

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO**



**FACULTAD DE INGENIERIA**

**CARRERA DE INGENIERIA CIVIL**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**INFLUENCIA DEL POLVO DE VIDRIO RECICLADO EN LA SUCCIÓN  
MATRICIAL DE UNA ARCILLA EXPANSIVA Y SU POTENCIAL DE  
EXPANSIÓN.**

**Autor:**

**ELVIS FERNANDO HUARACA MOROCHO**

**Tutor:**

**ING. MARCO JAVIER PALACIOS CARVAJAL MSC**

**Riobamba – Ecuador**

**Año 2023**

## DERECHOS DE AUTORÍA

Yo, **Elvis Fernando Huaraca Morocho**, con cédula de ciudadanía **060405941-0**, autor del trabajo de investigación titulado: **INFLUENCIA DEL POLVO DE VIDRIO RECICLADO EN LA SUCCIÓN MATRICIAL DE UNA ARCILLA EXPANSIVA Y SU POTENCIAL DE EXPANSIÓN.**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 10 días de noviembre de 2023.



Elvis Fernando Huaraca Morocho

C.I: 060405941-0

**DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL;**

Quienes suscribimos, catedráticos designados Tutor y Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **INFLUENCIA DEL POLVO DE VIDRIO RECICLADO EN LA SUCCIÓN MATRICIAL DE UNA ARCILLA EXPANSIVA Y SU POTENCIAL DE EXPANSIÓN.**, presentado por **Elvis Fernando Huaraca Morocho**, con cédula de identidad número **060405941-0**, emitimos el DICTAMEN FAVORABLE, conducente a la **APROBACIÓN** de la titulación. Certificamos haber revisado y evaluado el trabajo de investigación y cumplida la sustentación por parte de su autor; no teniendo nada más que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba, a los 10 días de noviembre de 2023

Msc. Andrea Natali Zarate Villacrés  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DEL GRADO**

  
.....  
Firma

Mgs. Jorge Eugenio Nuñez Vivar  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**

  
.....  
Firma

Mgs. Cristian Andrés Marcillo Zapata  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**

  
.....  
Firma

Mgs. Marco Javier Palacios Carvajal  
**TUTOR**

  
.....  
Firma

## CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DE TRIBUNAL;

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **INFLUENCIA DEL POLVO DE VIDRIO RECICLADO EN LA SUCCIÓN MATRICIAL DE UNA ARCILLA EXPANSIVA Y SU POTENCIAL DE EXPANSIÓN.**, presentado por **Elvis Fernando Huaraca Morocho**, con cédula de identidad número **060405941-0**, bajo la tutoría de **Mg. Marco Javier Palacios Carvajal**; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba, a los 10 días de noviembre de 2023

Msc. Andrea Natali Zarate Villacrés  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DEL  
GRADO**



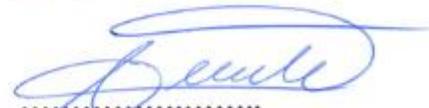
.....  
Firma

Mgs. Jorge Eugenio Nuñez Vivar  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE  
GRADO**



.....  
Firma

Mgs. Cristian Andrés Marcillo Zapata  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE  
GRADO**



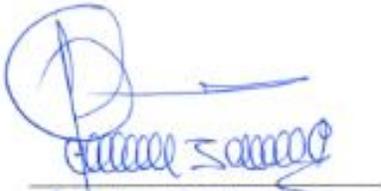
.....  
Firma



## CERTIFICACIÓN

Que, **HUARACA MOROCHO ELVIS FERNANDO** con CC: **060405941-0**, estudiante de la Carrera **Ingeniería Civil, NO VIGENTE**, Facultad de **INGENIERIA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado " **INFLUENCIA DEL POLVO DE VIDRIO RECICLADO EN LA SUCCIÓN MATRICIAL DE UNA ARCILLA EXPANSIVA Y SU POTENCIAL DE EXPANSIÓN**", cumple con el **6%**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **URKUND**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 08 de noviembre de 2023



Mgs. Javier Palacios  
TUTOR

## DEDICATORIA

*A mi familia Yeimy y Ambar, por su apoyo incondicional que ha sido el cimiento sobre el cual he construido cada paso hacia la culminación de este sueño. Cada desafío superado, cada logro alcanzado, lleva impreso su aliento y su amor. Su presencia ha llenado de significado cada jornada de estudio, recordándome que cada esfuerzo vale la pena. Ser testigo de su fortaleza y empuje me guía a ser un ejemplo a seguir.*

*Este logro, es nuestro triunfo como familia. Agradezco a ambas por ser mi faro en los días oscuros y mi luz en las jornadas de estudio interminables. Este título no solo representa mi esfuerzo, sino también el amor y apoyo inquebrantables que ustedes han brindado.*

*Con amor y gratitud eternos,*

*Elvis Fernando Huaraca Morocho*

## AGRADECIMIENTO

*En el camino de alcanzar la culminación de mis estudios, no puedo dejar de expresar mi más profundo agradecimiento a aquellos que han sido pilares fundamentales en este viaje.*

*A Dios, fuente de sabiduría y guía constante, le agradezco por iluminar mi senda, por darme fuerzas en los momentos de desafío y por ser mi refugio en las jornadas difíciles.*

*A mis padres José y Clara, quienes desde el inicio fueron mis primeros maestros y los arquitectos de mi educación, les debo mi gratitud infinita. Su sacrificio, amor incondicional y apoyo constante son la mejor guía y ejemplo para poder cristalizar mis objetivos.*

*A mis queridos hermanos Stalin, Carolina y Ulises, compañeros de vida y confidentes, les agradezco por ser mi apoyo, ejemplo a seguir, por brindarme toda su confianza y cuidarme en todo momento de mi vida.*

*A mis amigos José y Pablo, por brindarme su amistad sincera y ser de gran ayuda para el desarrollo de este proyecto de investigación.*

*Elvis Fernando Huaraca Morocho*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>DERECHOS DE AUTORÍA</b> .....	
<b>DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL;</b> .....	
<b>CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DE TRIBUNAL;</b> .....	
<b>CERTIFICADO ANTIPLAGIO</b> .....	
<b>DEDICATORIA</b> .....	
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....	
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	
<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	
<b>RESUMEN</b> .....	13
<b>ABSTRACT</b> .....	14
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	15
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	17
<b>OBJETIVOS</b> .....	18
<b>Objetivo General</b> .....	18
<b>Objetivos Específicos</b> .....	18
<b>CAPITULO I</b> .....	19
<b>GENERALIDADES</b> .....	19
<b>SUELO</b> .....	19
<b>FACTORES DEL FORMACIÓN DEL SUELO</b> .....	21
<b>COMPOSICIÓN DE SUELOS EN EL ECUADOR</b> .....	21
<b>ENTISOLES</b> .....	23
<b>INCEPTISOLES</b> .....	24
<b>MOLISOLES</b> .....	24
<b>VERTISOLES</b> .....	25
<b>MATERIALES CONSTITUTIVOS DE LOS SUELOS</b> .....	26
<b>SUELOS GRUESOS</b> .....	26
<b>SUELOS FINOS</b> .....	26
<b>ARCILLAS</b> .....	26
<b>ESTRUCTURA</b> .....	27
<b>TIPOS DE ARCILLAS</b> .....	27

<b>PROPIEDADES DE LAS ARCILLAS</b> .....	28
<b>GRÁFICO DE PLASTICIDAD</b> .....	30
<b>ARCILLAS EXPANSIVAS</b> .....	32
<b>POTENCIAL DE EXPANSIÓN DE LOS SUELOS</b> .....	34
<b>EFFECTOS DE LAS ARCILLAS EN LAS CONSTRUCCIONES</b> .....	34
<b>LÍMITE DE CONTRACCIÓN</b> .....	35
<b>SUCCIÓN EN SUELOS NO SATURADOS</b> .....	36
<b>SUCCIÓN MATRICIAL</b> .....	36
<b>MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA SUCCIÓN MATRICIAL DEL SUELO</b> .....	37
<b>Métodos directos</b> .....	38
<b>Métodos indirectos</b> .....	38
<b>ESTABILIZACIÓN DE LAS ARCILLAS EXPANSIVAS</b> .....	39
<b>POLVO DE VIDRIO RECICLADO</b> .....	39
<b>CAPITULO II</b> .....	40
<b>METODOLOGÍA</b> .....	40
<b>2.1. Características de la investigación</b> .....	40
<b>2.1.1. Nivel de investigación</b> .....	40
<b>2.1.2 Diseño de la investigación</b> .....	40
<b>2.2. Técnicas, instrumentos y procedimientos para recolección de datos</b> .....	40
<b>2.2.1. Técnicas</b> .....	40
<b>2.2.2 Instrumentos</b> .....	41
<b>2.2.3. Procedimiento</b> .....	41
<b>A. Revisión Bibliográfica</b> .....	42
<b>B. Toma de Muestras en la Zona de Estudio</b> .....	42
<b>C. Adquisición y Pulverización de Vidrios</b> .....	43
<b>D. Caracterización del suelo: Límites de Atterberg</b> .....	43
<b>E. Gravedad específica de los sólidos</b> .....	44
<b>F. Granulometría del Suelo vía Hidrómetro</b> .....	45
<b>G. Límite de Contracción</b> .....	47
<b>H. Ensayo de Succión matricial del Suelo</b> .....	48
<b>CAPITULO III</b> .....	50
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	50
<b>3.1 RESULTADOS</b> .....	50

<b>GEOGRAFÍA Y UBICACIÓN DE MUESTRO</b> .....	50
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD</b> .....	51
<b>SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)</b> .....	54
<b>GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS DEL SUELO POR PICNÓMETRO</b> .....	57
<b>GRANULOMETRÍA VÍA HIDRÓMETRO</b> .....	57
<b>LÍMITE DE CONTRACCIÓN</b> .....	61
<b>POTENCIAL DE EXPANSIÓN EN LOS SUELOS FINOS</b> .....	62
<b>SUCCIÓN MATRICIAL DEL SUELO</b> .....	63
<b>3.2 DISCUSIÓN</b> .....	67
<b>CAPITULO IV</b> .....	69
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	69
<b>4.1 CONCLUSIONES</b> .....	69
<b>4.2 RECOMENDACIONES</b> .....	71
<b>REFERENCIAS</b> .....	72
<b>ANEXOS FOTOGRÁFICOS</b> .....	93

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Claves para la taxonomía de suelos.....	22
<b>Tabla 2</b> Grado de Plasticidad del Suelo.....	30
<b>Tabla 3</b> Tabla de Clasificación de suelos.....	31
<b>Tabla 4</b> Relación entre la expansión del suelo y el índice de plasticidad.....	34
<b>Tabla 5</b> Valores de calibración para papel filtro Whatman N° 42.....	37
<b>Tabla 6</b> Pastillas y números de especímenes.....	49
<b>Tabla 7</b> Nombre y Ubicación de muestras.....	51
<b>Tabla 8</b> Contenido de humedad muestras inalteradas.....	52
<b>Tabla 9</b> Contenidos de humedad muestras alteradas en laboratorio.....	52
<b>Tabla 10</b> Índice plástico de las muestras.....	55
<b>Tabla 11</b> Gravedad específica calculadas en laboratorio.....	57
<b>Tabla 12</b> Resultados de Hidrometría Muestra M.....	58
<b>Tabla 13</b> Resultados de hidrometría Muestra HM.....	59
<b>Tabla 14</b> Resultados de hidrometría Polvo de Vidrio.....	60
<b>Tabla 15</b> Resultados de límite de contracción.....	61
<b>Tabla 16</b> Clasificación de los suelos expansivos basados en los índices de plasticidad y límite de contracción.....	62
<b>Tabla 17</b> Resultados de succión matricial muestra M.....	63
<b>Tabla 18</b> Resultados de succión matricial muestra HM.....	65

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1</b> Zonificación de suelos Alfisoles.....	23
<b>Ilustración 2</b> Zonificación de suelos Entisoles.....	23
<b>Ilustración 3</b> Zonificación de suelos Inceptisoles.....	24
<b>Ilustración 4</b> Zonificación de suelos Molisoles.....	24
<b>Ilustración 5</b> Zonificación de suelos Vertisoles.....	25
<b>Ilustración 6</b> Colores de las muestras M y HM.....	29
<b>Ilustración 7</b> Carta de Plasticidad.....	30
<b>Ilustración 8</b> Diagrama de flujo para clasificar los suelos de grano fino (50% o más pasa el tamiz No. 200).....	32
<b>Ilustración 9</b> Daños estructurales por arcillas expansivas.....	33
<b>Ilustración 10</b> Ensayo de Límite de Contracción.....	36
<b>Ilustración 11</b> Medición de la succión matricial con discos de alto valor de entrada de aire.....	38
<b>Ilustración 12</b> Esquema de colocación de papel filtro.....	38
<b>Ilustración 13</b> Trituración de botellas de vidrio.....	39
<b>Ilustración 14</b> Cuadro de procesos de la investigación.....	41
<b>Ilustración 15</b> Extracción de muestras de suelo.....	42
<b>Ilustración 16</b> Polvo de vidrio reciclado.....	43
<b>Ilustración 17</b> Ensayos de Límites de Atterberg.....	43
<b>Ilustración 18</b> Ensayo de Gravedad Específica.....	44
<b>Ilustración 19</b> Ensayo de Granulometría por Hidrómetro.....	46
<b>Ilustración 20</b> Ensayo de Límite de Contracción.....	48

<b>Ilustración 21</b> Papeles Filtro Whatman 42.....	49
<b>Ilustración 22</b> Muestras para el ensayo de succión matricial .....	50
<b>Ilustración 23</b> Coordenadas de extracción Muestra M.....	50
<b>Ilustración 24</b> Coordenadas de extracción Muestra HM.....	51
<b>Ilustración 25</b> Gráfico de barras de las muestras a diferentes humedades y dosificaciones de polvo de vidrio .....	54
<b>Ilustración 26</b> Clasificación SUCS de las muestras M y HM .....	55
<b>Ilustración 27</b> Reducción de los Límites de Consistencia añadiendo porcentajes de polvo de vidrio .....	56
<b>Ilustración 28</b> Curva Granulométrica Muestra .....	59
<b>Ilustración 29</b> Curva Granulométrica Muestra HM .....	60
<b>Ilustración 30</b> Curva Granulométrica Polvo de Vidrio .....	61
<b>Ilustración 31</b> Resultados de succión matricial Muestra M .....	64
<b>Ilustración 32</b> Resultados de succión matricial Muestra M .....	64
<b>Ilustración 33</b> Resultados de succión matricial Muestra HM.....	65
<b>Ilustración 34</b> Resultados de succión matricial Muestra HM.....	66
<b>Ilustración 35</b> Resultados del contenido de Humedad muestras M y HM .....	76
<b>Ilustración 36</b> Índice de plasticidad muestra M con 0% de polvo de vidrio.....	77
<b>Ilustración 37</b> Índice de plasticidad muestra M con 3 % de polvo de vidrio.....	78
<b>Ilustración 38</b> Índice de plasticidad muestra M con 5% de polvo de vidrio.....	79
<b>Ilustración 39</b> Índice de plasticidad muestra M con 7% de polvo de vidrio.....	80
<b>Ilustración 40</b> Índice de plasticidad muestra HM con 0% de polvo de vidrio.....	81
<b>Ilustración 41</b> Índice de plasticidad muestra HM con 3% de polvo de vidrio.....	82
<b>Ilustración 42</b> Índice de plasticidad muestra HM con 5% de polvo de vidrio.....	83
<b>Ilustración 43</b> Índice de plasticidad muestra HM con 7% de polvo de vidrio.....	84
<b>Ilustración 44</b> Carta de Plasticidad de todas las muestras inalteradas y alteradas .....	85
<b>Ilustración 45</b> Cálculos de la gravedad específica muestra M .....	86
<b>Ilustración 46</b> Cálculos de la gravedad específica muestra HM.....	87
<b>Ilustración 47</b> Cálculos de la gravedad para el polvo de vidrio .....	88
<b>Ilustración 48</b> Cálculos del ensayo de Hidrometría para la muestra M.....	89
<b>Ilustración 49</b> Cálculos del ensayo de Hidrometría para la muestra HM .....	90
<b>Ilustración 50</b> Cálculos del ensayo de Hidrometría para el polvo de vidrio.....	91
<b>Ilustración 51</b> Cálculos para determinar el Límite de Contracción.....	92
<b>Ilustración 52</b> Cálculos de succión matricial .....	92
<b>Ilustración 53</b> Extracción de muestras M y HM .....	93
<b>Ilustración 54</b> Trituración y recolección de polvo de vidrio .....	94
<b>Ilustración 55</b> Determinación de Límites de Atterberg.....	94
<b>Ilustración 56</b> Ensayo de Gravedad Específica.....	95
<b>Ilustración 57</b> Ensayo de Granulometría via Hidrómetro .....	95
<b>Ilustración 58</b> Ensayo de Límite de Contracción.....	96
<b>Ilustración 59</b> Ensayo de Succión matricial.....	97

## **RESUMEN**

El presente tema de investigación se centra en verificar la influencia que provoca el polvo de vidrio reciclado en distintas dosificaciones en muestras de suelo extraídas de la provincia de Manabí, cantón Rocafuerte, que son caracterizados por ser arcillas expansivas causantes de daños estructurales en diferentes obras civiles provocados por el hinchamiento y contracción del suelo debido al incremento o pérdida de humedad en el mismo, existen diversas formas para lograr una estabilización en este tipo de suelos como es el uso de cemento y puzolanas que mejoran el comportamiento mecánico del suelo; una alternativa más económica implica el uso de materiales reciclables como es el polvo de vidrio de botellas recicladas.

Se propone un estudio basado en las normas ASTM (American Society for Testing and Materials), donde se comprueba que, añadiendo distintas dosificaciones de 3, 5 y 7% de polvo de vidrio por muestra suelo, provoca el mejoramiento de los límites líquidos e índice de plasticidad causando que el suelo empleado para la investigación mejore sus características reduciendo su plasticidad y mejorando su consistencia.

Empleando el ensayo de límite de contracción se verifica que el potencial de expansión se reduce del rango alto al rango medio con la dosificación del 5% de polvo de vidrio, en cuanto al potencial de succión matricial del suelo los resultados varían dependiendo del contenido de humedad gravimétrica del suelo y del porcentaje de polvo vidrio provocando valores mayores cuando el polvo de vidrio aumenta en la muestra de suelo.

Palabras clave: succión matricial, polvo de vidrio, expansión, consistencia.

## **ABSTRACT**

The present research topic focuses on verifying the influence caused by recycled glass dust in different dosages in soil samples extracted from the province of Manabí, canton Rocafuerte, which are characterized by being expansive clays causing structural damage in other civil works caused by the swelling and contraction of the soil due to the increase or loss of moisture in it. There are several ways to stabilize this type of soil, such as using cement and pozzolans that improve the mechanical behavior of the earth. A more economical alternative involves using recyclable materials such as glass powder from recycled bottles.

A study based on the ASTM (American Society for Testing and Materials) standards is proposed, where it is proven that adding different dosages of 3, 5 and 7% of glass powder per soil sample causes the improvement of the liquid limits and plasticity index, causing the soil used for the research to improve its characteristics, reducing its plasticity and improving its consistency.

The expansion potential is reduced from the high range to the medium coverage with the dosage of 5% of glass powder; as for the matrix suction potential of the soil, the results vary depending on the gravimetric moisture content of the earth and the percentage of glass dust, causing higher values when the glass dust increases in the soil sample.

**Keywords:** Matrix suction, glass powder, expansion, consistency.



Reviewed by:

Mgs. Sofia Freire Carrillo

**ENGLISH PROFESSOR**

C.C. 0604257881

## INTRODUCCIÓN

En el campo de la Ingeniería una base primordial para el funcionamiento adecuado de toda obra civil es el estudio correcto del suelo donde será implantada la construcción, realizar el estudio previo del mismo conllevará a tener conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas del sitio para poder garantizar un buen desempeño de las estructuras tomando en cuenta las sollicitaciones para las que fueron diseñadas.

Se presentan graves problemas por la inestabilidad del suelo en ciertas zonas del Litoral Ecuatoriano principalmente en la provincia de Manabí, donde su suelo está conformado por arcillas expansivas que causan problemas a la construcción debido a su cambio volumétrico por variaciones de humedad presentes en la zona.

Se denominan arcillas expansivas a aquellos suelos que sufren contracción y expansión en su volumen causados por variaciones de humedad y por los esfuerzos internos afectados por el agua, para poder utilizar estos suelos se requiere modificar sus propiedades para evitar daños causados por el cambio de volumen, algunos efectos que producen estos suelos en la construcción son: levantamiento de piso, grietas en muros, asentamientos diferenciales, etc (Lopez-Lara et al., 2010).

Existen diferentes métodos para reducir el cambio volumétrico de las arcillas, algunos métodos modifican las características físicas-químicas de las arcillas, añadiendo diferentes materiales que ayudan a estabilizar el volumen de estas, tales como la cal, cemento hidráulico, fosfatos, sales de aluminio (Chicaiza & Oña, 2018).

En este caso particular se usará polvo de vidrio reciclado en diferentes dosificaciones como estabilizante.

El vidrio es un material amorfo no cristalino que es típicamente frágil y ópticamente transparente, es un elemento que se encuentra en la naturaleza y también se produce por el ser humano, su producción se realiza mediante el calentamiento de arena sílica, carbonato de sodio y piedra caliza en diferentes porcentajes, estos componentes presentes en el vidrio servirán como un aditivo que ayudará en la estabilización volumétrica de las arcillas (Olufowobi et al., 2014).

Debido a las variaciones volumétricas existentes en las arcillas expansivas se puede añadir un parámetro de succión matricial para generar una comprensión más completa del comportamiento del suelo, la succión matricial al estar relacionada con la humedad afecta a la resistencia, permeabilidad y variaciones volumétricas del suelo, en especial aquellos con un alto contenido de finos (Carrasco, 2017).

Existen diversos métodos convencionales para tomar la medida de la succión matricial como son la Cámara de Richards y embudo de Haines, esta investigación empleará el método alternativo del papel filtro que calcula la succión matricial indirectamente utilizando curvas de calibración que dependen entre la humedad del papel y la succión, las ventajas de este método son simplicidad, economía y exactitud razonable (Bicalho et al., 2006).

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los suelos del Ecuador tienen diferentes características dependiendo de su zona y clima, gran parte del Litoral Ecuatoriano están conformados por suelos arcillosos expansivos, que presentan diferentes componentes minerales como caolinitas, ilitas, montmorillonita, dichos minerales producen una modificación en la estructura de absorción de agua de la arcilla que generan el incremento de volumen del suelo y provoca daños severos a la cimentación de obras civiles presentes en la zona (Bravo & Lopez, 2021).

La búsqueda de una solución para este fenómeno es de gran importancia para la Ingeniería, puesto que los preceptos fundamentales de la misma es dar solución a los problemas y garantizar la optimización de recursos, existen diversos tratamientos para controlar la expansión de las arcillas de manera general, sin embargo, es importante tratar este caso a nivel particular y con elementos reciclables presentes en el medio como es el polvo de vidrio, además de añadir el estudio de succión matricial del suelo para tener una mejor caracterización y comprensión del comportamiento del mismo.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

- Determinar el efecto que produce el polvo de vidrio en la succión matricial y su potencial de expansión en arcillas expansivas.

