_{50}} = \frac{R S}{\Delta D_{50}}$$

$$\tau_c = 41,8 D^{0,82} - 0,017 \text{ Ln} (454 D)$$

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} = S_s - 1$$

$$R = A/P$$

Donde  $\gamma$  el peso específico del agua (kg f / m<sup>3</sup>),  $\gamma_s$  el peso específico de las partículas (kg f / m<sup>3</sup>),  $\rho_s$  la densidad de las partículas (kg / m<sup>3</sup>),  $S$  la pendiente hidráulica,  $R$  el radio hidráulico (m),  $A$  el área (m<sup>2</sup>),  $P$  el perímetro (m).

Método de Schoklitsch. Schoklitsch (1950) propuso una ecuación para la estimación del arrastre unitario en la capa de fondo, según experimentos basados en canales de laboratorio y mediciones en los ríos.

$$g_B = 2500 S^{\frac{3}{2}}(q - q_c)$$

Donde  $q$  el gasto unitario líquido del río,  $q_c$  el gasto unitario crítico (m<sup>3</sup>/s m),  $S$  la pendiente hidráulica,  $g_B$  el arrastre unitario en la capa de fondo (kg f / s m)

### Cálculo del gasto unitario crítico

Se requiere utilizar la fórmula de Manning:

$$q_c = \frac{1}{n} d_c^{5/3} S^{1/2}$$

Previamente, se halla  $n$  y  $d_c$ :

$$n = \frac{D^{1/6}}{19,05}$$

Donde  $D$  es el diámetro (m).

Por otro lado, para obtener el tirante crítico para el inicio del arrastre  $d_c$  existen dos métodos:

Método usual:

En el cual el tirante crítico está en función del diámetro ( $D$ ) del material del cauce y la pendiente hidráulica del río ( $S$ ).

$$d_c = \tau_{*c} \frac{\Delta D}{S}$$

Donde:

$$\tau_{*c} = f(U * D)/v = f(D *)$$

En lugar de la curva de Shields, se puede utilizar la ecuación que Maza obtuvo:

$$\tau_{*c} = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)} = \left[ \frac{0.2196}{D_*} + 0.177 \exp \left\{ - \left( \frac{30.35}{D_*} \right)^{0.563} \right\} \right]$$

Donde:

$$D_* = (R_*^2 / \tau_{*c})^{1/3}$$

El cual se utiliza si  $2.15 \leq D_* \leq 333$ .

Cuando  $D_* > 333$  el  $\tau_{*c}$  resulta un valor de:

$$\tau_{*c} = 0.06(\gamma_s - \gamma)D$$

Cuando  $D_* \leq 333$  el  $\tau_{*c}$  resulta un valor de:

$$\tau_{*c} = (\gamma_s - \gamma)D \left[ \frac{0.2196}{D_*} + 0.177 \exp \left\{ - \left( \frac{30.35}{D_*} \right)^{0.563} \right\} \right]$$

De las ecuaciones anteriores  $D_*$  que es el parámetro de la partícula equivale a:

$$D_* = D \left[ \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) \frac{g}{v^2} \right]^{1/3} = D \left( \frac{\Delta g}{v^2} \right)^{1/3}$$

La expresión general para el cálculo del gasto unitario crítico:

$$q_c = 19.05 \tau_{*c}^{5/3} \frac{\Delta^{5/3} D^{3/2}}{S^{7/6}}$$

Ecuación para evaluar el arrastre en la capa de fondo,

$$g_B = 2500 S^{1/3} (q S^{7/6} - 19.05 \tau_{*c}^{5/3} \Delta^{5/3} D^{3/2})$$

Donde  $g_B$  el transporte unitario de sedimentos expresado en peso seco (Kg/s.m), D el diámetro de las partículas (m), S la pendiente del fondo del canal, q el caudal unitario ( $m^3 /s.m$ ),  $\tau_{*c}$  el parámetro adimensional de Shields,  $\Delta$  la densidad relativa de la partícula.

Método de Levi. Levi (1948) propuso una ecuación para obtener el gasto sólido del material del fondo cuya expresión es:

$$g_B = \frac{0.002 \gamma_s U^3 (U - U_c)}{g^{3/2} (d D_m)^{1/4}}$$

Donde  $g_B$  es el transporte unitario de sedimentos expresado en peso seco ( $kg /s m$ ),  $\gamma_s$  el peso específico del sedimento seco ( $kg / m^3$ ), U la velocidad media (m/s),  $U_c$  la velocidad crítica (m/s),  $D_m$  el diámetro medio de las partículas (m), d la profundidad o tirante (m).

Método de Sato, Kikkawa y Ashida. Sato, Kikkawa y Ashida (1958), plantearon una ecuación para el arrastre en la capa de fondo.

Para el coeficiente de Manning ( $n$ )  $\geq 0.025$

$$g_B = U_* (\tau_o - \tau_c)$$

Para  $0.010 \leq n \leq 0.025$

$$g_B = U_* (\tau_o - \tau_c) \left( \frac{1}{40 n} \right)^{3.5}$$

Donde  $g_B$  el transporte unitario de sedimentos en peso seco ( $kg / s m$ ),  $U_*$  la velocidad al corte del flujo (m/s),  $\tau_o$  el número o parámetro adimensional de Shields,  $\tau_c$  es el esfuerzo constante máximo que resiste una partícula ( $kg / m^2$ ).

Fórmula de Rotter. Rotter (1959) publicó la siguiente fórmula basada en un análisis dimensional. El cual aplica si  $d \geq 1000 \text{ Dm}$ .

$$g_B = \frac{\gamma_s U^3}{37037 g \Delta}$$

Donde  $g_B$  el transporte unitario de sedimentos que se expresa en peso seco ( $\text{kg} / \text{s m}$ ),  $\gamma_s$  el peso específico del sedimento seco ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ),  $U$  la velocidad media ( $\text{m/s}$ ),  $\Delta$  la densidad relativa de las partículas,  $g$  la aceleración debida a la gravedad ( $\text{m/s}^2$ )

Método de Garde y Albertson. Garde y Albertson (1961), presentaron la siguiente ecuación para el arrastre de la capa de fondo. El cual, está establecido para el rango de  $0.018 \leq \tau_* \leq 0.6$  y  $8 \leq U/U_* \leq 15$ .

$$g_B = \gamma_s U_* D_{50} \Phi_k$$

Donde  $g_B$  el transporte unitario de sedimentos en peso seco ( $\text{kg} / \text{s m}$ ),  $\gamma_s$  el peso específico del sedimento seco ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ),  $U_*$  la velocidad al corte del flujo ( $\text{m/s}$ ),  $D_{50}$  el diámetro de las partículas ( $\text{m}$ ),  $\Phi_k$  el parámetro adimensional.

Método de Inglis y Lacey. Inglis y Lacey (1929), propusieron la siguiente ecuación para cauces en régimen, donde se incluía el diámetro la velocidad de la caída del material del fondo. También se utiliza para cauces arenosos.

$$g_B = \frac{0.562 \gamma U^5 v^{1/3}}{\omega_m d g^{5/3}}$$

Donde  $g_B$  el transporte unitario de sedimentos ( $kg / s m$ ),  $\gamma$  el peso específico del agua ( $kg/m^3$ ),  $U$  la velocidad media ( $m/s$ ),  $\nu$  la viscosidad cinemática del agua ( $m^2/s$ ),  $g$  la aceleración debida a la gravedad ( $m/s^2$ ),  $d$  la profundidad ( $m$ ),  $\omega_m$  la velocidad de caída del diámetro medio ( $m/s$ )

Método de Bogardi. Bogardi realizó su investigación con diferentes parámetros adimensionales que tuvieran efectos en el arrastre de fondo. Para ello, se debe verificar que  $\tau_* \leq 0,8$ , y  $\tau_* > 0,8$  cuando los resultados sean el transporte total de fondo.

$$g_B = 21,99 \gamma_s (g\Delta D^3)^{1/2} \tau_*^{4,121}$$

Donde  $g_B$  el transporte unitario de sedimentos que se expresa en peso seco ( $kg / s m$ ),  $\gamma_s$  el peso específico del sedimento seco ( $kg / m^3$ ),  $g$  la aceleración debida a la gravedad ( $m/s^2$ ),  $D_m$  el diámetro medio de las partículas ( $m$ ),  $\Delta$  la densidad relativa de la partícula,  $\tau_*$  el número o parámetro adimensional de Shields.

Método de Garg, Agrawal y Singh. Garg, Agrawal y Singh plantearon la siguiente fórmula. En el cual, se debe aplicar para diámetro menor de 0,598 mm.

$$g_B = \frac{3 g \gamma_s D_m U_1 (\tau'_o - \tau_c)}{\gamma C_D U_1^2 - 3g D_m S (\gamma_s - \gamma)}$$

Donde  $g_B$  el transporte unitario de sedimentos que se expresa en peso seco ( $kg / s m$ ),  $\gamma_s$  el peso específico del sedimento seco ( $kg / m^3$ ),  $g$  la aceleración debida a la gravedad ( $m/s^2$ ),  $D_m$  el diámetro medio de las partículas ( $m$ ),  $S$  la pendiente del fondo del canal,  $U_1$  la velocidad del

flujo (m/s),  $\gamma$  el peso específico del agua ( $kg/m^3$ ),  $\tau_c$  el esfuerzo constante máximo de una partícula antes de ser movida ( $kg/m^2$ ),  $C_D$  el coeficiente de empuje adimensional.

Formula de Graf y Acaraglu (1968). Graf y Acaraglu proponen una ecuación para estimar el gasto sólido total unitario a partir del  $D_m$  de la partícula.

$$g_{BT} = 20\gamma_s \left( g \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) D_m^3 \right)^{0,5} \tau_*^{3,3}$$

Donde  $g_{BT}$  es el Gasto sólido total unitario ( $kg\ s / m$ ),  $D_m$  el Diámetro de la partícula (m),  $g$  es la Aceleración debido de la gravedad ( $m^2/s$ ),  $\gamma_s$  el Peso específico del suelo ( $kg/m^3$ ),  $\gamma$  el Peso específico del agua ( $kg/m^3$ ),  $\tau_0$  el Número adimensional de Shields (m/s)

Método de Schoklitsch. Existen dos expresiones para obtener  $d_c$  los cuales son:

La primera expresión aplica si  $D \geq 0.006$  m:

$$d_c = 0.076 \frac{\Delta D}{S}$$

Entonces,  $q_c$  está dado por:

$$q_c = 0.26 \frac{\Delta^{5/3} D^{3/2}}{S^{7/6}}$$

Se llega finalmente a la siguiente ecuación:

$$g_B = 2500 S^{\frac{1}{3}} (q S^{\frac{7}{6}} - 0.26 \Delta^{\frac{5}{3}} D^{\frac{3}{2}})$$

La segunda expresión aplica si  $0.0001 \leq D \leq 0.003$ :

$$d_c = 0.000285 \frac{(\gamma_s - \gamma)D^{1/3}}{S}$$

Donde  $q_c$  está dado por:

$$q_c = 2.351 * 10^{-5} \frac{\Delta^{5/3} D^{7/18}}{S^{7/6}}$$

Finalmente, se llega a la siguiente ecuación:

$$g_B = 2500 S^{\frac{1}{3}} (q S^{\frac{7}{6}} - 2.351 * 10^{-5} \Delta^{5/3} D^{7/18})$$

Schoklitsh recomienda utilizar un diámetro representativo de la mezcla a  $D_{40}$  :

$$D = D_{40}$$

A continuación, se muestran las ecuaciones de gasto sólido en suspensión:

### **Definición de Términos Básicos**

**Cuencas hidrográficas:** Es el terreno de drenaje natural del agua, el cual se drena hacia el mar mediante los ríos que están en las subcuencas.

**Ecuación de Pérdida de Suelo Universal Revisada (RUSLE):** En un método matemático para calcular la pérdida media anual del suelo.

**Erosión hídrica:** Es el proceso que provoca la pérdida de la productividad de los suelos agrícolas, debido a la acción del agua. Suele presentarse poca cubierta vegetal y suelo poco resistente

**Precipitación:** Se define como la caída del agua hacia el suelo. En forma de agua, nieve brumas o rocío.

Sedimentos: Se define como la carga del flujo de agua.

Transporte de sedimentos: Es el proceso que se puede realizar en dos mecanismos distintos, como la escorrentía superficial sobre la cuenca de drenaje y el de trabajo del agua en los cauces.

## HIPÓTESIS Y VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN

### **Hipótesis**

La hipótesis es la supuesta explicación o suposición que se establece de ciertas acciones para dar soporte a una investigación. (Pájaro, 2002).

#### *Hipótesis Primaria*

Se estima que la erosión hídrica es aproximadamente 50 t/ha/año mientras que, el transporte de sedimentos en río Rapay es superior a 80 t/día.

#### *Hipótesis Secundarias*

La geomorfología de la cuenca presenta un relieve montañoso con pendiente fuertemente accidentado de 25 %. La geometría es ancha con potencial a crecientes muy alta. La red hídrica es densa, propensa a ser erosionada, donde su relación de bifurcación presenta 4,5 siendo una cuenca homogénea con textura fina.

La estimación de la erosión hídrica de la cuenca del río Rapay, mediante el método RUSLE oscila entre 50-200 t/ha/año y la clasificación tiende a ser severa a muy severa.

El modelo de transporte de sedimentos con mejor ajuste son las ecuaciones de Engelund y Hanzen y Schoklistch.

## **Variables e Indicadores**

### ***Variable independiente***

La variable independiente es la explicación de la ocurrencia de un fenómeno. Además, menciona que es la variable que se puede manipular en la investigación. (Amiel, 2007) En la presente investigación se define como variable independiente la erosión hídrica y el transporte de sedimentos.

### ***Variable dependiente***

La variable dependiente es el fenómeno que debe explicarse en la investigación y sus valores dependen de las variables independientes. (Núñez, 2007) En la presente investigación se define como variable dependiente la estructura hidráulica.

## Operacionalización de Variables

**Tabla 2**

*Operacionalización de variables*

	<b>Variable</b>	<b>Dimensión de la variable (Sub - variable)</b>	<b>Variables empíricos o indicadores</b>	<b>Medición</b>	<b>Valorización</b>	
Variable dependiente	Estructura hidráulica	Hidráulica	Área	m <sup>2</sup>	-	
			Caudal	m <sup>3</sup> /s	Método racional	
			Velocidad	m/s	Manual de hidrología, hidráulica	
			Pendiente	m/m	-	
			Tirante	m	-	
Variable independiente	Erosión hídrica	Suelo	Tipo de suelo	G.S.M.C.O	SUCS y AASHTO	
		Precipitación	Periodo de retorno	Años	2, 5, 10, 25 y 50 años	
	Curvas IDF		mm/h	Manual de hidrología, hidráulica		
	Tiempo de concentración		Minutos	-		
	Transporte de sedimentos	Análisis granulométrico	Manejo del suelo	Tipo de cultivo	-	-
			Peso del material	Granulometría	mm	Tamices estándar
				Densidad	kg/ cm <sup>3</sup>	-
			Peso específico	kg	-	

Variables	Sistema	Tipo de zona	Área de erosión	grados	S > 30°
intervenientes	fluvial		Transferencia	grados	20° < S < 30°
			Depósito	grados	S < 2°
	Cuenca	Parámetros geomorfológicos	Relieve	%	-
			Geometría	km <sup>2</sup> , km	MTC, normas o criterios, artículo científico
			Red hídrica	km/km <sup>2</sup>	-
	Métodos	Métodos semi empíricos y matemáticos	USLE	t/ha/año	ArcMap 10.8, MTC
			RUSLE	t/ha/año	ArcMap 10.8, MTC
			Método de clavos	mm	Artículo científico
			Métodos semi empíricos de sedimentos	kg/s.m	ArcMap 10.8, MTC

*Nota.* Elaboración propia

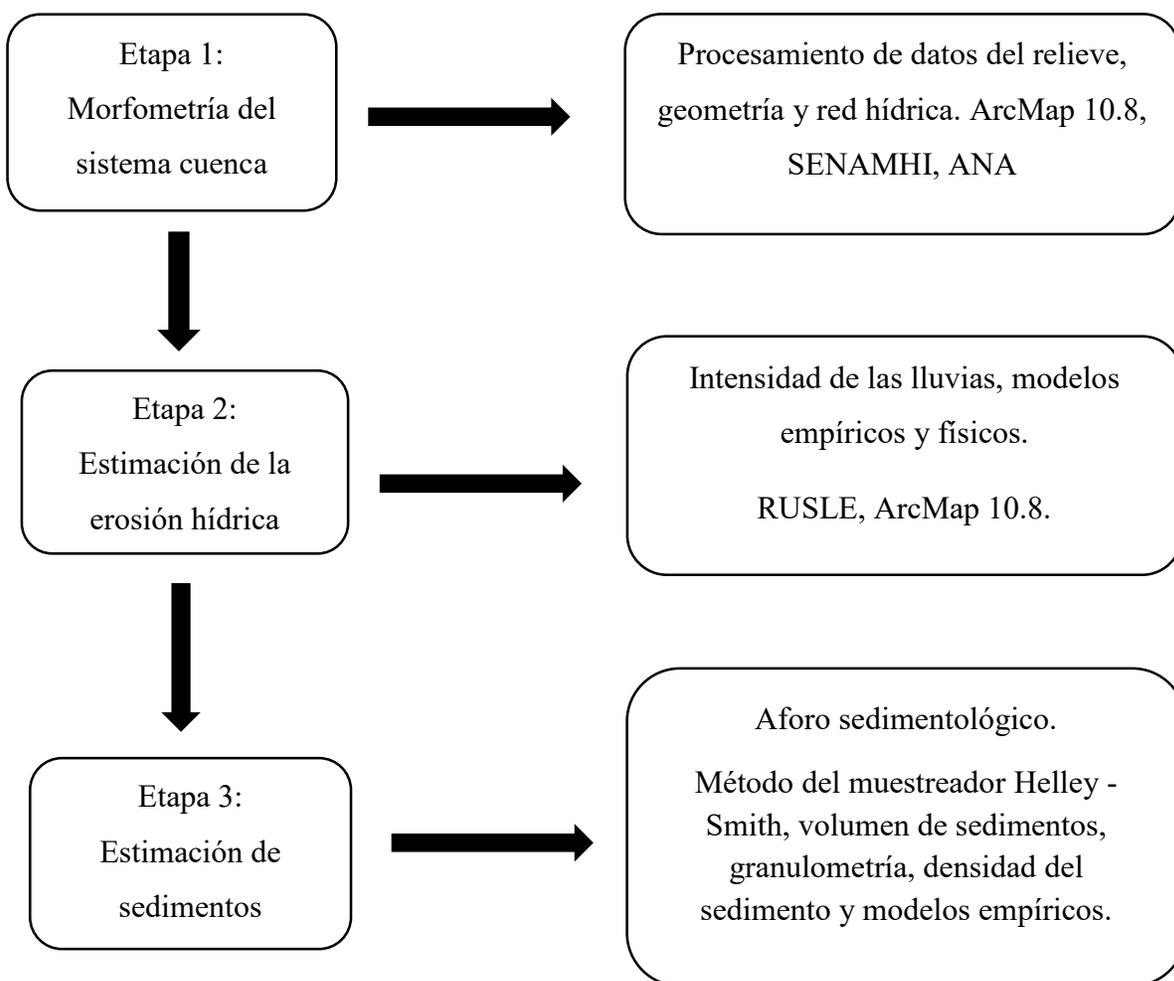
## DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

### Diseño de ingeniería

El diseño de ingeniería viene a ser un instrumento metodológico en la que facilita desarrollar los procesos investigativos y permite la verificación de la competencia académica y científica generando soluciones de problema. Es decir, este instrumento donde ayuda el investigador a planear su procedimiento de investigación de acuerdo a las normas metodológicas. (Torres, 1994)

### Figura 17

*Flujograma de diseño de ingeniería*



*Nota.* El gráfico representa las tres etapas para el desarrollo del proyecto. En la etapa 1, de morfometría del sistema cuenca se realizará el procesamiento de los datos del relieve, geometría y la red hídrica. En la etapa 2, se estimará la erosión hídrica mediante la metodología RUSLE. Finalmente, en la etapa 3 se estimará los sedimentos, mediante los modelos semi empíricos, el método del muestreador Helley Smith y el análisis con otros softwares.

## **Métodos y Técnicas del Proyecto**

### ***Enfoque de la Investigación***

La investigación cuantitativa recolecta y analiza un registro de datos obtenidos de diferentes fuentes, que para obtener los resultados se utiliza herramientas informáticas, matemáticas y estadísticas. Su principal propósito es cuantificar el problema y lograr entenderlo a través de los resultados numéricos que la investigación brinde. (Neill et al., 2018) (2018)

La presente investigación cuenta con un enfoque cuantitativo, porque se va a observar, recopilar, comparar información respecto a la geomorfología de la cuenca, la erosión y transporte de sedimentos.

### ***Alcance de la investigación***

La investigación explicativa se encarga de responder por las causas de los eventos y fenómenos físicos o sociales. El interés se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta o por qué se relacionan dos o más variables. (Hernández et al., 2014)

El alcance de la investigación es explicativo porque pretende determinar que método de erosión y sedimentación se ajusta más a la cuenca Rapay.

### ***Diseño de la investigación***

La investigación no experimental se trata de variables que se dan sin que el investigador tenga una intervención directa con ellas, sólo se observan los fenómenos de manera natural para luego realizar su respectivo análisis. (Lancheros, 2012).

La presente investigación es no experimental con diseño longitudinal porque el interés es el análisis de los cambios de las variables a través del tiempo. (Hernández et al., 2014).

### **Diseño estadístico**

#### ***Población***

La población de la investigación, es un conjunto de hechos que puede ser accesible, definido y limitado, el cual forma un referente para la elección de la muestra del estudio. (Arias et al., 2016) (2016)

En la presente investigación se seleccionó como población, la erosión y el transporte de sedimentos de la cuenca Pativilca.

#### ***Muestra***

La muestra en una investigación es la parte representativa de la población, el cual se elige por criterios lógicos y de acuerdo a los fines de la investigación. (López , 2004)

Para la presente investigación se ha considerado la muestra por criterio siendo el método No Probabilístico, tipo intencional. El cual, se basa en el criterio o conocimiento del investigador. Además, de la vulnerabilidad de la sociedad, la experiencia con la población y el grado de

importancia. (Hernández et al., 2014) Por ello, la muestra se consideró la erosión y el transporte de sedimentos de la cuenca Rapay.

## **Técnicas y Herramientas Estadísticas**

### ***Técnicas para la Investigación***

La observación directa es una técnica que permite recolectar la información de cómo se desarrolla un objeto, en sucesos que ocurren naturalmente (Pulido, 2015).

La presente investigación es de observación directa, porque se realizó la visita de campo en la cuenca de estudio, donde se ubicará los clavos para medir la erosión del suelo a través del tiempo y el estudio de sedimentos con el muestreador Helley- Smith en el río Rapay.

### ***Instrumentos para Recolección de Datos***

Cinta métrica: Se utilizó para medir el perímetro y la altura de la erosión de los clavos y el ancho de la sección del río Rapay.

Correntómetro FP111 Global Water: Instrumento de alta precisión que determina la velocidad de la corriente del río.

GPS: Se utilizó este equipo para localizar con coordenadas del objeto situado en la tierra.

Muestreador Helley - Smith: Se utilizó este equipo para recolectar los sedimentos transportados en el río.

*Tabla de actividades***Tabla 3***Tabla de actividades*

Actividades	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8
A. Delimitación de la cuenca								
- Parámetros morfométricos	■							
B. Ejecución de trabajo de campo								
- Muestreador Helley Smith			■					
C. Procesamiento de datos Métodos empíricos para estimar la erosión y transporte de sedimentos.						■		
D. Análisis e interpretación								
- Operacionalización de variables							■	
- Contrastación de hipótesis								■

*Nota.* Elaboración propia

*Tablas de matriz de consistencia*

**Tabla 4**

*Matriz de consistencia general*

<b>Preguntas</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Hipótesis</b>	<b>Alcance de la Investigación</b>	<b>Universo Investigado</b>	<b>Técnica e Instrumento</b>	<b>Tamaño, Muestra y Ensayos</b>
GENERAL ¿Cuál es la erosión hídrica y los sedimentos que se transportan en la cuenca del río Rapay para el planeamiento, diseño y operación eficiente de las estructuras hidráulicas?	GENERAL Estimar la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo.	GENERAL Se estima que la erosión hídrica es aproximadamente 50 t/ha/año mientras que, el transporte de sedimentos en río Rapay es superior a 80 t/día.	Explicativo (Cuantitativo)	Cuenca del río Rapay	Técnica: Observación directa.  Instrumento: - ArcGIS Pro - Muestreador Helley- Smith - SPSS - Guía de observación - Fichas - Cuadros de registros	Muestra: La muestra es la erosión y sedimentación de la sub cuenca Rapay.  Ensayos: Ensayo de granulometría, peso específico, porcentaje de humedad y densidad.

*Nota.* Elaboración propia

**Tabla 5***Matriz de consistencia específico*

<b>Preguntas</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Hipótesis</b>	<b>Alcance de la investigación</b>	<b>Universo investigado</b>	<b>Técnica e instrumento</b>	<b>Tamaño, muestra y ensayos</b>
ESPECÍFICAS	ESPECÍFICAS	ESPECÍFICAS				
¿Cuáles son las características morfológicas de la cuenca?	Determinar los parámetros morfológicos de la cuenca del río Rapay.	Se estima que la erosión hídrica es aproximadamente 50 t/ha/año mientras que, el transporte de sedimentos en río Rapay es superior a 80 t/día.	Explicativo (Cuantitativo)	Cuenca del río Rapay	Técnica: Observación directa	Muestra: La muestra es la erosión y sedimentación de la sub cuenca Rapay.
¿Cuál es la estimación de la erosión hídrica en la cuenca?	Estimar la erosión hídrica mediante la teledetección y sistema de información geográfica acoplado al	La estimación de la erosión hídrica de la cuenca del río Rapay, mediante el método de RUSLE oscila entre 50-200 t/ha/año y la clasificación tiende a ser severa a muy severa.			Instrumento: - ArcGIS Pro - Muestreador Helley- Smith - SPSS	Ensayos: Ensayo de granulometría, peso específico, porcentaje de humedad y densidad.

---

método de  
RUSLE.

¿Cuál es el modelo de predicción de transporte de sedimentos más preciso en el río Rapay?

Definir el modelo de transporte de sedimentos por métodos físicos y empíricos más precisos en el río Rapay y su influencia en la central hidroeléctrica Cahua.

El modelo de transporte de sedimentos con mejor ajuste son las ecuaciones de Engelund y Hanzen y Schoklistch.

---

*Nota.* Elaboración propia

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

### Parámetros Morfométricos

Se calcularán los parámetros morfométricos de las 6 microcuencas de la cuenca Rapay con el software ArcMap 10.8, los cuales son importantes, puesto que estos resultados se usarán en una posterior aplicación de la metodología RUSLE.

**Tabla 6**

*Parámetros morfométricos de la cuenca*

Parámetros	Ecuación
Área	Km <sup>2</sup>
Perímetro	Km
Pendiente	$\frac{\text{Promedio } \times \text{ocurrencia}}{N \text{ de ocurrencia}}$
Relación de elongación	$Re = \frac{D}{Lc}$
Factor de forma	$Ff = \frac{A}{L^2}$
Densidad de drenaje	$Dd = \frac{L}{A}$
Relación de bifurcación	$R_b = \frac{N_i}{N_{i+1}}$
Longitud media de la corriente	$Lmr = \frac{Lt}{Nu}$

*Nota.* Elaboración propia

Donde D es el diámetro de un círculo con área igual que la cuenca; Lc longitud de la cuenca; A área de la cuenca; Ni número de cauces de orden i; Ni+1 número de cauces de orden i+1; Lt longitud total de cauces; Nu número total de cauces.

## Estimación de la erosión hídrica mediante modelos matemáticos

### *Ecuación universal de pérdida de suelo (RUSLE)*

Con este método se cuantifica la pérdida de suelo de las 6 microcuencas, el cual incluye un factor climático de acuerdo con la precipitación máxima. Además, con esta ecuación se predecirá la cantidad de suelo que se desperdicia por la erosión hídrica. El cual está dado por la siguiente ecuación:

$$A = R K L S C P$$

Donde A la cantidad de suelo erosionado (t/h), R es el factor de lluvia, K es el factor de erodabilidad, L es el factor de longitud de pendiente, S es el factor de gradiente, C es el factor de cobertura vegetal, P es el factor prácticas de conservación.

**Tabla 7**

*Clasificación de niveles de pérdida de suelo*

Nivel	Pérdida de suelo (T/ha/año)	Tipo de erosión
1	< 1	Normal
2	1 – 5.0	Ligera
3	5 – 15	Moderada
4	15 – 50	Severa
5	50 – 200	Muy severa
6	>200	Catastrófica

*Nota.* Tomado de FAO (1980)

Determinación del factor de Erosividad de la precipitación (R). Para hallar el índice de erosividad se utilizó el registro de los datos pluviométricos, proporcionados por la estación meteorológica de la zona de influencia de la cuenca, en la que se puede indicar la estación de Cajatambo, estación Gorgor y la estación Laguna Surasaca con un registro de precipitaciones de 58 años (1964-2022). Luego se realizó el análisis de consistencia de los datos (Negese et., al, 2020). El factor de erosividad de la lluvia está dado por la siguiente ecuación empírica sugerida por Stocking y Elwell (1987).

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{(1.5 \log_{10}(\frac{Pi^2}{P}) - 0.08188)}$$

Donde R la erosividad de la lluvia ( $Mj \text{ mm} / ha^{-1} h^{-1}$ ), Pi la precipitación mensual (mm), P la precipitación anual (mm)

**Tabla 8**

*Clasificación del factor R anual*

<b>Clasificación</b>	<b>Factor R (MJ/ha mm/hr)</b>
Bajo	0 – 50
Moderado	50 – 550
Alto	550 – 1000
Muy alto	>1000

*Nota.* Tomado de Fournier (1960)

Teniendo el resultado del factor de erosividad, se procede a insertar al ArcMap 10.8, en el formato shapefile y con lo que se crea un raster con el método de interpolación spline para la cuenca. Posteriormente, se crea un mapa de isoyetas en ArcMap 10.8 con la finalidad de identificar las zonas dentro de la cuenca que presentan mayor erosividad.

Determinación del factor erosionabilidad del suelo (K). Se determinará el factor K para las 6 microcuencas, el cual, depende de la textura del suelo, y varía de acuerdo a la permeabilidad, la estructura y la materia orgánica. Además, mide la susceptibilidad de las partículas del suelo para desprenderse y ser transportadas por la escorrentía. De acuerdo, a la siguiente tabla, se utilizará la textura de la capa superior del terreno de la cuenca.

**Tabla 9**

*Valores del factor K*

<b>Factor K</b>	
Clases de Textura	K promedio
Arcilla	0,22
Franco arcilloso	0,30
Franco arenoso grueso	0,07
Arena fina	0,08
Franco arenoso fino	0,18
Arcilla pesada	0,17
Arcilla	0,30
Arena fina franca	0,11

Arena arcillosa	0,04
Arena franca muy fina	0,39
Arena	0,02
Franco arcilloso arenoso	0,20
Marga arenosa	0,13
Franco limoso	0,26
Franco arcilloso limoso	0,32
Arena muy fina	0,43
Franco arenoso muy fino	0,35

*Nota.* Agriculture Handbook

Determinación del factor longitud de la pendiente y factor de pendiente (LS). Respecto al factor L que es la longitud del declive y el factor S la pendiente. Se calcularán de manera conjunta puesto que el análisis radica en el terreno de la cuenca.

Se utilizó la herramienta Raster Calculator del software ArcGis, donde se utilizó la fórmula de Jiang y Zheng (2008):

$$LS = 1.07 \times \left(\frac{\lambda}{20}\right)^{0.28} \times \left(\frac{\alpha}{10}\right)^{1.3}$$

Donde:

$\lambda$  = Resolución del pixel del modelo digital de elevación.

$\alpha$  = Pendiente en grados

Determinación de la cobertura del suelo (C). Se determinará el factor C que varía de acuerdo a la cobertura vegetal, de 0 a 1, donde los valores más altos representan una mayor degradación del suelo debido al impacto de la lluvia y la escorrentía superficial (Beskow et al., 2009).

**Tabla 10***Valores de la cobertura vegetal factor C*

<b>Tipo de Cobertura Vegetal</b>	<b>Factor C</b>
Agricultura costera y andina	0,05
Área altoandina con escasa y sin vegetación	1
Bofedal	0,025
Bosque relicto altoandino	0,01
Glaciar	0
Lagunas, lagos y cochas	0
Matorral arbustivo	0,05
Pajonal andino	0,05
Plantación Forestal	0,2
Cardonal	1
Desierto costero	1
Bosque relicto mesoandino	0,01
Lagunas, lagos y cochas	0

*Nota.* Elaboración propia

Determinación del factor práctico de apoyo a la conservación (P). El factor P cuantificará las estrategias de conservación del suelo en la cuenca. Estas prácticas de conservación reducen el valor de P ya que limitan la velocidad y volumen de la escorrentía y promueve la deposición de sedimentos en la superficie. (Allafta & Opp, 2022) En el presente estudio se utilizó la siguiente fórmula:

$$P = 0,2 + 0,03 S$$

Donde S es grado de la pendiente (%)

### **Medición para el Aforo del Caudal Líquido del Río**

El caudal líquido del río Rapay se estimó a partir del método de las velocidades por dovelas en la sección y profundidades según Chow et al. (1994). Por tanto, el caudal para una sección transversal se definió por la siguiente ecuación:

$$Q = \iint V \times dA$$

$$Q = \sum_{i=1}^N V_i \times d_i \times \Delta w_i$$

Donde Q caudal líquido del río,  $V_i$  la velocidad media del flujo en la dovela  $i$   $\Delta W_i$  el ancho de la dovela  $i$ .

El registro de medidas de la velocidad por dovelas de la sección transversal del río Rapay, fueron tomadas por el correntómetro Global Water Modelo FP111, longitud de 1.1 a 1.8 metro, rango 0.3 a 19.9 FPS y precisión 0.1 FPS. Se eligieron dos secciones del río a una distancia de separación de 50 metros aguas abajo. Donde se colocó una soga en cada extremo de la orilla del río y con el correntómetro se tomaron el registro de las velocidades, en un tirante de 20% y 80% de altura. Las medidas en cada sección tuvieron una separación de 2 metros para la toma de datos.

**Figura 18**  
*Correntómetro FP111.*



*Nota.* Elaboración propia

## **Estimación de los Sedimentos**

### ***Método Físico por el Captador Helley - Smith***

La estimación total del transporte de sedimentos del cauce del río Rapay se define a partir del caudal sólido total que se represente mediante la siguiente ecuación.

$$Q_{st} = q_{sf} + q_{ss}$$

Donde  $Q_{st}$  el caudal sólido total (kg/s),  $q_{sf}$  el caudal sólido de fondo (kg/s),  $q_{ss}$  el caudal sólido en suspensión (kg/s)

La obtención del caudal sólido de fondo específico de forma física ( $q_{sff}$ ) para cada dovela de la sección transversal del cauce del río fue mediante la siguiente ecuación.

$$Q_{sff} = \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{(w)(t)}$$

Donde  $Q_{sff}$  es el caudal sólido de fondo físico (kg/ ms),  $M$  peso del sólido seco en la dovela (kg),  $t$  el tiempo de toma de muestra (s),  $i= 1 \dots n$  el número de dovela.

Para definir la ubicación de captador Helley - Smith, se realizó la visita de campo, donde se escogió el tramo medio de la cuenca Rapay y la toma de muestras del segundo tramo fue a 50 metros aguas abajo.

Para la obtención de las muestras de sedimentos se detalla a continuación:

Inspeccionaron las condiciones del río, donde observaron las velocidades que presentaba el flujo, los niveles del río, para la prevención de la toma de medidas. Fue de importancia, ya que cuando el río presenta niveles o caudales altos, podría arrastrar plantas, troncos, entre otros materiales, que pudo poner en peligro al equipo de medición y a la integridad de las personas.

El número de muestras que tomaron es de acuerdo con el ancho o sección del río, el cual analizaron cada 2 metros.

El tiempo que obtuvieron cada muestra es de 1 hora de captación.

La toma de las muestras constó con el uso del muestreador Helley - Smith, que manipularon mediante una cuerda. El equipo fue sumergido en el fondo de cada sección de aforo. A partir del momento que el equipo fue colocado en el río, se inició la toma de la muestra. Luego, al cumplirse el intervalo de una hora de tiempo, se procedió a elevar el muestreador Helley – Smith con cuidado, para que no pierdan ninguna porción de muestra. Finalmente, procedieron a verter la muestra hacia una bolsa, etiquetando el número y detalles de la sección de aforo y lavar el equipo para ser utilizado nuevamente.

### ***Métodos empíricos***

A continuación, se muestran los modelos empíricos utilizados en el análisis del transporte de sedimentos:

Fórmulas de Meyer – Peter y Müller. Según Meyer-Peter & Müller (1948) realizaron cuatro fórmulas, pero la última abarca todos los resultados que obtuvieron en cuatro pruebas:

Primera fórmula: Se utiliza cuando el material es uniforme con diámetro de 5.05 y 28.6 mm y el peso específico de 2680  $kg f / m^3$

$$g_B = [250 q_b^{2/3} S - 42.5 D]^{3/2}$$

Segunda fórmula: Se utiliza cuando el material es uniforme con diámetro de 5.05 mm y el peso específico es variable.

$$g_B = \frac{3.185 \gamma_s}{\Delta^{3/2}} (q_b^{2/3} S - 0.0957 \Delta^{10/9} D)^{3/2}$$

Tercera fórmula: Se utiliza cuando el material natural con peso específico es de 2680  $kg f / m^3$

$$g_B = 1.26 D_m^{3/2} \left[ \left( \frac{n'}{n} \right)^{3/2} \frac{\gamma d S}{D_m} - 79 \right]^{3/2}$$

Cuarta fórmula: Se utiliza cuando el material tiene diferentes diámetros para pesos específicos variables.

$$g_B = 8 \gamma_s (g \Delta D_m^3)^{1/2} \left[ \left( \frac{n'}{n} \right)^{3/2} \tau_* - 0.047 \right]^{3/2}$$

Donde  $g_B$  es el transporte de carga de fondo ( $kg f / s m$ ),  $q_b$  el gasto específico unitario ( $m^3 / s m$ ),  $D = D_m$  el diámetro de partícula o diámetro medio (m),  $S$  la pendiente hidráulica,  $\gamma_s$

el peso específico del sedimento ( $kg f/m^3$ ),  $\gamma$  el peso específico del fluido ( $kgf/m^3$ ),  $\Delta$  la densidad relativa de las partículas en el agua. (Adimensional),  $n'$  el coeficiente de rugosidad debida a las partículas en un fondo plano,  $n$  el coeficiente de rugosidad de Manning (Adimensional),  $d$  el tirante (m),  $\tau_*$  el número o parámetro adimensional de Shields,  $g$  la aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

Fórmula de Shields. Shields (1936) propuso la siguiente expresión para determinar el esfuerzo tangencial  $\tau_c$ .

$$\frac{g_B(\gamma_s - \gamma)}{g_w \gamma S} = \frac{10(\tau_o - \tau_c)}{D_{50}(\gamma_s - \gamma)}$$

Donde  $g_B$  el arrastre unitario en la capa de fondo ( $kg f / s m$ ),  $g_w = \gamma q$  el gasto líquido unitario ( $kg f / s m$ ),  $q$  el gasto líquido unitario ( $m^3 / s m$ ),  $\tau_c$  el esfuerzo tangencial crítico,  $\gamma_s$  el peso específico de las partículas,  $\gamma$  el peso específico del agua.

