



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA TUBIFICACIÓN  
DE LAS ARCILLAS DE LAS CANTERAS DE CURAYLLO PARA  
CONSTRUIR LA PRESA DE TIERRA CHAQA-QARQA,  
AZÁNGARO, PUNO 2023.**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. RONALD MAMANI ANAHUA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**PUNO – PERÚ**

**2024**



NOMBRE DEL TRABAJO

**EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD  
A LA TUBIFICACIÓN DE LAS ARCILLAS D  
E LAS CANTERAS DE CURAYLLO PARA**

AUTOR

**RONALD MAMANI ANAHUA**

RECuento DE PALABRAS

**23175 Words**

RECuento DE CARACTERES

**124557 Characters**

RECuento DE PÁGINAS

**123 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**3.6MB**

FECHA DE ENTREGA

**Jan 31, 2024 1:08 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Jan 31, 2024 1:09 PM GMT-5**


● **8% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base

- 7% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 4% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Cros:

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

  
MARIANO R. GARCIA LOAYZA  
CIP. 26223  
INGENIERO CIVIL

  
Ing. Jaime Medina Delva  
DOCENTE UNIVERSITARIO  
COD. UNA N° 910546  
COORDINADOR INVESTIGACION  
ERIC  
03/02/2024

[Resumen](#)



## DEDICATORIA

*A Dios, por brindarme fuerza y guiarme espiritualmente en cada jornada de mi vida. A mis padres Lucila Anahua Canque Q.E.P.D. y Cecilio Javier Mamani Flores, que me respaldaron tanto financieramente como emocionalmente a lo largo de mi proceso de formación académica.*

*A mi asesor Ing. Roberto García, a mis docentes de toda la escuela profesional de Ingeniería Civil, compañeros y amigos.*

***Ronald Mamani Anahua***



## AGRADECIMIENTOS

*Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a las personas que han colaborado de alguna u otra manera en la elaboración de esta tesis.*

*En primer lugar, a la UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO PUNO, a todos los docentes de la ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL por darme acogida e impartirme sus experiencias y enseñanzas.*

*Agradecer a mi madre Lucila Anahua Canque que, con su fuerza, determinación y temple posibilitaron mi educación académica, y agradezco a mi padre por ofrecerme su respaldo constante con su apoyo incondicional.*

*Igualmente agradecer a mi asesor Ing. Mariano Roberto García Loayza por haberme guiado en todo el desarrollo, y al Ing. Samuel Laura Huanca por las recomendaciones y observaciones en el desarrollo.*

**Ronald Mamani Anahua**



# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<b>DEDICATORIA</b>	
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	
<b>ACRÓNIMOS</b>	
<b>RESUMEN .....</b>	<b>16</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>18</b>
<b>1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>19</b>
1.2.1. Problema general.....	19
1.2.2. Problemas específicos .....	19
<b>1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>19</b>
1.3.1. Hipótesis general .....	19
1.3.2. Hipótesis específicas .....	20
<b>1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>20</b>
1.4.1. Justificación teórica.....	20
1.4.2. Justificación metodológica.....	21
1.4.3. Justificación social .....	22
1.4.4. Justificación económica .....	22
<b>1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>23</b>



1.5.1. Objetivo general .....	23
1.5.2. Objetivos específicos .....	23

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

<b>2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>24</b>
2.1.1. Antecedentes internacionales .....	24
2.1.2. Antecedentes nacionales .....	30
<b>2.2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>34</b>
2.2.1. Presas.....	34
2.2.2. Presas de tierra .....	35
2.2.3. Principales causas de fallas en presas .....	36
2.2.4. Tubificación .....	37
2.2.4.1. Condiciones generales de la tubificación.....	38
2.2.4.2. Factores involucrados en el fenómeno de tubificación.....	40
2.2.5. Características de grado de dispersión .....	41
2.2.5.1. Ensayo de Pinhole .....	41
2.2.5.2. Características de índices de tasa de erosión .....	44
2.2.5.3. Esfuerzo cortante.....	45
2.2.6. Prueba de erosión de agujeros (Hole Erosion Test) .....	45
2.2.6.1. Interpretación de datos del ensayo .....	47
2.2.7. Características índices de los suelos .....	52
2.2.7.1. Granulometría .....	52
2.2.7.2. Contenido de humedad de los suelos.....	52
2.2.7.3. Límites de consistencia.....	53



2.2.7.4. Proctor modificado.....	54
2.2.7.5. Gravedad específica .....	56

### CAPÍTULO III

#### MATERIALES Y MÉTODOS

<b>3.1. ÁMBITO DE ESTUDIO .....</b>	<b>58</b>
3.1.1. Ubicación política.....	58
3.1.2. Procedencia del material utilizado.....	60
<b>3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>61</b>
3.2.1. Tipo de Investigación .....	61
3.2.2. Nivel de Investigación.....	62
3.2.3. Diseño de la Investigación .....	62
3.2.4. Enfoque de la Investigación .....	62
3.2.5. Variables de la Investigación .....	63
3.2.5.1. Variable independiente.....	63
3.2.5.2. Variable interviniente .....	64
3.2.6. Población.....	64
3.2.7. Muestra.....	65
<b>3.3. VALIDEZ DE EQUIPOS Y CONFIABILIDAD. ....</b>	<b>65</b>
<b>3.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>66</b>
3.4.1. Etapa preliminar .....	66
3.4.2. Etapa de pre campo .....	66
3.4.3. Etapa de campo .....	66
3.4.3.1. Extracción de muestras de la cantera N° 01 .....	66
3.4.3.2. Extracción de muestras de la cantera N° 02 .....	67



3.4.3.3. Extracción de muestras de la cantera N° 03 .....	68
3.4.4. Etapa de laboratorio .....	69
3.4.4.1. Contenido de Humedad .....	69
3.4.4.2. Granulometría .....	70
3.4.4.3. Límites de Atterberg.....	74
3.4.4.4. Gravedad específica .....	75
3.4.4.5. Proctor modificado.....	75
3.4.4.6. Prueba o ensayos de la tubificación.....	78
3.4.4.7. Etapa de gabinete.....	79

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>4.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS ARCILLAS DE LA CANTERA</b>	
<b>CURAYLLU .....</b>	<b>80</b>
<b>4.2. GRADO DE DISPERSIÓN DE LAS ARCILLAS DE LA CANTERA</b>	
<b>CURAYLLO.....</b>	<b>83</b>
<b>4.3. TASA DE EROSIÓN DE LAS ARCILLAS DE LA CANTERA</b>	
<b>CURAYLLU .....</b>	<b>91</b>
4.3.1. Tasa de erosión de la Cantera 01.....	92
4.3.2. Tasa de erosión de la Cantera 02.....	96
4.3.3. Tasa de erosión de la Cantera 03.....	100
<b>4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>103</b>
<b>4.5. HIPÓTESIS GENERAL .....</b>	<b>108</b>
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>111</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>113</b>





<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>115</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>121</b>

**ÁREA:** Geotecnia

**TEMA:** Evaluación de la susceptibilidad a la tubificación en las arcillas.

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Geotecnia

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 10 de mayo del 2024



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> Estadística de fallas en grandes presas de tierra .....	37
<b>Tabla 2</b> Resistencia a la susceptibilidad a la tubificación .....	41
<b>Tabla 3</b> Criterios de evaluación para Resultados de Pinhole .....	43
<b>Tabla 4</b> Relación cualitativa del índice representativo de la tasa de erosión y la progresión de la erosión interna .....	50
<b>Tabla 5</b> Relación entre ÑHET y clasificación de suelos para suelos no dispersivos.	51
<b>Tabla 6</b> Abertura de tamices-granulometría.....	52
<b>Tabla 7</b> Rangos de potencial de expansión. ....	54
<b>Tabla 8</b> Rangos típicos de la gravedad específica de las partículas.....	55
<b>Tabla 9</b> Rangos típicos de la gravedad específica de las partículas.....	56
<b>Tabla 10</b> Valores típicos de gravedad específica .....	57
<b>Tabla 11</b> Numero de testigos para el ensayo de compresión. ....	65
<b>Tabla 12</b> Cuadro resumen del Contenido de Humedad de las arcillas de las Canteras C-01, C-02 y C-03.....	70
<b>Tabla 13</b> Granulometría de las tres canteras. ....	74
<b>Tabla 14</b> Cuadro resumen del Índice de Plasticidad de las arcillas de las calicatas C- 01, C-02 y C-03.....	75
<b>Tabla 15</b> Cuadro resumen del Gravedad específica C-01, C-02 y C-03.....	75
<b>Tabla 16</b> Resultados del ensayo de Proctor modificad para las canteras de Curayllo	76
<b>Tabla 17</b> Propiedades índices de las muestras de suelos. ....	82
<b>Tabla 18</b> Resultados del grado de dispersión de las arcillas de la Cantera C-01 .....	84
<b>Tabla 19</b> Resultados del grado de dispersión de las arcillas de la Cantera C-02.....	87
<b>Tabla 20</b> Resultados del grado de dispersión de las arcillas de la Cantera C-03.....	89



<b>Tabla 21</b>	Resultados del índice de erosión de las arcillas de la cantera C-01 .....	92
<b>Tabla 22</b>	Resultados del índice de erosión de las arcillas de la cantera C-02.....	96
<b>Tabla 23</b>	Resultados del índice de erosión de las arcillas de la cantera C-03.....	100
<b>Tabla 24</b>	Susceptibilidad a la tubificación de las arcillas de las canteras. ....	108
<b>Tabla 25</b>	Distribución Normal .....	110



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> Componentes principales de una presa.....	35
<b>Figura 2</b> Variaciones fundamentales de presas de relleno de tierra y enrocado. ....	36
<b>Figura 3</b> Tubificación.....	38
<b>Figura 4</b> Erosión interna en una presa ocasionada por la erosión hacia detrás de la presa.....	39
<b>Figura 5</b> Erosión interna en la presa ocasionada por fuga concentrada. ....	39
<b>Figura 6</b> Erosión interna en la fundación originada por erosión hacia atrás.....	40
<b>Figura 7</b> Erosión interna en el cuerpo de la presa y en el suelo de fundación. ....	40
<b>Figura 8</b> Equipo del ensayo de Pinhole.....	42
<b>Figura 9</b> Grado de dispersión del suelo.....	43
<b>Figura 10</b> Erosión general y local. ....	45
<b>Figura 11</b> Diagrama de erosión del agujero (Hole Erosion Test) .....	47
<b>Figura 12</b> Esquema de resultados típicos prueba de erosión del agujero. ....	51
<b>Figura 13</b> Equipo de Proctor modificado.....	55
<b>Figura 14</b> Ubicación política del distrito de Arapa. ....	59
<b>Figura 15</b> Ubicación geográfica de la futura presa Chaqa - Qarqa.....	59
<b>Figura 16</b> Ubicación de las 3 canteras cercanas a la presa Chaqa - Qarqa. ....	61
<b>Figura 17</b> Cantera N° 01. ....	67
<b>Figura 18</b> Cantera N° 02. ....	68
<b>Figura 19</b> Cantera N° 03. ....	68
<b>Figura 20</b> Curva granulométrica de la arcilla de la cantera C-01. ....	71
<b>Figura 21</b> Curva granulométrica de la arcilla de la cantera C-02. ....	72
<b>Figura 22</b> Curva granulométrica de la arcilla de la cantera C-03. ....	73



<b>Figura 23</b>	Gráfico de la relación de la densidad seca vs la humedad de la cantera C-01.....	76
<b>Figura 24</b>	Gráfico de la relación de la densidad seca vs la humedad de la cantera C-02.....	77
<b>Figura 25</b>	Gráfico de la relación de la densidad seca vs la humedad de la cantera C-03.....	77
<b>Figura 26</b>	Ensayo de la tubificación.....	78
<b>Figura 27</b>	Curvas Granulométricas .....	81
<b>Figura 28</b>	Carta de Plasticidad de Casagrande.....	82
<b>Figura 29</b>	Densidad Seca – Contenido de Agua Óptimo .....	83
<b>Figura 30</b>	Resultados de los diámetros del ensayo de tubificación de la Cantera C-01. .....	85
<b>Figura 31</b>	Muestras del ensayo de tubificación - Cantera 01 .....	86
<b>Figura 32</b>	Resultados de los diámetros del ensayo de tubificación de la Cantera C-02. .....	87
<b>Figura 33</b>	Muestras del ensayo de tubificación - Cantera 02.....	88
<b>Figura 34</b>	Resultados de los diámetros del ensayo de tubificación de la Cantera C-03. .....	89
<b>Figura 35</b>	Muestras del ensayo de tubificación - Cantera 03.....	91
<b>Figura 36</b>	Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-01-1 .....	93
<b>Figura 37</b>	Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-01-2 .....	93
<b>Figura 38</b>	Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-01-3 .....	94



<b>Figura 39</b>	Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-01-4 .....	94
<b>Figura 40</b>	Gráfico de presión vs tiempo para las muestras de la Cantera C-01 .....	95
<b>Figura 41</b>	Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-02-1 .....	97
<b>Figura 42</b>	Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-02-2 .....	97
<b>Figura 43</b>	Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-02-3 .....	98
<b>Figura 44</b>	Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-02-4 .....	98
<b>Figura 45.</b>	Gráfico de presión vs tiempo para las muestras de la Cantera C-02. ....	99
<b>Figura 46</b>	Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-03-1 .....	101
<b>Figura 47</b>	Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-03-2 .....	101
<b>Figura 48</b>	Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-03-3 .....	102
<b>Figura 49</b>	Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-03-4 .....	102
<b>Figura 50.</b>	Gráfico de presión vs tiempo para las muestras de la Cantera C-03. ....	103
<b>Figura 51.</b>	Gráfico de Gauss. ....	109



## ACRÓNIMOS

LL:	Límite Líquido
LP:	Límite Plástico
IP:	Índice de Plasticidad
INGEMMET:	Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico
SUCS:	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
Ce:	Coefficiente de Erosión
Ĩ:	Índice representativo de la tasa de erosión
IHET:	Índice de Tasa de Erosión
CH:	Arcilla Inorgánica de Alta Plasticidad
CL:	Arcilla Inorgánica de Plasticidad Media
SC:	Arena Arcillosa
ML:	Limo Inorgánico
MH:	Limo Inorgánico
SM:	Arena Limosa
HET:	Hole Erosion Test



## RESUMEN

La tubificación es uno de los orígenes primordiales de las fallas en presas de tierra (Nakano, 1991). La erosión del suelo se genera cuando las partículas son arrastradas por la fuerza erosiva del flujo de agua. Esta acción separa las partículas, creando pequeños conductos que aumentan de tamaño, fomentando la formación de tubos. El Pinhole Test de Sherard (1976), evalúa la susceptibilidad de los suelos a dispersión y piping mediante pruebas empíricas cualitativas. El presente estudio tuvo por objetivo evaluar la susceptibilidad a la tubificación de las arcillas de las canteras de Curayllo para construir la presa de tierra Chaqa-Qarqa, Azángaro, Puno 2023, para ello se usó la metodología de la Prueba de erosión de agujeros (HET) para evaluar la erosión en suelos cohesivos y el método estándar para la identificación de suelos dispersivos (Norma ASTM –D4647, USBR 5410-89). Se emplea una metodología de investigación de tipo básica, de diseño no experimental, del nivel descriptivo y con enfoque cuantitativo. Para ello se tomó muestras de 105 Kg de arcilla por cantera y se evaluaron 12 muestras de suelo agrupados 4 muestras por cantera (CL). Los resultados que se obtuvieron fueron valores de un grado de dispersión "D1" interpretando como arcillas dispersivas. Se calcularon el esfuerzo cortante crítico ( $\tau_c$ ) y el índice representativo de tasa de erosión ( $\tilde{I}$ ), los cuales permitieron identificar su comportamiento como "muy rápida" cuyos valores varían de 2.1631 a 2.9857 siendo este parámetro adimensional. En conclusión, los resultados revelan una variabilidad significativa destacando un claro grado dispersivo y una propensión a la rápida erosión interna.

**Palabras Clave:** Tubificación, Grado de dispersión, Pinhole, HET, Susceptibilidad.





## ABSTRACT

Piping is one of the primary origins of failures in earthen dams (Nakano, 1991). Soil erosion occurs when particles are carried away by the erosive force of flowing water. This action separates the particles, creating small conduits that increase in size, encouraging the formation of tubes. The Pinhole Test by Sherard (1976) evaluates the susceptibility of soils to dispersal and piping through qualitative empirical tests. The objective of this study was to evaluate the susceptibility to tubing of clays from the Curayllo quarries to build the Chaqa-Qarqa earth dam, Azángaro, Puno 2023, for this the Hole Erosion Test (HET) methodology was used to evaluate erosion in cohesive soils and the standard method for identification of dispersive soils (ASTM Standard –D4647, USBR 5410-89). A basic research methodology is used, with a non-experimental design, descriptive level and quantitative approach. For this, samples of 105 kg of clay were taken per quarry and 12 soil samples grouped together, 4 samples per quarry (CL), were evaluated. The results obtained were values of a dispersion degree "D1" interpreted as dispersive clays. The critical shear stress ( $\tau_c$ ) and the representative erosion rate index ( $\tilde{I}$ ) were calculated, which allowed identifying its behavior as "very fast" whose values vary from 2.1631 to 2.9857, this parameter being dimensionless. In conclusion, the results reveal significant variability, highlighting a clear degree of dispersion and a propensity for rapid internal erosion.

**Keywords:** Piping, Dispersion degree, Pinhole, HET, susceptibility.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel internacional, la evaluación de la susceptibilidad a la tubificación de arcillas en la construcción de presas ha ganado prominencia, destacándose ejemplos como el colapso de la presa de Bouzey en Francia en 1979, donde la tubificación comprometió la estabilidad de la estructura. Experiencias como esta resaltan la necesidad global de comprender y abordar la tubificación en proyectos de ingeniería geotécnica. Organizaciones internacionales, como la Sociedad Internacional de Mecánica del Suelo y Geotecnia, han promovido investigaciones para mejorar las prácticas de evaluación de la tubificación, reconociendo su impacto en la seguridad de presas en todo el mundo (Ferreira & Alonso, 2021).

A nivel nacional en Perú, la ingeniería geotécnica se enfrenta al desafío de adaptar estándares internacionales a las condiciones geológicas locales. Datos del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 2020) revelan variaciones significativas en las propiedades geotécnicas del suelo en distintas regiones del país. En el caso de presas de tierra, como la planificada en Azángaro, la variabilidad en la susceptibilidad a la tubificación de las arcillas extraídas de canteras nacionales requiere una atención específica. Datos de estudios geotécnicos previos indican que las arcillas en ciertas canteras pueden exhibir comportamientos diferentes ante procesos erosivos, destacando la necesidad de directrices nacionales adaptadas a las condiciones locales.



## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

A partir de lo mencionado previamente, se derivan los siguientes interrogantes, tanto de índole general como específica.

### **1.2.1. Problema general**

¿Cómo se evaluará la susceptibilidad a la tubificación las arcillas de las canteras de Curayllo para construir la presa de tierra Chaqa-Qarqa, Azángaro, Puno 2023?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- ¿Las características de las arcillas de las canteras de Curayllo son permisibles para construir la presa de tierra Chaqa-Qarqa, Azángaro, Puno 2023?
- ¿Cuál es el grado de dispersión que tienen las arcillas de las canteras de Curayllo para construir la presa de tierra Chaqa-Qarqa, Azángaro, Puno 2023?
- ¿Cuánto es el índice de tasa de erosión en las arcillas de las canteras de Curayllo para construir la presa de tierra Chaqa-Qarqa, Azángaro, Puno 2023?

## **1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.3.1. Hipótesis general**

Son susceptibles a la tubificación las arcillas de las canteras de Curayllo para construir la presa de tierra Chaqa-Qarqa, Azángaro, Puno 2023.



### **1.3.2. Hipótesis específicas**

- Las características de las arcillas de las canteras de Curayllo no son permisibles para construir la presa de tierra Chaqa-Qarqa, Azángaro, Puno 2023.
- El grado de dispersividad en las arcillas de las canteras de Curayllo son dispersivas para construir la presa de tierra Chaqa-Qarqa, Azángaro, Puno 2023.
- El índice de tasa de erosión es menor a 4 en las arcillas de las canteras de Curayllo para construir la presa de tierra Chaqa-Qarqa, Azángaro, Puno 2023.

## **1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1. Justificación teórica**

La construcción de una presa de tierra en la zona de Chaqa-qarqa, dentro del Centro Poblado de Curayllo, se sustenta en la necesidad de asegurar el suministro de recursos hídricos esenciales para actividades agrícolas, ganaderas y consumo humano en el Distrito de Arapa, Provincia de Azángaro, Departamento de Puno. Desde una perspectiva teórica, la investigación se enfoca en el análisis detallado de las propiedades y comportamiento de las arcillas presentes en las canteras cercanas. Es crucial comprender los posibles desafíos, como el fenómeno de tubificación, que puede afectar la estabilidad a largo plazo de la presa. Este enfoque teórico contribuirá al diseño y la implementación de la presa de tierra, asegurando su eficacia y durabilidad.



#### 1.4.2. Justificación metodológica

La elección de materiales arcillosos de canteras cercanas para la construcción de la presa implica la necesidad de una metodología de estudio integral. La investigación se basa en técnicas y procedimientos específicos para analizar las propiedades físicas y geotécnicas de las arcillas, anticipando y mitigando posibles problemas como la tubificación. Se emplean métodos de muestreo, ensayos de laboratorio y análisis geotécnicos para evaluar la idoneidad del material y diseñar medidas preventivas y correctivas. La metodología se centrará en la aplicación práctica de conocimientos teóricos para garantizar la eficiencia y sostenibilidad de la presa.

Justificación desde un punto de vista geotécnico: El modelado de pinhole y la prueba de erosión de agujeros (HET) son dos ensayos geotécnicos que se utilizan para evaluar la resistencia a la erosión de un suelo. Ambos ensayos consisten en perforar un agujero en el suelo y luego inyectar agua a presión a través del agujero. La resistencia a la erosión del suelo se mide por la cantidad de tiempo que tarda el agujero en colapsar.

El modelado de Pinhole y HET desempeñan un papel crucial en el campo de la ingeniería geotécnica, ya que ofrecen investigación meritoria sobre la estabilidad del suelo cuando se somete a erosión. En concreto, estas técnicas son particularmente útiles para evaluar la estabilidad de suelos dispersivos, que son propensos a la erosión causada por el agua. Al utilizar modelos estenopecicos y HET, los ingenieros pueden evaluar eficazmente la estabilidad de dichos suelos (Bowles, 1982).



Justificación desde un punto de vista hidráulico: Desde una perspectiva hidráulica, tanto el modelado de Pinhole como el HET tienen importancia. Estas pruebas arrojan información valiosa sobre la permeabilidad del suelo y su capacidad para facilitar el movimiento del agua. Esta información resulta esencial para el desarrollo de infraestructura hidráulica, incluidas presas, canales y oleoductos (Xiaodong & Benson, 1995).

Justificación desde un punto de vista físico: Desde una perspectiva física, el modelado Pinhole y HET tienen una importancia significativa. Estas pruebas arrojan datos valiosos sobre las características físicas del suelo, incluida la cohesión, la fricción y la resistencia al corte. Estos datos son fundamentales en el proceso de diseño de estructuras geotécnicas como edificios, carreteras y puentes.

#### **1.4.3. Justificación social**

El estudio tiene un impacto social significativo al proporcionar un suministro confiable de agua para diversas actividades fundamentales en la comunidad con la construcción de la presa. La presa beneficia a agricultores, ganaderos y residentes locales, mejorando el bienestar alimentario y mejor acceso a una fuente de agua potable. Además, la investigación y aplicación de medidas preventivas aseguran la seguridad de la infraestructura, evitando riesgos para la comunidad y promoviendo un desarrollo sostenible en la región.

#### **1.4.4. Justificación económica**

Refiriéndose al punto de vista económico, la construcción de esta presa de tierra en Chaqa-Qarqa contribuye al desarrollo económico local al respaldar actividades agrícolas y ganaderas, generando empleo y mejorando la productividad. La investigación geotécnica y la implementación de medidas



preventivas son inversiones estratégicas que protegen la inversión a largo plazo, evitando reparaciones costosas y asegurando la funcionalidad continua de la presa. En este contexto, la investigación no solo respalda la seguridad hídrica, sino que también tiene implicaciones positivas para el crecimiento económico local.

## **1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.5.1. Objetivo general**

Evaluar la susceptibilidad a la tubificación de las arcillas de las canteras de Curayllo para construir la presa de tierra Chaqa-Qarqa, Azángaro, Puno 2023.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Determinar las características de las arcillas de las canteras de Curayllo para construir la presa de tierra Chaqa-Qarqa, Azángaro, Puno 2023.
- Determinar el grado de dispersión de las arcillas de las canteras de Curayllo para construir la presa de tierra Chaqa-Qarqa, Azángaro, Puno 2023.
- Determinar el índice de tasa de erosión en las arcillas de las canteras de Curayllo para construir la presa de tierra Chaqa-Qarqa, Azángaro, Puno 2023.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

##### 2.1.1. Antecedentes Internacionales

Pang y Zhang (2019) observaron que la composición del agua de los poros es un factor importante que afecta a la formación de tubos en suelos arcillosos. Su propósito fue investigar el papel de la composición del agua de los poros en la formación de tubos en suelos arcillosos. Realizaron experimentos de laboratorio en suelos arcillosos con diferentes contenidos de sodio, calcio y magnesio, también midieron la permeabilidad del suelo y la tasa de formación de tubos en condiciones de flujo laminar. Su muestra fue los suelos arcillosos con diferentes contenidos de sodio, calcio y magnesio, así también el agua destilada y agua con diferentes concentraciones de sodio, calcio y magnesio. Sus resultados fueron que los suelos con un alto contenido de sodio son más susceptibles a la formación de tubos que los suelos con un bajo contenido de sodio; el calcio y el magnesio también pueden favorecer la formación de tubos, pero en menor medida que el sodio. Sus conclusiones fueron que el agua con un alto contenido de sodio es un factor importante que favorece la formación de tubos en suelos arcillosos.

Lopes et al. (2019) estudiaron el fenómeno de la desertificación en la región de Gilbués, Brasil, con el propósito de describir el estado y el papel de la construcción de represas en el control de los procesos de degradación del suelo y agua en dicha área. La metodología empleada fue de naturaleza básica, utilizando un diseño no experimental. La población de estudio se definió como la región del





sur de Piauí, y la muestra se tomó del área experimental de 53 hectáreas, que estaba parcialmente ubicada en tres pequeñas cuencas hidrográficas. Los resultados indicaron que las complicaciones de infiltración del agua en la base de las estructuras provocaron su ruptura; cerca del 50% de las primeras estructuras edificadas colapsaron por la tubificación y la carencia de un vertedero, resultando en el vertido de agua a través de la cima de la presa. Como conclusión, se determinó que la edificación de vertederos de tierra con material propio local fue muy eficaz durante un año hidrológico, pero se observó el progreso acelerado de la erosión sobre la cresta del vertedero en ese equivalente año.

Alcocer y Murillo (2019) estudiaron la estabilidad de las presas mexicanas, por lo cual se propusieron como objetivo diagnosticar preliminarmente más de cien presas que se encontraban en riesgo. La metodología que empleo fue de tipo básica y con un diseño no-experimental, la población fue comprendida por las 6200 presas y bordos de protección y la muestra fueron los 61 presas. En los resultados mostraron del total de presas estudiadas 24 que asumen riesgo de inestabilidad con cortinas de tierra y nueve con cortinas rígidas. Concluyeron que, si los materiales sin un control de compactación generan en la cortina grietas, deformaciones, brecha o erosiones de importancia, si se confirma la existencia de suelos dispersivos o erosionables, benefician la generación de tubificación en las presas.

González y Roque (2019) se propusieron determinar un nivel de susceptibilidad expresado en porcentaje mediante la aplicación del ensayo de Pinhole, con el objetivo de evaluar los riesgos asociados a la falla por tubificación. En la metodología, adoptaron un enfoque evaluativo con un diseño que combina



elementos documentales y de campo, centrándose en el Dique "C" de la Central Hidroeléctrica "Simón Bolívar" en Guri como muestra. Los resultados obtenidos a través de la metodología de Montecarlo, implementado con un total de cincuenta mil iteraciones en el programa RAM Commander, revelaron una posibilidad de existencia de fallo del 12,88%. Se llegó a la conclusión de que, el factor que ejerce una mayor significancia en el progreso de la falla ocasionada por tubificación es una inadecuada gestión de mantenimiento, con una importancia del 75,53%. Le siguen en importancia la presencia de insectos o animales en el dique (área), el desarrollo del asentamiento topográfico en el dique (cuerpo) y el incremento de las infiltraciones, cada uno de estos con una importancia significativa del 7,55%.