### **Objetivos Específicos**

- Realizar la clasificación de suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), de las muestras obtenidas de la provincia de Manabí, sector Rocafuerte
- Determinar mediante el método del papel filtro la succión matricial de las muestras
- Identificar el comportamiento que genera el polvo de vidrio reciclado en varias dosificaciones en la curva de retención de humedad de las arcillas expansivas
- Determinar el potencial de expansión de las muestras tomadas en sitio y modificadas en laboratorio.

## CAPITULO I

### GENERALIDADES

#### SUELO

El suelo está conformado por cualquier tipo de material terroso no consolidado compuesto por partículas sólidas (Guamán, 2016). Los suelos se originan por la desintegración y descomposición de las rocas ya sea por procesos físicos y químicos.

La desintegración por procesos físicos es aquellos en donde el suelo no presenta ninguna alteración mineralógica de la roca, únicamente la separación de los minerales. En cambio, la descomposición por procesos químicos los minerales tienden a transformarse en otros. Los procesos físicos producen generalmente suelos arenosos o limosos mientras que los químicos producen principalmente suelos arcillosos (W. Escobar, 2004).

#### *PROCESOS FÍSICOS*

Los procesos físicos se pueden dar por fuerzas de origen internas o externas, provocando una desintegración física de las rocas.

##### **Fuerzas internas**

**Cambios de temperatura.** Debido a la dilatación y contracción de los minerales de la roca se producen fuerzas internas que agrietan la roca de dentro hacia afuera fragmentándola en partículas más pequeñas

**Meteorización química.** Debido a la transformación de minerales en otros, dichos minerales adquieren más volumen que producen tensiones internas desintegrando la roca.

**Reducción de presiones confinantes.** Se producen por movimientos de rocas que confinan a las rocas que posteriormente se desintegraran

**Congelación del agua.** Al congelarse el agua interna de las rocas se producen fuerzas internas que fisuran y degradan las rocas.

### **Fuerzas externas**

**Erosión por agua.** El efecto de abrasión del agua al golpear las rocas provoca que estas se desintegren

**Abrasión por hielo.** El hielo se desliza de los glaciares llevando rocas y reduciéndola a partículas más pequeñas

**Abrasión mutua.** El contacto continuo entre rocas provoca que se desintegren

**Impacto de olas.** La fuerza con la que las olas del mar golpean las rocas y las rompen (W. Escobar, 2004).

### ***PROCESOS QUÍMICOS***

**Oxidación.** Elementos como hierro, aluminio, silicio y otros elementos ferromagnesianos, en presencia del oxígeno contenido en el agua forman óxidos y nuevos minerales. Un ejemplo de ellos es: la hermatita y kimonita.

**Carbonatación.** La lluvia en combinación con el anhídrido carbónico forma el ácido carbónico que reacciona con el hierro, calcio, magnesio, sodio y potasio, generando carbonatos y bicarbonatos que son enteramente agentes de meteorización

**Hidratación.** Es la absorción de agua por parte de los minerales de las rocas formando nuevos minerales. Un ejemplo de ello es la conversión de silicatos inestables de aluminio en minerales arcillosos (W. Escobar, 2004).

## **FACTORES DE LA FORMACIÓN DEL SUELO**

Según Pendleton & Jenny, 1945 son cuatro los factores que influyen en la formación del suelo, estos son:

**Roca madre.** Los suelos se forman principalmente del material parental, estos definen el color, composición, textura y estructura de los suelos.

**Clima.** Este es uno de los principales factores en la formación de los suelos entre ellos la temperatura y precipitación afectan directamente a la meteorización y desarrollo de organismos que forman los suelos.

**Topografía.** La forma de superficie del suelo influye en la distribución de agua lluvia que afecta directamente a la erosión de las rocas y suelos.

**Organismos.** Por su actividad biológica los organismos vivos fragmentan, transforman al suelo. Así como las raíces de la vegetación, que fragmentan las rocas acelerando la meteorización (Pendleton & Jenny, 1945).

## **COMPOSICIÓN DE SUELOS EN EL ECUADOR**

Según SIGTIERRAS, 2017 clasifica a los suelos que componen el territorio ecuatoriano y utilizando el Sistema Norteamericano del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), Claves para la Taxonomía de Suelos; los cuales se describen en la siguiente tabla (SIGTIERRAS, 2017).

*Tabla 1 Claves para la taxonomía de suelos*

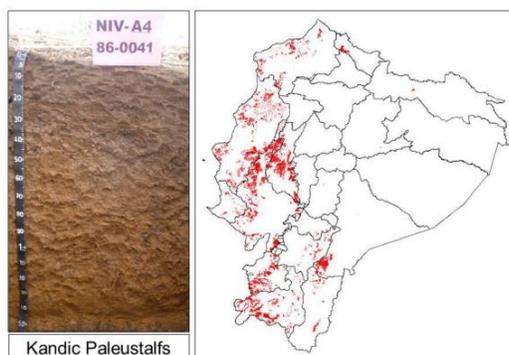
<b>ORDEN</b>	<b>DERIVACION</b>	<b>CONNOTACION</b>
<b>Gelisol</b>	(hielo)	Suelo congelado
<b>Histosol</b>	(tejido)	Turba, suelo orgánico
<b>Espodosol</b>	(ceniza)	Suelo ácido, queluvación, espódico
<b>Andisol</b>	(negro)	Propiedades ándicas y suelos volcánicos
<b>Oxisol</b>	(óxido)	Suelos ácidos, endopedion oxico
<b>Vertisol</b>	(volar)	Arcillas expansibles
<b>Aridisol</b>	(árido)	Régimen de humedad arídico
<b>Ultisol</b>	(último)	Suelos ácidos, con horizonte argílico o kandico
<b>Mollisol</b>	(mullido)	Espipedon mollico, SB $\geq$ 50%
<b>Alfisol</b>	(Al, Fe)	Horizonte argílico o natrico o kandico
<b>Inceptisol</b>	(inceptum)	Grado de desarrollo incipiente o pobre
<b>Entisol</b>	(reciente)	Perfil poco desarrollado

**Fuente:** SIGTIERRAS, S. N. de I. y G. de T. R. e I. T. (2017). Memoria explicativa del Mapa de órdenes de suelos del Ecuador. Quito, Ecuador. *SIGTIERRAS (Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica)*,

## ALFISIOLES

Comprenden 1 044 782 ha de la superficie del Ecuador, tienen saturaciones de bases mayor al 35%. Estos suelos han permanecido estables en zonas antiguas y bosques, es decir libre de erosión y otras perturbaciones (SIGTIERRAS, 2017).

### ALFISIOLES

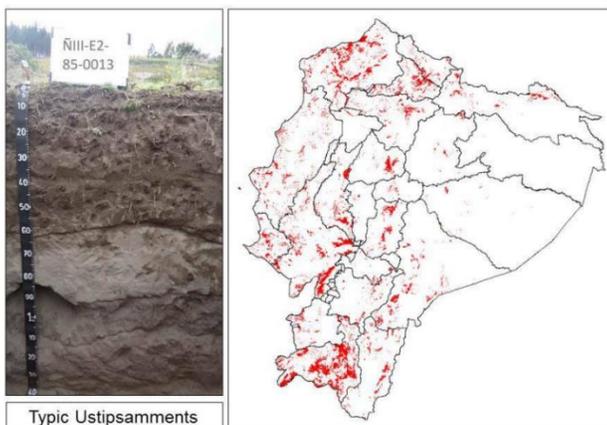


*Ilustración 1 Zonificación de suelos Alfisoles*

## ENTISIOLES

Abarcan una superficie 1 324 302 ha, se sitúan en pendientes fuertes >40 a 70%. Presentan erosión por lluvias, pedregosidad, elementos grueso y saturación de agua permanente (SIGTIERRAS, 2017).

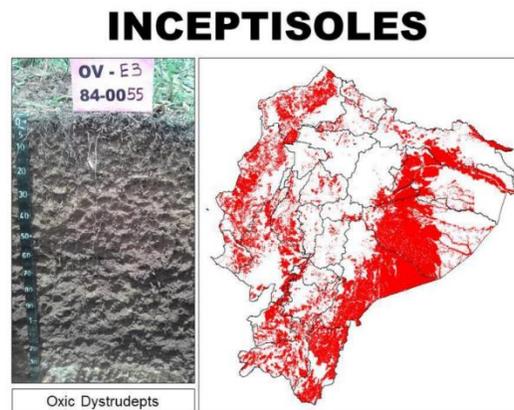
### ENTISIOLES



*Ilustración 2 Zonificación de suelos Entisoles*

## INCEPTISOLES

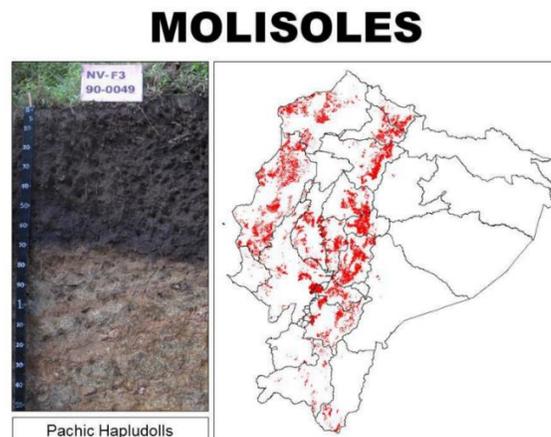
Ocupa 8 571 823 ha de la superficie del ecuador. Estos suelos presentan propiedades físicas y químicas variables: suelos drenados y más drenados, texturas arenosas o arcillosas, suelos ácidos o alcalinos y saturación base de más o menos 60%. Ya que comprende gran parte del país es quizá a lo que se deba cada propiedad, debido a los climas variados del país (SIGTIERRAS, 2017).



*Ilustración 3 Zonificación de suelos Inceptisoles*

## MOLISOLES

Ocupan un área de 1 872 652 ha que representa el 9% de la superficie nacional. Se ubican en relieves de la Costa y en los fondos de cuencas del callejón interandino(SIGTIERRAS, 2017).



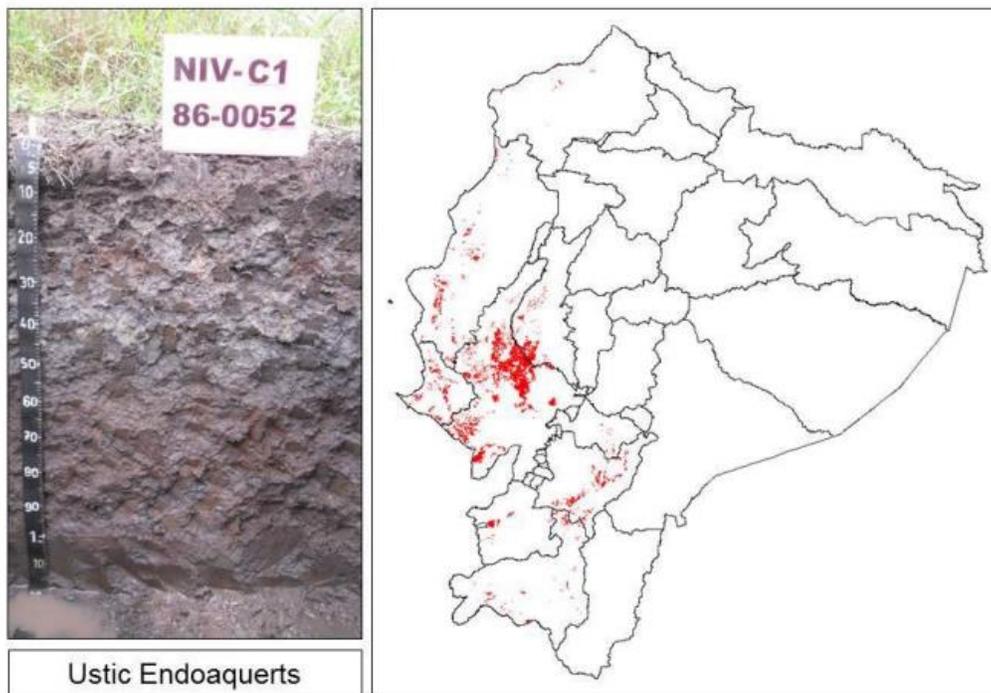
*Ilustración 4 Zonificación de suelos Molisoles*

## VERTISOLES

Suelos minerales poco desarrollados con un alto contenido de arcillas expansibles (>30%), en épocas de lluvia estas se inundan debido a su hinchamiento e impermeabilidad y por su contra cuando se secan se contraen prestando grietas. Son suelos muy plásticos en humedad y extremadamente duros en épocas secas.

En un proceso continuo de contracción y expansión debido al clima variado de la Costa, provocando un ascenso de material subterráneo y también que el suelo continuamente se mezcle entre sí. Estos suelos comprenden 405 823 ha de la superficie del país (SIGTIERRAS, 2017).

# VERTISOLES



*Ilustración 5 Zonificación de suelos Vertisoles*

## **MATERIALES CONSTITUTIVOS DE LOS SUELOS**

### **SUELOS GRUESOS**

Las propiedades principales que definen a los suelos gruesos son la Orientación de las partículas y Composición granulométrica.

#### ***Composición granulométrica***

La cantidad de tamaños que componen al suelo grueso es fundamental para definir su comportamiento. Es decir, en cuanto más cantidades iguales de tamaños tengan el material, mayor será su resistencia al cortante. Por contrario si el material presenta varios tamaños de partícula es menos resistente (W. Escobar, 2004).

#### ***Orientación de las partículas***

Cuando las partículas presentan varios ángulos o aristas en su periferia se dice que es más resistentes al corte que partículas cuyo perímetro es más bien redondeado (W. Escobar, 2004).

### **SUELOS FINOS**

Los suelos finos están representados por limos, turbas y arcillas, cada una con propiedades mecánicas diferentes, para objetos de estudio se analizarán únicamente las arcillas (W. Escobar, 2004).

### **ARCILLAS**

Los componentes mineralógicos de la arcilla influyen en el comportamiento mecánico. Formadas principalmente por silicatos de aluminio hidratados, silicatos de magnesio u hierro u otros metales hidratados. Las propiedades mecánicas de la arcilla son:

## ESTRUCTURA

Olguin, 2011, expone que los elementos que forman arcillas son los descritos previamente, al combinarse forman minerales arcillosos como: la Montmorillonita, la illita y la caolinita que tienen una alta, media y baja capacidad de absorción de agua respectivamente; dependiendo de las valencias de cada elemento se forman estos minerales (Olguin, 2011).

Asimismo, dependiendo de la cantidad y la forma de combinación se pueden generar diferentes estructuras de las arcillas.

1. **Simple:** producidas por la predominancia de las fuerzas gravitacionales en la disposición de las partículas.
2. **Panaloide:** típica de suelos cuyas partículas son menores de 0.02 mm de diámetro, por efecto de la gravedad las partículas forman panales con gran cantidad de vacíos.
3. **Floculante:** como la estructura panaloide, las partículas se juntan se sedimentan y forman una disposición similar a un panal, pero con doble cadenas de partículas.
4. **Compuesta:** las estructuras anteriores no se presentan puras en la naturaleza, la sedimentación comprende todo tipo de partículas y tamaños.
5. **Castillo de naipes:** las partículas de arcilla tienden a acomodarse en forma de castillo de naipes debido a que sus partículas son como laminas con diferentes cargas.
6. **Dispersa:** debido a presiones osmóticas los flóculos de las arcillas se separan y orientan a las láminas de arcilla en sus aristas (Olguin, 2011).

## TIPOS DE ARCILLAS

**Plásticas:** fácilmente moldeables al combinarse con agua

**Anti-plásticas:** la pasta al exponerse a altas temperaturas se vuelve vítreo

**Según su fusibilidad:** usados para la alfarería, y los colores que las caracterizan son castaños, ocreo, amarillos o marfil. En este grupo tenemos arcillas refractarias y arcillas caolines (Romero, 2021).

## **PROPIEDADES DE LAS ARCILLAS**

**Tamaño de la partícula:** Poseen estructura laminar cuyo tamaño de partículas es inferior a la micra.

**Merma:** son las arcillas que no tienen agua provocando una contracción y agrietamiento.

**Refractariedad:** cada tipo de arcilla tiene su temperatura de cocción, y soportan altas temperaturas sin sufrir variaciones.

**Porosidad:** arcillas con más poros se cuecen a baja temperatura y con menos poros a mayores temperaturas.

**Color:** debido al óxido de hierro y carbonato de calcio las arcillas adquieren diferentes tipos de color, además a simple vista debido al color que posee la arcilla se puede determinar la presencia de elementos orgánicos como plantas u organismos, así como inorgánicos como yeso o carbonatos (Chicaiza & Oña, 2018).

Para el estudio en esta investigación las muestras inalteradas fueron tomadas del cantón Rocafuerte, Provincia de Manabí; para la muestra M con coordenadas Latitud 0°55'37"S y Longitud 80°28'48"W, tiene un color café oscuro, mientras que para la muestra HM con coordenadas Latitud 0°54'59"S y Longitud 80°25'56"W, tiene un color café claro.



*Ilustración 6 Colores de las muestras M y HM*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

**Plasticidad:** es una característica de los suelos finos entre ellas las arcillas que al contacto con el agua esta actúa como un agente lubricante que facilita el deslizamiento entre sus partículas cuando son sometidas a un esfuerzo sobre ellas.

Las arcillas al tener una morfología laminar con partículas sumamente pequeñas y de alta capacidad de absorción presentan una alta plasticidad, que se pueden ser determinadas aplicando el ensayo de los Límites de Atterberg que determinan su límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, con los cuales diferenciamos las distintas consistencias del suelo: solido, semisólido, plástico y semilíquido (Chicaiza & Oña, 2018).

Una vez obtenido el límite líquido y plástico podemos calcular el Índice de plasticidad (IP) que nos ayuda a determinar el grado de plasticidad de un suelo, este se define como la diferencia entre el límite líquido y limite plástico como se muestra a continuación.

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP= Índice de plasticidad

LL= Límite líquido

LP= Límite plástico

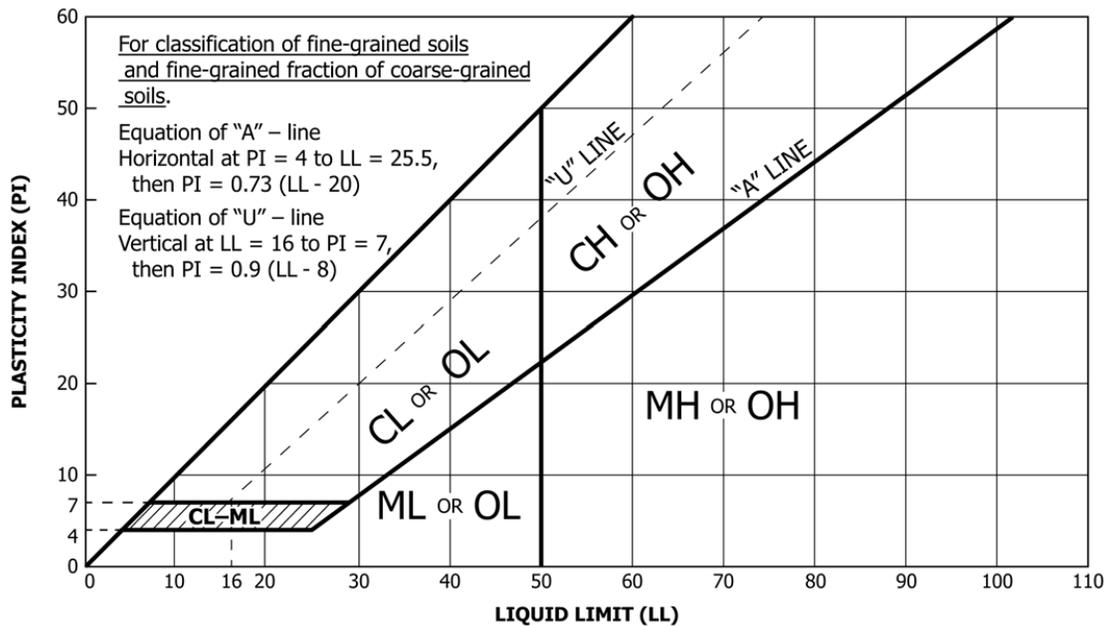
**Tabla 2** Grado de Plasticidad del Suelo

IP	Descripción
0-3	No Plástico
3-15	Ligeramente Plástico
15-30	Baja Plasticidad
>30	Alta Plasticidad

Fuente: (Sowers, 1979)

## GRÁFICO DE PLASTICIDAD

Casagrande (1932), estudio la relación que existe entre el índice de plasticidad y el límite líquido para una gran variedad de suelos y construyó el grafico de plasticidad representada en la Ilustración 7, en la cual las distintas variedades de suelo se agrupan ordenadamente en distintos sectores del gráfico. Las ecuaciones de las líneas que dividen el grafico en las regiones donde se agrupan los distintos tipos de suelos se las obtuvo empíricamente.