Finalmente, sustituyendo  $\gamma dS$  por  $\tau_o$  se tiene la siguiente ecuación:

$$g_B = \frac{10 U \gamma}{D_{50}(\gamma_s - \gamma)^2} \tau_o(\tau_o - \tau_c)$$

Donde  $U$  la velocidad media,  $D_{50}$  el diámetro de las partículas en que el 50% de la muestra es menor que ese tamaño (m).

El rango de los datos y el límite de aplicación es la siguiente:

$$1060 \leq \gamma_s \leq 4250 \text{ kg f / m}^3$$

$$0.156 \leq D_{50} \leq 0.00247 \text{ m}$$

Método de Kalinske. Según Kalinske (1947), la fracción unitaria ocupada por las partículas es:

$$p = \frac{N_{\alpha_i} D^2}{A_u} = N_{\alpha_i} D^2$$

Donde  $A_u$  el área unitaria de la superficie de fondo,  $N_{\alpha_i} D^2$  el área total ocupada por las partículas.

Además, el número total de partículas en el área unitaria está dado por:

$$N = \frac{p}{\alpha_i D^2}$$

La velocidad instantánea de una partícula es:

$$u_B = \beta(u - u_c)$$

Donde  $\beta$  es el constante cercano a 1,  $u$  la velocidad instantánea del agua,  $u_c$  la velocidad instantánea del agua que inicia el movimiento de la partícula.

Finalmente, el autor expresa el arrastre en la capa de fondo que está dado por:

$$g_B = \gamma_s U_* D_{50} f \left( \frac{\tau_c}{\tau_0} \right) = \gamma_s U_* D_{50} f \left( \frac{0,116}{\tau_*} \right)$$

Donde  $g_B$  es el transporte unitario de sedimentos en peso seco ( $kg / s m$ ),  $\gamma_s$  el gasto específico unitario ( $kg / m^3$ ),  $D_{50}$  el diámetro de las partículas (m),  $\tau_0$  el esfuerzo cortante donde el flujo ejerce sobre el fondo ( $kg / m^2$ ),  $\tau_c$  el esfuerzo constante máximo que resiste una partícula en el fondo antes de ser movida ( $kg / m^2$ ),  $\tau_*$  el parámetro adimensional de Shields.

Fórmulas de Einstein y Einstein – Brown. Einstein (1942) propuso una fórmula para evaluar el arrastre en la capa del fondo.

Cumple si  $0.045 \leq \tau_* \leq 0.19$  o  $22 \geq \Psi \geq 5.263$

$$g_B = 2.151 F_1 \gamma_s \sqrt{g \Delta D_{50}^3} e^{-0.391/\tau_*}$$

En 1950 Rouse completó la fórmula, el cual fue publicado por Brown.

Cumple si  $1.0 \geq \tau_* \geq 0.19$  o  $1.0 \leq \Psi \leq 5.263$

$$g_B = 40 F_1 \gamma_s \left(\frac{RS}{\Delta D_{50}}\right)^3 \sqrt{g \Delta D_{50}^3}$$

Donde  $g_B$  el transporte unitario de sedimentos en peso seco (kg / s m),  $\Delta$  la densidad relativa de las partículas,  $D_{50}$  el diámetro de las partículas (m),  $\gamma_s$  el peso específico del sedimento seco ( $kg f/m^3$ ),  $\tau_*$  el número o parámetro adimensional de Shields,  $g$  la aceleración debida a la gravedad ( $m/s^2$ ),  $S$  la pendiente hidráulica,  $R$  el radio hidráulico (m).

Las dos ecuaciones se aplican cuando los diámetros de las partículas están entre 0.0003 m a 0.03 m y con los pesos específicos de 1250 a 4200 ( $kg f/m^3$ ).

Método de Yalin. Yalin (1963) presentó su ecuación para el arrastre de la capa de fondo para un flujo permanente. El cual, se aplica para materiales con desviación estándar geométrica mayor a 3.

$$g_B = 0.635 S_\gamma D U_* (\gamma_s - \gamma) \left[ 1 - \frac{1}{\alpha_y S_\gamma} \ln(1 + \alpha_y S_\gamma) \right]$$

Donde  $g_B$  el transporte unitario de sedimentos (kg / s m),  $\alpha_y S_\gamma$  los constantes adimensionales,  $\gamma_s$  el peso específico del sedimento seco ( $kg /m^3$ ),  $\gamma$  el peso específico del agua ( $kg /m^3$ ),  $U_*$  la velocidad al corte del flujo (m/s),  $D_m$  el diámetro medio de las partículas (m).

Ecuación de Frijkink. Frijkink (1962) obtuvo la siguiente ecuación. El cual, solo aplica si  $1/\mu\tau_* \leq 18$ .

$$g_B = 5 \gamma_s D_{50} (\mu g R S)^{1/2} e^{-0.27 / \mu \tau_*}$$

Donde  $g_B$  el transporte unitario de sedimentos en peso seco (kg / s m),  $\gamma_s$  el peso específico del sedimento seco ( $kg / m^3$ ),  $D_{50}$  el diámetro de las partículas (m),  $\mu$  el parámetro adimensional denominado factor de rizos,  $g$  la aceleración debida a la gravedad ( $m/s^2$ ),  $S$  la pendiente del fondo del canal,  $R$  el radio hidráulico (m),  $\tau_*$  el número o parámetro adimensional de Shields.

Método de Pernecker y Vollmers. Pernecker y Vollmers (1965) obtuvieron la siguiente fórmula. El cual, se aplica en el transporte en la capa de fondo cuando se cumple que  $\tau_* \leq 0.50$ . Por otro lado, se obtiene el transporte total de fondo cuando se cumple que  $\tau_* > 0.50$  Además, si  $\tau_* \leq 0.04$ , no existe el transporte de sedimentos.

$$g_B = 25 \gamma_s (g \Delta D^3)^{1/2} \tau_*^{3/2} (\tau_* - 0.04)$$

Donde  $g_B$  es el transporte unitario de sedimentos peso seco (kg / s m),  $\gamma_s$  el peso específico del sedimento seco ( $kg / m^3$ ),  $g$  la aceleración debida a la gravedad ( $m/s^2$ ),  $D_m$  el diámetro medio de las partículas (m),  $\Delta$  la densidad relativa de las partículas,  $\tau_*$  el número o parámetro adimensional de Shields.

Método de Garde y Pande (1985) El método muestra la relación del caudal sólido en suspensión y el caudal líquido específico.

$$T_{ss} = 0.000051 \left( \frac{V_*}{\omega} \right)^4$$

$$V_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} = \sqrt{gRS}$$

Dónde  $T_{ss}$  es el transporte sólido en Suspensión por unidad de ancho en kg/seg/m,  $V_*$  es la velocidad de corte,  $\omega$  la velocidad de sedimentación.

Método de Samaga. Garde & Ranga (1985), el método muestra la relación del transporte y los parámetros de flujo.

$$30\tau_*^3 = \frac{T_{SS}}{\gamma_s} \left(\frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma}\right)^{1/2} \left(\frac{1}{g D_{50}^3}\right)^{1/2}$$

$$\tau_* = \frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma)D} = \frac{\gamma V_*^2}{(\gamma_s - \gamma)gD}$$

Dónde  $T_{SS}$  es el transporte sólido en suspensión en kg/seg/m,  $\Phi$  el parámetro de transporte y  $\tau_*$  adimensional de la fuerza tractiva.

Método de Benedict y Vanuni.

Miranda (1999), señala que la ecuación utiliza la concentración de sedimentos tomadas en un punto de la superficie en valores ppm.

$$T_{SS} = 0,0027 Q C_S$$

Dónde  $T_{SS}$  es el transporte sólido en suspensión en t/día,  $Q$  descarga de agua pie<sup>3</sup>/s y  $C_S$  la concentración de carga en suspensión en ppm.

A continuación, se muestran las ecuaciones del transporte total de fondo:

Método de Ackers White.

Ackers White (1973) presentó la ecuación de transporte total que se relaciona con el factor de fricción de fondo y el esfuerzo de corte.

$$T_{ST} = \frac{\varphi \gamma_s}{\left(\frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma}\right)^{1/2} \left(\frac{1}{g D_{50}^3}\right)^{1/2}}$$

Donde  $T_{ST}$  es el transporte sólido total por unidad de ancho (kg / s / m),  $\gamma_s$  el peso específico del sedimento seco (kg / m<sup>3</sup>),  $D_{50}$  el diámetro medio de las partículas (m),  $\varphi$  el parámetro de transporte, g la gravedad.

Método de Garde y Datiri.

Garde y Datiri consideraron que el aporte de sedimentos está en equilibrio con la erosión del cauce y que depende de la fuerza tractiva que se encuentra en el cauce.

$$T_{ST} = 16\tau_*^4 V_* D \gamma_s$$

Donde  $T_{ST}$  es el transporte sólido total por unidad de ancho (kg / s / m),  $\tau_*$  el parámetro de flujo,  $\gamma_s$  el peso específico del sedimento seco (kg / m<sup>3</sup>) y D el diámetro en 50 (mm).

Método de Engelund y Hansen.

Engelund y Hansen (1997) presentaron la ecuación del transporte total de fondo basados en cuatro experimentos donde utilizaron arenas.

$$T_{ST} = 0,05\gamma_s U^2 \tau_*^{3/2} \left(\frac{D_{50}}{g\Delta}\right)^{1/2}$$

Donde  $T_{ST}$  es el transporte sólido total por unidad de ancho (kg / s / m), U la velocidad media del flujo en m/s, d la tirante de la corriente (m),  $\Delta$  la densidad relativa de las partículas,  $\tau_*$  parámetro adimensional de Shields.

### ***Proceso de las Muestras en el Laboratorio***

El análisis de las muestras de sedimentos se desarrolló en el laboratorio del Proyecto Especial Alto Mayo, ubicado en el distrito de Nueva Cajamarca, región Rioja, departamento de San Martín. Donde realizaron tres ensayos, mencionados a continuación:

Ensayo de contenido de humedad de un suelo:

Utilizaron el procedimiento de secar las muestras a temperatura ambiente, luego los trasladaron las muestras a un recipiente y colocaron al horno con una temperatura de  $110\text{ }^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , después pesaron las muestras en kilogramos.

La pérdida de la masa debido al secado lo consideraron que es la masa del agua. Por otro lado, calcularon el contenido del agua utilizando la masa del agua y la masa de la muestra seca.

Ensayo de análisis granulométrico de suelos por tamizado.

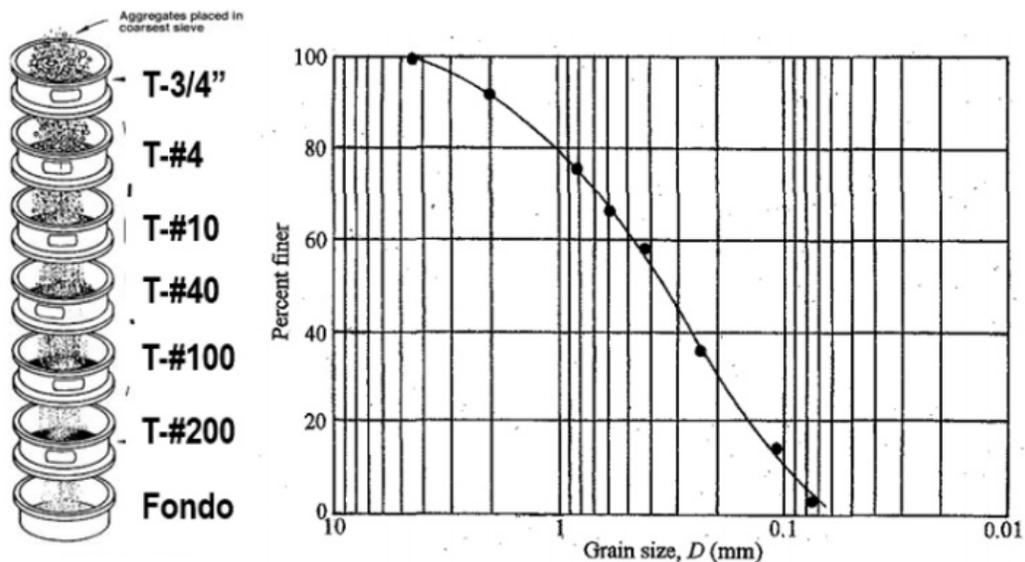
Agitaron una muestra de suelo en un conjunto de tamices con aberturas de diferentes tamaños. En el cual determinaron la masa de la muestra retenida en cada tamiz. Luego se comparó la masa retenida en cada tamiz con la cantidad total del tamaño de la muestra. Estos se pueden obtener en porcentajes.

El ensayo se representó gráficamente, en la curva de distribución de los tamaños de partículas.

## Figura

19

*Tamices y curva de distribución de tamaños de las partículas*



*Nota.* Das, B. (2002), Head, K. (1980), Mitchaell, J. & Soga, K. (2005)

Ensayo de peso volumétrico o densidad de suelos cohesivos

Pesó la muestra en la balanza. En ese momento calentó la parafina en un recipiente, hasta que se vuelva líquido.

Luego cubrió la muestra con la parafina. El cual realizó tres veces para evitar que ingrese y salga agua de la muestra.

Procedió a pesar la muestra cubierta de parafina.

Llenó en un balde para cubrir la canastilla que sumergió sujeta a una balanza. También registró el peso sumergido obtenido.

El procedimiento se realizó con las 17 muestras.

Finalmente, secaron las muestras a temperatura ambiente, luego trasladaron las muestras a un recipiente, lo colocaron al horno con una temperatura de 120°C y después pesaron las muestras en kilogramos.

## RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Resultados

#### *Parámetros Morfométricos de la Cuenca*

La cuenca Rapay fue dividida en seis microcuencas. Para así identificar las áreas más propensas a sufrir erosión hídrica.

#### MC1

La microcuenca número 1 (MC1) tiene un área de 198,92 km<sup>2</sup>, con un perímetro de 63,14 km, pendiente de 18,99% con un terreno fuertemente accidentado, densidad de drenaje 0,33, relación de bifurcación 1,60, longitud del río principal 17,86 km, relación de elongación 0,64 que indica que la microcuenca tiene amplia variedad de climas y geologías, factor de forma 0,33 que demuestra que la cuenca no está propensa a sufrir inundaciones puesto que su forma es ligeramente achatada.

#### MC2

La microcuenca número 2 (MC2) presenta un área de 201,98 km<sup>2</sup>, con un perímetro de 77,37 km, pendiente de 8,99% con un tipo de terreno medio accidentado, densidad de drenaje 0,383, relación de bifurcación 2,08, longitud del río principal 30,27 km, relación de elongación 0,43, factor de forma 0,15 que demuestra que la cuenca no está propensa a sufrir inundaciones puesto que su forma es muy poco achatada.

#### MC3

La microcuenca número 3 (MC3) tiene un área de 131,95 km<sup>2</sup>, con un perímetro de 62,97 km, pendiente de 15,21 % con un tipo de terreno accidentado, densidad de drenaje 0,337, relación de bifurcación 1,40, longitud del río principal 21,05 km, relación de elongación 0,50, factor de

forma 0,20 que demuestra que la microcuenca no está propensa a sufrir inundaciones puesto que su forma es ligeramente achatada.

#### MC4

La microcuenca número 4 (MC4) presenta un área de 67,35 km<sup>2</sup>, con un perímetro de 32,95 km, pendiente de 31,81 % con un tipo de terreno entre fuertemente accidentado y escarpado, densidad de drenaje 0.376, relación de bifurcación 1,88, longitud del río principal 9,61 km, relación de elongación 0,58, factor de forma 0,27 que demuestra que la microcuenca no está propensa a sufrir inundaciones puesto que su forma es ligeramente achatada.

#### MC5

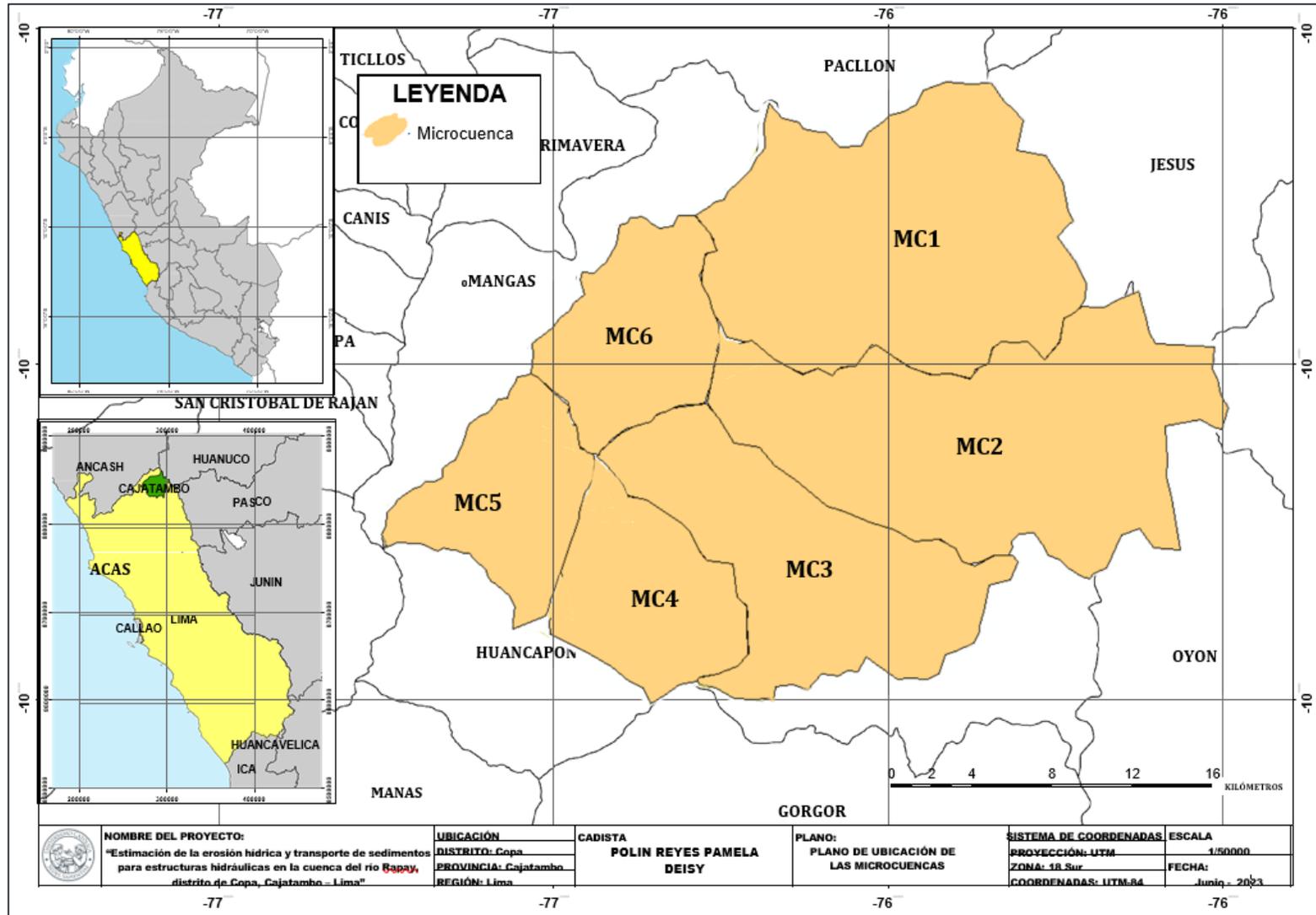
La microcuenca número 5 (MC5) tiene un área de 64,01 km<sup>2</sup>, con un perímetro de 47,68 km, pendiente de 21,86 % con un tipo de terreno fuertemente accidentado, densidad de drenaje 1,26, relación de bifurcación 2,94, longitud del río principal 12,74 km, relación de elongación 0,47, factor de forma 0,17 que demuestra que la cuenca no está propensa a sufrir inundaciones puesto que su forma es muy poca achatada.

#### MC6

La microcuenca número 6 (MC6) presenta un área de 68,21 km<sup>2</sup>, con un perímetro de 37,50 km, pendiente de 23,75 % con un tipo de terreno fuertemente accidentado, densidad de drenaje 1,65, relación de bifurcación 2,83, longitud del río principal 13,27 km, relación de elongación 0,57, factor de forma 0,26 que demuestra que la cuenca no está propensa a sufrir inundaciones puesto que su forma es ligeramente achatada.

Figura 20

Mapa de las microcuencas



Nota. Elaboración propia

**Tabla 11***Resumen de los parámetros morfométricos de las microcuencas*

N°	Parámetros	Microcuencas					
		MC1	MC2	MC3	MC4	MC5	MC6
1	A	199,57	201,98	131,95	67,38	68,57	68,43
2	P	63,1	77,4	63,0	32,9	47,7	37,5
3	Hz	4873,7	4550,2	3952,8	3625,5	3053,1	3702,3
4	L	24,7	37,0	25,8	15,9	19,1	16,3
5	Lp	17,9	30,3	21,1	9,6	12,7	13,3
6	HM	6264,2	5493,1	5173,9	4861,2	4174,6	5111,1
7	Hm	2906,4	2878,1	1989,2	1863,1	1400,0	1960,0
8	Ho	6299,7	5594,5	5180,0	4900,0	4174,6	5111,1
9	Hc	2908,2	2872,1	1978,1	1841,2	1390,4	1960,0
10	Lt	66,2	77,5	44,5	25,4	80,8	112,2
11	w	8,1	5,5	5,1	4,2	3,3	4,2
12	H	4603,9	4233,3	3579,1	3370,6	2782,5	3535,5
13	Af	3044,1	2982,5	2110,2	1963,0	1506,4	2091,2
14	Fm	4662,7	4634,6	3969,1	3656,5	2634,3	3531,8
15	F	0,3	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3
16	Re	0,6	0,4	0,5	0,6	0,5	0,6
17	Rc	0,6	0,4	0,4	0,8	0,4	0,6
18	K	1,3	1,5	1,5	1,1	1,7	1,3
19	Sc	25,8	24,1	26,0	43,6	19,0	25,1
20	S	19,0	9,0	15,2	31,8	21,9	23,7
21	u	u3	u3	u2	u3	u4	u5
22	Dd	0,3	0,4	0,3	0,4	1,3	1,6
23	C	3,0	2,6	3,0	2,7	0,8	0,6
24	Dc	0,2	0,3	0,2	0,3	0,9	1,1
25	IH	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7
26	Nc	27,0	29,0	12,0	13,0	118,0	196,0

27	Lmr	2,5	2,7	3,7	2,0	0,7	0,6
28	Pmc	1,8	1,6	2,0	3,9	1,7	2,2
29	Rb	1,6	2,1	1,4	1,9	2,9	2,8
30	Rbm	4,1	3,6	3,1	3,7	1,8	0,4
31	Ff	0,1	0,1	0,1	0,2	1,8	2,9
32	Td	0,4	0,4	0,2	0,4	2,5	5,2
33	Lf	2,5	2,7	3,7	2,0	0,7	0,6
34	Cm	3,0	2,6	3,0	2,7	0,8	0,6
35	Cma	23,1	21,0	27,1	50,0	43,5	51,8
36	Co	106,6	88,7	97,1	168,7	121,0	183,2

*Nota.* Elaboración Propia

Donde A el área de una cuenca; P el perímetro de la cuenca; Hz la altitud media; L la longitud de la cuenca; Lp la longitud del río principal; HM la cota mayor de la cuenca; Hm la cota mínima de la cuenca; Ho la cota de origen de cauce; Hc la cota de cierre de cauce; Lt la longitud total de cauces; w el ancho de cuenca; H la altitud media de la Cuenca; Af la altitud más frecuente; Fm la altitud de Frecuencia media; F el factor de forma de una Cuenca; Re la relación de elongación; Rc la relación de circularidad; K el índice de Compacidad; Sc la pendiente media de la Cuenca; S la pendiente del río principal; u el orden de las corrientes; Dd la densidad de drenaje; C los constantes de estabilidad del río; Dc la densidad de corriente; IH la integral Hipsométrica; Nc el número total de cauces; Lmr la longitud media de la corriente; Pmc la pendiente media de la red; Rb la relación de bifurcación; Rbm la relación de bifurcación media; Ff la frecuencia de flujo; Td la textura de drenaje; Lf la longitud media de flujo; Cm el constante de mantenimiento; Cma el coeficiente de masividad; Co el coeficiente orográfico.

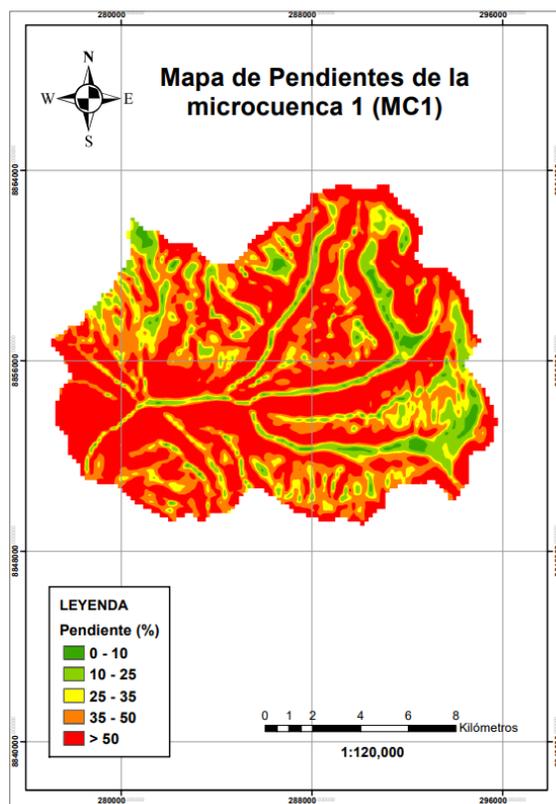
## *Cuantificación de la Erosión Hídrica Mediante la Metodología RUSLE*

### **Mapa de Pendientes**

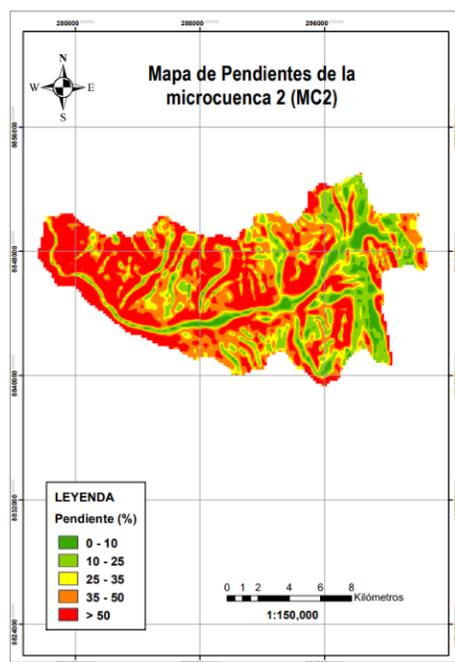
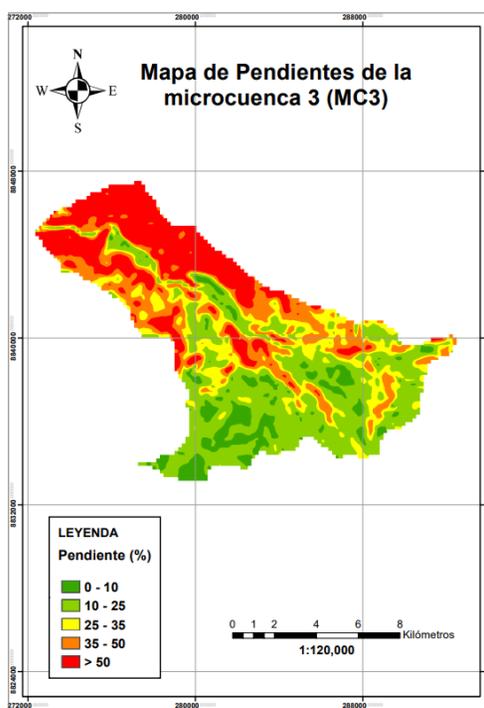
La erosión hídrica está ligada con la pendiente, por ello se halla un mapa de pendientes para identificar las áreas con mayor porcentaje en pendiente. A continuación, se muestran los mapas de pendiente de cada microcuenca.

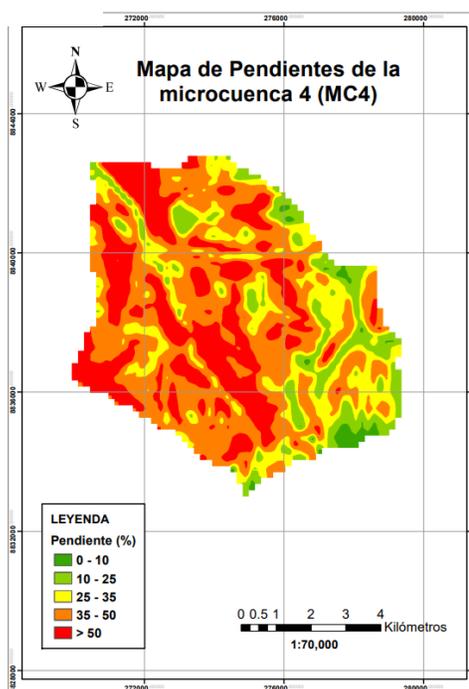
### **Figura 21**

#### *Mapa de Pendientes MC1*

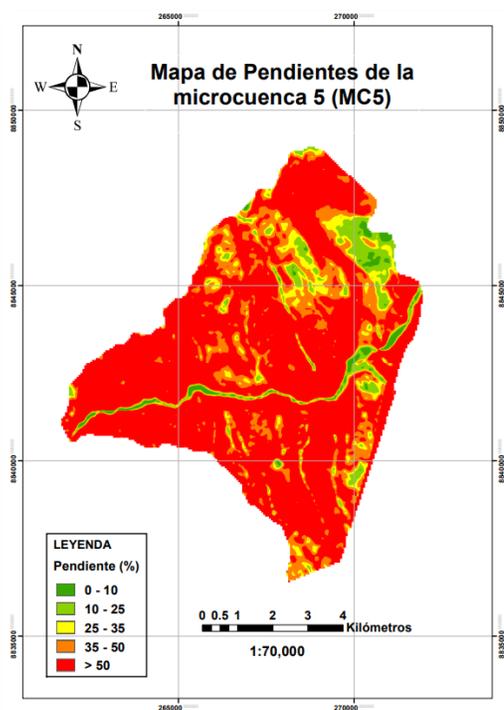


*Nota.* Elaboración propia

**Figura 22***Mapa de Pendientes MC2**Nota. Elaboración propia***Figura 23***Mapa de Pendientes MC4**Nota. Elaboración propia*

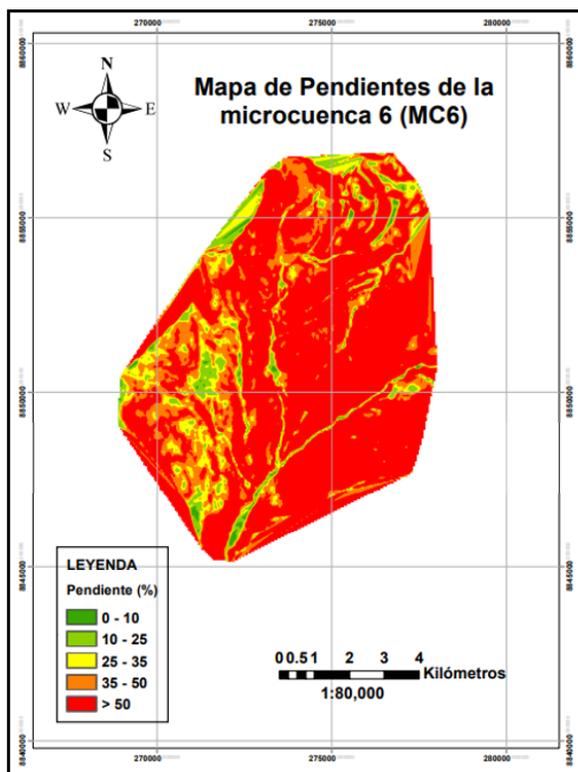
**Figura 24***Mapa de Pendientes MC3*

*Nota.* Elaboración propia

**Figura 25***Mapa de Pendientes MC5*

*Nota.* Elaboración propia

**Figura 26**  
*Mapa de Pendientes MC6*

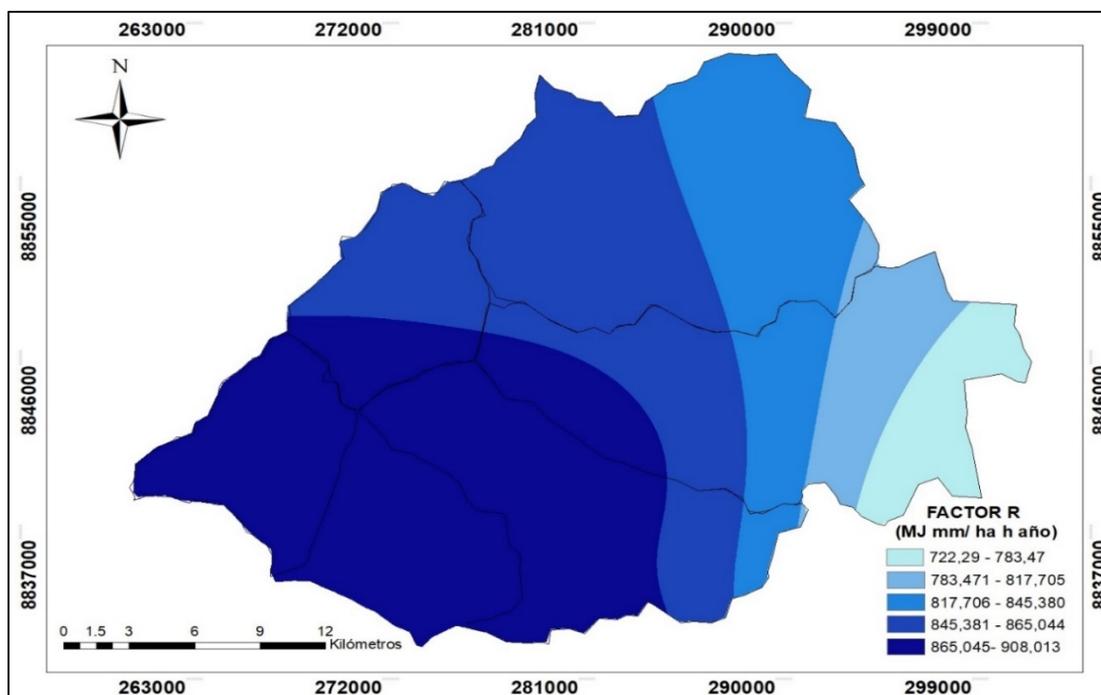


*Nota.* Elaboración propia

### Mapa del Factor de Erosividad (R)

Se realizó un análisis del registro de precipitaciones adquiridas de SENAMHI, con un registro de 59 años de la estación Cajatambo con el que cuenta el área de estudio. Pero, con la existencia de datos faltantes en algunos años, se tomó el registro de las estaciones Laguna Surasaca y Gorgor, que poseen las mismas características de la cuenca. Para completar los años sin registro de precipitación se utilizó el método de las distancias.

El mapa de la distribución espacial de factor R se presenta mediante la figura 35. Se visualiza una distribución variable y en concordancias con las altitudes, en la zona de menor altitud presentó menor factor R con valores próximos a 830 MJ mm / (ha h año). Mientras que, en las zonas más elevadas el factor R fue superior a los 880 MJ mm / (ha h año).

**Figura 27***Mapa Factor R*

*Nota.* Elaboración propia

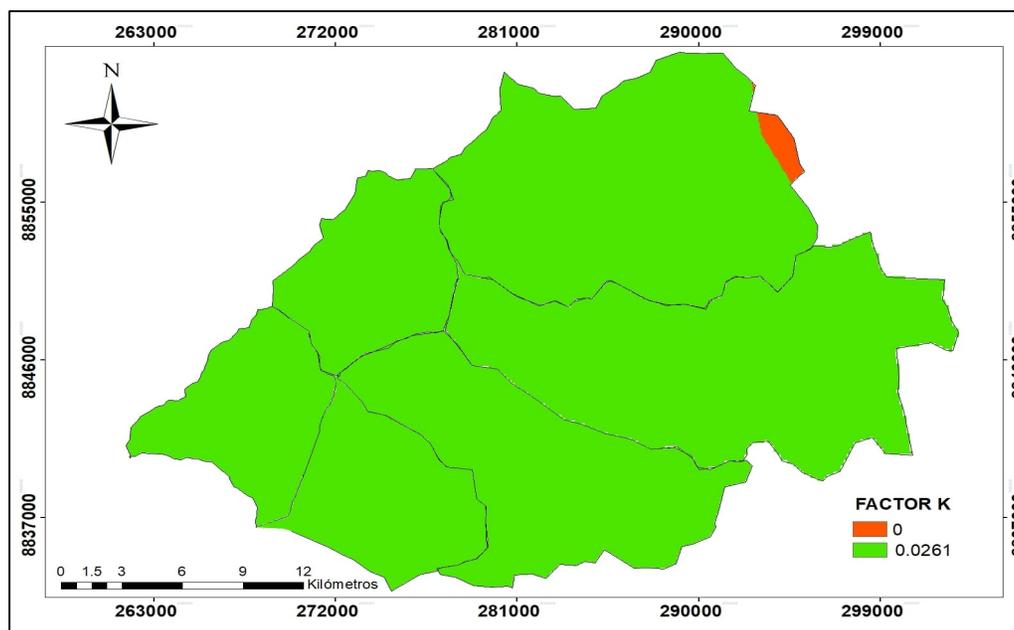
En la tabla 12 se muestran los resultados del factor de erosividad por microcuenca. El cual indica que la cuenca presenta una alta agresividad de las lluvias, siendo 854.58 MJ mm / (ha h año). Esto indica que, en la cuenca Rapay existen altas precipitaciones e intensidad de lluvias, por lo cual tiene un alto riesgo de sufrir erosión.