En el artículo de García, Pérez y Gómez (2020) evaluaron la eficacia de la tubificación de arcillas en presas de tierra, abordando la problemática de la erosión y el drenaje en estas estructuras. Los objetivos incluyen distinguir los factores que intervienen en la efectividad de la tubificación en arcillas y proponer recomendaciones para su uso en la práctica. La metodología incluye una investigación de la literatura y un estudio de situaciones reales. Como conclusión manifiestan que la tubificación de arcillas puede optimizar la tenacidad ante la erosión y el drenaje en presas de tierra. Las conclusiones sugieren que la selección del material y método de tubificación debe basarse en la evaluación de cada caso específico.

Li y Yang (2020) plantearon que las condiciones ambientales, como la lluvia y la escorrentía, también pueden afectar a la formación de tubos en suelos arcillosos. Su principal objetivo fue investigar el impacto de las condiciones ambientales en la formación de tubos en suelos arcillosos usando la metodología de realizar experimentos de laboratorio en suelos arcillosos expuestos a diferentes



condiciones ambientales, como lluvia y escorrentía midiendo la permeabilidad del suelo y la tasa de formación de tubos. La muestra que usaron fueron agua destilada, suelos arcillosos, también usaron el sistema de riego para simular la lluvia y la escorrentía. Obtuvieron como resultados que la lluvia y la escorrentía favorecen la formación de tubos en suelos arcillosos y el efecto de la lluvia es más pronunciado que el de la escorrentía. Concluyeron que las condiciones ambientales, como la lluvia y la escorrentía, son factores importantes que deben tomarse en consideración para una evaluación de las contingencias de la tubificación en suelos arcillosos.

Durante la investigación, Marín Saucedo y Cieza Benavides (2021) examinaron y analizaron cuidadosamente las propiedades físicas y mecánicas tradicionales del suelo. También tuvieron en cuenta las propiedades mineralógicas y dispersivas para obtener una comprensión integral de las características del suelo. Su principal objetivo era estabilizar el suelo en el área urbana del distrito de Pilluana mediante la adición de cemento Portland, y estaban particularmente interesados en cómo esto afectaría el comportamiento mecánico del suelo. Para determinar estas propiedades, siguieron la metodología Terzaghi y utilizaron estándares establecidos para todas las propiedades del índice del suelo. Para determinar el tipo de suelo tropical en el área urbana del distrito de Pilluana, realizaron un análisis de correlación de los límites de consistencia y utilizaron la metodología Crumb para erosión o dispersión. Los resultados indicaron que estos suelos son del tipo Laterita Arcillosa y tienen propiedades dispersivas. De ahí que concluyeron que los suelos tórridos de la urbe de Pilluana efectivamente pertenecen a la tipología laterita arcillosa, teniendo propiedades dispersivas.



Zhang y Li (2021), indagaron que, al no existir un modelo predictivo fiable para la formación de tubos en suelos arcillosos, propusieron como objetivo desarrollar un modelo predictivo para la formación de tubos en suelos arcillosos usando una metodología de desarrollar un modelo basado en un análisis de los factores que afectan a la formación de tubos, para así poder validar su modelo con datos experimentales. Usaron como muestra los datos experimentales sobre la formación de tubos en suelos arcillosos y un software para el desarrollo y la validación del modelo. Sus resultados fueron que el modelo resultó ser preciso para predecir la formación de tubos en suelos arcillosos y puede utilizarse para evaluar el riesgo de tubificación en suelos arcillosos. Concluyeron que el modelo es una herramienta valiosa para la evaluación del riesgo de tubificación en suelos arcillosos.

Santamaria (2021) examinó las irregularidades en la comuna 16 (Belén) con el propósito de identificar la posible presencia de suelos dispersivos, basándose en los resultados de pruebas de caracterización física de los suelos. La metodología usada fue de naturaleza básica con enfoque cuantitativo. La población de estudio se definió mediante el mapa de puntos que indican la ubicación de los baches en la comuna dieciséis (Belén) de la urbe de Medellín, y la muestra consistió en 11 puntos de los cuales se extrajeron las muestras de suelo. Los resultados revelaron que, el 80 % de todas las muestras que fueron recogidas en la comuna dieciséis fueron catalogadas como limos, mientras que el restante 20 % se constituyó de arenas limosas. Al evaluar el grado de dispersividad de estos suelos, se determinó que cerca del 50 % no mostraban características de dispersión, mientras que los demás exhibían dispersión ligera y/o moderada, cada vez que se acercaban a la zona de la comuna



dieciséis, relacionados como depósitos de sedimentos finos arrastrados por corrientes de agua. Como conclusión, Santamaria destacó que los suelos en la zona estudiada no presentan características dispersivas significativas, ya que más de la mitad de los manifiestos del ensayo de doble hidrómetro en cada muestra indicaron la ausencia de dispersión.

Acuña y Betancur (2022) analizaron si era posible establecer un nivel porcentual de susceptibilidad mediante la implementación del ensayo de Pinhole teniendo como objetivo la evaluación del grado de dispersividad de distintas muestras de suelo deformadas e inalteradas, extraídas del norte de la ciudad de Cartagena de Indias, mediante el ensayo de Pinhole. En la metodología que utilizaron fue de tipo aplicada y con un diseño experimental, la población fueron los suelos arcillosos de la ciudad Cartagena y para las muestras de tomo distintos suelos arcillosos con potencial expansivo para los ensayos de laboratorio. En los resultados demostraron que es un suelo arcilloso de alta plasticidad (CH), sus niveles de sodio fueron de 0,72 a 1,94%, las concentraciones del suelo fueron moderadamente dispersivo (i.e., ND3), la humedad óptima fue de 26% y peso un específico seco aparente máximo de 13,87 kN/m, por el contrario, para las condiciones de remoldeo del ensayo Pinhole, resultaron que las arcillas ostentan un grado de dispersividad ligero hasta medianamente dispersivo (denominada ND3), manifestando mayor susceptibilidad a estos fenómenos en humedades relativamente menores a las encontradas en campo del 34%. En sus conclusiones fue que las arcillas fueron categorizadas de acuerdo a las normas como aquellas que no pueden ser utilizadas para construcciones civiles debido al grado de incertidumbre que existe en su comportamiento.



Martínez, Fernández y González (2023) exploraron los impactos generados por las diversas microestructuras presentes en suelos arcillosos, las cuales fueron identificadas a través de la observación con un microscopio electrónico de barrido. En particular, se centraron en la arcilla del Kenger, examinando cómo la compactación, ya sea por el lado seco o húmedo del óptimo, afecta las medidas que describen el proceder dinámico de estos suelos, tales como el módulo de rigidez, el módulo Young y el coeficiente de amortiguamiento. Estos parámetros fueron evaluados a través del ensayo de la columna resonante. El enfoque principal de la investigación fue evaluar la eficacia de la tubificación de arcillas en presas construidas con arcilla apisonada, con el objetivo de proponer recomendaciones prácticas basadas en los resultados obtenidos. La metodología utilizada incluyó una exhaustiva revisión de la literatura y un análisis experimental. Los resultantes indican que la tubificación de arcillas puede corregir la tenacidad a la erosión y el drenaje en presas de arcilla apisonada. Las conclusiones sugieren que la selección del material y método de tubificación debe basarse en la evaluación de cada caso específico y en la consideración de la microestructura de la arcilla.

### **2.1.2. Antecedentes Nacionales**

Coronel (2019) propuso como objetivo la estimación de las propiedades índices y mecánicas de los suelos utilizados en la construcción de una presa de tipología de tierra. La metodología aplicada fue de índole cuantitativa, con un diseño cuasi-experimental. La población consistió en 0.70m<sup>3</sup> de arena y 0.10m<sup>3</sup> de confitillo, mientras que la muestra estuvo compuesta por sesenta kilogramos de arena fina y treinta kilogramos de confitillo. En los resultados, se identificó que la muestra exhibía características de arena pobremente graduada según la



clasificación SUCS. Las densidades mínima y máxima en confitillo lavado drenante fueron de 1.27g/cm<sup>3</sup> y 1.42g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, mientras que en confitillo lavado filtrante fueron de 1.26g/cm<sup>3</sup> y 1.42g/cm<sup>3</sup>. En la prueba de Proctor modificado, la densidad seca máxima y la humedad óptima para la arena sin lavar fueron de 1.939g/cm<sup>3</sup> y 12.84%, respectivamente, y para la arena con lavado continuo fueron de 1.80g/cm<sup>3</sup> y 10.07%. Como conclusión, se determinó que, bajo las condiciones examinadas, los materiales son adecuados para considerar en la construcción de la presa como parte de un material homogéneo.

Rosales (2021) planteó como objetivo la evaluación de la susceptibilidad a la tubificación de suelos empleados en la construcción de presas de tierra mediante ensayos experimentales de laboratorio. La metodología aplicada se caracterizó por su enfoque aplicado y un diseño experimental, utilizando como población todos los suelos destinados a la construcción y seleccionando una muestra de 28 muestras de suelo que se utilizarían tanto en la presa de tierra como en el terreno de fundación. Los resultados se categorizaron en siete tipos de suelos (CH, CL arenoso, CL, SC, ML, MH y SM), de los cuales se determinaron el esfuerzo cortante crítico ( $\tau_c$ ) y el índice representativo de tasa de erosión ( $\tilde{I}$ ). Este último permitió caracterizar el comportamiento de los suelos analizados, clasificando los especímenes SM como extremadamente rápida, los especímenes ML como muy rápida, los especímenes MH y CH como moderadamente rápida, y los especímenes CL, CL arenoso y SC como modernamente lenta. Estos valores, expresados como un parámetro adimensional, variaron de 0.1588 a 0.6607 en las condiciones específicas del estudio. En resumen, la tubificación se manifiesta en las muestras carentes de cohesión (arena limosa) o de muy baja plasticidad (con



IP inferior al 6 por ciento), así como en suelos con cohesión con un IP superior al 15 por ciento y con más del 40 por ciento de limo.

Sandoval (2022) se trazó como objetivo principal llevar a cabo el modelado y simulación de la rotura de la presa Poechos ante una avenida milenaria. La metodología empleada siguió un diseño preexperimental longitudinal, considerando la presa Poechos en el departamento de Piura como la población de estudio, y la muestra también fue la presa Poechos. Los resultados obtenidos en el escenario de tubificación con caudal medio revelaron que el caudal máximo instantáneo en el momento de la grieta fue de 73,989.52 m<sup>3</sup>/s, con una descarga pico que ocurre en un lapso de 2 horas. Durante este periodo, la rama ascendente del hidrograma tiene una duración de 2 horas, y las dimensiones de la grieta provocada por la rotura son de cincuenta metros de profundidad y 167.82 metros de ancho, con un tiempo total de falla de la estructura de 2.92 horas. En el escenario de retorno de 100 años (TR 100 años), el caudal máximo instantáneo en el momento de la grieta fue de 74,092.23 m<sup>3</sup>/s, con una descarga pico que también se extiende a lo largo de 2 horas. En este caso, las dimensiones de la brecha fueron similares, con una profundidad de cincuenta metros, un ancho de 168.42 metros y un tiempo total de colapso de la estructura de 2.92 horas. En la conclusión, se destacó que las velocidades generadas por la rotura cubren áreas más extensas con velocidades de al menos 10 m<sup>2</sup>/s en la falla por tubificación en comparación con el desbordamiento, y los niveles de agua resultantes varían entre 0 y 15 metros para ambos fenómenos.

Lujan (2022) se propuso simular la dinámica de la onda generada por la rotura de la presa de tierra y evaluar su riesgo en la presa Gallito Ciego. La metodología tomada fue de enfoque aplicativo y con un diseño no-





experimental. La población de interés se definió como la extensión del río Jequetepeque, que se origina en la presa Gallito Ciego y desemboca en el Pacífico. La muestra correspondió al modelado desde el eje de la presa hasta la desembocadura del río Jequetepeque en el océano Pacífico. En relación con la rotura de la presa en el segundo escenario, que implicó el fenómeno de tubificación, se registró un caudal mayor de 58,212.30 m<sup>3</sup>/s, con un tiempo de descarga de 0.80 horas. La conclusión extraída fue que, bajo condiciones normales, la rotura de la presa Gallito Ciego, inducida por tubificación, resultaría en un caudal elevado de entrada al embalse de 4,087.84 m<sup>3</sup>/s. Utilizando el mismo enfoque que en el caso de sobrevertimiento, se estimó que en 0.80 horas ocurriría la rotura o falla de la presa, y el caudal extremo descargado tras la ruptura del dique ascendería a 58,212.30 m<sup>3</sup>/s.

Samame et al. (2022) tuvieron como propósito identificar y evaluar el grado de dispersividad de los suelos en la carretera Puerto Sangama en dirección a la localidad de Pilluana. La metodología aplicada fue de carácter experimental y cuantitativo, utilizando niveles aplicativos y un diseño experimental. La población de interés abarcó todos los suelos en el tramo de la carretera desde Puerto Sangama hasta Pilluana, y la muestra consistió en 15 calicatas. Los resultados revelaron que los suelos preponderantes eran arcillas y limos, con mediana y baja plasticidad, con una humedad máxima del 27.02 %, de firmeza moderadamente dura y con la presencia de sales. En relación con estos ensayos de dispersión, los resultados fueron inconsistentes: el Crumb mostró una reacción de dispersión de ligera a casi ninguna, el doble hidrómetro indicó dispersividad intermedia solo en la calicata C-11 sin considerar la aparición de limos, y el ensayo de Pinhole concluyó que todas las calicatas no presentan dispersividad.



La conclusión a la que llegaron fue que el ensayo de Pinhole resulta ser que tiene más confiabilidad, ya que es cualitativo y cuantitativo, también modela las condiciones reales. Sin embargo, destacaron la importancia de no pasar por alto la existencia de salinidad y las evaluaciones del doble hidrómetro. En este contexto, afirmaron que los suelos en la carretera hacia la urbe de Pilluana consisten en arcillas y limos de mediana dispersión, con la existencia de sales.

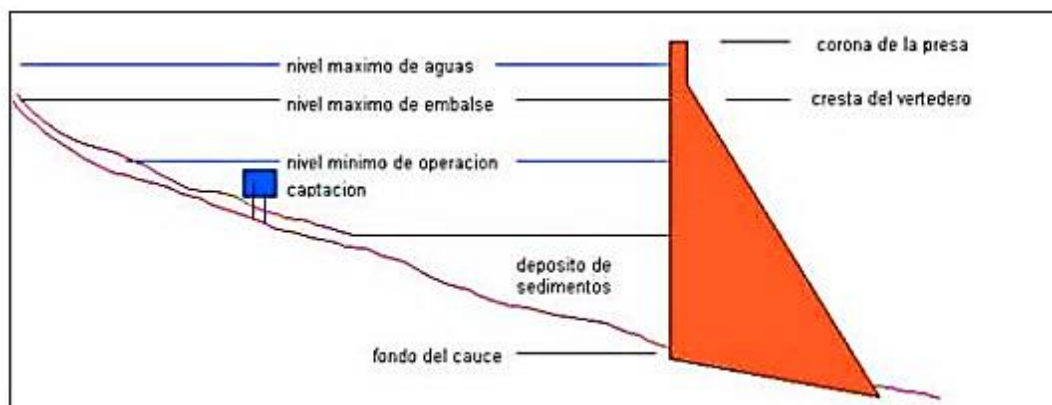
## **2.2. MARCO TEÓRICO**

### **2.2.1. Presas**

Los proyectos de presas se destacan como elementos fundamentales en la infraestructura hidráulica, y su número es considerable. Estas estructuras fueron concebidas con el propósito de impulsar el desarrollo económico, requiriendo inversiones significativas en términos de recursos financieros, naturales y humanos. En esencia, las presas consisten en tres tipos de estructuras principales, como señala Campos (2013). Además, es posible categorizar las presas de diversas maneras, considerando especialmente el material con el que están construidas. En épocas antiguas, las presas de tierra eran comúnmente empleadas, presentando menos demandas en términos de deformabilidad en comparación con otros tipos de presas (Yali, 2018).

## Figura 1

### *Componentes principales de una presa*



Nota: (Yali, 2018).

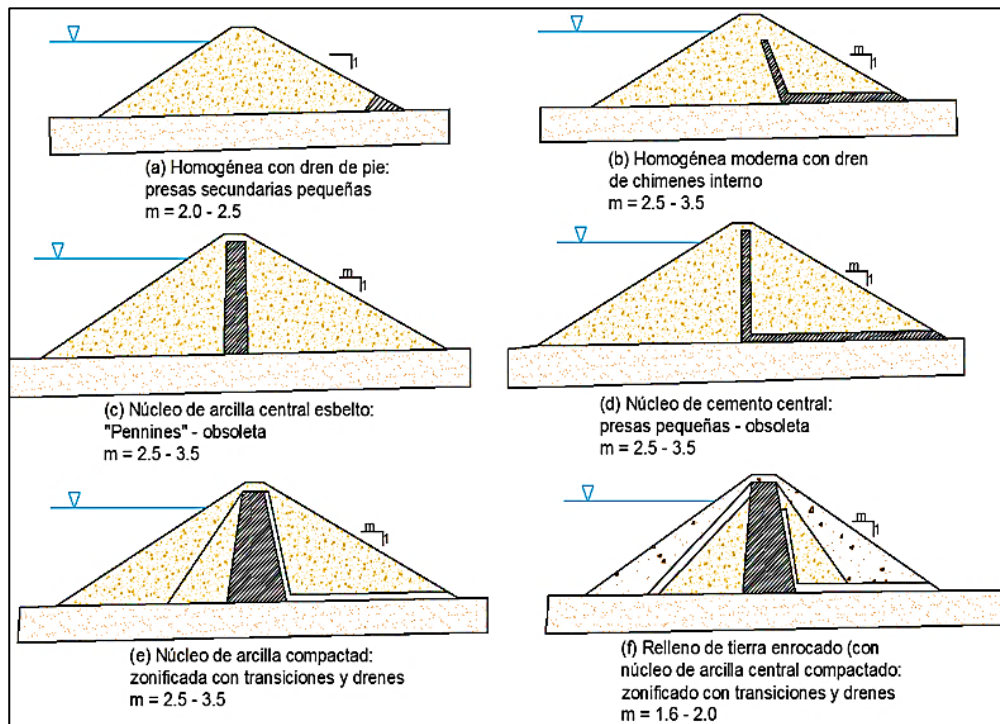
Durante la vida útil de la obra, el agua en el embalse no debe superar el Nivel Máximo de Aguas, ni si quiera durante las crecidas extraordinarias (Yali, 2018).

### **2.2.2. Presas de tierra**

Se considera que una presa es de relleno de tierra cuando más del 50% del volumen del material colocado está representado por suelos compactados. La construcción de este tipo de presa se basa principalmente en el uso de suelos seleccionados con precisión para propósitos de ingeniería, con un proceso de compactación llevado a cabo de manera uniforme e intensiva en capas relativamente delgadas, y con un control preciso del contenido de humedad (Novak, Moffat, & Nalluri, 2001). La Figura 2 ilustra secciones de algunas variantes más comunes de presas que combinan rellenos de tierra, también enrocado.

**Figura 2**

*Variaciones fundamentales de presas de relleno de tierra y enrocado*



Nota: (Rosales E. , 2021).

### 2.2.3. Principales causas de fallas en presas

(Nakano, 1991) señala que el factor de seguridad 1.2, no representa que la presa sea segura.

Las causas importantes de las fallas o daños en presas son:

- Sobre-vertimiento.
- Tubificación, filtración y erosión interna.
- Fallas en los taludes.

Según Berrío y Yohanna (2017), la falla de presas de gran envergadura construidas entre 1800 y 1986, excluyendo aquellas ubicadas en Japón y China, ha estado vinculada, en aproximadamente la mitad de los casos con modos de falla

conocidos, a la erosión interna. La Tabla 1 proporciona estadísticas sobre las fallas en grandes presas de tierra.

**Tabla 1**

*Estadística de fallas en grandes presas de tierra*

Tipo de Erosión		Deslizamiento del dique		
Tipo de falla	Erosión externa (sobre-vertimiento)	Erosión interna	Inestabilidad estática	Inestabilidad sísmica
%	48	46	4	2
mundial	94		6	

Nota: (Berrío & Yohanna, 2017)

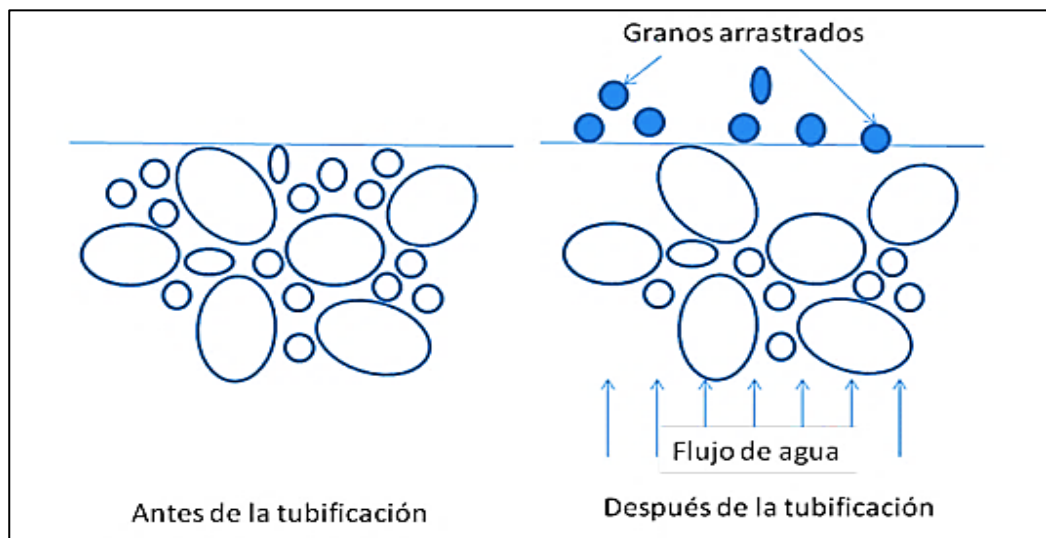
#### 2.2.4. Tubificación

Se precisa como el procedimiento de remoción o arrastre de partículas de suelo por debajo del gradiente hidráulico de la salida, dando como resultado la creación de un conducto partiendo de la salida. El fenómeno, así como definición se le conoce en la literatura como canalización retrógrada, ya que este suceso siempre ocurre en contra de la dirección del flujo desde el lado aguas abajo hacia el lado aguas arriba. A veces el término se utiliza erróneamente como sinónimo de levantamiento, erosión interna o migración (Li & Arroyo, 2011).

Las tuberías comienzan cuando las fuerzas erosivas del flujo de agua atraen partículas de suelo hacia la masa de suelo. A medida que se van eliminando las partículas, se van dejando pequeños canales en el suelo por los que el agua circula a mayor velocidad y con mayor resistencia, por lo que los fenómenos de formación de tubos tienden a aumentar, aumentando siempre el diámetro de los canales que se forman en el interior del terraplén (Rosales E. , 2021).

### Figura 3

#### *Tubificación*



Nota: (Li & Arroyo, 2011).

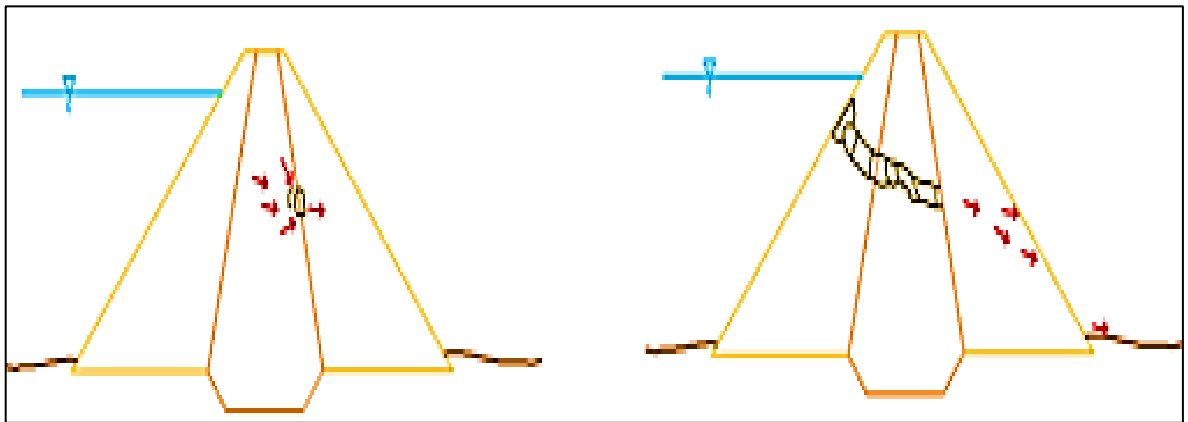
#### 2.2.4.1. Condiciones generales de la tubificación

Según Fell (2005), se requieren condiciones para que se desarrolle el fenómeno de tubificación:

- Debe existir una vía de flujo para la infiltración y agua.
- En la vía de flujo, debe haber material que pueda erosionarse y que sea transportado por el flujo de filtración.
- Tiene que existir una salida no protegida (sin filtración), por la cual el material que sufrió erosión pueda liberarse.
- Este fenómeno de tubificación se manifiesta tanto en el cuerpo de la presa como en el suelo de fundación.
- Las representaciones visuales del fenómeno de tubificación en el cuerpo de la presa se presentan en la Figura 4 y 5.