**Ilustración 7** Carta de Plasticidad

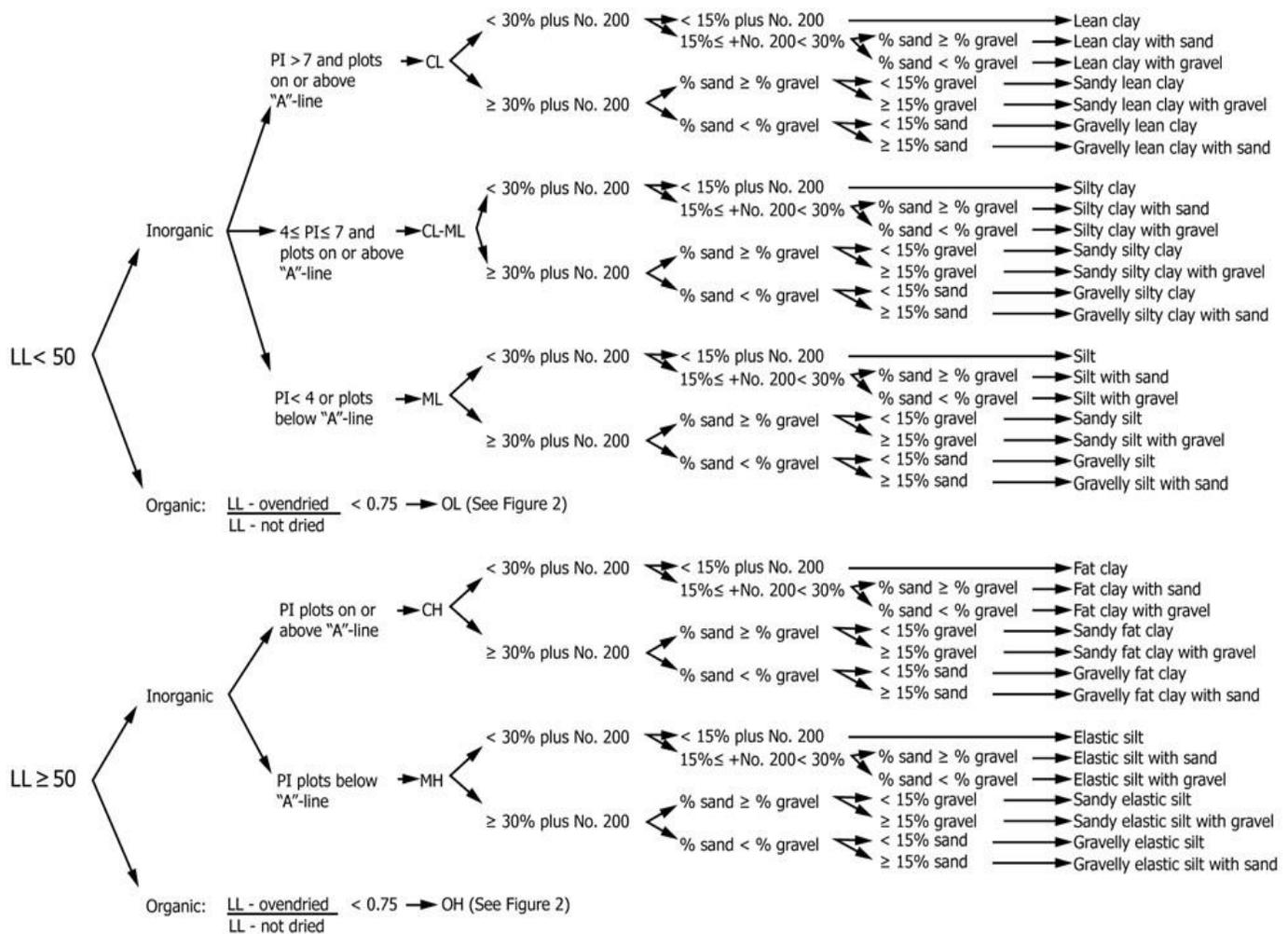
Fuente: Casagrande (1932)

La norma ASTM D2487-17 clasifica los suelos en categorías que representan los resultados de pruebas de laboratorio prescritas para determinar las características mediante el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, estableciendo la asignación de un nombre del grupo y símbolo correspondiente a la carta de plasticidad establecido por Casagrande (1932), todas las agrupaciones de este Sistema de clasificación son ideadas para correlacionarse de manera general con el comportamiento técnico del suelo (ASTM D2487-17, 2011).

**Tabla 3** Tabla de Clasificación de suelos

Criteria for Assigning Group Symbols and Group Names Using Laboratory Tests <sup>A</sup>				Soil Classification		
				Group Symbol	Group Name <sup>B</sup>	
COARSE-GRAINED SOILS	Gravels (More than 50 % of coarse fraction retained on No. 4 sieve)	Clean Gravels (Less than 5 % fines <sup>C</sup> )	$Cu \geq 4.0$ and $1 \leq Cc \leq 3.0^D$	GW	Well-graded gravel <sup>E</sup>	
			$Cu < 4.0$ and/or $[Cc < 1 \text{ or } Cc > 3.0]^D$	GP	Poorly graded gravel <sup>E</sup>	
		Gravels with Fines (More than 12 % fines <sup>C</sup> )	Fines classify as ML or MH	GM	Silty gravel <sup>E,F,G</sup>	
	More than 50 % retained on No. 200 sieve			Fines classify as CL or CH	GC	Clayey gravel <sup>E,F,G</sup>
		Sands (50 % or more of coarse fraction passes No. 4 sieve)	Clean Sands (Less than 5 % fines <sup>H</sup> )	$Cu \geq 6.0$ and $1.0 \leq Cc \leq 3.0^D$	SW	Well-graded sand <sup>I</sup>
				$Cu < 6.0$ and/or $[Cc < 1.0 \text{ or } Cc > 3.0]^D$	SP	Poorly graded sand <sup>I</sup>
	Sands with Fines (More than 12 % fines <sup>H</sup> )	Fines classify as ML or MH	SM	Silty sand <sup>F,G,I</sup>		
			Fines classify as CL or CH	SC	Clayey sand <sup>F,G,I</sup>	
FINE-GRAINED SOILS	Silts and Clays	inorganic	$PI > 7$ and plots on or above "A" line <sup>J</sup>	CL	Lean clay <sup>K,L,M</sup>	
			$PI < 4$ or plots below "A" line <sup>J</sup>	ML	Silt <sup>K,L,M</sup>	
	50 % or more passes the No. 200 sieve		organic	$\frac{\text{Liquid limit - oven dried}}{\text{Liquid limit - not dried}} < 0.75$	OL	Organic clay <sup>K,L,M,N</sup> Organic silt <sup>K,L,M,O</sup>
		Silts and Clays	inorganic	PI plots on or above "A" line	CH	Fat clay <sup>K,L,M</sup>
				PI plots below "A" line	MH	Elastic silt <sup>K,L,M</sup>
				organic	$\frac{\text{Liquid limit - oven dried}}{\text{Liquid limit - not dried}} < 0.75$	OH
HIGHLY ORGANIC SOILS	Primarily organic matter, dark in color, and organic odor			PT	Peat	

Fuente: (ASTM D2487-17)



**Ilustración 8** Diagrama de flujo para clasificar los suelos de grano fino (50% o más pasa el tamiz No. 200)

Fuente: (ASTM D2487-17)

## ARCILLAS EXPANSIVAS

Las arcillas expansivas presentan inestabilidad al entrar en contacto con el agua. Debido a su estructuración de acuerdo con condiciones de origen, composición química o propiedades físicas; la variación volumétrica que sufre con el aumento de líquido es considerable haciendo que este se hinche, y en caso de que haya estructuras sobre estos suelos, la expansividad de estos haría que la estructura se fracture, incluso pueda colapsar (Buitrón & Enríquez, 2018).



*Ilustración 9 Daños estructurales por arcillas expansivas*

Existen tres tipos de minerales principales de la formación básica de estas arcillas:

**Caolinitas.** Producidas por la unión de una lámina silícica y aluminica, la unión de sus retículas no permite el paso de moléculas de agua, lo cual hace que estas arcillas sean estables ante el agua.

**Montmorillonita.** Formadas por la superposición una lámina aluminica y dos silícicas, por su unión débil entre retículas hace que el agua penetre fácilmente; estas arcillas sufren de una fuerte expansión.

**Ilitas.** Similares a las montmorillonitas en estructuración, pero forman grupos en presencia de potasio lo cual hace que estas no sean tan expansivas (Delgado, 1986).

Las arcillas, básicamente son aluminosilicatos que no solo son expansivos debido a su estructura química, sino además por la presencia de los minerales mencionados, por ejemplo, las montmorillonitas que permite mayores índices de hinchamiento. Los mecanismos que producen la expansión de las arcillas, Delgado, 1986 son:

- a) Hidratación de las partículas de arcilla
- b) Hidratación de los cationes
- c) Repulsión osmótica

## POTENCIAL DE EXPANSIÓN DE LOS SUELOS

Estudios coinciden que cuando los índices de plasticidad de un suelo son mayores a 35% y el límite líquido mayor al 60% estos suelos son altamente expansivos.(Ordoñez et al., 2015)

El termino suelos expansivos, implica no solamente la tendencia a aumentar el volumen cuando su contenido de agua aumenta sino también su contracción cuando existe pérdida de humedad, hay que tomar en cuenta que la contracción es simplemente el proceso inverso.

El potencial expansivo de un suelo está relacionado con el índice de plasticidad, la tabla 4 señala varios grados de capacidad expansiva entre intervalos del índice de plasticidad calculados en laboratorio (Arancibia, 2003).

*Tabla 4 Relación entre la expansión del suelo y el índice de plasticidad*

<b>Potencial de Expansión</b>	<b>Índice de Plasticidad</b>
<b>Bajo</b>	0-15
<b>Medio</b>	10-35
<b>Alto</b>	20-35
<b>Muy Alto</b>	35 o mas

*Fuente: (Arancibia, 2003).*

## EFFECTOS DE LAS ARCILLAS EN LAS CONSTRUCCIONES

Varios son los efectos que producen las arcillas expansivas en las construcciones, tales como:

- Alteraciones en los procesos constructivos, debido al drenaje, la susceptibilidad a las variaciones meteorológicas
- Agrietamiento debido al constante cambio de clima, ya absorben agua y se hinchan y al secarse estas se agrietan. Afectando así a la durabilidad y estabilidad del suelo

- No se puede predecir con exactitud la resistencia de este suelo, debido a los cambios entre su estado húmedo y seco.
- En las cimentaciones producen deformaciones plásticas
- Por su baja permeabilidad no se puede eliminar el exceso de humedad, lo que generaría consolidación o movimientos diferidos (Buitrón & Enríquez, 2018).

## **LÍMITE DE CONTRACCIÓN**

Es el contenido máximo de agua por debajo del cual un secado adicional no causa disminución del volumen de la muestra tomada del suelo, pero al incremento del contenido de agua si produce cambios en su volumen.

Dada la cantidad de volumen de agua estos cambian en sus estados de consistencia los cuales son; sólido, semisólido, plástico semilíquido y líquido.

A partir de este ensayo es posible conocer la relación de contracción, que relaciona un cambio específico de volumen y el cambio correspondiente en su contenido de agua por encima del límite de contracción expresado en porcentaje (Peña & Dumar, 2020).

La muestra tomada para este ensayo deberán ser material que pase el tamiz # 40; conocer el límite de contracción nos permite comprender el comportamiento del suelo al momento que este pierde humedad generando cambios volumétricos, particularmente expansión y contracciones que provocan agrietamientos y fisuras (Guillén, 2016).



*Ilustración 10 Ensayo de Límite de Contracción*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

## **SUCCIÓN EN SUELOS NO SATURADOS**

El termino succión del suelo representa la deficiencia de presión en el agua de poros de algunos suelos saturados o no saturados que tienen la capacidad de absorber agua a presión atmosférica, el termino potencial de succión hace referencia al estado de tensiones de superficies capaces de retener agua dentro de la estructura del suelo (Hernández, 2006).

### **SUCCIÓN MATRICIAL**

Se define como la diferencia de presión entre la presión de aire de poros ( $ua$ ) y la presión de agua de los poros ( $uw$ ).

$$Sm = ua - uw$$

La succión matricial está asociada a los efectos de las presiones formadas en el menisco capilar y absorción del suelo producto de las fuerzas ejercidas en las superficies de las partículas, por lo que su valor depende del tamaño de las partículas, del tamaño de los poros y del grado de saturación (Carrasco, 2017).

Se detalla los resultados del ensayo realizado tanto para las probetas inalteradas como las probetas alteradas con diferentes dosificaciones de polvo de vidrio y diferentes contenidos de

humedad, usando la calibración disponible en la ASTM D 5298 -16 para papel Whatman N. 42 la cual se presenta en la siguiente ecuación.

$$h = mw_f + b$$

Donde:

$h$ = presión del suelo, en  $\log_{10}kPa$

$m$ = pendiente de la curva de calibración del papel filtro, en  $\log_{10}kPa/\%$

$W_f$ = contenido de agua en papel filtro en %

$b$ = valor de intersección de la curva de calibración del papel filtro en  $\log_{10}kPa$  (Carrasco, 2017).

Curva de calibración para papel filtro Whatman N° 42 (ASTM D5298)

**Tabla 5** Valores de calibración para papel filtro Whatman N° 42

<b>Curva de calibración</b>		
<b>Humedad</b>	<b>m</b>	<b>b</b>
<b>&lt; 45,3</b>	-0,0779	5,327
<b>&gt; 45,3</b>	-0,0135	2,412

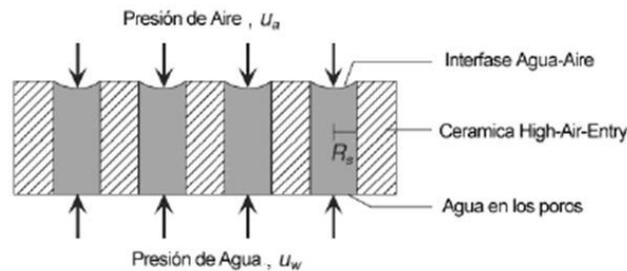
*Fuente: (ASTM D5298)*

## **MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA SUCCIÓN MATRICIAL DEL SUELO**

Existen métodos directos e indirectos para calcular la succión matricial del suelo.

## Métodos directos

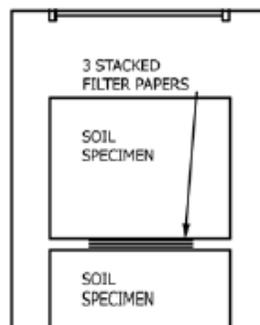
El método directo más utilizado para calcular la succión matricial son los tensiómetros y la técnica de traslación de ejes, estos métodos utilizan placas o discos cerámicos con un alto valor de entrada de aire, los cuales son materiales que presentan microporos de tamaños y distribución relativamente uniformes (Meza, 2012).



*Ilustración 11* Medición de la succión matricial con discos de alto valor de entrada de aire

## Métodos indirectos

El método indirecto más utilizado y empleado en este proyecto de investigación para medir la succión matricial es el método del papel filtro en contacto con el suelo, este ensayo aplica la transferencia de humedad del suelo hacia el papel filtro que es controlada por la capilaridad y por las fuerzas de adsorción superficial de las partículas, por lo tanto, la succión medida corresponde a la componente matricial de la succión (Meza, 2012).



*Ilustración 12* Esquema de colocación de papel filtro

Fuente: (ASTM D5298–16, 2016)

## ESTABILIZACIÓN DE LAS ARCILLAS EXPANSIVAS

La estabilización de un suelo es el proceso por el cual, con la ayuda de componentes orgánicos, químicos o mecánicos se pretende mejorar las propiedades del suelo. Entre ellos tenemos:

- Aditivos que retienen humedad
- Aditivos resistentes a la humedad
- Mezcla de suelo cemento
- Cal y cemento
- Agentes dispersantes
- Polvo de vidrio (Ordoñez et al., 2015)

### POLVO DE VIDRIO RECICLADO

Para la estabilización de arcillas expansivas Olufowobi et al., 2014, propone el uso de polvo de vidrio reciclado para mejorar el rendimiento del suelo, el vidrio es completamente inerte y por lo tanto no biodegradable, la mayor parte del vidrio está compuesto por dióxido de silicio, óxido de sodio y óxido de calcio.



*Ilustración 13 Trituración de botellas de vidrio*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

## **CAPITULO II**

### **METODOLOGÍA**

#### **2.1. Características de la investigación**

##### **2.1.1. Nivel de investigación**

La siguiente investigación es de nivel descriptivo, ya que se detallará paso a paso el proceso de las pruebas de laboratorio aplicadas en el suelo estudiado. Observando y detallando el comportamiento que tiene el suelo mientras se aplican porcentajes de 3, 5 y 7% de polvo de vidrio por muestra de suelo.

##### **2.1.2 Diseño de la investigación**

Esta investigación tiene un diseño experimental, debido a la aplicación de ensayos técnicos en laboratorio realizado a las diferentes muestras de suelo extraídas del cantón Rocafuerte añadiendo porcentajes de polvo de vidrio.

#### **2.2. Técnicas, instrumentos y procedimientos para recolección de datos**

##### **2.2.1. Técnicas**

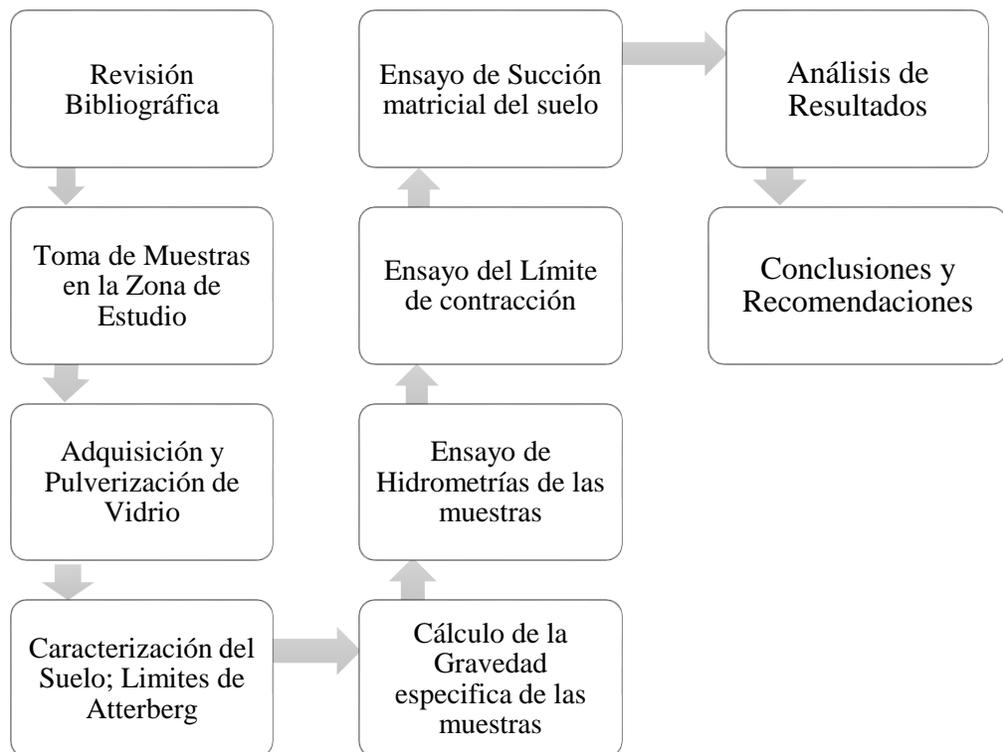
Las normas aplicadas para el desarrollo del proyecto son Normas: ASTM D4318-17 (Standard Test Methods for Liquid, Limit, Plastic, and Plasticity Index of Soils); ASTM D2487-17 (Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)); ASTM D854-14 (Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer); ASTM D 7928-17 (Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis); ASTM D 427-04 (Standard Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method) y ASTM D 5298-16 (Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper)

### 2.2.2 Instrumentos

Los instrumentos para la recolección de las calicatas de arcilla fueron herramientas básicas como: palas, picos y barras de acero. En cuanto a los instrumentos de laboratorio se usarán los detallados en las normas en las que se basa la investigación, además se verifico que estos estén correctamente calibrados para evitar errores de precisión.

### 2.2.3. Procedimiento

A continuación, se detalla un cuadro del proceso que se realizara para cumplir los objetivos de este proyecto de investigación



*Ilustración 14* Cuadro de procesos de la investigación

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

## A. Revisión Bibliográfica

Como punto de partida se realiza una revisión bibliográfica a través de los buscadores académicos disponibles tales como: Google Scholar, Scopus, Elseiver y la base de datos universitarias como D-Space. La información se deputará en base a parámetros específicos y que abarquen ensayos de caracterización del suelo, granulometría por hidrómetro, ensayos de succión matricial, límite de contracción e influencia de estabilizantes en arcillas expansivas.

## B. Toma de Muestras en la Zona de Estudio

Se tomó calicatas de suelo no inalteradas en la provincia de Manabí en el cantón Rocafuerte en las coordenadas Latitud  $0^{\circ}55'37''S$  y Longitud  $80^{\circ}28'48''W$ , para la muestra M y coordenadas Latitud  $0^{\circ}54'59''S$  y Longitud  $80^{\circ}25'56''W$ , para la muestra HM. Con la ayuda de herramientas manuales se extrajeron dichas calicatas inalteradas que cuidadosamente se transportaron y protegieron para evitar la pérdida de sus propiedades naturales y evitar contaminaciones externas.



*Ilustración 15 Extracción de muestras de suelo*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

### **C. Adquisición y Pulverización de Vidrios**

Se recolectaron botellas de vidrios, se las lavo para evitar contaminantes externos como materia orgánica, o inorgánica, aceites y otros agentes. Limpias y secas las botellas se pulverizaron con la ayuda de la máquina de abrasión hasta conseguir su máxima desintegración para posteriormente con la ayuda del tamiz No 200 recoger su pasante y así obtener el polvo de vidrio necesario para esta investigación.



*Ilustración 16 Polvo de vidrio reciclado  
Elaborado por: Elvis Huaraca*

### **D. Caracterización del suelo: Límites de Atterberg**

Se realizaron los ensayos para de determinar los limites líquidos, limites plásticos e índice plástico, de las muestras de suelo inalteradas y alteras de las muestras M y HM tomadas del cantón Rocafuerte, para determinar las variaciones que presenta el suelo a distintas humedades y porcentajes de vidrio.



*Ilustración 17 Ensayos de Límites de Atterberg  
Elaborado por: Elvis Huaraca*

## E. Gravedad específica de los sólidos

Se calcula la gravedad específica de los sólidos en base a la norma ASTM D 854-14.

El proceso para dicho ensayo se detalla a continuación:

1. Se determina la masa del matraz para lo cual debe estar limpio y seco tanto externa como interiormente.
2. Anotar y etiquetar el número del matraz.
3. Llenar el matraz con agua desairada hasta la marca del aforo, verificando que no existan burbujas de aire atrapado en la masa.
4. Inmediatamente tomar la lectura de la temperatura del agua del matraz con la ayuda de un termómetro.
5. Con los datos de la masa del matraz y la temperatura del agua se prepara una tabla de valores que permita graficar una curva de calibración del matraz.



*Ilustración 18* Ensayo de Gravedad Específica

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

## **F. Granulometría del Suelo vía Hidrómetro.**

Se realizó la granulometría vía hidrómetro del suelo usando la norma (ASTM D7928, 2021). El proceso para dicho ensayo se resume a continuación:

1. Se elaborará solución defloculante (Hexametafosfato de sodio) 15 días previos a la realización del ensayo. Y un día antes del ensayo se colocará la muestra en 125 ml de esta solución.
2. El día del ensayo, utilizando un agitador mecánico se coloca la muestra evitando perder partículas y se lo agita por un minuto.
3. Realizado esto, se coloca la muestra en una probeta y con agua destilada completamos el volumen de aproximadamente 1lt, se agita con la ayuda de un agitador manual o tapando completamente con la palma de la mano y revolviendo la probeta por 1 minuto, evitando, asimismo, pérdida de partículas; esto con el fin de que las partículas que se encuentran en el fondo suban. Terminado el proceso, se completa el volumen de un litro con agua destilada
4. Después del proceso, 1 minuto transcurrido, se coloca el hidrómetro en el centro de la probeta sin tocar las paredes y se toma la primera lectura (por arriba del menisco) además de la temperatura del agua de la probeta.
5. Este proceso se repite de acuerdo con los tiempos establecidos en la norma:

<b>Tiempo</b>
<b>1 minuto</b>
<b>2 minutos</b>
<b>5 minutos</b>
<b>8 minutos</b>
<b>15 minutos</b>

---

**30 minutos**

---

**60 minutos**

---

**120 minutos**

---

**240 minutos**

---

**1440 minutos**

---

6. Al día siguiente en una probeta se coloca 125 ml de defloculante y completamos 1 litro con agua destilada. Se toma la lectura con el hidrómetro por abajo del menisco y también la temperatura. Esto se realiza con el fin de realizar las correcciones correspondientes de menisco, temperatura y por defloculante.
7. La muestra principal que contiene el suelo, tomada la última lectura se coloca en un recipiente, y limpiando con agua destilada la probeta para asegurar que toda la muestra esté en el recipiente. Este recipiente se coloca en el horno por  $24 \text{ h} \pm 2 \text{ h}$ .