**Tabla 12***Factor de erosividad (R)*

<b>Microcuencas</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>	<b>Factor R</b>	<b>Factor R Ponderado (MJ mm) / (ha h año)</b>
MC1	199,57	27,05	843,378	
MC2	201,98	27,37	825,352	
MC3	131,95	17,88	877,346	
MC4	67,38	9,13	886,529	854,58
MC5	68,57	9,29	886,529	
MC6	68,43	9,27	866,180	
Total	737,88	100,00		

*Nota.* Elaboración Propia**Mapa del Factor de Erodabilidad (K)**

El factor K está relacionado al tipo de suelo y las características que posee el área de estudio. El mapa del factor K en su distribución espacial se mostró en la figura 28. El mismo, generó una distribución espacial prácticamente de igual magnitud para las seis microcuencas que contiene la cuenca Rapay. Por tanto, la leyenda de colores posee solo dos rangos, la menor área de color anaranjado reflejó la clasificación de los glaciares existentes en la cuenca. Y el área de mayor magnitud reflejó las condiciones normales en la vertiente del Pacífico en Perú, con presencia de pajonal andino, matorral arbustivo, área altoandina con escasa y sin vegetación.

**Figura 28***Mapa Factor K*

*Nota.* Elaboración Propia

A continuación, se presenta la tabla 13 el cual indica los resultados finales del factor K por cada microcuenca y el resultado final por ponderado de la cuenca Rapay fue de 0,026 T – ha (h/Mj ha cm).

**Tabla 13***Factor de erodabilidad (K)*

<b>Microcuencas</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>	<b>Factor K (T – ha (h/Mj ha cm)</b>	<b>Factor K Ponderado</b>
MC1	199,57	27,05	0,026	
MC2	201,98	27,37	0,026	0,026
MC3	131,95	17,88	0,026	

MC4	67,38	9,13	0,026
MC5	68,57	9,29	0,026
MC6	68,43	9,27	0,026
Total	737,88	100,00	

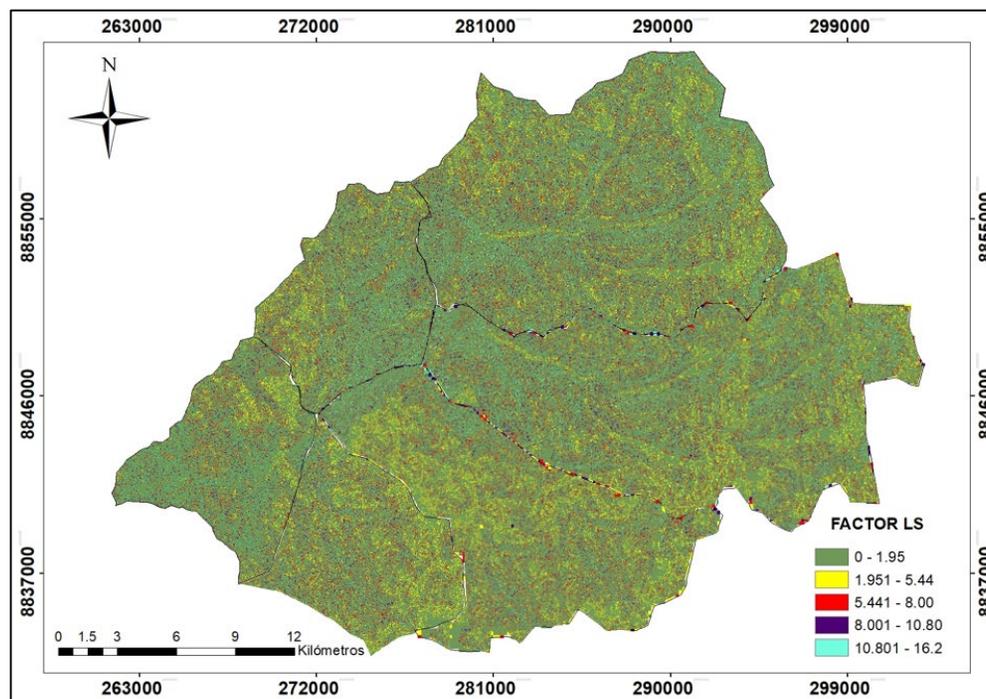
*Nota.* Elaboración Propia

### Mapa del factor Topográfico (LS)

El factor LS indica la longitud de la pendiente (L) y su pendiente (S) respectivamente. En la figura 29 se muestra la distribución espacial del factor LS, se observa que la microcuenca MC2 abarca la mayor magnitud del factor LS en comparación con la MC4 refleja el menor factor LS. En condiciones más precisas se determinó el factor LS por microcuencas.

### Figura 29

*Mapa Factor LS*



*Nota.* Elaboración Propia

En la siguiente Tabla 13 se muestra los resultados por cada microcuenca y el factor LS ponderado final de la cuenca Rapay, siendo este 2,18.

**Tabla 14**

*Factor Topográfico (LS)*

<b>Microcuencas</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área %</b>	<b>Factor LS por MC</b>	<b>Factor LS Ponderado</b>
MC1	199,57	27,05	1,73	
MC2	201,98	27,37	3,08	
MC3	131,95	17,88	2,22	
MC4	67,38	9,13	1,68	2,18
MC5	68,57	9,29	1,71	
MC6	68,43	9,27	1,76	
Total	737,88	100,00		

*Nota.* Elaboración Propia

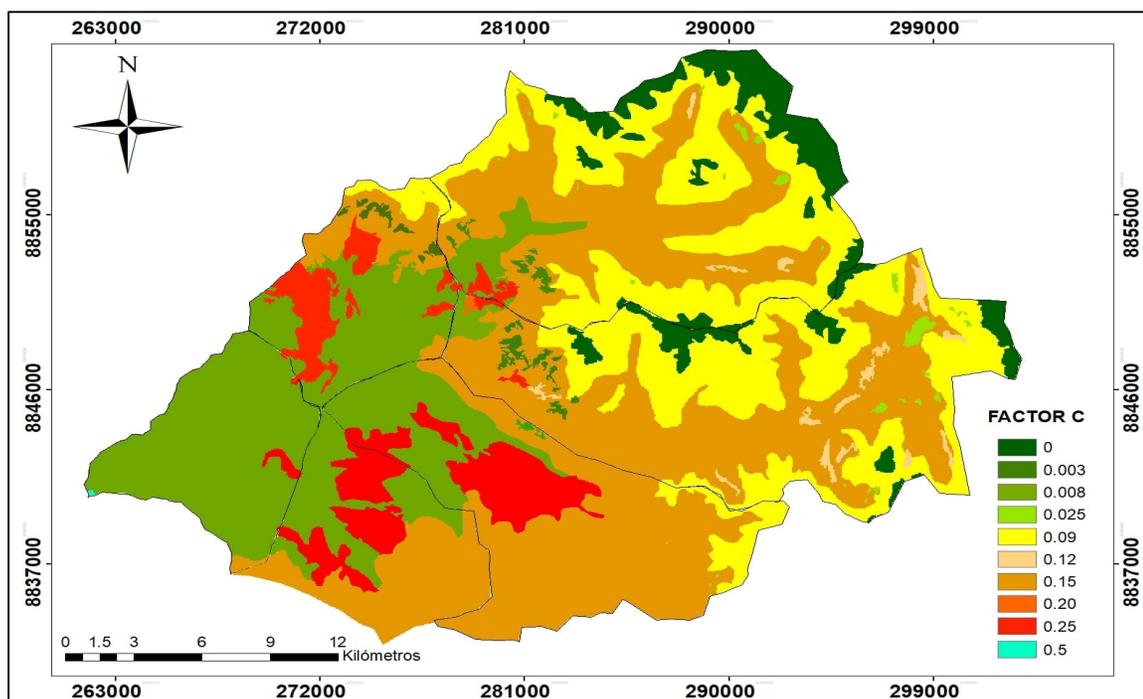
### **Determinación del Factor de Cobertura (C)**

El factor C fue un factor determinante para determinar la erosión hídrica porque es un indicador que refleja el uso de la cobertura del suelo y por consiguiente la mayor y menor magnitud de pérdida de suelo. En la figura 30 se reflejó la visualización espacial del factor C. Se aprecia que

el área con mayor índice de cobertura vegetal es ocupada por el pajonal andino en todas las microcuencas analizadas.

**Figura 30**

*Mapa Factor C*



*Nota.* Elaboración Propia

La cuenca Rapay tiene 13 tipos de cobertura vegetal en donde se asignaron los valores de acuerdo al tipo de cobertura C. En la tabla 15 se observa que la cuenca presenta mayor área predominante de 296,632 m<sup>2</sup> de pajonal andino con un factor C de 0,05, un área de 171,043 km<sup>2</sup> de altoandina con escasa y sin vegetación con un factor C de 1, un área de 159,269 km<sup>2</sup> de matorral arbustivo con un factor C de 0.05. La determinación del factor C se realizó con la tabla 10, el cual presenta los valores de los diferentes tipos de cobertura vegetal que oscilan desde 0 hasta 1.

**Tabla 15***Factor de Cobertura (C)*

<b>Factor C</b>			
<b>Tipo de Cobertura Vegetal</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>	<b>Factor C</b>
Agricultura costera y andina	55,906	7,58	0,05
Área altoandina con escasa y sin vegetación	171,043	23,18	1
Bofedal	5,993	0,81	0,025
Bosque relicto altoandino	6,140	0,83	0,01
Glaciar	39,769	5,39	0
Lagunas, lagos y cochas	3,069	0,42	0
Matorral arbustivo	159,269	21,58	0,05
Pajonal andino	296,362	40,16	0,05
Plantación Forestal	0,213	0,03	0,2
Cardonal	0,002	0,00	1
Desierto costero	0,073	0,01	1
Bosque relicto mesoandino	0,005	0,00	0,01
Lagunas, lagos y cochas	0,038	0,01	0

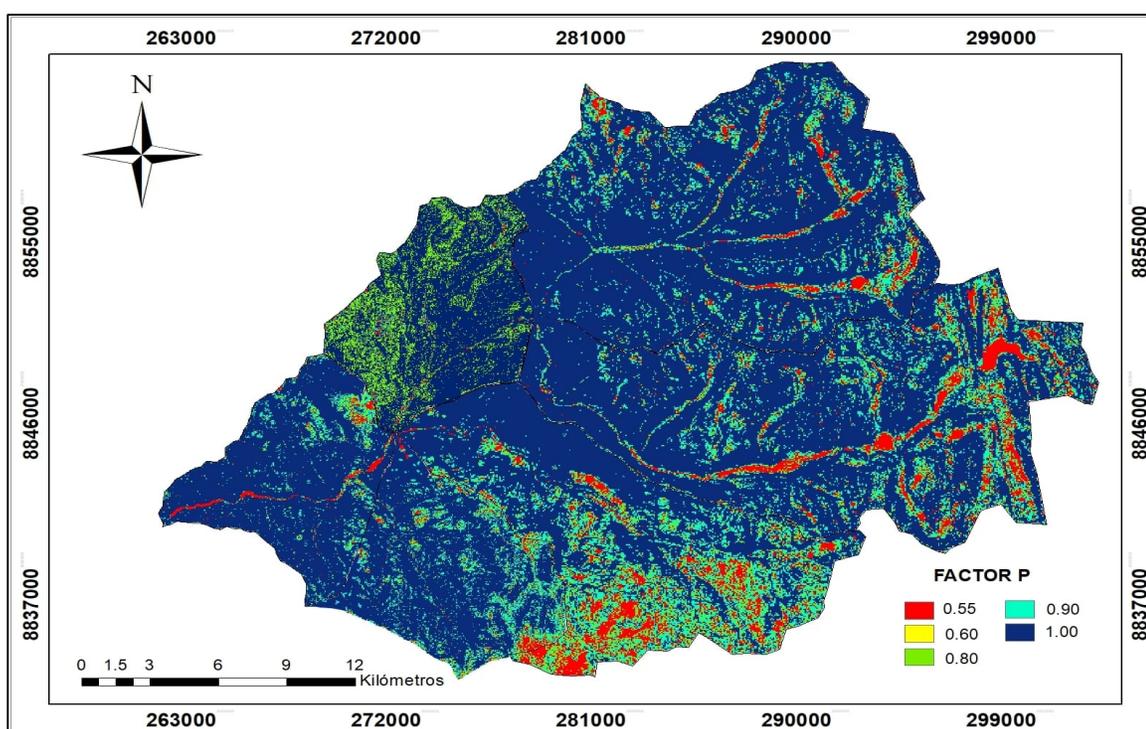
*Nota.* Elaboración Propia

### Determinación del factor de prácticas de conservación de suelos (P)

El mapa de la distribución espacial del factor P se muestra en la figura 31. Se observa que existe una estrecha relación de las prácticas y conservación del suelo entre las microcuencas 1 y 2; 3, 4 y 5; y 6 respectivamente.

**Figura 31**

*Mapa Factor P*



*Nota.* Elaboración Propia

El factor P depende de la pendiente del suelo. Los valores del factor P están reflejados de acuerdo a la tabla 16. La variación de los valores del factor P fue mínima, estos oscilaron de 0,83 a 0,947 para un ponderado de 0,90.

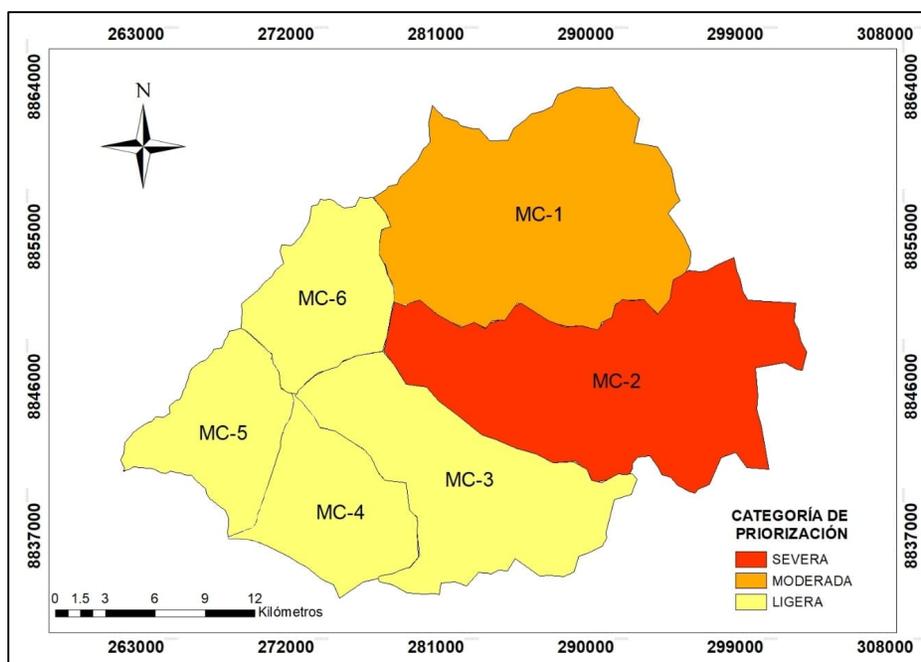
**Tabla 16***Factor Prácticas de conservación (P)*

<b>Microcuencas</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>	<b>Factor P por MC</b>	<b>Factor P Ponderado</b>
MC1	199,57	27,05	0,925	
MC2	201,98	27,37	0,889	
MC3	131,95	17,88	0,832	
MC4	67,38	9,13	0,900	0,90
MC5	68,57	9,29	0,943	
MC6	68,43	9,27	0,947	
Total	737,88	100,00		

*Nota.* Elaboración Propia**Determinación de la Erosión Hídrica**

En este proceso de cuantificación de la erosión del suelo por el método de RUSLE, se realizó la estimación del valor numérico de la pérdida de suelo, con la multiplicación de los cinco factores obtenidos anteriormente. En el cual se pudo deducir que la erosión se relaciona con el tipo de cobertura de las microcuencas y la pendiente respectiva.

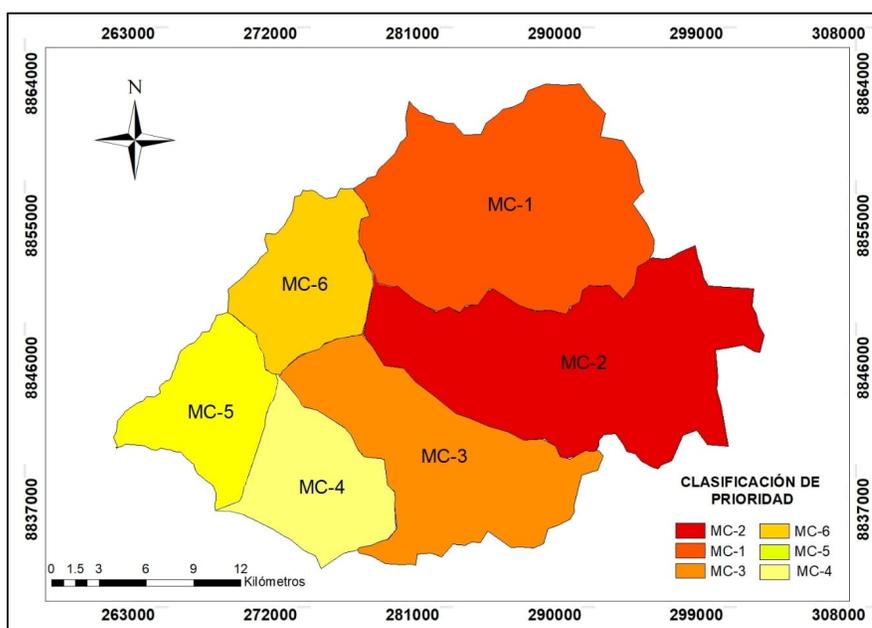
En la figura 32 se ha expresado la prioridad de la cuenca. En la distribución espacial generada en la escala de colores define la región de mayor prioridad a menor prioridad producto a la erosión hídrica. La región sur este central de la cuenca Rapay, MC-2 muestra según la escala de colores una clasificación severa, mientras que, la MC-1 es moderada su erosión y el resto de las microcuencas presentan una tendencia a una pérdida de suelo ligero.

**Figura 32***Categoría de priorización de las microcuencas**Nota.* Elaboración Propia

En la tabla 17 se muestra los valores de erosión obtenidos en cada microcuenca. En el cual, se consideró los cinco factores que involucran al estudio de RUSLE. Los cuales son el promedio de 59 años (1963 – 2022). Por lo que la MC1 con un área de 199.57 km<sup>2</sup> presenta una erosión moderada de 14.598 t/ha/año. La MC2 con un área de 201.98 km<sup>2</sup> presenta una erosión severa de 24,560 t/ha/año. La MC3 con un área de 131.95 km<sup>2</sup> presenta una erosión ligera de 4,54 t/ha/año. La MC4 con un área de 67.38 km<sup>2</sup> presenta una erosión ligera de 1,75 t/ha/año. La MC5 con un área de 68.57 km<sup>2</sup> presenta una erosión ligera de 1,90 t/ha/año. La MC6 con un área de 68.43 km<sup>2</sup> presenta una erosión ligera de 4,11 t/ha/año. La representación espacial de la clasificación de la prioridad de las microcuencas se representa en la figura 32. La escala de colores está en correspondencia con la erosión hídrica cuantitativa de la tabla 17, explicada en el párrafo anterior.

**Tabla 17***Resultados de la erosión hídrica*

<b>Microcuencas</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>	<b>Erosión (T/Ha/Año)</b>	<b>Tipo de erosión</b>
MC1	199,57	27,05	14,60	Moderada
MC2	201,98	27,37	24,56	Severa
MC3	131,95	17,88	4,54	Ligera
MC4	67,38	9,13	1,75	Ligera
MC5	68,57	9,29	1,90	Ligera
MC6	68,43	9,27	4,11	Ligera
Total	737,88	100,00	51,46	

*Nota. Elaboración Propia***Figura 33***Clasificación de prioridad de las microcuencas**Nota. Elaboración Propia*

## *Determinación del Transporte de Sedimentos*

### **Diseño Estructural del Muestreador Helley - Smith**

Para la obtención de muestras de sedimentos en el tramo Tumac del río Rapay fue necesario inicialmente la elaboración del instrumento de trabajo Helley Smith. Las dimensiones del instrumento se determinaron en función de las características visuales del cauce y condiciones hidrodinámicas y en particular el grado de exactitud de la toma de muestras. Además, se tomaron en consideración diseños previos de la estructura y recomendaciones de diversos autores.

Las características del muestreador Helley Smith se muestra en la figura 38 y 39. El mismo posee una longitud de, ancho 0,406 metros y abertura del instrumento 0,09 metros. Se utilizó para el mismo una malla N° 200 para obtener la máxima cantidad de sedimentos superior a la malla definida.

### **Figura 34**

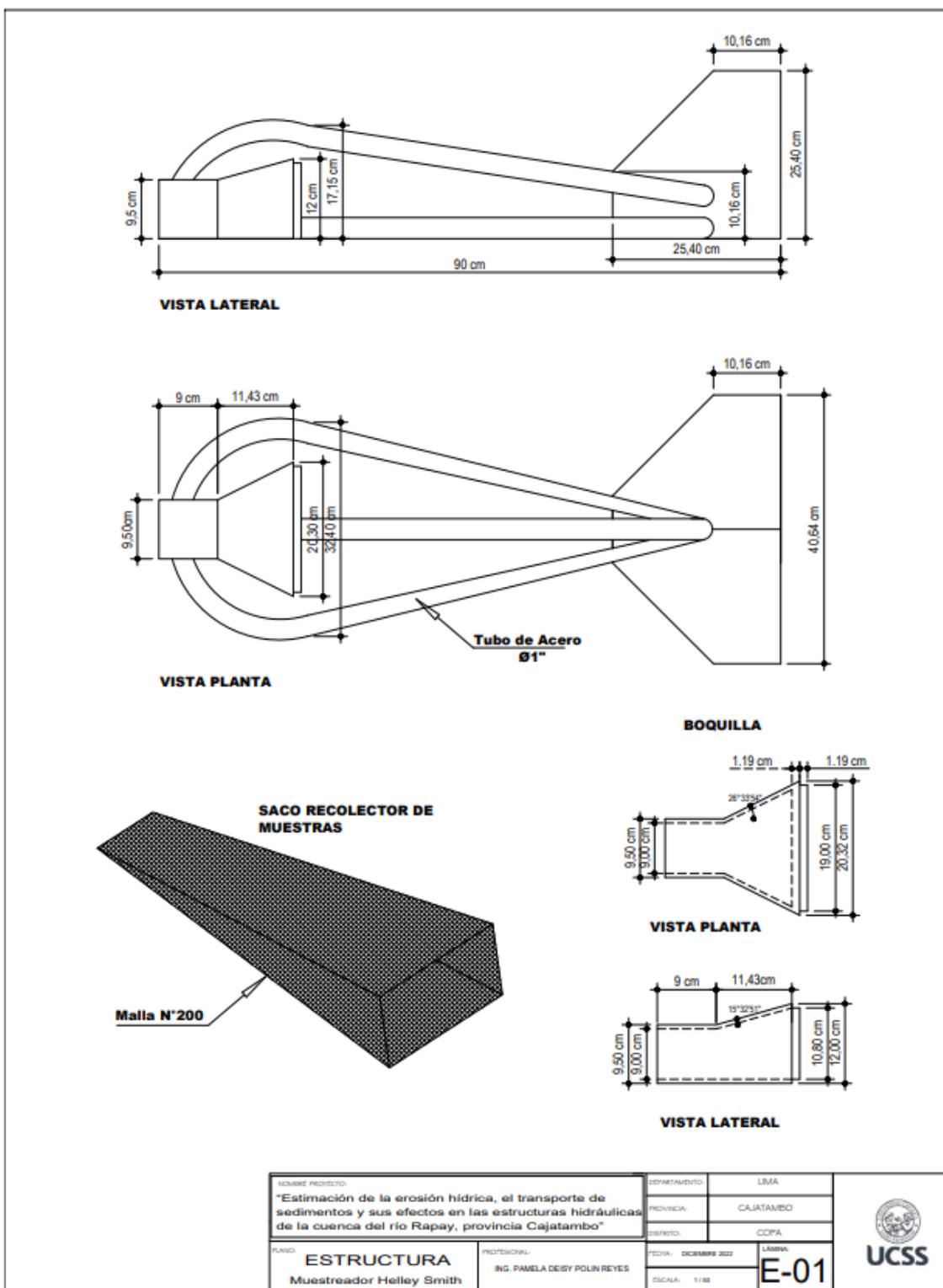
*Muestreador Helley - Smith*



*Nota. Elaboración Propia*

**Figura 35**

*Dimensiones del muestreador Helley Smith*



Nota. Elaboración Propia

En la siguiente figura se muestra el proceso de obtención de los sedimentos. Señalar que el instrumento Helley – Smith permaneció en cada una de las secciones del cauce del río durante una hora para minimizar el error de toma, generando en su totalidad 17 tomas de muestras de sedimentos. Las secciones del canal se muestran en la figura 38.

### Figura 36

*Muestreador Helley Smith en el río Rapay*



*Nota.* Se presenta el muestreador Helley Smith en el río Rapay.

**Figura 37**

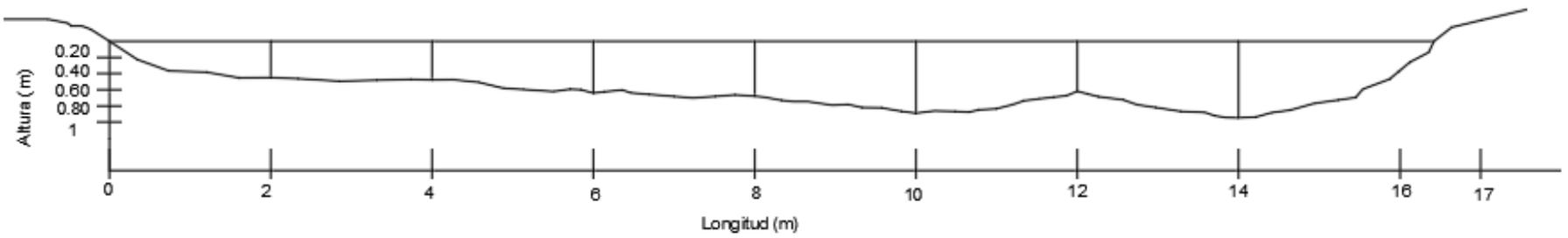
*Mediciones con el muestreador Helley- Smith*



*Nota.* Recojo del muestreador Helley Smith, luego de permanecer suspendido en el lecho del río, en las fotografías se aprecia gran cantidad de sedimentos de fondo retenido.

**Figura 38**

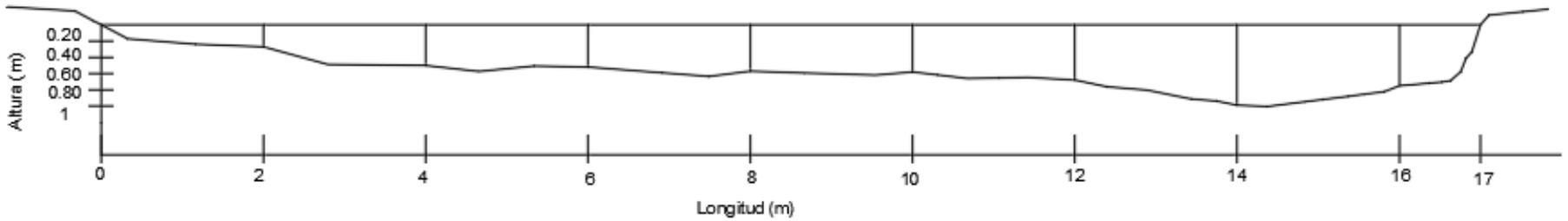
*Sección del ancho de río - Sección I*



*Nota.* Elaboración Propia

**Figura 39**

*Sección del ancho de río - Sección II*



*Nota.* Elaboración Propia

### Aforo del Caudal Líquido del Río

De igual modo, se tomaron las velocidades del flujo del cauce del río para cada sección transversal. Las velocidades del flujo se tomaron con el correntómetro a diferentes profundidades de acuerdo con cada sección transversal. En las siguientes figuras se muestran el proceso de las mediciones de la velocidad del flujo.

#### Figura 40

*Correntómetro FP111 en el río Rapay*



*Nota.* Se presenta el correntómetro FP111 y materiales en el río Rapay.

**Figura 41**

*Toma de medidas con el correntómetro FP111*



En la tabla 18 se reflejan los resultados de las velocidades tomadas con el correntómetro para cada tramo de la sección transversal I. Se observan que las velocidades oscilaron entre 0,4 m<sup>2</sup>/s y 3,1 m<sup>2</sup>/s.

**Tabla 18**

*Velocidades al 20% y 80% de tirante en la sección I*

Tirante	Velocidad (m <sup>2</sup> /s)							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
20%	0,3	1,1	1,6	1,7	2,3	1,9	3,1	0,9
80%		0,4	0,7	0,4	1,5	0,9	3,0	1,6

*Nota.* Elaboración Propia

En la tabla 19 se reflejan los resultados de las velocidades tomadas con el correntómetro para cada tramo de la sección transversal II. Se observan que las velocidades oscilaron entre 0,8 m<sup>2</sup>/s y 3,5 m<sup>2</sup>/s.

**Tabla 19**

*Velocidades en la sección II*

Tirante	Velocidad (m <sup>2</sup> /s)								
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
20%			2,1	1,4	1,4	3,5	2,4	3,2	2,3
80%	1,6	1,6	1,6	1,2	1,8	1,7	1,9	2,1	0,8

*Nota.* Elaboración Propia

### **Análisis de las Muestras de Sedimentos**

El análisis de las muestras de sedimentos tomados con el captador Helley-Smith fueron evaluadas en el laboratorio del “Proyecto Especial Altomayo” (PEAM). Los parámetros que se analizaron fueron el porcentaje de humedad, la densidad, densidad relativa y absorción, el peso unitario suelto y la granulometría.

**Tabla 20**

*Parámetros del laboratorio sección I*

Parámetros	Muestras							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8

%Hn	7,40	1,97	3,12	2,57	1,69	1,85	2,93	1,82
Densidad	2,31	2,44	2,37	3,42	2,35	2,50	2,32	2,40
Pu	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58

*Nota.* Elaboración Propia

**Tabla 21**

*Resultados del laboratorio sección II*

Parámetros	Muestras								
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
%Hn	3,74	0,83	0,56	1,71	0,85	1,00	1,26	0,79	4,47
Densidad	2,25	2,30	2,35	2,38	2,43	2,35	2,36	2,35	2,32
Pu	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65

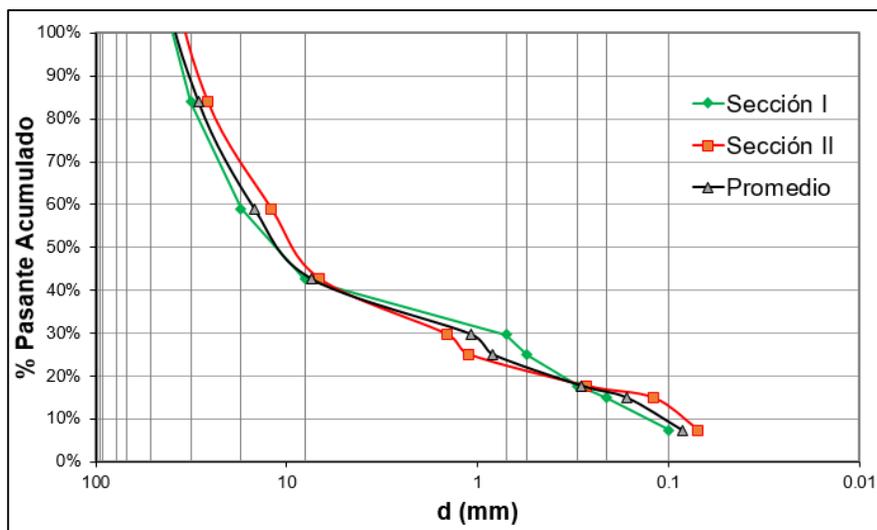
*Nota.* Elaboración Propia

### Distribución Granulométrica

La Figura 42 muestra la distribución granulométrica de los sedimentos recolectados en el Helley-Smith. Se observa que el sedimento de diámetro d50 indica el tamaño medio y se clasifica en el grupo Grava y la clase Mediana según la American Geophysical Union.

**Figura 42**

*Curva granulométrica de sedimentos de fondo- método Helley-Smith*



*Nota.* Elaboración Propia

### Caudal Líquido

Los parámetros hidráulicos de la sección I y Sección II analizada se muestra en la tabla 22, 26. Se alcanzó una velocidad promedio de 1,36 m/s y 1,74 m/s que generó caudales líquidos de 15,73 m<sup>3</sup>/s y 15,96 m<sup>3</sup>/s para las secciones I y II respectivamente. Por tanto, el caudal líquido para el cauce del río en los tramos analizados según el método de velocidades medias por correntómetro fue de 15,74 m<sup>3</sup>/s y 15,96 m<sup>3</sup>/s.

**Tabla 22**

*Parámetros hidráulicos de las dovelas en la sección I*

Parámetros hidráulicos	Dovelas							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Profundidad del flujo (m)	0,45	0,43	0,64	0,68	0,89	0,62	0,95	0,40

Ancho medio (m)	1,68	2,08	1,77	1,97	1,84	2,16	1,84	3,62
Área hidráulica (m <sup>2</sup> )	0,76	0,89	1,13	1,34	1,64	1,34	1,75	1,45
Perímetro mojado (m)	4,60	5,40	5,63	5,36	5,51	5,39	5,66	6,07
Radio hidráulico (m)	0,16	0,17	0,20	0,25	0,30	0,25	0,31	0,24
Velocidad media (m/s)	0,30	0,75	1,15	1,05	1,90	1,40	3,05	1,25
Caudal líquido (m <sup>3</sup> /m s)	0,23	0,67	1,30	1,41	3,11	1,88	5,33	1,81

*Nota.* Elaboración Propia

**Tabla 23**

*Parámetros hidráulicos de la dovela en la sección II*

Parámetros hidráulicos	Dovela								
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Profundidad del flujo (m)	0,23	0,27	0,50	0,52	0,57	0,58	0,68	0,99	0,75
Ancho medio (m)	1,82	2,00	1,82	2,05	2,04	2,06	2,23	1,91	0,90
Área hidráulica (m <sup>2</sup> )	0,42	0,54	0,91	1,06	1,16	1,20	1,52	1,89	0,68
Perímetro mojado (m)	4,31	4,53	4,80	5,03	5,11	5,17	5,64	5,78	4,11
Radio hidráulico (m)	0,10	0,12	0,19	0,21	0,23	0,23	0,27	0,33	0,16
Velocidad media (m/s)	1,50	1,60	2,10	1,40	1,40	1,80	2,40	1,09	2,30
Caudal líquido (m <sup>3</sup> /m s)	0,63	0,86	1,91	1,49	1,62	2,19	3,64	2,06	1,56

*Nota.* Elaboración Propia

### **Estimación del Caudal Sólido Físico por el Captador Helley-Smith**

El cálculo del caudal sólido de fondo específico (qsff) se obtuvo de forma física para cada dovela de la sección transversal y fue obtenido a partir del peso seco en el laboratorio, en relación al ancho de la boquilla del captador Helley-Smith por el tiempo de toma de muestra. La tabla 24 mostró los caudales sólidos para cada dovela en la sección I y sección II. Mientras que, la tabla 25 señaló el comportamiento estadístico que generó cada sección transversal del cauce. En la tabla 24 se obtuvo un comportamiento de los caudales sólidos por cada dovela con baja irregularidad. La varianza resultó prácticamente nula, mientras que el coeficiente de variación resultó inferior a 10, el cual generó una confiabilidad de las tomas de caudales sólidos para cada dovela.

**Tabla 24***Caudales sólidos de fondo por dovelas*

		Sección	Dovelas								
			M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Peso	Caudal I (m <sup>3</sup> /s)		0,00051	0,00077	0,00075	0,00059	0,00072	0,00069	0,00040	0,00073	
seco	Caudal II (m <sup>3</sup> /s)		0,00057	0,00065	0,00057	0,00070	0,00068	0,00067	0,00053	0,00067	0,00057
Peso	Caudal I (m <sup>3</sup> /s)		0,00055	0,00079	0,00077	0,00075	0,00084	0,00070	0,00051	0,00074	
húmedo	Caudal II (m <sup>3</sup> /s)		0,00059	0,00065	0,00057	0,00071	0,00069	0,00068	0,00054	0,00068	0,00060

*Nota.* Elaboración Propia

Sección		Parámetros estadísticos						
		Min	Max	Media	Varianza	Desviación Estándar	Coefficiente Variación	Sesgo
Peso seco	I	0,00040	0,0008	0,0007	0,000000016	0,00013	4,847	-1,099
	II	0,00053	0,0007	0,0006	0,000000004	0,00006	9,820	-0,230
	I	0,00051	00008	0,0007	0,000000012	0,00012	6,050	-0,930

---

Peso	II	0,00054	0,0007	0,0006	0,000000003	0,00006	10,334	-0,301	<b>Tabla 25</b>
húmedo									

---

*Comportamiento estadístico de los caudales sólidos físicos*

*Nota.* Elaboración Propia

**Tabla 26***Resumen de los parámetros en la sección I*

Datos	Muestras							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
D <sub>50</sub>	0,0007	0,0015	0,0018	0,0014	0,0010	0,0013	0,0018	0,0011
D <sub>90</sub>	0,0012	0,0064	0,0076	0,0036	0,0034	0,0054	0,0046	0,0043
U	1,211	0,300	0,400	0,700	0,400	1,500	0,900	3,000
S	0.0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
T	10	10	10	10	10	10	10	10
Y <sub>s</sub>	1582	1582	1582	1582	1582	1582	1582	1582
ρ <sub>s</sub>	2310	2440	2370	3420	2350	2500	2320	2400
τ*	0,198	0,097	0,094	0,153	0,245	0,168	0,144	0,180
τ <sub>0</sub>	0,082	0,083	0,101	0,125	0,148	0,124	0,154	0,119
Δ	0,582	0,582	0,582	0,582	0,582	0,582	0,582	0,582
n	0,021	0,022	0,017	0,011	0,022	0,007	0,010	0,003

*Nota.* Elaboración Propia

Donde D<sub>50</sub> el diámetro de la partícula 50 (m), D<sub>90</sub> el diámetro de la partícula 90 (m), U la velocidad media (m/s), S la pendiente hidráulica, T la temperatura (°C), Y<sub>s</sub> el peso específico del suelo (Kg f/m<sup>3</sup>), ρ<sub>s</sub> la densidad del suelo (Kg/m<sup>3</sup>), τ\* el número adimensional de Shields, τ<sub>0</sub> el esfuerzo cortante que el flujo ejerce en el fondo, Δ la densidad relativa de las partículas, n el coeficiente de Manning.