#### Figura 4

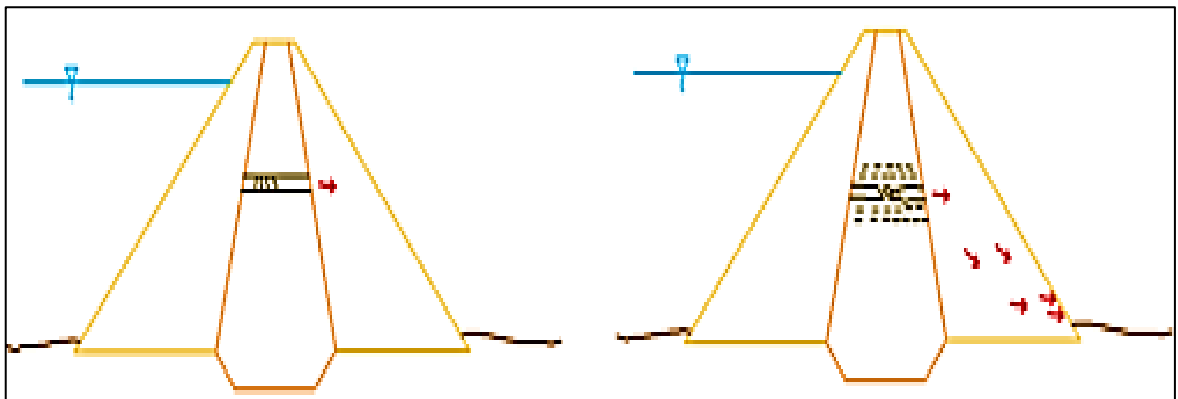
*Erosión interna en una presa ocasionada por la erosión hacia detrás de la presa*



Nota: (Rosales E. , 2021)

#### Figura 5

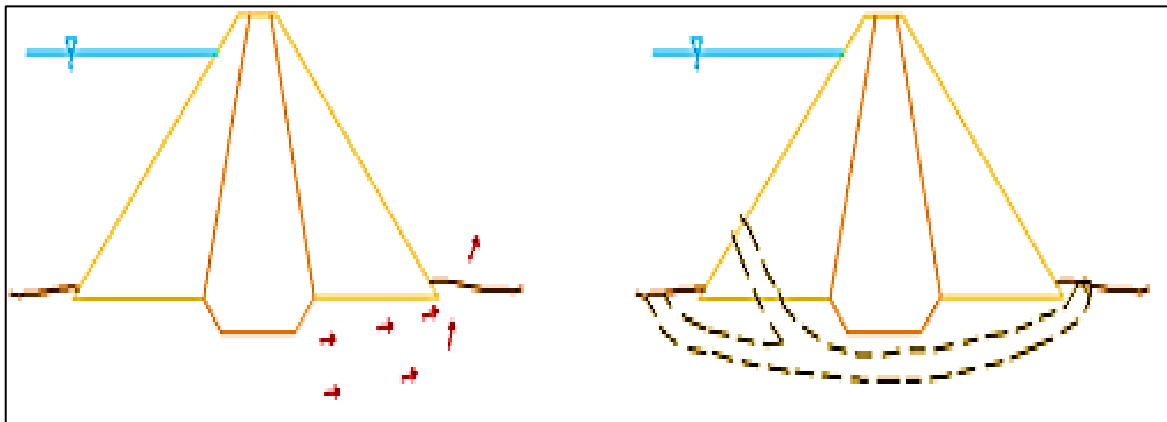
*Erosión interna en la presa ocasionada por fuga concentrada*



Nota: La tubificación en el terreno de fundación de la presa se muestra en la Figura 6 (Rosales E. , 2021)

## Figura 6

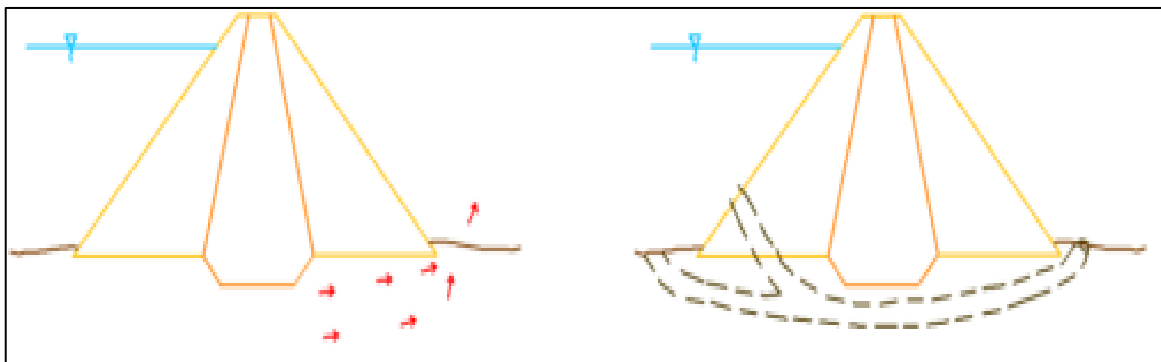
*Erosión interna en la fundación originada por erosión hacia atrás*



Nota: La tubificación desde el cuerpo de la presa hasta el terreno de fundación se muestra en la Figura 7 (Rosales E. , 2021).

## Figura 7

*Erosión interna en el cuerpo de la presa y en el suelo de fundación*



Nota: (Rosales E. , 2021)

### 2.2.4.2. Factores involucrados en el fenómeno de tubificación.

De acuerdo con Rico (2000), la falta de compactación adecuada en el terraplén es un factor que contribuye al fenómeno de tubificación, especialmente cuando afecta a suelos susceptibles.

La propiedad más determinante en la resistencia a la tubificación de un material es su índice de plasticidad; las arcillas con alto índice de plasticidad ( $I_p > 15$ ) ofrecen la máxima resistencia al arrastre de partículas



causada por fuerzas de filtración, mientras que los materiales con índices de plasticidad menores a seis son los menos satisfactorios en este aspecto, a excepción de las arcillas con alto contenido de iones de sodio en el agua de poro (Marsal & Reséndiz, 1975).

La Tabla 2 resume la experiencia acumulada respecto a la susceptibilidad de los suelos al fenómeno de tubificación, organizada de manera descendente respecto a la resistencia al fenómeno de tubificación.

**Tabla 2**

*Resistencia a la susceptibilidad a la tubificación*

<b>Alta resistencia a la susceptibilidad a la tubificación</b>	Arcillas muy plásticas ( $I_p > 15$ por ciento), adecuadamente compactadas. Arcillas muy plásticas ( $I_p > 15$ por ciento) con compactación defectuosa.
<b>Mediana resistencia a la susceptibilidad a la tubificación</b>	Arenas bien graduadas o mezcla de arena y grava, con contenido de arcilla con plasticidad media ( $I_p$ mayor a seis por ciento), bien compactadas. Arenas bien graduadas o mezcla de arena y grava, con contenido de arcilla de plasticidad media ( $I_p > 6\%$ ), deficientemente compactadas. Mezclas no plásticas bien graduadas y bien compactadas, de grava arena y limo ( $I_p$ menor a seis por ciento).
<b>Mínima resistencia a la susceptibilidad a la tubificación</b>	Mezclas no plásticas adecuadamente graduada y defectuosamente compactada, con grava arena y limo ( $I_p$ menor a seis por ciento). Arenas limpias, uniformes y finas ( $I_p < 6\%$ ) bien compactadas. Arenas limpias, finas, uniformes ( $I_p < 6\%$ ), defectuosamente compactadas.

Nota: (Juárez & Rico, 2011)

## 2.2.5. Características de grado de dispersión

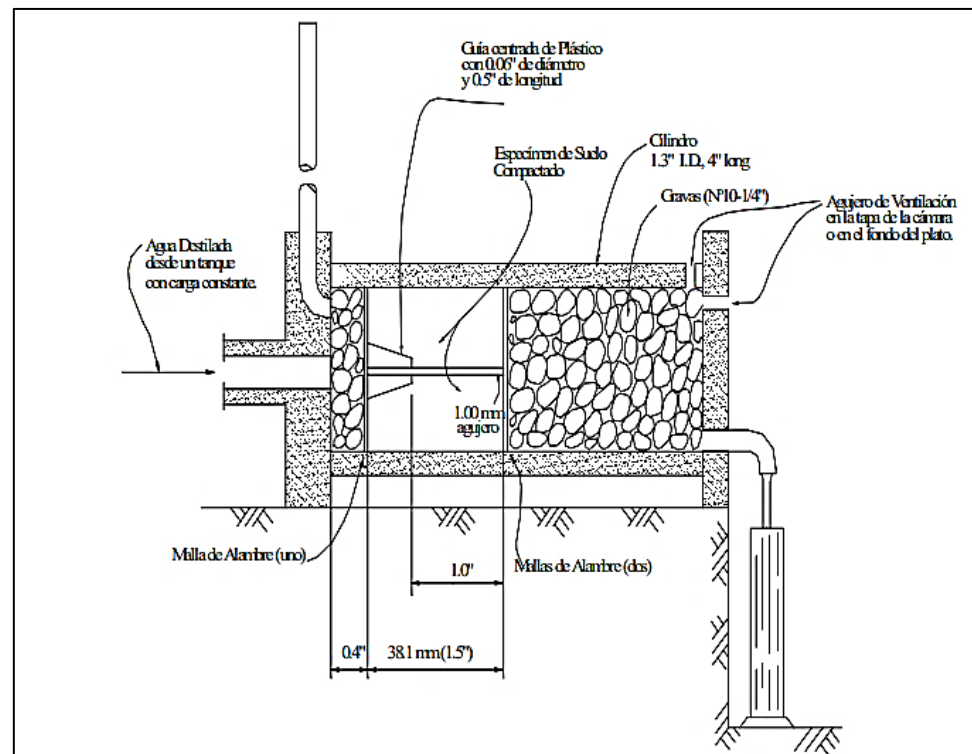
### 2.2.5.1. Ensayo de Pinhole

La prueba de Pinhole para determinar si se ha producido difusión en un espécimen de suelo, donde el agua transita atravesando pequeños agujeros en la muestra de suelo. Este flujo simula el proceso por el cual el

agua puede ingresar al suelo en la naturaleza a través de los poros, agujeros, grietas y canales que puedan existir en el centro de una presa (Rosales E. , 2021).

### Figura 8

#### *Equipo del ensayo de Pinhole*

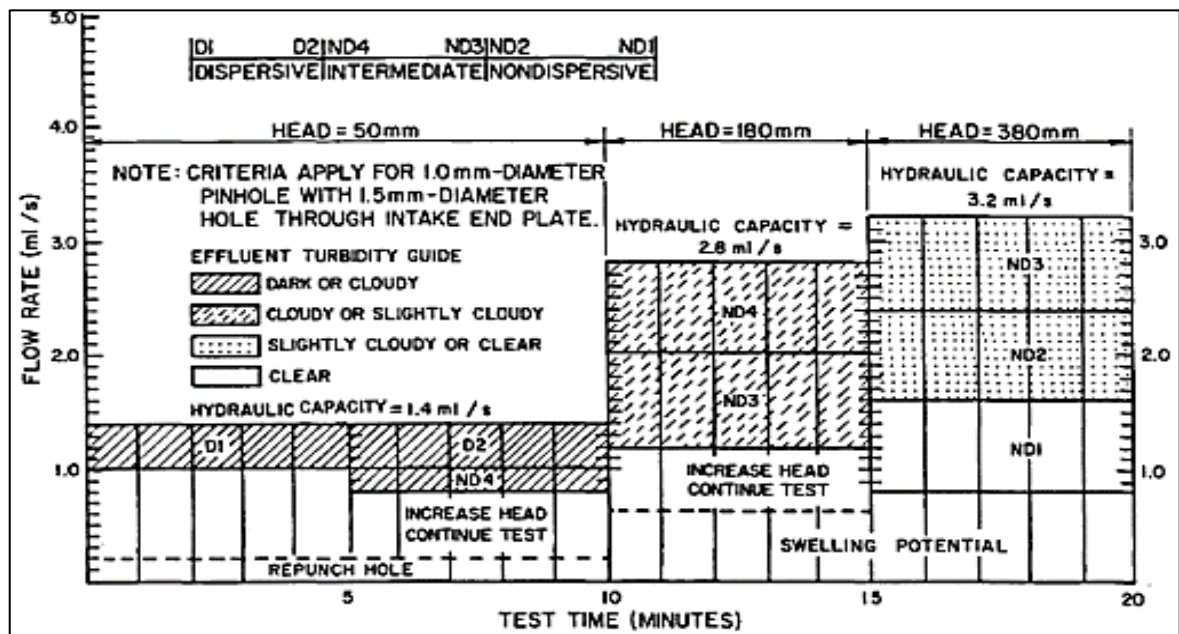


Nota: (Garay & Alva).

En 1976, Sherard desarrolló el ensayo que consiste en circular agua que atraviese un orificio de 1.0 mm de diámetro en un espécimen cilíndrico de suelo con dimensiones de 25.0 mm de longitud por 35.0 mm de diámetro. Durante la infiltración, se utiliza agua destilada con una carga hidráulica de 50, 180 y 380 mm. Durante el proceso, se registra tanto la velocidad alcanzada, que puede variar entre 30 y 60 cm/seg, como la turbidez del agua, como detalla Rosales E. (2021).

**Figura 9**

*Grado de dispersión del suelo*



Nota: ASTM D 4647 (2006)

**Tabla 3**

*Criterios de evaluación para Resultados de Pinhole:*

Clasificación de dispersividad	Cabeza	tiempo	Turbidez		Ø agujero mm
D1	50	5	Oscuro	Muy oscuro	$\geq 2$
D2	50	10	Moderadamente oscuro	Oscuro	$> 1.5$
ND4	50	10	Ligeramente oscuro	Moderadamente Oscuro	$\leq 1.5$
ND3	180	5	Poco visible	Ligeramente Oscuro	$\geq 1.5$
	380	5			$< 1.5$
ND2	1020	5	Claro	Claro	1
ND1	1020	5	Perfectamente claro	Perfectamente claro	

Nota: ASTM D 4647 (2006)



### 2.2.5.2. Características de índices de tasa de erosión

- **Erosión general**

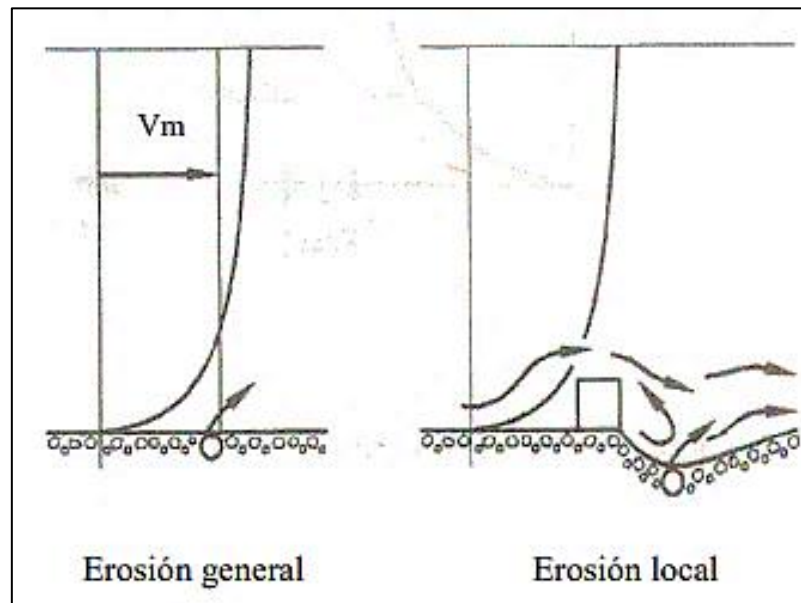
Este tipo de erosión puede impactar extensas secciones del curso de un río y se origina debido a la energía generada por el aumento de la velocidad del agua. El incremento en la velocidad del flujo también intensifica la acción erosiva, superando la resistencia al desplazamiento de las partículas del suelo y provocando su desprendimiento (Caminati, 2003).

- **Erosión local**

La erosión local afecta a áreas más reducidas en el lecho de un río y es resultado de procesos de flujo más complejos en comparación con la erosión general. El flujo local tiende a ser altamente turbulento, dando lugar a remolinos, siendo esta la principal causa de dicho fenómeno. Este tipo de erosión se manifiesta en lugares específicos del río, como curvas o cerca de obstáculos, generando alteraciones en los patrones de flujo. Estructuras hidráulicas como presas, puentes de muelles, o construcciones en los canales de los ríos, así como obras de canalización, pueden propiciar este tipo de erosión (Caminati, 2003).

**Figura 10**

*Erosión general y local*



Nota: (López G., 2020).

### **2.2.5.3. Esfuerzo cortante**

Este esfuerzo en el suelo se define como la resistencia máxima que el suelo puede soportar, expresada como la resistencia interna que proporciona una unidad de área de masa de suelo para resistir daños en cualquier plano dentro de ella (Salas, 2011).

### **2.2.6. Prueba de erosión de agujeros (Hole Erosion Test)**

La Prueba de Erosión de Agujeros (HET) es una prueba diseñada para simular la erosión y su progresión interna en represas de tierra.

A diferencia de las pruebas destinadas a determinar la tensión de corte crítica y las tasas de erosión, como las pruebas de dispersión, como las pruebas de Pinhole o las pruebas de filtración no erosivas, en las cuales el material de la presa



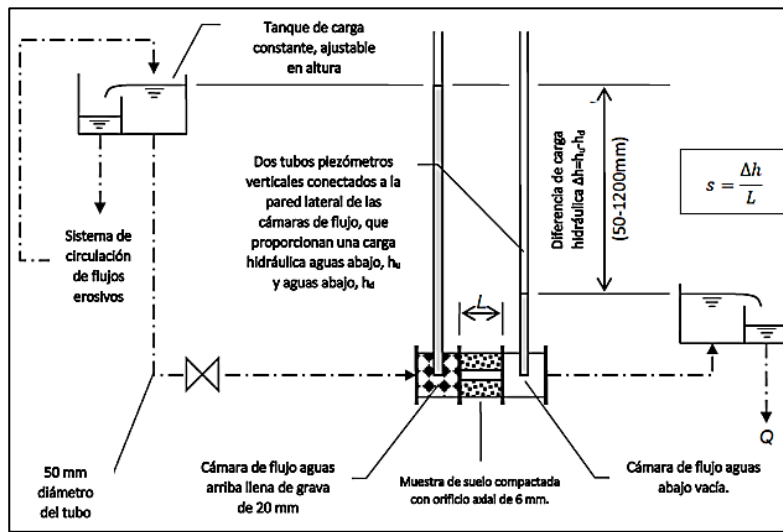
y el filtro pasan a través de muestras de suelo intactas simultáneamente, la HET utiliza un permeámetro (Luthi, 2011).

Los procedimientos de evaluación que replican los mecanismos de erosión del suelo, aunque no tienen la finalidad de establecer la tensión de corte crítica y las tasas de erosión, incluyen pruebas de dispersión, como las pruebas de Pinhole, y pruebas de filtración no erosivas. Estas pruebas implican que tanto el material de la presa como el filtro atraviesen muestras de suelo intactas simultáneamente. También se pueden utilizar otros métodos para llevar a cabo evaluaciones de erosión interna utilizando un permeámetro (Luthi, 2011).

En la HET, un espécimen de suelo reconstituida con un orificio axial se le impone a un flujo de presión de carga hidráulica constante. La tasa de erosión y el esfuerzo cortante se evalúan mediante la velocidad promedio del flujo de agua, el gradiente hidráulico y el tamaño de la abertura final. Dado que el énfasis principal recae en la tasa de erosión más que en el esfuerzo cortante crítico, los suelos de prueba se caracterizan mediante un número de grupo de suelo, que generalmente varía de 1 (erosión extremadamente rápida) a 6 (erosión extremadamente lenta) (Luthi, 2011).

**Figura 11**

*Diagrama de erosión del agujero (Hole Erosion Test)*



Nota: (Luthi, 2011)

### 2.2.6.1. Interpretación de datos del ensayo

Para pruebas realizadas en muestras con agujeros preformados orientados horizontalmente, esfuerzo cortante en el fluido en el área del agujero preformado, en el momento  $t$ ,  $\tau_t$  (N/m<sup>2</sup>), es dado por:

$$\tau_t = \rho_w \cdot g \cdot i_t \cdot \frac{D_t}{4}$$

(1)

Donde:

- $\rho_w$ (Kg/m<sup>3</sup>): densidad del fluido.
- $g$  (m/s<sup>2</sup>): aceleración de la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>).
- $\tau_t$  (N/m<sup>2</sup>): esfuerzo cortante en el fluido en la superficie de contacto con el agujero en el tiempo  $t$ .
- $D_t$  (m): diámetro del agujero en el tiempo  $t$ .

- **it:** gradiente hidráulico sobre la longitud del agujero en el tiempo t.

La tasa de erosión, en cada instante t, denotada de por  $\varepsilon_t$  (kg/s/m<sup>2</sup>), se puede obtener a través de la siguiente relación:

$$\varepsilon_t = \frac{\rho_d}{2} \frac{dD_t}{dt}$$

(2)

- **$\rho_d$  (Kg/m<sup>3</sup>):** es la densidad seca del suelo.

Las ecuaciones (1) y (2) nos permiten comprobar que, para un instante t dado, la determinación del esfuerzo cortante a lo largo del agujero preformado  $\tau_t$ , y la tasa de erosión por unidad de área del agujero  $\varepsilon_t$ , depende, respectivamente, sobre el diámetro del orificio  $D_t$ , y la derivada temporal del diámetro del tubo,  $dD_t/dt$ .

$$\varepsilon_t = C_e (\tau_{HET} - \tau_c)$$

(3)

$C_e$  (Kg/(s.m<sup>2</sup>)): es un coeficiente de erosión del suelo

El índice de tasa de erosión presenta un orden de magnitud que varía entre cerca de 0 (suelo de erosionabilidad extremadamente rápida) y 6 (suelo de erosionabilidad extremadamente lenta), es dado por:

$$I_{HET} = -\log(C_e)$$

(4)

No obstante, no es posible medir directamente el diámetro del agujero durante la prueba HET. En cambio, el diámetro de la tubería se



estima, en cada instante, indirectamente, midiendo el caudal,  $Q_t$  (m<sup>3</sup>/s), que pasa a través del orificio preformado y la pérdida de carga hidráulica.

La estimación del diámetro de la tubería, en cualquier momento  $t$ , durante la prueba HET, depende de las condiciones del flujo (es decir, laminar o turbulento). Todas las pruebas realizadas se realizaron con flujo turbulento (Santos, Caldeira, & Maranhã da, 2012).

Con base en las mediciones realizadas, se puede estimar el diámetro del orificio preformado en cada tiempo  $t$ , para flujo turbulento, utilizando la siguiente expresión (Santos, Caldeira, & Maranhã da, 2012).

$$D_{Tt} = \left( \frac{64 \cdot Q_t^2 \cdot f_{Tt}}{\pi^2 \cdot \rho_w \cdot g \cdot i_t} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (5)$$

$f_{Tt}$  (kg/m<sup>3</sup>) generalmente se designa como el factor de fricción, en el tiempo  $t$ , para condiciones de flujo turbulento, dado por:

$$f_{Tt} = \frac{\rho_w \cdot g \cdot \pi^2 \cdot i_t \cdot D_t^5}{64 \cdot Q_t^2} \quad (6)$$

Se consideró que  $f_{Tt}$  varía linealmente entre el inicio y el final de la prueba.

(Luthi, 2011) proporcionó valores típicos de  $\tilde{I}_{HET}$  que varían de 0 a 6, donde valores más bajos indican que los suelos experimentan una erosión mucho más rápida en comparación con aquellos que tienen valores más altos. Los suelos de prueba fueron clasificados en seis grupos con base en un índice de tasa de erosión representativo que describe los valores

normalizados de  $\tilde{I}HET$  a una densidad seca máxima del 95 % y un contenido de humedad óptimo, según se detalla en la Tabla 4.

**Tabla 4**

*Relación cualitativa del índice representativo de la tasa de erosión y la progresión de la erosión interna*

<b>Número de grupo</b>	<b>Índice de tasa de erosión. <math>\tilde{I}HET</math></b>	<b>Progreso de la erosión interna</b>
1	< 2	Extremadamente rápida
2	2-3	Muy rápida
3	3-4	Moderadamente rápida
4	4-5	Moderadamente lenta
5	5-6	Muy lenta
6	>6	Extremadamente lenta

*Nota:* (Luthi, 2011)

El coeficiente de erosión del suelo se caracteriza como la pendiente de la línea de regresión donde ambos, el coeficiente de erosión y el esfuerzo cortante, aumentan. Por otro lado, el esfuerzo cortante crítico indica la susceptibilidad a la erosión y representa el valor de esfuerzo cortante en el cual se inicia dicho fenómeno. Esta magnitud se define como la intersección con el eje x de la línea de regresión lineal extrapolada, según se ilustra en la Figura 12 (Luthi, 2011).

**Tabla 5**

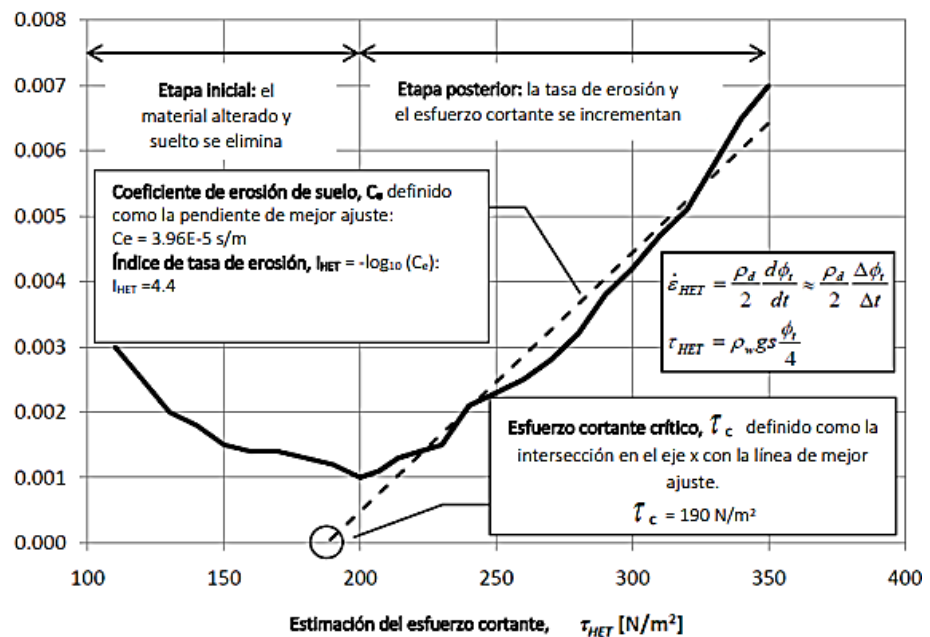
*Relación entre  $\tilde{I}_{HET}$  y clasificación de suelos para suelos no dispersivos*

Clasificación de suelo	Índice de tasa de erosión, $\tilde{I}_{HET}$		
	Mínimo probable	Mejor estimación	Máximo probable
SM con finos < 30%	1	<2	2.5
SM con finos > 30%	<2	2 a 3	3.5
SC con finos < 30%	<2	2 a 3	3.5
SC con finos > 40%	2	3	4
ML	2	2 a 3	3
CL-ML	2	3	4
CL	3	3 a 4	4.5
CL-CH	3	4	5
MH	3	3 a 4	4.5
CH con $w_l < 65\%$	3	4	5
CH con $w_l > 65\%$	4	5	6

Nota: (Santos, Caldeira, & Maranhã da, 2012)

**Figura 12**

*Esquema de resultados típicos prueba de erosión del agujero*



Nota: (Rosales E. , 2021)

## 2.2.7. Características índices de los suelos

### 2.2.7.1. Granulometría

La medición del tamaño de partículas es crucial en la construcción y la geotecnia para caracterizar y clasificar suelos (Gutiérrez W. , 2023). Tenemos la Norma Técnica Peruana (NTP) 339.128 desarrolla el método para el análisis granulométrico por una técnica el cual es el tamizado y por sedimentación de los suelos, pudiendo efectuarse en forma combinada con uno de los métodos indicados (Norma Técnica Peruana, 2014).

Limo: Suelo que pasa el tamiz 0.075mm (N°200) con  $IP < 4$ .

Arcilla: Suelo que pasa el tamiz 0.075 (N°200) con  $IP \geq 4$ .

**Tabla 6**

*Abertura de tamices-granulometría*

<b>Tamices</b>	<b>Designación ASTM</b>
75,0 mm	(3 pulg)
50,0 mm	2 pulg)
37,5 mm	(1 ½ pulg)
25,0 mm	(1 pulg)
19,0 mm	(¾ pulg)
9,5 mm	(3/8 pulg)
4,75 mm	(N° 4)
2,00 mm	(N°10)
850 µm	(N° 20)
425 µm	(N° 40)
250 µm	(N° 60)
106 µm	(N°140)
75 µm	(N°200)

Nota: (Norma Técnica Peruana, 2014).

### 2.2.7.2. Contenido de humedad de los suelos

Es la relación, en % del peso del agua del espécimen al peso de los sólidos, el contenido de humedad teóricamente varía entre  $0 \leq$

contenido humedad ( $\omega$ ) mas  $\infty$  sin embargo en la práctica varían desde 0 hasta valores de 100 %, incluso de 500 % o 600 % en el valle de México (Duque & Escobar, 2002).

### 2.2.7.3. Límites de consistencia

Los suelos arcillosos pueden manifestar diferentes estados, como sólido, semisólido, plástico o semilíquido, según sus propiedades y la cantidad de agua presente. El cambio de estado de estos suelos ocurre en función de su contenido de humedad, y este límite específico se conoce como límite de Atterberg. El método usado es de Atterberg, y el contenido de humedad en el que se produce el cambio de estado se denomina límite de Atterberg. Este ensayo se realiza en laboratorio siguiendo la normativa ASTM D 4318-800, utilizando equipos de Atterberg (Huanca, 2018).

- **Límite líquido;** define un contenido de humedad desde la cual la muestra de suelo tiene un comportamiento como líquido viscoso. Se determina con la técnica empleado el equipo de Casagrande y esta normalizado con la norma UNE 103-103-94, teniendo en cuenta que la muestra de suelo haya pasado el tamiz N (0.4 mm) (Sánchez, 2019).
- **Límite plástico;** es el contenido de humedad por debajo a través del cual el suelo tiene un comportamiento como un sólido, donde se emplea una norma UNE 103-104-94.
- **Índice de plasticidad;** es el rango de consistencia en el que el suelo se comporta plásticamente o como material plástico y mide su capacidad para

desarrollar cohesión. IP corresponde al valor de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico (López, Gurvara, León, & López, 2023).