*Ilustración 19 Ensayo de Granulometría por Hidrómetro*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

## G. Límite de Contracción

Se determina el límite de contracción en base a la norma ASTM D 427-04, detallando su proceso a continuación:

1. La muestra de suelo se mezcla con agua destilada suficiente para llenar completamente los vacíos del suelo y darle una consistencia pastosa, como para que pueda ser fácilmente colocada en el recipiente para contracción, es indispensable usar la menor cantidad de agua posible para llevar a la muestra a la consistencia adecuada con el fin de evitar el agrietamiento durante el proceso de secado.
2. Revestir el interior del recipiente para contracción con una capa delgada de vaselina para evitar la adhesión del suelo al recipiente.
3. Para determinar el volumen del recipiente de contracción se utiliza mercurio para determinar el volumen exacto del recipiente y por ende el volumen de la muestra de suelo, cabe mencionar que se debe utilizar todas las medidas de protección personal para el manejo del mercurio.
4. Una vez seca la muestra de suelo se debe rebosar el recipiente con mercurio para determinar la contracción que tuvo el suelo durante su periodo de secado al aire.
5. El volumen de mercurio desplazado por la pastilla de suelo hacia la vasija de evaporación se mide en la probeta graduada y se anota como el volumen de suelo seco ( $V_0$ ) o, alternativamente, determinando la masa del mercurio con aproximación a 0.1 g y calculando el volumen, usando la fórmula  $V_0=M/D$ , donde M es la masa de mercurio desplazada, en gramos, y  $D=13.55 \text{ g/cm}^3$  (densidad del mercurio).



*Ilustración 20 Ensayo de Límite de Contracción*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

## **H. Ensayo de Succión matricial del Suelo**

Se determinará el potencial de succión matricial de los suelos analizados en base a la norma ASTM D 5298-16 cuyo proceso de detalla a continuación.

1. 16 horas previas al ensayo se colocarán los papeles filtro en el horno para secarlos.
2. Transcurridas las horas de secado, se coloran los papeles filtro en la cámara desecador para mantenerlos antes del ensayo.
3. Se realizarán pastillas de las muestras de suelo a analizar a la humedad natural, según muestra la siguiente tabla:

*Tabla 6 Pastillas y números de especímenes*

<b>Etiqueta</b>	<b>% de polvo de vidrio</b>	<b>Numero de especímenes</b>
<b>Muestra M</b>	0%	3
	3%	3
	5%	3
	7%	3
<b>Muestra HM</b>	0%	3
	3%	3
	5%	3
	7%	3

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

4. En un recipiente, que se pueda sellar herméticamente, se colocara una de las pastillas; posteriormente se colocaran 3 papeles filtro con mucho cuidado (el filtro del centro tendrá menor diámetro al de los extremos) y finalmente se colocara otra pastilla. Se sellará el recipiente y se lo colocará en una cámara de temperatura controlada
5. Se realizará el mismo procedimiento para todos los especímenes y se almacenaran por 7 días.
6. Finalizado el periodo de equilibrio de las muestras, se pesarán los papeles filtro del centro con ayuda de una balanza cuya precisión en gramos sea al millonésimo decimal. (ASTM D5298–16, 2016)



*Ilustración 21 Papeles Filtro Whatman 42*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*



*Ilustración 22 Muestras para el ensayo de succión matricial  
Elaborado por: Elvis Huaraca*

### **CAPITULO III**

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **3.1 RESULTADOS**

#### **GEOGRAFÍA Y UBICACIÓN DE MUESTRO**

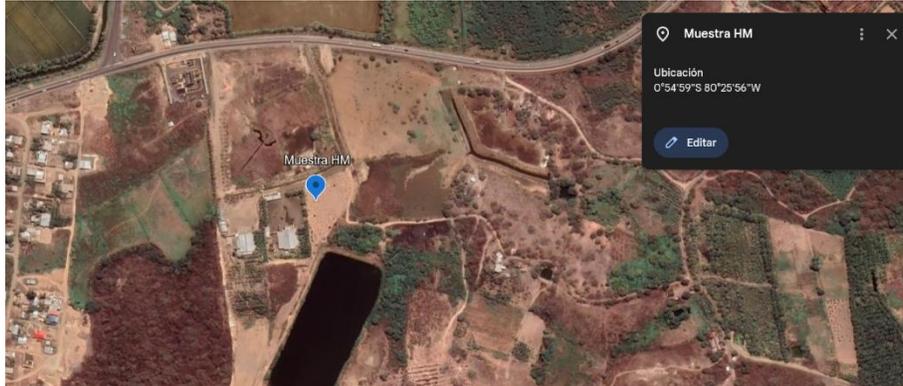
El área de muestro para este proyecto de investigación se centra en el Litoral Ecuatoriano en la Provincia de Manabí, cantón Rocafuerte donde se extrajeron dos muestras denominadas Muestra M y Muestra HM.

El primer sector de muestreo (Muestra M), se extrajo del cantón Rocafuerte situado en la parte occidental del territorio ecuatoriano parte central de la provincia de Manabí, a una altitud de 29 m.s.n.m. con coordenadas: Latitud  $0^{\circ}55'37''S$  y Longitud  $80^{\circ}28'48''W$ .



*Ilustración 23 Coordenadas de extracción Muestra M  
Fuente: Google Earth*

El segundo sector de muestreo (Muestra HM) se extrajo del cantón Rocafuerte situado en la parte occidental del territorio ecuatoriano parte central de la provincia de Manabí, a una altitud de 23 m.s.n.m. con coordenadas: Latitud 0°54'59"S y Longitud 80°25'56"W.



*Ilustración 24* Coordenadas de extracción Muestra HM

*Fuente:* Google Earth

*Tabla 7* Nombre y Ubicación de muestras

<b>Muestra</b>	<b>Etiqueta</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud</b>
<b>Número 1</b>	M	0°55'37"S	80°28'48"W	29 m.s.n.m.
<b>Número 2</b>	HM	0°54'59"S	80°25'56"W	23 m.s.n.m.

*Elaborado por:* Elvis Huaraca

## CONTENIDO DE HUMEDAD

Es uno de los ensayos utilizados con más frecuencia en laboratorio por su rápida ejecución y a la vez permite determinar ciertas características mecánicas del suelo y así poder relacionarlas con los resultados de otros ensayos aplicados en esta investigación.

El contenido de humedad define el estado actual del suelo a estudiar; se define como la relación entre el peso de agua contenido en una muestra y el peso seco de la misma, todo esto expresado en porcentaje.

$$W = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

Donde:

$W$  = contenido de humedad en %

$Ww$  = peso de agua contenido en la muestra

$Ws$  = peso seco de la muestra

Para la realización de las muestras M y HM, se utiliza la norma ASTM D 2216-10.

*Tabla 8 Contenido de humedad muestras inalteradas*

<b>Muestra</b>	<b>Prueba</b>	<b>W (%)</b>
<b>No.1</b>		
<b>M</b>	1	28,04
<b>HM</b>	1	26,88

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

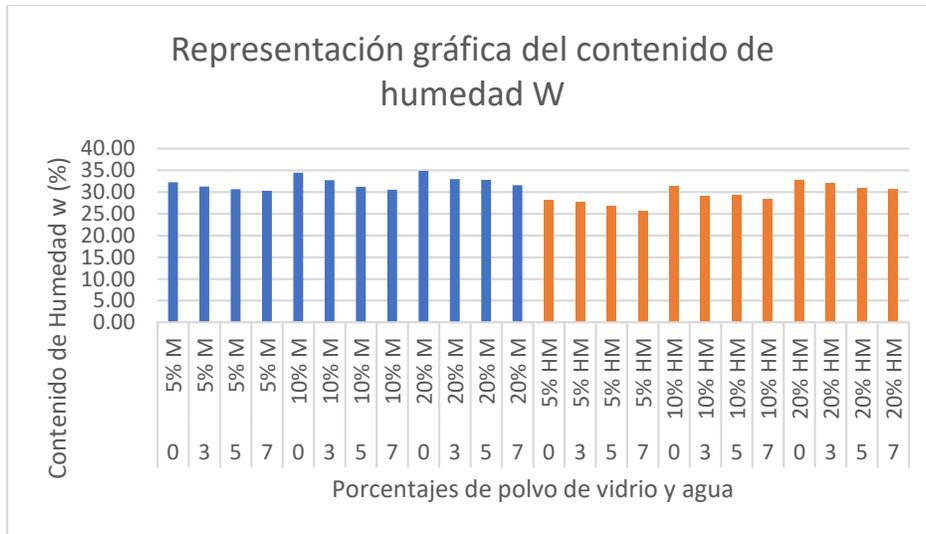
Para los contenidos de humedad de las siguientes muestras se utilizó las diferentes dosificaciones de polvo de vidrio, para observar los cambios e influencia que tiene el polvo de vidrio en el contenido de humedad del suelo a distintas humedades trabajadas en laboratorio.

*Tabla 9 Contenidos de humedad muestras alteradas en laboratorio*

<b>Probeta</b>	<b>Peso Cápsula</b>	<b>Peso Cápsula + Ww</b>	<b>Peso Cápsula + Ws</b>	<b>% de polvo de vidrio</b>	<b>Variaciones de humedad en muestras</b>	<b>Contenido de Humedad W (%)</b>
<b>1</b>	46,16	53,72	51,28	0	5% M	32,23
<b>2</b>	46,68	56,95	53,74	3	5% M	31,27
<b>3</b>	46,04	56,53	53,31	5	5% M	30,67
<b>4</b>	48,75	57,06	54,54	7	5% M	30,26
<b>5</b>	48,83	59,08	55,55	0	10% M	34,41

<b>6</b>	48,06	55,54	53,09	3	10% M	32,73
<b>7</b>	44,58	56,26	52,61	5	10% M	31,23
<b>8</b>	46,42	57,22	53,93	7	10% M	30,52
<b>9</b>	49,82	57,62	54,90	0	20% M	34,87
<b>10</b>	46,33	55,43	52,43	3	20% M	32,96
<b>11</b>	41,67	50,95	47,91	5	20% M	32,77
<b>12</b>	43,52	52,99	50,00	7	20% M	31,55
<b>13</b>	46,21	56,02	53,27	0	5% HM	28,05
<b>14</b>	44,99	56,38	53,21	3	5% HM	27,77
<b>15</b>	48,83	59,30	56,49	5	5% HM	26,87
<b>16</b>	45,52	57,41	54,38	7	5% HM	25,53
<b>17</b>	48,38	62,76	58,23	0	10% HM	31,45
<b>18</b>	47,15	66,62	60,96	3	10% HM	29,04
<b>19</b>	48,06	67,49	61,80	5	10% HM	29,27
<b>20</b>	44,69	60,40	55,95	7	10% HM	28,36
<b>21</b>	42,07	53,15	49,51	0	20% HM	32,81
<b>22</b>	46,44	59,83	55,55	3	20% HM	31,99
<b>23</b>	43,66	56,60	52,60	5	20% HM	30,96
<b>24</b>	48,70	59,16	55,95	7	20% HM	30,72

*Elaborado por: Elvis Huaraca*



*Ilustración 25* Gráfico de barras de las muestras a diferentes humedades y dosificaciones de polvo de vidrio

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

Como se evidencia el contenido de humedad W aumenta por cada porcentaje de agua que se le agrego al suelo natural tanto en la muestra M y HM; pero a la vez estos porcentajes de contenido de humedad bajan proporcionalmente por cada dosificación de polvo de vidrio agregado a cada muestra a diferentes humedades.

### **SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)**

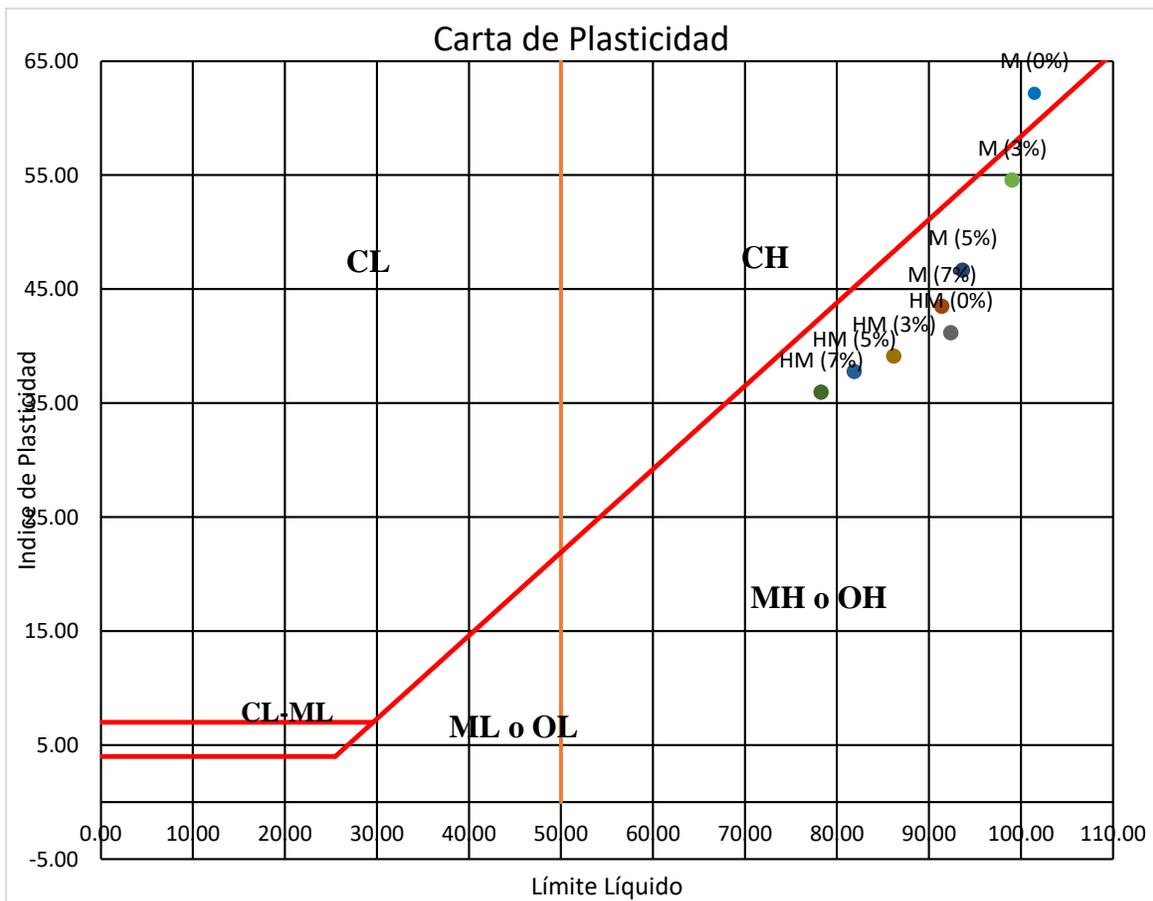
Para realizar la clasificación del suelo extraído y llevado a laboratorio se emplea el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) basada en la norma (ASTM D2487-17, 2011).

Se realizó el ensayo de Límites de Atterberg establecida en la norma (ASTM D4318 & ASTM D 4318-10, 2005) para caracterizar la consistencia del suelo fino con distintos porcentajes de polvo de vidrio obteniendo los siguientes resultados.

*Tabla 10 Índice plástico de las muestras*

Muestra	% de polvo de vidrio	LL (%)	LP (%)	IP (%)
M	0	101,47	39,29	62,18
M	3	99,05	44,47	54,57
M	5	93,67	47,00	46,67
M	7	91,40	47,92	43,49
HM	0	92,39	51,22	41,17
HM	3	86,19	47,07	39,12
HM	5	81,88	44,11	37,78
HM	7	78,30	42,34	35,96

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

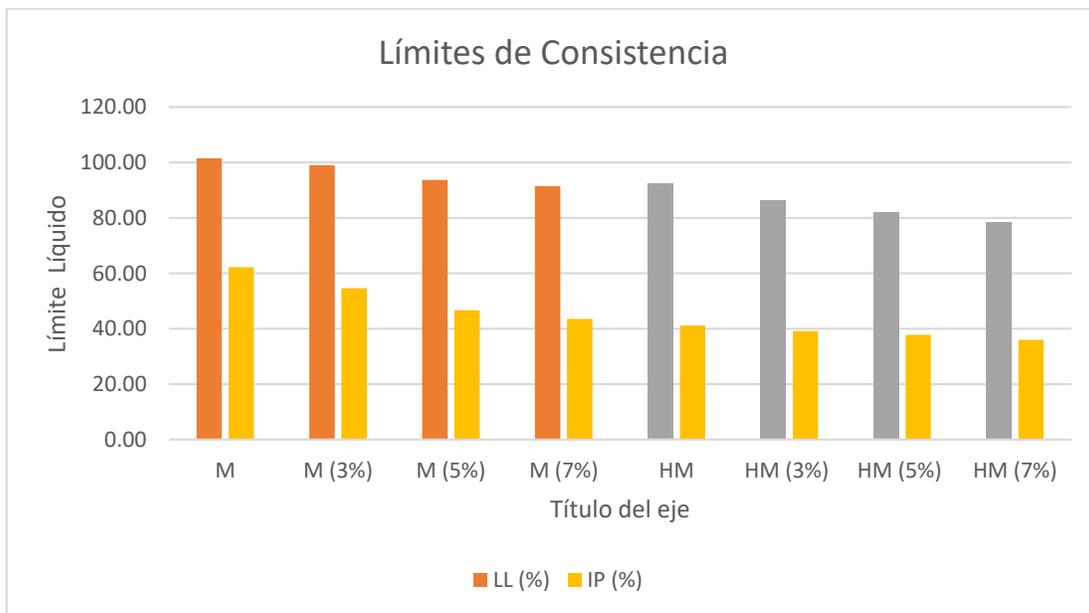


*Ilustración 26 Clasificación SUCS de las muestras M y HM*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

Mediante la clasificación de suelos S.U.C.S se pudo determinar que las muestra M correspondiente al suelo inalterado se clasifica como una arcilla de alta plasticidad (CH), debido a que su límite líquido e índice plástico se ubican en la parte superior de la línea A de la carta de plasticidad; para las muestras alteradas con porcentajes de vidrio del 3,5 y 7 % se clasifican en base a la Ilustración 8; dichas muestras alteradas presentan un límite líquido  $\geq 50$  lo que las clasifica como limos de alta plasticidad (MH), ubicadas por debajo de la Línea A de las carta de plasticidad de Casagrande.

Para la muestra inalterada HM mediante la clasificación de suelos S.U.C.S se encuentra por debajo de la línea A, y presentan un Limite Liquido  $\geq 50$  clasificándolo como un limo de alta plasticidad (MH), así mismo las muestras alteradas con polvo de vidrio se encuentran en la mismas zona pero mucho más abajo que la muestra inalterada dando a notar el cambio y disminución en los límites líquidos e índice plástico al combinarlas con los porcentajes de polvo de vidrio como se observa en la Tabla 10 e Ilustración 27.



**Ilustración 27** Reducción de los Límites de Consistencia añadiendo porcentajes de polvo de vidrio

Elaborado por: Elvis Huaraca.

## GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS DEL SUELO POR PICNÓMETRO

La gravedad específica (Gs), se define como la relación entre el peso y el volumen de las partículas sólidas de la muestra de suelo.

Los valores típicos para la gravedad específica (Gs), se encuentran asociados a los valores de los minerales constituyentes de la fase sólida del suelo; dichos valores son para Gravas (2.65 a 2.68), Arenas (2.65 a 2.68), Limos (2.66 a 2.70) y Arcillas (2.68 a 2.80) (D. Escobar et al., 2016)

La norma técnica utilizada para el desarrollo del ensayo es la norma (ASTM D854-14, 2000) (Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer)

*Tabla 11 Gravedad específica calculadas en laboratorio*

<b>Gravedad específica calculada en laboratorio</b>		
<b>Muestra</b>	<b>Gs</b>	<b>Unidad</b>
<b>M</b>	2,747	gr/cm <sup>3</sup>
<b>HM</b>	2,696	gr/cm <sup>3</sup>
<b>Polvo de vidrio</b>	2,459	gr/cm <sup>3</sup>

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

Los valores obtenidos en laboratorio se encuentran en los rangos especificados en normativa, estos valores de gravedad específica serán de gran importancia para el desarrollo del ensayo de granulometría vía hidrómetro.

## GRANULOMETRÍA VÍA HIDRÓMETRO

Este método de ensayo se utiliza para los suelos con un gran porcentaje de fracciones de suelo finos que pasen el tamiz No.200, se fundamenta en la ley de Stokes que hace referencia a la velocidad de sedimentación gravitacional de las partículas en un fluido (Valencia & Huertas, 2018).

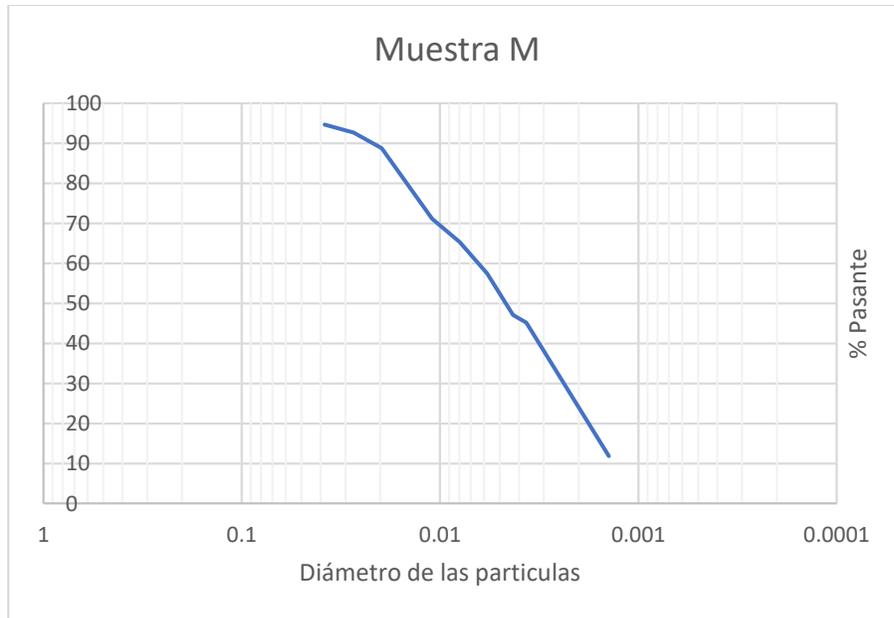
Este método es aplicable para las partículas de suelo dentro del rango de tamaño de 0.1mm y 0.001 mm; este ensayo deja sedimentar gravitacionalmente una muestra agua/suelo dentro de una probeta y con la ayuda del Hidrómetro 152 H, se toman lecturas a distintos intervalos de tiempo para medir valores de densidad en los diferentes tiempos de lectura del hidrómetro.