**Tabla 27***Resumen de los parámetros en la sección II*

Datos	Muestras								
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
D <sub>50</sub>	0,0007	0,0029	0,0032	0,0014	0,0025	0,0014	0,0033	0,0028	0,0009
D <sub>90</sub>	0,0014	0,0079	0,0079	0,0046	0,0076	0,0046	0,0095	0,0079	0,0015
U	1,60	1,60	1,60	1,20	1,80	1,70	1,90	2,10	0,80
S	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
T	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Y <sub>s</sub>	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650
ρ <sub>s</sub>	2250	2300	2350	2380	2430	2350	2360	2350	2320
τ*	1,260	0,113	0,031	0,046	0,120	0,070	0,132	0,062	0,090
τ <sub>0</sub>	0,048	0,060	0,095	0,106	0,113	0,116	0,134	0,164	0,082
Δ	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
n	0,003	0,003	0,005	0,007	0,005	0,005	0,005	0,005	0,008

*Nota.* Elaboración Propia

Donde D<sub>50</sub> el diámetro de la partícula 50 (m), D<sub>90</sub> el diámetro de la partícula 90 (m), U la velocidad media (m/s), S la pendiente hidráulica, T la temperatura (°C), Y<sub>s</sub> el peso específico del suelo (Kg f /m<sup>3</sup>), ρ<sub>s</sub> la densidad del suelo (Kg/m<sup>3</sup>), τ\* el número adimensional de Shields, τ<sub>0</sub> el esfuerzo cortante que el flujo ejerce sobre el fondo, Δ la densidad relativa de las partículas, n el coeficiente de Manning.

## Modelos Empíricos de Transporte de Sedimentos de Fondo

Los resultados de los ocho métodos empíricos del transporte de sedimentos de fondo se muestran en la tabla 28. Se aprecia que existe una variabilidad de criterios de los autores que propicia discrepancia entre los resultados de sedimentos de fondo de manera física. La disimilitud de los criterios se muestra de forma estadística en la tabla 29 existiendo una tendencia semejante de los métodos.

**Tabla 28**

*Resultados de los métodos empíricos de cálculo  $Q_s$  sección I*

Métodos	Qs Caudal sólido (kg f / s)							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Ecuación de Shields	0,327	0,240	0,523	0,615	0,000	1,526	0,000	3,132
Fórmulas de Meyer Peter y Müller	0,007	0,037	0,210	0,024	1,282	0,501	0,000	3,199
Método de Kalinske	0,178	0,588	0,857	0,962	0,842	1,260	1,936	2,298
Método de Einstein	0,025	0,012	0,014	0,042	0,099	0,052	0,051	0,089
Método de Sato, Kikkawa y Ashida	0,005	0,010	0,048	0,009	0,906	0,184	0,000	2,471
Ecuación de Frijlink	0,007	0,038	0,254	0,025	0,771	0,509	2,711	1,814
Método de Yalin	0,044	0,077	0,100	0,149	0,164	0,156	0,220	0,231
Método de Pernecker Y Vollmers	0,042	0,019	0,021	0,066	0,145	0,082	0,078	0,140

*Nota.* Elaboración Propia

En la tabla 29 se muestra el análisis estadístico de las 8 funciones empíricas para estimar los caudales sólidos de fondo. Las ecuaciones de Shield, Meyes y Peter, Kalinske, Einstein, Sato, Frijlink, mostraron mayor similitud de resultados con una varianza y error estándar de la media que oscilan desde 0,013 hasta 0,316 y 0,04 hasta 0,198 respectivamente. Mientras que la funciones de Yalin y Pernecker alcanzaron mayor varianza y error estándar de la media.

**Tabla 29**

*Análisis estadístico del tramo I*

	Shields	Meyer y Peter	Kalinske	Eisnten	Sato	Frijlink	Yalin	Pernecker
Media	0,079	0,128	0,253	0,237	0,526	0,534	0,625	1,672
Error estándar de la media	0,041	0,071	0,105	0,126	0,169	0,199	0,379	0,471
Mediana	0,034	0,038	0,155	0,054	0,468	0,343	0,065	2,056
Moda	0,007	0,010	0,014	0,009	0,000	0,052	0,000	0,089
Desv. estándar	0,115	0,201	0,296	0,356	0,479	0,563	0,071	1,333
Varianza	0,013	0,040	0,088	0,127	0,230	0,316	0,148	1,778
Asimetría	1,841	2,185	1,466	1,660	0,356	1,134	0,578	-0,250

Error									
estándar	0,752	0,752	0,752	0,752	0,752	0,752	0,752	0,752	0,752
de									
asimetría									
Curtosis	2,834	4,734	1,591	1,665	-1,605	-0,180	0,979	-2,010	
Error									
estándar	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481
de curtosis									
Rango	0,322	0,578	0,843	0,953	1,282	1,474	0,711	3,110	
Mínimo	0,005	0,010	0,014	0,009	0,000	0,052	0,000	0,089	
Máximo	0,327	0,588	0,857	0,962	1,282	1,526	2,711	3,199	
Suma	0,635	1,021	2,027	1,892	4,209	4,270	4,996	13,374	

*Nota.* Elaboración Propia

Para el cálculo del gasto real de fondo, se obtiene el peso de la muestra, el ancho de la boquilla del muestreador Helley – Smith, el tiempo en que se tomó la muestra, el número de muestras y el ancho del río. En la tabla 30 se muestra la comparación de resultados de las muestras del caudal real de fondo y el caudal sólido de la sección I.

**Tabla 30**

*Caudal real de fondo vs Caudal sólido de la sección I*

	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>	<b>M7</b>	<b>M8</b>
Qrf real de fondo	0,00055	0,00080	0,00078	0,00076	0,00085	0,00071	0,00052	0,00075

---

Qs empírico	0,025	0,012	0,014	0,042	0,099	0,052	0,051	0,089
(Einstein)								

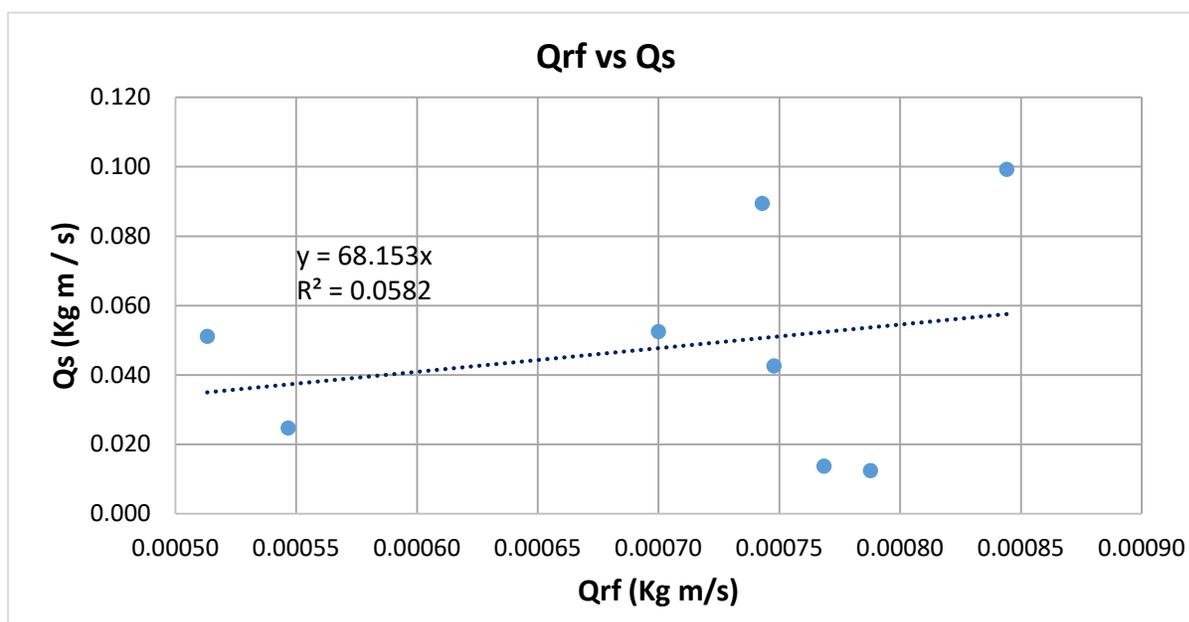
---

*Nota.* Elaboración Propia

En la figura 43 se muestra la relación obtenida del caudal real de fondo y el caudal sólido del método convencional de Einstein. El mismo fue el que más se ajustó con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,73 pero se evidencia en su formato general que los modelos empíricos sobre estiman en un 68,15 los valores reales de sedimentos en la sección I.

**Figura 43**

*Relación del caudal real de fondo y el caudal sólido empírico – tramo I*



*Nota.* Elaboración Propia

El análisis estadístico de las funciones matemáticas para la estimación de los caudales de sedimentos de fondo en la sección II se muestran en la tabla 31. Las funciones de Shields y Yalin

mostraron similitud de resultados en relación con las ecuaciones de Meyer y Peter, Kalinske, Frijlink relacionado a la varianza y el error estándar de la media.

**Tabla 31**

Resultados de los métodos empíricos de cálculo Qs sección II

	<b>Shields</b>	<b>Meyer y Peter</b>	<b>Kalinske</b>	<b>Eisnten</b>	<b>Frijlink</b>	<b>Yalin</b>	<b>Pernecker</b>
Media	0,935	1,469	1,223	0,014	1,573	0,122	0,019
Error estándar de la media	0,238	0,368	0,374	0,003	0,335	0,030	0,006
Mediana	0,89	1,634	1,005	0,012	1,714	0,113	0,015
Moda	0,114	0,000	0,000	0,001	0,101	0,017	0,015
Desv. estándar	0,713	1,105	1,123	0,010	1,005	0,090	0,017
Varianza	0,508	1,222	1,26	0	1,011	0,008	0
Asimetría	0,982	0,209	1.269	0,494	0,015	0,61	0,528
Error estándar de asimetría	0,717	0,717	0,717	0,717	0,717	0,717	0,717
Curtosis	0,353	-0,6	2,012	-1,263	-1,064	-0,5	-1,108

Error								
estándar de	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
curtosis								
Rango	2,2	3,337	3,648	0,029	2,968	0,262	0,049	
Mínimo	0,114	0	0	0,001	0,101	0,017	-0,002	
Máximo	2,314	3,337	3,648	0,03	3,069	0,279	0,047	
Suma	8,414	13,225	11,008	0,123	14,158	1,095	0,175	

*Nota.* Elaboración Propia.

**Tabla 32**

*Caudal real de fondo vs Caudal sólido de la sección II*

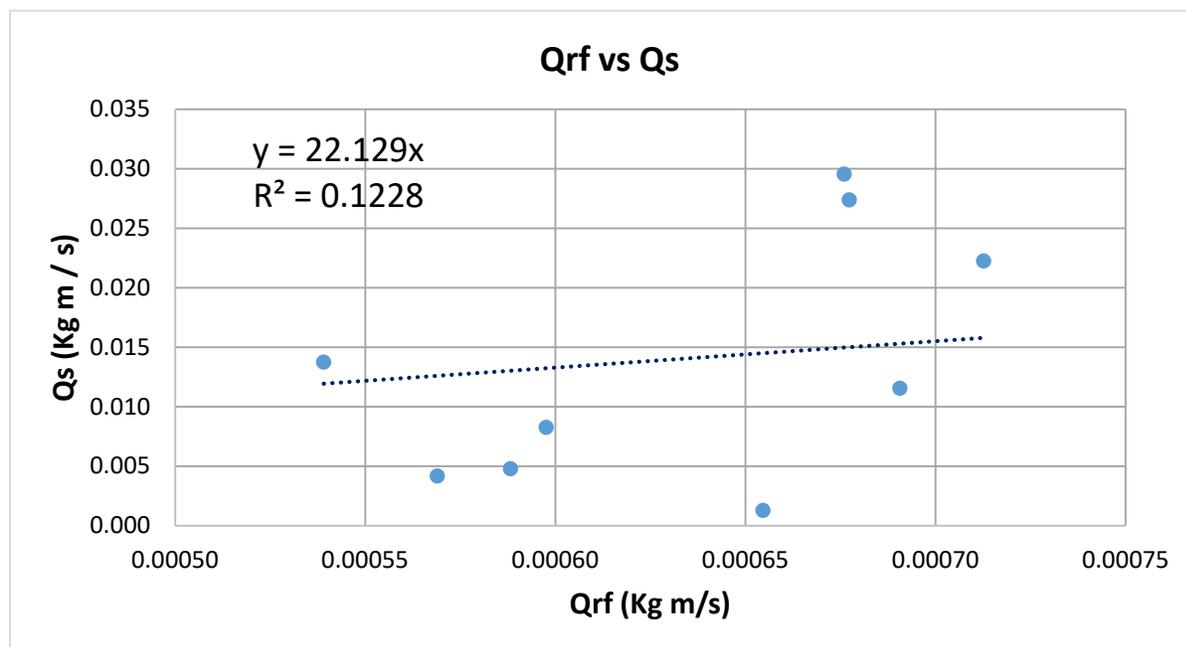
	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>	<b>M7</b>	<b>M8</b>	<b>M9</b>
Q <sub>rf</sub> real de fondo	0,00059	0,00066	0,00058	0,00072	0,00070	0,00068	0,00055	0,00068	0,00060
Q <sub>s</sub> empírico (Einstein)	0,005	0,001	0,004	0,022	0,012	0,030	0,014	0,027	0,008

*Nota.* Elaboración Propia

En la figura 44 se muestra la relación obtenida del caudal real de fondo y el caudal sólido del método convencional de Einstein. El mismo fue el que más se ajustó con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,30 pero se evidencia en su formato general que los modelos empíricos sobre estiman en un 22,13 los valores reales de sedimentos en la sección II.

**Figura 44**

Relación del caudal real de fondo y el caudal sólido empírico - tramo II

*Nota.* Elaboración Propia

### Modelos Empíricos de Transporte de Sedimentos en Suspensión

Los resultados de los caudales sólidos en suspensión del tramo I se muestran en la tabla 33. Se aplicaron los métodos de Garde y Pande; Samaga; Benedict y Vanuni de los cuales existen mayores similitudes entre los métodos de Samaga; Benedict y Vanuni. Con similares características se refleja los sedimentos en suspensión de la tabla 34. Con lo que se demuestra que el método de Garde y Pande presentó una sobre estimación de los sedimentos en suspensión según las características propias del flujo en el día de la toma de datos. La observación directa caracterizó un agua con escasa turbidez, por tanto, los sedimentos en suspensión se visualizaban de manera escasa

**Tabla 33***Caudal sólido suspensión del tramo I*

<b>Métodos</b>	<b>Qs Caudal sólido suspensión (kg / s)</b>								
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Garde y Pande	8,56	81,43	254,70	64,92	254,82	110,33	532,55	877,12	44,95
Samaga	0,03	0,01	0,02	0,04	0,11	0,05	0,05	0,06	0,06
Benedict y Vanuni	0,08	0,18	0,40	0,27	1,39	0,55	1,77	1,15	1,15

*Nota.* Elaboración Propia**Tabla 34***Caudal sólido suspensión del tramo II*

<b>Métodos</b>	<b>Qs Caudal sólido suspensión (kg / s)</b>							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Garde y Pande	5,455	17,467	80,618	35,453	140,074	60,116	667,358	44,531
Samaga	0,033	0,012	0,015	0,043	0,112	0,049	0,054	0,061
Benedict y Vanuni	0,080	0,183	0,403	0,266	1,392	0,549	1,770	1,150

*Nota.* Elaboración Propia

En la tabla 35 se muestran los resultados estadísticos del transporte en suspensión de los tres métodos en análisis. Se demostró que el método de Garde y Pande no se adecua a las condiciones propias del río Rapay producto a que genera elevados resultados fuera de los intervalos aceptables. El método de Garde en el tramo I alcanzó una error estándar, desviación estándar y

varianza de 62,24; 256,60 y 65844,83 en comparación con los métodos de Samaga y Benedict reflejaron un error estándar entre 0,007 y 0,145.

**Tabla 35**

*Análisis estadístico del Caudal Total - Tramo I*

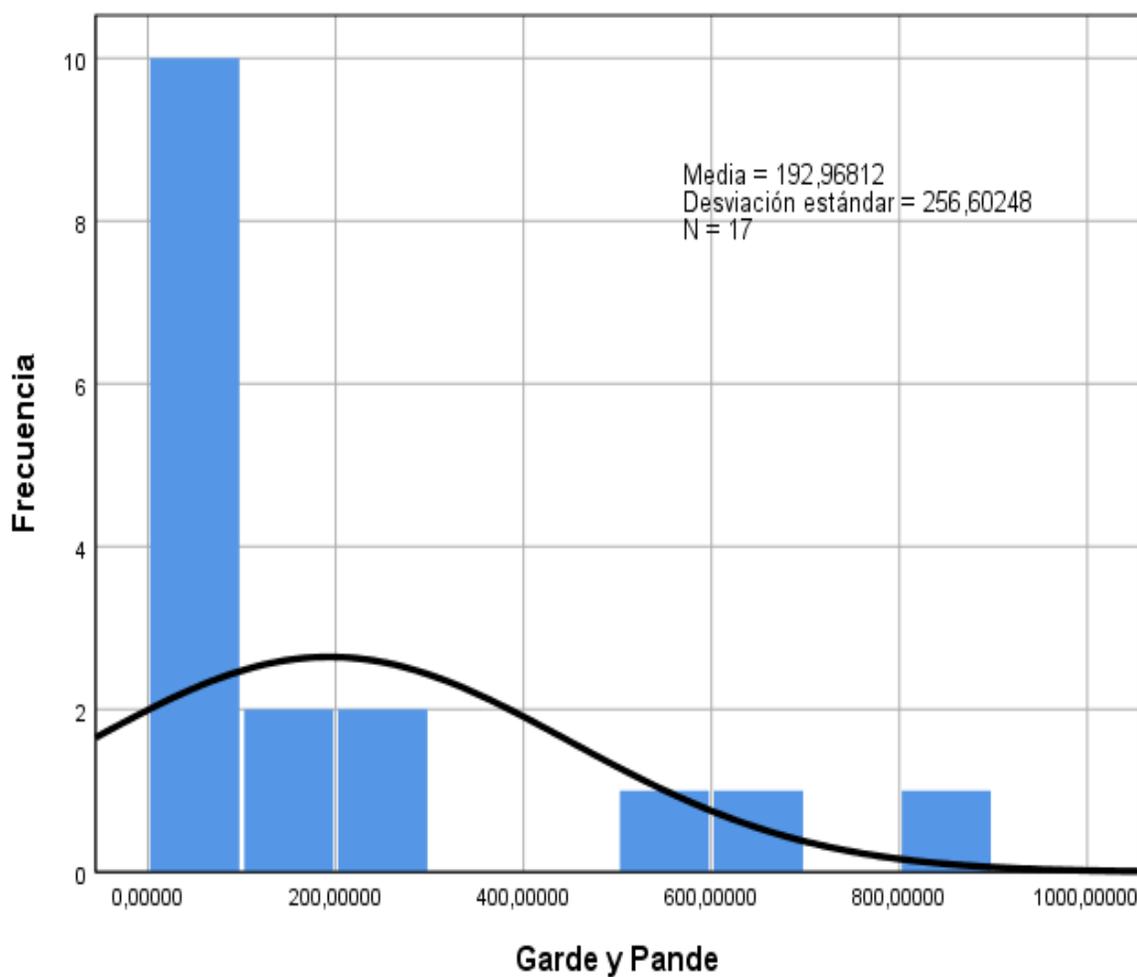
	<b>Garde</b>	<b>Samaga</b>	<b>Benedite</b>
N°	17	17	17
Media	192,968	0,048	0,749
Error estándar de la media	62,235	0,007	0,145
Mediana	80,618	0,047	0,512
Moda	5,455	0,061	1,150
Desv. Desviación	256,602	0,030	0,598
Varianza	65844,833	0,001	0,357
Asimetría	1,803	0,958	0,519
Error estándar de asimetría	0,550	0,550	0,550
Curtosis	2,412	0,981	-1,275
Error estándar de curtosis	1,063	1,063	1,063
Rango	871,666	0,100	1,690
Mínimo	5,455	0,012	0,080
Máximo	877,121	0,112	1,770
Suma	3 280,458	0,819	12,736

*Nota.* Elaboración Propia

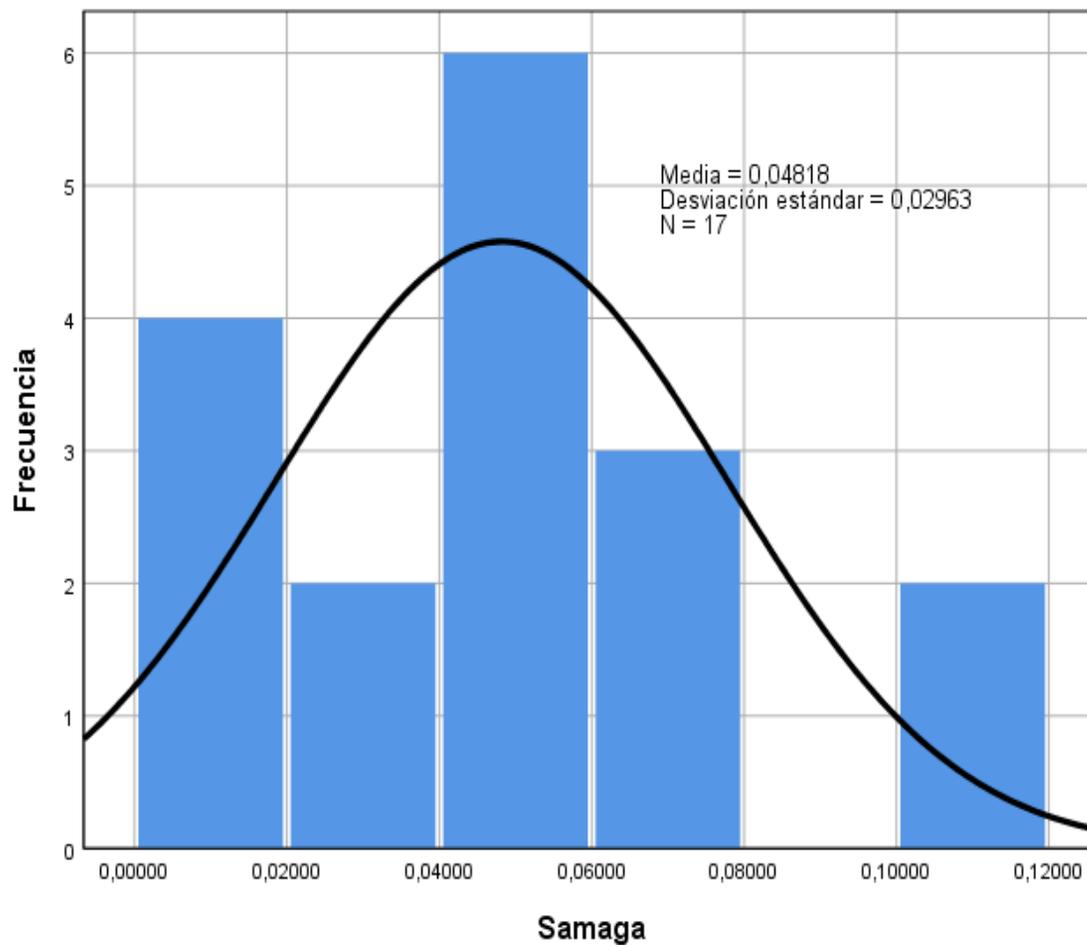
En las figuras 45, 46 y 47 se muestran los histogramas de frecuencias. Donde se confirma la imprecisión del método de Garde y Pande figura 45. En relación a los métodos de Samaga y Benedict V, se muestra que el histograma presenta mejor comportamiento de la frecuencia y la curva de normalidad con desviación estándar inferior a 0,59.

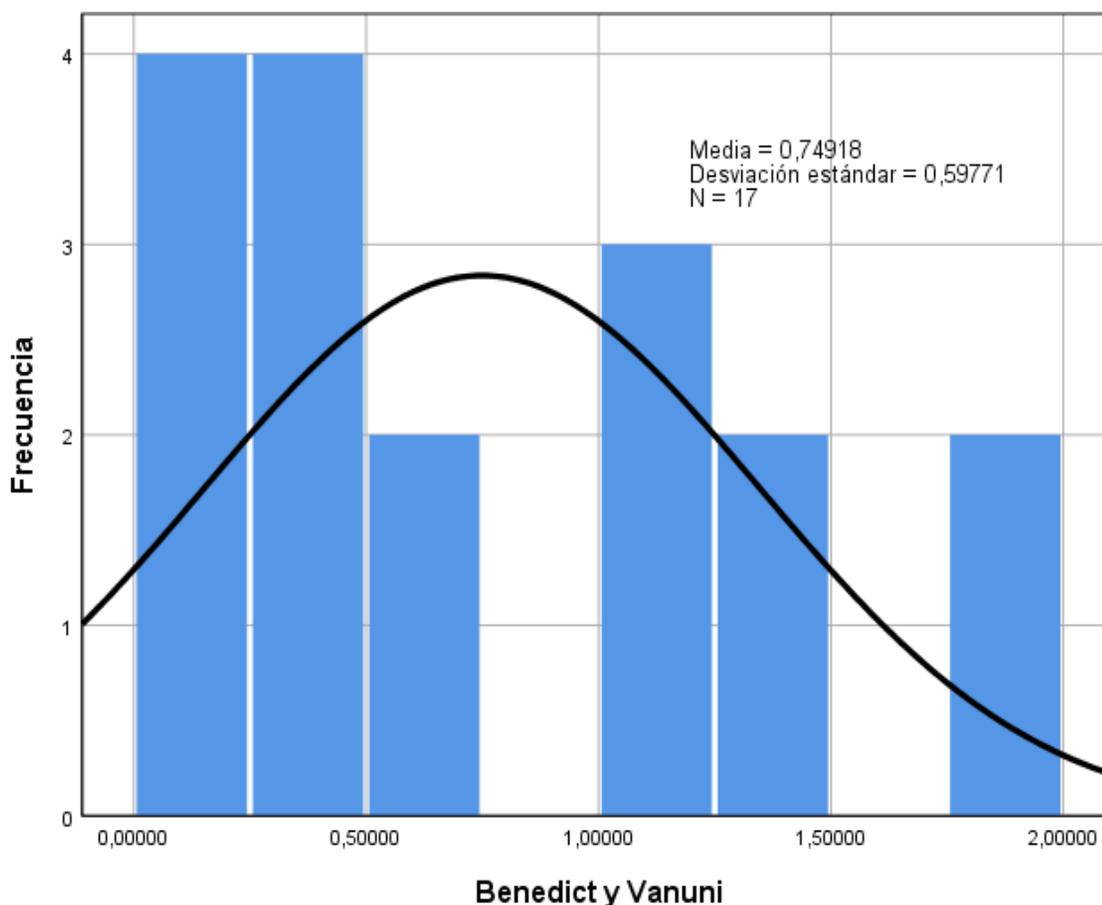
**Figura 45**

*Histograma de frecuencia de Garde y Pande (Tramo I)*



*Nota.* Elaboración Propia

**Figura 46***Histograma de frecuencia de Samaga (Tramo I)**Nota. Elaboración Propia*

**Figura 47***Histograma de frecuencia de Benedict y Vanuni (Tramo I)*

*Nota.* Elaboración Propia

### **Modelos Empíricos de Transporte de Sedimentos en Caudal Total**

El transporte de sedimentos del caudal total se aplicaron tres métodos Ackes White, Garde y Datiri, Engelund y Hansen que se muestran en las tablas 36 y 37 para los tramos unidos. En ambas secciones se observan que el método de Engelund y Hansen presentó mayor disimilitud en relación con los métodos de Ackes White, Garde y Datiri, Engelund que son más conservadores.

**Tabla 36***Caudal Sólido Total del Tramo I*

Métodos	Qs Caudal sólido Total (kg / s)							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Ackes White	0,001	0,008	0,022	0,029	0,190	0,072	0,453	0,089
Garde y Datiri	0,027	0,004	0,005	0,025	0,117	0,032	0,030	0,040
Engelund y Hansen	0,769	1,512	3,450	7,633	57,649	16,243	62,091	19,524

*Nota.* Elaboración Propia**Tabla 37***Caudal Sólido Total del Tramo II*

Métodos	Qs Caudal sólido Total (kg / s)								
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Ackes White	0,049	0,001	0,020	0,036	0,063	0,100	0,060	0,110	0,008
Garde y Datiri	0,002	0,000	0,001	0,009	0,002	0,013	0,002	0,008	0,014
Engelund y Hansen	6,958	0,925	2,083	6,349	6,021	15,455	5,942	13,949	3,317

*Nota.* Elaboración Propia

En la tabla 38 se muestran los resultados estadísticos del transporte de sedimentos total de los tres métodos en análisis. Se demostró que el método de Engelud y Hansen no se adecua a las

condiciones propias del río Rapay producto a que genera elevados resultados fuera de los intervalos aceptables. El método de Engelud y Hansen en los tramos alcanzó una error estándar, desviación estándar y varianza de 4,45; 18,37 y 337,40 en comparación con los métodos de Samaga y Benedict reflejaron un error estándar entre 0,007 hasta 0,026.

**Tabla 38**

*Análisis estadístico del Caudal Total - Tramo II*

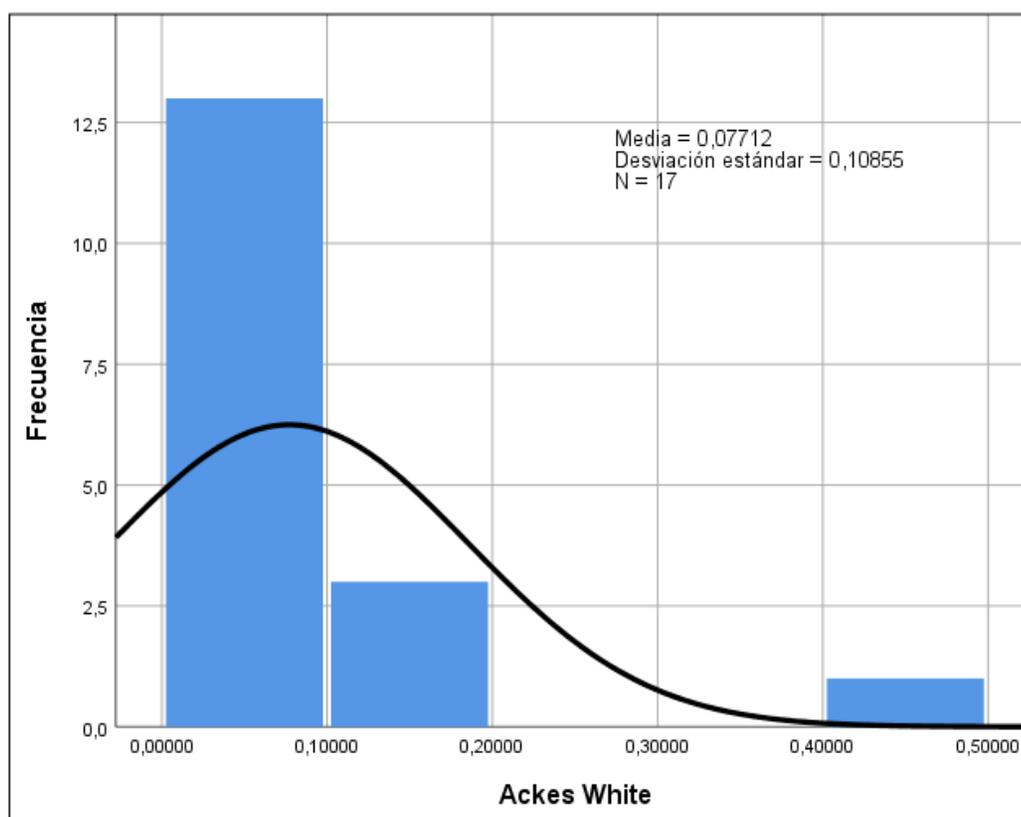
	<b>Ackes</b>	<b>Garde</b>	<b>Engelud</b>
N°	17	17	17
Media	0,077	0,019	13,522
Error estándar de la media	0,026	0,007	4,455
Mediana	0,049	0,009	6,349
Moda	0,001	0,002	0,769
Desv. Desviación	0,109	0,028	18,368
Varianza	0,012	0,001	337,402
Asimetría	2,907	2,857	2,167
Error estándar de asimetría	0,550	0,550	0,550
Curtosis	9,637	9,579	3,927
Error estándar de curtosis	1,063	1,063	1,063
Rango	0,452	0,117	61,322
Mínimo	0,001	0,000	0,769
Máximo	0,453	0,117	62,091
Suma	1,311	0,331	229,870

*Nota.* Elaboración Propia

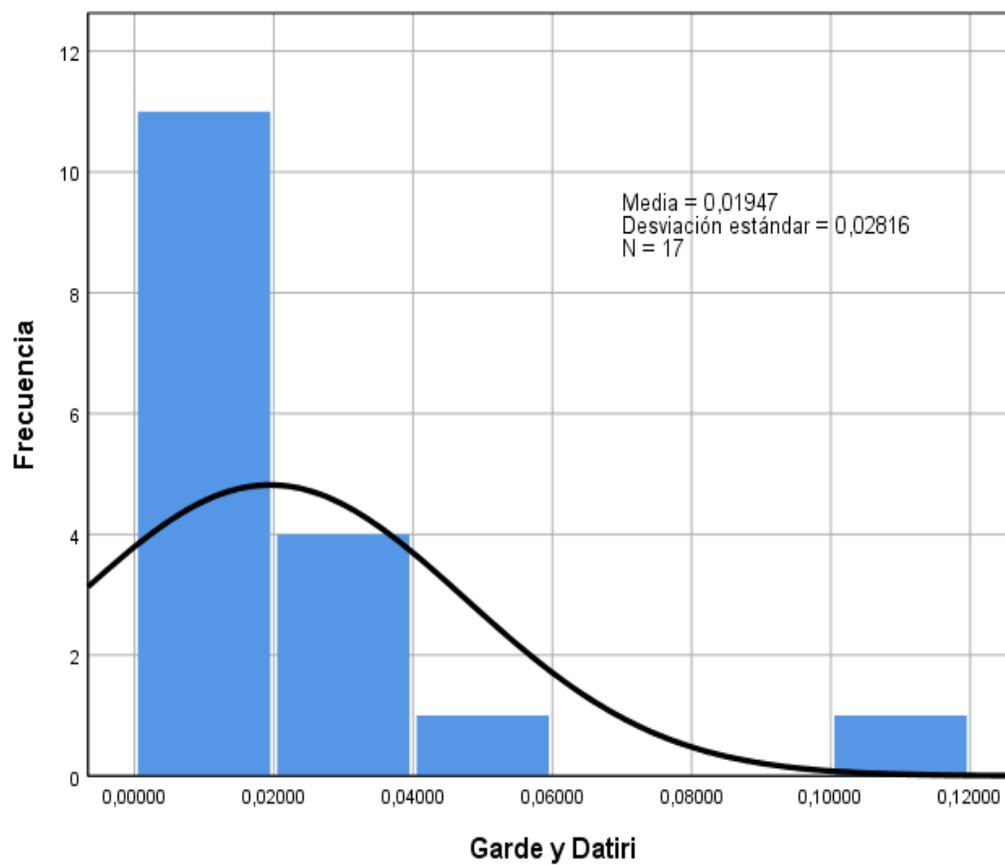
En las figuras 48, 49 y 50 se muestran los histogramas de frecuencias. Donde se confirma la imprecisión del método de Englund y Hansen figura 48. En relación a los métodos de Ackes White, se muestra que el histograma presenta mejor comportamiento de la frecuencia y la curva de normalidad con desviación estándar inferior a 0,11.

### Figura 48

*Histograma de frecuencia Ackes White (Tramo II)*



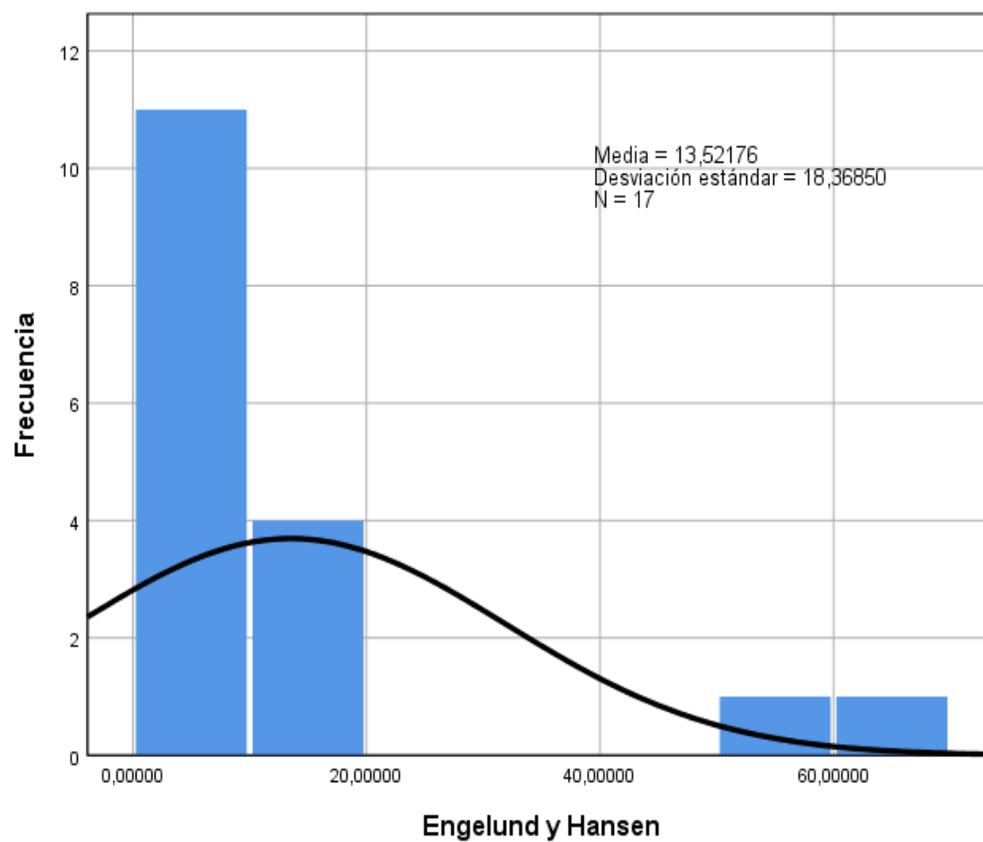
*Nota.* Elaboración Propia

**Figura 49***Histograma de frecuencia Garde y Datiri (Tramo II)*

*Nota.* Elaboración Propia

**Figura 50**

*Histograma de frecuencia de Engelund y Hansen (Tramo II)*



*Nota.* Elaboración Propia



**Tabla 40***Resultados estadísticos con el programa Trend*

<b>Test estadístico</b>	<b>Z</b>	<b>(<math>\alpha=5\%</math>)</b>	<b>Tipo prueba</b>	<b>Estudio</b>
Linear regression	1,656	1,977	Paramétrico	Tendencia
Cumulative deviation	1,18	1,301	Paramétrico	Homogeneidad/Salto
Worsley Likelihood	2,867	3,156	Paramétrico	Homogeneidad/Salto
Students t	1,656	1,977	Paramétrico	Homogeneidad
Cramer	-	0,256	Paramétrico	Homogeneidad
Bartlett	-	0,545	Paramétrico	Independencia
Mann-Kendall	1,645	1,96	No Paramétrico	Tendencia
Spearman's Rho	1,645	1,96	No Paramétrico	Tendencia
Cusum	20,704	21,069	No Paramétrico	Homogeneidad/Salto
Rank Sum	1,645	1,96	No Paramétrico	Homogeneidad/Salto

*Nota.* Elaboración Propia

En la tabla 41 se muestra los resultados del caudal máximo de retorno en los diferentes años, en el cual LogPearson Tipo III se ajustó a la cuenca.