### **Tabla 7**

#### *Rangos de potencial de expansión*

Potencial de Expansión	Índice de plasticidad IP (%)
Bajo	$IP \leq 15$
Medio	$10 \leq IP \leq 35$
Alto	$20 \leq IP \leq 55$
Muy alto	$IP \geq 35$

Nota: (López, Gurvara, León, & López, 2023).

#### **2.2.7.4. Proctor modificado**

La prueba de Proctor se utiliza para determinar la relación entre la densidad seca y humedad de compactación de los materiales utilizados en la capa granular. Por lo tanto, los resultados de las pruebas se utilizarán como referencia para el control de calidad de la compactación in situ (López G. , 2020).

**Figura 13**

*Equipo de Proctor modificado*



Nota: (López G., 2020).

**Tabla 8**

*Rangos típicos de la gravedad específica de las partículas*

**Proctor Modificado ASTM D 1557**

Ec = Energía de compactación = 56 250 Lb-ft/ft<sup>3</sup>  
W = Peso del martillo = 10 lb  
h = Altura de caída del martillo = 18 pulgadas  
N = Número de golpes por capas = depende del molde  
n = Número de capas = 5  
V = Volumen del molde cm<sup>3</sup> = depende del método dev prueba  
Suelo y molde a utilizar

Método A	Método B	Método C
Pasa la malla N° 4	Pasa la malla N° 3/8"	Pasa la malla N° 3/4"
Molde 4 pulgadas de diámetro	Molde 4 pulgadas de diámetro	Molde 6 pulgadas de diámetro
V = 1/30 ft <sup>3</sup>	V = 1/30 ft <sup>3</sup>	V = 1/13.3 ft <sup>3</sup>
N = 25 golpes / capa	N = 25 golpes / capa	N = 56 golpes / capa

Nota: (ASTM (American Society of Testing Materials), 2005)

### 2.2.7.5. Gravedad específica

La determinación de la gravedad específica del suelo se emplea para calcular aspectos relacionados con la fase del suelo, como la fracción de vacíos y la saturación. Este parámetro también se utiliza en los cálculos de densidad fija del suelo. El procedimiento implica la relación entre el peso y el volumen del suelo, donde se obtiene el peso seco del espécimen y la masa de los sólidos en la muestra y se obtiene el peso seco del espécimen y el común de los sólidos de la muestra (Cruz, y otros, 2022).

El valor de la gravedad específica está influenciado por la composición mineralógica de las partículas que conforman el suelo (Berry & D., 1993); algunos valores representativos se detallan en la Tabla 9.

**Tabla 9**

*Rangos típicos de la gravedad específica de las partículas.*

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Gs</b>
Grava, arena y limo	2, 65
Arcilla inorgánica	2, 70
Arcilla orgánica	2, 60
Turba amorfa	2, 00
Turba fibrosa	1, 50

Nota. (Berry & D., 1993)

Los valores típicos de gravedad específica que pueden ser utilizados como guía para calibrar los resultados en ensayos de laboratorio se muestra en la Tabla 10.





**Tabla 10**

*Valores típicos de gravedad específica*

<b>Tipo de Suelo</b>	<b>Índice de plasticidad IP (%)</b>
Arena	2.5 - 2.67
Arena limosa	2.67 - 2.70
Arcilla inorgánica	2.70 - 2.80
Suelos con micas o hierro	2.75 - 3.00
Suelos orgánicos	Variable, puede ser inferior a 2.00

Nota: (Bowles, 1982)



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. ÁMBITO DE ESTUDIO

El ámbito de estudio se sitúa se centra en la localidad de Curayllo, caracterizada por sus coordenadas geográficas en la Zona 19, hemisferio sur, con una posición Este (UTMX) de 390973.60 y Norte (UTMY) de 8338127.60 a una altitud de 3973 metros sobre el nivel del mar.

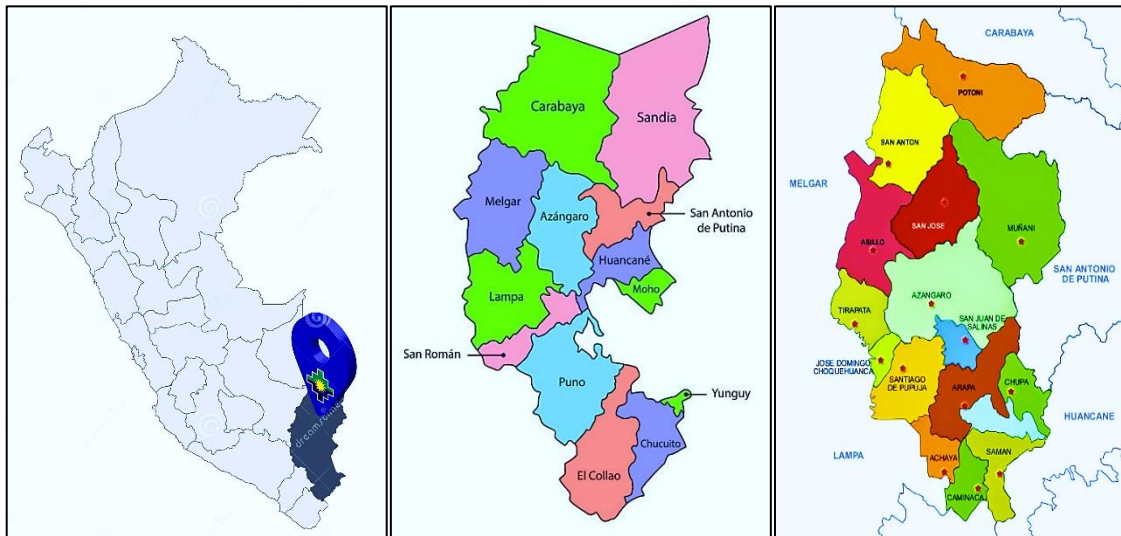
##### 3.1.1. Ubicación política

La región de Puno alberga la zona de estudio, que comprende los tres puntos de muestreo ubicados en las canteras de Curayllo, así como la futura construcción de la presa Chaqa-Qarqa. Esta área específica se sitúa dentro del distrito de Arapa, perteneciente a la provincia de Azángaro. (Ver Figura 14 y 15).

- **Región** : Puno
- **Provincia** : Azángaro
- **Distrito** : Arapa
- **Lugar** : Chaqa – Qarqa

**Figura 14**

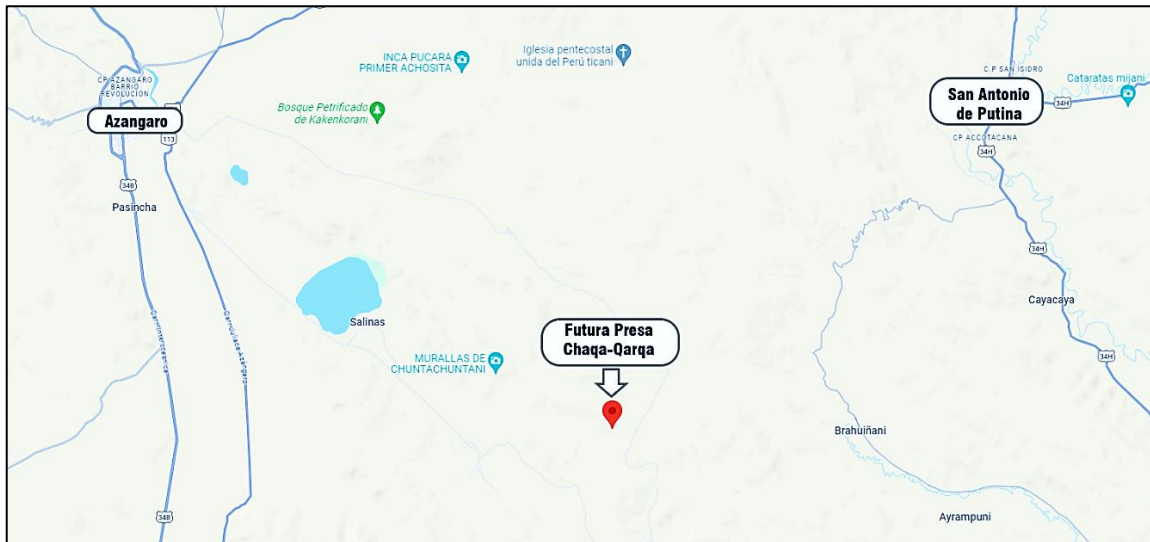
*Ubicación política del distrito de Arapa*



Nota: Material propio de la tesis.

**Figura 15**

*Ubicación geográfica de la futura presa Chaqa - Qarqa*



Nota: Obtenido de Google maps.



### 3.1.2. Procedencia del material utilizado

- **Cantera C-01**

La Cantera 1 está ubicada en la Zona 19, hemisferio sur, con coordenadas UTM Este (UTMX) de 389327.80 y Norte (UTMY) de 8335718.70. Estos valores precisos definen la posición geoespacial de la Cantera 1 en el sistema de coordenadas UTM (Ver Figura 16).

- **Cantera C-02**

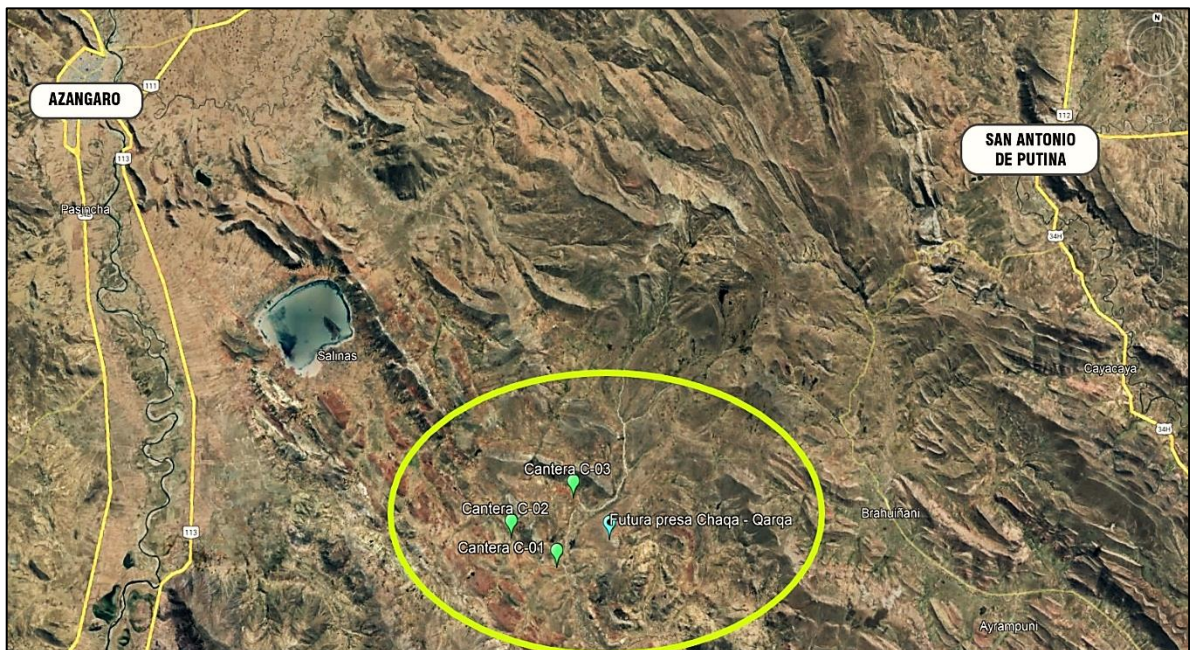
Por otro lado, la Cantera 2 se encuentra también en la Zona 19 y el hemisferio sur, con coordenadas UTM Este (UTMX) de 387671.30 y Norte (UTMY) de 8336615.40. Estos datos específicos proporcionan información detallada sobre la ubicación geográfica precisa de la Cantera 2 en el área de estudio (Ver Figura 16).

- **Cantera C-03**

La Cantera 3, al igual que las anteriores, está situada en la Zona 19 y el hemisferio sur. Sus coordenadas UTM son Este (UTMX) de 389791.50 y Norte (UTMY) de 8338025.20. Estos valores son esenciales para determinar con precisión la posición geoespacial de la Cantera 3 en relación con el sistema de coordenadas UTM (Ver Figura 16).

**Figura 16**

*Ubicación de las 3 canteras cercanas a la presa Chaqa - Qarqa*



Nota: Obtenido de Google Earth.

## 3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### 3.2.1. Tipo de Investigación

La investigación básica, también llamada investigación pura o investigación fundamental, es un tipo de investigación científica que se centra en la generación de nuevos conocimientos sobre un fenómeno o campo específico. Su objetivo principal es ampliar la comprensión del mundo natural o social, sin tener en cuenta su aplicación práctica inmediata. (Márquez-Fernández & Pérez-Sanz, 2021)

El tipo de investigación del presente estudio es **Básica** porque se busca generar nuevos conocimientos acerca de las arcillas en el centro poblado de Chaqa-qarqa, Azángaro, partiendo de un problema en este caso la tubificación que ocurre en la estructura de una presa, que será conformada por material arcilloso.



### 3.2.2. Nivel de Investigación

El nivel de investigación descriptivo es un tipo de investigación que se centra en la descripción de las características de un fenómeno o población. Su objetivo es proporcionar una descripción precisa y detallada de los hechos observados, sin enfocarse en establecer relaciones de causa y efecto. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2020).

En la presente investigación el nivel es **Descriptivo** porque se toma en cuenta diferentes tipos de arcillas provenientes de tres canteras localizadas cerca de la construcción de la presa, para observar la composición de las mismas y describirlas tal y como se recolectaron.

### 3.2.3. Diseño de la Investigación

Un diseño de investigación no experimental es un tipo de diseño de investigación que no involucra la manipulación intencional de las variables. En este tipo de diseño, el investigador observa los fenómenos tal como se dan en su contexto natural, sin intervenir de manera alguna (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2020).

Por lo tanto, el diseño de la investigación es **No Experimental** porque no genera ninguna alteración a las variables, por otro lado, será de tipo transversal porque se tomará la muestra de las canteras en su forma natural sin la modificación en el tiempo dado de la investigación.

### 3.2.4. Enfoque de la Investigación

El enfoque de investigación cuantitativo es un enfoque de investigación que se basa en la recolección y análisis de datos cuantitativos. Los datos



cuantitativos son datos que se pueden expresar en números. El enfoque cuantitativo se utiliza para describir, explicar y predecir fenómenos. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2020)

El presente estudio es de enfoque **Cuantitativo** porque los datos que se recolectaron son numéricos, en otras palabras, son medibles por lo que corresponde a este tipo de enfoque, tanto en los ensayos como en los cálculos que se realizarán.

### 3.2.5. Variables de la Investigación

#### 3.2.5.1. Variable independiente

Tubificación en arcillas.

- a) **Definición.** La tubificación en arcillas se refiere al fenómeno geotécnico en el cual las arcillas, especialmente cuando están expuestas a procesos de erosión o carga hídrica, desarrollan túneles o cavidades internas. Estas cavidades, conocidos como tubos, son formados por la acción del agua que fluye a través de la estructura de las arcillas, creando cavidades internas y comprometiendo la integridad de la masa de suelo. La tubificación es una condición que puede afectar la estabilidad de las estructuras que se asientan sobre suelos arcillosos, y su estudio es esencial para comprender y prevenir posibles problemas geotécnicos en proyectos de ingeniería civil y construcción.
- a) **Dimensiones.** Grado de dispersión e Índice de tasa de erosión.
- b) **Indicadores.** Ensayo de Pinhole, HET, Coeficiente de Erosión y Esfuerzo Cortante



- c) **Instrumentos.** Fichas y formatos de laboratorio.
- d) **Escala de medición.** Razón.

### 3.2.5.2. Variable interviniente

Caracterización de los suelos de las canteras.

- a) **Definición.** Se refiere a las Características de los suelos de las Canteras de Arcillas de Curayllo.
- b) **Dimensiones.** Características de las arcillas.
- c) **Indicadores.** Granulometría, Contenido de humedad, Límites de consistencia, Proctor Modificado, Gravedad Específica, Permeabilidad.
- d) **Instrumentos.** Fichas y formatos de laboratorio.
- e) **Escala de medición.** Razón

### 3.2.6. Población

Representa un conjunto conformado por todos los elementos a estudiar, la población está conformada por sujetos que no necesariamente son personas, pueden ser un grupo, días, negocios, etc. (Pino, 2007, pág. 449)

La población en la presente investigación estuvo conformada por las arcillas de las tres canteras de Curayllo, Distrito de Arapa, Provincia de Azángaro, Departamento de Puno.



### 3.2.7. Muestra

Considerado un fragmento que representa a la población en general, las cuales poseen particularidades de ser objetiva y reflejo fiel de la población, de modo que cada respuesta de las muestras pueda sistematizar a todos los elementos de la población (Carrasco, 2007 pág. 236).

Para la investigación se tomó muestras de 105 Kg de arcilla por cantera, en total 315 Kg de arcillas de las tres canteras que se analizaron, para la descripción más detallada de la muestra se tiene la siguiente Tabla 11:

**Tabla 11**

*Numero de testigos para el ensayo de compresión*

Ensayos	Cantera 1	Cantera 2	Cantera 3
Clasificación			
Límites de Consistencia	20	20	20
Gravedad específica			
Proctor modificado	25	25	25
Ensayos de tubificación	60	60	60
Total (kg)	105	105	105
Numero de ensayos mínimos por cantera	3	3	3

Nota: Material propio de la tesis.

### 3.3. VALIDEZ DE EQUIPOS Y CONFIABILIDAD.

Los equipos e instrumentos empleados en el desarrollo de esta investigación fueron suministrados por el laboratorio de mecánica de suelos y materiales de la Universidad Nacional del Altiplano (UNA-PUNO). Es relevante destacar que estos equipos han sido meticulosamente certificados y validados, asegurando su idoneidad y confiabilidad para su implementación en investigaciones de esta naturaleza. La procedencia de los instrumentos utilizados respalda la calidad y precisión de los datos obtenidos durante el estudio, consolidando la validez de los resultados alcanzados.



### **3.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

#### **3.4.1. Etapa preliminar**

En esta etapa de la investigación se realiza una revisión bibliográfica exhaustiva respecto al tema del estudio a tratar, con diferentes autores que anteceden a la presente.

#### **3.4.2. Etapa de pre campo**

En esta etapa se procedió a identificar las canteras a estudiar para poder extraer los materiales o los agregados necesarios, además se tiene una identificación de las coordenadas de las tres canteras a trabajar.

#### **3.4.3. Etapa de campo**

Durante esta etapa se realizó la exploración de campo donde se ubica las tres canteras propuestas se extrajeron la cantidad de muestras necesarias y finalmente se realizaron los ensayos de laboratorio y realizar los ensayos de tubificación.

Se uso los siguientes materiales:

- Herramientas manuales
- Libreta de campo
- Sacos

##### **3.4.3.1. Extracción de muestras de la cantera N° 01**

Se verifica en la ubicación exacta para poder extraer material  
Figura 17 para procesar en laboratorio Coordenadas UTM Cantera 1 Zona

19, hemisferio S, Este (UTMX) 389327.80, Norte (UTMY) 8335718.70

(Ver Figura 17).

### **Figura 17**

*Cantera N° 01*



Nota: Recojo de muestras de la Cantera 01.

#### **3.4.3.2. Extracción de muestras de la cantera N° 02**

Se verifica en la ubicación exacta para poder extraer material (Figura 18) para procesar en laboratorio Coordenadas UTM Cantera 2; Zona 19, hemisferio S, Este (UTMX) 387671.30, Norte (UTMY) 8336615.40.

## Figura 18

### *Cantera N° 02*



Nota: Recojo de muestras de la Cantera 02.

### **3.4.3.3. Extracción de muestras de la cantera N° 03**

Se verifica en la ubicación exacta para poder extraer material (Figura 19) para procesar en laboratorio Coordenadas UTM Cantera 3; Zona 19, hemisferio S, Este (UTMX) 389791.50, Norte (UTMY) 8338025.20 (Ver Figura 19).

## Figura 19

### *Cantera N° 03*



Nota: Recojo de muestras de la Cantera 03.



### **3.4.4. Etapa de laboratorio**

En esta etapa de la investigación se ejecutó el análisis y procesamiento de los datos obtenidos de los ensayos en laboratorio, para el cual se usó el programa Excel para el cálculo y estadística descriptiva para la comprobación de las hipótesis.

Se realizaron los siguientes estudios en laboratorio:

- Granulometría
- Contenido de humedad
- Límites de Atterberg
- Proctor modificado
- Gravedad específica
- Ensayo de Pinhole
- Ensayo de tubificación HET

#### **3.4.4.1. Contenido de Humedad**

El análisis del contenido de humedad de las Canteras 01, 02 y 03 en el estudio de las arcillas de la Cantera Curayllo revela datos significativos para comprender las propiedades físicas de este material.

**Tabla 12**

*Cuadro resumen del Contenido de Humedad de las arcillas de las Canteras C-01, C-02 y C-03*

<b>Contenido de Humedad</b>			
<b>Descripción</b>	<b>C-01</b>	<b>C-02</b>	<b>C-03</b>
Contenido de Humedad (%)	3.37	1.35	23.73

Nota: El análisis del contenido de humedad de las Canteras 01, 02 y 03 en el estudio de las arcillas revela datos significativos para comprender las propiedades físicas de este material, donde el material de C-03 muestra más humedad al estar cerca de un río.

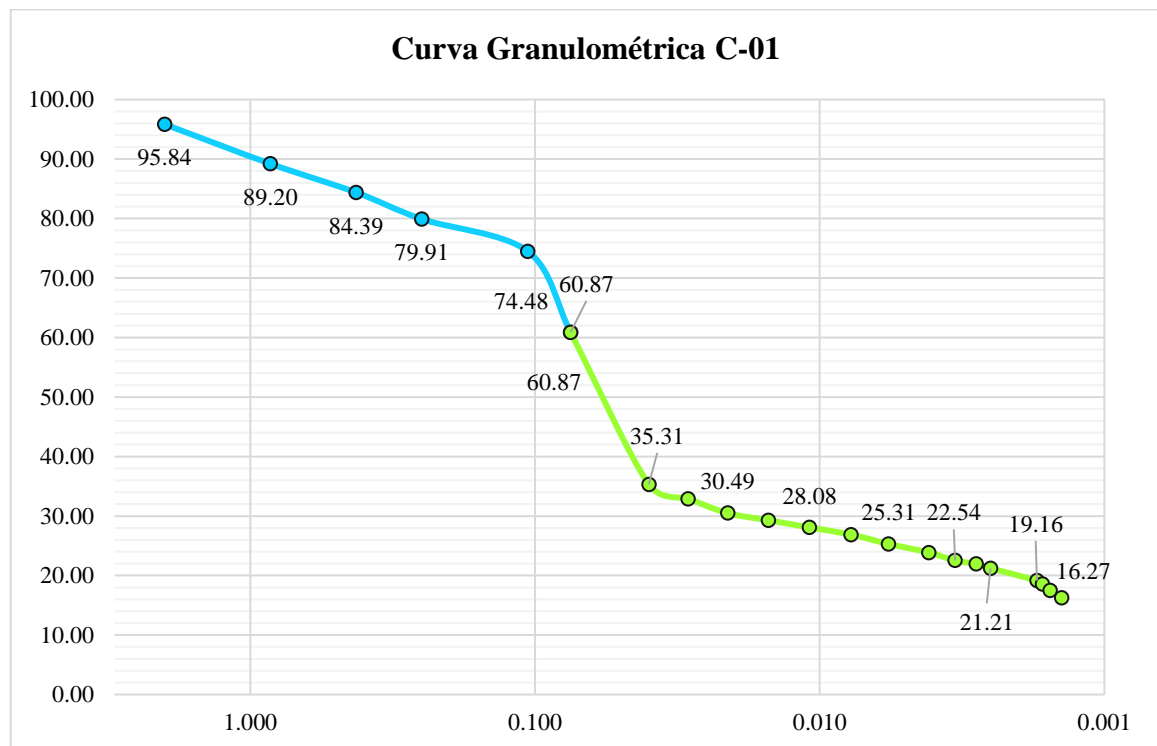
#### **3.4.4.2. Granulometría**

Preparación de las muestras extraídas de las canteras se procede a realizar los procedimientos para el ensayo de la granulometría para ello se realiza el lavado.

Este apartado denota la sección del informe dedicada al análisis detallado de la distribución de tamaños de partículas en la muestra de suelo, específicamente centrado en el contexto de la cantera bajo estudio. Este análisis granulométrico es fundamental para comprender las propiedades físicas del suelo, ya que revela la proporción de diferentes fracciones de partículas presentes, lo que a su vez influye en aspectos como la permeabilidad, la compactación y la capacidad de retención de agua del suelo.

**Figura 20**

*Curva granulométrica de la arcilla de la cantera C-01*

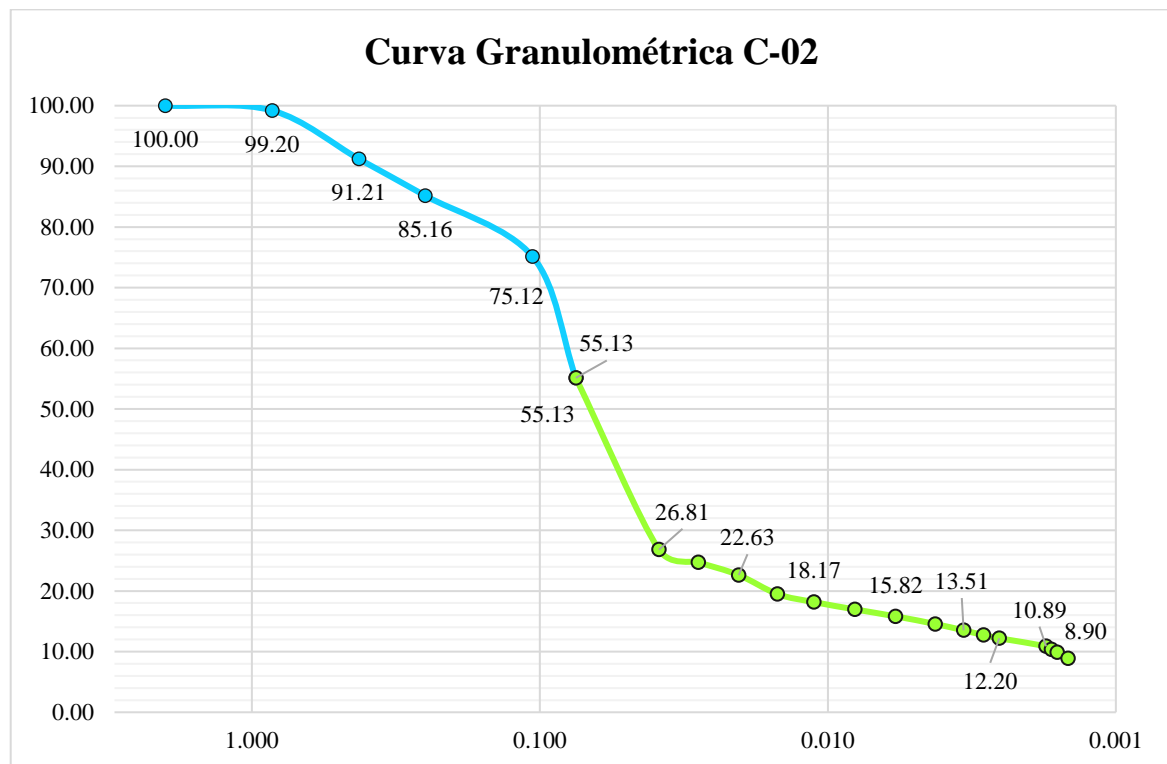


Nota: La sección verde es del ensayo de hidrómetro.

La Figura 20 presenta la curva granulométrica de la arcilla extraída de la cantera C-01. Esta representación gráfica destaca la distribución de tamaños de partículas en la muestra, proporcionando una visión general y cuantitativa de la composición granulométrica del suelo. La curva refleja un porcentaje de arena de 39.13%, un porcentaje de limo de 35.56% y un porcentaje de arcilla de 25.31%.