Para la realización del ensayo se utiliza la norma ASTM D7928-17 (Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis)

*Tabla 12 Resultados de Hidrometría Muestra M*

<b>Muestra M</b>	
<b>Diametro (mm)</b>	<b>PMF (%)</b>
<b>0,038189531</b>	94,6539623
<b>0,027272729</b>	92,6970889
<b>0,019659158</b>	88,7833423
<b>0,01097998</b>	71,1714825
<b>0,007949611</b>	65,3008625
<b>0,005791578</b>	57,4733693
<b>0,004281567</b>	47,1019407
<b>0,003675819</b>	45,1450674
<b>0,001407197</b>	11,878221

*Elaborado por: Elvis Huaraca*



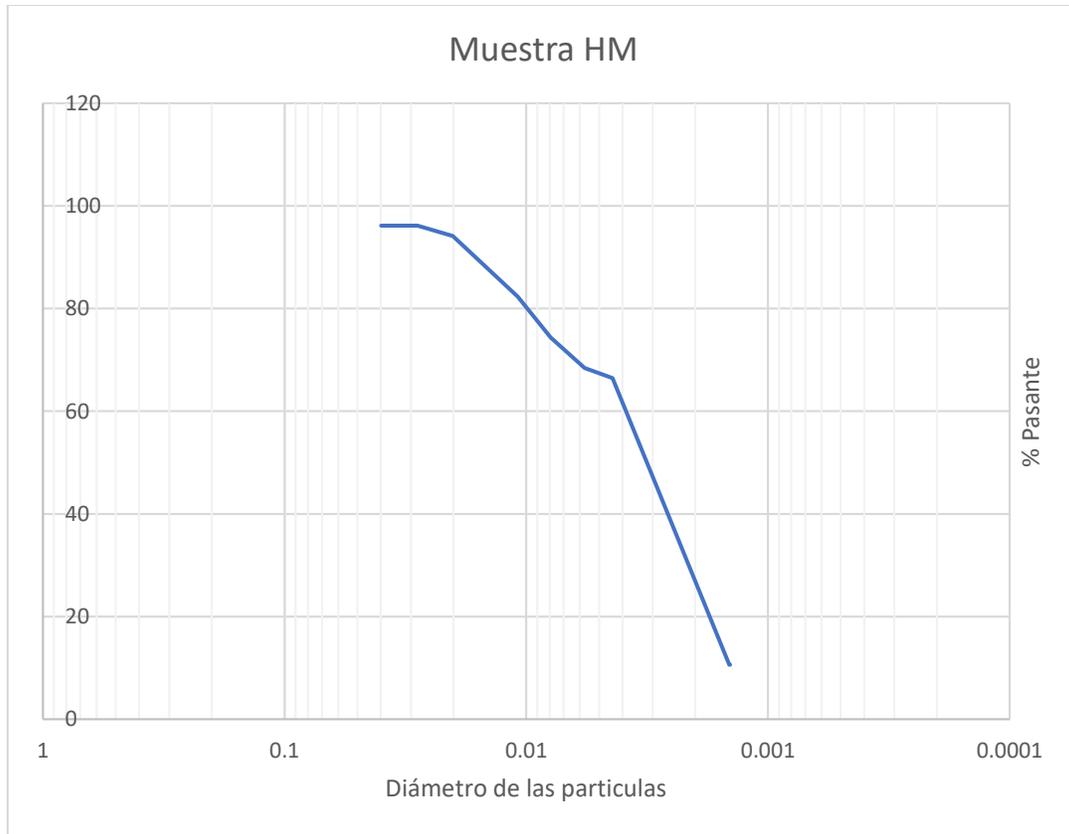
**Ilustración 28** Curva Granulométrica Muestra

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

**Tabla 13** Resultados de hidrometría Muestra HM

<b>Muestra HM</b>	
<b>Diametro (mm)</b>	<b>PMF (%)</b>
<b>0,03983248</b>	96,1457761
<b>0,02816581</b>	96,1457761
<b>0,02011517</b>	94,166246
<b>0,0108256</b>	82,2890655
<b>0,00791976</b>	74,3709452
<b>0,00573659</b>	68,4323549
<b>0,00439127</b>	66,4528248
<b>0,00144415</b>	10,6300765
<b>0,00143438</b>	10,6300765

*Elaborado por: Elvis Huaraca*



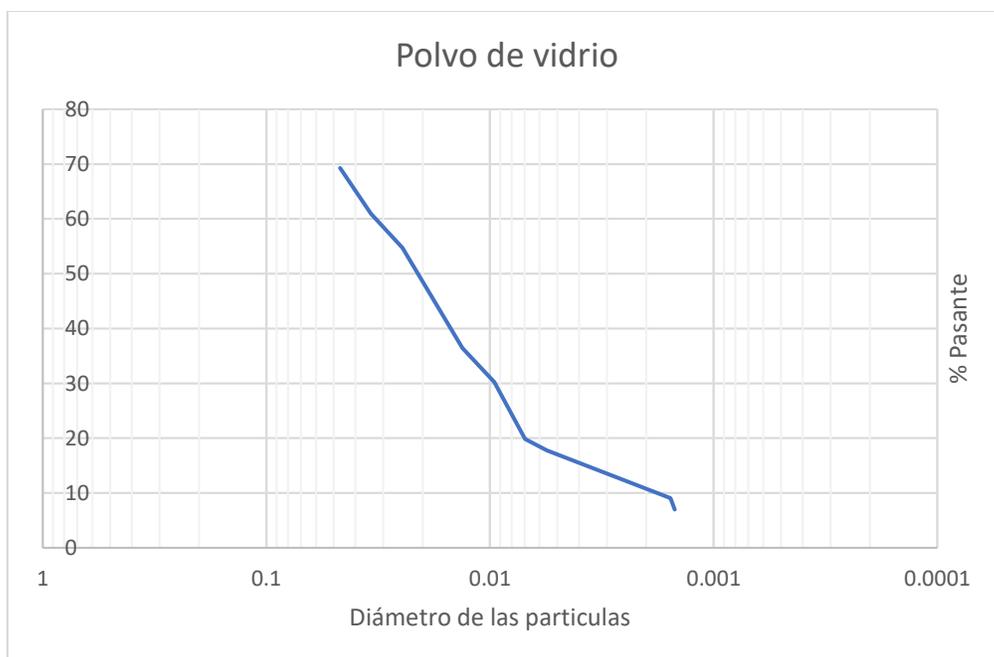
**Ilustración 29** Curva Granulométrica Muestra HM

Elaborado por: Elvis Huaraca

**Tabla 14** Resultados de hidrometría Polvo de Vidrio

<b>Polvo de Vidrio</b>	
<b>Diametro (mm)</b>	<b>PMF (%)</b>
<b>0,04681563</b>	69,25849057
<b>0,03410687</b>	60,95660377
<b>0,02463584</b>	54,73018868
<b>0,01328835</b>	36,46603774
<b>0,00956911</b>	30,23962264
<b>0,0069653</b>	19,86226415
<b>0,00556653</b>	17,78679245
<b>0,00155841</b>	9,069811321
<b>0,00149144</b>	6,994339623

Elaborado por: Elvis Huaraca



*Ilustración 30 Curva Granulométrica Polvo de Vidrio*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

## LÍMITE DE CONTRACCIÓN

La norma utilizada para el desarrollo de este ensayo es la norma A.S.T.M. D 427 -92, este ensayo se aplica tanto para las muestras M y HM, donde se calcula la reducción en volumen de masa del suelo con la utilización de Mercurio.

*Tabla 15 Resultados de límite de contracción*

<b>Muestra</b>	<b>% de polvo de vidrio</b>	<b>Límite de Contracción</b>
<b>M</b>	0	33,64
<b>M</b>	3	33,18
<b>M</b>	5	28,04
<b>M</b>	7	30,96
<b>HM</b>	0	34,52
<b>HM</b>	3	34,01
<b>HM</b>	5	29,68
<b>HM</b>	7	33,42

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

Los resultados obtenidos en el ensayo de límite contracción presentan valores mayores al no tener la influencia del polvo de vidrio, mientras que las muestras alteradas con polvo de vidrio se reducen significativamente de acuerdo al porcentaje añadido en cada muestra como se muestra en la tabla 15.

## POTENCIAL DE EXPANSIÓN EN LOS SUELOS FINOS

La expansividad es una propiedad física del suelo, la cual se ve reflejada por el incremento de volumen del suelo en base al aumento de la cantidad de agua, los suelos expansivos al desecarse disminuyen su volumen por la pérdida de contenido de humedad, existes diversos métodos para determinar la magnitud del potencial de expansión en este proyecto de investigación se utiliza el ensayo del Límite de Contracción (Peña & Dumar, 2020).

*Tabla 16* Clasificación de los suelos expansivos basados en los índices de plasticidad y límite de contracción

<b>Índice de Plasticidad (%)</b>	<b>Límite de Contracción (%)</b>	<b>Potencial de Expansión</b>
<b>&gt;10</b>	>40	Muy alto
<b>23-32</b>	30-40	Alto
<b>12-23</b>	15-30	Medio
<b>&lt;12</b>	<15	Bajo

*Fuente: Raman (1967)*

En base a los parámetros establecidos por Raman (1967), se establece criterios para predecir el potencial de expansión, mostrando que los mejores indicadores del potencial de expansión es la evaluación del índice de plasticidad y Límite de contracción.

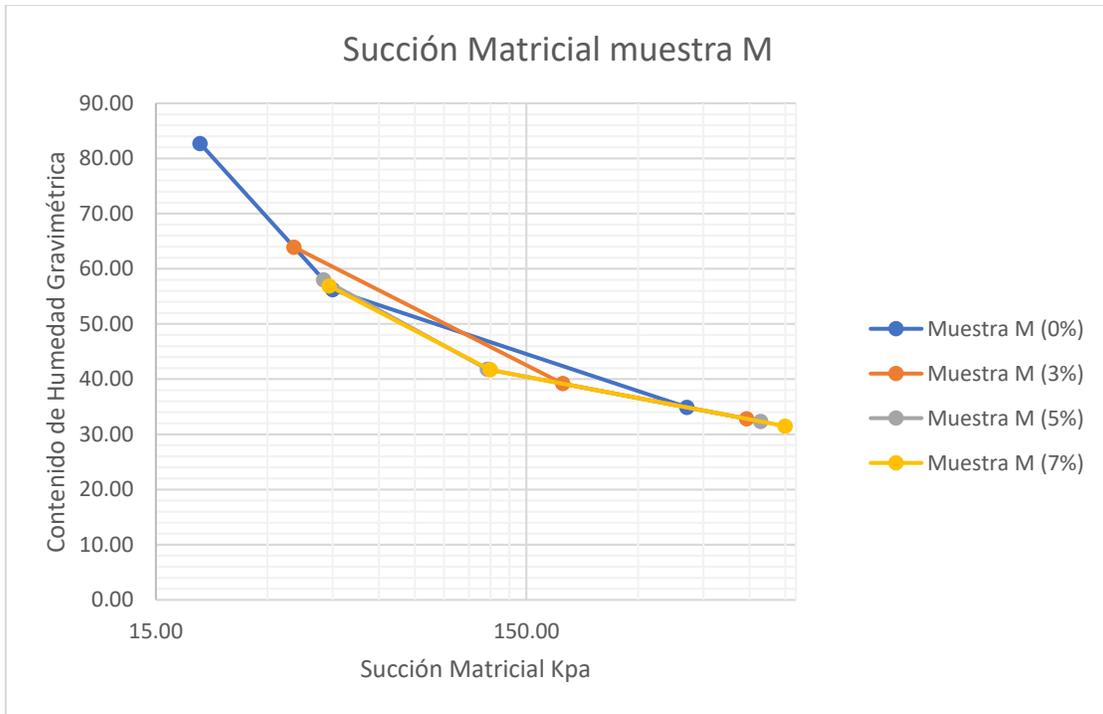
## SUCCIÓN MATRICIAL DEL SUELO

El ensayo de succión matricial estipulada en la norma (ASTM D5298–16, 2016) emplea distintos tipos de papel filtro, en la presente investigación se utiliza el papel filtro Whatman 42, y los valores de calibración especificadas en la tabla 5; dando los resultados expuestos en la Tabla 17 para la muestra M y Tabla 18 para la muestra HM.

*Tabla 17 Resultados de succión matricial muestra M*

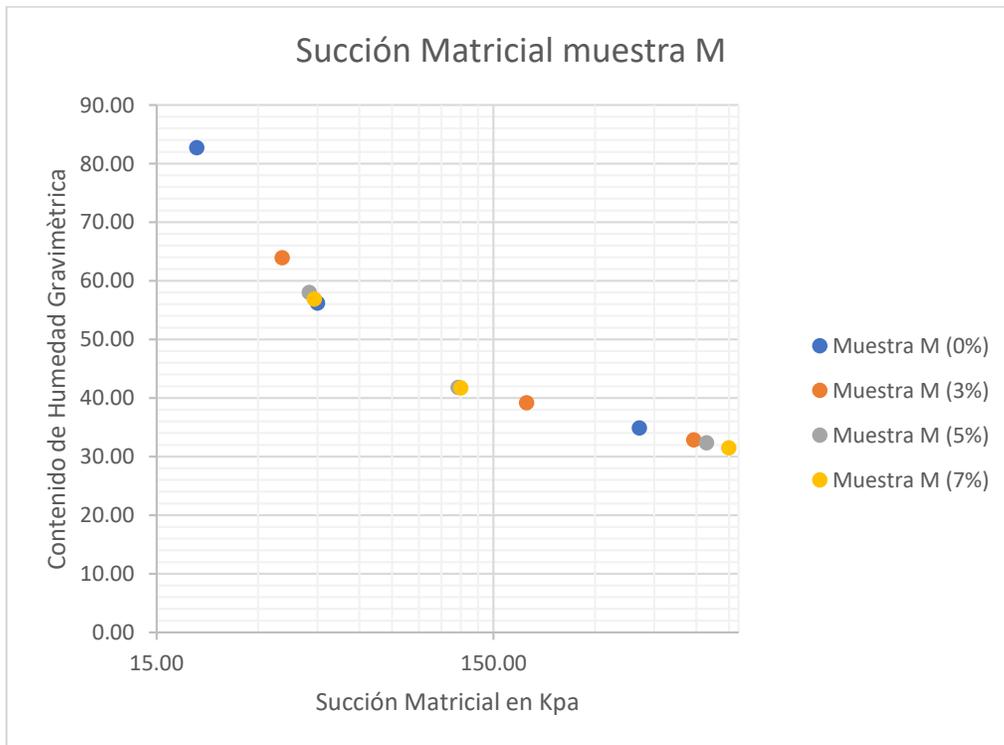
<b>Muestra</b>	<b>% de polvo de vidrio</b>	<b>Wf</b>	<b>m</b>	<b>b</b>	<b>h (Log10 Kpa)</b>	<b>h (Kpa)</b>
<b>M</b>	0%	34,89	5,327	-0,0779	2,61	406,60
<b>M</b>	0%	56,21	2,412	-0,0135	1,65	45,00
<b>M</b>	0%	82,70	2,412	-0,0135	1,30	19,75
<b>M</b>	3%	32,82	5,327	-0,0779	2,77	588,84
<b>M</b>	3%	39,19	5,327	-0,0779	2,27	187,99
<b>M</b>	3%	63,93	2,412	-0,0135	1,55	35,40
<b>M</b>	5%	32,33	5,327	-0,0779	2,81	643,32
<b>M</b>	5%	41,80	5,327	-0,0779	2,07	117,72
<b>M</b>	5%	58,01	2,412	-0,0135	1,63	42,55
<b>M</b>	7%	31,49	5,327	-0,0779	2,87	748,18
<b>M</b>	7%	41,70	5,327	-0,0779	2,08	119,83
<b>M</b>	7%	56,88	2,412	-0,0135	1,64	44,07

*Elaborado por: Elvis Huaraca*



**Ilustración 31** Resultados de succión matricial Muestra M

Elaborado por: Elvis Huaraca



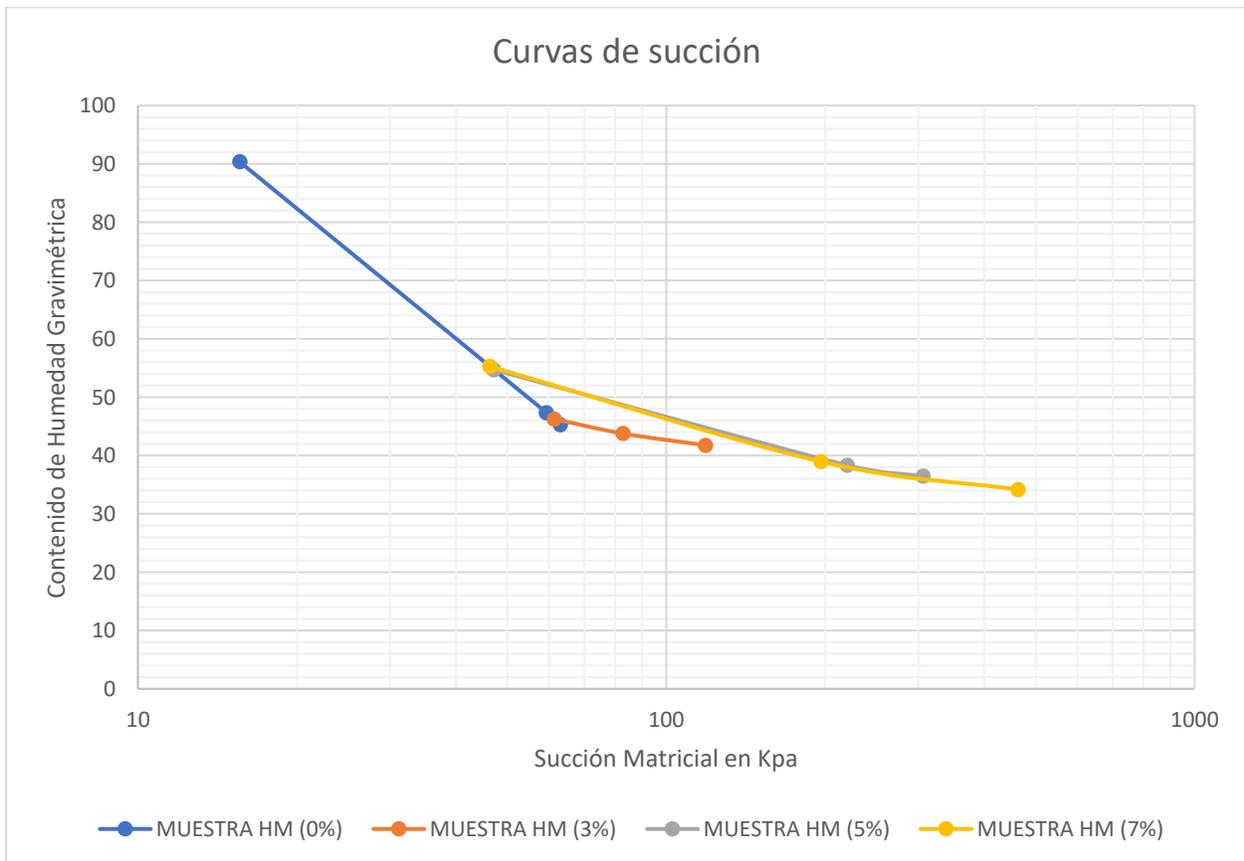
**Ilustración 32** Resultados de succión matricial Muestra M

Elaborado por: Elvis Huaraca

*Tabla 18 Resultados de succión matricial muestra HM*

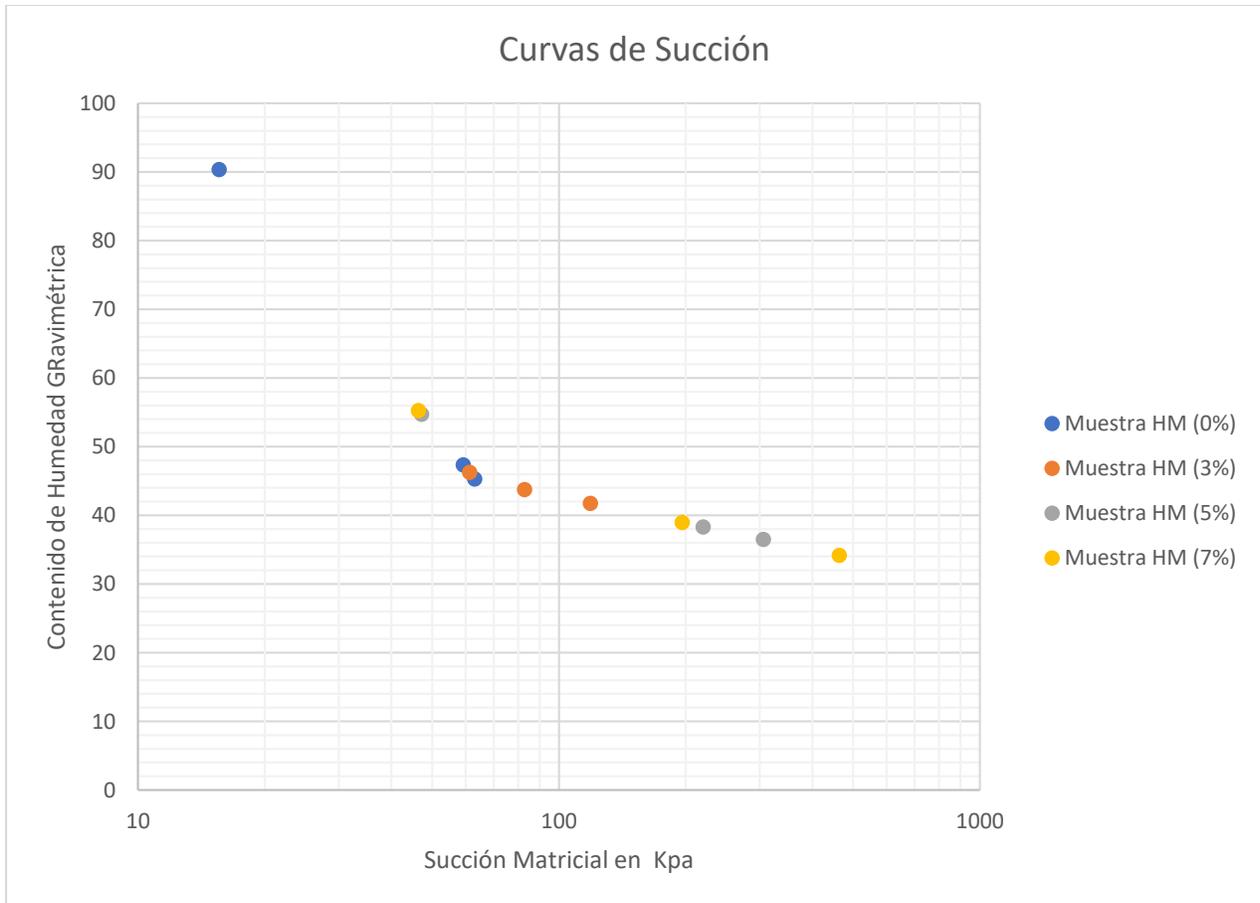
Muestra	% de polvo de vidrio	Wf	m	b	h(Log10 Kpa)	h (Kpa)
HM	0%	45,28	5,327	-0,0779	1,80	63,03
HM	0%	47,34	2,412	-0,0135	1,77	59,28
HM	0%	90,34	2,412	-0,0135	1,19	15,58
HM	3%	41,75	5,327	-0,0779	2,07	118,71
HM	3%	43,76	5,327	-0,0779	1,92	82,82
HM	3%	46,24	2,412	-0,0135	1,79	61,34
HM	5%	36,47	5,327	-0,0779	2,67	306,19
HM	5%	38,31	5,327	-0,0779	2,34	220,04
HM	5%	54,70	2,412	-0,0135	1,67	47,16
HM	7%	34,16	5,327	-0,0779	2,49	463,38
HM	7%	38,95	5,327	-0,0779	2,29	196,36
HM	7%	55,25	2,412	-0,0135	1,67	46,35

*Elaborado por: Elvis Huaraca*



*Ilustración 33 Resultados de succión matricial Muestra HM*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*



**Ilustración 34** Resultados de succión matricial Muestra HM

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

Los resultados obtenidos en el ensayo de succión matricial usando el método del papel filtro en las muestras M y HM, deducen un mayor potencial de succión cuando las muestras tienen un menor contenido de agua, pero dicho valor de succión matricial se incrementa gradualmente con las distintas dosificaciones de polvo de vidrio aumentando su potencial de succión; la retención de agua que producen las muestras inalteradas son menores que las muestras modificadas con polvo de vidrio provocando un incremento en la succión matricial del suelo, esto debido a que al mezclar las arcillas con porcentajes de polvo de vidrio reciclado, estas ocupan sus espacios de vacío y tiene mayor absorción.