**Tabla 41***Caudal máximo en diferentes tiempos de retorno*

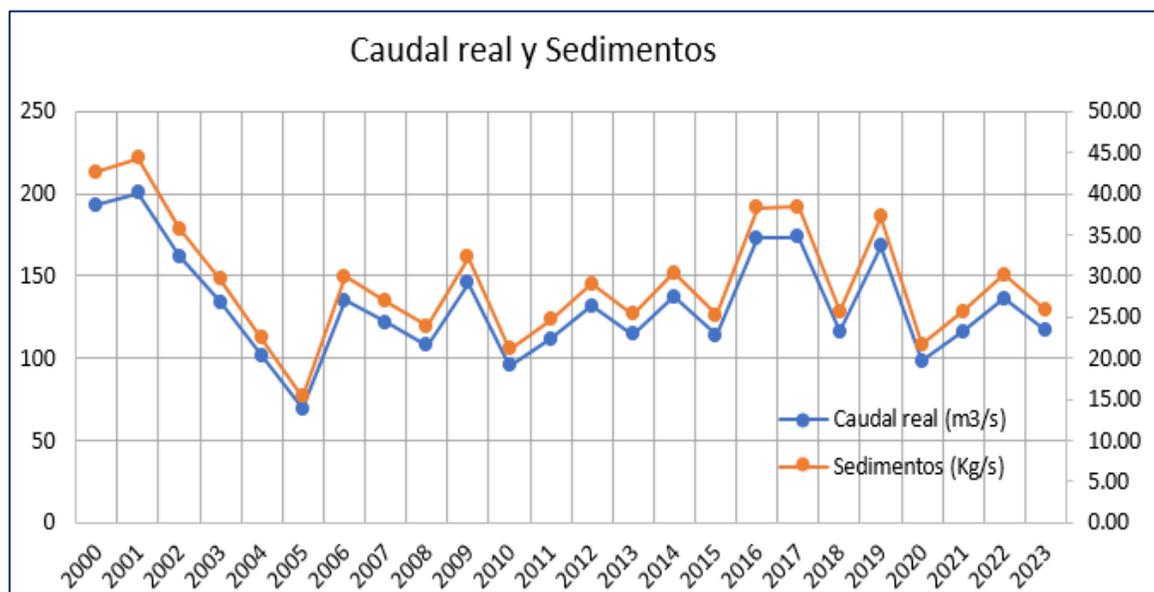
<b>T (años)</b>	<b>LogPearson Tipo III</b>
2	126,94
5	155,55

10	174,50
15	185,19
20	192,67
25	198,44
30	203,13
50	216,20
100	233,83
200	251,39
500	274,56

Nota. Elaboración Propia

**Figura 52**

*Caudal real vs Sedimentos*



Nota. Elaboración Propia

En la tabla 42 se muestra los caudales y sedimentos mínimos, máximos y el que se estimó físicamente por día, mes y año.

**Tabla 42**

*Resultados máximos y mínimos de los caudales y sedimentos*

	<b>Caudal</b>	<b>Sedimentos</b>	<b>Sedimentos</b>
	<b>hm<sup>3</sup>/año</b>	<b>(T/año)</b>	<b>T/día</b>
Valor máx.	4170,81	917577,21	2548,00
Valor min.	333,94	73465,92	204,00
Valor real	497,01	109340,89	303,72

*Nota.* Elaboración Propia

### ***Influencia del Transporte de Sedimentos en la Central Hidroeléctrica Cahua***

La central hidroeléctrica Cahua está en operación desde 1967 con una potencia nominal es de 43 MW y un caudal de diseño de 24,0 m<sup>3</sup>/s. La misma, tiene 2 turbinas Francis de 21,5 MW cada una. La captación está compuesta una bocatoma y un barraje mixto con dos compuertas radiales, mientras que el desarenador tiene 8 secciones funcionando en paralelo como muestra la figura 53.

**Figura 53***Desarenadores*

*Nota.* Tomado de Maita (2016)

Como se demostró la cuenca río Rapay transporta una amplia carga de sedimentos desde limos hasta piedras por tanto es de suma importancia el control de la tasa de concentración total de sólidos en los desarenadores porque puede ocasionar un cambio dramático en la tasa de abrasión en los rodets y equipamiento hidromecánico que son muy sensible al tamaño de la arena entre 0,062 a 2,0 mm. De acuerdo con Maita (2016) es un proceso gradual que ocurre en los periodos con mayor tamaño de la arena y mayor concentración de sedimentos.

Se identificó que la estructura hidráulica con mayor influencia en la eficiencia de la central hidroeléctrica en relación a la trasportación de sedimentos es el desarenador. En entrevista con los trabajadores de la empresa el desarenador ha logrado retener desde el 70% hasta el 95% de los sedimentos, mientras que en la cámara de carga logra captar un 80% de limo. En estudios previos por Maita (2016) en la sección 1 del desarenador en tres mediciones alcanzó mediciones de caudales de 3,1 m<sup>3</sup>/s, 3,3 m<sup>3</sup>/s y 2.9 m<sup>3</sup>/s que repercutió en una retención de arenas del 81%, 93.6% y 89.9% respectivamente.

En general, se planteó un flujograma, Figura 53 que muestra los efectos que produce el transporte de sedimentos en la central hidroeléctrica Cahua. La creación del embalse ocasiona la obstaculización de la bocatoma y la pérdida de la capacidad que genera la acumulación de los sedimentos en los conductos. A su vez, la trasportación de los sedimentos genera la abrasión en las compuertas y turbinas llevando consigo un incremento en los costos de mantenimiento y operación del sistema.

#### Figura 54

*Influencia de los sedimentos en la central hidroeléctrica Cahua*



*Nota.* Elaboración propia

## **Contrastación de Hipótesis**

### ***Contrastación de Hipótesis General***

En relación con la hipótesis general se cumplió en su totalidad. A partir de la teledetección y los sistemas de información geográfico acoplados al modelo RUSLE se determinó que la cuenca Rapay presenta una erosión hídrica de 51,46 t/Ha/año. Además, los 13 modelos empíricos y el método físico del muestreador Helley – Smith se estimó un transporte de sedimentos mínimo de 0,950 t/día.

### ***Contrastación de Hipótesis Específicas***

Referente a la hipótesis específica 1 la cuenca hidrográfica Rapay presentó según los parámetros morfométricos un relieve variado, pero en su mayor magnitud accidentado de fuertes pendientes de 25,8%. A su vez, la geometría que proporciona una interpretación que la cuenca tendrá crecientes moderadas a elevadas de forma parcialmente constante producto a la existencia de nevados. Además, su geometría interpretativa refleja una cuenca que tiende a ser redonda y por consiguiente moderada potencia de crecientes en los cauces. En relación a la red hidrográfica presentó un orden máximo de corriente tipo 5 que a consecuencia brinda una densidad de drenaje en sus microcuencas desde baja hasta moderada y una relación de bifurcación de 2,9. En constatación con los parámetros geométricos, densidad de drenaje y parámetros de relieve demuestran probabilidades de que la cuenca tiende a captar elevadas precipitaciones, transformación de escorrentía y máximas avenidas en los cauces de forma estable. No obstante, en relación a las condiciones litológicas, como capacidad de filtración según Hort 1945 y Smith 1950 se clasifica por tener una textura desde fina a muy gruesa. Por todo lo expuesto, se justifica el cumplimiento de la hipótesis.

Respecto a la hipótesis específica 2 relacionado a la estimación de la erosión hídrica y su clasificación por el grado de afectación en la cuenca Rapay se analizó a partir de las variables relieve, cobertura vegetal, precipitaciones y condiciones edafoclimáticas. Los aspectos señalados fueron evaluados por microcuenca y a nivel de cuenca. Como variable fundamental de la erosión la cuenca Rapay alcanzó precipitaciones medias históricas de 593,24 mm en un relieve accidentado montañosos que superó las pendientes de 25%. La superficie de la cuenca Rapay en su mayor magnitud se identificó que estaba cubierta en un 40,16 % por el pajonal andino, los cuales son característicos en los sistemas montañosos del Perú. Estas áreas de pajonal andino brindan condiciones favorables para la conservación y existencia de recursos hídricos subterráneos de buena calidad, según estudios de otros autores. En relación a los parámetros que involucran el método de RUSLE el factor R, K, LS, C y P alcanzaron valores de 84,58 (MJ mm) / (ha h año); 0,026 t – ha (h/Mj ha cm); 2.18; 0 a 1; 0.90; respectivamente. Por tanto, se estimó que la erosión hídrica en la cuenca Rapay fue de 51, 46 t /Ha/ Año clasifica como muy severa según FAO 1980. Al respecto, se consideró el cumplimiento total de la hipótesis planteada. La estimación de la erosión hídrica de la cuenca del río Rapay, se analizó por microcuencas en una totalidad de 6 áreas.

Respecto a la hipótesis específica 3 se aplicó 13 modelos de predicción de transporte de sedimentos, 7 en caudal de fondo, 3 en caudales en suspensión y 3 en caudal total de sedimentos, así como 17 muestras de caudales de sedimentos físicos por el método del muestreador Helley – Smith. Sin embargo, el método de Einstein, Samaga y Ackes White fueron los de mejor ajuste en relación a la toma de caudales de sedimentos físicos con un coeficiente de determinación superior a  $R^2 = 0,7$ . Por tanto, la hipótesis no se cumplió.

## Conclusiones

Se determinó la morfometría de la cuenca hidrográfica de forma precisa a partir del DEM con celdas de 5x5 del satélite PeruSat1 (CONIDA). El sistema de información geográfica proporcionó como resultado un área de la cuenca de 732,42 km<sup>2</sup> y perímetro de 126,32 km. En particular, se analizó los parámetros morfométricos por 6 microcuencas para obtener mayor precisión cualitativa y cuantitativa de las condiciones geométricas, relieve y red hidrográfica. Las áreas de las microcuencas oscilaron desde 64,01 km<sup>2</sup> a 201,18 km<sup>2</sup>, con pendientes del terreno fuertemente accidentado con valor máximo de 31,81%. En relación a la red hídrica se observó que la densidad de drenaje fue desde 0,33 hasta 1,65 km/km<sup>2</sup> a consecuencia una relación de bifurcación de 1,40 hasta 2,94. Todo ello demuestra que la cuenca tiene condiciones favorables para que se genere la erosión hídrica y el transporte de sedimentos producto a sus indicadores geomorfológicos.

Se analizó la influencia de la erosión hídrica para cada microcuenca delimitada. Las condiciones del factor erosividad (R) presentó valores entre 722,29 a 908 Mj mm /ha h año, según las condiciones hidrometeorológicas clasificó como una zona de elevadas precipitaciones e intensidad de lluvias. En relación, al factor de erodabilidad (K) se encontró el valor representativo ponderado de 0,0261 que se interpreta con similitudes de las características y tipo de suelo. En cuanto al factor topográfico (LS) el mismo concuerda con los parámetros morfométricos de un relieve fuertemente accidentado por poseer un valor ponderado de 1,18. En particular, la cobertura vegetal (C) se identificó que el 40,16% está cubierto por pajonal andino y el 23,18% con escasa y sin vegetación que generó un factor C que osciló entre 0 a 1. Mientras que, la conservación de los

suelos (P) mostró una estrecha relación de las prácticas y su conservación de 0,90 de valor ponderado.

La estimación de la erosión hídrica por el método de RUSLE fue de 4,11 ha/año y 24,56 t/ha/año como valores mínimos y máximos de las cuencas MC6 y MC2 respectivamente. De acuerdo a la FAO (1980) la erosión hídrica se clasificó desde ligera hasta severa, lo cual permitió generar el mapa de distribución espacial de las cuencas con menor y mayor prioridad (figura 31) para la toma de decisiones en la conservación del recurso suelo y agua, así como aspectos medioambientales.

De acuerdo a los modelos de estimación del transporte de sedimentos el criterio físico es el más real, pero generó elevados costos de inversión. Para ello, se estimó que por el río Rapay se transporta 0,011 Kg m/s (0,950 t/día). Sin embargo, con los modelos empíricos en sedimentos de fondos y en suspensión reflejó que el más preciso fue Einstein y Benedict y Vanuni con valores de 0,25 Kg m/s y 6,14 Kg m/s respectivamente. A partir de las máximas avenidas en el río Rapay para un periodo de 24 años se estimó que el transporte de sedimentos mínimo fue de 204,00 t/día y un máximo de 2548,00 t/día.

Se demostró en la investigación que la cuenca del río Rapay existen elevados volúmenes de transporte de sedimentos que repercute de forma negativa en la operación y mantenimiento de la central hidroeléctrica Cahua y el puente Tumac. Se concluyó que con el presente estudio dichas

obras hidráulicas pueden actualizar sus sistemas de costos y operaciones producto a los elevados sedimentos que se transportan en el cauce.

### **Recomendaciones**

Se recomienda aplicar un mayor número de métodos de estimación de pérdida de suelo en condiciones físicas y empíricas para obtener un valor más preciso.

De acuerdo a la presente investigación se recomienda aplicar acciones para las prácticas de conservación de suelo y de este modo disminuir la pérdida de suelo en las zonas más propensas a erosión. Lo cual, permitiría disminuir los posibles riesgos de desastres geodinámicos en el futuro.

Se recomienda para futuras investigaciones incluir nuevas tecnologías avanzadas para la estimación de caudales y transporte de sedimentos basado en el efecto de perfiladores de corrientes acústicos Doppler.

Se recomienda para futuras investigaciones incrementar un mayor número de tomas de muestras en diferentes épocas del año y sectores de la cuenca del río Rapay para la disminución del sesgo por los modelos físicos y empíricos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amiel, P. J. (2007). *Las variables en el método científico*. Revista Soc Quím Perú. [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1810-634X2007000300007](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2007000300007)
- Arias, G. J., Villasís, K. M. Á., & Miranda, N. M. G. (2016). *El protocolo de investigación III: La población de estudio*. Revista Alergia México, 201-206. <https://www.redalyc.org/pdf/4867/486755023011.pdf>
- Basile, P. A. (2002). *Modelación matemática del transporte de sedimentos no uniformes en condiciones de desequilibrio*. Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, Rosario. [https://www.fceia.unr.edu.ar/curiham/es/wp-content/uploads/2018/10/Pedro-Abel-Basile\\_CNA-2002.pdf](https://www.fceia.unr.edu.ar/curiham/es/wp-content/uploads/2018/10/Pedro-Abel-Basile_CNA-2002.pdf)
- Basile, P. (2018). *Transporte de sedimentos y morfodinámica de ríos pluviales*. Rosario: Editorial de la Universidad Nacional de Rosario. <https://rephip.unr.edu.ar/items/b4bacaec-ca06-4bfd-93b1-a81f16d6ffe3>
- Borges B, M. E. (2008). *Socavación al pie de muros longitudinales*. (Tesis de Grado para optar al Título de Ingeniero Civil). Universidad de los Andes, Mérida. [http://bdigital.ula.ve/storage/pdftesis/pregrado/tde\\_arquivos/7/TDE-2012-04-08T23:19:08Z-1539/Publico/borgesmaria\\_parte1.pdf](http://bdigital.ula.ve/storage/pdftesis/pregrado/tde_arquivos/7/TDE-2012-04-08T23:19:08Z-1539/Publico/borgesmaria_parte1.pdf)
- Camacho, Z. K., & Gómez, L. W. (2019). *Erosión hídrica por lluvias máximas en diferentes tiempos de retorno en la subcuenca Cumbaza - Región San Martín*. Cátedra Villarreal, 6(2). <https://revistas.unfv.edu.pe/RCV/article/view/275>

- Cappelletti, V. Y. (2011). *Aplicación de un sistema de información geográfico para la determinación de la erosión hídrica en cuencas del río Agrio*. (Tesis para optar el título de Magíster en Sistema de Información Geográfica). Universidad San Francisco de Quito, Quito.
- Centro de educación continua UNAM. (1980). *Erosión y sedimentación en obras hidráulicas*. México D.F.
- Cisneros, J., Cholaky, C., Cantero, G. A., González, J., Reynero, M., Diez, A., & Bergesio, L. (2012). *Erosión hídrica, principios y técnicas de manejo*. Córdoba: UniRío.
- Cortez, S. L., & Alan Neill, D. (2018). *Procesos y fundamentos de la Investigación Científica*. Machala: Editorial UTMACH.
- D'Amario, F. M. J. (2016). *Evaluación del riesgo de erosión hídrica, su distribución espacial y el efecto de la cobertura vegetal en el proceso erosivo, en la cuenca hidrográfica del Río Tunuyán Superior*. Tesis de grado. Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza.
- Djoukbala, O., Mazighi, H., Mazour, M., & Rabie, B. M. (2020). *Development of a minimalist conceptual numerical model for flood forecasting and management under GIS environment*. Journal of Water and Climate Change.
- De Regoyos, S, M. (2003). *Metodología para la evaluación de la Erosión Hídrica con modelos informáticos*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Díaz R., J. (2015). *Diagnóstico del potencial de erosión hídrica mediante técnicas de geoprociamiento en la sub-cuenca del río Angasmarca, La Libertad, Perú*. Anales Científicos, 76(2), Pág. 283-293. <https://doi.org/10.21704/ac.v76i2.793>

- Dumas, S. A. (2012). *Riesgo de erosión hídrica en la Cuenca hidrográfica del río Mundo*. Trabajo de fin de Máster. Universidad Complutense Madrid, Madrid.  
<https://docta.ucm.es/entities/publication/6e726154-fa4a-4441-84b2-d24e91c8ab46>
- Escobar, S. M. (2019). *Mitigación de la erosión hídrica para la conservación del suelo en la subcuenca del río Ichu, Huancavelica*. Tesis para optar el grado de magister scientiae en gestión integral de cuencas hidrográficas. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima.  
<https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4156>
- Expedito, L. G. H., Santos, M. R., Cristo Parreiras, T., Brandão Santana, D., de Melo Bolelli, T., & Luiz Mincato, R. (2020). *Water erosion modeling by the Erosion Potential Method and the*. Revista Ambiente & Água. doi:10.4136/1980-993X.  
<https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/k8Kwmmh57ZfftsxWV8HzLvH/?lang=en>
- George, M.W., Hotchkiss, R.H. and Huffaker, R., *Reservoir sustainability and sediment management*. Journal of Water Resources Planning and Management, 143(3), pp. 1-8, 2017. DOI: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000720
- Gutiérrez, L. R., Muciño, P. J., Arellano, M. J., Guichard, R. D. R., & Aguilar, S. M. Á. (2021). *Estimación de la Erosión Hídrica y el Transporte de Sedimentos en la Cuenca Alta del Río Cuxtepeques, Chiapas, México*. Revista EIA, 1-14.
- Hernández, S. R., Fernández, C., Baptista, P. L. (2014). *Metodología de la investigación*. (6a. Edición). México D.F. McGraw-Hill
- Hudson, N. (1997). *Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía*. Londres: Boletín de Suelos de la FAO - 68.

- Laqui, C. F. R. (2022). *Estimación de la erosión y transporte potencial de sedimentos hasta el eje de la futura represa Callazas en sub - cuenca del río Callazas en la región Tacna - Perú*. (Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Tacna. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/626410>
- López, P. L. (2004). *Población, Muestra y Muestreo*. Scientific Electronic Library Online. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-02762004000100012](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-02762004000100012)
- Maita, E. A. (2016) *Manejo de sedimentos en la cuenca del río Pativilca para la operación de la central hidroeléctrica Cahua – Perú*. IAHR. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Lima, Perú.
- Maza, Á. J. A., & García, F. M. (1996). *Manual de Ingeniería de Ríos. Transporte de Sedimentos*. Instituto de Ingeniería de UNAM, México D.F.
- Mendoza, B. E. G. (2013). *Modelado de la evolución morfodinámica de playas, por oleaje y viento*. Tesis para optar por el grado de Maestro en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000703365>
- Nota Técnica N° 002. (2017) *Atlas de Erosión de Suelos por Regiones Hidrológicas del Perú*. Dirección de Hidrología. Lima-Perú.
- Núñez, F. M. I. (2007). *Las variables: estructura y función en la hipótesis*. Investigación Educativa.
- Orbegoso, N. L. A., & Rodríguez, D. S. (2018). *Erosión hídrica en la sub cuenca río Urpay utilizando el método del perfil, Huaraz*. Revista Tzhoconen.
- Pájaro, H. D. (2002). *La Formulación de Hipótesis*. Cinta de Moebio.

Pérez, M. G. B., Rodríguez, C. J. A., & Molina, A. J. P. (2018). *Ingeniería de Ríos*. Morelia: Editorial Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

<http://hidraulica.umich.mx/bperez/APUNTES%20INGENIERÍA%20DE%20RÍOS-AGO-2018%20V-3.pdf>

Polanco, J.A., *Exploring governance for sustainability in contexts of violence: the case of the hydropower industry in Colombia*. *Energy, Sustainability and Society*, 8(1), pp. 1-15, 2018. DOI: 10.1186/s13705-018-0181-0

Polanco, J.A. y Ramírez, F., *La evaluación de la sostenibilidad en empresas de energía. Una investigación aplicada a centrales de generación hidroeléctrica*. Sello Editorial Universidad de Medellín, Medellín, Colombia, 2017.

Pulido, P. M. (2015). *Ceremonial y protocolo: métodos y técnicas de investigación científica*. Revista Opción.

Raza, A., Ahrends, H., Habib-Ur-Rahman, M., & Gaiser, T. (2021). *Modeling Approaches to Assess Soil Erosion by Water at the Field Scale with Special Emphasis on Heterogeneity of Soils and Crops*. *Land*, 1.

Restrepo J, D., & Kjerfve, B. (2000). *Water Discharge and sediment load from the western slopes of Colombian Andes with focus on Rio San Juan*. *Journal of Geology*.

Rocha, P. (2016). *Los ríos: sistemas fluviales*. Buenos Aires.

Schleiss, A.J., Franca, M.J., Juez, C., De Cesare, G. and Professor, F., *Reservoir sedimentation*. *Journal of Hydraulic Research*, 54(6), pp. 595-614, 2016. DOI: 10.1080/00221686.2016.1225320

Vásquez, I. J. F. (2018). *Estudio comparativo del transporte de sedimentos en fondo en las inmediaciones del puente Motupe*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil.

Universidad Señor de Sipán, Pimentel.

<https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/5433>

## ANEXOS

## Anexo 1.

*Registro de precipitaciones de la estación Cajatambo*

<b>Año</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Anual</b>
1964	33,1	68,5	128,4	57,00	23,7	0,00	0,00	2,8	8,3	34,1	44,7	26,00	426,6
1965	39,4	92,4	104,4	59,2	7,8	0,00	1,1	6,5	14,6	21,8	8,4	68,1	423,7
1966	78,00	94,4	117,6	49,00	6,6	0,00	0,00	0,00	0,00	68,1	48,2	62,8	524,7
1967	91,4	167,5	112,7	71,3	8,6	0,00	1,3	3,4	60,1	72,6	40,6	9,00	638,5
1968	122,2	42,8	83,6	3,8	22,2	0,00	0,5	8,00	6,8	45,4	118,8	69,5	523,6
1969	51,7	130,6	89,7	59,2	3,9	0,1	0,8	8,3	10,7	29,5	120,6	229,00	734,1
1970	168,1	81,9	100,00	107,9	32,3	4,00	0,00	4,6	68,7	56,6	78,2	66,7	769,00
1971	108,9	118,4	229,4	45,9	0,00	0,00	0,00	7,7	57,4	21,1	133,3	154,2	876,3
1972	162,6	127,5	259,2	68,6	2,00	0,00	0,00	0,00	14,5	17,7	17,1	46,4	715,6
1973	44,4	75,1	79,00	49,8	0,00	0,00	0,00	1,00	33,00	114,1	29,00	161,4	586,8
1974	125,00	179,8	136,7	45,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,8	16,6	15,8	520,00
1975	23,00	140,00	213,6	27,7	2,00	0,00	0,00	8,2	29,5	32,00	39,9	16,5	532,4
1976	97,3	134,7	108,00	12,8	0,00	6,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,9	365,7
1977	153,2	119,8	31,5	22,00	37,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,2	46,4	41,00	464,1
1978	71,6	34,00	98,1	29,1	2,1	0,00	2,1	0,3	4,3	2,8	5,5	6,1	256,00
1979	30,1	96,00	118,8	37,00	7,4	0,00	0,00	0,00	10,8	14,5	13,00	42,00	369,6
1980	44,5	36,25	79,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	92,9	96,1	41,8	391,53
1981	77,6	214,7	221,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,1	19,8	566,2
1982	39,2	101,7	83,9	11,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	57,5	65,6	105,3	464,6
1983	162,8	50,8	180,3	102,6	0,00	0,00	0,00	0,00	3,2	12,5	63,3	122,7	698,2
1984	100,3	200,8	166,8	50,2	23,21	12,13	0,00	3,26	7,44	91,09	141,53	85,03	881,8
1985	101,5	95,5	146,98	9,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,2	0,00	14,28	73,26	447,73
1986	4,7	0,00	63,00	61,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,5	78,1	225,1
1987	19,5	96,11	47,16	14,95	0,61	0,00	0,00	1,29	5,33	7,02	48,02	50,34	290,33
1988	145,41	24,5	94,4	73,9	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,88	53,14	129,79	536,02

1989	208,54	183,21	169,28	6,6	0,00	13,00	0,00	0,00	5,26	45,47	6,59	2,72	640,67
1990	68,54	48,71	48,93	9,3	2,3	12,1	0,00	0,00	4,00	60,8	32,8	83,96	371,45
1991	52,82	72,62	124,71	35,04	18,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,12	6,01	314,82
1992	14,14	57,83	113,87	41,99	15,06	4,62	0,00	0,14	9,29	46,74	8,16	25,33	337,17
1993	84,64	79,03	178,2	99,99	0,29	0,00	0,00	0,00	3,22	47,2	30,49	116,7	639,77
1994	179,3	216,5	177,4	83,8	1,7	0,00	0,00	0,5	10,1	8,8	23,2	73,6	774,9
1995	73,2	52,2	104,3	56,6	6,3	0,00	0,00	0,00	3,1	7,5	47,00	126,6	476,8
1996	109,00	125,9	143,9	39,2	8,5	0,00	0,00	4,2	0,6	35,3	20,6	76,5	563,7
1997	108,5	168,2	55,7	25,7	4,5	0,00	0,00	0,4	15,9	25,4	63,6	233,9	701,8
1998	162,7	179,5	153,1	46,9	2,7	3,1	0,00	4,5	6,00	69,7	16,4	59,8	704,4
1999	138,00	247,9	108,3	55,5	48,9	14,5	0,00	0,5	17,1	46,9	40,3	90,6	808,5
2000	149,8	187,6	138,7	64,7	23,9	0,00	1,4	10,7	13,6	41,5	29,8	151,7	813,4
2001	166,3	114,3	250,4	12,13	8,3	1,3	0,3	0,00	14,5	39,00	117,6	66,4	790,53
2002	77,42	110,2	165,3	95,8	6,3	7,00	0,00	0,00	15,6	65,00	67,5	83,4	693,52
2003	91,2	105,5	114,2	39,3	4,1	0,00	0,00	0,00	0,00	25,4	18,2	153,1	551,00
2004	32,5	155,3	86,2	45,00	3,6	2,43	4,4	0,00	24,00	63,6	74,3	95,5	586,83
2005	74,6	71,09	124,1	17,00	2,2	0,00	0,00	3,00	0,6	29,3	12,2	114,5	448,59
2006	120,4	174,00	214,8	118,4	2,8	5,4	0	3,9	7,2	26,1	80,8	124,5	878,3
2007	92,1	77,1	177,4	88,5	25,2	0,00	0	0,3	0,00	29,4	33,6	24,1	547,7
2008	141,6	171,8	132,2	51,6	0,2	0,00	0	3,2	2,3	34,3	35,5	87,9	660,6
2009	158,2	184,1	229,9	80,8	9,6	0,00	0,9	2,7	3,00	59,7	76,9	94,00	899,8
2010	89,00	102,7	122,3	36,5	0,00	0,5	0,00	0,3	29,00	8,7	56,00	181,2	626,2
2011	163,6	92,4	149,00	102,00	0,6	0,7	3,00	3,1	4,6	12,7	84,00	169,5	785,2
2012	104,3	156,9	149,5	112,2	5,2	0,1	0,00	0,00	21,7	42,5	75,9	74,1	742,4
2013	50,6	171,3	166,1	31,9	15,3	0,00	1,1	2,2	0,1	76,3	50,7	95,7	661,3
2014	124,7	123,7	180,5	46,2	25,6	0,00	0,00	0,8	12,6	23,8	56,7	125,00	719,6
2015	121,9	74,7	125,7	57,2	16,9	0,8	0,1	2,3	1,6	26,7	31,1	113,00	572,00
2016	35,3	147,00	87,1	57,9	7,5	0,8	0,00	0,3	18,9	11,9	0,00	81,7	448,4
2017	191,5	218,5	295,3	77,8	41,5	1,6	0,00	0,1	5,3	45,6	14,2	50,5	941,9
2018	139,6	73,6	209,7	78,3	19,2	4,4	0,1	0,00	4,5	27,2	35,7	73,6	665,9
2019	141,3	166,8	136,9	27,3	6,4	2,00	0,8	0,00	39,3	15,4	30,6	129,7	696,5
2020	79,9	96,7	64,85	32,5	20,3	0,00	0,00	0,00	5,8	21,6	27,8	211,9	561,35

2021	255,4	36,8	181,4	47,3	0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	23,9	22,1	123,7	691,5
2022	104,83	96,21	49,1	9,86	8,77	0,00	0,00	0,00	0,00	4,67	6,19	18,1	297,73
Media	101,71	116,33	135,98	49,16	9,26	1,65	0,3	1,67	10,86	33,28	44,48	85,87	590,55
Max	255,4	247,9	295,3	118,4	48,9	14,5	4,4	10,7	68,7	114,1	141,53	233,9	941,9
Min	4,7	0,00	31,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,72	225,1

*Nota.* Tomado de SENAMHI

**Anexo 2.***Registro de precipitaciones de la estación Laguna Surasaca*

<b>Año</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Anual</b>
1964	33,1	75,6	116,7	38,5	24,00	0,2	0,2	3,5	8,3	51,8	44,7	26,00	422,6
1965	39,4	92,4	104,4	46,7	1,3	0,00	2,2	0,3	16,9	31,6	29,7	80,7	445,6
1966	78,00	44,6	58,5	43,2	2,1	0,00	0,00	0,00	18,3	79,2	42,3	60,3	426,5
1967	91,4	167,5	112,7	71,3	25,3	11,00	7,6	17,00	60,1	72,6	77,5	88,5	802,5
1968	73,1	55,7	81,6	6,00	5,6	1,6	3,2	26,2	18,6	50,8	32,8	61,7	416,9
1969	39,6	103,6	89,7	59,2	3,9	2,6	2,4	13,2	10,3	39,2	66,00	142,9	572,6
1970	116,8	52,2	102,00	72,5	23,1	2,2	4,8	7,3	53,2	59,6	42,9	101,9	638,5
1971	91,7	121,1	154,2	39,1	4,4	1,4	0,4	16,00	5,2	45,1	46,3	110,3	635,2
1972	88,3	72,8	204,00	92,00	0,1	0,00	0,00	11,7	31,5	38,4	32,5	55,5	626,8
1973	116,00	101,9	116,4	94,8	44,6	1,3	6,8	9,00	47,5	26,1	44,00	134,9	743,3
1974	84,00	119,7	107,8	32,3	3,8	5,1	2,2	26,00	3,6	13,5	34,9	41,9	474,8
1975	127,4	76,9	165,9	44,3	37,00	0,00	0,00	8,3	29,5	32,00	39,9	16,5	577,7
1976	125,4	114,8	114,1	36,9	5,5	7,9	2,7	10,5	13,5	5,6	19,00	69,1	525,00
1977	68,00	111,1	48,6	37,6	46,3	0,8	1,7	0,8	17,9	14,2	85,8	72,4	505,2
1978	39,4	114,7	50,2	28,4	4,00	0,00	5,7	2,8	33,7	44,3	44,1	28,2	395,5
1979	48,3	95,4	106,7	57,1	7,2	0,00	0,00	0,00	10,8	17,6	16,5	12,7	372,3
1980	71,5	62,7	80,5	8,1	4,8	1,2	0,8	0,00	3,3	103,2	63,1	72,3	471,5
1981	92,9	156,4	107,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,3	0,00	57,3	61,8	111,7	594,4
1982	88,5	153,2	71,9	37,4	4,6	0,00	4,3	0,00	0,00	57,5	65,6	105,3	588,3
1983	162,8	50,8	180,3	102,6	0,00	0,00	0,00	0,00	3,2	12,5	63,3	122,7	698,2
1984	100,3	200,8	166,8	69,4	38,3	33,9	8,5	9,1	20,8	76,2	111,8	128,5	964,4
1985	101,5	95,5	120,4	50,2	0,00	0,00	0,00	6,6	14,7	27,3	39,9	90,6	546,7
1986	112,00	125,4	126,6	58,4	26,6	5,1	3,5	7,2	11,7	10,6	24,7	65,8	577,6
1987	127,3	105,1	35,8	25,8	1,7	0,00	5,3	3,6	14,9	19,6	90,2	45,4	474,7
1988	104,7	61,8	58,1	72,9	12,7	0,00	0,00	0,00	11,1	27,6	29,7	61,8	440,4
1989	133,8	93,9	109,7	46,5	22,5	3,7	0,00	2,00	14,7	39,5	18,4	7,6	492,3
1990	51,4	76,00	59,4	4,4	8,5	1,00	0,00	0,00	1,5	139,00	82,7	113,3	537,2

1991	49,1	146,2	108,4	23,1	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,3	16,8	358,8
1992	39,5	23,8	48,7	23,5	2,6	3,4	0,00	0,4	6,6	19,9	22,8	17,3	208,5
1993	89,2	127,7	147,00	110,2	0,8	0,00	0,00	0,00	9,00	83,1	85,2	247,4	899,6
1994	129,00	127,3	163,9	110,5	45,4	1,8	2,00	0,7	42,00	9,00	57,00	48,00	736,6
1995	73,3	35,2	140,1	59,4	9,00	5,1	1,2	4,4	7,3	43,2	49,5	85,5	513,2
1996	121,9	96,4	125,00	58,2	3,9	0,00	0,00	2,00	6,1	26,5	21,4	61,8	523,2
1997	88,3	115,7	40,5	26,8	0,00	0,00	0,00	0,00	14,00	24,2	64,4	125,3	499,2
1998	178,1	112,3	123,3	20,9	2,00	2,5	0,00	0,00	11,9	58,5	33,6	32,00	575,1
1999	101,6	193,2	85,7	52,6	38,5	0,00	4,2	0,00	31,9	57,1	50,3	76,9	692,00
2000	120,6	124,00	104,9	63,4	35,9	0,00	2,7	4,5	26,4	60,1	29,5	135,1	707,1
2001	143,3	87,00	149,9	33,9	9,9	7,5	0,00	0,00	26,4	35,6	104,9	66,00	664,4
2002	92,00	65,1	96,9	45,5	8,6	2,1	0,00	2,1	17,2	73,5	73,9	93,1	570,00
2003	89,7	96,3	121,7	37,00	0,00	0,00	0,00	1,3	11,3	15,8	8,7	87,7	469,5
2004	36,3	78,7	56,5	78,1	0,00	6,8	0,00	0,00	22,3	56,4	95,6	95,1	525,8
2005	90,00	40,6	105,6	9,5	4,1	0,00	0,00	3,9	0,5	28,00	23,8	80,3	386,3
2006	70,9	124,3	145,9	89,7	0,3	11,5	0,00	6,00	6,00	35,00	80,8	92,3	662,7
2007	106,3	77,4	148,5	55,2	36,6	0,00	0,00	0,00	6,7	52,2	44,9	39,5	567,3
2008	108,8	136,00	100,7	49,9	0,00	5,2	0,00	0,00	2,8	59,6	17,4	83,4	563,8
2009	101,00	104,5	165,3	78,1	16,8	0,00	1,5	7,5	8,2	54,2	86,9	92,4	716,4
2010	60,1	57,3	117,00	29,9	0,00	2,3	0,00	0,00	9,2	20,7	45,7	123,2	465,4
2011	145,6	60,9	133,4	63,4	5,6	0,6	12,00	0,00	5,4	22,4	79,7	129,9	658,9
2012	78,8	131,6	91,4	113,9	1,8	2,7	0,00	0,00	34,1	35,2	46,5	89,3	625,3
2013	55,8	69,8	152,6	57,4	17,5	32,00	10,3	16,9	23,2	20,00	63,4	87,2	606,1
2014	182,4	197,5	169,1	68,1	39,5	0,00	13,3	20,8	56,2	88,00	65,8	132,5	1033,2
2015	99,85	69,56	115,13	49,36	10,57	0,5	0,06	1,44	1,00	19,13	24,24	88,75	479,6
2016	26,42	115,14	77,35	51,42	14,00	16,4	9,8	2,2	59,5	66,3	3,7	131,7	573,92
2017	196,7	174,9	246,00	123,6	47,3	0,00	0,00	5,6	22,9	56,9	57,5	135,9	1067,3
2018	148,1	109,4	172,7	143,1	37,00	16,7	6,6	15,4	28,8	85,5	81,8	83,8	928,9
2019	173,5	188,9	181,2	102,8	23,9	6,4	15,6	0,00	44,4	55,7	94,00	251,2	1137,6
2020	102,1	65,1	56,7	32,5	20,3	0,00	0,00	0,00	5,8	13,5	27,8	211,9	535,7
2021	179,16	23,79	133,87	39,17	0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	23,9	22,1	123,7	546,59
2022	250,9	189,5	49,1	12,3	24,5	0,00	0,00	0,00	0,00	10,9	17,3	18,1	572,6