**Figura 21**

*Curva granulométrica de la arcilla de la cantera C-02*



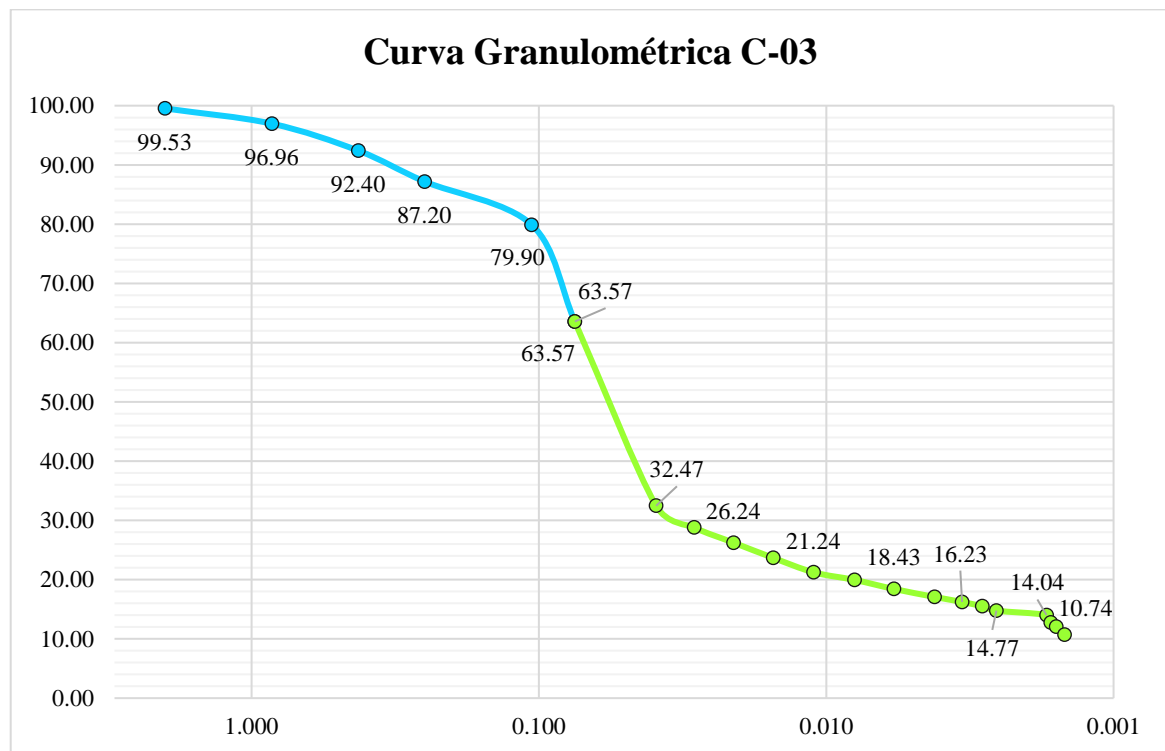
Nota: La sección verde es del ensayo de hidrómetro

La Figura 21 complementa esta información al presentar de manera gráfica la curva granulométrica de la arcilla de la cantera C-02, proporcionando una representación visual más intuitiva de la distribución de tamaños de partículas en la muestra. La curva refleja un porcentaje de arena de 44.87%, u porcentaje de limo de 39.31% y un porcentaje de arcilla de 15.82%.



**Figura 22**

*Curva granulométrica de la arcilla de la cantera C-03*



Nota: La sección verde es del ensayo de hidrómetro.

La Figura 22 complementa esta información mediante una representación gráfica de la curva granulométrica, proporcionando una visualización clara de la distribución de tamaños de partículas en la muestra. La curva refleja un porcentaje de arena de 36.43%, un porcentaje de limo de 45.14% y un porcentaje de arcilla de 18.43%. Este análisis es fundamental para comprender las propiedades físicas del suelo y orienta sobre su comportamiento en diversas aplicaciones geotécnicas.

**Tabla 13***Granulometría de las tres canteras*

	<b>Cantera 01</b>	<b>Cantera 02</b>	<b>Cantera 03</b>
% Arena	39.13	44.87	36.43
% Limo	35.56	39.31	45.14
% Arcilla	25.31	15.82	18.43

Nota: Material propio

**3.4.4.3. Límites de Atterberg**

Se realiza el ensayo con las muestras extraídas de las tres canteras correspondientes para posteriormente determinar el IP.

Este apartado resume de manera concisa los resultados obtenidos de las pruebas de límites de consistencia realizadas en las arcillas extraídas de las calicatas C-01, C-02 y C-03. El cuadro detalla los valores específicos de los límites líquido y plástico, así como el índice de plasticidad (IP) para cada ubicación identificada.

En la Tabla 14 se presenta un análisis detallado de los límites de consistencia del suelo en tres calicatas identificadas como C-01, C-02 y C-03. Los valores expresados en porcentaje para cada descripción incluyen el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad (IP). Para la calicata C-01, se registró un límite líquido de 29,69, un límite plástico de 14,81 y un índice de plasticidad de 14,88. De manera similar, para la C-02, los valores fueron 21,82, 14,46 y 7,37, respectivamente. En cuanto a la calicata C-03, se obtuvieron valores de 34,33, 15,59 y 18,74.

**Tabla 14**

*Cuadro resumen del Índice de Plasticidad de las arcillas de las calicatas C-01, C-02 y C-03*

<b>Límites de consistencia del suelo</b>			
<b>Descripción</b>	<b>C-01</b>	<b>C-02</b>	<b>C-03</b>
Límite Líquido	29,69	21,82	34,33
Límite Plástico	14,81	14,46	15,59
Índice de plasticidad (IP)	14,88	7,37	18,74

Nota: El IP de C-01 y C-03 son superiores a C-02.

#### **3.4.4.4. Gravedad específica**

En el contexto del análisis de las características de las arcillas, el estudio de la gravedad específica emerge como un elemento clave para comprender la densidad y la composición de los sólidos del suelo. Este análisis se realiza mediante ensayos detallados que incluyen mediciones precisas del peso de la fiola y la muestra seca, así como la consideración de la temperatura de ensayo y correcciones correspondientes.

**Tabla 15**

*Cuadro resumen del Gravedad específica C-01, C-02 y C-03*

<b>Gravedad específica</b>			
<b>Descripción</b>	<b>C-01</b>	<b>C-02</b>	<b>C-03</b>
Gravedad específica	2.716	2.867	2.851

Nota: Elaboración propia

#### **3.4.4.5. Proctor modificado**

Se realizó el procedimiento con el ensayo de Proctor modificado para ello se realiza en las tres muestras extraídas de las canteras. En este apartado se detalla los resultados obtenidos del ensayo de Proctor Modificado, que es esencial en proyectos de construcción, carreteras, presas y otros trabajos geotécnicos donde es crucial entender y controlar

la compactación del suelo para garantizar la estabilidad y resistencia adecuadas.

**Tabla 16**

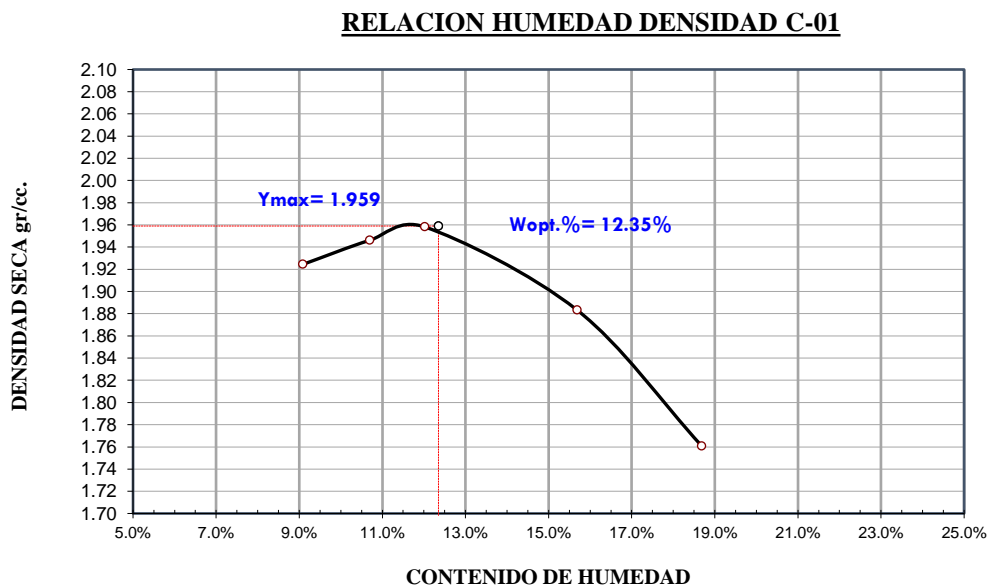
*Resultados del ensayo de Proctor modificad para las canteras de Curayllo*

<b>Proctor modificado método A</b>			
<b>Descripción</b>	<b>C-01</b>	<b>C-02</b>	<b>C-03</b>
Humedad Optima (%)	12.35	10.10	15.07
Máxima densidad Seca (gr/cc)	1.96	2.01	1.81

Nota: La humedad óptima se utilizará para el remoldeo de las muestras para el ensayo de tubificación.

**Figura 23**

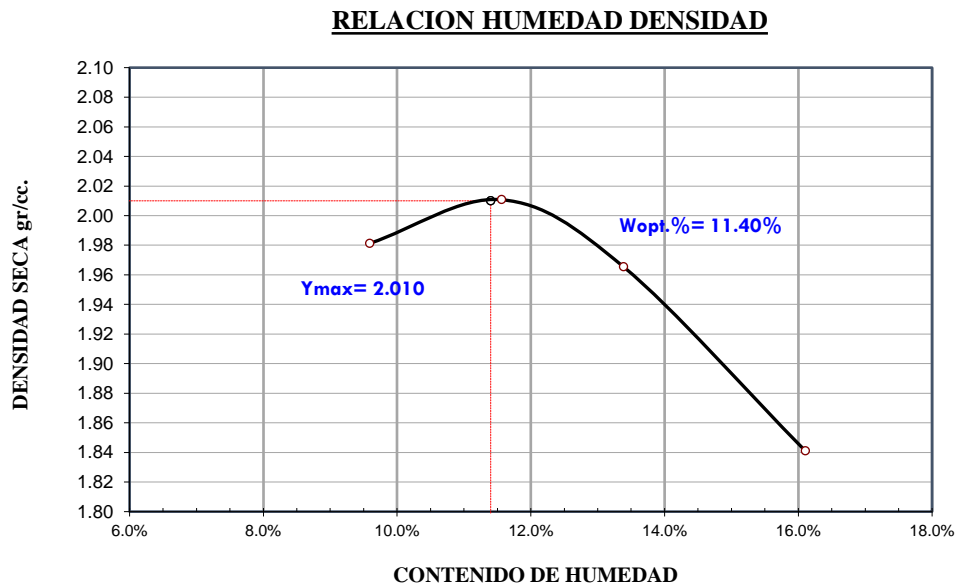
*Gráfico de la relación de la densidad seca vs la humedad de la cantera C-01*



Nota: Contenido de agua óptimo de 12.35%

**Figura 24**

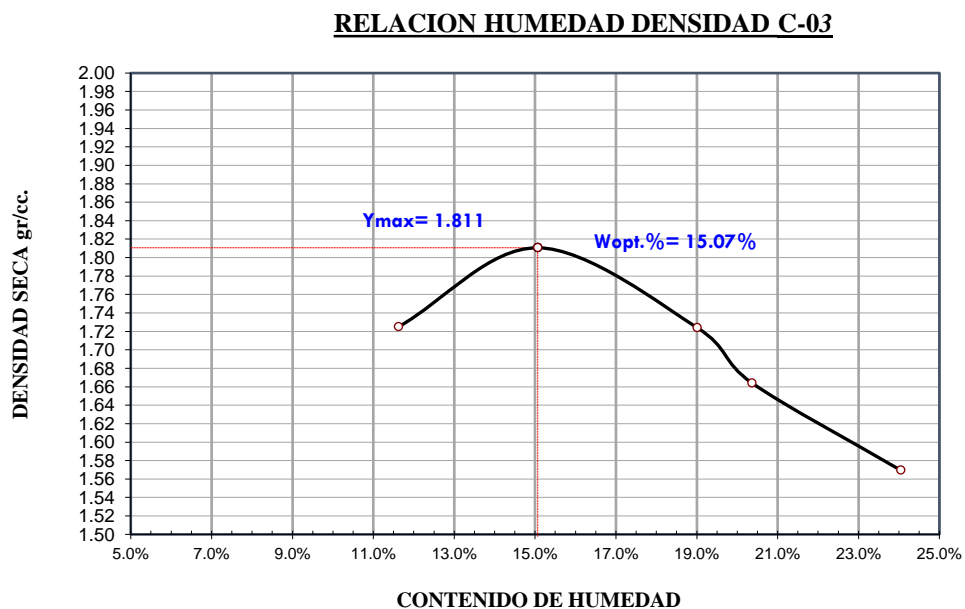
*Gráfico de la relación de la densidad seca vs la humedad de la cantera C-02*



Nota: Contenido de agua óptimo de 11.40%

**Figura 25**

*Gráfico de la relación de la densidad seca vs la humedad de la cantera C-03*



Nota: Contenido de agua óptimo de 15.07%.

La tabla 28 presenta los resultados obtenidos del ensayo de Proctor, donde la humedad óptima obtenida en las canteras C-01, C-02 y C-03 fueron de 12.35 %, 10.10 % y 15.07 % respectivamente, en cuanto a la máxima densidad seca de cada cantera fueron de 1.96 gr/cc, 2.06 gr/cc y 1.81 gr/cc respectivamente para las canteras C-01, C-02 y C-03. Esto presente de manera visual en la figura 26 (Cantera C-01), figura 27 (Cantera C-02) y figura 28 (Cantera C-03).

#### 3.4.4.6. Prueba o ensayos de la tubificación

Ensayo de tubificación (Preparación de la primera celda, preparación de la muestra, realizando un agujero de 3mm), se realiza el Montaje del ensayo de tubificación, Armado de los instrumentos, Ensayo de tubificación, al finalizar el ensayo de tubificación, muestra con parafina.

**Figura 26**

*Ensayo de la tubificación*



*Nota:* a) preparación de la muestra. b) equipo de la tubificación. c) muestra con la parafina.



#### **3.4.4.7. Etapa de gabinete**

Durante la etapa de análisis de gabinete, se procedió a realizar una revisión exhaustiva de la información recopilada durante la fase de laboratorio. Se llevó a cabo un examen detallado de los resultados derivados de los ensayos, implicando la interpretación minuciosa de los parámetros medidos y la elaboración del informe conclusivo correspondiente al estudio ejecutado.



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el laboratorio, se llevaron a cabo ensayos estándar y pruebas de tubificación en 12 muestras de suelo, provenientes de 3 canteras en Curayllo.

La clasificación de los especímenes de suelo se efectuó utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), conforme a la norma ASTM D2487. Se llevaron a cabo análisis de hidrómetro siguiendo las directrices establecidas en las normas ASTM D422. Los límites de consistencia (Atterberg) de los suelos, es decir, el límite líquido (LL) y el límite plástico (PL), se determinaron según la norma ASTM D4318. Además, se realizaron pruebas de compactación modificada utilizando el Método A, conforme a la norma ASTM D1557. Esto permitió obtener el contenido óptimo de agua y la densidad seca máxima, lo que posibilitó el remoldeo de las 12 muestras para llevar a cabo las pruebas de tubificación.

#### **4.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS ARCILLAS DE LA CANTERA**

##### **CURAYLLU**

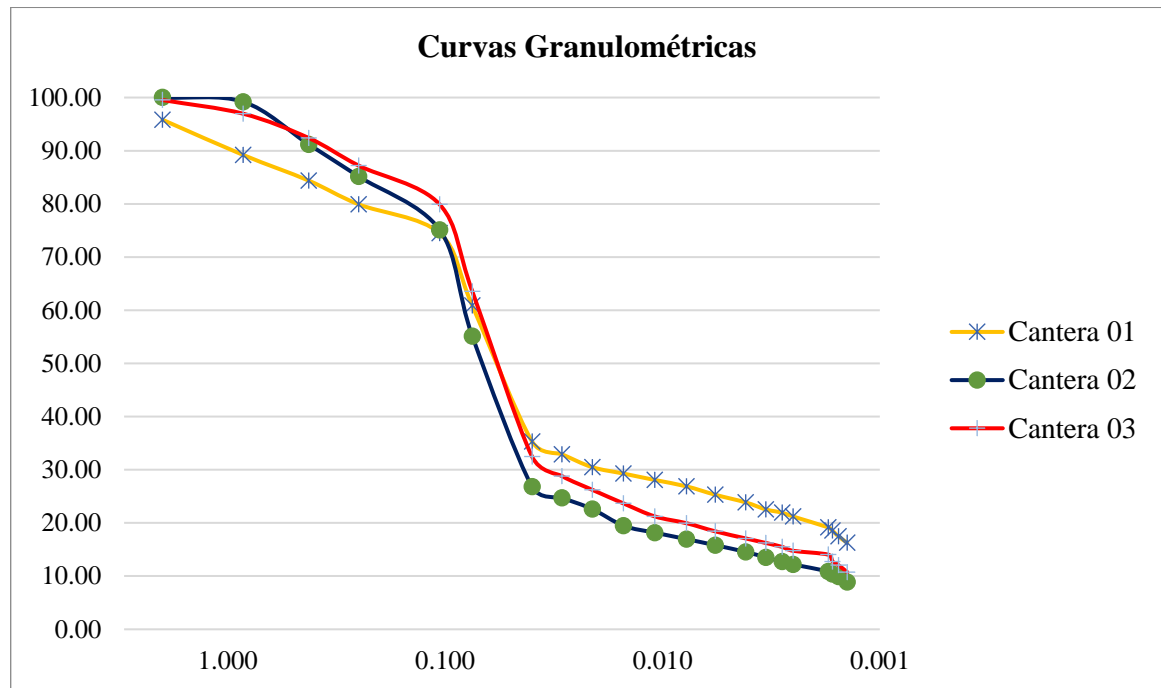
Con los resultados de los ensayos realizados en laboratorio a las 12 muestras de suelos se clasificaron como CL arenoso (arcilla arenosa de plasticidad media), de acuerdo a su clasificación SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).

En la Figura 27 se presenta las curvas granulométricas de los suelos analizados cuya distribución granulométrica varía por los porcentajes de arena, limo y arcilla que presentan cada tipo de suelo.



**Figura 27**

*Curvas Granulométricas*



Nota: Curvas de distribución del tamaño de partículas de suelos.

Fue esencial determinar los porcentajes de arena, limo y arcilla en las muestras con el fin de evaluar su impacto en el fenómeno de tubificación. Para llevar a cabo esta evaluación, se realizaron ensayos granulométricos mediante la utilización de un hidrómetro.

En la Tabla 17 se muestra las propiedades índices de los suelos, donde las muestras de las Canteras son suelos de clasificación CL arenoso (arcilla arenosa de plasticidad media) y presentan un porcentaje de arena que varía de 36.43 a 44.87, el porcentaje de limo varía de 35.56 a 45.14, el porcentaje de arcilla varía de 15.82 a 25.31, con un límite líquido que varía de 21.82 a 34.33 por ciento y un índice de plasticidad que varía de 7.37 a 18.74 por ciento.

**Tabla 17**

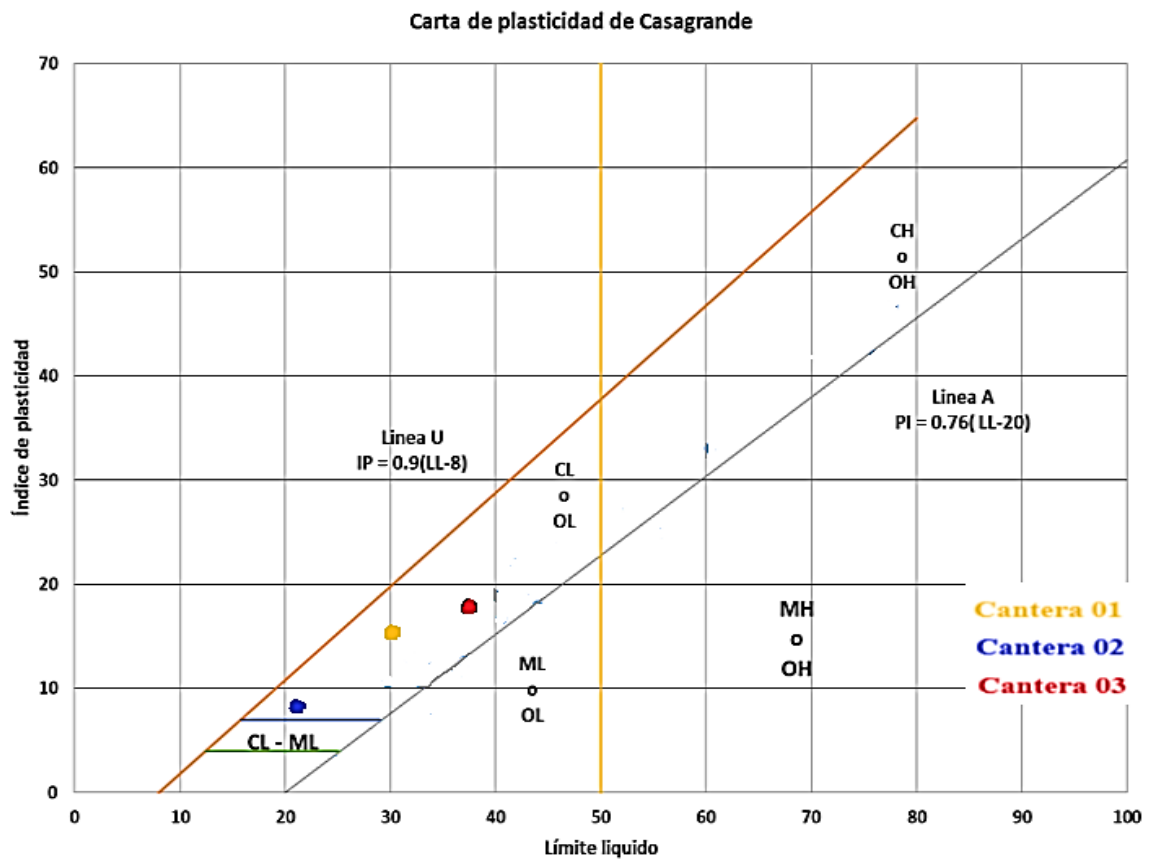
*Propiedades índices de las muestras de suelos*

Fracción Granulométrica	Límites de Atterberg			Índice de plasticidad	Humedad Natural	CLASIFICACIÓN			
	LL %	LP %	IP %			SUCS	AASHTO		
Muestra	%Aren a	% Limo	% Arcilla	LL %	LP %	IP %	w%	SUCS	AASHTO
Cantera 01	39.13	35.56	25.31	29,69	14,81	14,88	3.37	CL	A-6
Cantera 02	44.87	39.31	15.82	21,82	14,46	7,37	1.35	CL	A-4
Cantera 03	36.43	45.14	18.43	34,33	15,59	18,74	23.73	CL	A-6

Nota: Las muestras de las 3 canteras son suelos CL.

**Figura 28**

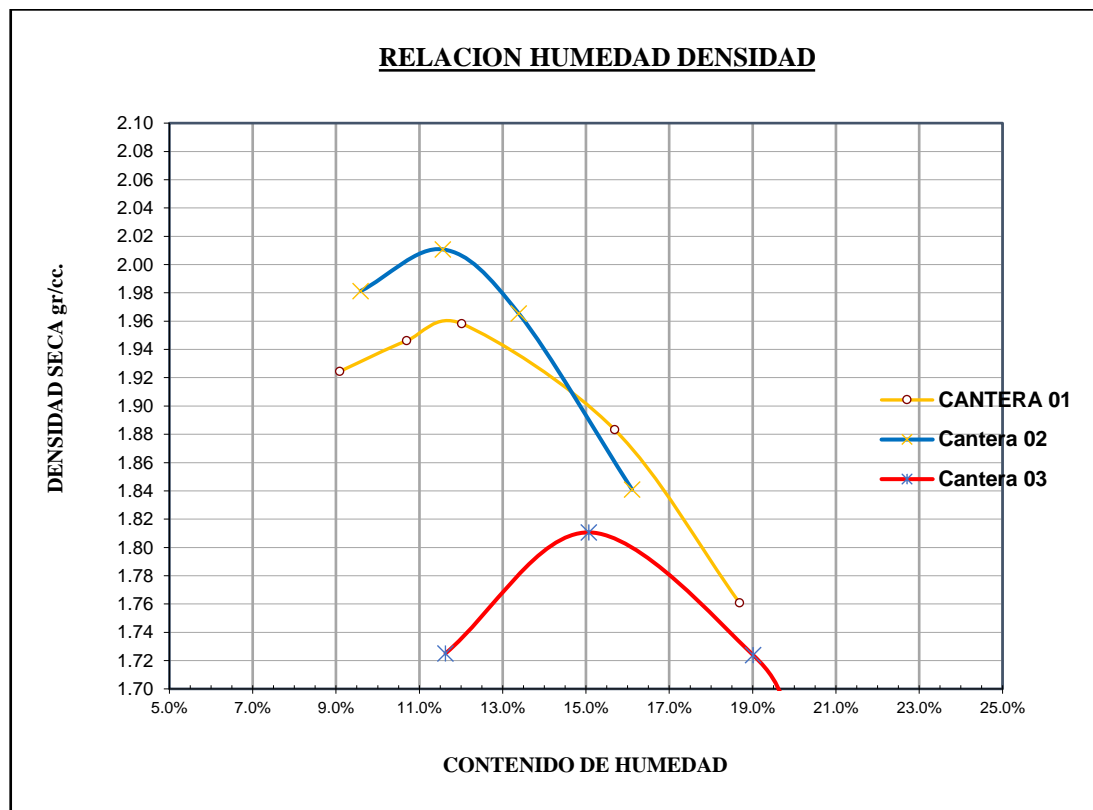
*Carta de Plasticidad de Casagrande*



Nota: Las 03 canteras se encuentran en la clasificación CL.

**Figura 29**

*Densidad Seca – Contenido de Agua Óptimo*



Nota: Contenido de Agua Óptimo oscila desde 11% hasta 15%.

#### **4.2. GRADO DE DISPERSIÓN DE LAS ARCILLAS DE LA CANTERA CURAYLLO**

El grado de dispersión de las arcillas de la Cantera Curayllo se refiere a la capacidad de las partículas de arcilla para separarse en una suspensión acuosa. Este atributo, evaluado mediante pruebas como el ensayo de dispersión de suelo, revela la tendencia de las partículas a formar agregados o dispersarse. Un bajo grado de dispersión indica una mayor propensión a la formación de agregados, mientras que un alto grado sugiere una dispersión extensa de partículas. La información obtenida es crucial para entender el comportamiento del suelo en términos de compactación, permeabilidad y retención de agua, siendo de particular relevancia para proyectos de ingeniería.