### 3.2 DISCUSIÓN

La expansión de las arcillas expansivas en la provincia de Manabí, cantón Rocafuerte generan daños perjudiciales a toda obra civil del sector si a estas no se les da una adecuada estabilización, existen diversas técnicas y métodos para lograr una estabilización de los mismos como presenta Chicaiza & Oña, 2018, aplican ceniza de cascarilla de arroz en porcentajes de 10, 20 y 30 % a muestras del Cantón Rocafuerte, añadiendo la ceniza de cascarilla de arroz bajan su Índice de Plasticidad y su potencial expansivo dando un mejor resultado la combinación de 30 % de ceniza de cascarilla de arroz; en la presente investigación al usar porcentajes de 3, 5 y 7 % de polvo de vidrio reducen los límites líquidos e índice plástico como se indica en la Tabla 10 consiguiendo así una mayor estabilidad al suelo, el potencial de expansión se ve disminuido en mayor porcentaje para las muestras añadidas 5 % de polvo de vidrio dando así una mejor estabilización y comportamiento mecánico al suelo.

Bicalho et al., 2006 comparan el método del papel filtro utilizando el papel filtro Whatman Nro.42, con métodos directos como el uso de tensiómetros y la técnica osmótica concluyendo que los valores obtenidos se encuentran en un rango aceptable utilizando este método indirecto, los valores de succión matricial difieren según el tipo de suelo y la cantidad de humedad que esta presenta el suelo.

El potencial de succión como se muestra en la Tabla 17 y 18 aumenta los valores de succión matricial al añadir los porcentajes de polvo de vidrio además que dichos valores son inversamente proporcionales a su humedad.

El grado de saturación del suelo está directamente relacionado con la succión ya que representa una variable independiente de los esfuerzos que influyen en la reducción de la resistencia del suelo debido a la infiltración del agua, el método del papel filtro utiliza los filtros

como sensores pasivos que describen el estado de energía del agua del suelo (presión negativa) que ejerce el agua de los poros de un suelo saturado o parcialmente saturado (García-Elías et al., 2017).

Olufowobi et al., 2014 recomienda el uso de polvo de vidrio para mejorar las propiedades del suelo arcilloso, en su estudio publicado los mejores resultados los obtiene con la adición entre el 5% y el 10% en masa del suelo de polvo de vidrio, lo que concuerda con la presente investigación, teniendo la mejor reducción del límite de contracción al utilizar el 5% de polvo de vidrio en la masa de suelo.

## CAPITULO IV

### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 CONCLUSIONES

- De las muestras denominadas M y HM, extraídas de la provincia de Manabí, cantón Rocafuerte en base a los ensayos realizados de clasificación SUCS donde comprobamos que las mismas pertenecen a una arcilla de alta plasticidad (CH) para la muestra M y un limo de alta plasticidad (MH) para la muestra HM, las cuales tienen un índice plástico  $> 30$  y un límite líquido  $\geq 50$ , por lo tanto este suelo inalterado tiende a tener un potencial de expansión muy alto; en las muestras remodeladas con diferentes porcentajes de polvo de vidrio el índice de plasticidad decrece gradualmente como se ve reflejado en la Tabla 10, lo que da entender que el polvo de vidrio nos ayuda a disminuir el potencial de expansión en estos tipos de suelo dando una mejor consistencia al mismo.
- Los resultados del límite de contracción para las muestras M y HM, especificadas en la tabla 15, demuestran que las muestras alteradas con polvo de vidrio bajan los valores del límite de contracción comparado a las muestras inalteradas; según los parámetros establecidos por Raman (1967) para el límite de contracción entre los valores de 30 a 40 tienen un potencial de expansión alto, las muestras alteradas con 5% de polvo de vidrio baja al rango medio por lo tanto su potencial de expansión disminuye, demostrando que un porcentaje más óptimo sería el 5% de polvo de vidrio en la masa del suelo.
- Los valores de succión matricial en las Tablas 17 y 18, demuestra que cuando el grado de saturación disminuye, los meniscos de las partículas del suelo se retraen en espacios de poros pequeños donde el radio de curvatura del menisco se reduce y de esta manera, la

succión matricial se incrementa por tal motivo al llenar esos espacios con polvo de vidrio en distintas dosificaciones el potencial de succión se incrementa en las muestras alteradas, en consecuencia un porcentaje muy alto de polvo de vidrio por muestra de suelo provocara que el suelo tenga un comportamiento similar a una arena.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar esta investigación utilizando otras dosificaciones de polvo de vidrio reciclado, además emplear métodos comparativos con distintas metodologías para el cálculo de la succión matricial y añadir el cálculo de la succión total del suelo para poder comprender de mejor manera el comportamiento mecánico del mismo.
- El método de papel filtro para el cálculo de succión matricial podría verse afectado por una mala manipulación de los filtros por lo que es necesario manejarlos en contenedores plásticos y en un ambiente a temperatura constante para una correcta ejecución del ensayo.
- Comparar resultados de succión matricial utilizando los diferentes tipos de papel filtro establecido en la Norma (ASTM D5298–16, 2016).

## REFERENCIAS

- Arancibia, C. (2003). *Arcillas expansivas: Comportamiento, identificación y su correlación mediante ensayos de fácil ejecución*. (Issue Table II). UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE.
- ASTM D2487-17. (2011). Designation: D2487-11 standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system). *ASTM International*, 1–12.  
<https://doi.org/10.1520/D2487-17>.
- ASTM D4318, & ASTM D 4318-10. (2005). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. *Report, 04*(March 2010), 1–14.  
<https://doi.org/10.1520/D4318-17E01>.
- ASTM D5298–16. (2016). Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. *Astm International*, 04.08(November 1994), 1–6.  
<https://doi.org/10.1520/D5298-16.2>
- ASTM D7928. (2021). Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis. *ASTM International*, May 2016, 1–25. <https://doi.org/10.1520/D7928-17>
- ASTM D854-14. (2000). D854 - Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. *Astm D854*, 2458000(C), 1–7. <https://doi.org/10.1520/D0854-14>.
- Bicalho, K. V, Gomes Correia, A., Ferreira, S., & Marinho, F. A. M. (2006). Filter Paper Method of Soil Suction Measurement. *PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING*. <http://hdl.handle.net/1822/12305>

- Bravo, B., & Lopez, H. (2021). *Mejoramiento de las Propiedades Mecánicas de Suelos Arcillosos Empleando Valvas de Molusco y Vidrio en la Ciudad de Talara, Piura*.  
<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/654603>
- Buitrón, S., & Enríquez, A. (2018). *Estudio De La Estabilización De Arcillas Expansivas De Manabí Con Ceniza Del Volcán Tungurahua*. 42–43. <https://bit.ly/3ETnZJB>
- Carrasco, J. (2017). *Implementación de Ensayos de Succión en Suelos Parcialmente Saturados y Análisis de Resultados en Suelos Residuales* (Vol. 4) [Universidad de Chile].  
<http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/148022>
- Chicaiza, E., & Oña, F. (2018). *Estabilización de Arcillas Expansivas de la Provincia de Manabí con Puzolana Extraída de Ceniza de Cascarilla de Arroz* [Escuela Politécnica Nacional].  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19624/1/CD-9026.pdf>
- Delgado, A. (1986). *INFLUENCIA DE LA TRAYECTORIA DE LAS TENSIONES EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS ARCILLAS EXPANSIVAS Y DE LOS SUELOS COLAPSABLES EN EL LABORATORIO Y EN EL TERRENO*. Universidad de Sevilla.
- Escobar, D., Escobar, G., & Carlos, E. (2016). Relaciones Gravimétricas Y Volumétricas Del Suelo. In *Gromecánica* (pp. 29–47).
- Escobar, W. (2004). *Origen Y Formacion De Suelos Y Rocas* (pp. 1–29).
- García-Elías, A., Aguilar, A., Córdova-Ceballos, A., Sánchez-Amador, J. L., Campos, A., Zamora-Cruz, H., & Azuara-Garcia, J. (2017). Estimación de la succión total en arcilla expansiva. *Revista Iberoamericana de Ciencias*.
- Guamán, I. (2016). *Estudio del Comportamiento de un Suelo Arcilloso Estabilizado por Dos*

*Metodos Quimicos (Cal y Cloruro de Sodio)*. Universidad Tecnica de Ambato.

Guillén, C. (2016). Determinación del límite de contracción lineal de los suelos. In *Astm*

*International*. [https://kupdf.net/download/astm-d427\\_5b89f2b3e2b6f52c4b0b7058\\_pdf](https://kupdf.net/download/astm-d427_5b89f2b3e2b6f52c4b0b7058_pdf)

Hernández, M. (2006). *Estudio Geológico Y Reconocimiento De Arcillas Expansivas En Suelos*

*De Una Zona Al Sur De*. Universidad Central de Venezuela.

Lopez-Lara, T., Castaño-Meneses, V. M., Hernandez-Zaragoza, J. B., Horta-Rangel, J.,

Coronado-Márquez, A., & Castaño-Meneses, V. M. (2010). Polímeros Para la

Estabilización volumétrica de Arcillas Expansivas. *Revista Iberoamericana de Polímeros*,

*11*(January), 159–168.

[https://www.researchgate.net/publication/277275715\\_Polimeros\\_para\\_la\\_estabilizacion\\_volumentrica\\_de\\_arcillas\\_expansivas](https://www.researchgate.net/publication/277275715_Polimeros_para_la_estabilizacion_volumentrica_de_arcillas_expansivas)

Meza, V. (2012). Suelos Parcialmente Saturados, De La Investigación a La Cátedra

Universitaria. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, *31*, 23–38.

<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/31251/43362>

Olguin, F. J. (2011). *Mecánica de Suelos 1*.

<http://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstream/handle/123456789/14401/MecaSuelosI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Olufowobi, J., Ogundaju, A., Michael, B., & Aderinlewo, O. (2014). Clay soil stabilisation using

powdered glass. *Journal of Engineering Science and Technology*, *9*(5), 541–558.

Ordoñez, J., Auvinet, G., & Moises, J. (2015). Caracterizacion del subsuelo y analisis de riesgos

geotecnicos asociados a las arcillas expansivas de la ciudad de Tuxtla Gutierrez. *Ingeniería*,

*Investigación y Tecnología*, 16(3), 453–470.

[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-)

[77432015000300012&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432015000300012&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

Peña, A., & Dumar, J. (2020). *Comparación del Límite de Contracción Obtenido Mediante el Uso de Fluidos Diferentes al Mercurio Para Limos Inorgánicos de Baja Comprensibilidad de la UPB Seccional Bucaramanga* (Vol. 21, Issue 1) [Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga]. <http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203%0Ahttp://mpoc.org.my/malaysian-palm-oil-industry/>

Pendleton, R. L., & Jenny, H. (1945). Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology. In *Geographical Review* (Vol. 35, Issue 2). Dover Publications.

<https://doi.org/10.2307/211491>

Romero, J. (2021). *DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LADRILOS MACIZOS FABRICADOS CON DIFERENTES TIPOS DE ARCILLA DEL CANTON PASTAZA Y SU COMPARACIÓN CON EL LADRILLO COMÚN*. (Vol. 1). UNIVERSIDAD TÉCNICA AMBATO.

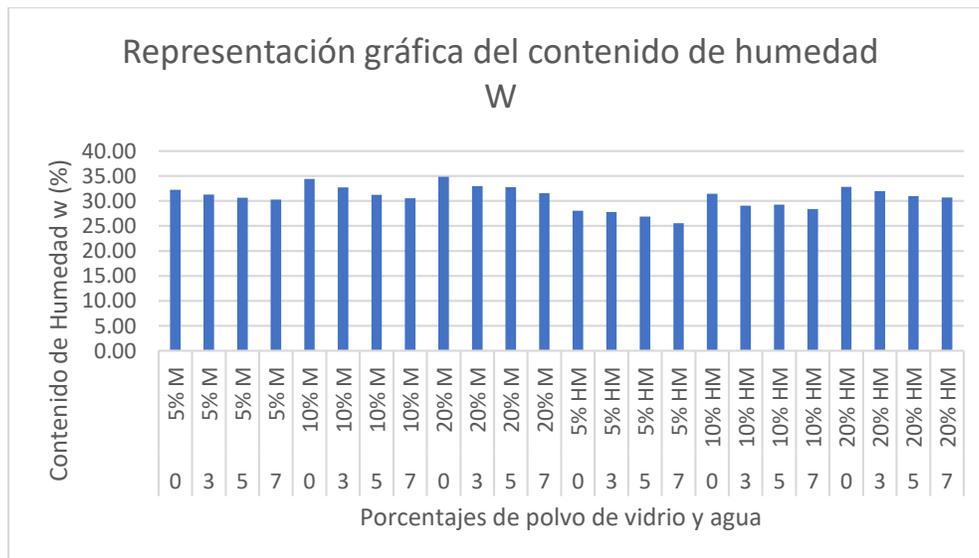
SIGTIERRAS, S. N. de I. y G. de T. R. e I. T. (2017). Memoria explicativa del Mapa de órdenes de suelos del Ecuador. Quito, Ecuador. *SIGTIERRAS (Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica)*, 15.

Valencia, C., & Huertas, L. (2018). Análisis De Granulometría Por Hidrómetro Y Un Método Automatizado Para Suelos Bentónicos. In *Universidad Católica De Colombia*.

## ANEXOS

Anexo 1: Datos y resultados del contenido de humedad de la muestra M y HM, con diferentes contenidos de humedad y porcentajes de polvo de vidrio.

Probeta	Peso Cápsula	Peso Cápsula + Ww	Peso Cápsula + Ws	% de polvo de vidrio	Variaciones de humedad en muestras	Contenido de Humedad W (%)
1	46,16	53,72	51,28	0	5% M	32,23
2	46,68	56,95	53,74	3	5% M	31,27
3	46,04	56,53	53,31	5	5% M	30,67
4	48,75	57,06	54,54	7	5% M	30,26
5	48,83	59,08	55,55	0	10% M	34,41
6	48,06	55,54	53,09	3	10% M	32,73
7	44,58	56,26	52,61	5	10% M	31,23
8	46,42	57,22	53,93	7	10% M	30,52
9	49,82	57,62	54,90	0	20% M	34,87
10	46,33	55,43	52,43	3	20% M	32,96
11	41,67	50,95	47,91	5	20% M	32,77
12	43,52	52,99	50,00	7	20% M	31,55
13	46,21	56,02	53,27	0	5% HM	28,05
14	44,99	56,38	53,21	3	5% HM	27,77
15	48,83	59,30	56,49	5	5% HM	26,87
16	45,52	57,41	54,38	7	5% HM	25,53
17	48,38	62,76	58,23	0	10% HM	31,45
18	47,15	66,62	60,96	3	10% HM	29,04
19	48,06	67,49	61,80	5	10% HM	29,27
20	44,69	60,40	55,95	7	10% HM	28,36
21	42,07	53,15	49,51	0	20% HM	32,81
22	46,44	59,83	55,55	3	20% HM	31,99
23	43,66	56,60	52,60	5	20% HM	30,96
24	48,70	59,16	55,95	7	20% HM	30,72



**Ilustración 35** Resultados del contenido de Humedad muestras M y HM

Elaborado por: Elvis Huaraca

## Anexo 2. Índice de plasticidad muestra M con 0% de polvo de vidrio

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO</b> <b>Facultad de Ingeniería - Carrera de Ingeniería Civil</b> <b>Informe de laboratorio</b>		
<b>Nombre del proyecto:</b>	Influencia del polvo de vidrio reciclado en la succión matricial de una arcilla expansiva y su potencial de expansión.	<b>Ensayado por:</b>	Elvis Fernando Huaraca Morocho
<b>Ensayo:</b>	Límites de Atterberg	<b>Revisado por:</b>	Ing. Marco Javier Palacios Carvajal
<b>Normas:</b>	ASTM-D 4318-17	<b>Ubicación:</b>	Provincia de Manabí - Cantón Rocafuerte
		<b>Coordenadas:</b>	Latitud 0°55'37"S-Longitud 80°28'48"W.

Muestra M (0%)					
Límite Líquido					
Número de Golpes	Cápsula	Peso de la Cápsula	Peso de la cápsula + suelo humedo	Peso de la cápsula + suelo seco (gr)	% de Humedad
33	A1	21,54	31,63	26,61	99,0138067
26	B2	21,36	30,87	26,12	99,789916
16	C3	21,59	30,85	26,06	107,158837

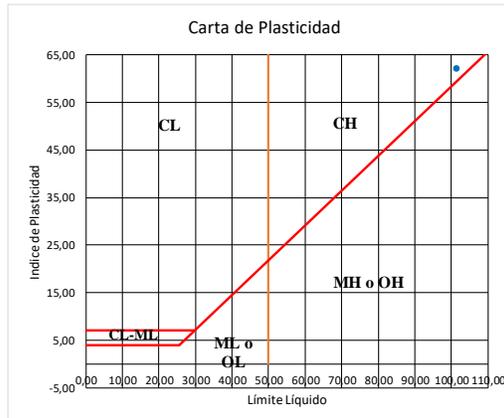
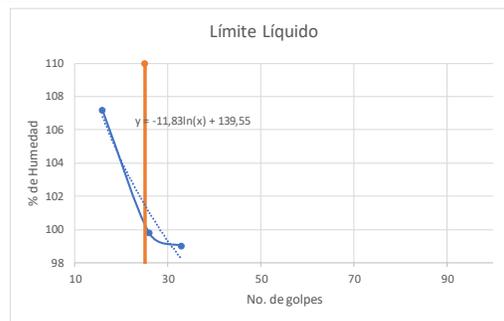
LL% 101,47

Muestra M (0%)					
Límite Plástico					
Cápsula	Peso de la Cápsula	Peso de la cápsula + suelo humedo	Peso de la cápsula + suelo seco (gr)	% de Humedad	Promedio de Humedad
A7	14,5	15,4	15,2	28,5714286	39,286
A8	14,2	14,8	14,6	50	

LP% 39,29

Resumen Muestra M (0%)	
Límite Líquido	101,47
Límite Plástico	39,29

Índice Plástico = LL-LP < 10	Suelo Plástico
Índice Plástico	62,18



**Ilustración 36** Índice de plasticidad muestra M con 0% de polvo de vidrio

Elaborado por: Elvis Huaraca

### Anexo 3. Índice de plasticidad muestra M con 3 % de polvo de vidrio

**Nombre del proyecto:** Influencia del polvo de vidrio reciclado en la succión matricial de una arcilla expansiva y su potencial de expansión. **Ensayado por:** Elvis Fernando Huaraca Morocho  
**Ensayo:** Límites de Atterberg **Revisado por:** Ing. Marco Javier Palacios Carvajal  
**Normas:** ASTM-D 4318-17 **Ubicación:** Provincia de Manabí - Cantón Rocafuerte **Coordenadas:** Latitud 0°55'37"S-Longitud 80°28'48"W.

Muestra M (3%)					
Límite Líquido					
Número de Golpes	Cápsula	Peso de la Cápsula	Peso de la cápsula + suelo húmedo	Peso de la cápsula + suelo seco (gr)	% de Humedad
30	A1	21,39	36,56	29,09	97,012987
24	B2	22,46	33,59	28,04	99,4623656
17	C3	21,49	39,19	30,19	103,448276

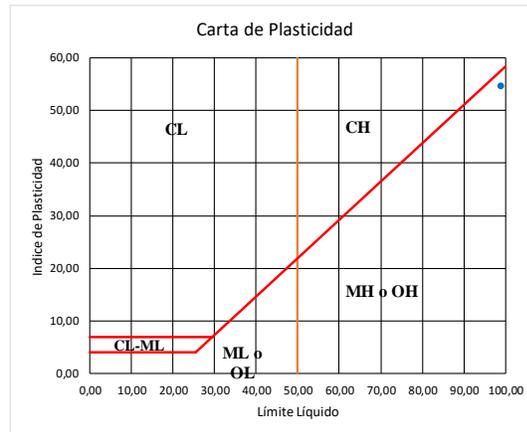
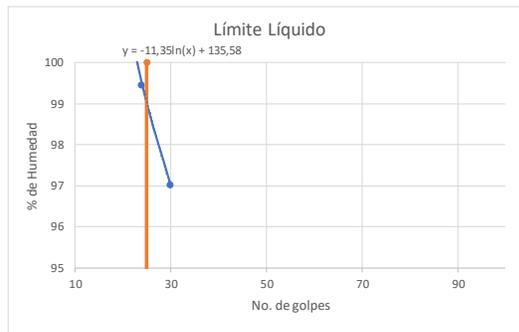
LL% **99,05**

Muestra M (3%)					
Límite Plástico					
Cápsula	Peso de la Cápsula	Peso de la cápsula + suelo húmedo	Peso de la cápsula + suelo seco (gr)	% de Humedad	Promedio de Humedad
A7	7,56	8,41	8,14	46,5517241	44,472
A8	7,53	8,84	8,45	42,3913043	

LP% **44,47**

Resumen Muestra M (3%)	
Límite Líquido	99,05
Límite Plástico	44,47

Índice Plástico = LL-LP < 10	Suelo Plástico
Índice Plástico	



*Ilustración 37 Índice de plasticidad muestra M con 3 % de polvo de vidrio*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

## Anexo 4. Índice de plasticidad muestra M con 5% de polvo de vidrio

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO</b> <b>Facultad de Ingeniería - Carrera de Ingeniería Civil</b> <b>Informe de laboratorio</b>	
<b>Nombre del proyecto:</b>	Influencia del polvo de vidrio reciclado en la succión matricial de una arcilla expansiva y su potencial de expansión.	<b>Ensayado por:</b> Elvis Fernando Huaraca Morocho
<b>Ensayo:</b>	Límites de Aterberg	<b>Revisado por:</b> Ing. Marco Javier Palacios Carvajal
<b>Normas:</b>	ASTM-D 4318-17	<b>Ubicación:</b> Provincia de Manabí - Cantón Rocafuerte
		<b>Coordenadas:</b> Latitud 0°55'37"S-Longitud 80°28'48"W.

Muestra M (5%)					
Límite Líquido					
Número de Golpes	Cápsula	Peso de la Cápsula	Peso de la cápsula + suelo humedo	Peso de la cápsula + suelo seco (gr)	% de Humedad
34	A1	21,37	30,59	26,2	90,8902692
23	B2	21,11	34,68	28,05	95,5331412
16	C3	22,65	38,54	30,75	96,1728395

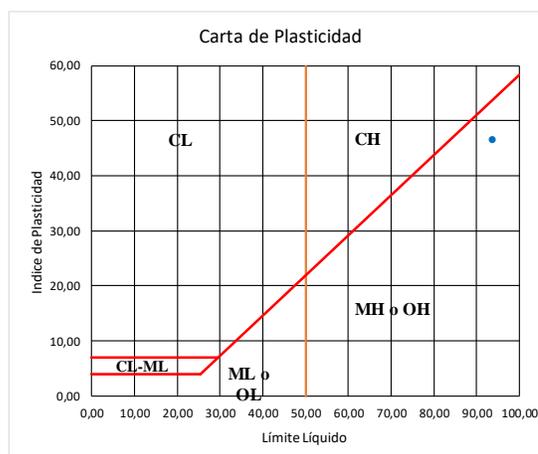
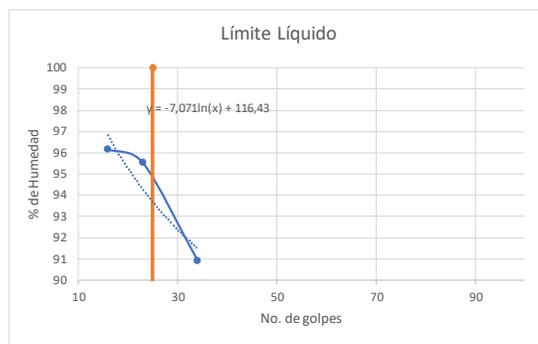
LL%    93,67

Muestra M (5%)					
Limite Plástico					
Cápsula	Peso de la Cápsula	Peso de la cápsula + suelo humedo	Peso de la cápsula + suelo seco (gr)	% de Humedad	Promedio de Humedad
A7	7,65	8,01	7,9	44	47,000
A8	5,4	5,7	5,6	50	

LP%    47,00

Resumen Muestra M (5%)	
Límite Líquido	93,67
Límite Plástico	47,00

Índice Plástico = LL-LP < 10	<b>Suelo Plástico</b>
Índice Plástico	



*Ilustración 38 Índice de plasticidad muestra M con 5% de polvo de vidrio*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

## Anexo 5. Índice de plasticidad muestra M con 7% de polvo de vidrio

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO</b> <b>Facultad de Ingeniería - Carrera de Ingeniería Civil</b> <b>Informe de laboratorio</b>	
<b>Nombre del proyecto:</b>	Influencia del polvo de vidrio reciclado en la succión matricial de una arcilla expansiva y su potencial de expansión.	<b>Ensayado por:</b> Elvis Fernando Huaraca Morocho
<b>Ensayo:</b>	Límites de Aterberg	<b>Revisado por:</b> Ing. Marco Javier Palacios Carvajal
<b>Normas:</b>	ASTM-D 4318-17	<b>Ubicación:</b> Provincia de Manabí - Cantón Rocafuerte
		<b>Coordenadas:</b> Latitud 0°55'37"S-Longitud 80°28'48"W.

Muestra M (7%)					
Límite Líquido					
Número de Golpes	Cápsula	Peso de la Cápsula	Peso de la cápsula + suelo humedo	Peso de la cápsula + suelo seco (gr)	% de Humedad
33	A1	21,65	32,34	27,36	87,2154116
27	B2	21,18	35,41	28,58	92,2972973
18	C3	21,52	36,47	29,21	94,4083225

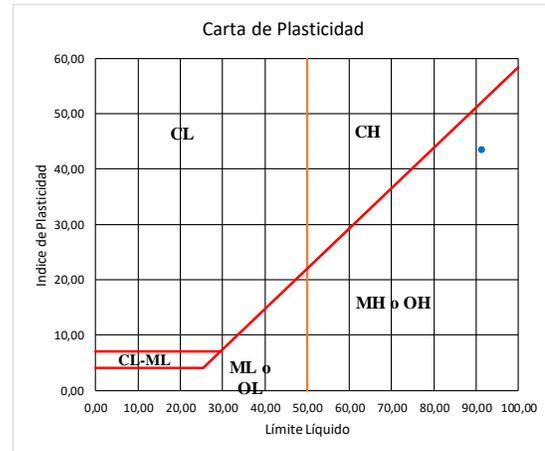
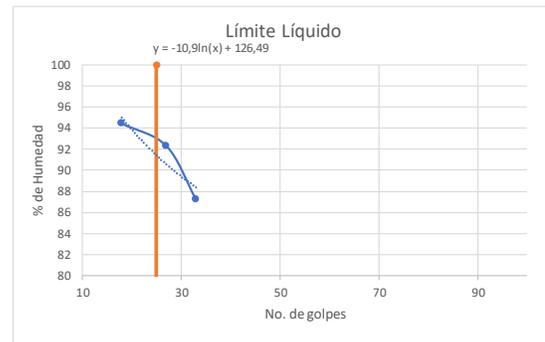
LL%     91,40

Muestra M (7%)					
Limite Plástico					
Cápsula	Peso de la Cápsula	Peso de la cápsula + suelo humedo	Peso de la cápsula + suelo seco (gr)	% de Humedad	Promedio de Humedad
A7	21,69	22,02	21,91	50	47,917
A8	20,95	21,3	21,19	45,8333333	

LP%     47,92

Resumen Muestra M (7%)	
Límite Líquido	91,40
Límite Plástico	47,92

Índice Plástico = LL-LP < 10	<b>Suelo Plástico</b>
Índice Plástico	



**Ilustración 39** Índice de plasticidad muestra M con 7% de polvo de vidrio

Elaborado por: Elvis Huaraca

## Anexo 6. Índice de plasticidad muestra HM con 0% de polvo de vidrio

 <b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO</b> Facultad de Ingeniería - Carrera de Ingeniería Civil <b>Informe de laboratorio</b>		
<b>Nombre del proyecto:</b>	Influencia del polvo de vidrio reciclado en la succión matricial de una arcilla expansiva y su potencial de expansión.	<b>Ensayado por:</b> Elvis Fernando Huaraca Morocho
<b>Ensayo:</b>	Límites de Atterberg	<b>Revisado por:</b> Ing. Marco Javier Palacios Carvajal
<b>Normas:</b>	ASTM-D 4318-17	<b>Ubicación:</b> Provincia de Manabí - Cantón Rocafuerte
		<b>Coordenadas:</b> Latitud 0°54'59"S-Longitud 80°25'56"W

Muestra HM (0%)					
Límite Líquido					
Número de Golpes	Cápsula	Peso de la Cápsula	Peso de la cápsula + suelo humedo	Peso de la cápsula + suelo seco (gr)	% de Humedad
33	A1	21,65	28,69	25,37	89,2473118
27	B2	21,18	33,5	27,54	93,7106918
18	C3	21,64	34,99	28,52	94,0406977

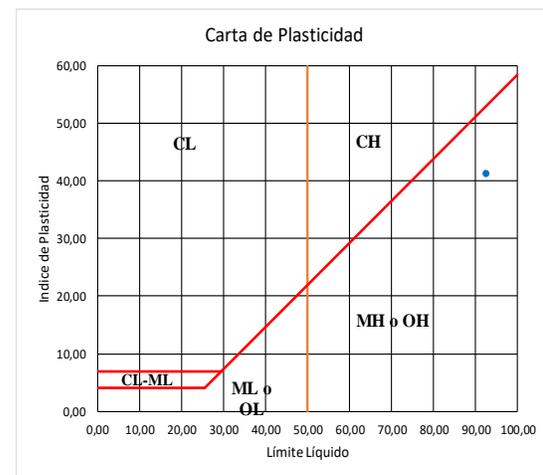
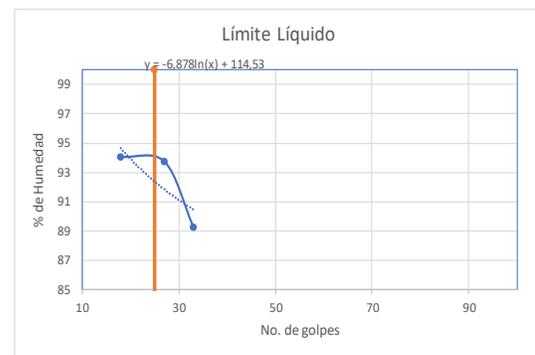
LL% **92,39**

Muestra HM (0%)					
Límite Plástico					
Cápsula	Peso de la Cápsula	Peso de la cápsula + suelo humedo	Peso de la cápsula + suelo seco (gr)	% de Humedad	Promedio de Humedad
A7	7,62	7,99	7,86	54,1666667	51,2212644
A8	7,65	8,08	7,94	48,2758621	

LP% **51,22**

Resumen Muestra HM (0%)	
Límite Líquido	92,39
Límite Plástico	51,22

Indice Plástico = LL-LP < 10	<b>Suelo Plástico</b>
Indice Plástico	



**Ilustración 40** Índice de plasticidad muestra HM con 0% de polvo de vidrio

Elaborado por: Elvis Huaraca

## Anexo 7. Índice de plasticidad muestra HM con 3% de polvo de vidrio

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO</b> Facultad de Ingeniería - Carrera de Ingeniería Civil <b>Informe de laboratorio</b>	
<b>Nombre del proyecto:</b>	Influencia del polvo de vidrio reciclado en la succión matricial de una arcilla expansiva y su potencial de expansión.	<b>Ensayado por:</b> Elvis Fernando Huaraca Morocho
<b>Ensayo:</b>	Límites de Atterberg	<b>Revisado por:</b> Ing. Marco Javier Palacios Carvajal
<b>Normas:</b>	ASTM-D 4318-17	<b>Ubicación:</b> Provincia de Manabí - Cantón Rocafuerte
		<b>Coordenadas:</b> Latitud 0°54'59"S-Longitud 80°25'56"W

Muestra HM (3%)					
Límite Líquido					
Número de Golpes	Cápsula	Peso de la Cápsula	Peso de la cápsula + suelo humedo	Peso de la cápsula + suelo seco (gr)	% de Humedad
34	A1	21,47	31,83	27,08	84,6702317
27	B2	21,86	33,36	28,02	86,6883117
16	C3	21,81	33,43	28,01	87,4193548

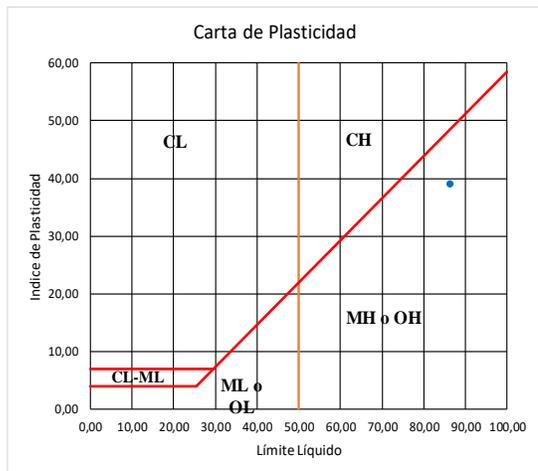
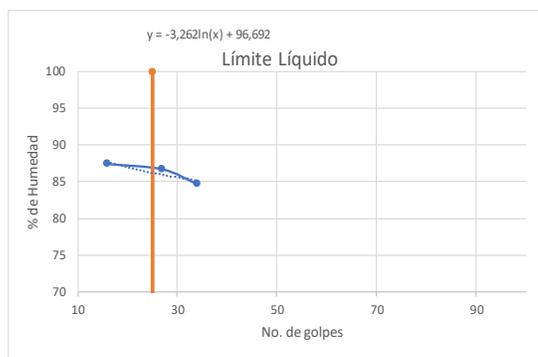
LL% **86,19**

Muestra HM (3%)					
Límite Plástico					
Cápsula	Peso de la Cápsula	Peso de la cápsula + suelo humedo	Peso de la cápsula + suelo seco (gr)	% de Humedad	Promedio de Humedad
A7	7,83	8,48	8,26	51,1627907	47,0689987
A8	7,57	9,3	8,78	42,9752066	

LP% **47,07**

Resumen Muestra HM (3%)	
Límite Líquido	86,19
Límite Plástico	47,07

Índice Plástico = LL-LP < 10	Suelo Plástico
Índice Plástico	



*Ilustración 41 Índice de plasticidad muestra HM con 3% de polvo de vidrio*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

## Anexo 8. Índice de plasticidad muestra HM con 5% de polvo de vidrio

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO</b> <b>Facultad de Ingeniería - Carrera de Ingeniería Civil</b> <b>Informe de laboratorio</b>	
<b>Nombre del proyecto:</b>	Influencia del polvo de vidrio reciclado en la succión matricial de una arcilla expansiva y su potencial de expansión.	<b>Ensayado por:</b> Elvis Fernando Huaraca Morocho
<b>Ensayo:</b>	Límites de Atterberg	<b>Revisado por:</b> Ing. Marco Javier Palacios Carvajal
<b>Normas:</b>	ASTM-D 4318-17	<b>Ubicación:</b> Provincia de Manabí - Cantón Rocafuerte
		<b>Coordenadas:</b> Latitud 0°54'59"S-Longitud 80°25'56"W

Muestra HM (5%)					
Límite Líquido					
Número de Golpes	Cápsula	Peso de la Cápsula	Peso de la cápsula + suelo humedo	Peso de la cápsula + suelo seco (gr)	% de Humedad
33	A1	21,42	31,41	26,95	80,6509946
26	B2	20,93	31,03	26,5	81,3285458
17	C3	21,54	34,9	28,8	84,0220386

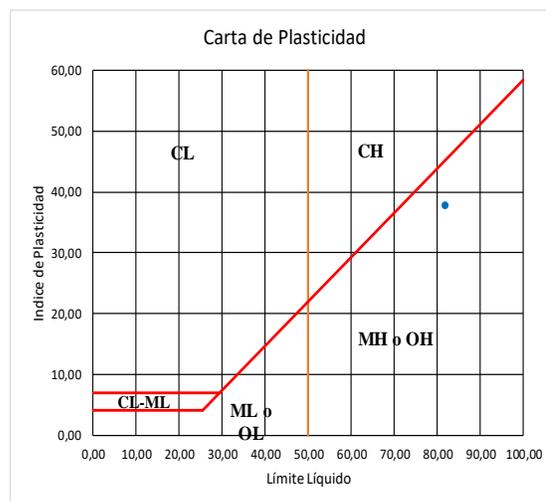
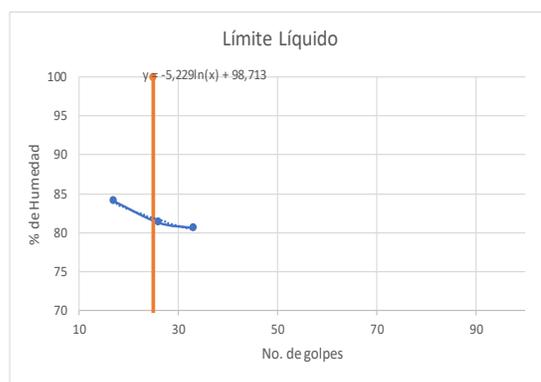
LL% 81,88

Muestra HM (5%)					
Límite Plástico					
Cápsula	Peso de la Cápsula	Peso de la cápsula + suelo humedo	Peso de la cápsula + suelo seco (gr)	% de Humedad	Promedio de Humedad
A7	7,66	8,34	8,12	47,826087	44,105
A8	7,43	8,16	7,95	40,3846154	

LP% 44,11

Resumen Muestra HM (5%)	
Límite Líquido	81,88
Límite Plástico	44,11

Índice Plástico = LL-LP < 10	<b>Suelo Plástico</b>
Índice Plástico	



**Ilustración 42** Índice de plasticidad muestra HM con 5% de polvo de vidrio

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

## Anexo 9. Índice de plasticidad muestra HM con 7% de polvo de vidrio

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO</b> Facultad de Ingeniería - Carrera de Ingeniería Civil <b>Informe de laboratorio</b>	
<b>Nombre del proyecto:</b> Influencia del polvo de vidrio reciclado en la succión matricial de una arcilla expansiva y su potencial de expansión.		<b>Ensayado por:</b> Elvis Fernando Huaraca Morocho
<b>Ensayo:</b> Límites de Atterberg		<b>Revisado por:</b> Ing. Marco Javier Palacios Carvajal
<b>Normas:</b> ASTM-D 4318-17		<b>Ubicación:</b> Provincia de Manabí - Cantón Rocafuerte
		<b>Coordenadas:</b> Latitud 0°54'59"S-Longitud 80°25'56"W

Muestra HM (7%)					
Límite Líquido					
Número de Golpes	Cápsula	Peso de la Cápsula	Peso de la cápsula + suelo humedo	Peso de la cápsula + suelo seco (gr)	% de Humedad
33	A1	21,69	31,05	26,99	76,6037736
26	B2	21,6	34,02	28,56	78,4482759
18	C3	21,57	39,29	31,42	79,8984772

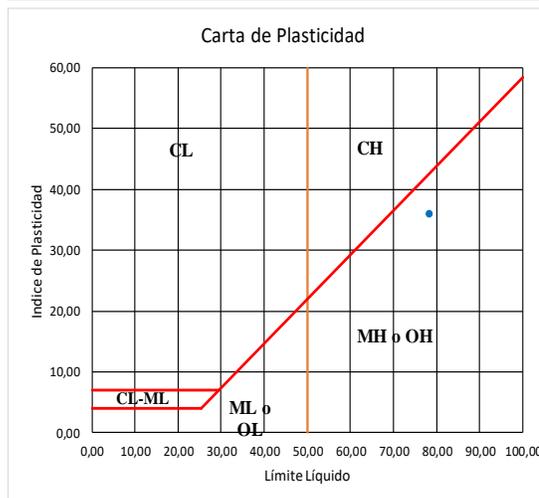
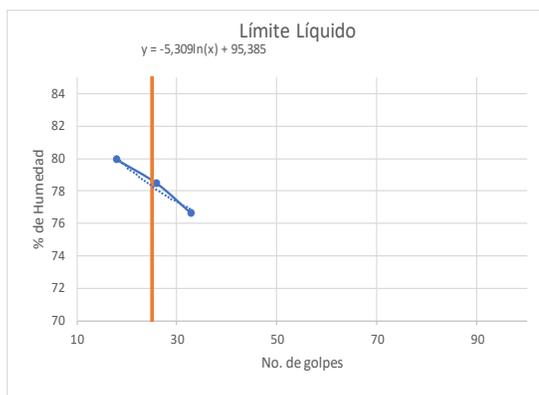
LL% 78,30

Muestra HM (7%)					
Límite Plástico					
Cápsula	Peso de la Cápsula	Peso de la cápsula + suelo humedo	Peso de la cápsula + suelo seco (gr)	% de Humedad	Promedio de Humedad
A7	7,18	7,86	7,65	44,6808511	42,340
A8	7,36	7,92	7,76	40	

LP% 42,34

Resumen Muestra HM (7%)	
Límite Líquido	78,30
Límite Plástico	42,34

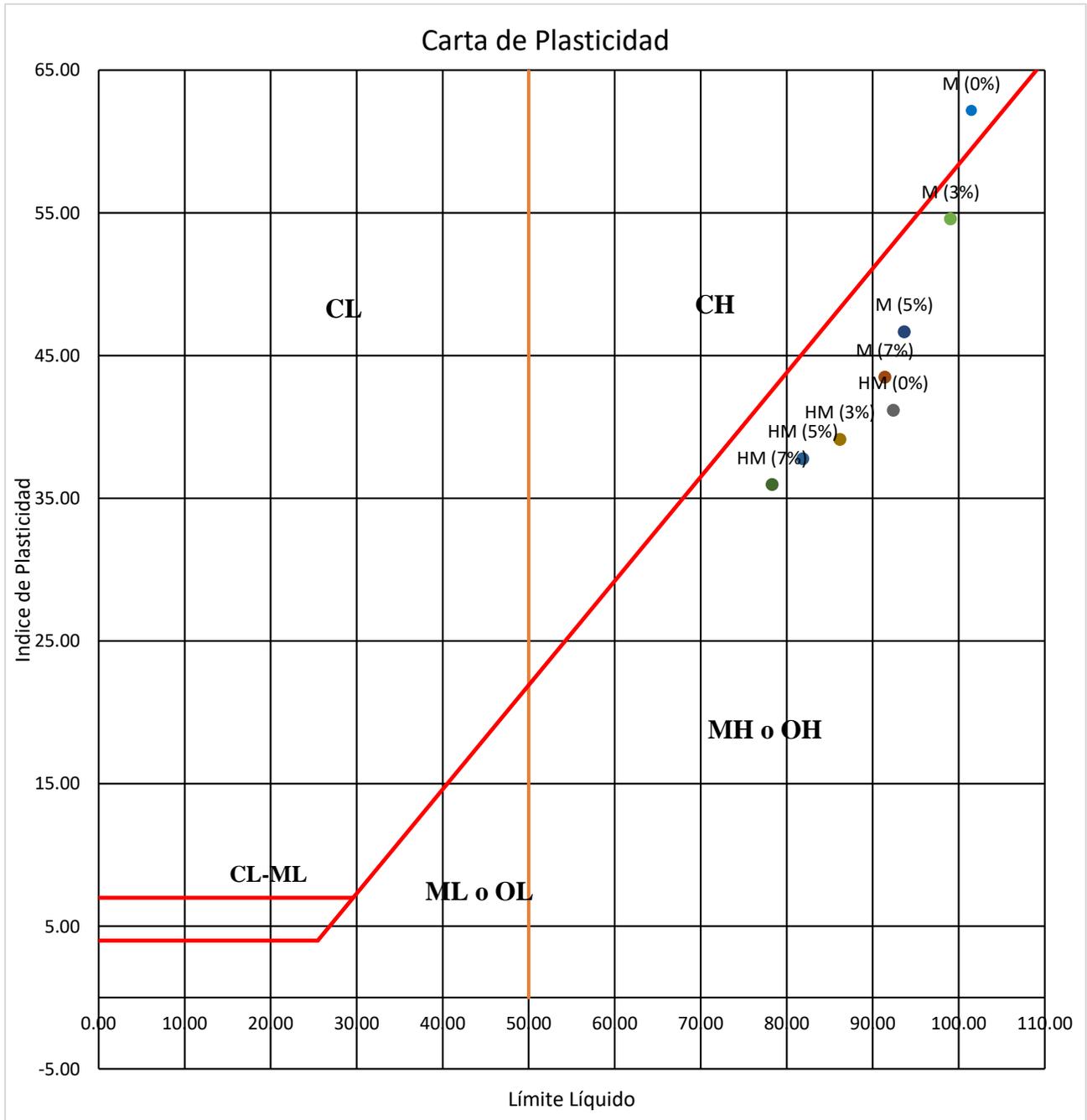
Índice Plástico = LL-LP < 10	<b>Suelo Plástico</b>
Índice Plástico	