Media	100,59	102,83	113,97	54,03	13,82	3,45	2,39	4,81	17,32	42,41	49,91	88,33	593,85
Max	250,9	200,8	246,00	143,1	47,3	33,9	15,6	26,2	60,1	139,00	111,8	251,2	1137,6
Min	26,42	23,79	35,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,7	7,6	208,5

*Nota.* Tomado de SENAMHI

## Anexo 3.

## Registro de precipitaciones de la estación Gorgor

<b>Año</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Anual</b>
1964	33,1	70,28	125,47	52,37	23,78	0,05	0,05	2,98	8,3	38,53	44,7	26,00	425,59
1965	39,4	92,4	104,4	56,07	6,17	0,00	1,38	4,95	15,18	24,26	13,74	71,26	429,19
1966	78,00	81,92	102,79	47,55	5,47	0,00	0,00	0,00	4,58	70,88	46,72	62,17	500,09
1967	91,4	167,5	112,7	71,3	12,78	2,76	2,88	6,81	60,1	72,6	49,84	28,92	679,58
1968	109,89	46,03	83,09	4,35	18,04	0,4	1,18	12,56	9,76	46,75	97,26	67,55	496,87
1969	48,67	123,84	89,7	59,2	3,9	0,73	1,2	9,53	10,59	31,93	106,92	207,43	693,64
1970	155,25	74,46	100,5	99,03	29,99	3,55	1,2	5,28	64,82	57,35	69,36	75,52	736,31
1971	104,59	119,08	210,56	44,19	1,1	0,35	0,1	9,78	44,32	27,11	111,51	143,2	815,9
1972	143,99	113,79	245,37	74,46	1,52	0,00	0,00	2,93	18,76	22,89	20,96	48,68	693,35
1973	62,34	81,81	88,37	61,07	11,17	0,33	1,7	3,00	36,63	92,05	32,76	154,76	626,01
1974	114,73	164,74	129,46	42,04	0,95	1,28	0,55	6,51	0,9	3,98	21,18	22,34	508,68
1975	49,15	124,19	201,65	31,86	10,77	0,00	0,00	8,23	29,5	32,00	39,9	16,5	543,75
1976	104,34	129,71	109,53	18,84	1,38	6,48	0,67	2,63	3,38	1,4	4,76	22,48	405,61
1977	131,86	117,62	35,78	25,91	39,33	0,2	0,42	0,2	4,48	13,45	56,27	48,87	474,39
1978	63,53	54,22	86,1	28,92	2,58	0,00	3,00	0,93	11,67	13,19	15,17	11,64	290,95
1979	34,66	95,85	115,77	42,04	7,35	0,00	0,00	0,00	10,8	15,28	13,88	34,66	370,28
1980	88,7	21,5	79,7	20,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	81,8	70,5	49,44	411,74
1981	81,43	200,09	192,44	0,00	0,00	0,00	0,00	1,83	0,00	14,35	40,29	42,82	573,26
1982	104,1	114,6	80,89	17,91	1,15	0,00	1,08	0,00	0,00	57,5	65,6	105,3	548,14
1983	162,8	50,8	180,3	102,6	0,00	0,00	0,00	0,00	3,2	12,5	63,3	122,7	698,2
1984	100,3	200,8	166,8	39,5	14,8	0,00	0,00	0,00	0,00	99,4	158,1	60,8	840,5
1985	101,5	95,5	161,8	73,3	22,4	0,00	0,00	0,00	11,3	0,00	0,00	63,6	529,4
1986	74,6	128,4	119,5	61,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,6	51,00	450,1
1987	184,00	91,1	53,5	8,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,5	53,1	415,1
1988	168,1	93,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	66,2	167,7	495,2
1989	250,2	233,00	202,5	43,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	48,8	0,00	0,00	778,1
1990	78,1	33,5	43,1	0,00	0,00	0,00	0,00	3,2	0,00	60,1	97,4	67,6	383,00

1991	54,9	31,6	133,8	41,7	28,3	54,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	345,1
1992	0,00	76,8	150,2	52,3	22,00	5,3	0,00	0,00	10,8	61,7	0,00	29,8	408,9
1993	82,1	51,9	195,6	94,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	423,9
1994	227,4	263,7	149,6	111,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,5	0,00	98,7	858,1
1995	97,6	132,7	226,4	21,2	0,00	0,00	0,00	0,00	7,2	14,2	49,3	92,2	640,8
1996	171,5	172,8	214,2	87,8	26,5	0,00	0,00	0,00	0,00	15,2	5,7	74,8	768,5
1997	91,5	108,1	45,9	32,9	0,00	0,00	0,00	0,00	8,00	11,00	128,2	181,6	607,2
1998	251,8	307,6	234,2	63,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,5	18,4	44,7	951,6
1999	160,3	286,1	202,7	82,3	19,8	0,00	0,00	0,00	0,00	58,8	52,9	121,4	984,3
2000	123,4	187,00	85,2	46,5	20,6	0,00	0,00	0,00	0,00	35,8	40,6	150,00	689,1
2001	174,5	122,3	291,3	0,00	18,9	0,00	0,00	0,00	0,00	37,7	98,5	37,5	780,7
2002	69,3	182,8	180,8	96,5	12,4	0,00	0,00	0,00	15,3	64,8	73,1	59,9	754,9
2003	94,4	68,9	145,5	38,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	29,3	25,5	146,00	548,2
2004	38,8	85,2	80,7	42,4	0,00	0,00	0,00	0,00	26,8	16,9	15,8	80,2	386,8
2005	31,9	88,1	116,2	36,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,9	44,00	335,00
2006	39,5	40,7	65,8	24,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,2	80,8	27,9	294,8
2007	68,4	34,1	113,5	55,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,00	0,00	18,3	298,8
2008	49,5	81,3	91,2	42,4	0,00	6,7	0,00	9,5	3,3	20,2	51,1	43,52	355,2
2009	114,5	145,00	150,6	52,4	12,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28,4	28,7	42,00	573,6
2010	59,7	101,7	119,5	30,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	27,9	102,6	442,00
2011	114,4	83,8	125,8	58,9	0,00	0,00	0,00	0,00	4,9	6,6	64,8	123,7	582,9
2012	62,8	210,9	132,2	82,1	10,1	0,00	0,00	0,00	14,6	26,8	25,1	55,5	620,1
2013	35,9	153,8	183,6	33,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	62,8	39,7	67,9	577,5
2014	102,7	86,2	103,00	41,00	12,4	0,00	0,00	0,00	0,00	9,9	27,8	58,7	441,7
2015	63,1	61,00	97,5	36,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,5	12,8	48,3	325,5
2016	11,6	62,00	61,1	40,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	52,9	228,2
2017	80,2	82,00	119,9	43,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,6	12,3	344,2
2018	57,9	32,8	121,4	27,8	16,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,5	12,8	24,00	301,2
2019	58,8	86,4	59,5	14,2	7,7	0,00	0,00	0,00	13,7	4,8	3,3	52,3	300,7
2020	65,8	59,2	69,4	32,5	20,3	0,00	0,00	0,00	5,8	0,00	27,8	211,9	492,7
2021	52,00	2,1	54,6	25,6	0,00	0,9	0,00	0,00	0,00	23,9	22,1	123,7	304,9
2022	23,4	44,2	49,1	8,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,2	0,00	18,1	144,5

Media	93,02	109,37	125,28	44,48	7,49	1,42	0,26	1,54	7,77	26,21	39,04	69,43	525,32
Max	251,8	307,6	291,3	111,2	39,33	54,8	3,00	12,56	64,82	99,4	158,1	211,9	984,3
Min	0,00	2,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	144,5

*Nota.* Tomado de SENAMHI

## Anexo 4.

## Resultados de los ensayos de las 17 muestras de sedimentos

## Figura 55

## Resultados de ensayos de la muestra 1- tramo 1



## PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO

OFICINA DE PRESUPUESTO, PLANEACIÓN, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

MINISTERIO DE LA URBANIDAD, LA VIVIENDA Y EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL

<b>Proyecto:</b>	"Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"		
<b>Sector:</b>	Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima		
<b>Muestra:</b>	Tramo N° 01 - Muestra N° 01		
<b>Material:</b>	Sedimentos		
<b>Para Uso :</b>	Cuantificación de sedimentos transportados en el río.	<b>Kilometraje</b>	-
<b>Perforación:</b>	Extracción	<b>Prof. de Muestra:</b>	0.45 m - 1.00 m
<b>Hecho Por:</b>	Laboratorio Mecánica de Suelos PEAM	<b>Fecha:</b>	8/01/2023

## DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD NATURAL ASTM D - 2216

LATA	1	2	3
PESO DE LATA grs	61.48	61.50	61.46
PESO DEL SUELO HUMEDO + LATA grs	238.58	238.62	238.51
PESO DEL SUELO SECO + LATA grs	226.37	226.40	226.34
PESO DEL AGUA grs	12.21	12.22	12.17
PESO DEL SUELO SECO grs	164.89	164.90	164.88
% DE HUMEDAD	7.40	7.41	7.38
PROMEDIO % DE HUMEDAD	7.40		

## DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCION DE AGREGADO FINO ASTM C - 128

		1	2	PROMEDIO
Peso Material Saturado Superficialmente Seco (En Aire)	gr.	176.65	177.55	
Peso Frasco + Agua	gr.	683.25	684.49	
Peso Frasco + Agua + A	gr.	860.25	861.69	
Peso del Material + Agua en el Frasco	gr.	777.15	777.77	
Volumen de Masa + Volumen de Vacío	gr	83.10	83.92	
Peso de Material Seco en Estufa (105° C)	gr	164.55	165.23	
Volumen de Masa	cc	71.00	71.60	
Pe Bulk (Base Seca)	gr./cc	1.98	1.97	1.97
Pe Bulk (Base Saturada)	gr./cc	2.13	2.12	2.12
Pe Aparente (Base Seca)	gr./cc	2.32	2.31	2.31

## PESO UNITARIO SUELTO ASTM D - 4253

ENSAYO	1	2	
PESO MOLDE + MATERIAL	5,320	5,322	grs.
PESO DE MOLDE	3,880	3,880	grs.
PESO DE MATERIAL	1,440	1,442	grs.
VOLUMEN DE MOLDE	911.000	911.000	cm3
PESO UNITARIO	1.581	1.583	gr/cm3
PROMEDIO	1.582		



## Figura 56

### Resultados de ensayos de la muestra 2- tramo 1



**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**  
OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

<b>Proyecto:</b>	"Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"	
<b>Sector:</b>	Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima	
<b>Muestra:</b>	Tramo N° 01 - Muestra N° 02	
<b>Material:</b>	Sedimentos	
<b>Para Uso :</b>	Cuantificación de sedimentos transportados en el río.	<b>Kilometraje:</b>
<b>Perforación:</b>	Extracción	<b>Prof. de Muestra:</b> 0.45 m - 1.00 m
<b>Hecho Por:</b>	Laboratorio Mecánica de Suelos PEAM	<b>Fecha:</b> 8/01/2023

#### DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD NATURAL ASTM D - 2216

LATA	1	2	3
PESO DE LATA grs	80.25	80.77	81.29
PESO DEL SUELO HUMEDO + LATA grs	335.18	336.00	336.82
PESO DEL SUELO SECO + LATA grs	330.46	331.08	331.70
PESO DEL AGUA grs	4.72	4.92	5.12
PESO DEL SUELO SECO grs	250.21	250.31	250.41
% DE HUMEDAD	1.89	1.97	2.04
PROMEDIO % DE HUMEDAD	1.97		

#### DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCION DE AGREGADO FINO ASTM C - 128

		1	2	PROMEDIO
Peso Material Saturado Superficialmente Seco (En Aire)	gr.	254.99	255.47	
Peso Frasco + Agua	gr.	658.52	659.00	
Peso Frasco + Agua + A	gr.	913.75	914.23	
Peso del Material + Agua en el Frasco	gr.	806.15	806.63	
Volumen de Masa + Volumen de Vacío	gr	107.60	107.60	
Peso de Material Seco en Estufa (105° C)	gr	250.07	250.55	
Volumen de Masa	cc	102.68	102.68	
Pe Bulk (Base Seca)	gr./cc	2.32	2.33	2.33
Pe Bulk (Base Saturada)	gr./cc	2.37	2.37	2.37
Pe Aparente (Base Seca)	gr./cc	2.44	2.44	2.44

#### PESO UNITARIO SUELTO ASTM D - 4253

ENSAYO	1	2	
PESO MOLDE + MATERIAL	5,320	5,322	grs.
PESO DE MOLDE	3,880	3,880	grs.
PESO DE MATERIAL	1,440	1,442	grs.
VOLUMEN DE MOLDE	911.000	911.000	cm3
PESO UNITARIO	1.581	1.583	gr/cm3
PROMEDIO	1.582		

CHRISTIAN EDUARDO ROS PEREDES  
 INGENIERO CIVIL  
 C.O. N° 185356

## Figura 57

### Resultados de ensayos de la muestra 3- tramo 1



#### PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO

OFICINA DE PRESUPUESTO, PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

<b>Proyecto:</b>	"Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"		
<b>Sector:</b>	Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima		
<b>Muestra:</b>	Tramo N° 01 - Muestra N° 03		
<b>Material:</b>	Sedimentos		
<b>Para Uso :</b>	Cuantificación de sedimentos transportados en el río.	<b>Kilometraje:</b>	-
<b>Perforación:</b>	Extracción	<b>Prof. de Muestra:</b>	0.45 m - 1.00 m
<b>Hecho Por:</b>	Laboratorio Mecánica de Suelos PEAM	<b>Fecha:</b>	8/01/2023

#### DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD NATURAL ASTM D - 2216

LATA	1	2	3
PESO DE LATA grs	80.46	80.89	81.32
PESO DEL SUELO HUMEDO + LATA grs	329.44	329.87	330.30
PESO DEL SUELO SECO + LATA grs	321.91	322.34	322.77
PESO DEL AGUA grs	7.53	7.53	7.53
PESO DEL SUELO SECO grs	241.45	241.45	241.45
% DE HUMEDAD	3.12	3.12	3.12
PROMEDIO % DE HUMEDAD	3.12		

#### DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCION DE AGREGADO FINO ASTM C - 128

		1	2	PROMEDIO
Peso Material Saturado Superficialmente Seco (En Aire)	gr.	248.45	249.51	
Peso Frasco + Agua	gr.	658.71	659.77	
Peso Frasco + Agua + A	gr.	907.69	908.75	
Peso del Material + Agua en el Frasco	gr.	798.31	799.37	
Volumen de Masa + Volumen de Vacío	gr	109.38	109.38	
Peso de Material Seco en Estufa (105° C)	gr	240.92	241.98	
Volumen de Masa	cc	101.85	101.85	
Pe Bulk (Base Seca)	gr./cc	2.20	2.21	2.21
Pe Bulk (Base Saturada)	gr./cc	2.27	2.28	2.28
Pe Aparente (Base Seca)	gr./cc	2.37	2.38	2.37

#### PESO UNITARIO SUELTO ASTM D - 4253

ENSAYO	1	2	
PESO MOLDE + MATERIAL	5,320	5,322	grs.
PESO DE MOLDE	3,880	3,880	grs.
PESO DE MATERIAL	1,440	1,442	grs.
VOLUMEN DE MOLDE	911.000	911.000	cm3
PESO UNITARIO	1.581	1.583	gr/cm3
PROMEDIO	1.582		



## Figura 58

### Resultados de ensayos de la muestra 4- tramo 1



**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**  
OFICINA DE PRESUPUESTO, PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL  
GOBIERNO REGIONAL SAN MARTIN

<b>Proyecto:</b>	"Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"		
<b>Sector:</b>	Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima		
<b>Muestra:</b>	Tramo N° 01 - Muestra N° 04		
<b>Material:</b>	Sedimentos		
<b>Para Uso :</b>	Cuantificación de sedimentos transportados en el río.	<b>Kilometraje:</b>	-
<b>Perforación:</b>	Extracción	<b>Prof. de Muestra:</b>	0.45 m - 1.00 m
<b>Hecho Por:</b>	Laboratorio Mecánica de Suelos PEAM	<b>Fecha:</b>	8/01/2023

#### DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD NATURAL ASTM D - 2216

LATA	1	2	3
PESO DE LATA grs	81.00	81.62	82.24
PESO DEL SUELO HUMEDO + LATA grs	323.26	323.88	324.50
PESO DEL SUELO SECO + LATA grs	273.68	274.30	274.92
PESO DEL AGUA grs	49.58	49.58	49.58
PESO DEL SUELO SECO grs	192.68	192.68	192.68
% DE HUMEDAD	25.73	25.73	25.73
PROMEDIO % DE HUMEDAD	25.73		

#### DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCION DE AGREGADO FINO ASTM C - 128

		1	2	PROMEDIO
Peso Material Saturado Superficialmente Seco (En Aire)	gr.	241.61	242.88	
Peso Frasco + Agua	gr.	658.14	659.38	
Peso Frasco + Agua + A	gr.	900.40	901.64	
Peso del Material + Agua en el Frasco	gr.	794.56	795.80	
Volumen de Masa + Volumen de Vacío	gr	105.84	105.84	
Peso de Material Seco en Estufa (105° C)	gr	192.06	193.30	
Volumen de Masa	cc	56.29	56.26	
Pe Bulk (Base Seca)	gr./cc	1.81	1.83	1.82
Pe Bulk (Base Saturada)	gr./cc	2.28	2.29	2.29
Pe Aparente (Base Seca)	gr./cc	3.41	3.44	3.42

#### PESO UNITARIO SUELTO ASTM D - 4253

ENSAYO	1	2	
PESO MOLDE + MATERIAL	5,320	5,322	grs.
PESO DE MOLDE	3,880	3,880	grs.
PESO DE MATERIAL	1,440	1,442	grs.
VOLUMEN DE MOLDE	911.000	911.000	cm3
PESO UNITARIO	1.581	1.583	gr/cm3
PROMEDIO	1.582		

  
 CHRISTIAN FERNANDO PINOS FEREDIDES  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP N° 185396

Figura 59

## Resultados de ensayos de la muestra 5- tramo 1



## PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO

OFICINA DE PRESUPUESTO, PLANIFICACIÓN, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

MAYO DE LA CIUDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO

<b>Proyecto:</b>	"Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"		
<b>Sector:</b>	Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima		
<b>Muestra:</b>	Tramo N° 01 - Muestra N° 05		
<b>Material:</b>	Sedimentos		
<b>Para Uso :</b>	Cuantificación de sedimentos transportados en el río.	<b>Kilometraje:</b>	-
<b>Perforación:</b>	Extracción	<b>Prof. de Muestra:</b>	0.45 m - 1.00 m
<b>Hecho Por:</b>	Laboratorio Mecánica de Suelos PEAM	<b>Fecha:</b>	8/01/2023

**DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD NATURAL ASTM D - 2216**

LATA	1	2	3
PESO DE LATA grs	85.58	85.85	86.12
PESO DEL SUELO HUMEDO + LATA grs	359.08	359.35	359.62
PESO DEL SUELO SECO + LATA grs	319.37	319.64	319.91
PESO DEL AGUA grs	39.71	39.71	39.71
PESO DEL SUELO SECO grs	233.79	233.79	233.79
% DE HUMEDAD	16.99	16.99	16.99
PROMEDIO % DE HUMEDAD	16.99		

**DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCION DE AGREGADO FINO ASTM C - 128**

		1	2	PROMEDIO
Peso Material Saturado Superficialmente Seco (En Aire)	gr.	189.08	189.62	
Peso Frasco + Agua	gr.	683.60	684.14	
Peso Frasco + Agua + A	gr.	872.95	873.49	
Peso del Material + Agua en el Frasco	gr.	817.84	818.38	
Volumen de Masa + Volumen de Vacío	gr	55.11	55.11	
Peso de Material Seco en Estufa (105° C)	gr	233.52	234.06	
Volumen de Masa	cc	99.55	99.55	
Pe Bulk (Base Seca)	gr./cc	4.24	4.25	4.24
Pe Bulk (Base Saturada)	gr./cc	3.43	3.44	3.44
Pe Aparente (Base Seca)	gr./cc	2.35	2.35	2.35

**PESO UNITARIO SUELTO ASTM D - 4253**

ENSAYO	1	2	
PESO MOLDE + MATERIAL	5,320	5,322	grs.
PESO DE MOLDE	3,880	3,880	grs.
PESO DE MATERIAL	1,440	1,442	grs.
VOLUMEN DE MOLDE	911.000	911.000	cm3
PESO UNITARIO	1.581	1.583	gr/cm3
PROMEDIO	1.582		


  
 CHRISTINA CÁRMON PEREDES
   
 INGENIERO CIVIL
   
 C.I. N° 185396

## Figura 62

### Resultados de ensayos de la muestra 6- tramo 1



#### PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO

OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

<b>Proyecto:</b>	"Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"		
<b>Sector:</b>	Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima		
<b>Muestra:</b>	Tramo N° 01 - Muestra N° 06		
<b>Material:</b>	Sedimentos		
<b>Para Uso :</b>	Cuantificación de sedimentos transportados en el río.	<b>Kilometraje:</b>	-
<b>Perforación:</b>	Extracción	<b>Prof. de Muestra:</b>	0.45 m - 1.00 m
<b>Hecho Por:</b>	Laboratorio Mecánica de Suelos PEAM	<b>Fecha:</b>	8/01/2023

#### DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD NATURAL ASTM D - 2216

LATA	1	2	3
PESO DE LATA grs	80.47	80.94	81.41
PESO DEL SUELO HUMEDO + LATA grs	307.25	307.72	308.19
PESO DEL SUELO SECO + LATA grs	303.14	303.61	304.08
PESO DEL AGUA grs	4.11	4.11	4.11
PESO DEL SUELO SECO grs	222.67	222.67	222.67
% DE HUMEDAD	1.85	1.85	1.85
PROMEDIO % DE HUMEDAD	1.85		

#### DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCION DE AGREGADO FINO ASTM C - 128

		1	2	PROMEDIO
Peso Material Saturado Superficialmente Seco (En Aire)	gr.	226.31	227.25	
Peso Frasco + Agua	gr.	683.40	684.34	
Peso Frasco + Agua + A	gr.	910.18	911.12	
Peso del Material + Agua en el Frasco	gr.	817.16	818.10	
Volumen de Masa + Volumen de Vacío	gr	93.02	93.02	
Peso de Material Seco en Estufa (105° C)	gr	222.20	223.14	
Volumen de Masa	cc	88.91	88.91	
Pe Bulk (Base Seca)	gr./cc	2.39	2.40	2.39
Pe Bulk (Base Saturada)	gr./cc	2.43	2.44	2.44
Pe Aparente (Base Seca)	gr./cc	2.50	2.51	2.50

#### PESO UNITARIO SUELTO ASTM D - 4253

ENSAYO	1	2	
PESO MOLDE + MATERIAL	5,320	5,322	grs.
PESO DE MOLDE	3,880	3,880	grs.
PESO DE MATERIAL	1,440	1,442	grs.
VOLUMEN DE MOLDE	911,000	911,000	cm3
PESO UNITARIO	1.581	1.583	gr/cm3
PROMEDIO	1.582		

  
 CHRISTIAN EDUARDO PEREDES  
 INGENIERO CIVIL  
 C. N° 185396

**Figura 65**  
Resultados de ensayos de la muestra 7- tramo 1



**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**

OFICINA DE PRESUPUESTO, PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

TAMBO DE LA UNIDAD: LA PAZ Y EL DESARROLLO

<b>Proyecto:</b>	"Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"	
<b>Sector:</b>	Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima	
<b>Muestra:</b>	Tramo N° 01 - Muestra N° 07	
<b>Material:</b>	Sedimentos	
<b>Para Uso :</b>	Cuantificación de sedimentos transportados en el río.	<b>Kilometraje:</b> -
<b>Perforación:</b>	Extracción	<b>Prof. de Muestra:</b> 0.45 m - 1.00 m
<b>Hecho Por:</b>	Laboratorio Mecánica de Suelos PEAM	<b>Fecha:</b> 8/01/2023

**DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD NATURAL ASTM D - 2216**

LATA	1	2	3
PESO DE LATA grs	80.13	80.60	81.07
PESO DEL SUELO HUMEDO + LATA grs	246.39	246.86	247.33
PESO DEL SUELO SECO + LATA grs	208.68	209.15	209.62
PESO DEL AGUA grs	37.71	37.71	37.71
PESO DEL SUELO SECO grs	128.55	128.55	128.55
% DE HUMEDAD	29.33	29.33	29.33
PROMEDIO % DE HUMEDAD	29.33		

**DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCION DE AGREGADO FINO ASTM C - 128**

		1	2	PROMEDIO
Peso Material Saturado Superficialmente Seco (En Aire)	gr.	165.79	166.73	
Peso Frasco + Agua	gr.	658.29	659.23	
Peso Frasco + Agua + A	gr.	824.55	825.49	
Peso del Material + Agua en el Frasco	gr.	731.53	732.47	
Volumen de Masa + Volumen de Vacío	gr	93.02	93.02	
Peso de Material Seco en Estufa (105° C)	gr	128.08	129.02	
Volumen de Masa	cc	55.31	55.31	
Pe Bulk (Base Seca)	gr./cc	1.38	1.39	1.38
Pe Bulk (Base Saturada)	gr./cc	1.78	1.79	1.79
Pe Aparente (Base Seca)	gr./cc	2.32	2.33	2.32

**PESO UNITARIO SUELTO ASTM D - 4253**

ENSAYO	1	2	
PESO MOLDE + MATERIAL	5,320	5,322	grs.
PESO DE MOLDE	3,880	3,880	grs.
PESO DE MATERIAL	1,440	1,442	grs.
VOLUMEN DE MOLDE	911.000	911.000	cm3
PESO UNITARIO	1.581	1.583	gr/cm3
PROMEDIO	1.582		



Figura 68

Resultados de ensayos de la muestra 8- tramo 1



**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**  
 OFICINA DE PRESUPUESTO, PLANIFICACIÓN, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL  
 MUNICIPIO DE SAN MARTÍN

**Proyecto:** "Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"

**Sector:** Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima

**Muestra:** Tramo N° 01 - Muestra N° 08

**Material:** Sedimentos

**Para Uso :** Cuantificación de sedimentos transportados en el río. **Kilometraje** -

**Perforación:** Extracción **Prof. de Muestra:** 0.45 m - 1.00 m

**Hecho Por:** Laboratorio Mecánica de Suelos PEAM **Fecha:** 8/01/2023

**DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD NATURAL ASTM D - 2216**

LATA	1	2	3
PESO DE LATA grs	78.27	78.80	79.33
PESO DEL SUELO HUMEDO + LATA grs	318.96	319.49	320.02
PESO DEL SUELO SECO + LATA grs	314.65	315.18	315.71
PESO DEL AGUA grs	4.31	4.31	4.31
PESO DEL SUELO SECO grs	236.38	236.38	236.38
% DE HUMEDAD	1.82	1.82	1.82
PROMEDIO % DE HUMEDAD	1.82		

**DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCION DE AGREGADO FINO ASTM C - 128**

		1	2	PROMEDIO
Peso Material Saturado Superficialmente Seco (En Aire)	gr.	240.16	241.22	
Peso Frasco + Agua	gr.	658.71	659.77	
Peso Frasco + Agua + A	gr.	899.40	900.46	
Peso del Material + Agua en el Frasco	gr.	796.65	797.71	
Volumen de Masa + Volumen de Vacío	gr	102.75	102.75	
Peso de Material Seco en Estufa (105° C)	gr	235.85	236.91	
Volumen de Masa	cc	98.44	98.44	
Pe Bulk (Base Seca)	gr./cc	2.30	2.31	2.30
Pe Bulk (Base Saturada)	gr./cc	2.34	2.35	2.34
Pe Aparente (Base Seca)	gr./cc	2.40	2.41	2.40

**PESO UNITARIO SUELTO ASTM D - 4253**

ENSAYO	1	2	
PESO MOLDE + MATERIAL	5,320	5,322	grs.
PESO DE MOLDE	3,880	3,880	grs.
PESO DE MATERIAL	1,440	1,442	grs.
VOLUMEN DE MOLDE	911.000	911.000	cm3
PESO UNITARIO	1.581	1.583	gr/cm3
PROMEDIO	1.582		



CHRISTIAN EDUARDO PINEDA PEREDES  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP N° 185396

Figura 71

Resultados de ensayos de la muestra 1- tramo 2



**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**  
OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

<b>Proyecto:</b>	"Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"		
<b>Sector:</b>	Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima		
<b>Muestra:</b>	Tramo N° 02 - Muestra N° 01		
<b>Material:</b>	Sedimentos		
<b>Para Uso :</b>	Cuantificación de sedimentos transportados en el río.	<b>Kilometraje:</b>	-
<b>Perforación:</b>	Extracción	<b>Prof. de Muestra:</b>	0.25 m - 1.00 m
<b>Hecho Por:</b>	Laboratorio Mecánica de Suelos PEAM	<b>Fecha:</b>	8/01/2023

**DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD NATURAL ASTM D - 2216**

LATA	1	2	3
PESO DE LATA grs	64.15	64.76	65.37
PESO DEL SUELO HUMEDO + LATA grs	254.74	255.35	255.96
PESO DEL SUELO SECO + LATA grs	247.87	248.48	249.09
PESO DEL AGUA grs	6.87	6.87	6.87
PESO DEL SUELO SECO grs	183.72	183.72	183.72
% DE HUMEDAD	3.74	3.74	3.74
PROMEDIO % DE HUMEDAD	3.74		

**DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCION DE AGREGADO FINO ASTM C - 128**

		1	2	PROMEDIO
Peso Material Saturado Superficialmente Seco (En Aire)	gr.	189.97	191.21	
Peso Frasco + Agua	gr.	658.62	659.86	
Peso Frasco + Agua + A	gr.	849.21	850.45	
Peso del Material + Agua en el Frasco	gr.	760.73	761.97	
Volumen de Masa + Volumen de Vacío	gr	88.48	88.48	
Peso de Material Seco en Estufa (105° C)	gr	183.10	184.34	
Volumen de Masa	cc	81.61	81.61	
Pe Bulk (Base Seca)	gr./cc	2.07	2.08	<b>2.08</b>
Pe Bulk (Base Saturada)	gr./cc	2.15	2.16	<b>2.15</b>
Pe Aparente (Base Seca)	gr./cc	<b>2.24</b>	<b>2.26</b>	<b>2.25</b>

**PESO UNITARIO SUELTO ASTM D - 4253**

ENSAYO	1	2	
PESO MOLDE + MATERIAL	5,380	5,380	grs.
PESO DE MOLDE	3,880	3,880	grs.
PESO DE MATERIAL	1,500	1,506	grs.
VOLUMEN DE MOLDE	911.0000	911.0000	cm3
PESO UNITARIO	1.647	1.653	gr/cm3
PROMEDIO	1.650		

  
 CHRISTIAN ESPINOZA PEREDES  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP N° 185396

Figura 74

## Resultados de ensayos de la muestra 2- tramo 2

			<b>PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO</b>	
	<small>OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL</small>			
	<small>TABO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DELIBERACION</small>			
<b>Proyecto:</b>	"Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"			
<b>Sector:</b>	Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima			
<b>Muestra:</b>	Tramo N° 02 - Muestra N° 02			
<b>Material:</b>	Sedimentos			
<b>Para Uso :</b>	Cuantificación de sedimentos transportados en el río.	<b>Kilometraje:</b>	-	
<b>Perforación:</b>	Extracción	<b>Prof. de Muestra:</b>	0.25 m - 1.00 m	
<b>Hecho Por:</b>	Laboratorio Mecánica de Suelos PEAM	<b>Fecha:</b>	8/01/2023	

**DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD NATURAL ASTM D - 2216**

LATA	1	2	3
PESO DE LATA grs	61.08	61.55	60.61
PESO DEL SUELO HUMEDO + LATA grs	273.17	273.64	272.70
PESO DEL SUELO SECO + LATA grs	271.43	271.90	270.96
PESO DEL AGUA grs	1.74	1.74	1.74
PESO DEL SUELO SECO grs	210.35	210.35	210.35
% DE HUMEDAD	0.83	0.83	0.83
PROMEDIO % DE HUMEDAD	0.83		

**DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCION DE AGREGADO FINO ASTM C - 128**

		1	2	PROMEDIO
Peso Material Saturado Superficialmente Seco (En Aire)	gr.	211.62	212.56	
Peso Frasco + Agua	gr.	658.77	659.71	
Peso Frasco + Agua + A	gr.	870.86	871.80	
Peso del Material + Agua en el Frasco	gr.	777.69	778.63	
Volumen de Masa + Volumen de Vacío	gr	93.17	93.17	
Peso de Material Seco en Estufa (105° C)	gr	209.88	210.82	
Volumen de Masa	cc	91.43	91.43	
Pe Bulk (Base Seca)	gr./cc	2.25	2.26	2.26
Pe Bulk (Base Saturada)	gr./cc	2.27	2.28	2.28
Pe Aparente (Base Seca)	gr./cc	2.30	2.31	2.30

**PESO UNITARIO SUELTO ASTM D - 4253**

ENSAYO	1	2	
PESO MOLDE + MATERIAL	5,380	5,380	grs.
PESO DE MOLDE	3,880	3,880	grs.
PESO DE MATERIAL	1,500	1,506	grs.
VOLUMEN DE MOLDE	911.0000	911.0000	cm3
PESO UNITARIO	1.647	1.653	gr/cm3
PROMEDIO	1.650		

 CHRISTIAN ESQUIVEL PEREDES  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP N° 185396

Figura 77

## Resultados de ensayos de la muestra 3- tramo 2

			<b>PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO</b>	
	<small>OFICINA DE PRESUPUESTO PLANEACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL</small>			
	<small>AV. DE LA UNIDAD, LA FAJ Y EL DESARROLLO</small>			
<b>Proyecto:</b>	"Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"			
<b>Sector:</b>	Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima			
<b>Muestra:</b>	Tramo N° 02 - Muestra N° 03			
<b>Material:</b>	Sedimentos			
<b>Para Uso :</b>	Cuantificación de sedimentos transportados en el río.	<b>Kilometraje</b>	-	
<b>Perforación:</b>	Extracción	<b>Prof. de Muestra:</b>	0.25 m - 1.00 m	
<b>Hecho Por:</b>	Laboratorio Mecánica de Suelos PEAM	<b>Fecha:</b>	8/01/2023	

**DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD NATURAL ASTM D - 2216**

LATA	1	2	3
PESO DE LATA grs	62.37	61.98	62.76
PESO DEL SUELO HUMEDO + LATA grs	246.72	246.33	247.11
PESO DEL SUELO SECO + LATA grs	245.70	245.31	246.09
PESO DEL AGUA grs	1.02	1.02	1.02
PESO DEL SUELO SECO grs	183.33	183.33	183.33
% DE HUMEDAD	0.56	0.56	0.56
PROMEDIO % DE HUMEDAD	0.56		

**DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCION DE AGREGADO FINO ASTM C - 128**

		1	2	PROMEDIO
Peso Material Saturado Superficialmente Seco (En Aire)	gr.	183.96	184.74	
Peso Frasco + Agua	gr.	658.37	659.15	
Peso Frasco + Agua + A	gr.	842.72	843.50	
Peso del Material + Agua en el Frasco	gr.	763.71	764.49	
Volumen de Masa + Volumen de Vacío	gr	79.01	79.01	
Peso de Material Seco en Estufa (105° C)	gr	182.94	183.72	
Volumen de Masa	cc	77.99	77.99	
Pe Bulk (Base Seca)	gr./cc	2.32	2.33	2.32
Pe Bulk (Base Saturada)	gr./cc	2.33	2.34	2.33
Pe Aparente (Base Seca)	gr./cc	2.35	2.36	2.35

**PESO UNITARIO SUELTO ASTM D - 4253**

ENSAYO	1	2	
PESO MOLDE + MATERIAL	5,380	5,380	grs.
PESO DE MOLDE	3,880	3,880	grs.
PESO DE MATERIAL	1,500	1,506	grs.
VOLUMEN DE MOLDE	911.0000	911.0000	cm3
PESO UNITARIO	1.647	1.653	gr/cm3
PROMEDIO	1.650		



## Figura 80

### Resultados de ensayos de la muestra 4- tramo 2



#### PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO

OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SAN MARTÍN

<b>Proyecto:</b>	"Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"		
<b>Sector:</b>	Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima		
<b>Muestra:</b>	Tramo N° 02 - Muestra N° 04		
<b>Material:</b>	Sedimentos		
<b>Para Uso :</b>	Cuantificación de sedimentos transportados en el río.	<b>Kilometraje:</b>	-
<b>Perforación:</b>	Extracción	<b>Prof. de Muestra:</b>	0.25 m - 1.00 m
<b>Hecho Por:</b>	Laboratorio Mecánica de Suelos PEAM	<b>Fecha:</b>	8/01/2023

#### DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD NATURAL ASTM D - 2216

LATA	1	2	3
PESO DE LATA grs	80.40	79.99	80.81
PESO DEL SUELO HUMEDO + LATA grs	311.29	310.88	311.70
PESO DEL SUELO SECO + LATA grs	307.40	306.99	307.81
PESO DEL AGUA grs	3.89	3.89	3.89
PESO DEL SUELO SECO grs	227.00	227.00	227.00
% DE HUMEDAD	1.71	1.71	1.71
PROMEDIO % DE HUMEDAD	1.71		

#### DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCION DE AGREGADO FINO ASTM C - 128

		1	2	PROMEDIO
Peso Material Saturado Superficialmente Seco (En Aire)	gr.	230.48	231.30	
Peso Frasco + Agua	gr.	658.35	659.17	
Peso Frasco + Agua + A	gr.	889.24	890.06	
Peso del Material + Agua en el Frasco	gr.	789.93	790.75	
Volumen de Masa + Volumen de Vacío	gr	99.31	99.31	
Peso de Material Seco en Estufa (105° C)	gr	226.59	227.41	
Volumen de Masa	cc	95.42	95.42	
Pe Bulk (Base Seca)	gr./cc	2.28	2.29	2.29
Pe Bulk (Base Saturada)	gr./cc	2.32	2.33	2.32
Pe Aparente (Base Seca)	gr./cc	2.37	2.38	2.38

#### PESO UNITARIO SUELTO ASTM D - 4253

ENSAYO	1	2	
PESO MOLDE + MATERIAL	5,380	5,380	grs.
PESO DE MOLDE	3,880	3,880	grs.
PESO DE MATERIAL	1,500	1,506	grs.
VOLUMEN DE MOLDE	911.0000	911.0000	cm3
PESO UNITARIO	1.647	1.653	gr/cm3
PROMEDIO	1.650		



**Figura 83***Resultados de ensayos de la muestra 5- tramo 2*

**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**  
 OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

<b>Proyecto:</b>	"Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"		
<b>Sector:</b>	Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima		
<b>Muestra:</b>	Tramo N° 02 - Muestra N° 05		
<b>Material:</b>	Sedimentos		
<b>Para Uso :</b>	Cuantificación de sedimentos transportados en el río.	<b>Kilometraje:</b>	-
<b>Perforación:</b>	Extracción	<b>Prof. de Muestra:</b>	0.25 m - 1.00 m
<b>Hecho Por:</b>	Laboratorio Mecánica de Suelos PEAM	<b>Fecha:</b>	8/01/2023

**DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD NATURAL ASTM D - 2216**

LATA	1	2	3
PESO DE LATA grs	78.68	78.31	79.05
PESO DEL SUELO HUMEDO + LATA grs	302.44	302.07	302.81
PESO DEL SUELO SECO + LATA grs	300.56	300.19	300.93
PESO DEL AGUA grs	1.88	1.88	1.88
PESO DEL SUELO SECO grs	221.88	221.88	221.88
% DE HUMEDAD	0.85	0.85	0.85
PROMEDIO % DE HUMEDAD	0.85		

**DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCION DE AGREGADO FINO ASTM C - 128**

		1	2	PROMEDIO
Peso Material Saturado Superficialmente Seco (En Aire)	gr.	223.39	224.13	
Peso Frasco + Agua	gr.	683.50	684.24	
Peso Frasco + Agua + A	gr.	907.26	908.00	
Peso del Material + Agua en el Frasco	gr.	813.90	814.64	
Volumen de Masa + Volumen de Vacío	gr	93.36	93.36	
Peso de Material Seco en Estufa (105° C)	gr	221.51	222.25	
Volumen de Masa	cc	91.48	91.48	
Pe Bulk (Base Seca)	gr./cc	2.37	2.38	<b>2.38</b>
Pe Bulk (Base Saturada)	gr./cc	2.39	2.40	<b>2.40</b>
Pe Aparente (Base Seca)	gr./cc	<b>2.42</b>	<b>2.43</b>	<b>2.43</b>

**PESO UNITARIO SUELTO ASTM D - 4253**

ENSAYO	1	2	
PESO MOLDE + MATERIAL	5,380	5,380	grs.
PESO DE MOLDE	3,880	3,880	grs.
PESO DE MATERIAL	1,500	1,506	grs.
VOLUMEN DE MOLDE	911.0000	911.0000	cm3
PESO UNITARIO	1.647	1.653	gr/cm3
PROMEDIO	1.650		



**Figura 86****Resultados de ensayos de la muestra 6- tramo 2****PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**

OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

"AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO"

<b>Proyecto:</b>	"Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"	
<b>Sector:</b>	Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima	
<b>Muestra:</b>	Tramo N° 02 - Muestra N° 06	
<b>Material:</b>	Sedimentos	
<b>Para Uso :</b>	Cuantificación de sedimentos transportados en el río.	
<b>Perforación:</b>	Extracción	<b>Kilometraje:</b> -
<b>Hecho Por:</b>	Laboratorio Mecánica de Suelos PEAM	<b>Prof. de Muestra:</b> 0.25 m - 1.00 m
		<b>Fecha:</b> 8/01/2023

**DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD NATURAL ASTM D - 2216**

LATA	1	2	3
PESO DE LATA grs	62.92	62.38	63.46
PESO DEL SUELO HUMEDO + LATA grs	281.92	281.38	282.46
PESO DEL SUELO SECO + LATA grs	279.75	279.21	280.29
PESO DEL AGUA grs	2.17	2.17	2.17
PESO DEL SUELO SECO grs	216.83	216.83	216.83
% DE HUMEDAD	1.00	1.00	1.00
PROMEDIO % DE HUMEDAD	1.00		

**DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCION DE AGREGADO FINO ASTM C - 128**

		1	2	PROMEDIO
Peso Material Saturado Superficialmente Seco (En Aire)	gr.	218.46	219.54	
Peso Frasco + Agua	gr.	683.33	684.41	
Peso Frasco + Agua + A	gr.	902.33	903.41	
Peso del Material + Agua en el Frasco	gr.	807.93	809.01	
Volumen de Masa + Volumen de Vacío	gr	94.40	94.40	
Peso de Material Seco en Estufa (105° C)	gr	216.29	217.37	
Volumen de Masa	cc	92.23	92.23	
Pe Bulk (Base Seca)	gr./cc	2.29	2.30	<b>2.30</b>
Pe Bulk (Base Saturada)	gr./cc	2.31	2.33	<b>2.32</b>
Pe Aparente (Base Seca)	gr./cc	<b>2.35</b>	<b>2.36</b>	<b>2.35</b>

**PESO UNITARIO SUELTO ASTM D - 4253**

ENSAYO	1	2	
PESO MOLDE + MATERIAL	5,380	5,380	grs.
PESO DE MOLDE	3,880	3,880	grs.
PESO DE MATERIAL	1,500	1,506	grs.
VOLUMEN DE MOLDE	911.0000	911.0000	cm3
PESO UNITARIO	1.647	1.653	gr/cm3
PROMEDIO	1.650		

CHRISTIAN EDUARDO RÍOS PEREDES  
INGENIERO CIVIL  
CIP N° 185396

## Figura 89

### Resultados de ensayos de la muestra 7- tramo 2



<b>Proyecto:</b>	"Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"	
<b>Sector:</b>	Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima	
<b>Muestra:</b>	Tramo N° 02 - Muestra N° 07	
<b>Material:</b>	Sedimentos	
<b>Para Uso :</b>	Cuantificación de sedimentos transportados en el río.	
<b>Perforación:</b>	Extracción	<b>Kilometraje:</b> -
<b>Hecho Por:</b>	Laboratorio Mecánica de Suelos PEAM	<b>Prof. de Muestra:</b> 0.25 m - 1.00 m
		<b>Fecha:</b> 8/01/2023

#### DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD NATURAL ASTM D - 2216

LATA	1	2	3
PESO DE LATA grs	64.89	64.35	65.43
PESO DEL SUELO HUMEDO + LATA grs	239.55	239.01	240.09
PESO DEL SUELO SECO + LATA grs	237.38	236.84	237.92
PESO DEL AGUA grs	2.17	2.17	2.17
PESO DEL SUELO SECO grs	172.49	172.49	172.49
% DE HUMEDAD	1.26	1.26	1.26
PROMEDIO % DE HUMEDAD	1.26		

#### DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCION DE AGREGADO FINO ASTM C - 128

		1	2	PROMEDIO
Peso Material Saturado Superficialmente Seco (En Aire)	gr.	174.12	175.20	
Peso Frasco + Agua	gr.	658.22	659.30	
Peso Frasco + Agua + A	gr.	832.88	833.96	
Peso del Material + Agua en el Frasco	gr.	757.77	758.85	
Volumen de Masa + Volumen de Vacío	gr	75.11	75.11	
Peso de Material Seco en Estufa (105° C)	gr	171.95	173.03	
Volumen de Masa	cc	72.94	72.94	
Pe Bulk (Base Seca)	gr./cc	2.29	2.30	2.30
Pe Bulk (Base Saturada)	gr./cc	2.32	2.33	2.33
Pe Aparente (Base Seca)	gr./cc	2.36	2.37	2.36

#### PESO UNITARIO SUELTO ASTM D - 4253

ENSAYO	1	2	
PESO MOLDE + MATERIAL	5,380	5,380	grs.
PESO DE MOLDE	3,880	3,880	grs.
PESO DE MATERIAL	1,500	1,506	grs.
VOLUMEN DE MOLDE	911.0000	911.0000	cm3
PESO UNITARIO	1.647	1.653	gr/cm3
PROMEDIO	1.650		

  
 CHRISTIAN EDUARDO RIOS PEREDES  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP N° 185396

## Figura 92

### Resultados de ensayos de la muestra 8- tramo 2



<b>Proyecto:</b>	"Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"	
<b>Sector:</b>	Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima	
<b>Muestra:</b>	Tramo N° 02 - Muestra N° 08	
<b>Material:</b>	Sedimentos	
<b>Para Uso :</b>	Cuantificación de sedimentos transportados en el río.	<b>Kilometraje:</b> -
<b>Perforación:</b>	Extracción	<b>Prof. de Muestra:</b> 0.25 m - 1.00 m
<b>Hecho Por:</b>	Laboratorio Mecánica de Suelos PEAM	<b>Fecha:</b> 8/01/2023

#### DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD NATURAL ASTM D - 2216

LATA	1	2	3
PESO DE LATA grs	68.46	67.83	69.09
PESO DEL SUELO HUMEDO + LATA grs	287.89	287.26	288.52
PESO DEL SUELO SECO + LATA grs	286.17	285.54	286.80
PESO DEL AGUA grs	1.72	1.72	1.72
PESO DEL SUELO SECO grs	217.71	217.71	217.71
% DE HUMEDAD	0.79	0.79	0.79
PROMEDIO % DE HUMEDAD	0.79		

#### DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCION DE AGREGADO FINO ASTM C - 128

		1	2	PROMEDIO
Peso Material Saturado Superficialmente Seco (En Aire)	gr.	218.80	220.06	
Peso Frasco + Agua	gr.	658.61	659.87	
Peso Frasco + Agua + A	gr.	878.04	879.30	
Peso del Material + Agua en el Frasco	gr.	783.71	784.97	
Volumen de Masa + Volumen de Vacío	gr	94.33	94.33	
Peso de Material Seco en Estufa (105° C)	gr	217.08	218.34	
Volumen de Masa	cc	92.61	92.61	
Pe Bulk (Base Seca)	gr./cc	2.30	2.31	2.31
Pe Bulk (Base Saturada)	gr./cc	2.32	2.33	2.33
Pe Aparente (Base Seca)	gr./cc	2.34	2.36	2.35

#### PESO UNITARIO SUELTO ASTM D - 4253

ENSAYO	1	2	
PESO MOLDE + MATERIAL	5,380	5,380	grs.
PESO DE MOLDE	3,880	3,880	grs.
PESO DE MATERIAL	1,500	1,506	grs.
VOLUMEN DE MOLDE	911.0000	911.0000	cm3
PESO UNITARIO	1.647	1.653	gr/cm3
PROMEDIO	1.650		



## Figura 95

### Resultados de ensayos de la muestra 9- tramo 2



#### PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO

OFICINA DE PRESUPUESTO PLANEACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

"MÁS DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO"

<b>Proyecto:</b>	"Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"		
<b>Sector:</b>	Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima		
<b>Muestra:</b>	Tramo N° 02 - Muestra N° 09		
<b>Material:</b>	Sedimentos		
<b>Para Uso :</b>	Cuantificación de sedimentos transportados en el río.	<b>Kilometraje</b>	-
<b>Perforación:</b>	Extracción	<b>Prof. de Muestra:</b>	0.25 m - 1.00 m
<b>Hecho Por:</b>	Laboratorio Mecánica de Suelos PEAM	<b>Fecha:</b>	8/01/2023

#### DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD NATURAL ASTM D - 2216

LATA	1	2	3
PESO DE LATA grs	64.85	64.34	65.36
PESO DEL SUELO HUMEDO + LATA grs	258.47	257.96	258.98
PESO DEL SUELO SECO + LATA grs	250.19	249.68	250.70
PESO DEL AGUA grs	8.28	8.28	8.28
PESO DEL SUELO SECO grs	185.34	185.34	185.34
% DE HUMEDAD	4.47	4.47	4.47
PROMEDIO % DE HUMEDAD	4.47		

#### DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCION DE AGREGADO FINO ASTM C - 128

		1	2	PROMEDIO
Peso Material Saturado Superficialmente Seco (En Aire)	gr.	193.11	194.13	
Peso Frasco + Agua	gr.	658.25	659.27	
Peso Frasco + Agua + A	gr.	851.87	852.89	
Peso del Material + Agua en el Frasco	gr.	763.69	764.71	
Volumen de Masa + Volumen de Vacío	gr	88.18	88.18	
Peso de Material Seco en Estufa (105° C)	gr	184.83	185.85	
Volumen de Masa	cc	79.90	79.90	
Pe Bulk (Base Seca)	gr./cc	2.10	2.11	2.10
Pe Bulk (Base Saturada)	gr./cc	2.19	2.20	2.20
Pe Aparente (Base Seca)	gr./cc	2.31	2.33	2.32

#### PESO UNITARIO SUELTO ASTM D - 4253

ENSAYO	1	2	
PESO MOLDE + MATERIAL	0	0	grs.
PESO DE MOLDE	0	0	grs.
PESO DE MATERIAL	0	0	grs.
VOLUMEN DE MOLDE	0.1000	0.1000	grs.
PESO UNITARIO	0	0	%
PROMEDIO	0		



Figura 98

Resultados de granulometría de la muestra 1- tramo 1



**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**  
 OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

Proyecto: "Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"  
 Localización: Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima  
 Muestra: Tramo N°01 - Muestra N° 01  
 Material: Sedimentos  
 Para Uso: Cuantificación de sedimentos transportados en el río.

Perforación: Extracción  
 Kilometraje: -  
 Profundidad de Muestra: 1.10 - 1.50 m.  
 Hecho Por: Laboratorio Mecánica de Suelos I  
 Fecha: -

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO ASTM D - 422

Tamices	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Especificaciones	Tamaño Máximo:
5"	127.00					Modulo de Fineza AF:
4"	101.60					Modulo de Fineza AG:
3"	76.20					Equivalente de Arena:
2"	50.80					Descripción Muestra:
1 1/2"	38.10					Arcilla limo arenosa
1"	25.40					SUCS =
3/4"	19.050					SP
1/2"	12.700					AASHTO =
3/8"	9.525					A1-b(1)
1/4"	6.350					LL = 0.00
Nº 4	4.760	0.00	0.00%	100.00%		LP = 0.00
Nº 8	2.380	1.35	0.82%	99.18%		IP = 0.00
Nº 10	2.000	3.56	2.16%	97.01%		IG =
Nº 16	1.190	7.59	4.61%	92.40%		D 90=
Nº 20	0.840	46.98	28.56%	36.16%		D 60= 0.802
Nº 30	0.590	41.15	25.02%	61.18%		D 30= 0.522
Nº 40	0.426	34.77	21.14%	82.32%		D 10= 0.366
Nº 50	0.297	27.35	16.63%	98.95%		
Nº 60	0.250	0.31	0.19%	99.14%		
Nº 80	0.177	0.31	0.19%	99.33%		
Nº 100	0.149	0.33	0.20%	99.53%		
Nº 200	0.074	0.35	0.21%	99.74%		
Fondo	0.01	0.43	0.26%	100.00%		
PESO INICIAL	164.48					

Observaciones :  
 Arcilla limo arenosa de color marrón de consistencia media y de media plasticidad con 67.97% de finos (que pasa la malla N°200), Lim. Liq. = 23.64% e Ind. Plast. = 6.35%, de expansión baja en condición normal.



CHRISTIAN EDUARDO PEREDES  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP N° 185396

Figura 101

Resultados de granulometría de la muestra 2- tramo 1



**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**  
 OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

**Proyecto:** Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo  
**Localización:** Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima  
**Muestra:** Tramo N°01 - Muestra N° 02  
**Material:** Sedimentos  
**Para Uso:** Cuantificación de sedimentos transportados en el río.  
**Perforación:** Extracción  
**Kilometraje:** -  
**Profundidad de Muestra:** 1.10 - 1.50 m.  
**Hecho Por:** Laboratorio Mecánica de Suelos I  
**Fecha:**

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM D - 422**

Tamices	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Especificaciones
Ø (mm)					
5"	127.00				
4"	101.60				
3"	76.20				
2"	50.80				
1 1/2"	38.10				
1"	25.40				
3/4"	19.050				
1/2"	12.700	0.00	0.00%	100.00%	
3/8"	9.525	8.45	3.38%	96.62%	
1/4"	6.350	19.27	7.70%	88.92%	
N° 4	4.760	9.65	3.86%	14.94%	85.06%
N° 8	2.380	45.44	18.17%	33.11%	66.89%
N° 10	2.000	26.00	10.40%	43.51%	56.49%
N° 16	1.190	55.41	22.16%	65.66%	34.34%
N° 20	0.840	34.02	13.60%	79.26%	20.74%
N° 30	0.590	24.30	9.72%	88.98%	11.02%
N° 40	0.426	14.59	5.83%	94.81%	5.19%
N° 50	0.297	11.47	4.59%	99.40%	0.60%
N° 60	0.250	0.34	0.14%	99.54%	0.46%
N° 80	0.177	0.51	0.20%	99.74%	0.26%
N° 100	0.149	0.17	0.07%	99.81%	0.19%
N° 200	0.074	0.26	0.10%	99.91%	0.09%
Fondo	0.01	0.22	0.09%	100.00%	0.00%
PESO INICIAL	250.10				

Tamaño Máximo:	
Modulo de Fineza AF:	
Modulo de Fineza AG:	
Equivalente de Arena:	
Descripción Muestra:	Arcilla limo arenosa
SUCS =	SP
AASHTO =	A1-b(1)
LL =	0.00
LP =	0.00
IP =	0.00
IG =	
D 90 =	
D 60 =	2.128
D 30 =	1.078
D 10 =	0.561
WT =	
WT+SAL =	
WSAL =	
WT+SDL =	
WSDL =	
%ARC =	0.09
%ERR =	0.00
Cc =	0.97
Cu =	3.79

Observaciones :  
 Arcilla limo arenosa de color marrón de consistencia media y de media plasticidad con 67.97% de finos (que pasa la malla N°200), Lim. Liq = 23.64% e Ind. Plast = 6.35%, de expansión baja en condición normal.



CHRISTIAN EDWIN RAMOS PEREDES  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP N° 185396

Figura 104

Resultados de granulometría de la muestra 3- tramo 1

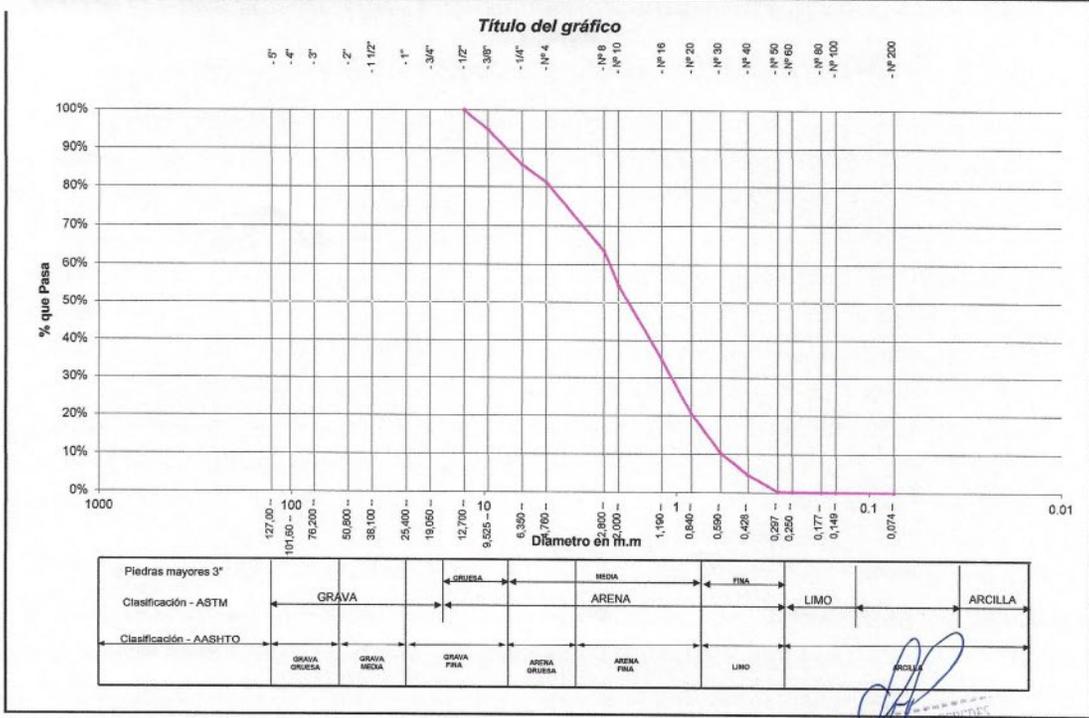


**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**  
 OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL  
 MUNICIPIO DE LA UNION LA PAZ Y EL DESARROLLO

Proyecto: "Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"  
 Localización: Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima  
 Muestra: Tramo N°01 - Muestra N° 03  
 Material: Sedimentos  
 Para Uso: Cuantificación de sedimentos transportados en el río.  
 Perforación: Extracción  
 Kilometraje: -  
 Profundidad de Muestra: 1.10 - 1.50 m.  
 Hecho Por: Laboratorio Mecánica de Suelos I  
 Fecha: \_\_\_\_\_

**ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO ASTM D - 422**

Tamices	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Especificaciones	Tamaño Máximo:	
5"	127.00					Modulo de Fineza AF:	
4"	101.60					Modulo de Fineza AG:	
3"	76.20					Equivalente de Arena:	
2"	50.80					Descripción Muestra:	
1 1/2"	38.10					Arcilla limo arenosa	
1"	25.40					SUCS =	
3/4"	19.050					SP	
1/2"	12.700	0.00	0.00%	100.00%		AASHTO =	
3/8"	9.525	12.46	5.17%	94.83%		A1-b(1)	
1/4"	6.350	21.84	9.06%	85.77%		LL = 0.00	
N° 4	4.760	10.94	4.54%	81.23%		LP = 0.00	
N° 8	2.380	42.44	17.61%	63.62%		IP = 0.00	
N° 10	2.000	22.17	9.20%	54.42%		IG =	
N° 16	1.190	47.26	19.61%	34.81%		D 90 =	
N° 20	0.840	34.43	14.29%	20.52%		D 60 = 2.231	
N° 30	0.590	24.59	10.20%	10.32%		D 30 = 1.072	
N° 40	0.426	13.54	5.62%	4.70%		D 10 = 0.581	
N° 50	0.297	10.65	4.42%	0.28%		Observaciones:	
N° 60	0.250	0.17	0.07%	0.21%		Arcilla limo arenosa de color marrón de consistencia media y de media plasticidad con 67.97% de finos (que pasa la malla N°200), Lim. Liq. = 23.64% e Ind. Plast. = 6.35%, de expansión baja en condición normal.	
N° 80	0.177	0.25	0.10%	0.10%			
N° 100	0.149	0.08	0.03%	0.07%			
N° 200	0.074	0.09	0.04%	0.03%			
Fondo	0.01	0.08	0.03%	0.00%			
PESO INICIAL	241.0						



CHRISTIAN ESPARTEGOS PEREZ  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP N° 185396

Figura 107

Resultados de granulometría de la muestra 4- tramo 1



**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**  
 OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

Proyecto: "Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"  
 Localización: Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima  
 Muestra: Tramo N°01 - Muestra N° 04  
 Material: Sedimentos  
 Para Uso: Cuantificación de sedimentos transportados en el río.

Perforación: Extracción  
 Kilometraje: -  
 Profundidad de Muestra: 1.10 - 1.50 m.  
 Hecho Por: Laboratorio Mecánica de Suelos I  
 Fecha: -

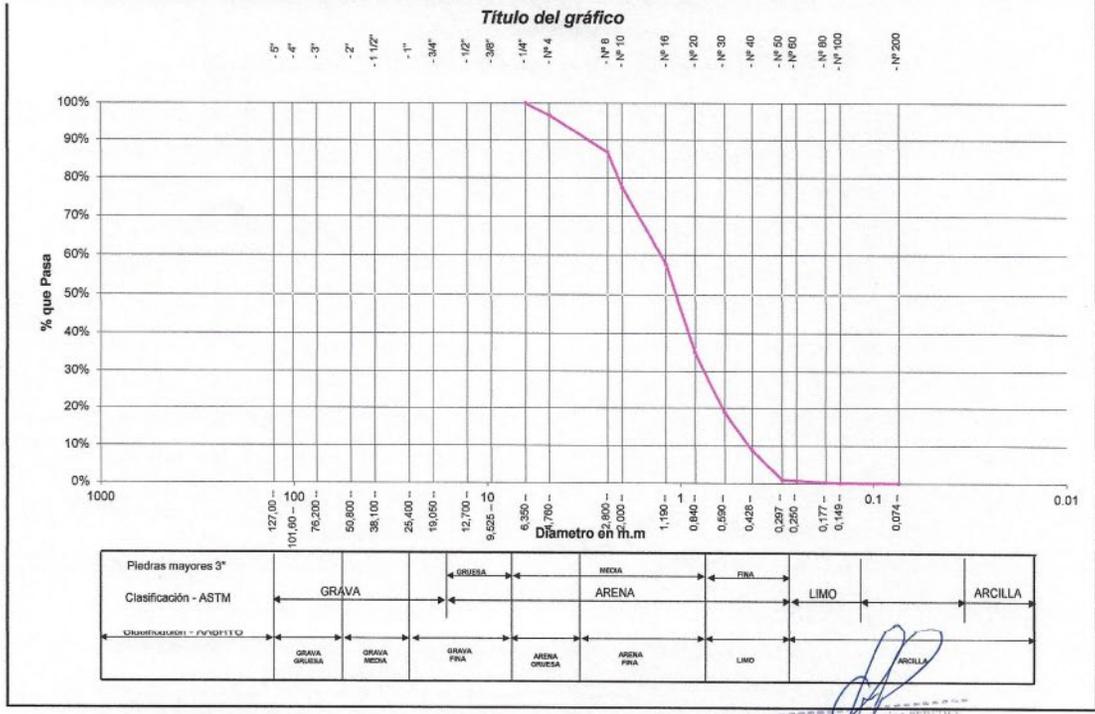
**ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO ASTM D - 422**

Tamices	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Especificaciones	Tamaño Máximo:
G	(mm)					Modulo de Fineza AF:
5"	127.00					Modulo de Fineza AG:
4"	101.60					Equivalente de Arena:
3"	76.20					Descripción Muestra:
2"	50.80					Arcilla limo arenosa
1 1/2"	38.10					
1"	25.40					
3/4"	19.050					
1/2"	12.700					
3/8"	9.525					
1/4"	6.350	0.00	0.00%	100.00%		
N° 4	4.760	6.15	3.27%	96.73%		
N° 8	2.380	18.85	10.02%	86.71%		
N° 10	2.000	17.36	9.23%	77.48%		
N° 16	1.190	37.00	19.67%	57.82%		
N° 20	0.840	42.88	22.79%	35.03%		
N° 30	0.590	30.63	16.28%	18.75%		
N° 40	0.426	18.69	9.93%	8.81%		
N° 50	0.297	14.70	7.81%	1.00%		
N° 60	0.250	0.51	0.27%	0.73%		
N° 80	0.177	0.77	0.41%	0.32%		
N° 100	0.149	0.28	0.14%	0.18%		
N° 200	0.074	0.18	0.10%	0.09%		
Fondo	0.01	0.16	0.09%	100.00%		
PESO INICIAL	188.14					

SUCS =	SP	AASHTO =	A1-b(1)
LL	0.00	WT	
LP	0.00	WT+SAL	
IP	0.00	WSAL	
IG		WT+SDL	
		WSDL	
D 90=		%ARC.	0.09
D 60=	1.280	%ERR.	0.00
D 30=	0.763	Cc	1.02
D 10=	0.446	Cu	2.87

Observaciones:

Arcilla limo arenosa de color marrón de consistencia media y de media plasticidad con 67.97% de finos (que pasa la malla N°200). Lim. Liq.= 23.64% e Ind. Plast.= 6.35%, de expansión baja en condición normal.



CHRISTIAN EDUARDO FROS PERLES  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP N° 185396

Figura 110

Resultados de granulometría de la muestra 5- tramo 1



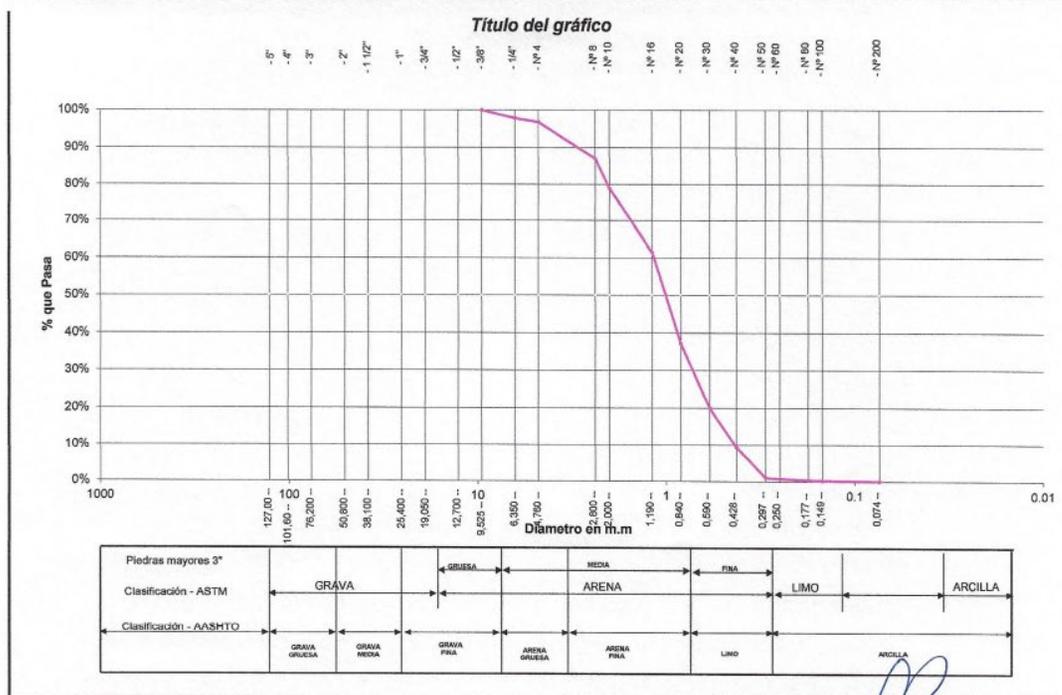
**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**  
 OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

Proyecto: "Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"  
 Localización: Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima  
 Muestra: Tramo N°01 - Muestra N° 05  
 Material: Sedimentos  
 Para Uso: Cuantificación de sedimentos transportados en el río.

Perforación: Extracción  
 Kilometraje: -  
 Profundidad de Muestra: 1.10 - 1.50 m.  
 Hecho Por: Laboratorio Mecánica de Suelos I  
 Fecha: -

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM D - 422**

Tamices (mm)	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Especificaciones	Tamaño Máximo:
5"	127.00					Modulo de Fineza AF:
4"	101.60					Equivalente de Arena:
3"	76.20					Descripción Muestra: Arcilla limo arenosa
2"	50.80					SUCS =
1 1/2"	38.10					SP
1"	25.40					AASHTO =
3/4"	19.050					A1-b(1)
1/2"	12.700					LL = 0.00 WT =
3/8"	9.525	0.00	0.00%	100.00%		LP = 0.00 WT+SAL =
1/4"	6.350	5.07	2.13%	97.87%		IP = 0.00 WSAL =
N° 4	4.760	2.54	1.07%	96.80%		IG = WT+SDL =
N° 8	2.380	23.31	9.81%	86.99%		D 90= 0.11
N° 10	2.000	19.30	8.12%	78.87%		D 60= 1.168 %ERR. = 0.00
N° 16	1.190	41.15	17.32%	61.55%		D 30= 0.733 Cc = 1.06
N° 20	0.840	57.46	24.18%	37.37%		D 10= 0.435 Cu = 2.68
N° 30	0.590	41.04	17.27%	20.10%		Observaciones:
N° 40	0.426	25.42	10.70%	9.40%		Arcilla limo arenosa de color marrón de consistencia media y de media plasticidad con 67.97% de finos (que pasa la malla N°200), Lim. Lq= 23.64% e Ind. Plast.= 6.35%, de expansión baja en condición normal.
N° 50	0.297	19.99	8.41%	0.99%		
N° 60	0.250	0.59	0.25%	0.74%		
N° 80	0.177	0.89	0.37%	0.37%		
N° 100	0.149	0.30	0.13%	0.24%		
N° 200	0.074	0.31	0.13%	0.11%		
Fondo	0.01	0.26	0.11%	0.00%		
PESO INICIAL	237.63					



CHRISTIAN LEONARDO PEREZ PEREZ  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP N° 185396

Figura 113

Resultados de granulometría de la muestra 6- tramo 1



**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**  
 OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

Proyecto: "Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"  
 Localización: Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima  
 Muestra: Tramo N°01 - Muestra N° 06  
 Material: Sedimentos  
 Para Uso: Cuantificación de sedimentos transportados en el río.

Perforación: Extracción  
 Kilometraje: -  
 Profundidad de Muestra: 1.10 - 1.50 m.  
 Hecho Por: Laboratorio Mecánica de Suelos I  
 Fecha: \_\_\_\_\_

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM D - 422**

Tamices (mm)	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Especificaciones
Ø					
5"	127.00				
4"	101.60				
3"	76.20				
2"	50.80				
1 1/2"	38.10				
1"	25.40				
3/4"	19.050				
1/2"	12.700	0.00	0.00%	100.00%	
3/8"	9.525	3.17	1.43%	98.57%	
1/4"	6.350	13.31	6.01%	92.56%	
Nº 4	4.760	6.66	3.00%	89.56%	
Nº 8	2.380	30.52	13.77%	75.79%	
Nº 10	2.000	19.53	8.81%	66.98%	
Nº 16	1.190	41.62	18.78%	48.20%	
Nº 20	0.840	45.07	20.33%	27.87%	
Nº 30	0.590	32.19	14.52%	13.34%	
Nº 40	0.426	16.02	7.23%	6.11%	
Nº 50	0.297	12.60	5.68%	0.43%	
Nº 60	0.250	0.18	0.08%	0.35%	
Nº 80	0.177	0.28	0.13%	0.22%	
Nº 100	0.149	0.09	0.04%	0.18%	
Nº 200	0.074	0.22	0.10%	0.08%	
Fondo	0.01	0.18	0.08%	0.00%	
PESO INICIAL	221.84				

Tamaño Máximo:	Modulo de Fineza AF:	Equivalente de Arena:	Descripción Muestra:
			Arcilla limo arenosa
SUCS =	SP	AASHTO =	A1-b(1)
LL =	0.00	WT =	
LP =	0.00	WT+SAL =	
IP =	0.00	WSAL =	
IG =		WT+SDL =	
		WSDL =	
D 90 =		%ARC. =	0.08
D 60 =	1.699	%ERR. =	0.00
D 30 =	0.877	Cc =	0.88
D 10 =	0.514	Cu =	3.30

Observaciones:  
 Arcilla limo arenosa de color marrón de consistencia media y de media plasticidad con 67.97% de finos (que pasa la malla N°200), Lim. Liq. = 23.64% e Ind. Plast. = 6.35%, de expansión baja en condición normal.



CHRISTIAN EDUARDO PEREDES  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP N° 185396

Figura 116

Resultados de granulometría de la muestra 7- tramo 1



**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**  
 OFICINA DE PRESUPUESTO, PLANIFICACIÓN, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL  
MINISTERIO DE LA CIUDAD, LA VIDA Y EL DESARROLLO

**Proyecto:** "Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"  
**Localización:** Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima  
**Muestra:** Tramo N°01 - Muestra N° 07  
**Material:** Sedimentos  
**Para Uso:** Cuantificación de sedimentos transportados en el río.

**Perforación:** Extracción  
**Kilometraje:** -  
**Profundidad de Muestra:** 1.10 - 1.50 m.  
**Hecho Por:** Laboratorio Mecánica de Suelos I  
**Fecha:**

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM D - 422**

Tamices	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Especificaciones
5"	127.00				
4"	101.60				
3"	76.20				
2"	50.80				
1 1/2"	38.10				
1"	25.40				
3/4"	19.050				
1/2"	12.700	0.00	0.00%	100.00%	
3/8"	9.525	1.48	1.15%	98.85%	
1/4"	6.350	4.44	3.46%	95.39%	
Nº 4	4.750	2.23	1.74%	93.65%	
Nº 8	2.380	40.60	31.65%	62.00%	
Nº 10	2.000	10.95	8.54%	53.46%	
Nº 16	1.190	23.34	18.19%	35.27%	
Nº 20	0.840	17.20	13.41%	21.86%	
Nº 30	0.590	12.29	9.58%	12.28%	
Nº 40	0.425	8.43	6.57%	5.71%	
Nº 50	0.297	6.63	5.17%	0.54%	
Nº 60	0.250	0.18	0.14%	0.40%	
Nº 80	0.177	0.27	0.21%	0.19%	
Nº 100	0.149	0.09	0.07%	0.12%	
Nº 200	0.074	0.08	0.06%	0.06%	
Fondo	0.01	0.07	0.05%	0.00%	
<b>PESO INICIAL</b>	<b>128.28</b>				

**Tamaño Máximo:** \_\_\_\_\_  
**Modulo de Fineza AF:** \_\_\_\_\_  
**Modulo de Fineza AG:** \_\_\_\_\_  
**Equivalente de Arena:** \_\_\_\_\_  
**Descripción Muestra:** Arcilla limo arenosa

SUCS =	SP	AASHTO =	A1-b(1)
LL	= 0.00	WT	=
LP	= 0.00	WT+SAL	=
IP	= 0.00	WSAL	=
IG	=	WT+SDL	=
D 90	=	WSDL	=
D 60	= 2.291	%ARC.	= 0.05
D 30	= 1.053	%ERR.	= 0.00
D 10	= 0.533	Cc	= 0.91
		Cu	= 4.30

**Observaciones:**

Arcilla limo arenosa de color marrón de consistencia media y de media plasticidad con 67.97% de finos (que pasa la malla Nº200), Lim. Líq. = 23.64% e ind. Plast. = 6.35%, de expansión baja en condición normal.