**Tabla 18***Resultados del grado de dispersión de las arcillas de la Cantera C-01*

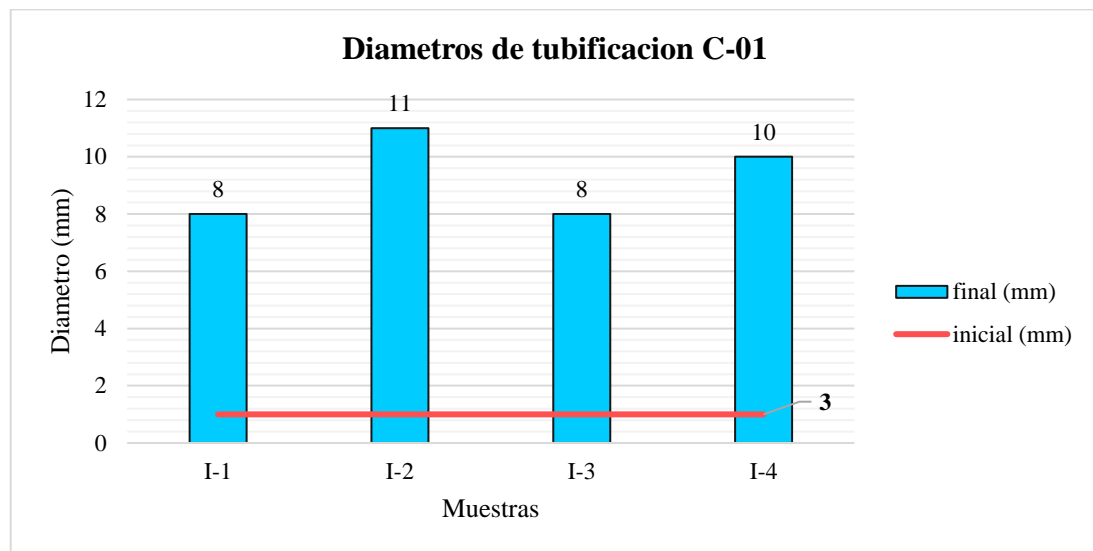
Muestra	Clasificación del suelo	Tiempo de ensayo (min)	Caudal de ingreso (l/min)	Diámetro		Material de arrastre (g)			Color del efluente	Grado de dispersión	Interpretación
				inicial (mm)	final (mm)	10 min	20 min	30 min			
<b>Cantera I</b>											
I-1	CL	30	18	3	8	2.13	1.46	1.48	Oscuro	D1	Dispersivo
I-2	CL	30	23.2	3	11	11.51	5.31	4.92	Oscuro	D1	Dispersivo
I-3	CL	30	8.1	3	8	3.03	2.03	1.46	Oscuro	D1	Dispersivo
I-4	CL	30	21.3	3	10	11.95	8.54	6.88	Oscuro	D1	Dispersivo

Nota: La interpretación se basa en la Figura 9 para más detalle.

La Tabla 18 presenta los resultados del grado de dispersión de las arcillas de la Cantera C-01, obtenidos a través del ensayo de suelo. Se registraron datos como el tiempo de ensayo (30 minutos), el caudal de ingreso de agua (2 a 20 l/min), así como los diámetros iniciales y finales de las partículas. Además, se detallan los valores de material de arrastre a los 10, 20 y 30 minutos de ensayo. Los resultados indican un grado de dispersión clasificado como "D1" para todas las muestras, interpretándose como Dispersivo, destacando valores específicos para cada intervalo de tiempo y parámetro evaluado.

**Figura 30**

*Resultados de los diámetros del ensayo de tubificación de la Cantera C-01*







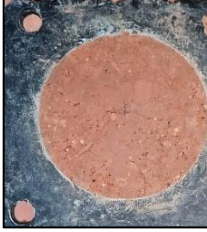
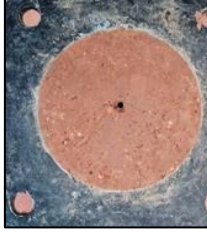




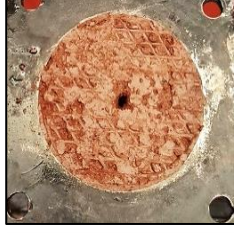


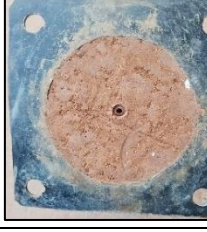


Nota: Variación de diámetros hasta 11 mm.

La Figura 30 presenta los diámetros obtenidos durante el ensayo, proporcionando una representación visual de cómo varían las dimensiones de las partículas de arcilla con respecto al diámetro inicial de 3 mm. El valor más alto obtenido es de 11 mm correspondiente a la muestra I-2 y el mínimo obtenido representa los 8 mm que se encuentran en las muestras I-1 y I-3.

La Figura 31 muestra de manera detallada las muestras del ensayo de tubificación realizado en la Cantera 01. Cada muestra compactada para los ensayos numerados del 01 al 04 se presenta con información específica. Se observa el diámetro inicial del agujero (3 mm) antes de la prueba de tubificación. Posteriormente, se registran los agujeros finales y sus correspondientes diámetros resultantes en metros (m) para cada ensayo. Esta representación visual, proporciona datos concretos sobre cómo las muestras de la Cantera 01 experimentan cambios dimensionales durante el proceso de tubificación.

**Figura 31**

*Muestras del ensayo de tubificación - Cantera 01*

Ensayo N°	Muestras Compactadas	Agujero inicial Diámetro (3 mm)	Muestras de suelos Cantera 01		Diámetro (m)
			Prueba de tubificación	Agujero final	
01					0.008
02					0.011
03					0.008
04					0.010

Nota: El diámetro final oscila entre 0.008 y 0.011m.

**Tabla 19**

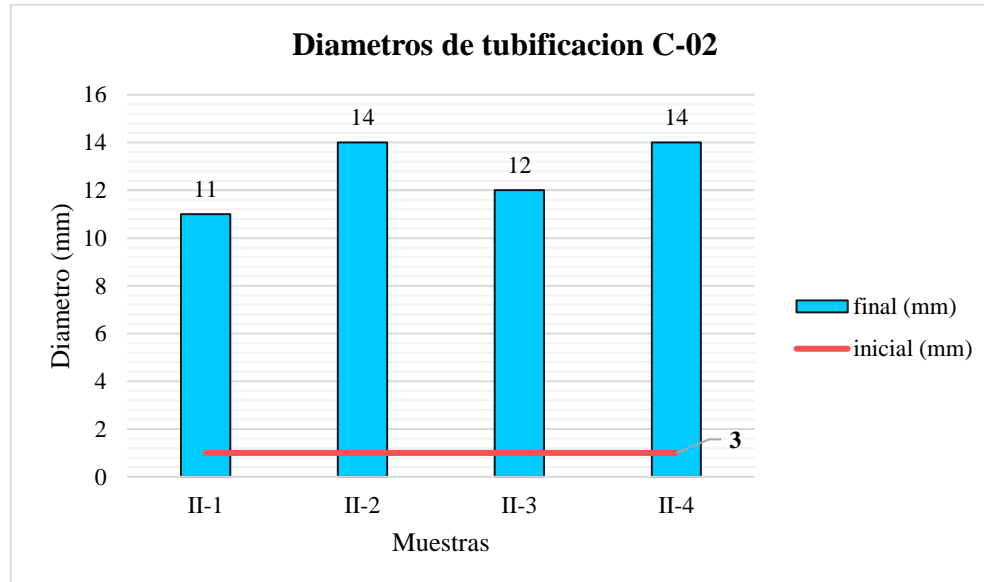
*Resultados del grado de dispersión de las arcillas de la Cantera C-02*

Muestra	Clasificación del suelo	Tiempo de ensayo (min)	Presión		Caudal de agua (l/min)	Diámetro		Material de arrastre (g)			Color del efluente	Grado de dispersión	Interpretación
			Máxima (Psi)	Mínima (Psi)		Inicial (mm)	Final (mm)	10 min	20 min	30 min			
<b>Cantera II</b>													
II-1	CL	30	35	5	26.4	3	11	32.42	18.2	14	Oscuro	D1	Dispersivo
II-2	CL	15	60	5	35.4	3	14	55.42	25.2	24	Oscuro	D1	Dispersivo
II-3	CL	30	15	5	14.7	3	12	74.29	48.6	45	Oscuro	D1	Dispersivo
II-4	CL	15	50	5	28.2	3	14	62.16	26.7	27	Oscuro	D1	Dispersivo

Nota: La interpretación se basa en la Figura 9 para más detalle.

**Figura 32**

*Resultados de los diámetros del ensayo de tubificación de la Cantera C-02*



Nota: Variación de diámetros hasta 14mm.

La Figura 32 presenta los diámetros obtenidos durante el ensayo, proporcionando una representación visual de cómo varían las dimensiones de las partículas de arcilla con respecto al diámetro inicial de 3 mm. El valor más alto obtenido es de 14 mm

correspondiente a la muestra II-2 y la muestra II-4, el mínimo obtenido representa los 11 mm que se encuentran en la muestra II-1.

**Figura 33**

*Muestras del ensayo de tubificación - Cantera 02*

Ensa yo N°	Muestras Compactadas	Agujero inicial Diámetro (3 mm)	Muestras de suelos Cantera 02		Diámetr o (m)
			Prueba de tubificación		
			Agujero final		
01					0.011
02					0.014
03					0.012
04					0.014

Nota: El diámetro final oscila entre 0.011 y 0.014

La Figura 33 muestra de manera detallada las muestras del ensayo de tubificación realizado en la Cantera 02. Cada muestra compactada para los ensayos numerados del 01 al 04 se presenta con información específica. Se observa el diámetro inicial del agujero (3 mm) antes de la prueba de tubificación. Posteriormente, se registran los agujeros finales y sus correspondientes diámetros resultantes en metros (m) para cada ensayo. Esta



representación visual, proporciona datos concretos sobre cómo las muestras de la Cantera 02 experimentan cambios dimensionales durante el proceso de tubificación.

**Tabla 20**

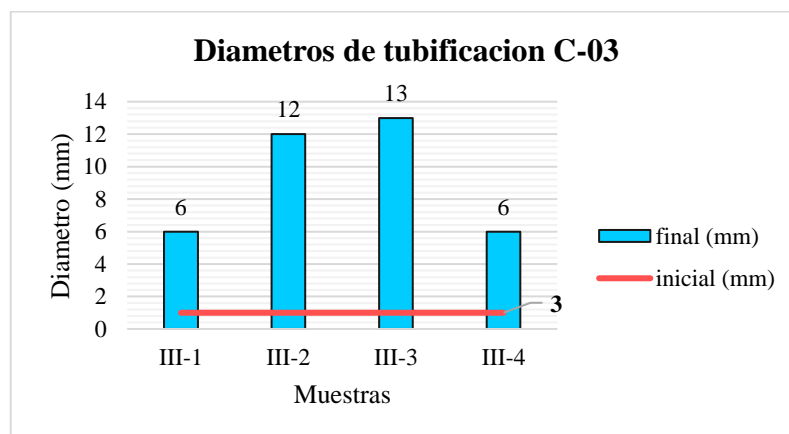
*Resultados del grado de dispersión de las arcillas de la Cantera C-03*

Muestra	Clasificación del suelo	Tiempo de ensayo (min)	Presión		Caudal de ingreso (l/min)	Diámetro		Material de arrastre (g)			Color del efluente	Grado de dispersión	Interpretación
			Máxima (Psi)	Mínima (Psi)		inicial (mm)	final (mm)	10 min	20 min	30 min			
<b>Cantera III</b>													
III-1	CL	30	51	25	12	3	6	49.79	31.7	29.1	Oscuro	D1	Dispersivo
III-2	CL	15	50	5	26.4	3	12	63.83	28.4	10.7	Oscuro	D1	Dispersivo
III-3	CL	15	55	5	27	3	13	60.14	35.7	27.6	Oscuro	D1	Dispersivo
III-4	CL	30	35	18	7.8	3	6	46.36	31	27.9	Oscuro	D1	Dispersivo

Nota: La interpretación se basa en la Figura 9 para más detalle.

**Figura 34**

*Resultados de los diámetros del ensayo de tubificación de la Cantera C-03*



Nota: Variación de diámetros hasta 13mm.

La Figura 34 presenta los diámetros obtenidos durante el ensayo, proporcionando una representación visual de cómo varían las dimensiones de las partículas de arcilla con respecto al diámetro inicial de 3 mm. El valor más alto obtenido es de 13 mm


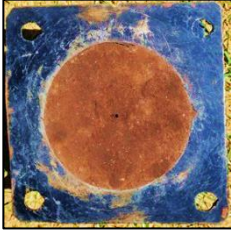


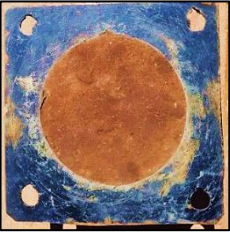
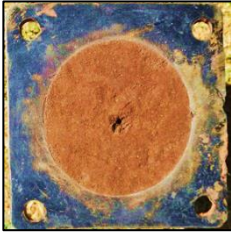
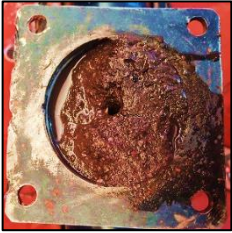

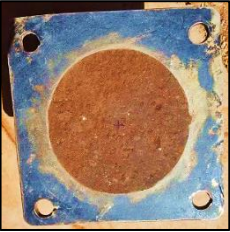
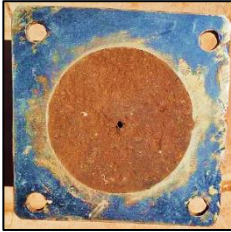
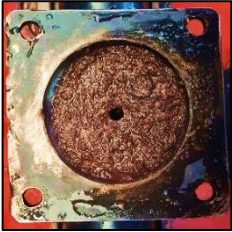

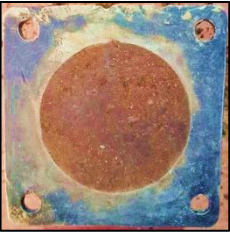
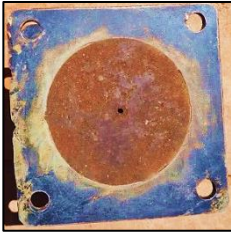




correspondiente a la muestra III-3, el mínimo obtenido representa los 6 mm que se encuentran en la muestra III-1 y III-4.

La Figura 35 muestra de manera detallada las muestras del ensayo de tubificación realizado en la Cantera 03. Cada muestra compactada para los ensayos numerados del 01 al 04 se presenta con información específica. Se observa el diámetro inicial del agujero (3 mm) antes de la prueba de tubificación. Posteriormente, se registran los agujeros finales y sus correspondientes diámetros resultantes en metros (m) para cada ensayo. Esta representación visual, proporciona datos concretos sobre cómo las muestras de la Cantera 03 experimentan cambios dimensionales durante el proceso de tubificación.

**Figura 35**

*Muestras del ensayo de tubificación - Cantera 03*

Ensayo N°	Muestras Compactadas	Muestras de suelos Cantera 03			Diámetro (m)
		Agujero inicial Diámetro (3 mm)	Prueba de tubificación		
			Agujero final		
01					0.006
02					0.012
03					0.013
04					0.006

Nota: El diámetro final oscila entre 0.006 y 0.013.

### 4.3. TASA DE EROSIÓN DE LAS ARCILLAS DE LA CANTERA

#### CURAYLLU

La Tasa de Erosión de las arcillas de la Cantera Curayllo se evalúa mediante el ensayo de tubificación. La información detallada permite comprender la respuesta del suelo a la erosión, identificando muestras dispersivas y proporcionando una evaluación cuantitativa de la tasa de erosión en función del tiempo. Usamos las ecuaciones 3 y 4 para IHET y  $C_e$  respectivamente.



### 4.3.1. Tasa de erosión de la Cantera 01

**Tabla 21**

*Resultados del índice de erosión de las arcillas de la cantera C-01*

Muestra	Ce	IHET	$\tau_{tc}$ (N/m <sup>2</sup> )	Progreso de la erosión interna
I-1	0,0046	2,3376	493,225	Muy rápida
I-2	0,0041	2,3888	719,719	Muy rápida
I-3	0,0065	2,1847	449,824	Muy rápida
I-4	0,0022	2,6618	1349,472	Muy rápida

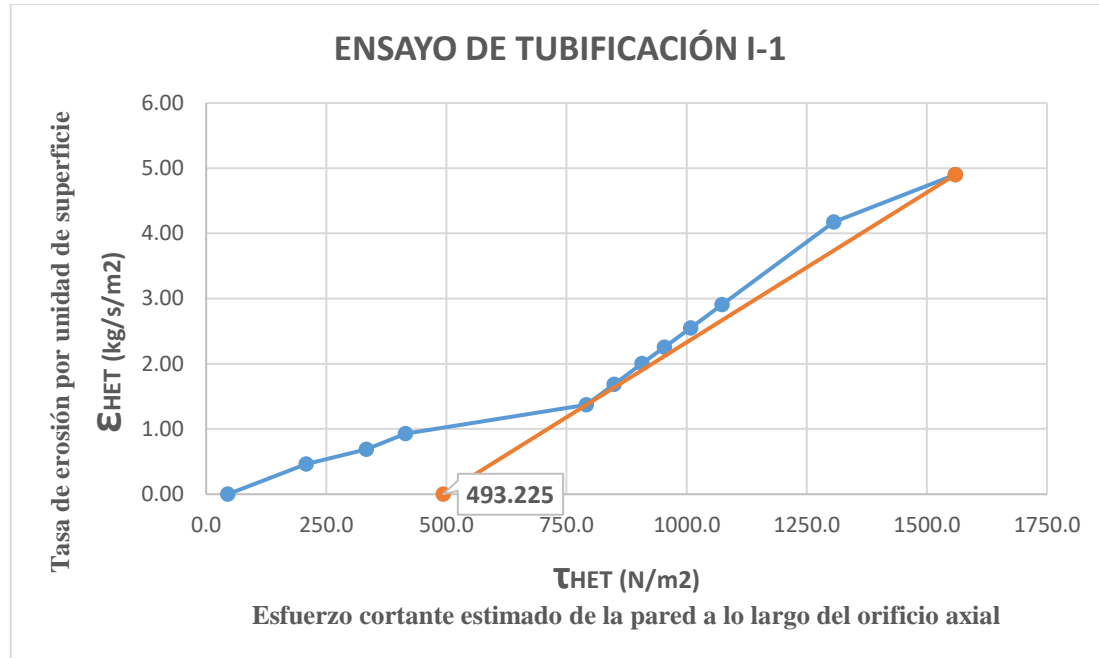
Nota: El progreso a la erosión interna es “Muy rápida” en todos los casos.

La Tabla 21 presenta los resultados detallados del Índice de Erosión del Suelo (IHET) para cada muestra de la Cantera C-01. Se incluyen valores específicos de Coeficiente de Erosión (Ce), IHET y tensión de corte crítica ( $\tau_{tc}$ ) en N/m<sup>2</sup>. Estos parámetros proporcionan una evaluación exhaustiva de la resistencia del suelo a la erosión, permitiendo una comparación precisa entre las diferentes muestras. En particular, se observa que la muestra I-4 tiene menor coeficiente de erosión (0,0022), pero muestra el IHET más alto (2,6618), indicando una mayor resistencia a la erosión interna. (Ver Tabla 3).

**Figura 36**

Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-01-

1

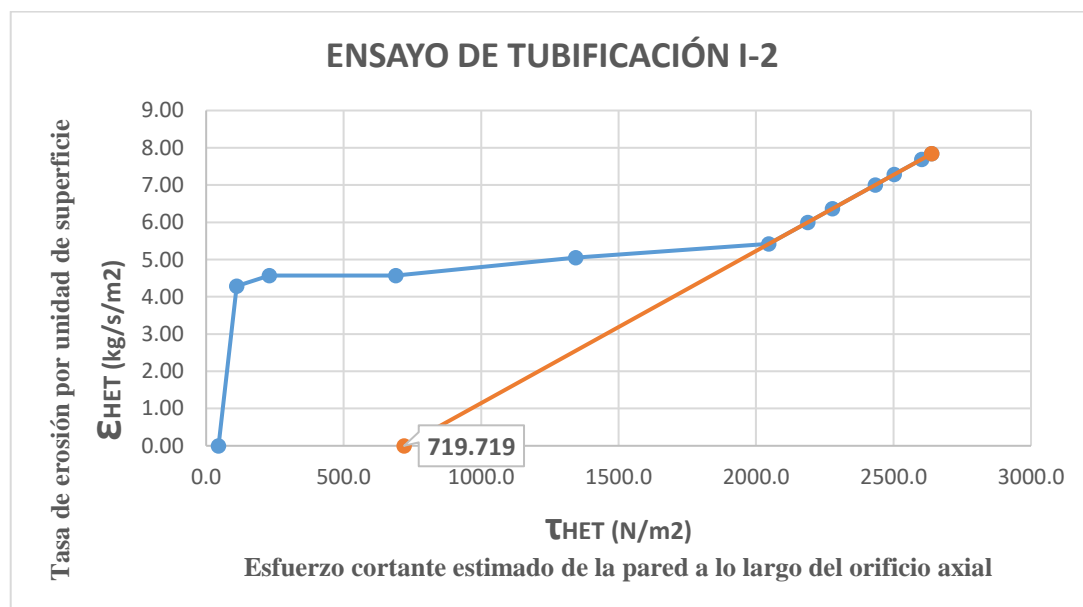


Nota: Se observa un comportamiento diferente en cada ensayo debido a las presiones iniciales y finales.

**Figura 37**

Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-01-

2

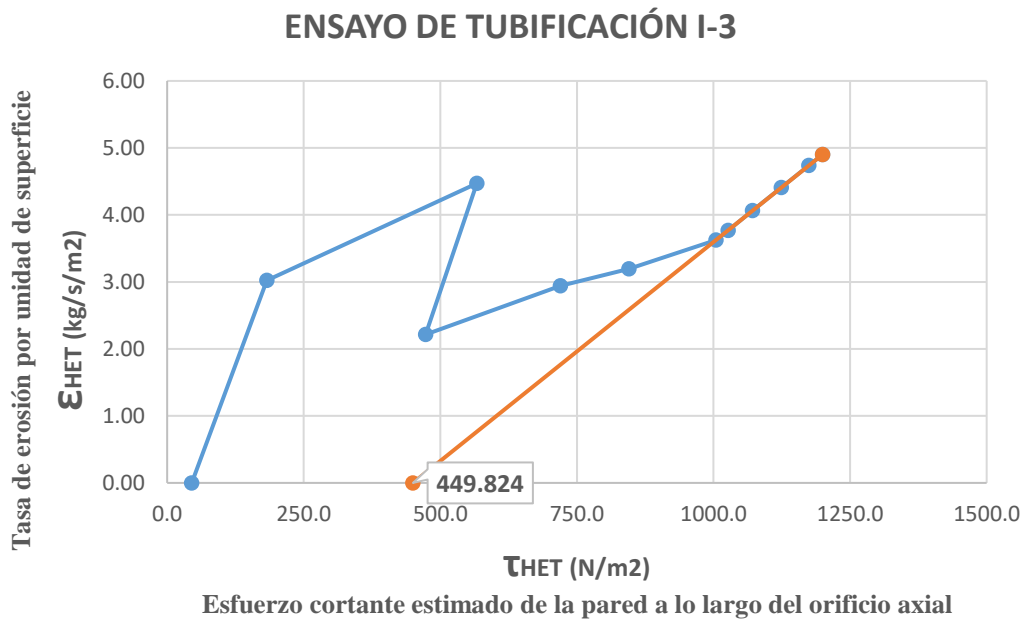


Nota: Se observa un comportamiento diferente en cada ensayo debido a las presiones iniciales y finales.

**Figura 38**

*Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-01-*

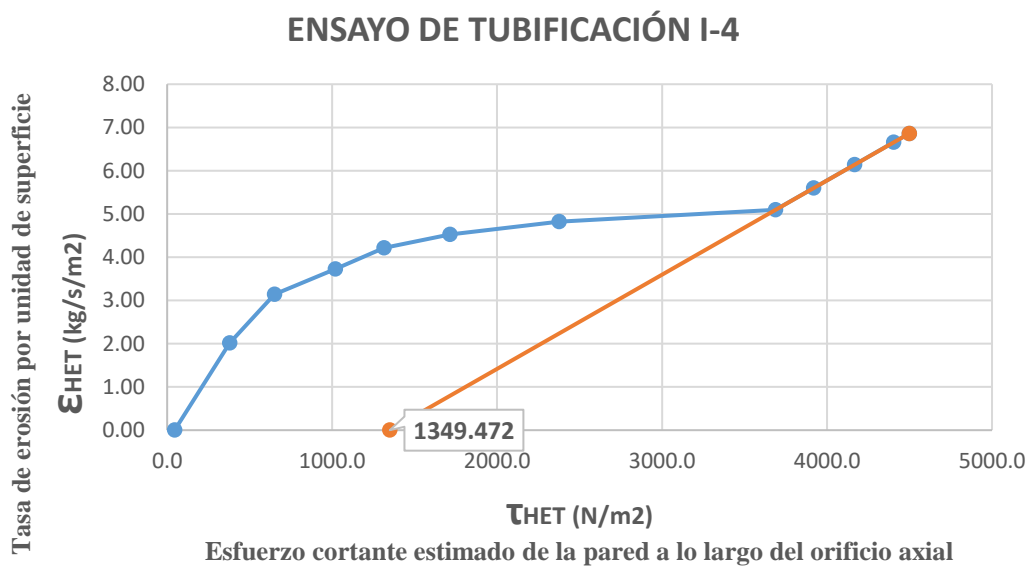
3



Nota: Se observa un comportamiento diferente en cada ensayo debido a las presiones iniciales y finales.

**Figura 39**

*Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C01-4*

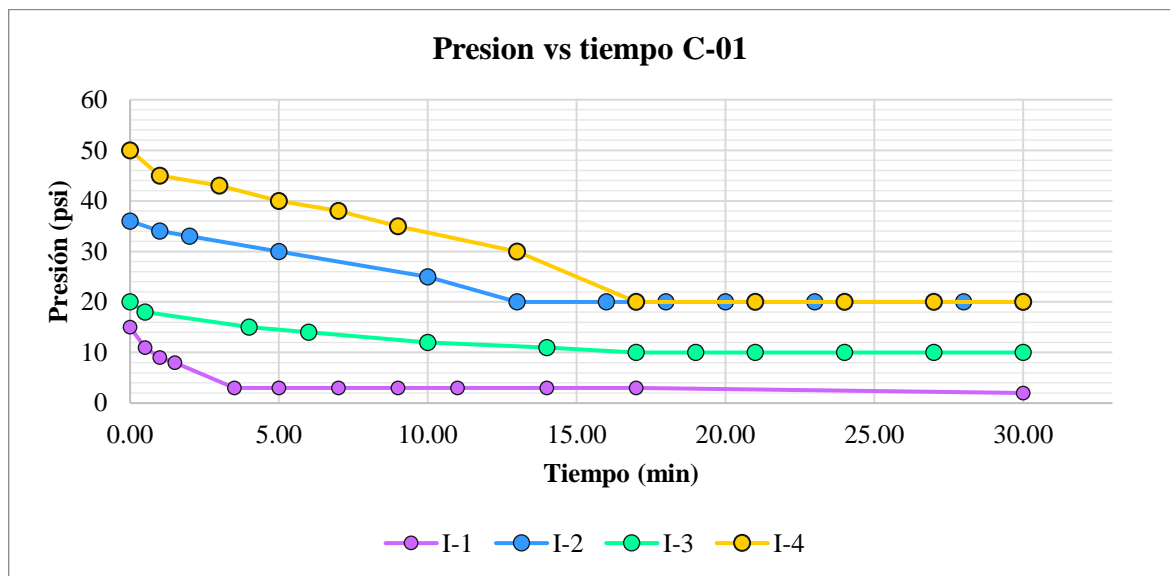


Nota: Se observa un comportamiento diferente en cada ensayo debido a las presiones iniciales y finales.

Las Figuras 36, 37, 38 y 39 representan el esfuerzo cortante estimado de la pared a lo largo del orificio axial vs Tasa de erosión por unidad de superficie para las muestras de la Cantera C-01. La pendiente de los gráficos de esfuerzo cortante vs tasa de erosión es el índice de erosión interna.

### Figura 40

*Gráfico de presión vs tiempo para las muestras de la Cantera C-01*



Nota: Elaboración propia.

La Figura 40 complementa la información de la tabla al presentar un gráfico de presión vs. tiempo para las cuatro muestras de la Cantera C-01. Este gráfico visualiza la variación de la presión a lo largo del tiempo y brinda una representación gráfica de cómo las muestras responden a las condiciones de corte, contribuyendo a una comprensión más completa de la erosión en la Cantera C-01.



#### 4.3.2. Tasa de erosión de la Cantera 02

**Tabla 22**

*Resultados del índice de erosión de las arcillas de la cantera C-02*

Muestra	Ce	IHET	$\tau_{tc}$ (N/m <sup>2</sup> )	Progreso de la erosión interna
II-1	0,0022	2,6509	1349,472	Muy rápida
II-2	0,0010	2,9791	1009,132	Muy rápida
II-3	0,0067	2,1738	449,824	Muy rápida
II-4	0,0015	2,8270	2024,208	Muy rápida

Nota: El progreso a la erosión interna es “Muy rápida” en todos los casos.