*Ilustración 43 Índice de plasticidad muestra HM con 7% de polvo de vidrio*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

Anexo 10. Carta de Plasticidad de todas las muestras inalteradas y alteradas



**Ilustración 44** Carta de Plasticidad de todas las muestras inalteradas y alteradas

Elaborado por: Elvis Huaraca



## Anexo12. Cálculos de la gravedad específica muestra HM

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO</b> <b>Facultad de Ingeniería - Carrera de Ingeniería Civil</b> <b>Informe de Laboratorio</b>	
<b>Proyecto:</b> Influencia del polvo de vidrio reciclado en la succión matricial de una arcilla expansiva y su potencial de expansión.	<b>Ensayado por:</b> Elvis Fernando Huaraca Morocho	<b>Revisado por:</b> Ing. Marco Javier Palacios Carvajal
<b>Ensayo:</b> Gravedad Específica de los Sólidos del suelo por picnómetro	<b>Ubicación:</b> Provincia de Manabí - Cantón Rocafuerte	<b>Coordenadas:</b> Latitud 0°54'59"S-Longitud 80°25'56"W
<b>Normas:</b> ASTM D854-14		

**CALIBRACIÓN DEL PICNÓMETRO**

N°	MASA DEL PICNÓMETRO
1	157,3
<b>PROMEDIO</b>	157,3

TIPO DE SUELO	VOLUMEN PICNOMETRO A USAR [ml]	MASA REQUERIDA [g]
CLAY	500	50 ±10

Temperatura T [°C]	Masa Picnómetro y Agua M <sub>pw,c</sub> [g]	Masa seca picnómetro M <sub>p</sub> [g]	Densidad Agua a temperatura Calibración ρ <sub>w</sub> [g/ml]	Volumen Picnómetro V <sub>p</sub> [ml]
23,00	658,50	157,300	0,99835	502,03
24,00	658,60	157,300	0,99833	502,14
32,00	658,40	157,300	0,99559	503,32
35,00	653,70	157,300	0,99550	498,64
36,00	657,30	157,300	0,99547	502,28
<b>VOLUMEN PROMEDIO</b>				501,68

**GRAVEDAD ESPECÍFICA**

Temperatura T [°C]	Densidad Agua a temperatura ensayo ρ <sub>w</sub> [g/ml]	Masa Picnómetro y Agua a Temperatura Ensayo M <sub>pwT</sub> [g]	Masa del Suelo Ms [g]	Masa Picnómetro, Agua y Suelo a Temperatura Ensayo M <sub>pwst</sub> [g]	Gravedad Específica a Temperatura de Ensayo G <sub>t</sub>	Coefficiente de Temperatura K	Gravedad Específica a 20°C
27	0,99652	657,2353021	50	688,7	2,698	0,9996	2,696

**REPORTE DE RESULTADOS:**

Gravedad Específica: 2,70

*Ilustración 46 Cálculos de la gravedad específica muestra HM*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

## Anexo13. Cálculos de la gravedad para el polvo de vidrio

 <b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO</b> Facultad de Ingeniería - Carrera de Ingeniería Civil <b>Informe de Laboratorio</b>								
<b>Proyecto:</b>	Influencia del polvo de vidrio reciclado en la succión matricial de una arcilla expansiva y su potencial de expansión.	<b>Ensayado por:</b>	Elvis Fernando Huaraca Morocho					
<b>Ensayo:</b>	Gravedad Específica de los Sólidos del suelo por picnómetro	<b>Revisado por:</b>	Ing. Marco Javier Palacios Carvajal					
<b>Normas:</b>	ASTM D854-14	<b>Ubicación:</b>	Provincia de Manabí - Cantón Rocafuerte					
		<b>Coordenadas:</b>	Riobamba-Ecuador					
<b>CALIBRACIÓN DEL PICNÓMETRO</b>								
	<b>N°</b>	<b>MASA DEL PICNÓMETRO</b>						
	1	157,3						
	<b>PROMEDIO</b>	157,3						
		<b>TIPO DE SUELO</b>	<b>VOLUMEN PICNOMETRO A USAR [ml]</b>	<b>MASA REQUERIDA [g]</b>				
		Polvo de vidrio	500	50 ±10				
	<b>Temperatura T [°C]</b>	<b>Masa Picnómetro y Agua Mpw,c [g]</b>	<b>Masa seca picnómetro Mp [g]</b>	<b>Densidad Agua a temperatura Calibración <math>\rho_w</math> [g/ml]</b>	<b>Volumen Picnómetro Vp [ml]</b>			
	23,00	658,50	157,300	0,99835	502,03			
	24,00	658,60	157,300	0,99833	502,14			
	32,00	658,40	157,300	0,99559	503,32			
	35,00	657,70	157,300	0,99550	502,66			
	36,00	657,30	157,300	0,99547	502,28			
	<b>VOLUMEN PROMEDIO</b>				502,48			
<b>GRAVEDAD ESPECÍFICA</b>								
	<b>Temperatura T [°C]</b>	<b>Densidad Agua a temperatura ensayo <math>\rho_w</math> [g/ml]</b>	<b>Masa Picnómetro y Agua a Temperatura Ensayo Mpwst [g]</b>	<b>Masa del Suelo Ms [g]</b>	<b>Masa Picnómetro, Agua y Suelo a Temperatura Ensayo Mpwt [g]</b>	<b>Gravedad Específica a Temperatura de Ensayo Gt</b>	<b>Coefficiente de Temperatura K</b>	<b>Gravedad Específica a 20°C</b>
	24	0,99730	658,4280599	50	688,1	2,460	0,9996	2,459
<b>REPORTE DE RESULTADOS:</b>								
	Gravedad Específica:	2,5						

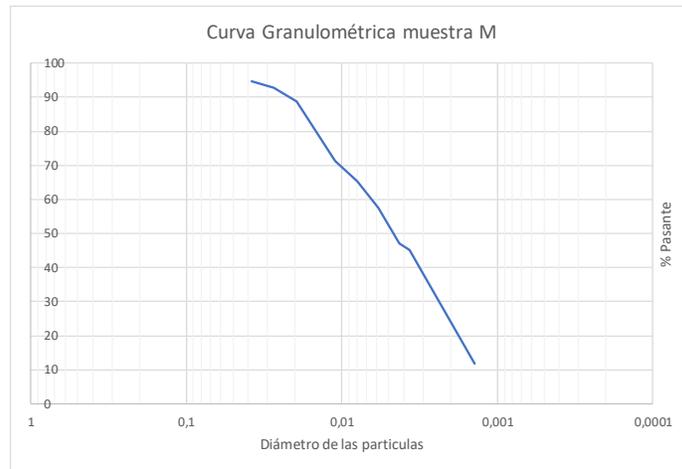
*Ilustración 47 Cálculos de la gravedad para el polvo de vidrio*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

## Anexo14. Cálculos del ensayo de Hidrometría para la muestra M

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO</b> <b>Facultad de Ingeniería - Carrera de Ingeniería Civil</b> <b>Informe de laboratorio</b>	
<b>Nombre del proyecto:</b> Influencia del polvo de vidrio reciclado en la succión matricial de una arcilla expansiva y su potencial de expansión. <b>Ensayo:</b> Análisis Granulométrico via Hidrómetro <b>Norma:</b> ASTM 422	<b>Ensayado por:</b> Elvis Fernando Huaraca Morocho <b>Revisado por:</b> Ing. Marco Javier Palacios Carvajal <b>Ubicación:</b> Latitud 0°55'37"S-Longitud 80°28'48"W.	

Datos:		Unidades
Tipo de Hidrómetro:	152H	
Masa de suelo:	50	gramos
Gravedad Específica:	2.75	
Corrección por defloculante:	5	g/L
Corrección por menisco	1,37	g/L
Lectura de 0 a 60	9,892	cm
L2	14,866	cm
Volumen del densímetro	66,5	cm <sup>3</sup>
Distancia medida probeta azul	2,211	cm
Distancia medida probeta naranja	2,193	cm
K - 19 C°	0,0134	g/cm <sup>3</sup>
K - 20 C°	0,0133	g/cm <sup>3</sup>



M  
u  
e  
s  
t  
r  
a  
  
M

Lectura # A	Tiempo (min)	Temperatura C°	Ct	Lectura aparente	Re (g/L)	L1 (g/L)	L1 cm	L (cm)	Diametro (mm)	PMF (%)
1	1	20	0	52	48,37	11,63	1,917399333	8,244899333	0,03818953	94,6539623
2	2	20	0	51	47,37	12,63	2,082266	8,409766	0,02727273	92,6970889
3	4	20	0	49	45,37	14,63	2,411999333	8,739499333	0,01965916	88,7833423
4	15	20	0	40	36,37	23,63	3,895799333	10,2232993	0,01097998	71,1714825
5	30	20	0	37	33,37	26,63	4,390399333	10,7178993	0,00794961	65,3008625
6	60	20	0	33	29,37	30,63	5,049866	11,377366	0,00579158	57,4733693
7	120	19	-0,3	28	24,07	35,93	5,923659333	12,2511593	0,00428157	47,1019407
8	165	19	-0,3	27	23,07	36,93	6,088526	12,416026	0,00367582	45,1450674
9	1380	19	-0,3	10	6,07	53,93	8,891259333	15,2187593	0,0014072	11,878221

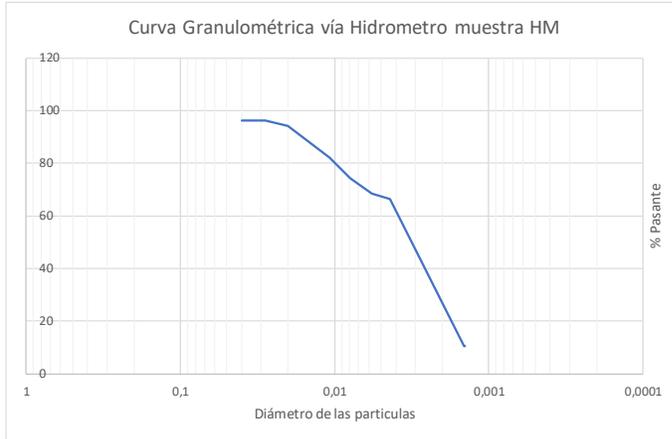
**Ilustración 48** Cálculos del ensayo de Hidrometría para la muestra M

Elaborado por: Elvis Huaraca

## Anexo15. Cálculos del ensayo de Hidrometría para la muestra HM

 <b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO</b> <b>Facultad de Ingeniería - Carrera de Ingeniería Civil</b> <b>Informe de laboratorio</b>		
<b>Nombre del proyecto:</b>	Influencia del polvo de vidrio reciclado en la succión matricial de una arcilla expansiva y su potencial de expansión.	<b>Ensayado por:</b> Elvis Fernando Huaraca Morocho
<b>Ensayo:</b>	Análisis Granulométrico via Hidrómetro	<b>Revisado por:</b> Ing. Marco Javier Palacios Carvajal
<b>Norma:</b>	ASTM 422	<b>Ubicación:</b> Latitud 0°54'59"S-Longitud 80°25'56"W

Datos:	Unidades
Tipo de Hidrómetro:	152H
Masa de suelo:	50 gramos
Gravedad Especifica:	2,70
Corrección por defloculante:	5 g/L
Corrección por menisco	1,37 g/L
Lectura de 0 a 60	9,892 cm
L2	14,866 cm
Volumen del densímetro	66,5 cm <sup>3</sup>
Distancia medida probeta azul	2,211 cm
Distancia medida probeta naranja	2,193 cm
K - 20 C°	0,0139 g/cm <sup>3</sup>
K - 21 C°	0,0137 g/cm <sup>3</sup>



**M  
u  
e  
s  
t  
r  
a  
  
H  
M**

Lecturas de Hidrómetro										
Lectura #	Tiempo (min)	Temperatura C°	Ct	Lectura aparente	Rc (g/L)	L1 (g/L)	L1 cm	L (cm)	Diametro (mm)	PMF (%)
1	1	21	0,2	52	48,57	11,43	1,884426	8,211926	0,03983248	96,1457761
2	2	21	0,2	52	48,57	11,43	1,884426	8,211926	0,02816581	96,1457761
3	4	21	0,2	51	47,57	12,43	2,049292667	8,37679267	0,02011517	94,166246
4	15	21	0,2	45	41,57	18,43	3,038492667	9,36599267	0,0108256	82,2890655
5	30	21	0,2	41	37,57	22,43	3,697959333	10,0254593	0,00791976	74,3709452
6	60	21	0,2	38	34,57	25,43	4,192559333	10,5200593	0,00573659	68,4323549
7	104	21	0,2	37	33,57	26,43	4,357426	10,684926	0,00439127	66,4528248
8	1380	20	0	9	5,37	54,63	9,006666	15,334166	0,00144415	10,6300765
9	1440	20	0	9	5,37	54,63	9,006666	15,334166	0,00143438	10,6300765

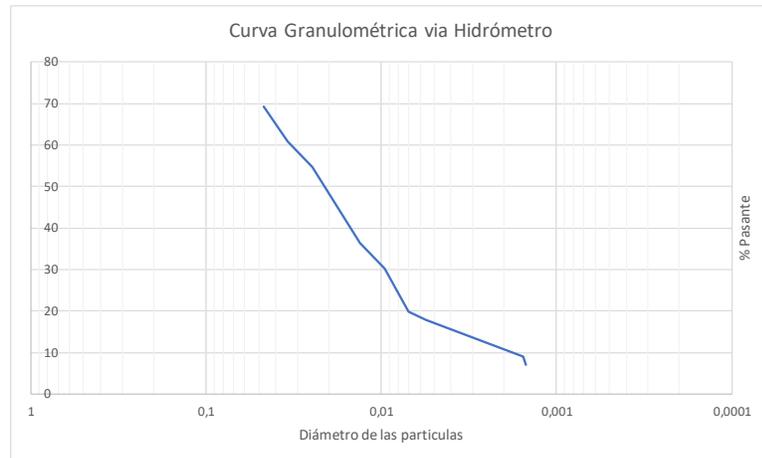
*Ilustración 49 Cálculos del ensayo de Hidrometría para la muestra HM*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

## Anexo16. Cálculos del ensayo de Hidrometría para el polvo de vidrio

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO</b> <b>Facultad de Ingeniería - Carrera de Ingeniería Civil</b> <b>Informe de laboratorio</b>	
<b>Nombre del proyecto:</b>	Influencia del polvo de vidrio reciclado en la succión matricial de una arcilla expansiva y su potencial de expansión.	<b>Ensayado por:</b> Elvis Fernando Huaraca Morocho
<b>Ensayo:</b>	Análisis Granulométrico via Hidrómetro	<b>Revisado por:</b> Ing. Marco Javier Palacios Carvajal
<b>Norma:</b>	ASTM 422	<b>Ubicación:</b> Riobamba - Ecuador

Datos:	Unidades
Tipo de Hidrómetro:	152H
Masa de suelo:	50 gramos
Gravedad Específica:	2,50
Corrección por defloculante:	5 g/L
Corrección por menisco	1,37 g/L
Lectura de 0 a 60	9,892 cm
L2	14,866 cm
Volumen del densímetro	66,5 cm <sup>3</sup>
Distancia medida probeta azul	2,211 cm
Distancia medida probeta naranja	2,193 cm
K - 20 C°	0,0143 g/cm <sup>3</sup>
K - 21 C°	0,0141 g/cm <sup>3</sup>



### Lecturas de Hidrometro

Lectura #	Tiempo (min)	Temperatura C°	Ct	Lectura aparente	Rc (g/L)	L1 (g/L)	L1 cm	L (cm)	Diametro (mm)	PMF (%)
1	1	20	0	37	33,37	26,63	4,390399333	10,7178993	0,04681563	69,2584906
2	2	20	0	33	29,37	30,63	5,049866	11,377366	0,03410687	60,9566038
3	4	20	0	30	26,37	33,63	5,544466	11,871966	0,02463584	54,7301887
4	15	21	0,2	21	17,57	42,43	6,995292667	13,3227927	0,01328835	36,4660377
5	30	21	0,2	18	14,57	45,43	7,489892667	13,8173927	0,00956911	30,2396226
6	60	21	0,2	13	9,57	50,43	8,314226	14,641726	0,0069653	19,8622642
7	95	21	0,2	12	8,57	51,43	8,479092667	14,8065927	0,00556653	17,7867925
8	1305	20	0	8	4,37	55,63	9,171532667	15,4990327	0,00155841	9,06981132
9	1440	20	0	7	3,37	56,63	9,336399333	15,6638993	0,00149144	6,99433962

*Ilustración 50 Cálculos del ensayo de Hidrometría para el polvo de vidrio*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*

## Anexo17. Cálculos para determinar el Límite de Contracción

 <b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO</b> Facultad de Ingeniería - Carrera de Ingeniería Civil <b>Informe de laboratorio</b> 	
<b>Nombre del proyecto:</b> Influencia del polvo de vidrio reciclado en la succión matricial de una arcilla expansiva y su potencial de expansión. <b>Ensayo:</b> Límite de Contracción <b>Normas:</b> ASTM D427-92	<b>Ensayado por:</b> Elvis Fernando Huaraca Morocho <b>Revisado por:</b> Ing. Marco Javier Palacios Carvajal <b>Ubicación:</b> Riobamba-Ecuador

Muestra	% de vidrio	Mt	Mw	M	Md	Mo	W	V (cm <sup>3</sup> )	volumen de las pastillas seca	Vo (cm <sup>3</sup> )	Límite de contracción	Relación de Contracción
M	0	6,8731	41,6615	34,7884	25,8273	18,9542	83,54	25,26	9,29079909	15,97	34,52	1,19
M	3	7,2431	39,3242	32,0811	24,7724	17,5293	83,01	23,32	8,59039105	14,73	34,01	1,19
M	5	7,1703	40,3135	33,1432	25,5402	18,3699	80,42	23,75	9,32128166	14,43	29,68	1,27
M	7	7,4251	41,1793	33,7542	25,8153	18,3902	83,54	24,73	9,21757745	15,51	33,42	1,19
HM	0	7,3608	40,8925	33,5317	25,7432	18,3824	82,41	24,35	8,96592171	15,38	33,64	1,19
HM	3	7,5068	39,8167	32,3099	25,3717	17,8649	80,86	23,46	8,51794533	14,94	33,18	1,20
HM	5	6,756	39,7682	33,0122	25,5482	18,7922	75,67	23,58	8,95018245	14,63	28,04	1,28
HM	7	7,0887	40,1528	33,0641	25,6307	18,542	78,32	23,61	8,78070971	14,83	30,96	1,25

**Ilustración 51** Cálculos para determinar el Límite de Contracción

Elaborado por: Elvis Huaraca

## Anexo18. Cálculos para determinar la succión matricial

 <b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO</b> Facultad de Ingeniería - Carrera de Ingeniería Civil <b>Informe de laboratorio</b> 	
<b>Nombre del proyecto:</b> Influencia del polvo de vidrio reciclado en la succión matricial de una arcilla expansiva y su potencial de expansión. <b>Ensayo:</b> Ensayo de succión matricial <b>Normas:</b> ASTM-D 5298-16	<b>Ensayado por:</b> Elvis Fernando Huaraca Morocho <b>Revisado por:</b> Ing. Marco Javier Palacios Carvajal <b>Ubicación:</b> Provincia de Manabí - Cantón Rocafuerte

	Filtro Whatman #42	% de polvo de vidrio	Tiempo de equilibrio (días)	Masa del	Masa de	Contenido	Mw	Wf	m	b	Succión	Succión
				papel filtro seco	agua en el papel filtro	de agua del papel filtro %					matricial (Log10 KPa)	matricial (Kpa)
				Masa W	Mf (masa seca) gr						h(Log10 Kpa)	h (Kpa)
Muestra	1	0%	7	0,3758	0,2786	0,0972	34,89	5,33	-0,0779	2,61	406,60	
	2	0%	7	0,4355	0,2788	0,1567	56,21	2,41	-0,0135	1,65	45,00	
	3	0%	7	0,5185	0,2838	0,2347	82,70	2,41	-0,0135	1,30	19,75	
	1	3%	7	0,3565	0,2684	0,0881	32,82	5,33	-0,0779	2,77	588,84	
	2	3%	7	0,3882	0,2789	0,1093	39,19	5,33	-0,0779	2,27	187,99	
	3	3%	7	0,4285	0,2614	0,1671	63,93	2,41	-0,0135	1,55	35,40	
	1	5%	7	0,352	0,266	0,086	32,33	5,33	-0,0779	2,81	643,32	
	2	5%	7	0,3657	0,2579	0,1078	41,80	5,33	-0,0779	2,07	117,72	
	3	5%	7	0,4252	0,2691	0,1561	58,01	2,41	-0,0135	1,63	42,55	
M	1	7%	7	0,3541	0,2693	0,0848	31,49	5,33	-0,0779	2,87	748,18	
	2	7%	7	0,3884	0,2741	0,1143	41,70	5,33	-0,0779	2,08	119,83	
	3	7%	7	0,4242	0,2704	0,1538	56,88	2,41	-0,0135	1,64	44,07	
Muestra	1	0%	7	0,3895	0,2681	0,1214	45,28	5,33	-0,0779	1,80	63,03	
	2	0%	7	0,404	0,2742	0,1298	47,34	2,41	-0,0135	1,77	59,28	
	3	0%	7	0,5101	0,268	0,2421	90,34	2,41	-0,0135	1,19	15,58	
	1	3%	7	0,3721	0,2625	0,1096	41,75	5,33	-0,0779	2,07	118,71	
	2	3%	7	0,3732	0,2596	0,1136	43,76	5,33	-0,0779	1,92	82,82	
	3	3%	7	0,4026	0,2753	0,1273	46,24	2,41	-0,0135	1,79	61,34	
	1	5%	7	0,3645	0,2717	0,0928	34,16	5,33	-0,0779	2,67	463,77	
	2	5%	7	0,3769	0,2725	0,1044	38,31	5,33	-0,0779	2,34	220,04	
	3	5%	7	0,4098	0,2649	0,1449	54,70	2,41	-0,0135	1,67	47,16	
HM	1	7%	7	0,3611	0,2646	0,0965	36,47	5,33	-0,0779	2,49	306,18	
	2	7%	7	0,3746	0,2696	0,105	38,95	5,33	-0,0779	2,29	196,36	
	3	7%	7	0,4285	0,276	0,1525	55,25	2,41	-0,0135	1,67	46,35	

**Ilustración 52** Cálculos de succión matricial

Elaborado por: Elvis Huaraca

## ANEXOS FOTOGRÁFICOS



*Ilustración 53 Extracción de muestras M y HM*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*



*Ilustración 54 Trituración y recolección de polvo de vidrio*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*



*Ilustración 55 Determinación de Límites de Atterberg*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*



*Ilustración 56 Ensayo de Gravedad Especifica*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*



*Ilustración 57 Ensayo de Granulometria via Hidrómetro*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*



*Ilustración 58 Ensayo de Límite de Contracción*

*Elaborado por: Elvis Huaraca*



*Ilustración 59* Ensayo de Succión matricial

*Elaborado por: Elvis Huaraca*