CHRISTIAN EDUARDO TORRES PEREDÉS  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP N° 185396

Figura 119

Resultados de granulometría de la muestra 8- tramo 1



**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**  
 OFICINA DE PRESUPUESTO, PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

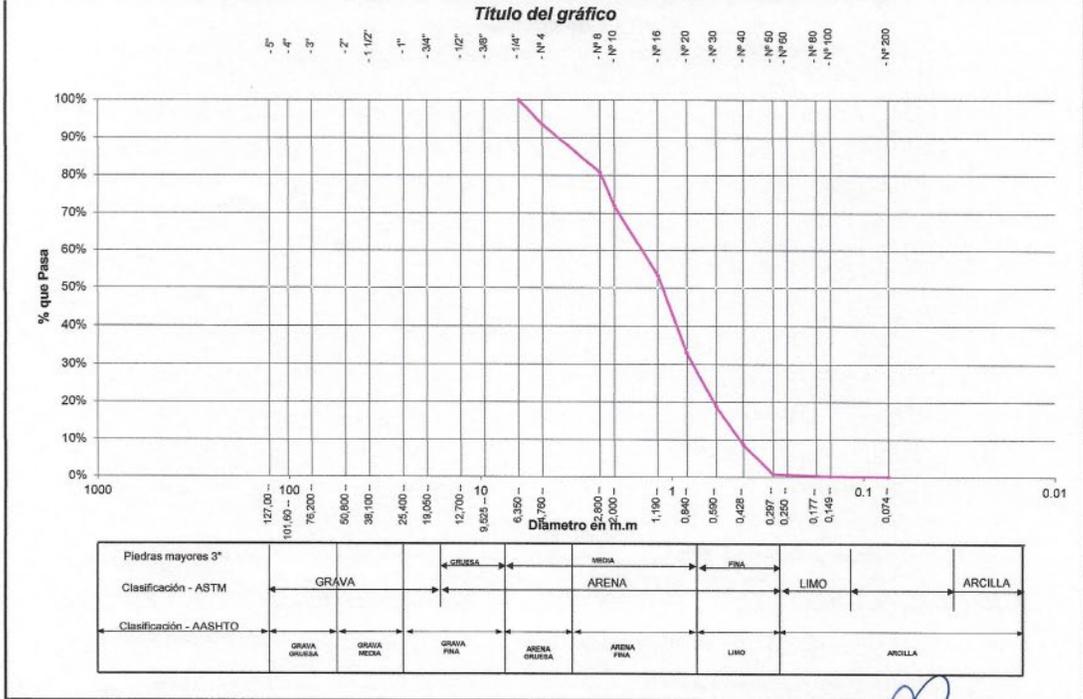
Proyecto: "Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"  
 Localización: Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima  
 Muestra: Tramo N°01 - Muestra N° 08  
 Material: Sedimentos  
 Para Uso: Cuantificación de sedimentos transportados en el río.

Perforación: Extracción  
 Kilometraje: -  
 Profundidad de Muestra: 1.10 - 1.50 m.  
 Hecho Por: Laboratorio Mecánica de Suelos I  
 Fecha: \_\_\_\_\_

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO ASTM D - 422

Tamices	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Especificaciones	Tamaño Máximo:
5"	127.00					Modulo de Fineza AF:
4"	101.60					Modulo de Fineza AG:
3"	76.20					Equivalente de Arena:
2"	50.80					Descripción Muestra:
1 1/2"	38.10					Arcilla limo arenosa
1"	25.40					SUCS = SP AASHTO = A1-b(1)
3/4"	19.050					LL = 0.00 WT =
1/2"	12.700					LP = 0.00 WT+SAL =
3/8"	9.525					IP = 0.00 WSAL =
1/4"	6.350	0.00	0.00%	100.00%		IG = WT+SDL =
N° 4	4.760	15.23	6.45%	93.55%		WSDL =
N° 8	2.380	30.14	12.77%	80.78%		%ARC. = 0.12
N° 10	2.000	20.72	8.78%	72.00%		%ERR. = 0.00
N° 16	1.190	44.17	18.71%	53.29%		Cc = 0.93
N° 20	0.840	47.36	20.06%	33.23%		Cu = 3.33
N° 30	0.590	33.83	14.33%	18.90%		Observaciones:
N° 40	0.426	23.80	10.08%	8.82%		
N° 60	0.297	18.72	7.93%	0.89%		
N° 80	0.250	0.50	0.21%	0.68%		
N° 100	0.177	0.74	0.31%	0.36%		
N° 200	0.074	0.33	0.14%	0.12%		
Fondo	0.01	0.28	0.12%	0.00%		
PESO INICIAL	236.07					

Arcilla limo arenosa de color marrón de consistencia media y de media plasticidad con 67.97% de finos (que pasa la malla N°200). Lim. Liq. = 23.64% e Ind. Plast. = 6.35% de expansión baja en condición normal.



*Handwritten signature*  
 CHRISTIAN CARLOS PEREZ  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP N° 185396

Figura 122

Resultados de granulometría de la muestra 1- tramo 2



PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO

OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

Proyecto: "Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"  
 Localización: Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima  
 Muestra: Tramo N°02 - Muestra N° 01  
 Material: Sedimentos  
 Para Uso: Cuantificación de sedimentos transportados en el río.  
 Perforación: Extracción  
 Kilometraje: -  
 Profundidad de Muestra: 1.10 - 1.50 m.  
 Hecho Por: Laboratorio Mecánica de Suelos I  
 Fecha: -

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM D - 422

Tamices	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Especificaciones	Tamaño Máximo:
Ø (mm)						Modulo de Fineza AF: Modulo de Fineza AG: Equivalente de Arena:
5"	127.00					Descripción Muestra: Arcilla limo arenosa
4"	101.60					SUCS = SP AASHTO = A1-b(1)
3"	76.20					LL = 0.00 WT = 0.00
2"	50.80					LP = 0.00 WT+SAL = 0.00
1 1/2"	38.10					IP = 0.00 WSAL = 0.00
1"	25.40					IG = WT+SDL = 0.00
3/4"	19.050					D 90= 0.00 %ARC. = 0.28
1/2"	12.700					D 60= 0.703 %ERR. = 0.00
3/8"	9.525					D 30= 0.434 Cc = 0.92
1/4"	6.350	0.00	0.00%	100.00%		D 10= 0.290 Cu = 2.42
N° 4	4.760	0.34	0.19%	0.19%		Observaciones:
N° 8	2.380	1.84	1.01%	1.19%		Arcilla limo arenosa de color marrón de consistencia media y de media plasticidad con 67.97% de finos (que pasa la malla N°200), Lím. Liq.= 23.64% e Ind. Plast.= 6.35%, de expansión baja en condición normal.
N° 10	2.000	2.85	1.56%	2.75%		
N° 16	1.190	16.55	9.05%	11.80%		
N° 20	0.840	12.08	6.61%	18.41%		
N° 30	0.590	71.84	39.29%	57.70%		
N° 40	0.426	23.60	12.91%	70.60%		
N° 50	0.297	34.81	19.04%	89.64%		
N° 60	0.250	4.30	2.35%	91.99%		
N° 80	0.177	12.30	6.73%	98.72%		
N° 100	0.149	1.83	1.00%	99.72%		
N° 200	0.074	0.00	0.00%	99.72%		
Fondo	0.01	0.51	0.28%	100.00%		
PESO INICIAL	182.85					



CHRISTIAN ALVARO ROS PEREDES  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP N° 185396

Figura 125

Resultados de granulometría de la muestra 2- tramo 2



**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**  
OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

**Proyecto:** "Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"  
**Localización:** Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima  
**Muestra:** Tramo N°02 - Muestra N° 02  
**Material:** Sedimentos  
**Para Uso:** Cuantificación de sedimentos transportados en el río.

**Perforación:** Extracción  
**Kilometraje:** -  
**Profundidad de Muestra:** 1.10 - 1.50 m.  
**Hecho Por:** Laboratorio Mecánica de Suelos I  
**Fecha:**

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM D - 422**

Tamices	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Especificaciones
5"	127.00				
4"	101.60				
3"	76.20				
2"	60.80				
1 1/2"	38.10				
1"	25.40				
3/4"	19.050				
1/2"	12.700	0.00	0.00%	100.00%	
3/8"	9.525	7.35	3.50%	96.50%	
1/4"	6.350	27.79	13.23%	83.27%	
N° 4	4.760	13.92	6.63%	23.36%	
N° 8	2.380	57.90	27.57%	50.93%	
N° 10	2.000	18.03	8.58%	59.51%	
N° 16	1.190	38.42	18.29%	77.81%	
N° 20	0.840	20.29	9.66%	87.47%	
N° 30	0.590	14.49	6.90%	94.37%	
N° 40	0.426	6.34	3.02%	97.39%	
N° 50	0.297	4.98	2.37%	99.76%	
N° 60	0.250	0.14	0.07%	99.82%	
N° 80	0.177	0.21	0.10%	99.92%	
N° 100	0.149	0.07	0.03%	99.96%	
N° 200	0.074	0.05	0.02%	99.98%	
Fondo	0.01	0.04	0.02%	100.00%	
PESO INICIAL	210.02				

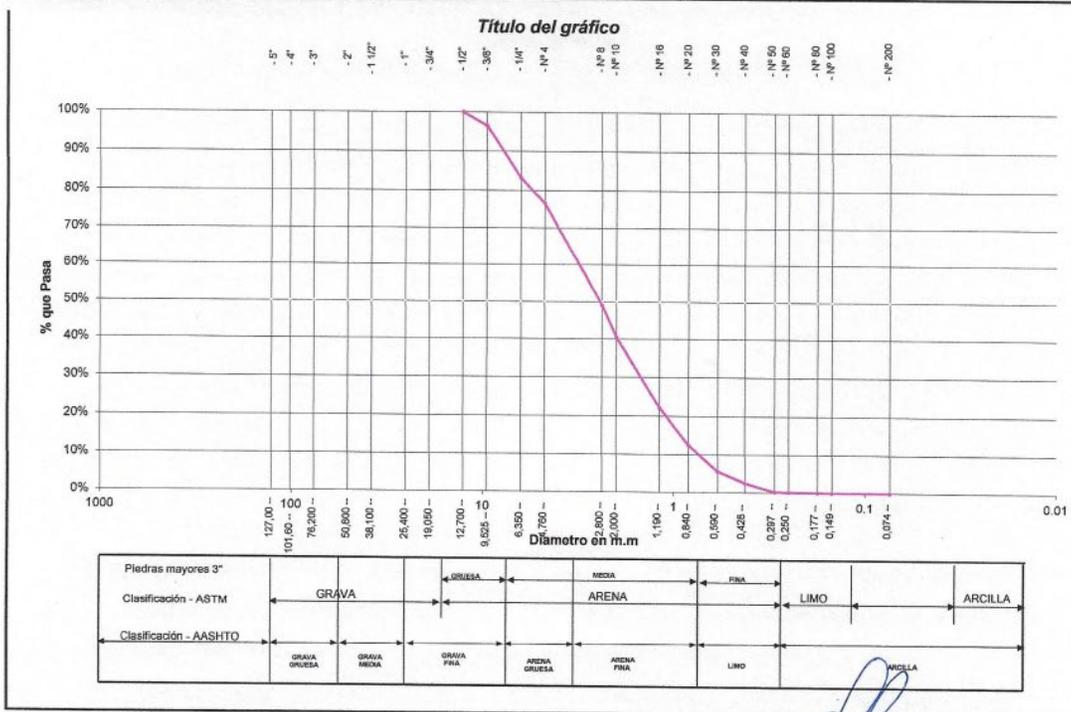
  

Tamaño Máximo:	Modulo de Fineza AF:	Modulo de Fineza AG:	Equivalente de Arena:

Descripción Muestra: Arcilla limo arenosa

SUCS =	SP	AASHTO =	A1-a(1)
LL	= 0.00	WT	=
LP	= 0.00	WT+SAL	=
IP	= 0.00	WSAL	=
IG	=	WT+SDL	=
		WSDL	=
D 90=		%ARC.	= 0.02
D 60=	3.323	%ERR.	= 0.00
D 30=	1.536	Cc	= 0.95
D 10=	0.748	Cu	= 4.44

Observaciones: Arcilla limo arenosa de color marrón de consistencia media y de media plasticidad con 67.97% de finos (que pasa la malla N°200), Lim. Liq.= 23.64% e Ind. Plast.= 6.35%, de expansión baja en condición normal.



**CHRISTIAN RIOS PEREDES**  
**INGENIERO CIVIL**  
**CIP N° 185396**

Figura 128

Resultados de granulometría de la muestra 3- tramo 2



**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**  
 OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

Proyecto: "Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"  
 Localización: Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima  
 Muestra: Tramo N°02 - Muestra N° 03  
 Material: Sedimentos  
 Para Uso: Cuantificación de sedimentos transportados en el río.

Perforación: Extracción  
 Kilometraje: -  
 Profundidad de Muestra: 1.10 - 1.50 m.  
 Hecho Por: Laboratorio Mecánica de Suelos I  
 Fecha: \_\_\_\_\_

**ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO ASTM D - 422**

Tamices	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Especificaciones
5"	127.00				
4"	101.60				
3"	76.20				
2"	50.80				
1 1/2"	38.10				
1"	25.40				
3/4"	19.050				
1/2"	12.700	0.00	0.00%	100.00%	
3/8"	9.525	3.23	1.77%	98.23%	
1/4"	6.350	28.61	15.64%	82.60%	
N° 4	4.760	14.33	7.83%	25.24%	74.76%
N° 8	2.380	54.06	29.55%	54.79%	45.21%
N° 10	2.000	13.23	7.23%	62.02%	37.98%
N° 16	1.190	28.20	15.41%	77.44%	22.56%
N° 20	0.840	17.12	9.36%	86.79%	13.21%
N° 30	0.590	12.23	6.69%	93.48%	6.52%
N° 40	0.426	6.48	3.54%	97.02%	2.98%
N° 50	0.297	5.10	2.79%	99.81%	0.19%
N° 60	0.250	0.09	0.05%	99.86%	0.14%
N° 80	0.177	0.14	0.08%	99.93%	0.07%
N° 100	0.149	0.05	0.03%	99.96%	0.04%
N° 200	0.074	0.04	0.02%	99.98%	0.02%
Fondo	0.01	0.03	0.02%	100.00%	0.00%
PESO INICIAL	182.94				

Tamaño Máximo: \_\_\_\_\_  
 Modulo de Fineza AF: \_\_\_\_\_  
 Equivalente de Arena: \_\_\_\_\_

Descripción Muestra: Arcilla limo arenosa

SUCS =	SP	AASHTO =	A1-a(1)
LL	= 0.00	WT	=
LP	= 0.00	WT+SAL	=
IP	= 0.00	WSAL	=
IG	=	WT+SDL	=
		WSDL	=
D 90=		%ARC.	= 0.02
D 60=	3.571	%ERR.	= 0.00
D 30=	1.581	Cc	= 0.97
D 10=	0.720	Cu	= 4.96

Observaciones: \_\_\_\_\_

Arcilla limo arenosa de color marrón de consistencia media y de media plasticidad con 67.97% de finos (que pasa la malla N°200), Lim. Liq = 23.64% e Ind. Plast = 6.35%, de expansión baja en condición normal.



CHRISTIAN EDUARDO PEREZ  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP N° 185396

**Figura 131**  
Resultados de granulometría de la muestra 4- tramo 2



**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**  
OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

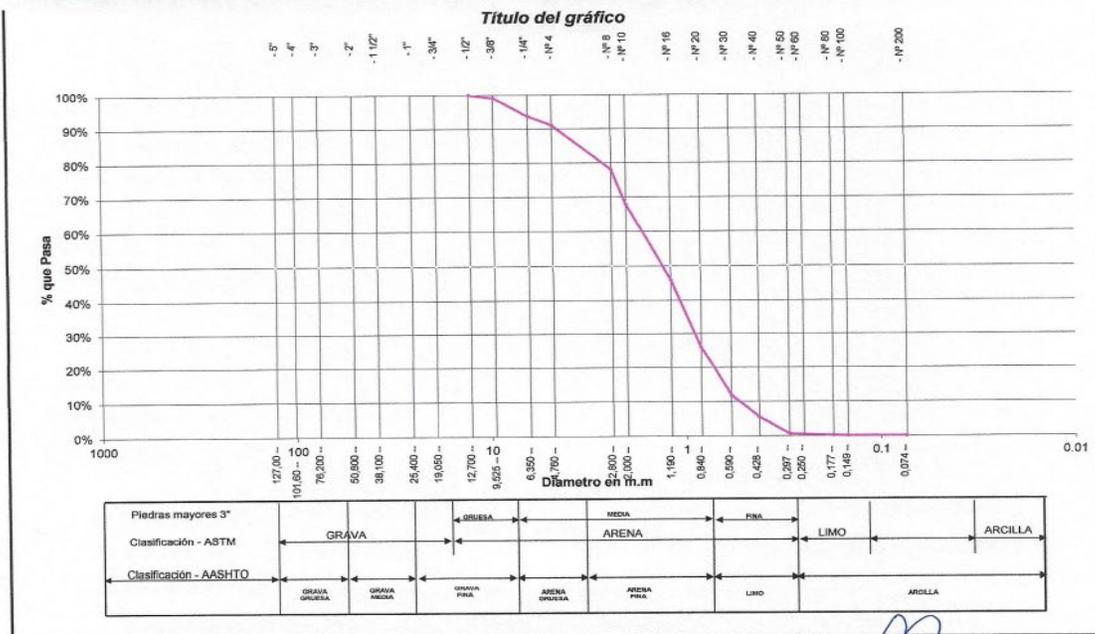
Proyecto: "Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"  
 Localización: Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima  
 Muestra: Tramo N°02 - Muestra N° 04  
 Material: Sedimentos  
 Para Uso: Cuantificación de sedimentos transportados en el río.

Perforación: Extracción  
 Kilometraje: -  
 Profundidad de Muestra: 1.10 - 1.50 m.  
 Hecho Por: Laboratorio Mecánica de Suelos I  
 Fecha: \_\_\_\_\_

**ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO ASTM D - 422**

Tamices	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Especificaciones	Tamaño Máximo:
Ø (mm)						Modulo de Fineza AF:
5"	127.00					Modulo de Fineza AG:
4"	101.60					Equivalente de Arena:
3"	76.20					Descripción Muestra:
2"	50.80					Arcilla limo arenosa
1 1/2"	38.10					
1"	25.40					
3/4"	19.050					
1/2"	12.700	0.00	0.00%	100.00%		SUCS =
3/8"	9.525	2.11	0.93%	99.07%		SP
1/4"	6.350	12.16	5.37%	93.70%		AASHTO =
N° 4	4.750	6.10	2.69%	91.00%		A1-b(1)
N° 8	2.380	29.11	12.86%	78.14%		LL =
N° 10	2.000	23.20	10.26%	67.89%		LP =
N° 16	1.190	49.45	21.84%	46.05%		IP =
N° 20	0.840	45.15	19.95%	26.10%		IG =
N° 30	0.590	32.25	14.25%	11.86%		D 90 =
N° 40	0.426	14.11	6.23%	5.62%		D 60 =
N° 50	0.297	11.10	4.90%	1.72%		D 30 =
N° 60	0.250	0.45	0.20%	0.52%		D 10 =
N° 80	0.177	0.87	0.30%	0.23%		
N° 100	0.149	0.23	0.10%	0.12%		
N° 200	0.074	0.15	0.07%	0.06%		
Fondo	0.01	0.13	0.06%	0.00%		
PESO INICIAL	226.37					

**Observaciones:**  
Arcilla limo arenosa de color marrón de consistencia media y de media plasticidad con 67.97% de finos (que pasa la malla N°200), Lim. Liq. = 23.64% e Ind. Plast. = 6.35%, de expansión baja en condición normal.



CHRISTIAN ARMANDO PEREDES  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP N° 185396

Figura 134

Resultados de granulometría de la muestra 5- tramo 2



**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**  
 OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

Proyecto: "Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"  
 Localización: Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima  
 Muestra: Tramo N°02 - Muestra N° 05  
 Material: Sedimentos  
 Para Uso: Cuantificación de sedimentos transportados en el río.  
 Perforación: Extracción  
 Kilometraje: -  
 Profundidad de Muestra: 1.10 - 1.50 m.  
 Hecho Por: Laboratorio Mecánica de Suelos I  
 Fecha: -

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO ASTM D - 422

Tamices	Peso Retenido (mm)	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Especificaciones
5"	127.00				
4"	101.60				
3"	76.20				
2"	50.80				
1 1/2"	38.10				
1"	25.40				
3/4"	19.050				
1/2"	12.700	0.00	0.00%	100.00%	
3/8"	9.525	3.98	1.79%	98.21%	
1/4"	6.350	27.07	12.23%	85.98%	
N° 4	4.760	13.56	6.13%	79.85%	
N° 8	2.380	58.40	26.39%	53.46%	
N° 10	2.000	21.65	9.78%	56.33%	
N° 16	1.190	46.15	20.86%	77.18%	
N° 20	0.840	22.16	10.01%	87.20%	
N° 30	0.590	15.83	7.16%	94.35%	
N° 40	0.426	6.59	2.98%	97.33%	
N° 50	0.297	5.18	2.34%	99.67%	
N° 60	0.250	0.21	0.09%	99.77%	
N° 80	0.177	0.31	0.14%	99.91%	
N° 100	0.149	0.10	0.05%	99.95%	
N° 200	0.074	0.06	0.03%	99.98%	
Fondo	0.01	0.05	0.02%	100.00%	
PESO INICIAL	221.28				

Tamaño Máximo:	Modulo de Fineza AF:	Modulo de Fineza AG:	Equivalente de Arena:

Descripción Muestra:			
Arcilla limo arenosa			
SUCS =	SP	AASHTO =	A1-a(1)
LL	= 0.00	WT	=
LP	= 0.00	WT+SAL	=
IP	= 0.00	WSAL	=
IG	=	WT+SDL	=
		WSDL	=
D 90=		%ARC.	= 0.02
D 60=	2.970	%ERR.	= 0.00
D 30=	1.469	Cc	= 0.98
D 10=	0.742	Cu	= 4.00

Observaciones:

Arcilla limo arenosa de color marrón de consistencia media y de media plasticidad con 67.97% de finos (que pasa la malla N°200), Lim. Liq.= 23.64% e Ind. Plast.= 6.35% de expansión baja en condición normal.



CHRISTIAN ESTEBAN PAVS PEREDES  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP N° 185396

Figura 137

Resultados de granulometría de la muestra 6- tramo 2



PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO  
OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

Proyecto: "Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"  
 Localización: Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima  
 Muestra: Tramo N°02 - Muestra N° 06  
 Material: Sedimentos  
 Para Uso: Cuantificación de sedimentos transportados en el río.  
 Perforación: Extracción  
 Kilometraje: -  
 Profundidad de Muestra: 1.10 - 1.50 m.  
 Hecho Por: Laboratorio Mecánica de Suelos I  
 Fecha: -

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO ASTM D - 422

Tamices	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Especificaciones
5"	127.00				
4"	101.60				
3"	76.20				
2"	50.80				
1 1/2"	38.10				
1"	25.40				
3/4"	19.050				
1/2"	12.700	0.00	0.00%	100.00%	
3/8"	9.525	2.23	1.03%	98.97%	
1/4"	6.350	10.98	5.05%	93.89%	
N° 4	4.760	5.50	2.54%	91.35%	
N° 8	2.380	30.04	13.89%	77.45%	
N° 10	2.000	22.28	10.31%	32.85%	
N° 16	1.190	47.50	21.97%	54.82%	
N° 20	0.840	41.40	19.15%	73.97%	
N° 30	0.590	29.57	13.68%	87.65%	
N° 40	0.425	14.19	6.96%	94.21%	
N° 50	0.297	11.17	5.17%	99.38%	
N° 60	0.250	0.35	0.16%	99.54%	
N° 80	0.177	0.53	0.25%	99.79%	
N° 100	0.149	0.18	0.08%	99.87%	
N° 200	0.074	0.15	0.07%	99.94%	
Fondo	0.01	0.13	0.06%	100.00%	
PESO INICIAL	216.20				

Tamaño Máximo:	Modulo de Fineza AF:	Modulo de Fineza AG:	Equivalente de Arena:

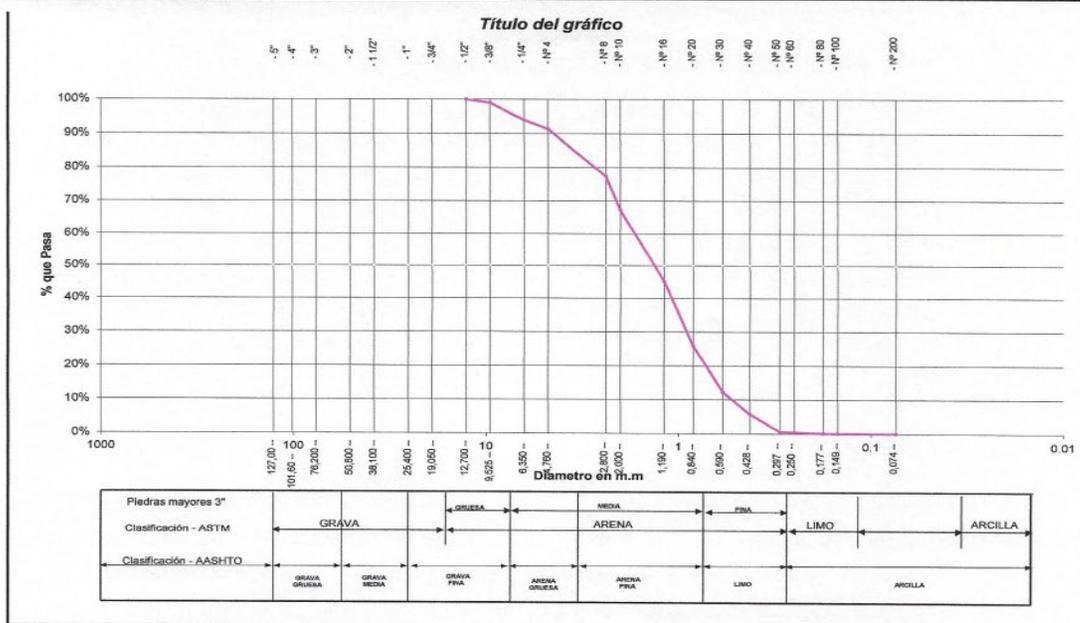
  

Descripción Muestra:			
Arcilla limo arenosa			
SUCS =	SP	AASHTO =	A1-b(1)
LL	0.00	WT	
LP	0.00	WT+SAL	
IP	0.00	WSAL	
IG		WT+SDL	
D 90=		WSDL	0.06
D 60=	1.737	%ARC	0.00
D 30=	0.913	Cc	0.90
D 10=	0.531	Cu	3.27

Observaciones:

Arcilla limo arenosa de color marrón de consistencia media y de media plasticidad con 67.97% de finos (que pasa la malla N°200), Lim. Liq. = 23.64% e Ind. Plast. = 6.35%, de expansión baja en condición normal.



CHRISTIAN ESCOBAR ROS PEREDES  
INGENIERO CIVIL  
CIP N° 185396

Figura 140

Resultados de granulometría de la muestra 7- tramo 2



**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**  
 OFICINA DE PRESUPUESTO PLANEACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL  
 MUNICIPIO DE CALLEJÓN DE LA VENTA, SAN MARTÍN

Proyecto: "Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"  
 Localización: Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima  
 Muestra: Tramo N°02 - Muestra N° 07  
 Material: Sedimentos  
 Para Uso: Cuantificación de sedimentos transportados en el río.

Perforación: Extracción  
 Kilometraje: -  
 Profundidad de Muestra: 1.10 - 1.50 m.  
 Hecho Por: Laboratorio Mecánica de Suelos  
 Fecha: -

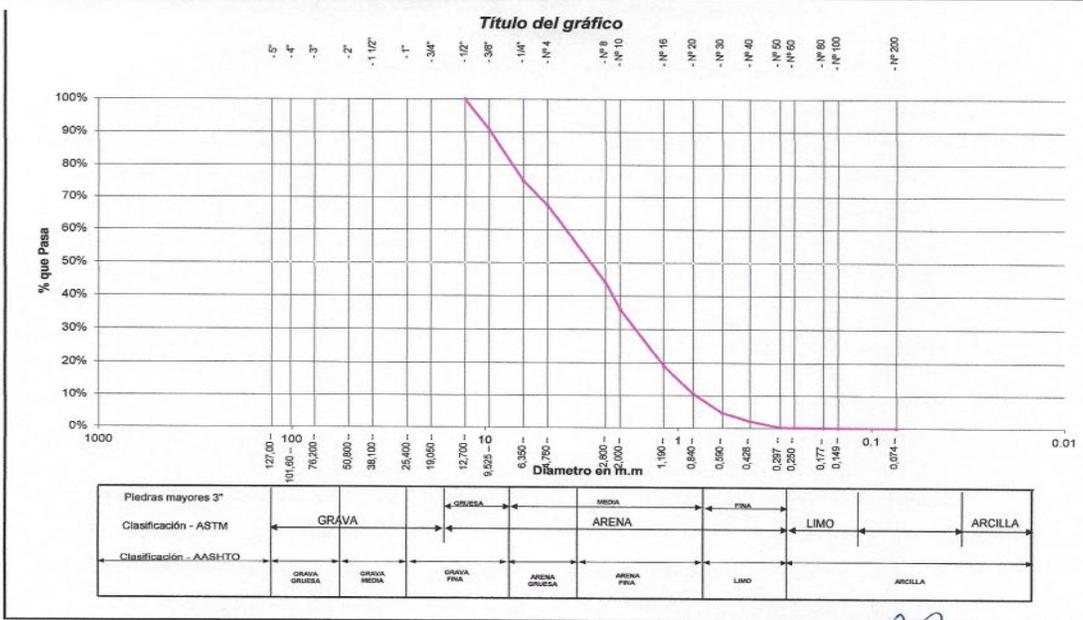
ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO ASTM D - 422

Tamices	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Especificaciones	Tamaño Máximo:
5"	127.00					
4"	101.60					
3"	76.20					
2"	50.80					
1 1/2"	38.10					
1"	25.40					
3/4"	19.050					
1/2"	12.700	0.00	0.00%	100.00%		
3/8"	9.525	16.15	9.32%	90.68%		
1/4"	6.350	26.81	15.48%	75.20%		
N° 4	4.760	13.43	7.75%	32.55%		
N° 8	2.380	40.55	23.41%	55.96%		
N° 10	2.000	13.78	7.95%	63.92%		
N° 16	1.190	29.37	16.95%	80.87%		
N° 20	0.840	14.68	8.47%	89.34%		
N° 30	0.590	10.49	6.06%	95.40%		
N° 40	0.426	4.20	2.42%	97.82%		
N° 60	0.297	3.30	1.90%	99.73%		
N° 80	0.250	0.11	0.06%	99.79%		
N° 100	0.177	0.16	0.09%	99.88%		
N° 200	0.149	0.05	0.03%	99.91%		
N° 400	0.074	0.08	0.05%	99.95%		
Fondo	0.01	0.07	0.04%	100.00%		
PESO INICIAL	173.23					

SUCS =	SP	AASHTO =	A1-a(1)
LL	= 0.00	WT	=
LP	= 0.00	WT+ <i>SAL</i>	=
IP	= 0.00	WSAL	=
IG	=	WT+ <i>SDL</i>	=
		WSDL	=
D 90=		% <i>ARC.</i>	= 0.04
D 60=	4.003	% <i>ERR.</i>	= 0.00
D 30=	1.709	<i>Cc</i>	= 0.90
D 10=	0.813	<i>Cu</i>	= 4.92

Observaciones: Arcilla limo arenosa de color marrón de consistencia media y de media plasticidad con 67.97% de finos (que pasa la malla N°200), Lim. Liq. = 23.64% e Ind. Plast. = 6.35%, de expansión baja en condición normal.



CHRISTIAN E. VILLARROS PEREDES  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP N° 185396

Figura 143

Resultados de granulometría de la muestra 8- tramo 2



**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**  
 OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

**Proyecto:** "Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"  
**Localización:** Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima  
**Muestra:** Tramo N°02 - Muestra N° 08  
**Material:** Sedimentos  
**Para Uso:** Cuantificación de sedimentos transportados en el río.  
**Perforación:** Extracción  
**Kilometraje:** -  
**Profundidad de Muestra:** 1.10 - 1.50 m.  
**Hecho Por:** Laboratorio Mecánica de Suelos I  
**Fecha:** -

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM D - 422**

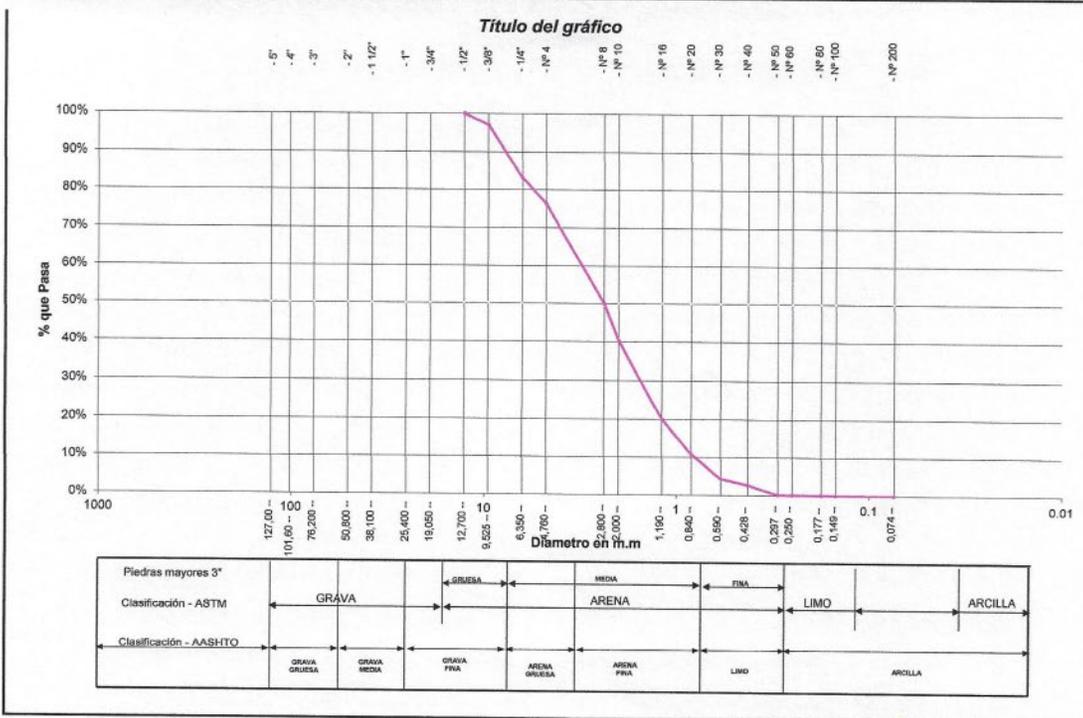
Tamices	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Especificaciones
5"	127.00				
4"	101.60				
3"	76.20				
2"	50.80				
1 1/2"	38.10				
1"	25.40				
3/4"	19.050				
1/2"	12.700	0.00%	0.00%	100.00%	
3/8"	9.525	6.68%	3.08%	96.92%	
1/4"	6.350	29.82%	13.75%	83.17%	
N° 4	4.760	14.93%	6.88%	76.29%	
N° 8	2.380	57.22%	26.38%	49.91%	
N° 10	2.000	20.73%	9.56%	40.36%	
N° 16	1.190	44.18%	20.37%	19.99%	
N° 20	0.840	19.60%	9.04%	10.95%	
N° 30	0.590	14.00%	6.45%	4.50%	
N° 40	0.426	3.60%	1.66%	2.84%	
N° 50	0.297	5.61%	2.69%	0.25%	
N° 60	0.250	0.10%	0.05%	0.21%	
N° 80	0.177	0.15%	0.07%	0.14%	
N° 100	0.149	0.10%	0.05%	0.09%	
N° 200	0.074	0.11%	0.05%	0.04%	
Fondo	0.01	0.09%	0.04%	0.00%	
<b>PESO INICIAL</b>	<b>216.92</b>				

Tamaño Máximo:	
Modulo de Fineza AF:	
Modulo de Fineza AG:	
Equivalente de Arena:	
Descripción Muestra:	Arcilla limo arenosa
SUCS =	SP
AASHTO =	A1-a(1)
LL =	0.00
LP =	0.00
IP =	0.00
IG =	
D 90 =	
D 60 =	3.290
D 30 =	1.588
D 10 =	0.803
WT =	
WT+SAL =	
WSAL =	
WT+SDL =	
WSDL =	
%ARC. =	0.04
%ERR. =	0.00
Cc =	0.95
Cu =	4.10

Observaciones:

Arcilla limo arenosa de color marrón de consistencia media y de media plasticidad con 67.97% de finos (que pasa la malla N°200), Lim. Liq. = 23.64% e Ind. Plast. = 6.35%, de expansión baja en condición normal.



*[Handwritten Signature]*  
 CHRISTIAN ANDRÉS PÉREZ PEREDES  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP N° 183396

Figura 146

Resultados de granulometría de la muestra 9- tramo 2



**PROYECTO ESPECIAL ALTO MAYO**  
 OFICINA DE PRESUPUESTO PLANIFICACION, ESTUDIOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

**Proyecto:** "Estimación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos para estructuras hidráulicas en la cuenca del río Rapay, provincia Cajatambo"  
**Localización:** Río Rapay / Dist. Copa / Prov. Cajatambo / Dpto. Lima **Perforación:** Extracción  
**Muestra:** Tramo N°02 - Muestra N° 09 **Kilometraje:** -  
**Material:** Sedimentos **Profundidad de Muestra:** 1.10 - 1.50 m.  
**Para Uso:** Cuantificación de sedimentos transportados en el río. **Hecho Por:** Laboratorio Mecánica de Suelos  
**Fecha:** -

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM D - 422**

Tamices	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Especificaciones
5"	127.00				
4"	101.60				
3"	76.20				
2"	50.80				
1 1/2"	38.10				
1"	25.40				
3/4"	19.050				
1/2"	12.700				
3/8"	9.525				
1/4"	6.350				
N° 4	4.760	0.00%	0.00%	100.00%	
N° 8	2.380	2.27	1.23%	1.23%	
N° 10	2.000	7.08	3.84%	5.07%	
N° 16	1.190	15.10	8.18%	13.25%	
N° 20	0.840	73.22	39.68%	52.93%	
N° 30	0.590	52.30	28.35%	81.28%	
N° 40	0.426	18.38	9.96%	91.24%	
N° 50	0.297	14.46	7.84%	99.08%	
N° 60	0.250	0.42	0.23%	99.31%	
N° 80	0.177	0.64	0.35%	99.65%	
N° 100	0.149	0.21	0.11%	99.77%	
N° 200	0.074	0.23	0.12%	99.89%	
Fondo	0.01	0.20	0.11%	100.00%	
PESO INICIAL	184.51			0.00%	

Tamaño Máximo:	
Modulo de Fineza AF:	
Modulo de Fineza AG:	
Equivalente de Arena:	
Descripción Muestra:	Arcilla limo arenosa
SUCS =	SP
AASHTO =	A1-b(1)
LL =	0.00 WT =
LP =	0.00 WT+SAL =
IP =	0.00 WSAL =
IG =	WT+SDL =
	WSDL =
D 90 =	%ARC. = 0.11
D 60 =	0.954 %ERR. = 0.00
D 30 =	0.689 Cc = 1.12
D 10 =	0.446 Cu = 2.14
<b>Observaciones:</b>	
Arcilla limo arenosa de color marrón de consistencia media y de media plasticidad con 67.97% de finos (que pasa la malla N°200), Lim. Liq.= 23.64% e Ind. Plast.= 6.35%, de expansión baja en condición normal.	



*[Signature]*  
 CHRISTIAN EDUARDO RÍOS PEREDES  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP N° 185396