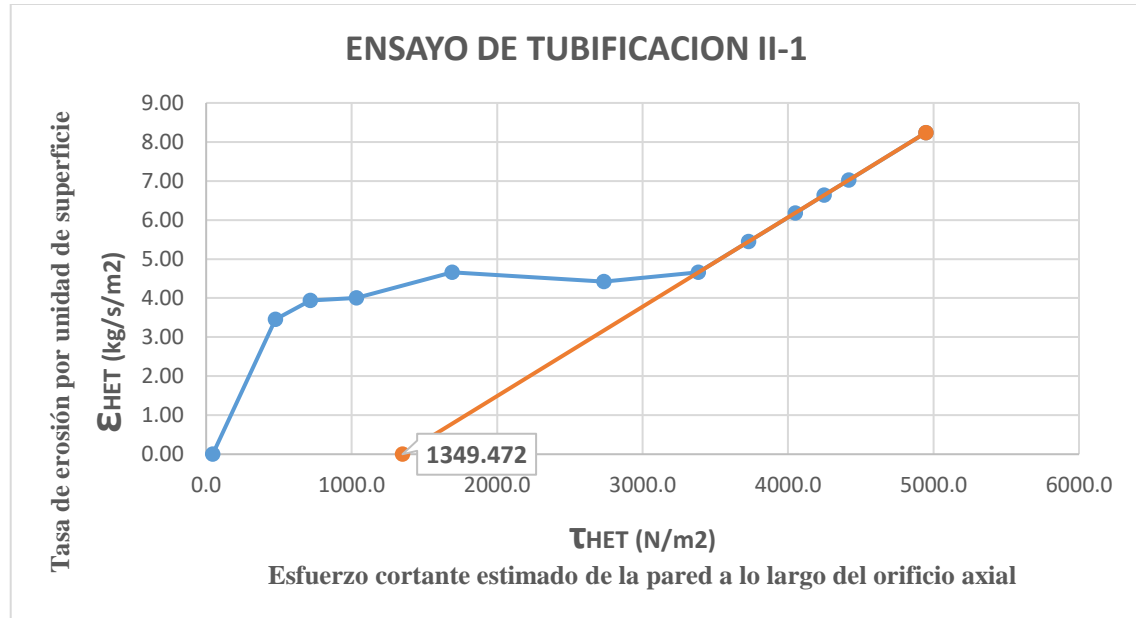
La Tabla 22 presenta los resultados detallados del Índice de Erosión del Suelo (IHET) para cada muestra de la Cantera C-02. Se incluyen valores específicos de Coeficiente de Erosión (Ce), IHET y tensión de corte crítica ( $\tau_{tc}$ ) en N/m<sup>2</sup>. Estos parámetros proporcionan una evaluación exhaustiva de la resistencia del suelo a la erosión, permitiendo una comparación precisa entre las diferentes muestras. En particular, se observa que la muestra II-2 tiene menor coeficiente de erosión (0,0011), pero muestra el IHET más alto (2,9685), indicando una mayor resistencia a la erosión interna (Ver Tabla 3).



**Figura 41**

Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-02-

1

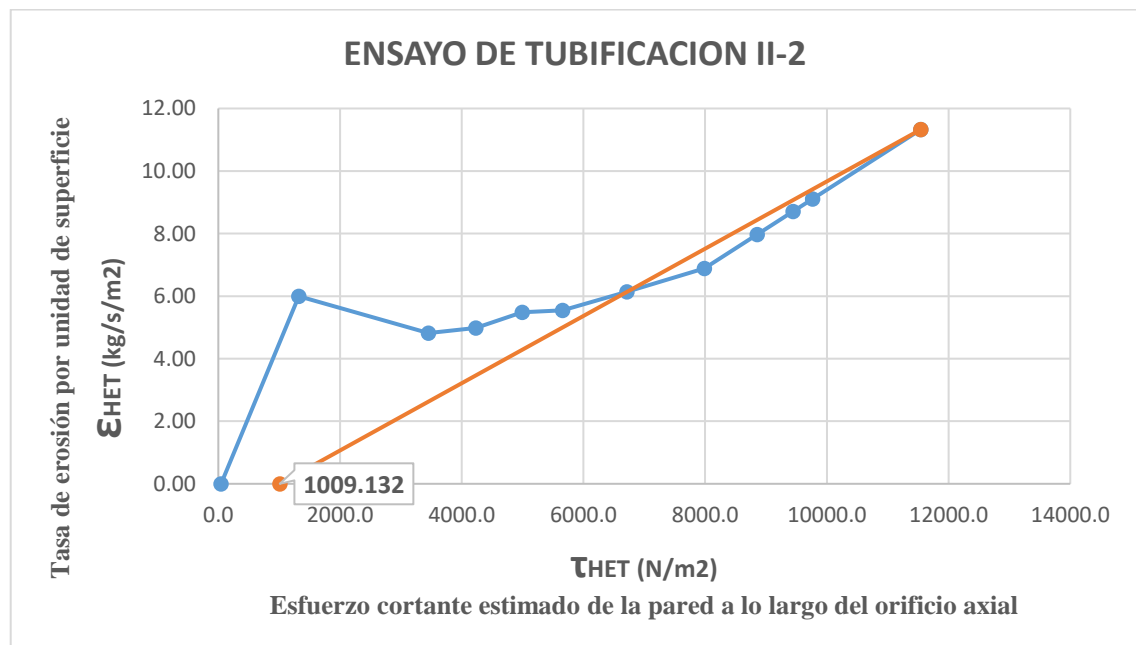


Nota: Se observa un comportamiento diferente en cada ensayo debido a las presiones iniciales y finales.

**Figura 42**

Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-02-

2

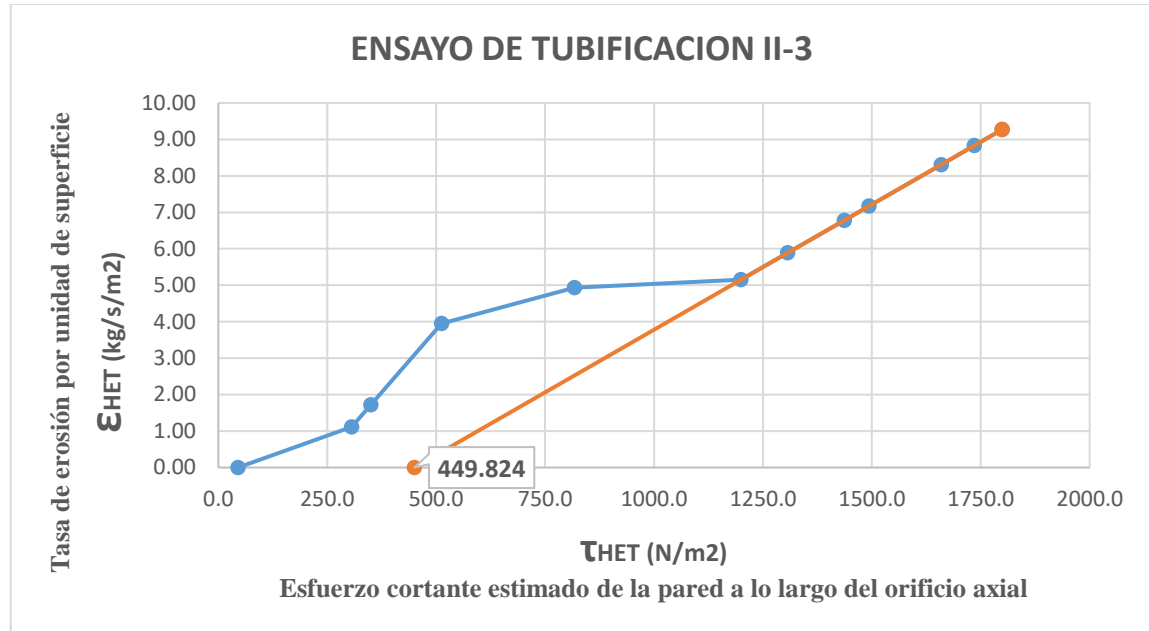


Nota: Se observa un comportamiento diferente en cada ensayo debido a las presiones iniciales y finales.

**Figura 43**

*Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-02-*

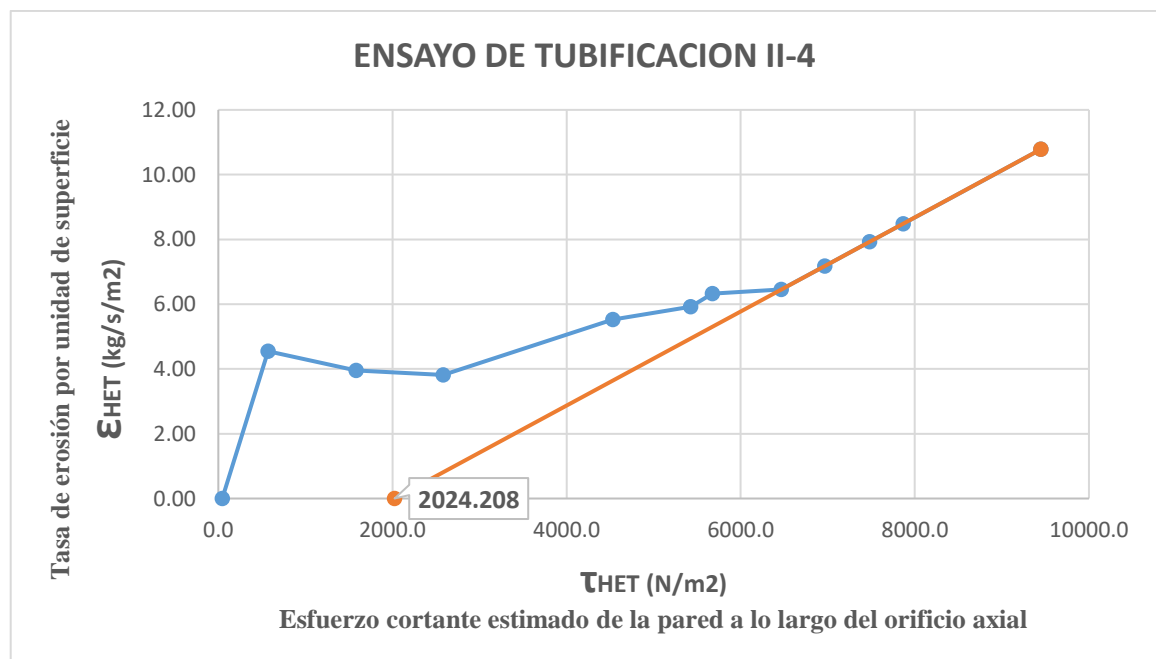
3



Nota: Se observa un comportamiento diferente en cada ensayo debido a las presiones iniciales y finales.

**Figura 44**

*Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C02-4*

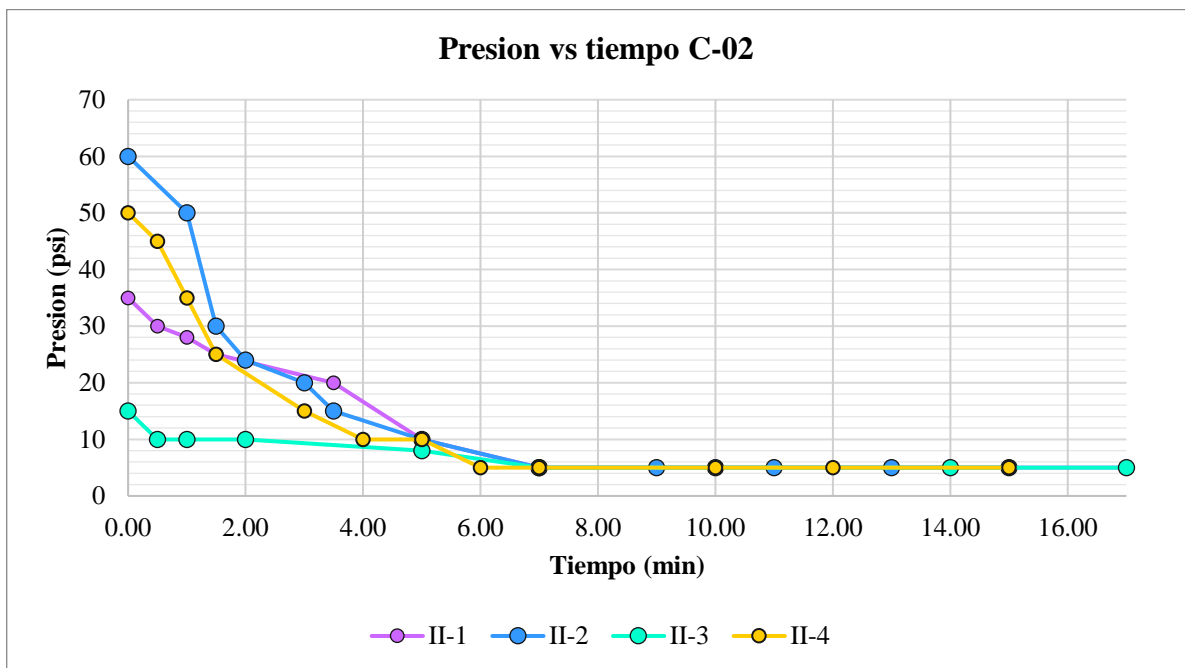


Nota: Se observa un comportamiento diferente en cada ensayo debido a las presiones iniciales y finales.

Las Figuras 41, 42, 43, y 44 representan el esfuerzo cortante estimado de la pared a lo largo del orificio axial vs Tasa de erosión por unidad de superficie para las muestras de la Cantera C-02. La pendiente de los gráficos de esfuerzo cortante vs tasa de erosión es el índice de erosión interna.

### Figura 45.

Gráfico de presión vs tiempo para las muestras de la Cantera C-02



Nota: Elaboración propia.

La Figura 45 complementa la información de la tabla al presentar un gráfico de presión vs. tiempo para las cuatro muestras de la Cantera C-02. Este gráfico visualiza la variación de la presión a lo largo del tiempo y brinda una representación gráfica de cómo las muestras responden a las condiciones de corte, contribuyendo a una comprensión más completa de la erosión en la Cantera C-02.



### 4.3.3. Tasa de erosión de la Cantera 03

**Tabla 23**

*Resultados del índice de erosión de las arcillas de la cantera C-03*

Muestra	Ce	IHET	$\tau_{tc}$ (N/m <sup>2</sup> )	Progreso de la erosión interna
III-1	0,0023	2,6342	1169,543	Muy rápida
III-2	0,0011	2,9449	923,125	Muy rápida
III-3	0,0010	2,9857	989,359	Muy rápida
III-4	0,0038	2,4151	764,701	Muy rápida

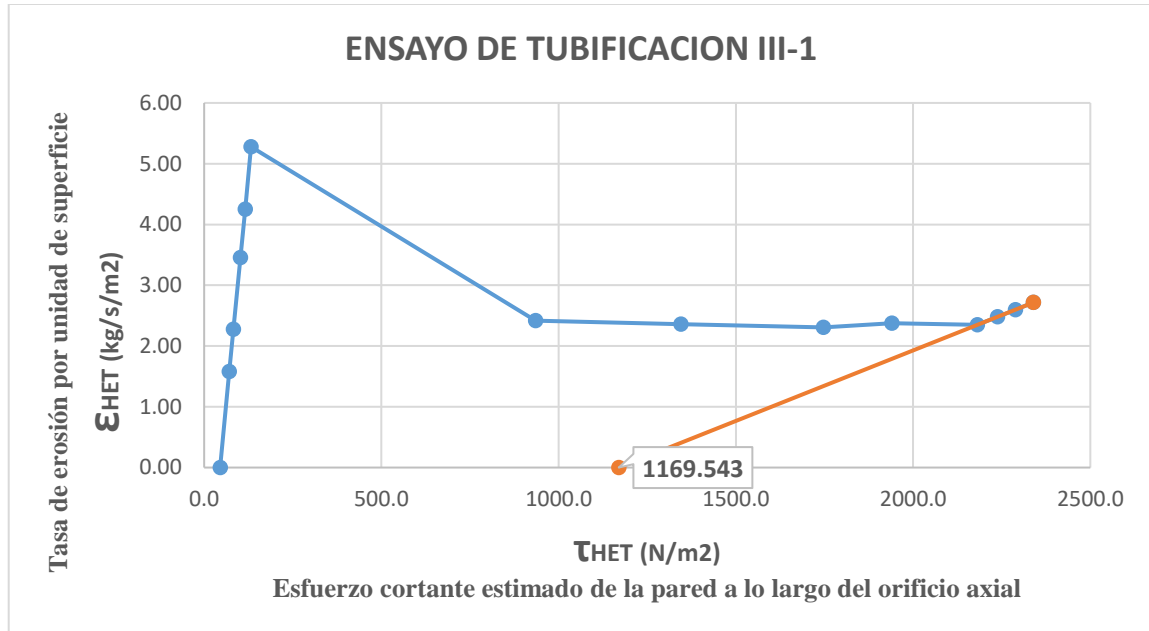
Nota: El progreso a la erosión interna es “Muy rápida” en todos los casos.

La Tabla 23 presenta los resultados detallados del Índice de Erosión del Suelo (IHET) para cada muestra de la Cantera C-03. Se incluyen valores específicos de Coeficiente de Erosión (Ce), IHET y tensión de corte crítica ( $\tau_{tc}$ ) en N/m<sup>2</sup>. Estos parámetros proporcionan una evaluación exhaustiva de la resistencia del suelo a la erosión, permitiendo una comparación precisa entre las diferentes muestras. En particular, se observa que la muestra III-3 tiene menor coeficiente de erosión (0,0010), pero muestra el IHET más alto (2,9857), indicando una mayor resistencia a la erosión interna (Ver Tabla 3).

**Figura 46**

Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-03-

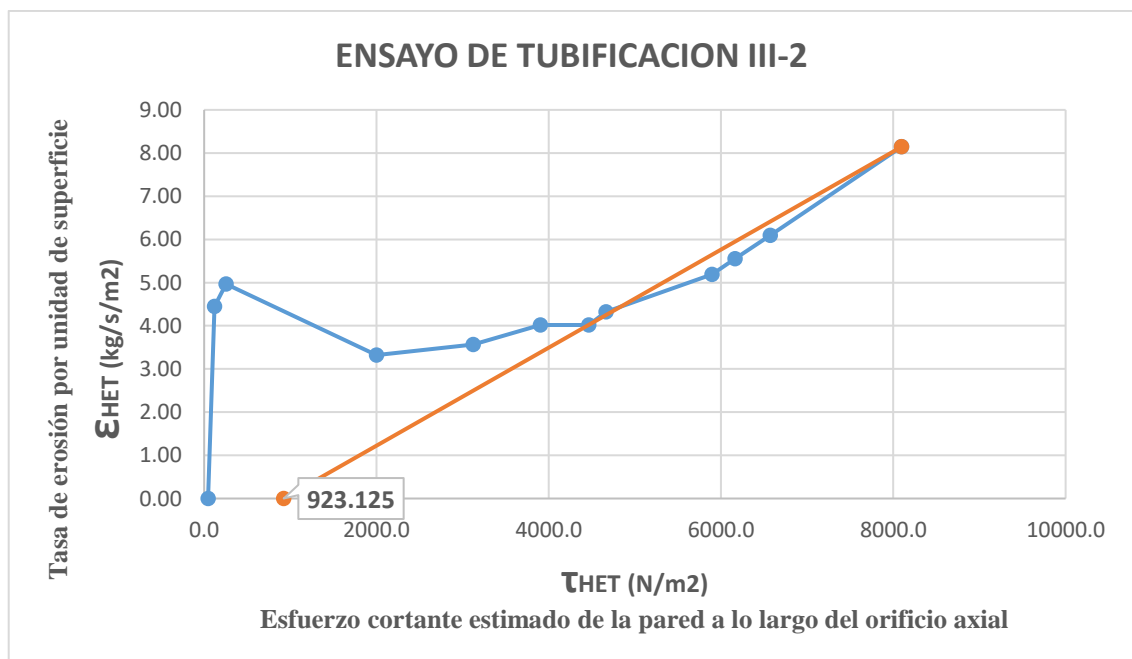
1



Nota: Se observa un comportamiento diferente en cada ensayo debido a las presiones iniciales y finales.

**Figura 47**

Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C03-2

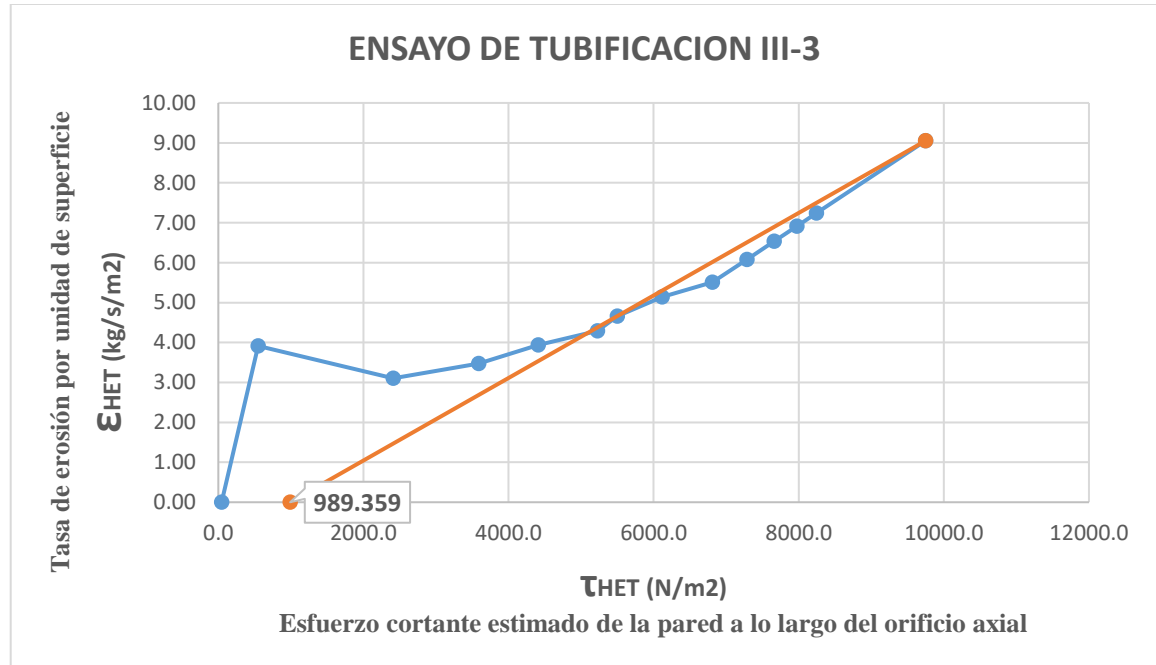


Nota: Se observa un comportamiento diferente en cada ensayo debido a las presiones iniciales y finales.

**Figura 48**

Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-03-

3

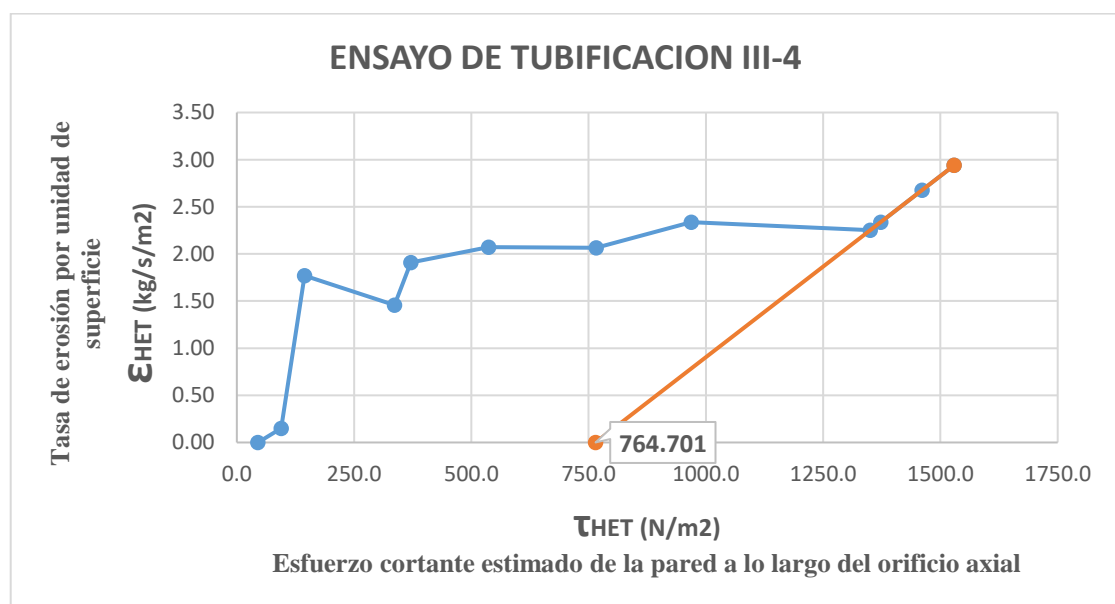


Nota: Se observa un comportamiento diferente en cada ensayo debido a las presiones iniciales y finales.

**Figura 49**

Gráfico de esfuerzo cortante vs Tasa de erosión para las muestras de la Cantera C-03-

4

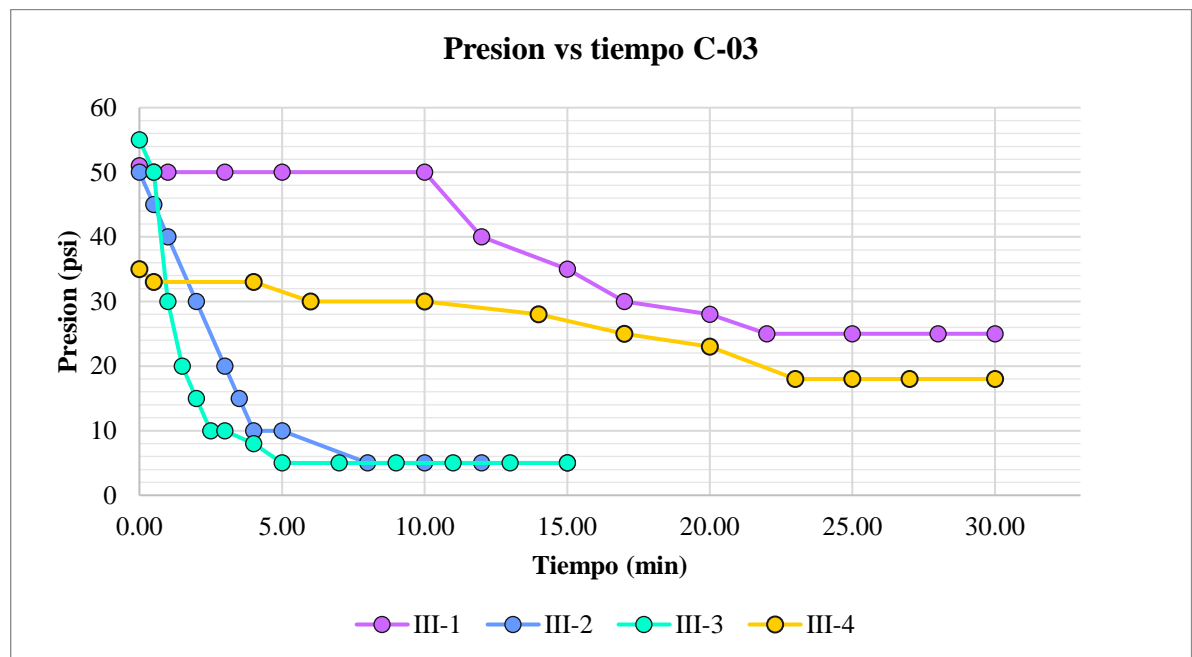


Nota: Se observa un comportamiento diferente en cada ensayo debido a las presiones iniciales y finales.

Las Figuras 46, 47, 48 y 49 representan el esfuerzo cortante estimado de la pared a lo largo del orificio axial vs Tasa de erosión por unidad de superficie para las muestras de la Cantera C-03. La pendiente de los gráficos de esfuerzo cortante vs tasa de erosión es el índice de erosión interna.

**Figura 50.**

*Gráfico de presión vs tiempo para las muestras de la Cantera C-03*



Nota: Elaboración propia.

La Figura 50 complementa la información de la tabla al presentar un gráfico de presión vs. tiempo para las cuatro muestras de la Cantera C-03. Este gráfico visualiza la variación de la presión a lo largo del tiempo y brinda una representación gráfica de cómo las muestras responden a las condiciones de corte, contribuyendo a una comprensión más completa de la erosión en la Cantera C-03.

#### 4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

**D1.** Determinar las características de las arcillas de las canteras de Curayllo para construir la presa de tierra Chaqa-Qarqa, Azángaro, Puno 2023.



Acuña y Betancur (2022) en su investigación determinaron que el material estudiado contenía una gravedad específica igual a 2.61, un límite líquido del 64.76%, límite plástico del 36.87% y un índice de plasticidad del 36.87%. De igual forma, Rosales (2021) determinó los límites de consistencia para 7 grupos (CH, CL arenoso, CL, SC, ML, MH y SM) donde el LL para el primer grupo varía desde los 51.60% hasta los 77.74%, el LP varía desde los 34.00% hasta los 24.17% y el IP varía desde los 27.43% hasta los 46.80%; en el segundo grupo se obtuvo LL que van desde los 29.76% hasta los 44.00%, LP que van desde los 19.25% hasta los 26.00% y el IP que va desde los 10.50% hasta los 19.00%. En contraste con la presente investigación, se obtuvo un contenido de humedad para C-01 de 3.37%, C-02 de 1.35% y C-03 de 23.73%; una gravedad específica de 2.716, 2.867 y 2.851 para las canteras C-01, C-02 y C-03 respectivamente. En cuanto a los límites de consistencia se obtuvo que la cantera C-01 presentó un 29.69 de límite líquido, 14.81 de límite plástico y un índice de plasticidad de 14.88, la Cantera C-02 presentó un límite líquido de 21.82, límite plástico de 14.46 y un Índice de plasticidad de 7.37; finalmente la Cantera C-03 presentó un límite plástico de 15.59, un límite líquido de 34.33 y un índice de plasticidad de 18.74.

Mientras Acuña y Betancur (2022) identificaron una gravedad específica de 2.61 en su material, los valores observados en nuestras canteras (C-01: 2.716, C-02: 2.867, C-03: 2.851) indican diferencias que resaltan la variabilidad inherente en las propiedades físicas de los suelos, influenciada por factores como la mineralogía y la compactación. Además, al comparar los límites de consistencia, se evidencian discrepancias notables, por ejemplo, la Cantera C-01 exhibió un LL de 29.69, LP de 14.81 y un IP de 14.88, en contraste con los rangos reportados por Rosales (2021) en sus diferentes grupos. La variabilidad en el contenido de humedad también destaca, ya que nuestras canteras presentaron valores específicos (C-01: 3.37%, C-02: 1.35%, C-03: 23.73%), subrayando



la necesidad de adaptar los enfoques de diseño y construcción a las características únicas de cada sitio.

**D2:** Determinar el grado de dispersión de las arcillas de las canteras de Curayllo para construir la presa de tierra Chaqa-Qarqa, Azángaro, Puno 2023.

Los resultados de la presente investigación sobre la tubificación en las canteras de Curayllo (C-01, C-02 y C-03) indican un grado de dispersión del tipo "D1" que se interpreta como "Dispersivo" en todas las muestras, evidenciando una propensión significativa a la rápida erosión interna de los suelos. Los diámetros de tubificación registrados en la Cantera C-01 fueron de 11 mm (máximo) y 8 mm (mínimo), en la Cantera C-02 se obtuvieron diámetros de tubificación con máximos y mínimos de 14 mm y 11 mm, respectivamente, y en la Cantera C-03 se observaron diámetros de tubificación de 13 mm (máximo) y 6 mm (mínimo).

Comparando estos resultados con la investigación de Rosales (2021), que abordó diversos tipos de suelos, se observa una variabilidad considerable en los diámetros de tubificación. Los suelos de tipo CH presentaron diámetros que oscilaron entre 13.19 mm y 43.91 mm, mientras que los suelos CL (arcilla arenosa de plasticidad media) mostraron variaciones de 11.10 mm a 28.00 mm. Además, en suelos de tipo CL (arcilla inorgánica de plasticidad media), los diámetros variaron de 12.89 mm a 70.27 mm, y para suelos SC, la variación fue de 9.94 mm a 48.01 mm. Cabe destacar que en suelos de tipo ML, se obtuvo un diámetro promedio fino de 83.89 mm, mientras que para suelos MH fue de 14.19 mm y para suelos SM el diámetro promedio fue de 82.90 mm, todos medidos en un tiempo de ensayo de 30 minutos. Estas comparaciones resaltan la singularidad de la respuesta de las arcillas de Curayllo a la tubificación y enfatizan la importancia de



considerar estas particularidades al evaluar la idoneidad de los suelos para proyectos de ingeniería, como la construcción de una presa de tierra.

**D3:** Determinar el índice de tasa de erosión en las arcillas de las canteras de Curayllo para construir la presa de tierra Chaqa-Qarqa, Azángaro, Puno 2023.

En la investigación de Rosales (2021) se describen los resultados de los ensayos de tubificación, donde se evaluaron diversos parámetros para diferentes muestras clasificadas según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Para las muestras con clasificación SUCS CH (arcilla inorgánica de alta plasticidad), se observa una variación en el coeficiente de erosión de suelo ( $C_e$ ) de 0.177 a 0.3843 Kg/(s.m<sup>2</sup>) y en el índice representativo de tasa de erosión ( $\tilde{I}$ ) de 0.4153 a 0.75129. En el caso de las muestras SUCS CL arenosas, se registra una variación en  $C_e$  de 0.1472 a 0.4098 Kg/(s.m<sup>2</sup>) y en  $\tilde{I}$  de 0.3874 a 0.8320. Asimismo, para las muestras SUCS CL (arcilla inorgánica de plasticidad media) se evidencia una variación en  $C_e$  de 0.1387 a 0.3644 Kg/(s.m<sup>2</sup>) y en  $\tilde{I}$  de 0.4384 a 0.8579. Para las muestras SUCS SC (arena arcillosa), se muestra una variación en  $C_e$  de 0.1422 a 0.3139 Kg/(s.m<sup>2</sup>) y en  $\tilde{I}$  de 0.5032 a 0.8471. Se analizaron también muestras clasificadas como ML (limo inorgánico) y MH (limo inorgánico), destacando diferentes valores de  $C_e$  e  $\tilde{I}$ . Además, la muestra SM (arena limosa) presenta valores específicos de  $C_e$  (0.6937 Kg/(s.m<sup>2</sup>)) e  $\tilde{I}$  (0.1588). Estos resultados detallan la variabilidad de los parámetros de tubificación en función de la clasificación SUCS y proporcionan información clave para comprender el comportamiento de las arcillas en condiciones específicas.

En contraste con la presente investigación, las muestras de la cantera C-01 muestran valores del coeficiente de erosión ( $C_e$ ) desde 0.0022 hasta los 0.0046, un Índice representativo de la tasa de erosión (IHET) que va desde los 2.1847 hasta los 2.6618; En



el caso de la cantera C-02, los  $C_e$  obtenidos fueron desde los 0.0011 hasta los 0.0069 con un IHET que abarca los 2.1631 hasta los 2.9685; y finalmente la cantera C-03 demostró contar con valores  $C_e$  desde los 0.0010 hasta los 0.0038 con valores de IHET que va desde los 2.4151 hasta los 2.9857. Para todos los casos analizados de las 3 canteras se puede apreciar que el progreso de la erosión sucede muy rápido tal como se representa en las tablas 20, 21 y 22 conjuntamente representado en las figuras 33, 34 y 35 del presente estudio.

Comparando estos resultados con los obtenidos por Rosales (2021), se observa que, a pesar de las diferencias en las condiciones del suelo y las metodologías de ensayo, ambas investigaciones resaltan la importancia de comprender la variabilidad de las arcillas en función de su clasificación y su comportamiento frente a procesos erosivos. Los coeficientes de erosión y los índices de tasa de erosión proporcionan una medida cuantitativa de la susceptibilidad a la erosión, y los resultados indican que las arcillas de las Canteras C-01, C-02 y C-03 podrían experimentar una erosión interna rápida, lo que podría afectar negativamente la seguridad y estabilidad de la presa planificada.

#### 4.5. HIPÓTESIS GENERAL

Se planteó la siguiente hipótesis: “Son susceptibles a la tubificación las arcillas de las canteras de Curayllo para construir la presa de tierra Chaqa-Qarqa, Azángaro, Puno 2023.”, los resultados para cada cantera son los siguientes.

**Tabla 24**

*Susceptibilidad a la tubificación de las arcillas de las canteras*

Muestra	Ce	IHET	Progreso de la erosión interna	Susceptibilidad a la tubificación
I-1	0,0046	2,3376	Muy rápida	67%
I-2	0,0041	2,3888	Muy rápida	66%
I-3	0,0065	2,1847	Muy rápida	69%
I-4	0,0022	2,6618	Muy rápida	62%
II-1	0,0023	2,6402	Muy rápida	62%
II-2	0,0011	2,9685	Muy rápida	58%
II-3	0,0069	2,1631	Muy rápida	69%
II-4	0,0015	2,8379	Muy rápida	59%
III-1	0,0023	2,6342	Muy rápida	62%
III-2	0,0011	2,9449	Muy rápida	58%
III-3	0,0010	2,9857	Muy rápida	57%
III-4	0,0038	2,4151	Muy rápida	65%
			Media	63%
			Mediana	62%
			Rango	12%
			Varianza	18.14%
			Desviación estándar	4.26%

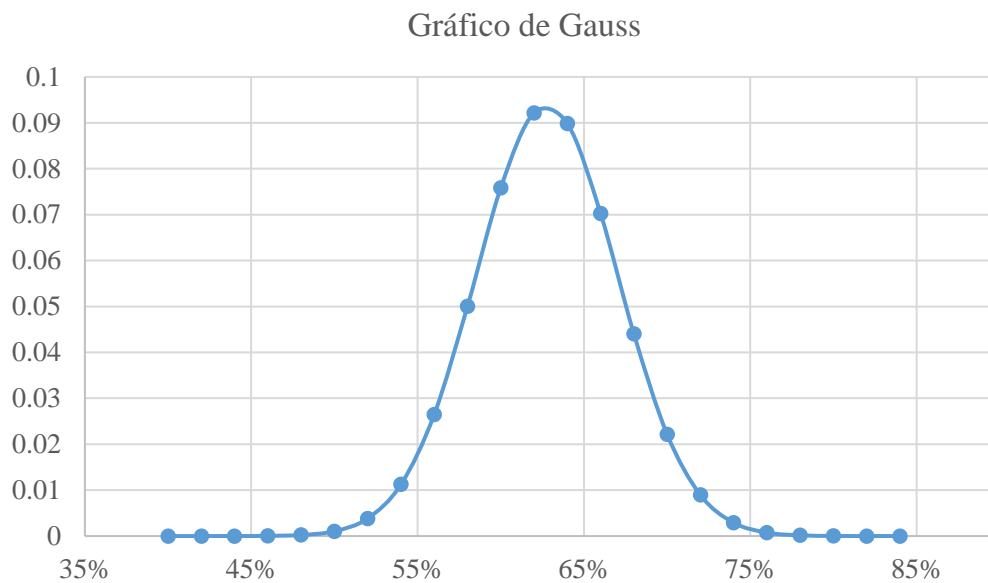
Nota: El progreso a la erosión interna es “Muy rápida” en todos los casos.

Las hipótesis planteadas para esta investigación fueron afirmativas con la aplicación de las metodologías de Ensayo de erosión de agujeros (HET) y Pinhole, para la caracterización de los suelos y su eficacia para la determinación de dispersividad y progresión a la erosión interna. Por lo tanto, con los resultados obtenidos de las Tabla 24 se valida las hipótesis de estudio de que los suelos arcillosos de las canteras de Curayllo son dispersivos y presentarán una progresión de erosión rápida respecto a la metodología

de Ensayo de erosión de agujeros (HET) contrastando y afirmando respecto a los parámetros ofrecidos por Luthi (2011) en la Tabla 3, afirmando una alta susceptibilidad a la tubificación.

### Figura 51

*Gráfico de Gauss*



Nota: El gráfico de Gauss depende de la distribución normal (Ver Tabla 25)

Considerando una escala del índice de tasa de erosión de 0 a 6 según Luthi (2011), entonces las arcillas de las canteras tendrán una susceptibilidad a la tubificación mayor a 63% validando la hipótesis general.



**Tabla 25**

*Distribución Normal*

<b>Porcentajes</b>	<b>Distribución Normal</b>
40%	5.81339E-08
42%	6.41169E-07
44%	5.67199E-06
46%	4.02457E-05
48%	0.000229046
50%	0.001045559
52%	0.003828195
54%	0.011242432
56%	0.026481778
58%	0.050032783
60%	0.07581983
62%	0.092157692
64%	0.089846467
66%	0.070257235
68%	0.044065807
70%	0.022168333
72%	0.008945096
74%	0.00289506
76%	0.000751538
78%	0.000156482
80%	2.61336E-05
82%	3.50069E-06
84%	3.76123E-07

Nota: Distribución normal tomando en cuenta la media y la variación estándar.



## V. CONCLUSIONES

**PRIMERA:** Se ha determinado que las características de las arcillas de las Canteras de Curayllo, esenciales para la construcción de la presa de tierra Chaqa-Qarqa en Azángaro, Puno en 2023, presentan una marcada variabilidad en sus propiedades físicas. La teoría elaborada por Acuña y Betancur (2022) nos muestran que las arcillas de baja plasticidad, clasificadas como CL presentan un grado de dispersividad significativo. En particular, las muestras con un índice de plasticidad inferior a 10% mostraron un tiempo de filtración menor a 5 minutos, lo que significa un alto grado de dispersividad, fundamentalmente en porcentajes de humedad relativamente bajos con respecto a su humedad natural. Los resultados revelan contrastes significativos en el contenido de humedad, oscilando desde 1.35% en C-02 hasta 23.73% en C-03, indicando disparidades en la capacidad de retención de agua de estos suelos. Además, se ha observado una diversidad pronunciada en la gravedad específica (C-01: 2.716, C-02: 2.867, C-03: 2.851). Presentaron rangos distintos en índice de plasticidad, subrayando la diversidad intrínseca de estas fuentes de arcilla.

**SEGUNDA:** Se ha establecido que las arcillas provenientes de las Canteras C-01, C-02 y C-03 en Curayllo presentan un grado de dispersión "D1" que se interpreta como Dispersivo (Ver Figura 9), según los resultados del ensayo de tubificación realizado en el contexto de la construcción de la presa de tierra Chaqa-Qarqa. Este hallazgo sugiere una marcada propensión de estos suelos a experimentar una rápida erosión interna, lo cual es crucial considerar en el diseño y la planificación del proyecto para garantizar su



estabilidad a largo plazo. En la normativa que regula la metodología de Pinhole (ASTM D4647) señala: “Los suelos cuyos resultados de clasificación sean dispersivos (D1), presentaran un alto nivel de incertidumbre con respecto a la existencia de problemas significativos con respecto al diseño de la estabilidad de una estructura”. La evaluación detallada de los diámetros de tubificación en cada cantera refuerza la conclusión de un comportamiento dispersivo consistente.

**TERCERA:** Se ha determinado que, al evaluar el índice de tasa de erosión en las arcillas de las Canteras en Curayllo para la construcción de la presa de tierra Chaqa-Qarqa, los resultados revelan una marcada susceptibilidad a la erosión interna. Todos los índices de tasa de erosión de la presente investigación son menores que 4, oscilando entre 2.1847 a 2.9857. Este análisis cuantitativo pone de manifiesto una rápida progresión de la erosión en todas las canteras evaluadas, subrayando la urgente necesidad de estrategias de mitigación en el diseño y construcción de la presa planificada.





## VI. RECOMENDACIONES

- PRIMERA:** Observando la variabilidad de la presión del agua y otros parámetros, se debe realizar estudios de tubificación a nivel experimental para proponer un nuevo modelo de tubificación.
- SEGUNDA:** Dada la variabilidad de las características de las arcillas dispersivas se aconseja monitorear de cerca el contenido de humedad, límites de consistencia y aplicar técnicas de compactación adecuadas para evitar cambios volumétricos significativos y garantizar la estabilidad a largo plazo de una presa.
- TERCERA:** Se sugiere realizar estudios detallados y experimentales sobre cada muestra para adaptar estrategias específicas que aborden las características únicas de cada tipo de arcilla.
- CUARTA:** Dado el comportamiento dispersivo de todas las muestras, se recomienda implementar medidas efectivas de control de dispersión durante la construcción. El uso de aditivos o técnicas específicas de compactación puede ser crucial para minimizar la erosión interna y preservar la integridad de la presa, se puede hacer uso de la bentonita u otros aditivos para estabilizar las arcillas dispersivas.
- QUINTA:** Se debe perpetuar con los procedimientos mostrados en la presente investigación con un número mayor cantidad de especímenes para cada tipo de suelos estableciendo más características del comportamiento en el proceso de tubificación.



- SEXTA:** Considerando la complejidad del comportamiento geotécnico de las arcillas se sugiere realizar investigaciones adicionales para comprender más a fondo las interacciones entre las diferentes propiedades del suelo y su impacto en la estabilidad de la presa. Esto puede incluir estudios específicos sobre la mineralogía, la porosidad y otros factores influyentes.
- SÉPTIMA:** Se recomienda incrementar el estudio efectuando variaciones de los parámetros de compactación y la presión hidráulica en un proceso de experimental de mayor escala.
- OCTAVA:** Se debe investigar agentes estabilizantes para las arcillas dispersivas una de ellas es la bentonita y el sulfato de aluminio que refiere Gonzales y Armas (2008).



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña, C., & Betancur, J. (2022). *Determinación del grado de dispersividad de suelos arcillosos en la ciudad de Cartagena de indias mediante el ensayo de Pinhole*. Universidad de Cartagena, Distrito Turístico y Cultural Cartagena de Indias - Colombia.
- Alcocer, V., & Murillo, R. (2019). Revisión de la estabilidad de presas mexicanas con riesgo. *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*, 1842 - 1849.
- ASTM (American Society of Testing Materials). (2005). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)). D1557. V 04.08*. West Conshohocken, EE.UU: Prior. Abr.
- ASTM (American Society of Testing Materials). (2006). *Standard Test method for Identification and Classification of dispersive of Clay Soils by the Pinhole Test. D4647. Sección 4*. West Conshohocken, EE.UU: Prior. Abr. V 04.09.
- Berrío, O., & Yohanna, X. (2017). *Evaluación del fenómeno de erosión interna en presas de tierra: una revisión a las presas de Antioquia*.
- Berry, P., & D., R. (1993). *Mecánica de suelos. 1 ed*. Santa Fé, Bogotá: McGraw Hill.
- Bowles, J. (1982). *Propiedades geofísicas de los suelos. 1 ed*. Bogotá: McGraw Hill.
- Caminati, M. (2003). *“El método del índice de erodabilidad en el cálculo de la erosión local en pilares de puentes*. Piura: Universidad de Piura .
- Campos , D. (febrero de 2013). Modelado empírico simple del rompimiento de presas pequeñas de tierra (hidrograma de salidas). *Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XIV(3)*, 377-388.
- Coronel, G. (2019). *Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales empleados en el modelamiento de una presa de tierra, Lambayeque*. Universidad Señor de Sipán, Pimentel - Perú.



- Cruz, S., Mendoza, C., Ascoy, K., Cipriano, J., Barrenechea, J., & Flores, G. (2022). Mecánica de Suelos y cimentaciones. *In Engineering Sciences*, 44-62.
- Duque, G., & Escobar, C. (2002). *MECANICA DE LOS SUELOS*. Manizales: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MAZANILLAS.
- Fell, R., MacGregor, P., & Bell, G. (2005). *Geotechnical engineering of dams*. London: CRC Press.
- Ferreira, J. M., & Alonso, E. E. (2021). Tubificación en presas: una revisión de los métodos de evaluación y las medidas de mitigación. *Revista de Ingeniería Civil*, 13(2), 160-169.
- Garay, G., & Alva, J. (s.f.). *Identificación y encayos en suelos dispersivos*. Universidad Nacional de Ingeniería .
- García, J., Pérez, M., & Gómez, A. (2020). Evaluación de la eficacia de la tubificación de arcillas en presas de tierra. *Revista de Obras Públicas*.
- González Haramboure, Y., & Armas Novoa, R. (2008). Identificación y Estabilización de Suelos Estado del Arte. *CCIA'2008*, 1-9.
- González, E., & Roque, P. (2019). *Evaluación de los riesgos asociados a la falla por tubificación del Dique "C" de la Central Hidroeléctrica "Simón Bolívar" en Guri*. Universidad Católica Andrés Bello, Guayana - Venezuela.
- Gutiérrez, J. &. (2023). Adaptación de estándares internacionales para la evaluación de la susceptibilidad a la tubificación en presas de tierra en Perú. *Revista de Ingeniería Civil*, 15(1), 1-10.
- Gutiérrez, W. (2023). *Ensayo granulométrico de los suelos mediante el método del tamizado*. Oruro: Ciencia Latina Internacional.  
doi:[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i2.5834](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5834)
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2020). *Metodología de la investigación (6.a ed.)*. McGraw-Hill Education.



- Huanca, C. (2018). *GUIA DE ENSAYOS DE LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS*. La Paz: UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES.
- Juárez, B. E., & Rico, R. (2011). *Mecánica de suelos Tomo 2: teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos*. México: Limusa.
- Li, X., & Arroyo, V. (2011). Impacto de fuerzas de filtración y tubificación retrógrada a la inestabilidad de talud y erosión hídrica. *Tecnologías de Información y Comunicación -UNAM*, 2.
- Li, Z., & Yang, Y. (2020). Impact of environmental conditions on pipe formation in granular soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 48(1), 251-261.
- Lopes, J., De Araújo, J., & Conrado, F. (2019). Caracterización de las presas de tierra empleadas para el control de la desertificación en la región de Gilbués, Noreste de Brasil. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 1(45), 1-10.
- López, C., Gurvara, E., León, V., & López, D. (2023). 122Arcillas expansivas del Norte de Venezuela: Caracterización mediante el uso de los límites de Atterberg, índices de consistencia y ensayos de expansión. *Universidad Central de Venezuela*. doi:<https://doi.org/10.21703/0718-2813.2023.34.2451>
- López, G. (2020). *Ensayos de compactación en carreteras: Proctor Normal y Modificado*. Valencia: Universitat Politècnica de València. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10251/139866>
- Lujan, C. (2022). *Modelamiento hidráulico bidimensional del tránsito de la onda generada por la rotura de una presa de tierra zonificada aplicada a la presa Gallito Ciego -Cajamarca, Perú 2021*. Universidad César Vallejo, Chimbote - Perú.
- Luthi, M. (2011). *A MODIFIED HOLE EROSION TEST (HET-P) TO STUDY EROSION CHARACTERISTICS OF SOIL*. THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA.
- Marin Saucedo, K. J., & Cieza Benavides, R. A. (2021). *COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS SUELOS DISPERSIVOS TROPICALES*,



*ESTABILIZADOS CON CEMENTO PÓRTLAND, EN LA ZONA URBANA DEL  
DISTRITO DE PILLUANA, PROVINCIA DE PICOTA Y REGIÓN SAN  
MARTÍN – 2020.*

- Márquez-Fernández, F., & Pérez-Sanz, M. (2021). Investigación básica y aplicada: conceptos, diferencias y relaciones. *Revista de Investigación en Educación*, 29(2), 230-245.
- Marsal, R., & Reséndiz, D. (1975). *Presas de tierra y enrocado. 1 ed.* México: Limusa.
- Martínez, J., Fernández, J., & González, L. (2023). Comportamiento dinámico de los núcleos de presas de arcilla apisonada, según la microestructura de la misma, con examen particular de la arcilla del Kenger. *Revista de Ingeniería Geotécnica*.
- Nakano, R. (1991). *Desing of fill type dams.* Tsukuba: Tsukuba International Agricultural Training Centre, Japan International Cooperation Agency.
- Norma Técnica Peruana. (2014). *SUELOS. Método de ensayo para el análisis granulométrico.* Lima: INDECOPI.
- Novak, P., Moffat, A., & Nalluri, C. (2001). *Estructuras hidráulicas.* Bogotá: McGraw Hill.
- Pang, C., & Zhang, Z. (2019). Experimental study of the role of pore water chemistry on pipe formation in granular soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(11), 04020006.
- Pino, R. (2007). *Metodología de la investigación.* Lima: San Marcos.
- Rico, R. D. (2000). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas volumen I.* México: Limusa.
- Rosales, E. (2021). *“ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL FENÓMENO DE TUBIFICACIÓN EN PRESAS DE TIERRA.* Lima : UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA.
- Rosales, E. (2021). *Análisis experimental del fenómeno de tubificación en Presas de tierra.* Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.



- Rosales, E. (2021). *ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL FENÓMENO DE TUBIFICACIÓN EN PRESAS DE TIERRA*. Lima : Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Salas, O. (2011). Ensayos triaxiales para suelos. *Universidad de Costa Rica, Lanamme.*, 14–24. <https://doi.org/10.15517/mym.v1i1.8391>
- Samame, V., Arevalor, K., & Davila, C. (2022). *Identificación y determinación del grado de dispersividad de los suelos en la carretera puerto Sangama hacia la localidad de Pilluana*. Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto - Perú.
- Sánchez, F. (13 de MAYO de 2019). Límites de Atterberg: limite líquido y límite plástico gráfico de plasticidad de Casagrande. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia. Obtenido de <https://polimedia.upv.es/visor/?id=b272c280-700a-11e9-a7d3-3df1cef1857d>
- Sandoval, F. (2022). *Modelado y simulación de rotura de presa poechos debido a una avenida Milenaria, Distrito Lancones, Provincia Sullana, Departamento de Piura - Perú*. Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo - Perú.
- Santamaria, V. (2021). *Determinación de la presencia de suelos dispersivos en la comuna 16 (Belén) de la ciudad de Medellín*. Universidad EIA, Medellín - Colombia.
- Santos, R., Caldeira, L., & Maranhã da, E. (2012). Influence of compaction in the erodability of a partially saturated soil. *GEOTECNIA*, 5-40.
- Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., & Rey S. Decker, M. (1976). Pinhole Test for Identifying Dispersive Soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 11846: 69-85.
- Xiaodong, W., & Benson, C. H. (1995). Infiltration and Saturated Hydraulic Conductivity of Compacted Clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 121, Issue 10.
- Yali, R. (2018). *Modelo de erosión RUSLE y coeficiente de aporte de sedimentos (SDR) para la estimación del volumen muerto de reservorios, caso de estudio: Reservorio Gallito Ciego* . Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos .



Zhang, Y., & Li, H. (2021). A new method for the identification of pipe-prone clayey soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147 (11).





## ANEXOS

**ANEXO 1:** Matriz de Consistencia.

**ANEXO 2:** Constancia del uso de equipos de laboratorio.

**ANEXO 3:** Certificados de Calibración de equipos de laboratorio.

**ANEXO 4:** Contenido de humedad, densidad y gravedad específica de C-1, C-2 y C-3.

**ANEXO 5:** Límites de Consistencia de las Canteras C-1, C-2 y C-3.

**ANEXO 6:** Granulometría de las Canteras C-1, C-2 Y C-3.

**ANEXO 7:** Ensayo de Proctor modificado de las Canteras C-1, C-2 Y C-3.

**ANEXO 8:** Ensayos de Tubificación Cantera 01.

**ANEXO 9:** Ensayos de Tubificación Cantera 02.

**ANEXO 10:** Ensayos de Tubificación Cantera 03.



## DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo RONALD MDMANI ANAHUA  
identificado con DNI 70847274 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado  
INGENIERIA CIVIL

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:  
"EVALUACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA TUBIFICACION DE LAS ARCILLAS DE LAS  
CANTERAS DE CURAYLLO PARA CONSTRUIR LA PRESA DE TIERRA CHAGA-QARQA,  
AZANGARO, PUNO 2023"

Es un tema original.


Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 25 de ENERO del 2024

  
FIRMA (obligatoria)



Huella



## AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo RONALD MAMANI ANAHUA,  
identificado con DNI 70847274 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERIA CIVIL

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

" EVALUACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA TUBIFICACION DE LAS ARCILLAS DE LAS CANTERAS DE CURAYLLO PARA CONSTRUIR LA PRESA DE TIERRA CHACA-CARCA, DE ANEGARU, PUNO 2023."

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 25 de ENERO del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella