

**ANÁLISIS DE GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO Y UN MÉTODO
AUTOMATIZADO PARA SUELOS BENTÓNICOS.**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**CAMILO ANDRES VALENCIA PATIÑO
LINA GISETH HUERTAS DAZA**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ D.C.
2018**

**Título del proyecto:
ANÁLISIS DE GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO Y UN MÉTODO
AUTOMATIZADO PARA SUELOS BENTÓNICOS.**

**Presentado por:
CAMILO ANDRES VALENCIA PATIÑO- CÓDIGO 504698
LINA GISETH HUERTAS DAZA- CÓDIGO 505213**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

**Docente asesor:
JUAN CARLOS RUGE CÁRDENAS
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ D.C.
2018**



Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Compartir bajo la Misma Licencia — Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

Nota de Aceptación

Firma del Presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. 31 de Octubre de 2018

Dedicatoria

A Dios por la vida y permitirme alcanzar un nuevo logro. A mis padres, por ser el ejemplo; enseñarme que con responsabilidad, esfuerzo y trabajo puedo alcanzar las metas que me proponga, por brindarme el apoyo incondicional durante todo este proceso, a mis hermanos por su apoyo por darme ánimo para continuar.

Al ingeniero Juan Carlos Ruge, por compartir su conocimiento y experiencia durante el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos que siempre me han apoyado en los malos y buenos momentos en este proceso universitario.

Lina Huertas

A Dios por ser nuestro guía y darnos las herramientas necesarias para alcanzar este objetivo.

A mis padres y a mis hermanas por estar siempre presentes y ayudando en cada momento.

Al ingeniero Juan Carlos Ruge Cárdenas por brindarnos su conocimiento y encaminarnos en el desarrollo de este trabajo.

A todos los docentes y personas que contribuyeron en nuestra enseñanza durante el tiempo de formación.

Camilo Valencia.

Contenido

1. GLOSARIO	12
2. RESUMEN	13
3. ABSTRACT	14
4. INTRODUCCIÓN	15
5. GENERALIDADES	17
5.1. ANTECEDENTES	17
6. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	20
7. OBJETIVOS	22
7.1. OBJETIVO GENERAL	22
7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
8. JUSTIFICACIÓN	23
9. DELIMITACIÓN	25
9.1. ESPACIO	25
9.2. TIEMPO	25
9.3. CONTENIDO	25
9.4. ALCANCE	25
10. MARCO DE REFERENCIA	26
10.1. MARCO CONCEPTUAL	26
10.2. MARCO TEÓRICO	26
10.3. MARCO HISTÓRICO	30
10.4. MARCO LEGAL	32
11. ESTADO DEL ARTE	33
12. METODOLOGÍA	35
13. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS	37
13.1. ANÁLISIS GRANULOMETRÍA POR MEDIO DEL HIDRÓMETRO	37
13.1.1. EQUIPO	37
13.1.2. CALIBRACIÓN DEL HIDRÓMETRO	37
13.1.3. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA	38

13.1.4.	PROCEDIMIENTO	38
13.1.5.	CORRECCIÓN DE LAS LECTURAS DEL HIDRÓMETRO.	39
13.1.6.	CÁLCULOS	41
13.2.	ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS- PARIO	43
13.2.1.	Componentes, especificaciones técnicas y configuración del sistema PARIO. 43	
13.2.2.	PREPARACIÓN DE LA MUESTRA DE SUELO.....	48
13.2.3.	RESULTADOS (EVALUACIÓN Y EXPORTACIÓN DE DATOS).....	52
14.	RESULTADOS	55
14.1.	RESULTADOS GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO	55
14.1.1.	REGISTRO FOTOGRÁFICO GRAVEDAD ESPECÍFICA Y GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO.....	62
14.2.	RESULTADOS ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE TAMAÑO DE PARTICULAS-PARIO. 66	
14.2.1.	REGISTRO FOTOGRÁFICO ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE TAMAÑO DE PARTICULAS- PARIO.....	72
15.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	76
15.1.	DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	76
15.2.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE CADA EQUIPO.....	84
16.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
16.1.	CONCLUSIONES	86
16.2.	RECOMENDACIONES	87
17.	BIBLIOGRAFÍA.....	88
18.	ANEXOS.....	90
18.1.	ANEXO 1. DATOS Y RESULTADOS ENSAYO GRAVEDAD ESPECÍFICA. 90	
18.2.	ANEXO 2. RESULTADOS SISTEMA PARIO.....	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de profundidad efectiva, basados en hidrómetro y cilindro de tamaños especificados.	37
Tabla 2. Valores de Ct para corrección por temperatura de las lecturas del hidrómetro. ..	40
Tabla 3. Valores del K para el cálculo del diámetro de Partículas.	42
Tabla 4. B Valores del K para el cálculo del diámetro de partículas.....	42
Tabla 5. Valores de a para diferentes gravedades específicas.....	43
Tabla 6. Especificaciones Técnicas Sistema PARIO	45
Tabla 7. Indicaciones LED en cabezal de medición.....	46
Tabla 8. Datos Iniciales primer ensayo convencional granulometría por hidrómetro.	55
Tabla 9. Calculos primer ensayo convencional granulometría.....	55
Tabla 10. Datos Iniciales segundo ensayo convencional granulometría por hidrómetro. ..	56
Tabla 11. Calculos segundo ensayo convencional granulometría.....	57
Tabla 12. Datos Iniciales tercer ensayo convencional granulometría por hidrómetro.	58
Tabla 13. Calculos tercer ensayo convencional granulometría.....	58
Tabla 14. Datos Iniciales cuarto ensayo convencional granulometría por hidrómetro.	59
Tabla 15. Calculos cuarto ensayo convencional granulometría.....	60
Tabla 16. Datos Iniciales quinto ensayo convencional granulometría por hidrómetro.....	61
Tabla 17. Cálculos quinto ensayo convencional granulometría.....	61
Tabla 18. Porcentaje en peso (%Peso) en cada fase mineral identificada en la muestra. 77	
Tabla 19. Minerales presentes en la muestra.	79
Tabla 20. Clasificación de Suelos Finos en diferentes países.....	82
Tabla 21. Datos de entrada.....	90
Tabla 22. Resultados.....	90
Tabla 23. Resultados sistema PARIO, ensayo 1	91
Tabla 24. Resultados sistema PARIO, ensayo 2.....	104
Tabla 25. Resultados sistema PARIO, ensayo 3.....	117
Tabla 26. Resultados sistema PARIO, ensayo 4.....	130

Índice de gráficas.

Grafica 1. Granulometría por Hidrómetro primer ensayo.	56
Grafica 2. Granulometría por Hidrómetro segundo ensayo.....	57
Grafica 3. Granulometría por Hidrómetro tercer ensayo.....	59
Grafica 4. Granulometría por Hidrómetro cuarto ensayo.....	60
Grafica 5. Granulometría por Hidrómetro quinto ensayo.....	62
Grafica 6. Presión/Temperatura vs Tiempo (Ensayo 1).....	66
Grafica 7. Presión vs Temperatura (Ensayo 1).....	66
Grafica 8. Presion vs Tiempo (Ensayo 1).....	67
Grafica 9. Peso acumulado vs diámetro de las partículas (Ensayo 1).....	67
Grafica 10. Clase de Texturas (Ensayo 1).....	68
Grafica 11. Peso acumulado vs diámetro de las partículas (Ensayo 2).....	69
Grafica 12. Peso acumulado vs diámetro de las partículas (Ensayo 3).....	70
Grafica 13. Peso acumulado vs diámetro de las partículas (Ensayo 4).....	71
Grafica 14. Difractograma de muestra Bentonita en polvo.....	78
Grafica 15. Granulometría General Bentonita.....	82
Grafica 16. Curva Gravedad Especifica.	91
Grafica 17. Curva granulometrica ensayo 1.	104
Grafica 18. Curva granulometrica ensayo 2.	117
Grafica 19. Curva granulometrica ensayo 3.....	130
Grafica 20. Curva granulometrica ensayo 4.	143

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. . Representación esquemática del dominio de medición del método de pipeta y el método de ISP	30
Figura 2. Componentes sistema Pario.	44
Figura 3. Sensor de presión y temperatura.	45
Figura 4. Ventana de configuración sistema PARIO	47
Figura 5. Ventana de configuración sistema PARIO.....	47
Figura 6. Ventana de configuración del sistema PARIO.	48
Figura 7. Instrucciones de uso sistema PARIO.....	49
Figura 8. Instrucciones de uso sistema PARIO.....	50
Figura 9. Instrucciones de uso sistema PARIO.....	50
Figura 10. Instrucciones de uso sistema PARIO.	51
Figura 11. Instrucciones de uso sistema PARIO	51
Figura 12. Ventana de resultados sistema PARIO.	52
Figura 13. Ventana de resultados sistema PARIO	53
Figura 14. Ventana de resultados sistema PARIO	53
Figura 15. Ventana de resultados sistema PARIO	54
Figura 16. Ventana de resultados sistema PARIO	54
Figura 17. Muestras de laboratorio.	62
Figura 18. Ensayo de gravedad específica.....	63
Figura 19. Gravedad Específica.	63
Figura 20. Temperatura gravedad específica.....	64
Figura 21. Gravedad Específica.	64
Figura 22. Lecturas con Hidrómetro 152H.....	65
Figura 23. Baño Termostatico.....	65
Figura 24. Triangulo del suelo (Ensayo 1)	68
Figura 25. . Triangulo del suelo (Ensayo 2)	69
Figura 26. . Triangulo del suelo (Ensayo 3)	70
Figura 27. . Triangulo del suelo (Ensayo 4)	71
Figura 28. Configuración inicial sistema PARIO	72
Figura 29. Muestra de suelo.....	72
Figura 30. Preparación Muestra de suelo.	73
Figura 31. Preparación material en suspensión.....	73
Figura 32. Baño termostatico sistema PARIO	74
Figura 33. Toma de datos (LED)	74
Figura 34. Resultados sistema PARIO	75
Figura 35. Proporción composicional de la muestra (%Peso)	77
Figura 36. Proporción minerales presentes en la muestra.....	79
Figura 37. Micrografía 1 Bentonita.	80

Figura 38. Micrografía 2 Bentonita 80
Figura 39. Micrografía 3 Bentonita 81

1. GLOSARIO

Bentonita: La bentonita es una arcilla de grano muy fino (coloidal) del tipo de montmorillonita que contiene bases y hierro. Tiene aplicaciones en cerámica, entre otros usos. El nombre deriva de un yacimiento que se encuentra en Fort Benton, Estados Unidos. ¹

Penetrómetro: Los penetrómetros dinámicos o pruebas o ensayos de penetración dinámica son un tipo de ensayos de penetración, empleados en la determinación de las características geotécnicas de un terreno, como parte de las técnicas de reconocimiento de un reconocimiento geotécnico. ²

Mormorillonita: La montmorillonita es un mineral del grupo de los silicatos, subgrupo filosilicatos y dentro de ellos pertenece a las llamadas arcillas. Es un hidroxisilicato de magnesio y aluminio, con otros posibles elementos. ³

Sedimentación: La sedimentación, en geología, es el proceso en el cual los sedimentos se depositan en determinadas zonas de la superficie. ³

Granulometría: La granulometría se define como la distribución de los diferentes tamaños de las partículas de un suelo, expresado como un porcentaje en relación con el peso total de la muestra seca. La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado tal como se determina por análisis de tamices y/o análisis granulométrico por el método del hidrómetro. ⁴

Difracción de Rayos X: Es una técnica que sirve para determinar la estructura detallada de un material, debido a ese ordenamiento se pueden conocer propiedades físicas y químicas. ⁵

¹ E.T.S.A. de La Coruña. Juan Pérez Valcárcel, Catedrático de Estructuras Conceptos generales de la mecánica del suelo.

² INVIAS. Método de ensayo normal para el uso del penetrómetro dinámico de cono en aplicaciones de pavimentos a poca profundidad. Bogotá. Norma Invias. E- 172 – 07. Año 2007)

³ Braja M Das. Principios de ingeniería de cimentaciones. Cuarta Edición. Internacional Thomson Editores. Pag, 2.

⁴ Ingeniería y construcción. Granulometría De Suelos. [En línea]. Bogotá. [Citado 7 marzo, 2018] Disponible en internet:< <https://civilgeeks.com/2013/11/25/granulometria-suelos-ing-nestor-luis-sanchez/> >

⁵ SlideShare. Difracción de rayos x. [En línea]. Bogotá [Citado 25 octubre, 2018] Disponible en internet:< <https://es.slideshare.net/maoxro/difraccion-rayos-x>>

2. RESUMEN

Este trabajo de investigación presenta los análisis realizados al material bentonita industrial con 95% mormorillonita, con el método de granulometría por hidrómetro y con el sistema automatizado PARIO, con objetivo de realizar un comparativo entre éstos dos ensayos, para así saber si este método automatizado se puede implementar en Colombia.

Para lo anterior, se adquirieron muestras comerciales y se investigaron las características físicas que contiene la bentonita industrial con 95% mormorillonita; esto permitió establecer parámetros claros, al analizar qué condiciones normalmente presenta este material para los procesos, además, también indicios sobre su uso en el ámbito industrial y de la construcción. Las muestras se analizaron bajo condiciones de laboratorio, en donde los escenarios del lugar cuentan con control de temperatura y humedad relativa constante, lo que nos permitió tener resultados con condiciones idóneas y con menor margen de error.

A la par, se realizaron ensayos de laboratorio con el material antes mencionado, ejecutando el ensayo tradicional de granulometría por hidrómetro y el equipo automatizado PARIO. Esto tuvo como finalidad establecer la comparación de resultados entre el método tradicional y el método automatizado, generando observaciones y recomendaciones para la implementación del mismo.

Igualmente, Se ejecutaron cinco ensayos de laboratorio con el material, utilizando el método tradicional (Granulometría por Hidrómetro) y el método automatizado (PARIO).

Finalmente se entregan resultados y procedimientos definidos para la ejecución de los ensayos individuales y se realizan los análisis pertinentes por comparación.

Palabras claves: Bentonita, Gravedad Especifica, Granulometría, Hidrómetro.

3. ABSTRACT

This research work presents the analysis made to the industrial bentonite material with 95% mormorillonite, with the hydrometer granulometry method and with the automated PARIO system, with the aim of making a comparison between these two tests, in order to know this automated method. implement in Colombia.

For the above, commercial samples were acquired and the physical characteristics that contain the industrial bentonite with 95% mormorillonite were investigated; This applies to clear parameters, they are analyzed, the conditions are explained, the materials are presented, they are published, they are also indicated in the industrial and construction field. They have constant temperature and relative humidity control.

At the same time, laboratory tests are carried out with the aforementioned material, carrying out the traditional hydrometer granulometry test and the PARIO automated equipment. This was intended to obtain results for its implementation.

Likewise, five laboratory tests were carried out with the material, using the traditional method (Granulometry by Hydrometer) and the automated method (PARIO).

Finally, results and procedures for execution are included.

Keywords: Bentonite, Specific Gravity, Granulometry, Hydrometer.

4. INTRODUCCIÓN

Es de vital importancia el estudio de los diferentes tipos de suelos, ya que esto permite identificar las características primordiales. Cuando los suelos no son gruesos granulares, sino que tienen tamaños de granos pequeños no se puede hacer análisis granulométrico por mallas (tamices o mecánico), para determinar el porcentaje de peso de los diferentes tamaños de los granos de suelo. Lo apropiado es aplicar el método del hidrómetro (densímetro). Actualmente para suelos finos quizá es el ensayo de mayor uso, este se basa en que las partículas tienen una velocidad de sedimentación, relacionada con el tamaño de las mismas.⁶

Asimismo, la ley fundamental para realizar análisis granulométrico por hidrómetro por Stokes, enuncia que si una partícula esférica cae dentro del agua adquiere pronto una velocidad uniforme dependiendo del diámetro de la partícula, de su densidad y de la viscosidad del agua; este ensayo se realiza con el estándar en las normas INV E 124-07 y ASTM D422-63 (Re aprobada 1998).

Los suelos bentoníticos poseen gran capacidad de adsorción y pueden aumentar volumen al contacto con el agua presentando alta plasticidad debido al contenido de partículas finas de forma laminar en su estructura.⁷

Debido a lo anterior, este material arcilloso actualmente tiene muchas aplicaciones en el campo de la ingeniería civil, puesto que puede ser utilizado como material de sellado para la obturación de fugas en depósitos y canales, como aditivos para mortero, mejorando su resistencia mecánica y acelerando su fraguado, de igual manera se usa para la disminución de permeabilidad de los suelos, como material absorbente para contaminantes orgánicos o inorgánicos, al atrapar iones o moléculas de gas líquidas presentes en soluciones acuosas, entre otros.⁸

En Colombia no existe otra alternativa para hacer este tipo de análisis o en defecto para manejar el margen de error que puede presentar los resultados del ensayo

⁶ BADILLO Juárez y RODRIGUEZ Rico, Mecánica de suelos. Fundamentos de la mecánica de suelos. Tomo 1. Limusa Noriega Editores. Pág. 38.

⁷ DUARTE, María Carolina y ROJAS, Herman Daniel, Obtención del límite líquido y límite plástico usando el penetrometro de cono de caída, considerando los diferentes conos existentes en la literatura para un suelo bentonítico. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería, 2017. Pág. 37.

⁸ Scrib. Desarrollo e Historia de la Mecánica de Suelos [En línea]. Bogotá. [Citado 19 abril, 2018] Disponible en Internet: < <https://es.scribd.com/doc/98588051/Desarrollo-e-Historia-de-la-Mecanica-de-Suelos> >

mencionado, es por eso que se presenta la propuesta de realizar estos ensayos comparativos con el equipo automatizado Pario el cual es cien por ciento tecnológico y los datos se leen mediante un software.

Esta investigación busca implementar otra opción para el análisis de suelos en suspensión, basado en un macro proyecto, con el objetivo de determinar mediante ensayos comparativos para diferentes tipos de suelo, cuál de los dos será el más acertado en los resultados esperados.

5. GENERALIDADES

5.1. ANTECEDENTES.

Todas las obras de ingeniería civil descansan, de una u otra forma, sobre el suelo, y muchas de ellas; además, utilizan la tierra como elemento de construcción para terraplenes, diques y rellenos en general; por lo que, en consecuencia, su estabilidad y comportamiento funcional y estético estarán regidos, entre otros factores, por la conducta del material de asiento, situado dentro de las profundidades de influencia de los esfuerzos que se generan, o por la del suelo utilizado para conformar los rellenos. Si se sobrepasan los límites de la capacidad resistente del suelo, o si aún sin llegar a ellos las deformaciones son considerables, se pueden producir esfuerzos secundarios en los miembros estructurales, quizás no tomados en consideración en el diseño, productores a su vez de deformaciones importantes, fisuras, grietas, alabeo o desplomos que pueden producir, en casos extremos, el colapso de la obra o a su inutilización y abandono. En consecuencia, las condiciones del suelo como elemento de sustentación y construcción y las del cimiento como dispositivo de transición entre aquél y la estructura, han de ser siempre observadas, aunque esto se haga en proyectos pequeños fundados sobre suelos normales a la vista de datos estadísticos y experiencias locales, y en proyectos de mediana a gran importancia o en suelos dudosos, infaliblemente, a través de una correcta investigación de mecánica de suelos.

Casos mundiales en los que hizo falta la aplicación de la mecánica de suelos (estudio de suelos).

Dos de las obras de construcción de carácter monumental en el ámbito mundial donde se hizo patética la ausencia de estudios de mecánica de suelos moderna son la Torre de Pisa y el canal de Panamá. La llamada Torre Inclinada de Pisa fue comenzada por Bonno Pisano en el 1174 y terminada en la segunda mitad del Siglo XIV. Con una altura de cuarenta y cinco (45) metros y un peso total de 14,500 toneladas, su cimentación anular transmite presiones al subsuelo del orden de 5 Kg/cm². Fundada sobre capas alternadas de arena y arcilla, su inclinación comenzó a producirse desde la época de su construcción como consecuencia de presiones diferenciales de los suelos afectados, observándose en la actualidad una separación entre la vertical y el eje longitudinal de la torre de 4.90 m en su parte más alta.

Una estructura parecida construida en Venecia, de 100m de altura, se desplomó en 1902 cuando su inclinación era de apenas 0.8%. Una nueva torre, existente, fue erigida en el lugar de la antigua, con una cimentación más grande.

El primer intento por construir un canal artificial que uniese los océanos Atlántico y Pacífico fue realizado por el Ing. Francés Fernando de Lesseps, en el 1881, quien antes había llevado a cabo el Canal de Suez. Pero no fue hasta el año 1914 que el canal de navegación solucionado por los norteamericanos mediante un sistema de esclusas pudo ser puesto en servicios, después de lograr el saneamiento de la zona de la fiebre amarilla y la malaria. El costo final de la obra fue de 380 millones de dólares, suma superior a la estimada en el presupuesto. Se excavaron 315 millones de metros cúbicos de material, en los 82.5Km de longitud del canal, de los cuales 129 millones correspondieron al corte de Gaillard. La construcción se caracterizó por grandes deslizamientos en las formaciones denominadas "culebra" y "cucaracha", estando constituida esta última por arenisca arcillosa estructuralmente débil. Las fallas se siguieron produciendo años después de la inauguración del canal provocando el cierre temporal por períodos más o menos largos. La estabilidad actual de las laderas del canal plantea un problema de resistencia a largo tiempo. ⁸

Teniendo en cuenta la anterior, se puede evidenciar que el estudio de suelos es de suma importancia en cualquier obra en ingeniería civil. En la medida en que, la solución de estos problemas, a lo largo del tiempo, necesitan una salida urgente, con riesgo colapso de la estructura. Por lo tanto, lo ideal es empezar a realizar diferentes estudios de suelos entre ellos granulometría por tamizado, pero ya que por este método no se podían analizar los suelos finos se empezó con la granulometría por hidrómetro.

A continuación, se menciona un breve resumen de la historia del análisis mecánico del suelo fino.

El primer período de investigación en análisis mecánico (de 1880 a 1920) se caracteriza por técnicas de separación laboriosas como la decantación y elutriación, que fueron reemplazados en la década de 1920 por los métodos modernos de pipeta e hidrómetro. El método de la pipeta se basa en la Ley de Stokes y se ha convertido en el método estándar, mientras que el método del hidrómetro Bouyoucos es empírico y su popularidad se basa en la simplicidad y la velocidad de uso a expensas de precisión.

MÉTODOS DE ANÁLISIS MECÁNICO

Investigación temprana

La sedimentación en agua se usó tan temprano como 1708 por Houghton para separar cuantitativamente la fracción de "tierra" de arena, y científicos de finales del

siglo XIX también parecían haber utilizado la sedimentación empíricamente. Sin conocimiento específico de la Ley de Stokes (Keen, 1931), Hilgard (1892) desarrolló un elutriador; utilizó la velocidad del agua que fluye para lavarse progresivamente partículas más gruesas de una muestra en un aparato de columna, usando un microscopio para determinar el tamaño de las partículas en diferentes fracciones. Osborne (1887) y trabajadores en Alemania también usaron la medición microscópica para determinar tamaños de partículas del suelo separado por decantación, después de arbitrariamente tiempos de asentamiento elegidos, eligiendo tamaños de 1 a 0.05 mm diámetro. como arena, 0.05 a 0.01 mm diámetro como limo, y <0.01 mm diámetro. (más tarde, <0.005 mm diámetro.) como "polvo" o arcilla.

Hall (1904) puede haber sido uno de los primeros en utilizar Ley de Stokes en el método de decantación correctamente, al calcular tiempos de sedimentación para un rango de partículas tamaños hasta <2 μm , a lo que se refirió como "klay" o fracción coloidal.

Oden (1915) en Suecia también rigurosamente aplicó la Ley de Stokes a suelo mecánico análisis, en el proceso de desarrollo del "sedimento" balance, a través de "un ingenioso dispositivo que usaba una balanza suspendida en la solución de sedimentación y continuamente registró el peso del sedimento acumulado en el pan. Se obtuvieron curvas de distribución de tamaño de partícula completa de esta manera, con tamaños hasta submicrómetro rango calculado por la Ley de Stokes. Desafortunadamente, errores graves debido a las corrientes de convección bajo se descubrieron balanzas (Keen, 1931), y beneficios de la distribución completa laboriosamente recolectada curvas, a diferencia de unas pocas fracciones discretas, nublaron este proceso.

Ambos métodos de elutriación y decantación también consumen mucho tiempo, lo que requiere una separación completa de partículas. Para completar la separación por decantación, se necesitaron de 6 a 10 días para un conjunto de ocho muestras, con grandes volúmenes de suspensiones de partículas a evaporar (Osborne, 1887).⁹

⁹ W.P Miller, D.E.Radcliffe and D.M. Miller, An historical perspective on the theory and practice of soil mechanical analysis, 1988.

6. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Existen muy pocos estudios relacionados o similares al estudio de granulometría por hidrómetro, por eso se presenta esta propuesta para hacer una comparación entre el método mencionado anteriormente y el nuevo método automatizado Pario, ya que los existentes para el análisis del tamaño de partícula: el método de la pipeta y el método del hidrómetro, requieren lecturas manuales o muestreos de volúmenes de suspensión a intervalos de tiempo predefinidos de hasta 24 horas como se explica en la norma INV E 124-07. El proceso requiere tiempo, habilidad y es propenso a los errores del usuario, ya sea a partir de lecturas inexactas o un muestreo impreciso. Con cada inserción del hidrómetro o la pipeta, hay un ascenso en suspensión que puede causar alteraciones en el proceso de sedimentación.

PARIO reduce los errores, ya que no requiere la inserción de un hidrómetro o el muestreo del volumen de la suspensión con una pipeta, lo que altera el proceso de sedimentación. Al ser automático, también evita la lectura manual o el cálculo de errores. Esto da como resultado una tasa de error global de solo 3% más baja que cualquier método de análisis de tamaño de partícula convencional.

Asimismo, PARIO calcula la distribución del tamaño de partícula según la ley de Stokes, con un rango de tamaños de partícula de 63 μm a 1 μm . Cada 10 segundos, PARIO graba y envía los datos a través de usb a un computador donde se almacenan y evalúan. Los PSD continuos se derivan utilizando la ley de Stoke, el mismo proceso físico que los métodos bien establecidos, como la pipeta y el hidrómetro, pero sin la interferencia del personal del laboratorio.¹⁰

PARIO utiliza un nuevo método llamado método de presión de suspensión integral (ISP) para facilitar el funcionamiento y reducir los errores. ISP es un método para medir el cambio en la presión de la suspensión a lo largo del tiempo, así como la temperatura, para curvas PSD continuas. Igualmente, permite el funcionamiento automatizado y sin supervisión, sin interferencias del personal del laboratorio. Simplemente se debe configurar y volver 6 horas después a una medición final con todos los datos que se necesiten.

Teniendo en cuenta que este nuevo método se estudiara por primera vez en Colombia, buscamos indagar ¿Si es posible analizar y determinar el tamaño de las

¹⁰ Linked in. New method and apparatus for particle-size analysis replaces conventional operations, which require manual readings for up to 24 hours. [En línea]. Bogotá- [Citado 1 marzo, 2018]. Disponible en internet:< <https://www.linkedin.com/pulse/new-method-apparatus-particle-size-analysis-replaces-which-hertel>>

partículas de suelos bentónicos, siguiendo otro procedimiento como es el de Pario, mejorando la precisión y validez del resultado?

7. OBJETIVOS

7.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar técnicamente los resultados obtenidos por el análisis de granulometría por el método del hidrómetro y el sistema automatizado Pario para una muestra de suelo bentónico, determinando que ventajas o desventajas presenta cada uno.

7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar ensayos de laboratorio que permitan hacer una comparación entre el análisis de granulometría por medio del hidrómetro y el método automatizado Pario.
- Dar a conocer el método automatizado Pario, en las áreas de estudio de suelos en la Universidad Católica de Colombia.
- Proponer una nueva alternativa de estudio para que permita el análisis de la sedimentación gravitacional (análisis de tamaño de partículas) de un material granular fino teniendo la certeza de los resultados obtenidos.

8. JUSTIFICACIÓN

En la ingeniería civil es de vital importancia la precisión en los resultados de los tantos ensayos de laboratorio que se realizan a los diferentes tipos de suelos, presentados en las construcciones. Es de conocimiento general que el ensayo de granulometría por hidrómetro lleva muchos años empleándose, no solo en Colombia con la norma INV E 124-07, sino además en todo el mundo, especialmente Estados Unidos con la norma ASTM D422-63 (Reaprobada 1998).

Cuando se lleva a cabo este ensayo de granulometría por hidrómetro se toma el riesgo de que existan determinaciones imprecisas ya sea en el desarrollo del mismo como también en los resultados de laboratorio, porque este procedimiento es netamente manual y se deben tomar datos durante 24 horas aproximadamente.¹¹

El nuevo sistema automatizado Pario (automated particle size analysis) promete solventar estos errores puesto que este maneja un software llamado "Integral Suspension Pressure Method" (ISP), además, arroja datos precisos. Cabe aclarar que este nuevo método está basado en el método por hidrómetro siguiendo la ley de Stocke.¹²

La homogeneización de la suspensión por agitación superior dio menor reproducibilidad y menores fracciones de limo que la agitación vertical. Sin embargo, resultó que la agitación vertical debe realizarse con suficiente rigor para obtener una distribución inicial completamente homogénea. Análisis de material tamizado a <2000 μ a <200 μ dio los mismos resultados, es decir, no hubo indicios de efectos de arrastre de grandes partículas

La eliminación completa de la fracción de arena, es decir, el tamizado conduce a menos sedimento, probablemente debido a una pérdida de material fino por el proceso de tamizado. Los PSD obtenidos con el PARIO se corresponden muy bien con los resultados del método de pipeta.¹³

¹¹ Bowles Joseph. Manual de laboratorios en suelos en Ingeniería Civil. Tomo 1. McGRAW Hill. Pág,47.

¹² Meter Environment. Automated particle size analysis. [En Línea]. Bogotá. [Citado 1 marzo, 2018] Disponible en internet: < <https://www.metergroup.com/environment/products/pario/>>

¹³ Geophysical Research Abstracts. Testing the ISP method with the PARIO device: Accuracy of results and influence of homogenization technique. Vol. 19, EGU2017-9422-1, 2017

Al realizar esto se puede proporcionar información importante sobre un sistema que ofrece ventaja en la optimización del tiempo; y así la facilidad para ser utilizado en cualquier laboratorio de suelos generando confianza en la obtención de los resultados para así poder tener precisión y conocimiento en las propiedades físicas de los suelos. Cabe aclarar que este método automatizado no se maneja bajo la norma ASTM D422-63.

9. DELIMITACIÓN

9.1. ESPACIO

La mayor limitación que se encontró a lo largo de la ejecución de los ensayos, fue la disponibilidad del laboratorio, ya que los horarios disponibles en la Universidad únicamente eran en el día, sin embargo, se buscaron espacios y tiempos para elaborarlos, tanto para el ensayo Granulometría por Hidrómetro de la norma INV E 124-07, como para los ensayos con el sistema automatizado PARIO.

9.2. TIEMPO

Para realizar cada uno de los ensayos es necesario contar con el tiempo adecuado y así cumplir con la normatividad; esta indica que el contenido de agua (humedad) de las arcillas debe ser el natural y no se debe secar para no alterar el tamaño de las partículas, como también el peso específico del material según la norma técnica. (norma INV E 122)

9.3. CONTENIDO

Para la propuesta es necesario dejar claro que la limitación principal fue la variedad de materiales que maneja el país, donde fue obligatorio realizar un estudio más preciso para poder determinar si el método a implantar es útil y referente en la construcción. Lo anterior se realizó con la intención de cumplir con las indicaciones expuestas por un ente normativo como Icontec o Invias.

9.4. ALCANCE

Según lo planteado dentro de la investigación se estipuló un trabajo de cinco (05) meses, a partir de la aceptación de la investigación, donde se realizaron visitas a zonas potenciales del material a estudiar. Estos estudios son netamente académicos donde se registran resultados y posibles sugerencias para el uso del método dentro de la normativa y los laboratorios que controlan los procesos de calidad de una obra.

Este proyecto busca como resultado conocer y desarrollar un método nuevo y útil, no desarrollado aún en Colombia y así determinar los límites de una manera más precisa.

10. MARCO DE REFERENCIA

10.1. MARCO CONCEPTUAL

- Granulometría: La granulometría se define como la distribución de los diferentes tamaños de las partículas de un suelo, expresado como un porcentaje en relación con el peso total de la muestra seca. La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado tal como se determina por análisis de tamices y/o análisis granulométrico por el método del hidrómetro. ⁴
- Hidrómetro: es un instrumento que sirve para determinar la densidad relativa de los líquidos son necesidad de calcular antes su masa y volumen. Normalmente, está hecho de vidrio y consiste en un cilindro hueco con un bulbo pesado en su extremo para que pueda flotar en posición vertical basado en el principio de Arquímedes. Tiene un lastre de mercurio en su parte inferior (que le hace sumergirse parcialmente en el líquido) y un extremo graduado directamente en unidades en densidad. El nivel del líquido marca sobre la escala el valor de su densidad. ¹⁴
- PSD: Corresponde a las siglas en ingles de “particle-size distribution”, en español distribución del tamaño de la partícula.
- Bentonita: Se entiende por bentonita, aquella variedad de arcillas formada principalmente por silicatos de aluminio y otros elementos como magnesio, potasio, sodio y calcio; fácilmente atacable por los ácidos; de aspecto untuoso, se presenta en masas compactas, de color claro y muy blandas; de gran alterabilidad y capacidad de hinchamiento. ¹⁵

10.2. MARCO TEÓRICO

A continuación, se menciona el fundamento teórico en el cual se basarán los dos ensayos, análisis granulométrico por medio del hidrómetro y el método automatizado Pario.

¹⁴ Medina González, Hanoi; García Coronado, Jorge; Núñez Acosta, Daniel El método del hidrómetro: base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelo Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, vol. 16, núm. 3, 2007, pp. 19-24 Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez La Habana, Cuba Disponible en internet:< <http://www.redalyc.org/pdf/932/93216305.pdf>>

¹⁵ Ingeplan. Pliego de prescripciones técnicas particulares. [En línea]. Bogotá [Citado 10 marzo, 2018] Disponible en internet:< http://www.elorrio.eus/es-ES/Ayuntamiento/Perfil-Contratante/2014%20Proyecto%20de%20urbanizacion%20del%20vial%20y%20puente6/P1201_PPTP_284_V03.pdf>

Fundamentos del método de sedimentación.

Ley de Stokes: El método de sedimentación se basa en el análisis de la sedimentación gravitacional de partículas en un fluido. Una suspensión de suelo dispersa se transfiere a un cilindro de sedimentación, se llena hasta un volumen definido, y se agita para obtener una distribución uniforme de partículas. Después de agitar, sacudir o girar el cilindro, el fluido se detiene y las partículas en la suspensión caen con una velocidad de sedimentación que está relacionada con su tamaño. Dependiendo de la distribución del tamaño de las partículas, su concentración en cualquier profundidad de la suspensión del suelo disminuye continuamente con el tiempo, porque las partículas sedimentadas más grandes que un tamaño determinado han pasado la profundidad.

Todos estos métodos asumen que la sedimentación de las partículas minerales puede ser adecuadamente descrita por la ley de Stokes [Stokes, 1850]. Sobre esta base, el "diámetro equivalente" de una partícula se define como el diámetro de una esfera de la misma densidad que se asienta con la misma velocidad vertical en la suspensión. Las suposiciones subyacentes o las condiciones necesarias son las siguientes: (i) Las partículas son esferas rígidas y lisas, (ii) las partículas se están asentando en flujo laminar, es decir, el número de Reynolds es menor que 0,2, (iii) la suspensión de las partículas está suficientemente diluida para asegurar que las partículas no se interfieren entre sí durante la sedimentación, (iv) no hay interacción entre las partículas y el líquido, (v) el diámetro del cilindro de suspensión es grande comparado al diámetro de las partículas, (vi) todas las partículas alcanzan su velocidad terminal inmediatamente, y (vii) la densidad de la partícula es la misma para todas las partículas, es decir, independientemente del diámetro. Las partículas del suelo alcanzan su velocidad terminal casi de inmediato y la suposición (vi) queda así justificada.

La ley de Stoke describe la velocidad de sedimentación terminal v (m/s-1) de partículas esféricas en función de su diámetro D (mm).

$$v = \frac{g(\rho p - \rho sol)}{18n} D^2$$

Donde, $g = 9.81 \text{ m/s}^{-2}$, es la aceleración debida a la gravedad, ρp (kg/m^{-3}), es la densidad de las partículas y , ρsol (kg/m^{-3}), es la densidad de la solución. Como la solución se compone de sales líquidas y disueltas (dispersantes), la densidad de la solución se calcula mediante:

$$\rho_{sol} = \rho_w + \frac{msalt}{vsol}$$

Donde ρ_w (kg/m^3), es la densidad del agua pura, $msalt$ (kg), es la masa de los dispersantes añadidos y $vsol$ (m^3), es el volumen de la solución.

La pipeta y el método del hidrómetro hacen uso de mediciones de las concentraciones de sedimentos (o su densidad de suspensión equivalente) en algunas ocasiones y en profundidades predefinidas dentro del cilindro de sedimentación.

Las partículas con diámetros mayores que un cierto valor se han asentado más allá de la profundidad de medición y ya no forman parte de la suspensión anterior. El tiempo de asentamiento a una temperatura dada se puede calcular a partir de la ecuación (1). Para partículas de diámetros de 63 μm , 20 μm , 6.3 μm y 2 μm , los tiempos de asentamiento para alcanzar una profundidad de 20 cm son del orden de 10^0 , 10^1 , 10^2 y 10^3 minutos. Los diámetros corresponden en la clasificación alemana de texturas del suelo a los límites de tamaño de arena a limo grueso, limo medio, limo fino y arcilla, respectivamente, y estos tiempos de asentamiento reflejan la dependencia cuadrática de la velocidad de sedimentación sobre el diámetro de partícula.

La combinación de tamizado y el método de pipeta se acepta internacionalmente como metodología de referencia para el análisis del tamaño de partícula. Ambos métodos se basan en la medición de la densidad de partículas en una capa pequeña a una profundidad objetivo y en ciertos momentos. Ambos métodos tienen desventajas distintas. Lo que es más importante, la necesidad de lecturas manuales repetidas (método del hidrómetro) o el muestreo de volúmenes de suspensión (método de pipeta) en tiempos predefinidos hace que los métodos sean laboriosos y requiera operadores capacitados. Además, cada inserción del hidrómetro o la pipeta conduce a un levantamiento de la suspensión y puede causar alteraciones en el proceso de sedimentación. Finalmente, la evaluación de datos se basa en la simplificación de suposiciones como la linealidad en el espacio. En consecuencia, se ha informado que los resultados obtenidos por los dos métodos no siempre son idénticos. Esto hace que sea deseable reemplazarlos con una metodología totalmente automatizada, que conduce a curvas PSD altamente precisas y continuas, y es robusta en el sentido de que no se ve afectada por errores de operación y perturbaciones por lecturas o muestreo.

Algunos intentos de automatizar el método de sedimentación gravitacional se han realizado en el pasado. Zhang y Tumay [1995] presentaron un método llamado "análisis granulométrico computarizado en suspensión", en el que la presión de

suspensión durante la sedimentación se mide en dos profundidades y los datos puntuales de la PSD se calculan mediante un análisis linealizado de la diferencia de presión.

Nemes et al. [2002] sugirió automatizar el método del hidrómetro midiendo el cambio de fuerza que ejerce un cuerpo flotando en la suspensión durante la sedimentación. Kovács et al. [2004] utilizó un sistema electrónico de medición y control de pruebas, donde los cambios de densidad se registraron comparando las mediciones de nivel de suspensión y otro líquido de densidad conocida, y las mediciones se evaluaron mediante una aproximación de "tangente finita".¹⁶

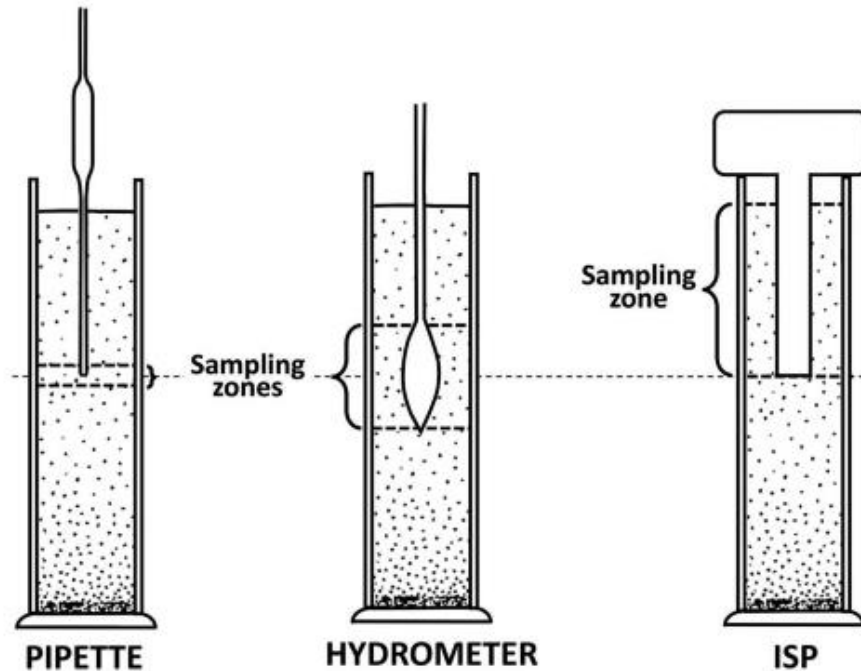
Método Automatizado Pario ISP: El objetivo de este trabajo es presentar un nuevo método para el análisis de tamaño de partículas, que llamamos método de presión de suspensión integral (ISP). Se utiliza el cambio temporal de la presión medida con alta precisión a una cierta profundidad dentro de la suspensión para derivar la PSD. Esta presión integra la espacialmente variable densidad de la suspensión por encima de la profundidad de medición. La evaluación de la serie temporal de la presión de suspensión se basa en un modelo matemático que calcula la presión en función del tiempo en función de la PSD. La PSD de una muestra se determina ajustando la serie de presión temporal simulada a la observada mediante modelado inverso utilizando la optimización global. El ISP se basa en la misma base física que los métodos de pipeta e hidrómetro, pero no perturba el proceso de sedimentación, produce una PSD continua y no requiere ninguna simplificación en el análisis

En la figura 1 que se muestra a continuación, se evidencia que Pario trabaja bajo el mismo fundamento de la ley de Stokes, como se trabaja en pipeta e hidrómetro.¹⁷

¹⁶ TECHNICAL PAPER; THE OF TYPE, CONCETRATION AND VOLUME OF DISPERSING AGENT ON THE MAGNITUDE OF THE CLAY CONTENT DETERMINED BY THE HYDROMETER ANALYSIS Journal of the South African, Institution of Civil Engineering, ISSN 1021-2019, Vol 58 No 4, December 2016, Pages 48–54, Paper 1376

¹⁷ AGUPUBLICATIONS, Water Resources Research, The integral suspension pressure method (ISP) for precise particle-size analysis by gravitational sedimentation. Article10.1002/2016WR019830. Pág. 1-9.

Figura 1. . Representación esquemática del dominio de medición del método de pipeta y el método de ISP



Fuente: (Meter Environment. Automated particle size analysis).2018.

10.3. MARCO HISTÓRICO

George Bouyoucos y el hidrómetro.

Durante la década de 1920, George Bouyoucos venía estudiando el tamaño de partícula del suelo. Él desarrolló un método, usando mediciones de calor de humectación, o estimación del "coloide" del suelo contenido, pensado en ese momento para representar una muy fracción fina y altamente reactiva del suelo. Este enfoque, junto con técnicas de adsorción de agua, dio estimaciones de coloide contenido que concuerda con los datos de intercambio de base (catión), pero pronto se reconoció que dependía del tipo de coloide presente, aunque la identidad de los minerales de arcilla no sería descubierta hasta la década de 1930. Sedimentación parecía ser la forma de cuantificar el contenido real de clases de tamaño de partícula. En 1927 Bouyoucos adaptó un hidrómetro de densidad para medir las concentraciones de arcilla suspendida en un cilindro de sedimentación. Calibró el

vástago del hidrómetro usando suspensiones de arcilla conocidas y encontraron un buen acuerdo entre lecturas de hidrómetro tomadas después de 15 sedimentación de lluvia y el contenido de coloides por el calor de la humectación, aunque ambos conjuntos de valores parecen ser altos (Bouyoucos, 1928). Para entonces, se había desarrollado un hidrómetro especial y comercializado, junto con la taza y el mezclador desconcertados para la muestra dispersión. En 1928, Bouyoucos aplicó por primera vez la Ley Stokes al método del hidrómetro, pero desafortunadamente utilizó una fórmula y la profundidad de asentamiento incorrecta (suponiendo que hidrómetro midió una densidad promedio en todo el cilindro). Él racionalizó el largo asentamiento calculado veces para arcilla (4 horas para partículas $<5 \mu\text{m}$) y "coloides" (24 horas para partículas $<2 \mu\text{m}$) en comparación con su lectura de 15 minutos suponiendo que "el material coloidal puede variar tremendamente en tamaño de partículas, y, además, cualquier nombre se puede dar (a varias clases de tamaño) que uno desee (Bouyoucos, 1928).

Comparación de los métodos de pipeta e hidrómetro

Con la creciente popularidad del método del hidrómetro debido a su aclamada rapidez y facilidad de operación, Bouyoucos intentó colocar su método en una base más sólida comparándolo con el método de la pipeta, que había sido adoptado en 1930 como el método estándar para análisis mecánico por la Sociedad Internacional de Suelos Ciencia. Usando un tiempo de sedimentación de 1 hora para arcilla $<5 \mu\text{m}$ y 2 horas para los coloides $<2 \mu\text{m}$, encontró el hidrómetro los valores estuvieron de acuerdo "muy bien" con las determinaciones de la pipeta, explicando las texturas un poco más finas dadas por el hidrómetro como muy probablemente debido a problemas de dispersión (Bouyoucos, 1932). Él refuta a los que critican su método como no seguir "ciertas leyes físicas" presentando datos que muestran un acuerdo entre laboratorios pobre de la pipeta datos del método, aunque el hidrómetro no probado de manera similar para determinar su precisión. A pesar de su reconocimiento de que el hidrómetro "puede no ser tan preciso" en la medición de arcilla fina ($<2 \mu\text{m}$), uno siente su determinación de defender el hidrómetro en el aparente conflicto con los defensores de la pipeta (Bouyoucos, 1932). Veinte años después, Bouyoucos publicó una "re calibración" del método del hidrómetro, esencialmente otra comparación con datos de pipeta en un grupo de 17 suelos (Bouyoucos, 1951). Este estudio, aún citado en la investigación actual literatura y manuales de laboratorio, reafirma el acuerdo de los dos métodos que usan el nuevo tamaño de partícula definición de arcilla como $<2 \mu\text{m}$, cambiada de $5 \mu\text{m}$ en 1938. Un examen detallado de los datos muestra que el 2-horas lectura de hidrómetro utilizada para la determinación de arcilla sobreestima el contenido de arcilla en un

5 a 10% en la mitad de los suelos, particularmente aquellos con alto contenido de limo.

Paul Day finalmente puso el método del hidrómetro en una empresa equilibrio físico mostrando la "profundidad efectiva" en que el hidrómetro mide la densidad de suspensión, enmendando el trabajo teórico anterior de Casagrande con el hidrómetro hecho en Alemania en la década de 1930. Este trabajo confirmó el acuerdo de hidrómetro lecturas con determinaciones de pipeta cuando la Ley de Stokes fue utilizado con la profundidad de asentamiento correcta (Day, 1953) y condujo a recomendaciones de 10 a 12 horas de establecimiento para $<2 \mu\text{m}$ tamaños, que fueron adoptados por la Sociedad de la Ciencia del Suelo de los Estados Unidos y la Sociedad Estadounidense de Materiales de Prueba (Day, 1956).⁹

10.4. MARCO LEGAL

En el presente trabajo se realizarán análisis de granulometría por medio del hidrómetro, los cuales se llevarán bajo la norma INVIAS E-124, esta pertenece a la sección 100- Suelos. A demás se realizarán ensayos con el método automatizado Pario, el cual trabaja bajo la norma ASTM D-422 (Re aprobada).^{18 19}

¹⁸ INVIAS. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro. Bogotá. Norma Invias E124-13. Año 2013

¹⁹ ASTM. Standard test Method for Particle-size analysis of soils. Bogotá. Norma ASTM D 422 (Reaprobada 1988). Año 1998.

11. ESTADO DEL ARTE

Teniendo en cuenta que la granulometría por hidrómetro ha sido de gran importancia en la investigación de suelos. Al identificar sus componentes finos, la mayoría de las investigaciones del tema mencionado están enfocadas en reconocimiento microscópico de diversos tipos de materiales fino, como lo son el limo y la arcilla comúnmente encontrados; como es el caso del artículo “SHORTCOMINGS IN THE ESTIMATION OF CLAY FRACTION BY HYDROMETER”, artículo que centra su estudio en el comportamiento de la arcilla y de su dispersión con un análisis visual por medio de microscopio.

Todas las arcillas probadas mostraron cierta falta de dispersión. Cada muestra mostró instancias de arcilla permaneciendo unida a partículas más grandes o formando aglomeraciones con otras partículas de arcilla.

En algunos casos, la falta de dispersión era bastante pequeño, pero en algunos casos una sustancia fracción de las partículas de arcilla parecía ser sin dispersar. Esto sugiere que no será razonable buscar algún factor universal por el cual los resultados del hidrómetro podrían ser corregidos. Parece que las predicciones basadas en fracción de arcilla determinada por el procedimiento de SANS 3001 GR3 puede ser muy poco confiable para algunos suelos. Desde el SANS 3001 procedimiento es bastante similar al de muchos otros países, es probable que este problema puede ser generalizado.^{19 20}

Por otro lado, el artículo “THE OF TYPE, CONCETRATION AND VOLUME OF DISPERSING AGENT ON THE MAGNITUDE OF THE CLAY CONTENT DETERMINED BY THE HYDROMETER ANALYSIS” este artículo concentra su análisis a los agentes dispersantes y sus incidencias en el análisis de granulometría por hidrómetro y argumenta que el tamaño puede variar dependiente del tipo de dispersante.

Dado que el contenido de arcilla de un suelo se utiliza para determinar su actividad, y que a su vez se utiliza para propósitos de diseño, es muy importante determinar con precisión el contenido de arcilla de los suelos. Las determinaciones inexactas de contenido de arcilla tienen resultó en soluciones de diseño inapropiadas, que incluso han llevado a daños inaceptables a las estructuras. En Sudáfrica hay un problema con la determinación precisa del contenido de arcilla de los suelos. Esta dificultad, que fue expresado formalmente por Jacobsz y Day (2008), refuerza la

²⁰ SHORTCOMINGS IN THE ESTIMATION OF CLAY FRACTION BY HYDROMETER – differences the estimation de arcillas fraccion por hidrometro TECHNICAL PAPER, Journal of the South African, Institution of Civil Engineering, Vol 58 No 2, June 2016, Pages 14–24, Paper 1232

necesidad de investigar todas las variables de la prueba del hidrómetro con una visión para mejorar su precisión y tal vez para estandarizar la prueba a nivel nacional, y posiblemente, en el futuro, internacionalmente. ²¹

Uno de los propósitos es profundizar el estudio de estos materiales finos en Colombia; se han indagado e investigado de alguno estudios como los son “LA IMPORTANCIA DE LOS ESTUDIOS INTERDISIPLINAR EN LA CARACTERIZACION DE DOS TIPOS DE ARCILLAS EN LA CANTARA DE SAN JOAQUIN, NEMOCON-CUNDINAMARCA (COLOMBIA)” y CARACTERIZACION DE ARCILLAS EMPLEADAS EN PASTA CERAMICA PARA LA ELABORACION DE LADRILLOS EN LA ZONA DE OCAÑA SANTANDER, NORTE DE SANTANDER” logrando identificar en los dos estudios mencionados la caracterización granulométrica, química y mineralógicamente de los diferentes tipos de arcilla, optimizando sus propiedades mecánicas ya sea para uso constructivo o uso artesanal. Con el sistema PARIO se lograría obtener resultados mucho más precisos que logren aportar a la investigación de las arcillas de los suelos Geológicos en Colombia. ³

²¹ Norma SANS 3001-GR32014 – SOUTH AFRICAN NATIONAL STANDARD

12. METODOLOGÍA

El primer paso dentro de la metodología es la formulación del proyecto, donde se define con claridad cuál es la problemática que presentamos respecto a los análisis de granulometría por el método del hidrómetro y que actividades son necesarias para la solución de la necesidad.

Ante la formulación realizada y teniendo la claridad respecto a las actividades que se necesitan, definimos los costos básicos o necesarios para saber la viabilidad del proyecto.

Para la ejecución del proyecto de investigación, se manejó una metodología teórico-práctica; inicialmente se realizó una inversión de tiempo para la revisión de la información existente, lo que permitió establecer las pautas de trabajo y cronograma a ejecutar. Siguiendo las necesidades que se presentaron para el proyecto de grado, se desarrollaron 3 etapas donde se agruparon las partes más relevantes de la investigación de la siguiente manera:

ETAPA 1

Recolección e información e investigación referente a estudios realizados con los métodos propuestos, debido a que es comparación entre dos métodos se necesitan referencia de estudios antiguos y similares sobre el método de granulometría por hidrómetro. Y al ser un método de estudio ya realizado en Estados Unidos, se ve la necesidad de tener una referencia internacional del proceso y objetivos que se plantean en el proyecto, con la necesidad de tener documentos base para comenzar el trabajo a realizar.

Referencia geológica del material seleccionado: Teniendo el método de ensayo se buscó información nacional referente al material seleccionado "bentonita industrial", donde con bases geológicas definimos que utilidad se le puede dar al estudio realizado.

ETAPA 2

Partiendo de las necesidades específicas, consideramos empezar con la obtención de la maquina Pario, esta pueda tener una duración de dos meses para los ensayos propuestos, haciendo una importación del mismo; es indispensable la contratación de personal calificado, con experiencia para los estudios pertinentes, cabe aclarar que este personal se debe capacitar para manejar el nuevo dispositivo.

Adicional a la compra del equipo, se recopiló muestras representativas del material designado para el estudio (Bentonita), obteniendo ejemplares que se comercializaban en Colombia con la intención de tener las características más cercanas a la realidad. Luego de la selección del material, se realizaron los ensayos para cada tipo de suelo asignado y se hizo la contratación para ensayos de laboratorio para cada método.

ETAPA 3

Estudio e interpretación de resultados: Registrando los resultados registrados por el laboratorista se plantea un análisis técnico, donde se pudo observar y se comparó la ejecución y el método de ensayo en busca del más conveniente.

Conclusiones y comentarios del proceso: Ya teniendo los estudios técnicos se plantean los comentarios y sugerencias respecto al proceso ejecutado y que viabilidad podrá tener en Colombia.

13. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

13.1. ANÁLISIS GRANULOMETRÍA POR MEDIO DEL HIDRÓMETRO.

A continuación, se realizará una breve descripción sobre el ensayo realizado para por medio del hidrómetro para análisis granulométrico.

13.1.1. EQUIPO.

- Balanza. Debe tener una capacidad suficiente y una sensibilidad de 0.1%.
- Tamices – De 4.75 mm (No.4), de 425 μm (No 40) y de 75 μm (No.200).
- Tamizadora mecánica.
- Aparato agitador.
- Hidrómetro. Para estos ensayos se utilizó un hidrómetro 152 H, va de 5 a + 60. Se identifica como 152 H y está calibrado para el supuesto que el agua destilada tiene gravedad específica de 1.00 a 20° C (68° F) y que el suelo en suspensión tiene una gravedad específica de 2.65.
- Cilindro de vidrio para sedimentación: De unos 460 mm (18") de alto, y 60 mm (2.5") de diámetro y marcado para un volumen de 1000 ml a 20° C (68°F). El diámetro interior debe ser tal que la marca de 1000ml esté a $360 \pm 20\text{mm}$ ($14 \pm 1.0"$) desde el fondo, en el interior del cilindro.
- Termómetro de inmersión – Con apreciación de 0.5° C (0.9° F).
- Cronómetro o reloj.
- Horno – capaz de mantener temperaturas uniformes y constantes hasta $110^\circ \pm 5^\circ \text{C}$ ($230^\circ \pm 9^\circ \text{F}$).
- Baño de Agua o Cuarto de temperatura constante.
- Vaso de vidrio (Beaker).
- Varilla de vidrio.
- Agente Dispersante. Una solución de hexametáfosfato de sodio; se usará en agua destilada o desmineralizada en proporción de 40 g de hexametáfosfato de sodio por litro de solución.
- Agua

13.1.2. CALIBRACIÓN DEL HIDRÓMETRO.

El hidrómetro debe ser calibrado para determinar la profundidad efectiva en términos de lectura de hidrómetro, como en estos ensayos se utilizó el hidrómetro 152 H, la profundidad efectiva se obtiene de la siguiente tabla.

Tabla 1. Valores de profundidad efectiva, basados en hidrómetro y cilindro de tamaños especificados.

Hidrómetro 151 H		Hidrómetro 152 H			
Lectura real del Hidrómetro	Profundidad efectiva, L, mm	Lectura real del Hidrómetro	Profundidad efectiva, L, mm	Lectura real del Hidrómetro	Profundidad efectiva, L, mm
1	163.0	0	163	31	112
1.001	160.0	1	161	32	111
1.002	158.0	2	160	33	109
1.003	155.0	3	158	34	107
1.004	152.0	4	156	35	106
1.005	150.0	5	155		
1.006	147.0	6	153	36	104
1.007	144.0	7	152	37	102
1.008	142.0	8	150	38	101
1.009	139.0	9	148	39	99
1.010	137.0	10	147	40	97
1.011	134.0	11	145	41	96
1.012	131.0	12	143	42	94
1.013	129.0	13	142	43	92
1.014	126.0	14	140	44	91
1.015	123.0	15	138	45	89
1.016	121.0	16	137	46	88
1.017	118.0	17	135	47	86
1.018	115.0	18	133	48	84
1.019	113.0	19	132	49	83
1.020	110.0	20	130	50	81
1.021	107.0	21	129	51	79
1.022	105.0	22	127	52	78
1.023	102.0	23	125	53	76
1.024	100.0	24	124	54	74
1.025	97.0	25	122	55	73
1.026	94.0	26	120	56	71
1.027	92.0	27	119	57	70
1.028	89.0	28	117	58	68
1.029	86.0	29	115	59	66
1.030	84.0	30	114	60	65
1.031	81.0				
1.032	78.0				
1.033	76.0				
1.034	73.0				
1.035	70.0				
1.036	68.0				
1.037	65.0				
1.038	62.0				

Fuente: INVIAS. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro. Bogotá. Norma Invias E124-07. Año 2013

13.1.3. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.

El tamaño aproximado de la muestra que se debe usar varia con el tipo de suelo que va a ser ensayado, para estos ensayos de utilizó aproximadamente 60 g. La masa exacta de la muestra se debe tener determinada, mediante el ensayo de gravedad específica el cual se encuentra en el anexo 1.

13.1.4. PROCEDIMIENTO

- Si se conoce la corrección por defloculante y punto cero, Cd y la corrección por menisco, Cm, se debe apuntar los valores para los respectivos cálculos más adelante.
- Se determina la gravedad específica de los sólidos, Gs.
- Ya que la muestra es secada al horno, se deben apuntar lo pesos correspondientes para los respectivos cálculos, seguido se agrega el agente dispersante a la muestra de suelo seco.
- Luego se lleva la muestra al vaso de dispersión, lavando cualquier residuo que quede en la capsula con agua destilada.
- Seguido de esto se lleva la suspensión al cilindro de sedimentación de 1 litro. Esta debe ser llevada a la temperatura que se espera tendrá el laboratorio durante el ensayo.
- Un minuto antes de comenzar el ensayo, se tapa el cilindro de sedimentación con la mano o con un tapón adecuado, se agita la suspensión durante varios

segundos, para remover los sedimentos del fondo y lograr que la suspensión sea uniforme, esta agitación se debe llevar durante un minuto, con movimientos hacia arriba y hacia abajo. Otra alternativa para la suspensión de la misma puede ser agitada mediante un agitador manual, durante 1 minuto.

- Al terminar el minuto de agitación, se coloca el cilindro sobre una mesa. Se pone en marcha el cronometro, si hay espuma se debe quitar con un pedazo de papel absorbente. En seguida se introduce lentamente el hidrómetro en la suspensión (al introducirlo y extraerlo se debe tener cuidado para no alterar la suspensión).
- Una vez hecho esto se deben anotar las dos primeras lecturas de hidrómetro, al minuto y a los dos minutos de haber colocado el cilindro sobre la mesa (estas lecturas se deben realizar en el tope del menisco), ya realizadas esas dos lecturas, se extrae cuidadosamente el hidrómetro de la suspensión y se coloca en un cilindro graduado con agua destilada, se debe tener especial cuidado para no dejar el bulbo mucho tiempo en la suspensión ya que el material se puede adherir a este y puede causar errores en el ensayo.
- Luego de esto se introduce el hidrómetro nuevamente y se realizan lecturas a los 5, 15, 30, 60, 120, 250 y 1440 minutos del inicio de la suspensión, en cada una de las lecturas se debe tener especial cuidado al extraer el hidrómetro.
- Después de cada lectura, se debe tomar la temperatura, ya que los cambios de temperatura de la suspensión durante el ensayo afectan los resultados, para que no haya cambios de temperatura bruscos se debe mantener el cilindro alejado de hornos, rayos de sol o ventanas abiertas. Para que controlar los efectos de la temperatura se puede colocar el cilindro graduado en baño maría (esto en los primeros minutos de haber empezado el ensayo).

13.1.5. CORRECCIÓN DE LAS LECTURAS DEL HIDRÓMETRO.

- Antes de iniciar con los cálculos, las lecturas de hidrómetro se deben corregir por menisco, temperatura, defloculante y punto cero.
- **Corrección por menisco (Cm):** Los hidrómetros se calibran para leer correctamente a la altura de la superficie del líquido. La suspensión de suelo no es transparente y no es posible leer directamente a la superficie del líquido; por lo tanto, la lectura del hidrómetro se debe realizar en la parte superior del menisco. La corrección por menisco es constante para un hidrómetro dado, y se determina introduciendo el hidrómetro en agua destilada o desmineralizada y observando la altura a la cual el menisco se levanta por encima de la superficie del agua. Valores corrientes de Cm son:
Hidrómetro tipo 152 H

$$C_m = 1.0 \text{ g/litro}$$

- **Corrección por temperatura (Ct):** En el caso de no disponer de un baño de agua o de un cuarto de temperatura constante que permita realizar toda la prueba a 20°C, a cada una de las lecturas de hidrómetro se debe aplicar también un factor de corrección por temperatura, el cual debe sumarse algebraicamente a cada lectura. Este factor puede ser positivo o negativo, dependiendo de la temperatura de la suspensión en el momento de realizar cada lectura. El valor del factor de corrección por temperatura para cada lectura de hidrómetro se obtiene de la siguiente tabla.

Tabla 2. Valores de Ct para corrección por temperatura de las lecturas del hidrómetro.

Temp. °C	Ct	
	Hidrómetro graduado en	
	Densidad (g/cm ³) x 10 ³	Concentración (g/litro)*
10	-1.3	-2.0
11	-1.2	-1.9
12	-1.1	-1.8
13	-1.0	-1.6
14	-0.9	-1.4
15	-0.8	-1.2
16	-0.6	-1.0
17	-0.5	-0.8
18	-0.3	-0.5
19	-0.2	-0.3
20	0.0	0.0
21	0.2	0.3
22	0.4	0.6
23	0.6	0.9
24	0.8	1.3
25	1.0	1.7
26	1.3	2.0
27	1.5	2.4
28	1.8	2.9
29	2.0	3.3
30	2.3	3.7

Fuente: INVIAS. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro. Bogotá. Norma Invias E124-07. Año 2007

- **Corrección por agente de dispersión y por desplazamiento del punto cero (Cd):** Los granos de suelos muy finos en suspensión tienden normalmente a flocular y se adhieren de tal forma que tienden a precipitarse juntos. Por lo tanto, es necesario añadir a las muestras un agente de disgregación para evitar la floculación durante el ensayo. La adición de un agente defloculante produce aumento en la densidad del líquido y obliga a realizar una corrección a la lectura observada en el hidrómetro observado. Así mismo, como la escala de cada hidrómetro ha sido graduada para registrar una lectura cero o lectura inicial a una temperatura base, que generalmente es 20° C (68° F), existirá un desplazamiento del punto cero, y

las lecturas de hidrómetro observadas también deberán corregirse por este factor.

El procedimiento para determinar la corrección por defloculante y punto cero consistirá en los pasos siguientes: Se selecciona un cilindro graduado de 1000 ml de capacidad y se llena con agua destilada o desmineralizada con una cantidad de defloculante igual a la que se empleará en el ensayo. Si en el ensayo no se va a utilizar defloculante, llénese el cilindro sólo con agua destilada o desmineralizada. En este caso la corrección será solamente por punto cero. Se realiza, en la parte superior del menisco, la lectura del hidrómetro y, a continuación, se introduce un termómetro para medir la temperatura de la solución. Se calcula la corrección por defloculante y punto cero (Cd) mediante la fórmula:

$$Cd = t' + Cm \pm Ct$$

Donde:

t' : lectura del hidrometro, en agua con defloculante unicamente.

Cm : Corrección por menisco

Ct : Corrección por temperatura, sumada algebraicamente.

13.1.6. CÁLCULOS

- **Lectura de hidrómetro corregida:** Se calculan las lecturas de hidrómetro corregidas por menisco (R), sumándole a cada lectura de hidrómetro no corregida (R'), la corrección por menisco Cm . o sea:

$$R = R' + Cm$$

- **Cálculo del diámetro de las partículas (D):** El diámetro máximo, D , de las partículas en suspensión correspondiente el porcentaje indicado por una lectura en el hidrómetro, debe ser calculado usando la Ley de Stokes. De acuerdo con la Ley de Stokes:

$$D = K \sqrt{\frac{l}{T}}$$

Donde:

T = Tiempo transcurrido en minutos.

L = Profundidad efectiva en mm

$$K = \sqrt{\left[\frac{30h}{981(Gs - 1)gw} \right]}$$

K : constante para facilitar el cálculo la cual depende del valor de la gravedad específica del suelo y de la temperatura de la suspensión.

Tabla 3. Valores del K para el cálculo del diámetro de Partículas.

Temperatura °C	Gs								
	2.45	2.5	2.55	2.6	2.65	2.7	2.75	2.8	2.85
16	0.0049	0.0048	0.0047	0.0046	0.0045	0.0045	0.0044	0.0044	0.0043
17	0.0048	0.0047	0.0046	0.0046	0.0045	0.0044	0.0044	0.0043	0.0042
18	0.0047	0.0047	0.0046	0.0045	0.0044	0.0044	0.0043	0.0042	0.0042
19	0.0047	0.0046	0.0045	0.0044	0.0044	0.0043	0.0043	0.0042	0.0041
20	0.0046	0.0045	0.0045	0.0044	0.0043	0.0043	0.0042	0.0041	0.0041
21	0.0046	0.0045	0.0044	0.0043	0.0043	0.0042	0.0042	0.0041	0.0040
22	0.0045	0.0044	0.0044	0.0043	0.0042	0.0042	0.0041	0.0040	0.0040
23	0.0045	0.0044	0.0043	0.0042	0.0042	0.0041	0.0041	0.0040	0.0039
24	0.0044	0.0043	0.0043	0.0042	0.0041	0.0041	0.0040	0.0040	0.0039
25	0.0044	0.0043	0.0042	0.0041	0.0041	0.0040	0.0040	0.0039	0.0039
26	0.0043	0.0042	0.0042	0.0041	0.0040	0.0040	0.0039	0.0039	0.0038
27	0.0043	0.0042	0.0041	0.0041	0.0040	0.0039	0.0039	0.0038	0.0038
28	0.0042	0.0041	0.0041	0.0040	0.0040	0.0039	0.0038	0.0038	0.0037
29	0.0042	0.0041	0.0040	0.0040	0.0039	0.0039	0.0038	0.0037	0.0037
30	0.0041	0.0041	0.0040	0.0039	0.0039	0.0038	0.0038	0.0037	0.0037

Fuente: INVIAS. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro. Bogotá. Norma Invias E124-07. Año 2007

Tabla 4. B Valores del K para el cálculo del diámetro de partículas.

Temperatura °C	Gravedad específica de las partículas de suelo								
	2.45	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80	2.85
16	0.01510	0.01505	0.01481	0.01457	0.01435	0.01414	0.01394	0.01374	0.01356
17	0.01501	0.01486	0.01462	0.01439	0.01417	0.01396	0.01376	0.01356	0.01338
18	0.01492	0.01467	0.01443	0.01421	0.01399	0.01378	0.01359	0.01339	0.01321
19	0.01474	0.01449	0.01425	0.01403	0.01382	0.01361	0.01342	0.01323	0.01305
20	0.01456	0.01431	0.01408	0.01386	0.01365	0.01344	0.01325	0.01307	0.01289
21	0.01438	0.01414	0.01391	0.01369	0.01348	0.01328	0.01309	0.01291	0.01273
22	0.01421	0.01397	0.01374	0.01353	0.01332	0.01312	0.01294	0.01276	0.01258
23	0.01404	0.01381	0.01358	0.01337	0.01317	0.01297	0.01279	0.01261	0.01243
24	0.01388	0.01365	0.01342	0.01321	0.01301	0.01282	0.01264	0.01246	0.01229
25	0.01372	0.01349	0.01327	0.01306	0.01286	0.01267	0.01249	0.01232	0.01215
26	0.01357	0.01334	0.01312	0.01291	0.01272	0.01253	0.01235	0.01218	0.01201
27	0.01342	0.01319	0.01297	0.01277	0.01258	0.01239	0.01221	0.01204	0.01188
28	0.01327	0.01304	0.01283	0.01264	0.01244	0.01225	0.01208	0.01191	0.01175
29	0.01312	0.01290	0.01269	0.01249	0.01230	0.01212	0.01195	0.01178	0.01162
30	0.01298	0.01276	0.01256	0.01236	0.01217	0.01199	0.01182	0.01165	0.01149

Fuente: INVIAS. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro. Bogotá. Norma Invias E124-07. Año 2007

- **Cálculo del porcentaje más fino al tamaño “D” o Porcentaje de suelo en suspensión:** Las lecturas del hidrómetro deben corregirse aplicando todas las correcciones, (por menisco, por temperatura si es pertinente y por defloculante y punto cero de las escalas de hidrómetro). El porcentaje de suelo en dispersión determinado a partir de la lectura del hidrómetro corregida está afectado por la gravedad específica del suelo, las escalas de los hidrómetros están elaboradas para un valor de G de 2.65. Para calcular el porcentaje de partículas de diámetro más fino que el correspondiente a

una lectura de hidrómetro dada, se utiliza la siguiente fórmula:
Para hidrómetro 152H: ²²

$$\% \text{más fino} = \frac{R_{\text{corregida}} * a}{W_o} * 100$$

$$a = \frac{2.65 - 1.000}{2.65} * \frac{G_s}{G_s - 1.000}$$

Donde:

G_s = Gravedad específica de los sólidos

W_o = Masa de la muestra del suelo secado al horno

a = Factor de corrección por gravedad específica.

Tabla 5. Valores de a para diferentes gravedades específicas.

Gravedad Especifica G_s	Constante a
2.95	0.94
2.85	0.96
2.75	0.98
2.65	1
2.55	1.02
2.45	1.05
2.35	1.08

Fuente: INVIAS. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro. Bogotá. Norma Invias E124-07. Año 2007

NOTA: Se referencian las dos normas porque en la actualización no se presentan los cálculos para las correcciones, mientras que en la versión de 2007 está completa.

13.2. ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS- PARIO

A continuación, se realizará una breve descripción sobre todo el sistema pario, desde componentes, especificaciones técnicas y configuración, preparación de la muestra, cuidado y almacenamiento y por último resultados (evaluación y exportación de datos) del mismo.

13.2.1. Componentes, especificaciones técnicas y configuración del sistema PARIO.

El sistema Pario se conforma por un sensor de presión y temperatura, eje de medición, cabeza de medición, conexión vía USB, dos cilindros de sedimentación estándar y tapón de caucho.

²² Manual User. Meter Environment. Automated particle size analysis. [En Línea]. Bogotá. [Citado 12 Septiembre, 2018] Disponible en internet: <
<https://www.metergroup.com/environment/products/pario/>>

Figura 2. Componentes sistema Pario.



Fuente: (Group Meter Enviroment) 2017.

El sistema PARIO maneja dos rangos de tiempo en medición uno de ellos es de 6 a 8 horas para partículas de $2 \mu\text{m}$ y el otro rango es de hasta 24 horas para partículas de $1 \mu\text{m}$, (como se hace normalmente con el método convencional de granulometría por Hidrómetro), tiene un intervalo de medida de cada 10 segundos, registrando Tiempo, Presión y Temperatura.

El error aproximado de detección de estas fracciones es de $\pm 3 \%$, teniendo en cuenta que con el método convencional de granulometría por Hidrómetro se puede llegar a tener un error de hasta el 10%.

También tiene una precisión en la medición de presión de 0.1 Pa. La masa típica de las partículas debe estar entre 25-40 gramos por litro, si una muestra tiene alto contenido de arenas se podría trabajar con una cantidad igual a 40 g de la misma para que el equipo pueda hacer bien su trabajo. Si es una muestra que tiene altos contenidos de arcilla, se deberá trabajar con una cantidad menor cerca a los 25 g.

El rango de temperatura de operación está entre 5°C a 35°C y solo admite un máximo de variación de temperatura de 3°C , se puede usar la inmersión en baño de maría o cualquier otro método para control de temperatura, si no se cuenta con alguno de estos recursos, se debe mantener el equipo alejado de ventanas, de radiación directa y lugares donde haya corrientes de aire que puedan hacer que la temperatura varíe considerablemente.

El volumen de suspensión es estándar es de 1 lt.

Este sistema necesita estar conectado a un computador durante el tiempo de operación que necesite ya sea de 6 a 24 horas, ya que de este tomara la fuente de alimentación y es donde almacenara los datos, teniendo en cuenta que se debe tener instalado el software que maneja el sistema.

Al igual que en el método convencional de Granulometría por Hidrómetro, este requiere que se haga un análisis de arenas (gravedad específica) para que este equipo pueda manejar internamente porcentajes para los respectivos cálculos. Además de todo lo mencionado anteriormente el dispositivo debe colocarse sobre una superficie horizontal, libre de vibraciones y sólida para evitar errores en los resultados.

Figura 3. Sensor de presión y temperatura.



Fuente: (Group Meter Environment) 2017.

Tabla 6. Especificaciones Técnicas Sistema PARIO

Especificaciones Técnicas Sistema PARIO	
Rango de tamaños de partículas	63 μm a 1 μm^*
Error aprox. en la detección de fracción de masa	$\pm 3 \%$
Precisión de la medición de presión	0.1 Pa
Masa típica de partículas	25 - 40 g /L
Duración típica de las mediciones	6 horas
Intervalo de medida	10 s
Rango de temperatura de operación	5 $^{\circ}\text{C}$ a 35 $^{\circ}\text{C}$
Máx. cambio de temperatura tolerable durante la medición	3 $^{\circ}\text{C}$
Volúmen de la suspensión	1000 cm^3
Altura del cilindro de sedimentación	35 cm

Fuente: (Valencia & Huertas) 2018.

Adicionalmente, es vital considerar ciertos ajustes básicos que son importantes para saber el funcionamiento. Este equipo maneja un led en su cabezal de mediciones, en donde muestra tres colores, blanco, azul y rojo los cuales tienen un significado para entender el funcionamiento del equipo, a continuación, se muestra un resumen de los episodios que se pueden presentar.

Tabla 7. Indicaciones LED en cabezal de medición.

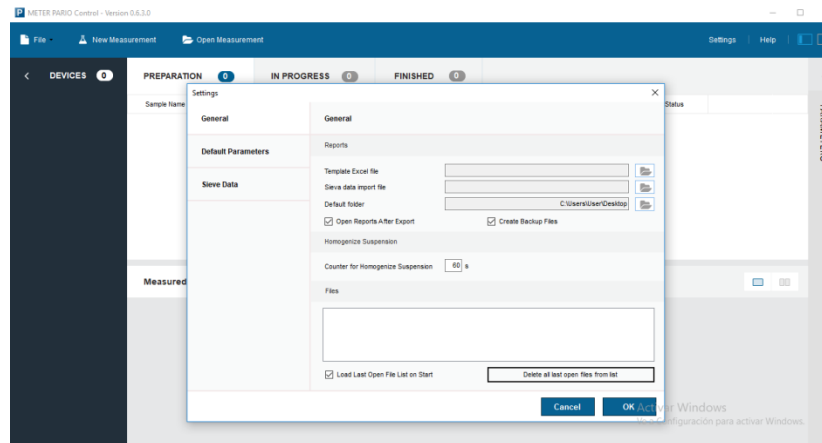
Indicaciones LED en Cabezal de medición.		
Blanco	Flash, 3x	PARIO© ha sido detectado por el PC.
Blanco	Permanente	PARIO© ha sido detectado por el Software. PARIO Control. El dispositivo puede ser configurado para realizar las mediciones.
Blanco	Flash	PARIO© está listo para medir.
Azul	Pulsos	PARIO© está en proceso de medición.
Azul	Permanente	PARIO© ha terminado la medición.
Rojo	Permanente	Actualizar Firmware (Software)
Rojo	Flash	Error en el Hardware. Contáctese al distribuidor.

Fuente: (Valencia & Huertas) 2018.

Una vez se tiene claro los parámetros iniciales y una vez instalado el software del dispositivo, se deben tener en cuenta ciertos parámetros iniciales que se deben introducir en el software.

En el software PARIO Control aparecerá en una nueva ventana. En esta ventana, primero abre el Punto de menú "Configuración" en la parte superior derecha. En la ventana de configuración, puede establecer varios parámetros, que serán aplicables para todas las mediciones individuales posteriores. Los ajustes se clasifican en tres registros: <General>, en donde se guardan los datos, <Contador para homogeneizar suspensión> en este espacio se coloca el tiempo de agitación el cual se describirá más adelante.

Figura 4. Ventana de configuración sistema PARIO

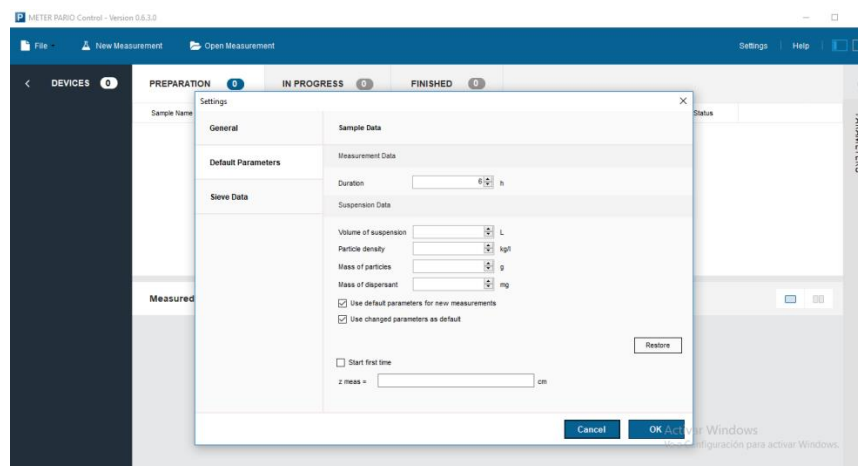


Fuente: (Group Meter Enviroment. Manual del Usuario) 2017.

<Parámetros por defecto> en este espacio se colocan los datos como duración, tamaño de partículas que se desea estudiar, tiempo del ensayo, volumen de la suspensión, densidad de partículas (gravedad específica), peso de las partículas y por último la masa del dispersante.

La duración y la densidad de las partículas se dan como valores por defecto, pero se pueden cambiar por Configuración individual de la medida.

Figura 5. Ventana de configuración sistema PARIO.

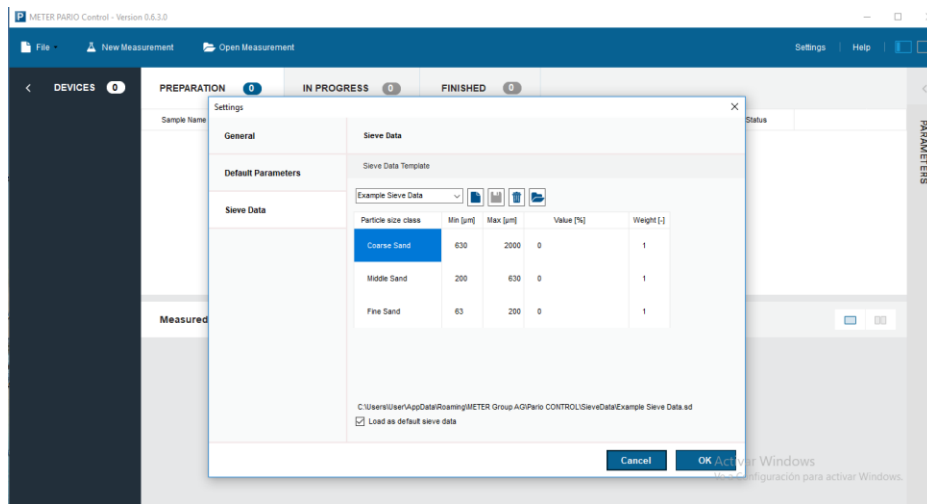


Fuente: (Group Meter Enviroment. Manual del Usuario) 2017.

<Clases de tamiz> esta pestaña muestra la importancia de las arenas en el equipo, aquí se muestra tres tipos de arenas: gruesas, medias y finas, con sus tamaños de

partículas mínimos y máximos respectivos, allí se debe ingresar el porcentaje de cada una.

Figura 6. Ventana de configuración del sistema PARIO.



Fuente: (Group Meter Enviroment. Manual del Usuario) 2017.

Ya configurado el sistema se procede a la preparación del ensayo.

13.2.2. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA DE SUELO.

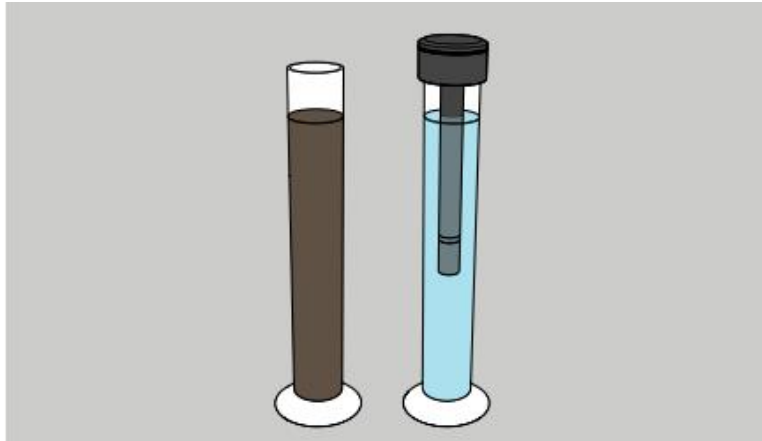
Con anticipación al ensayo se prepara el suelo con la adición de hexametáfosfato de sodio en un cilindro de sedimentación exactamente de la misma manera como se hace generalmente para un análisis de pipeta o hidrómetro.

El ensayo debe estar en el rango de 25 g (para material sin arena) hasta 50 g (para material con mucha arena). Si no se sabe nada el contenido de arena, se recomienda utilizar 30 g de peso seco.

Seguido de esto se debe llenar un cilindro con 1 litro de agua destilada y taparlo. Se coloca la muestra de suelo en el segundo cilindro y con agua destilada para rellenar hasta la marca de un litro.

Ya lista esta parte, se deben dejar por un momento sin empezar en el software porque todo el sistema del ensayo (cilindros, mezcla, agua y PARIO) deben estar en una temperatura constante ya que se puede presentar errores el registro de datos de temperatura debido a que tiene variaciones de ± 1.5 °C de temperatura. En lo posible se debe mantener la misma temperatura durante todo el ensayo con cambios de ± 3 °C.

Figura 7. Instrucciones de uso sistema PARIO



Fuente: (Group Meter Enviroment. Manual del Usuario) 2017.

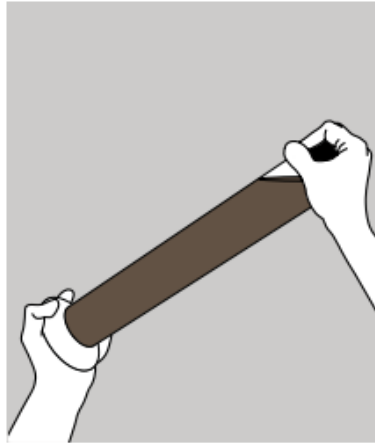
Para iniciar una medición, se presiona el botón de “inicio” para la muestra seleccionada en el “Ventana de preparación” de PARIO.

Esto inicializa el conteo para mezclar. El conteo se debe establecer en 60 segundos o el tiempo que se haya configurados inicialmente. Durante el conteo, se mezcla la suspensión a fondo. Esto se puede hacer ya sea girando boca abajo continuamente del cilindro (que debe cubrirse con el tapón hermético incluido) o por agitación vertical con un agitador adecuado (típicamente una placa con aberturas al final de una barra).

Se debe tener cuidado al comenzar la mezcla que no queden residuos en el fondo del recipiente, esto debe hacerse antes de que termine el conteo ya que puede mostrar alteraciones en los resultados.

NOTA: Mientras se está haciendo la mezcla en unos de los cilindros, el cabezal de PARIO debe estar en el otro cilindro con agua destilada.

Figura 8. Instrucciones de uso sistema PARIO

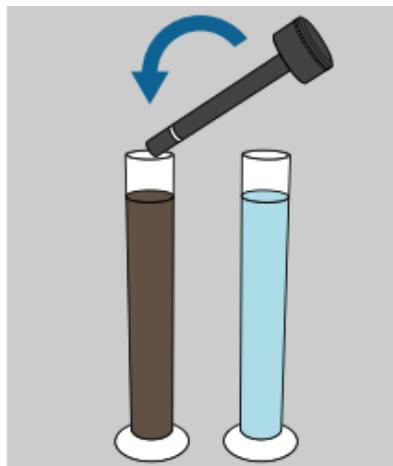


Fuente: (Group Meter Enviroment. Manual del Usuario) 2017.

Se detiene la mezcla exactamente cuando el conteo llega a 0 segundos, enseguida se coloca el cilindro de sedimentación ahora en su posición final para la medición.

Ahora se cambia el PARIO de cilindro desde su posición vertical en el otro cilindro hasta el cilindro de medición en la suspensión, llevarlo por un momento a una orientación horizontal (aprox. 45 °) que activa la detección automática del dispositivo en PARIO Control.

Figura 9. Instrucciones de uso sistema PARIO



Fuente: (Group Meter Enviroment. Manual del Usuario) 2017.

Se inserta la cabeza de medición en la suspensión y se debe asegurar de que el borde del cilindro de sedimentación esté en la tuerca del PARIO. El tiempo desde el final de la mezcla hasta la inserción final de no debe superar los 30 s.

A partir de ahí, PARIO Control registrará un triple de datos de medición (tiempo, presión, temperatura) cada 10 segundos y representa gráficamente los datos registrados. Para el operador, no hay nada que hacer ahora hasta el final de la medición.

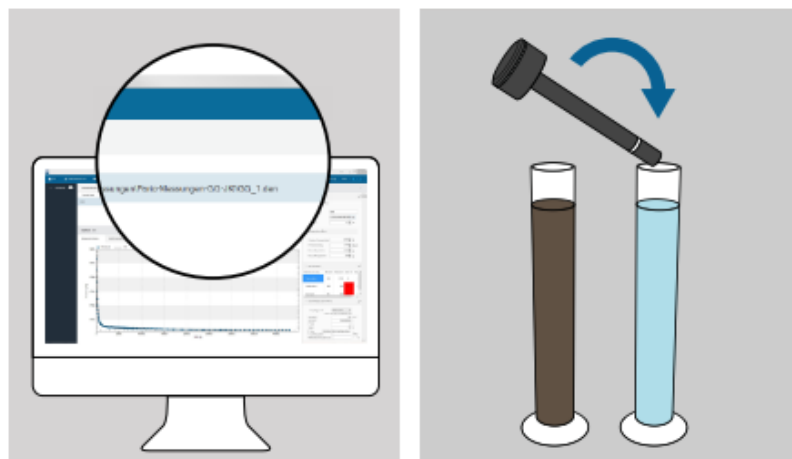
Figura 10. Instrucciones de uso sistema PARIO.



Fuente: (Group Meter Enviroment. Manual del Usuario) 2017.

La medición finaliza automáticamente cuando termina la duración de tiempo introducida. Alternativamente, se puede detener una medición en cualquier momento haciendo clic en el botón correspondiente en PARIO software. Cuando se detiene la medición, aparece en la pestaña "Finalizado".

Figura 11. Instrucciones de uso sistema PARIO



Fuente: (Group Meter Enviroment. Manual del Usuario) 2017.

Una vez finalizado el ensayo se debe tener en cuenta el almacenamiento del equipo. Para el almacenamiento a corto plazo (próxima medición dentro de un par de días), simplemente se retira el PARIO, desde la suspensión y se coloca nuevamente en el cilindro con agua destilada. Si es necesario, se enjuaga el eje del PARIO, con un suave chorro de agua. Además, se puede limpiar el Eje con un paño suave. Es importante nunca tocar el sensor de presión, que está blindado en la punta del eje. Si el sistema PARIO no se utiliza durante un período de tiempo más largo, se recomienda lavar todo partes del dispositivo con agua para prevenir el daño del cabezal y posteriormente se guarda el dispositivo en estado seco en el empaque.

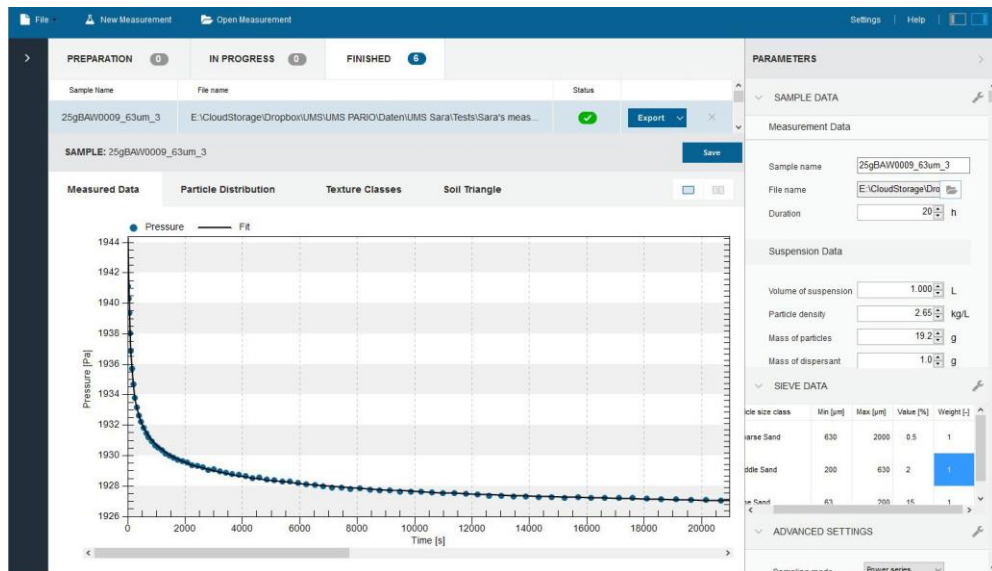
13.2.3. RESULTADOS (EVALUACIÓN Y EXPORTACIÓN DE DATOS).

PARIO Control proporciona para cada medición cuatro pantallas de salida:

DATOS DE MEDICIÓN

Muestra los datos registrados de presión y / o temperatura en función del tiempo. Eje del tiempo se puede alternar entre lineal y logarítmico. Los datos se pueden mostrar todos o en una cantidad reducida (“logarítmica”, “potencia”). Después de ajustar la disminución de presión, adicionalmente se muestra la línea ajustada en superposición a los datos.

Figura 12. Ventana de resultados sistema PARIO.

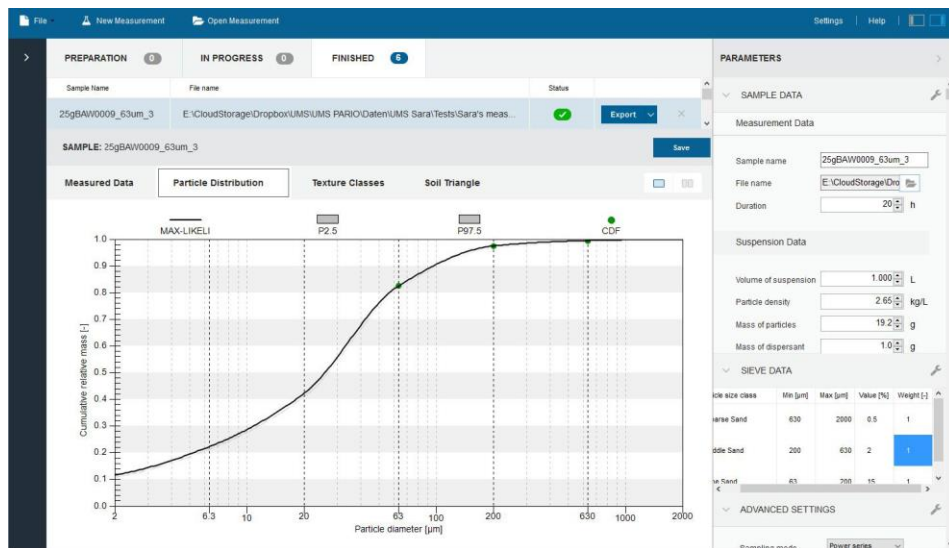


Fuente: (Group Meter Enviroment. Manual del Usuario) 2017.

DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS

Esta ventana muestra el resultado del análisis en forma de PSD acumulativa, que está disponible después de ajustar los datos. Masa relativa acumulada en función del diámetro [µm].

Figura 13. Ventana de resultados sistema PARIO

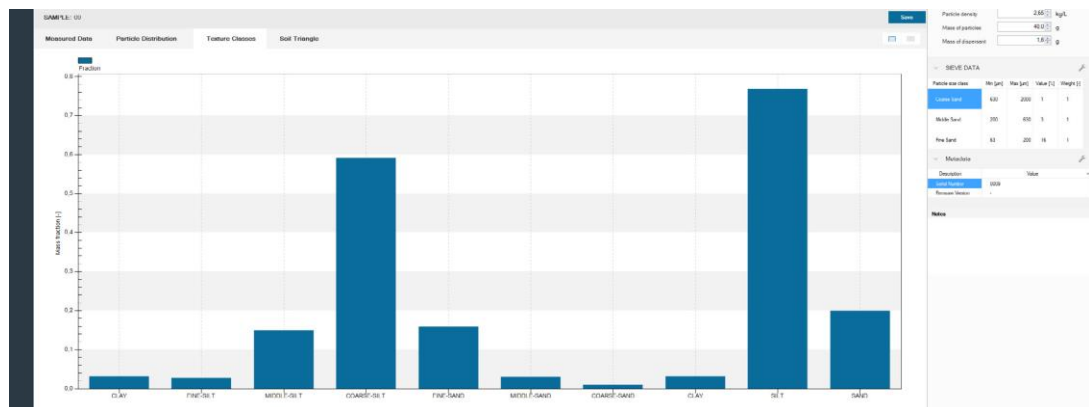


Fuente: (Group Meter Environment. Manual del Usuario) 2017.

CLASE DE TEXTURAS.

Esta muestra la fracción de masa en el eje Y y nombra los tipos de suelo que puede presentar la muestra evaluada (arcilla, limo fino, limo medio, limo grueso, arena fina, arena media, arena gruesa, arcilla, limo, arena).

Figura 14. Ventana de resultados sistema PARIO

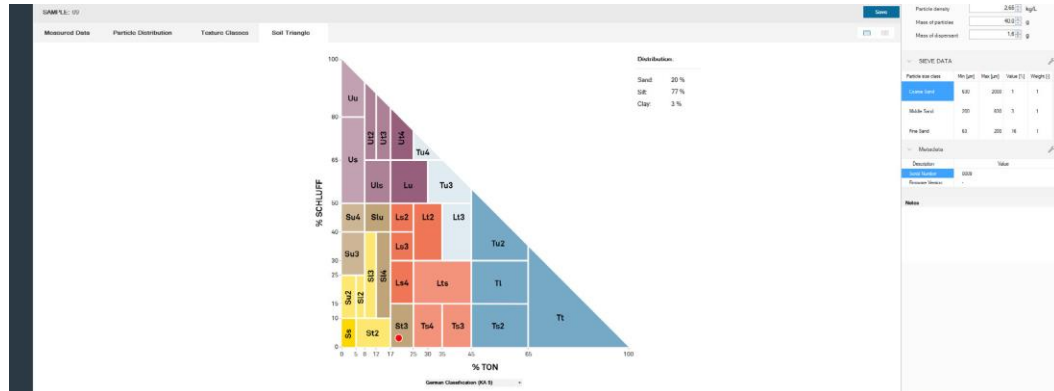


Fuente: (Group Meter Environment. Manual del Usuario) 2017.

TRIÁNGULO DE SUELO

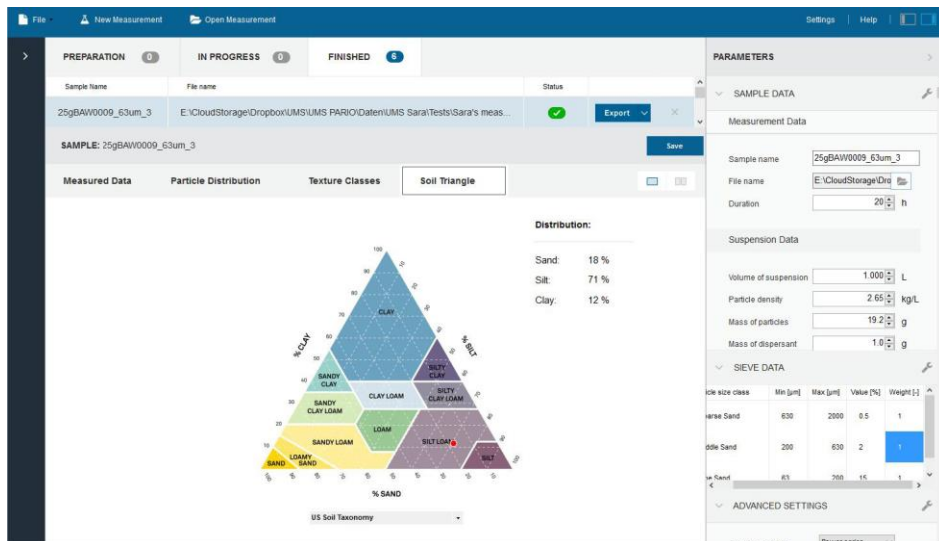
Esta muestra el triángulo de suelos en dos clasificaciones diferentes: alemana y americana.

Figura 15. Ventana de resultados sistema PARIO



Fuente: (Group Meter Enviroment. Manual del Usuario) 2017.

Figura 16. Ventana de resultados sistema PARIO



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Los datos de medición registrados y los resultados de las pruebas se guardan y almacenan automáticamente después de cada medición se abre en el directorio especificado en los archivos especificados. Nombres de archivos están compuestos por el nombre principal especificado por el usuario y un nombre de archivo genérico que termina ".den" en un formato binario. Estos pueden ser exportados por programas de hoja de cálculo como MS-Excel y algunos pueden ser exportados como una imagen en formato ".jpg".²²

14. RESULTADOS

A continuación, se mostrarán los resultados del primer ensayo para cada método respectivamente con un registro fotográfico y para los demás se mostrarán solo los resultados necesarios, además se anexarán los resultados del ensayo de gravedad específica como Anexo 1.

14.1. RESULTADOS GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO

Para obtener datos de estudio, se realizaron 5 ensayos con el método tradicional de granulometría por hidrómetro siguiendo los lineamientos estipulados en la Norma INVIAS E 124-13 para un suelo bentónico, a continuación, se presenta cada ensayo con su respectiva gráfica.

Ensayo 1. Granulometría por hidrómetro para un suelo Bentonítico.

Tabla 8. Datos Iniciales primer ensayo convencional granulometría por hidrómetro.

MUESTRA	BENTONITA1				
HIDROMETRO	152 H				
DEFLOCULANTE	HEXAMETAFOFATO DE SODIO				
TAMAÑO MAXIMO					
CILINDRO	1000ml				
RECIPIENTE #	12				
PESO RECIPIENTE (g)	102,34			Cm	1
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	115,77			Gs	2,69
PESO SUELO SECO + SOLUCION	13,43			ALFA	1,000
PESO SUELO SECO W0	8,43			W0	8,43

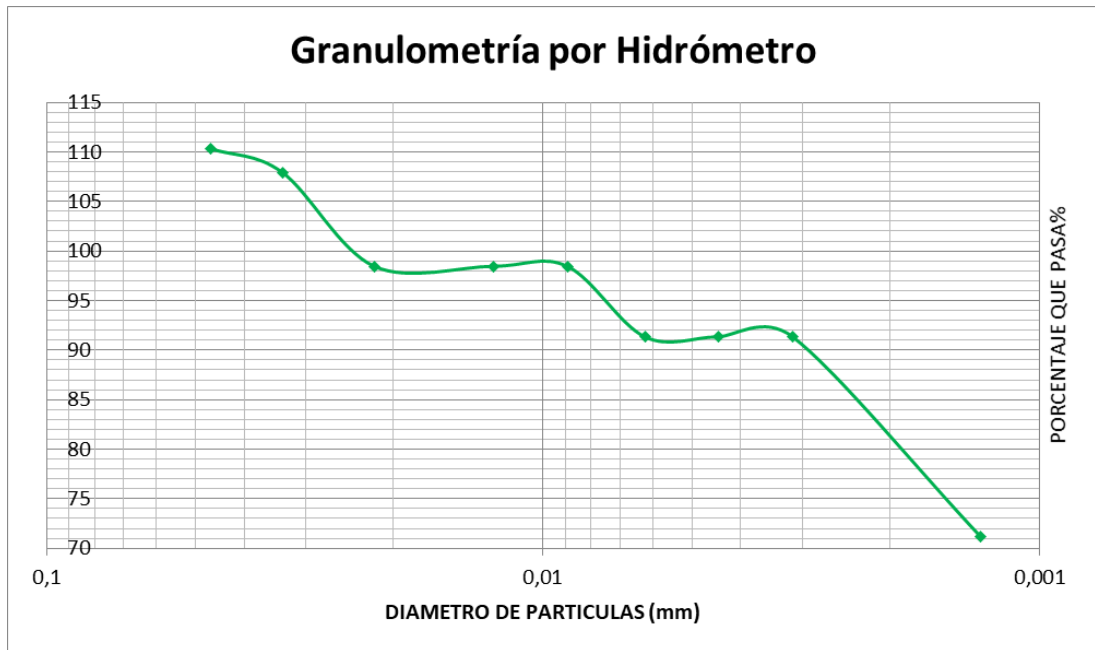
Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Tabla 9. Calculos primer ensayo convencional granulometría.

TIEMPO	TEMP	R'	T'	Ct	Cd	R	L	K	D	PASA
min	°C	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	cm		mm	%
0										100
1	24	19	8	1,7	10,7	9,3	13,20	0,01282	0,0466	110,32
2	23	18	8	0,9	9,9	9,1	13,30	0,01297	0,0334	107,95
5	22	17	8	0,7	9,7	8,3	13,50	0,01328	0,0218	98,46
15	22	17	8	0,7	9,7	8,3	13,50	0,01328	0,0126	98,46
30	22	17	8	0,7	9,7	8,3	13,50	0,01328	0,0089	98,46
60	21	16	8	0,3	9,3	7,7	13,50	0,01312	0,0062	91,34
120	21	16	8	0,3	9,3	7,7	13,70	0,01312	0,0044	91,34
240	21	16	8	0,3	9,3	7,7	13,70	0,01312	0,0031	91,34
1440	20	14	8	0	9	6	13,70	0,01344	0,0013	71,17

Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Grafica 1. Granulometría por Hidrómetro primer ensayo.



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Ensayo 2. Granulometría por hidrómetro para un suelo Bentonítico.

Tabla 10. Datos Iniciales segundo ensayo convencional granulometría por hidrómetro.

MUESTRA	BENTONITA2		
HIDROMETRO	152 H		
DEFLOCULANTE	HEXAMETAFOFATO DE SODIO		
TAMAÑO MAXIMO			
CILINDRO	1000ml		
RECIPIENTE #	121		
PESO RECIPIENTE (g)	112,20	Cm	1
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	124,84	Gs	2,69
PESO SUELO SECO + SOLUCION	12,64	ALFA	1,000
PESO SUELO SECO W0	7,64	W0	7,64

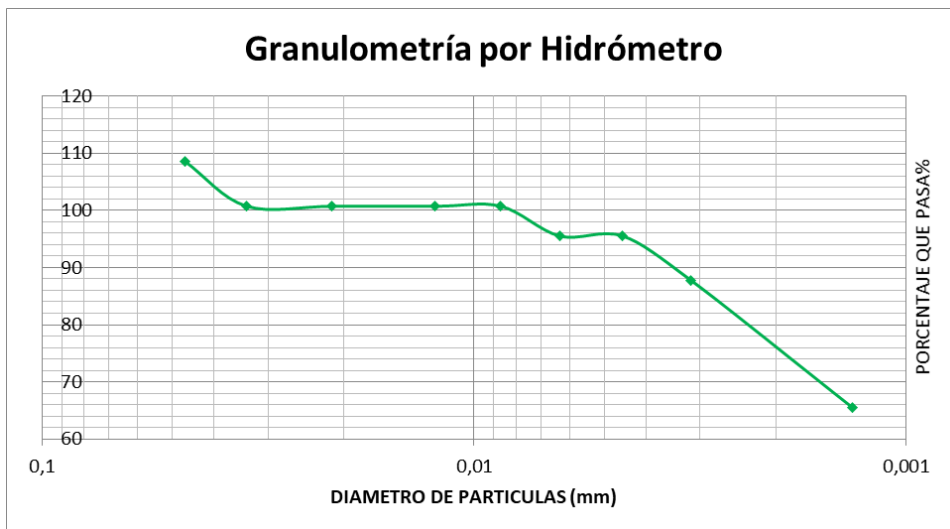
Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Tabla 11. Calculos segundo ensayo convencional granulometría.

TIEMPO	TEMP	R'	T'	Ct	Cd	R	L	K	D	PASA
min	°C	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	cm		mm	%
0										100
1	24	18	8	1,7	10,7	8,3	13,30	0,01282	0,0468	108,64
2	23	17	8	1,3	10,3	7,7	13,50	0,01297	0,0337	100,79
5	23	17	8	1,3	10,3	7,7	13,50	0,01297	0,0213	100,79
15	23	17	8	1,3	10,3	6,7	13,50	0,01297	0,0123	87,70
30	23	17	8	1,3	10,3	7,7	13,50	0,01297	0,0087	100,79
60	22	16	8	0,7	9,7	7,3	13,70	0,01328	0,0063	95,55
120	22	16	8	0,7	9,7	7,3	13,70	0,01344	0,0045	95,55
240	21	15	8	0,3	9,3	6,7	13,80	0,01312	0,0031	87,70
1440	20	13	8	0	9	5	14,20	0,01344	0,0013	65,45

Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Grafica 2. Granulometría por Hidrómetro segundo ensayo



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Ensayo 3. Granulometría por hidrómetro para un suelo Bentonítico.

Tabla 12. Datos Iniciales tercer ensayo convencional granulometría por hidrómetro.

MUESTRA	BENTONITA3				
HIDROMETRO	152 H				
DEFLOCULANTE	HEXAMETAFOSFATO DE SODIO				
TAMAÑO MAXIMO					
CILINDRO	1000ml				
RECIPIENTE #	2				
PESO RECIPIENTE (g)	101,91			Cm	1
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	115,40			Gs	2,69
PESO SUELO SECO + SOLUCION	13,49			ALFA	1,000
PESO SUELO SECO W0	8,49			W0	8,49

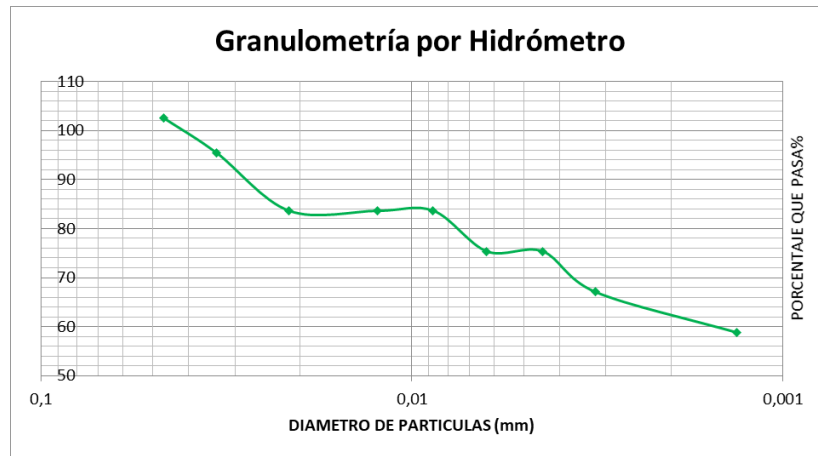
Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Tabla 13. Calculos tercer ensayo convencional granulometría.

TIEMPO	TEMP	R'	T'	Ct	Cd	R	L	K	D	PASA
min	°C	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	cm		mm	%
0										100
1	24	18	8	1,3	10,3	8,7	13,30	0,01282	0,0468	102,47
2	23	17	8	0,9	9,9	8,1	13,50	0,01297	0,0337	95,41
5	23	16	8	0,9	9,9	7,1	13,70	0,01297	0,0215	83,63
15	23	16	8	0,9	9,9	7,1	13,70	0,01297	0,0124	83,63
30	23	16	8	0,9	9,9	7,1	13,70	0,01297	0,0088	83,63
60	22	15	8	0,6	9,6	6,4	13,80	0,01312	0,0063	75,38
120	22	15	8	0,6	9,6	6,4	13,80	0,01312	0,0044	75,38
240	21	14	8	0,3	9,3	5,7	14,00	0,01328	0,0032	67,14
1440	20	13	8	0	9	5	14,20	0,01344	0,0013	58,89

Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Grafica 3. Granulometría por Hidrómetro tercer ensayo



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Ensayo 4. Granulometría por hidrómetro para un suelo Bentonítico.

Tabla 14. Datos Iniciales cuarto ensayo convencional granulometría por hidrómetro.

MUESTRA	BENTONITA4		
HIDROMETRO	152 H		
DEFLOCULANTE	HEXAMETAFOSFATO DE SODIO		
TAMAÑO MAXIMO			
CILINDRO	1000ml		
RECIPIENTE #	14		
PESO RECIPIENTE (g)	104,73	Cm	1
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	118,24	Gs	2,69
PESO SUELO SECO + SOLUCION	13,51	ALFA	1,000
PESO SUELO SECO W0	8,51	W0	8,51

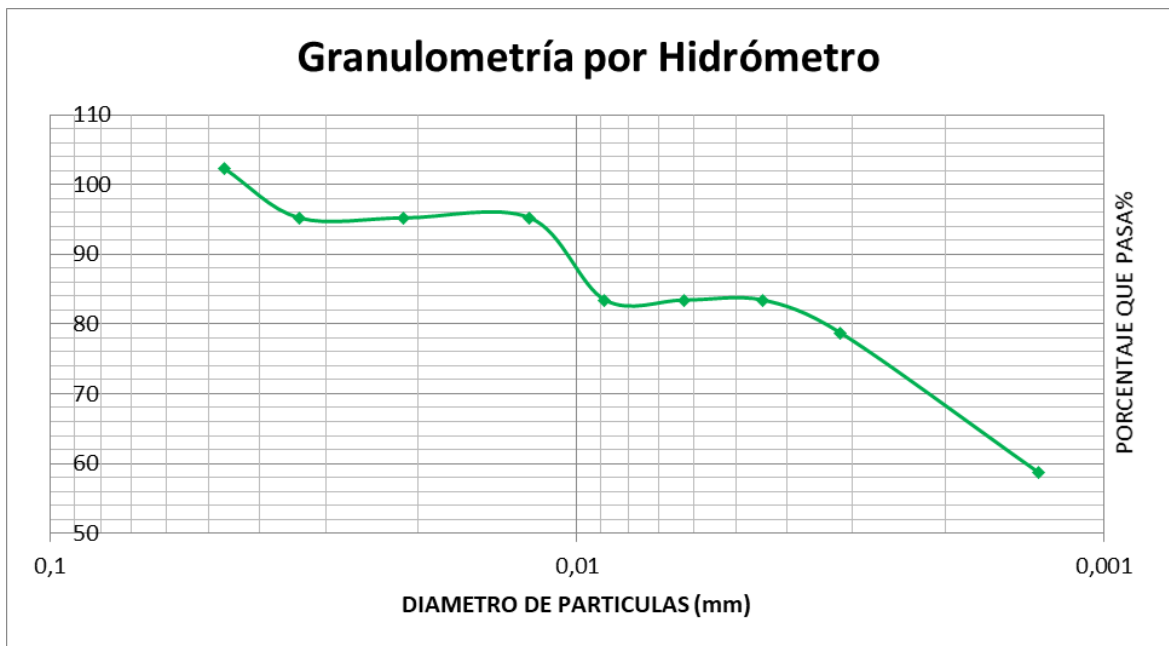
Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Tabla 15. Calculos cuarto ensayo convencional granulometría.

TIEMPO	TEMP	R'	T'	Ct	Cd	R	L	K	D	PASA
min	°C	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	cm		mm	%
0										100
1	24	18	8	1,3	10,3	8,7	13,30	0,01282	0,0468	102,23
2	23	17	8	0,9	9,9	8,1	13,50	0,01297	0,0337	95,18
5	23	17	8	0,9	9,9	8,1	13,50	0,01297	0,0213	95,18
15	23	17	8	0,9	9,9	8,1	13,50	0,01297	0,0123	95,18
30	22	16	8	0,9	9,9	7,1	13,70	0,01312	0,0089	83,43
60	22	16	8	0,9	9,9	7,1	13,70	0,01312	0,0063	83,43
120	22	16	8	0,9	9,9	7,1	13,80	0,01312	0,0044	83,43
240	21	15	8	0,3	9,3	6,7	14,00	0,01312	0,0032	78,73
1440	20	13	8	0	9	5	14,20	0,01344	0,0013	58,75

Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Grafica 4. Granulometría por Hidrómetro cuarto ensayo



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Ensayo 5. Granulometría por hidrómetro para un suelo Bentonítico.

Tabla 16. Datos Iniciales quinto ensayo convencional granulometría por hidrómetro.

MUESTRA	BENTONITA5				
HIDROMETRO	152 H				
DEFLOCULANTE	HEXAMETAFOSFATO DE SODIO				
TAMAÑO MAXIMO					
CILINDRO	1000ml				
RECIPIENTE #	12				
PESO RECIPIENTE (g)	102,34			Cm	1
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	115,77			Gs	2,69
PESO SUELO SECO + SOLUCION	13,43			ALFA	1,000
PESO SUELO SECO W0	8,43			W0	8,43

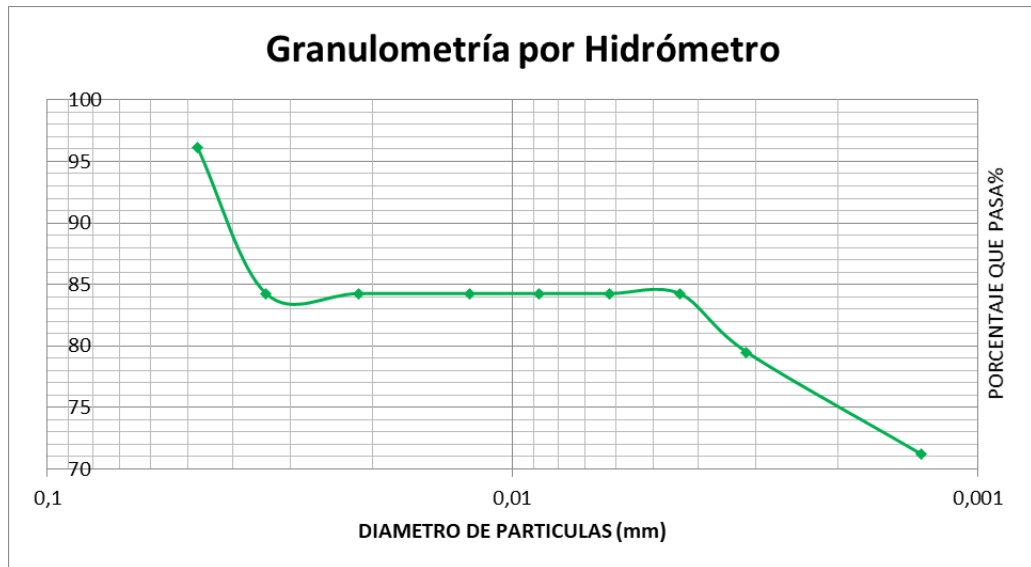
Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Tabla 17. Cálculos quinto ensayo convencional granulometría.

TIEMPO	TEMP	R'	T'	Ct	Cd	R	L	K	D	PASA
min	°C	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	cm		mm	%
0										100
1	23	17	8	0,9	9,9	8,1	13,50	0,01297	0,0477	96,09
2	23	16	8	0,9	9,9	7,1	13,70	0,01297	0,0339	84,22
5	23	16	8	0,9	9,9	7,1	13,70	0,01297	0,0215	84,22
15	23	16	8	0,9	9,9	7,1	13,70	0,01297	0,0124	84,22
30	23	16	8	0,9	9,9	7,1	13,70	0,01297	0,0088	84,22
60	23	16	8	0,9	9,9	7,1	13,70	0,01297	0,0062	84,22
120	23	16	8	0,9	9,9	7,1	13,70	0,01297	0,0044	84,22
240	21	15	8	0,3	9,3	6,7	13,80	0,01312	0,0031	79,48
1440	20	14	8	0	9	6	14,00	0,01344	0,0013	71,17

Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Grafica 5. Granulometría por Hidrómetro quinto ensayo



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

14.1.1. REGISTRO FOTOGRÁFICO GRAVEDAD ESPECÍFICA Y GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO.

Figura 17. Muestras de laboratorio.



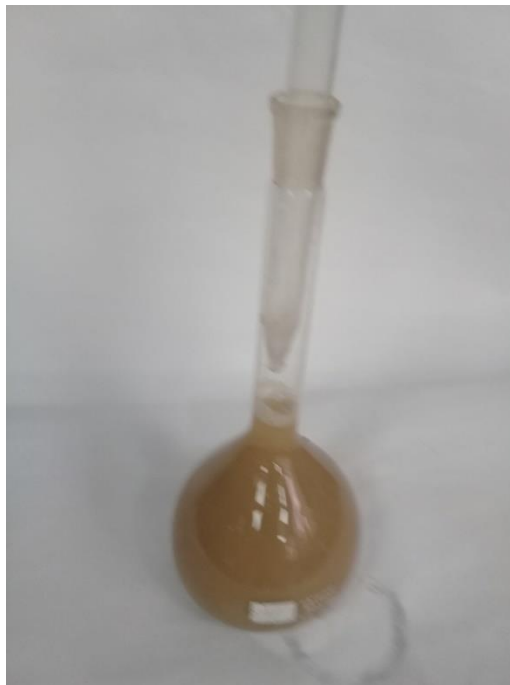
Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Figura 18. Ensayo de gravedad específica.



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Figura 19. Gravedad Específica.



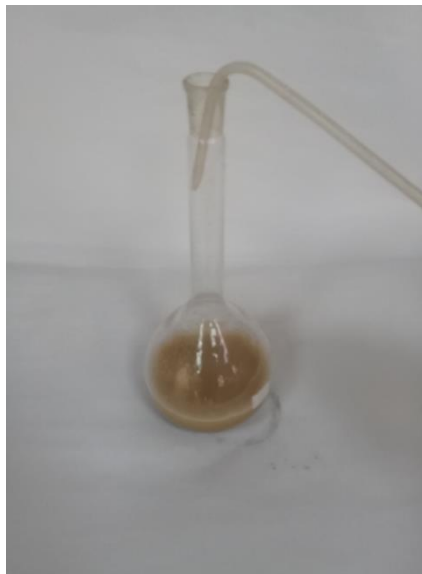
Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Figura 20. Temperatura gravedad específica.



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Figura 21. Gravedad Específica.



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Figura 22. Lecturas con Hidrómetro 152H



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Figura 23. Baño Termostático.



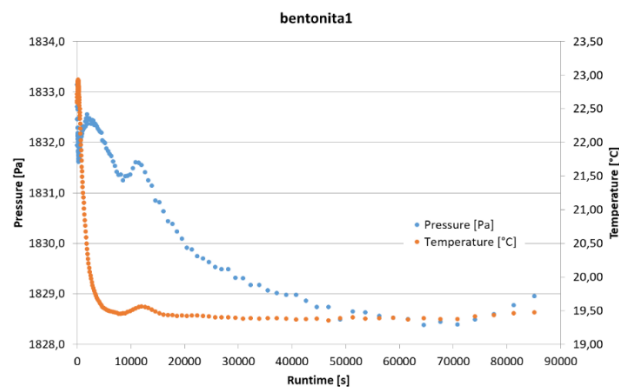
Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

14.2. RESULTADOS ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE TAMAÑO DE PARTICULAS- PARIO.

Para obtener datos de estudio, se realizaron 4 ensayos con el método análisis automático de tamaño de partículas. PARIO siguiendo los pasos estipulados en el manual para un suelo bentónico, a continuación, se presenta cada ensayo con su respectiva gráfica. Adicionalmente se presentan todos los resultados tablas, gráficos y demás, de los demás ensayos como Anexo 2.

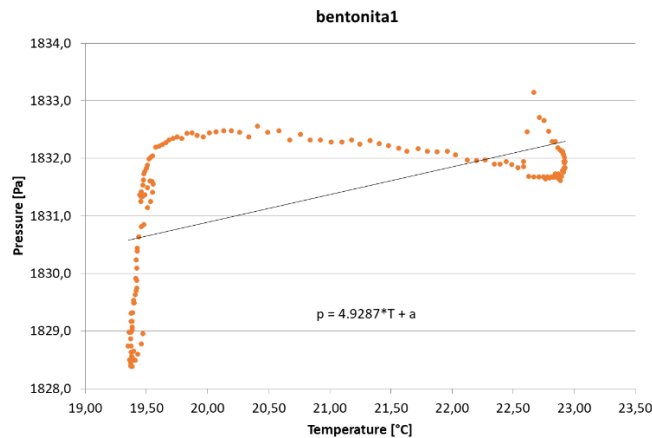
Ensayo 1. Método automatizado para un suelo Bentonítico.

Grafica 6. Presión/Temperatura vs Tiempo (Ensayo 1)



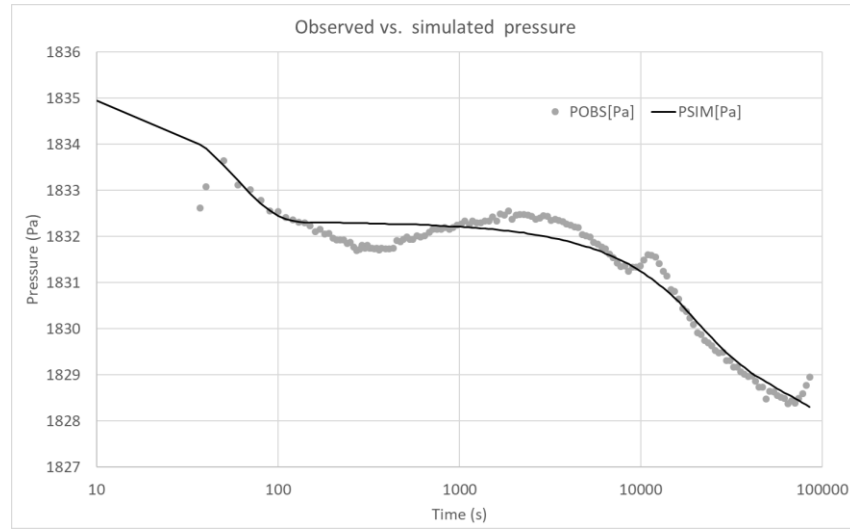
Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Grafica 7. Presión vs Temperatura (Ensayo 1)



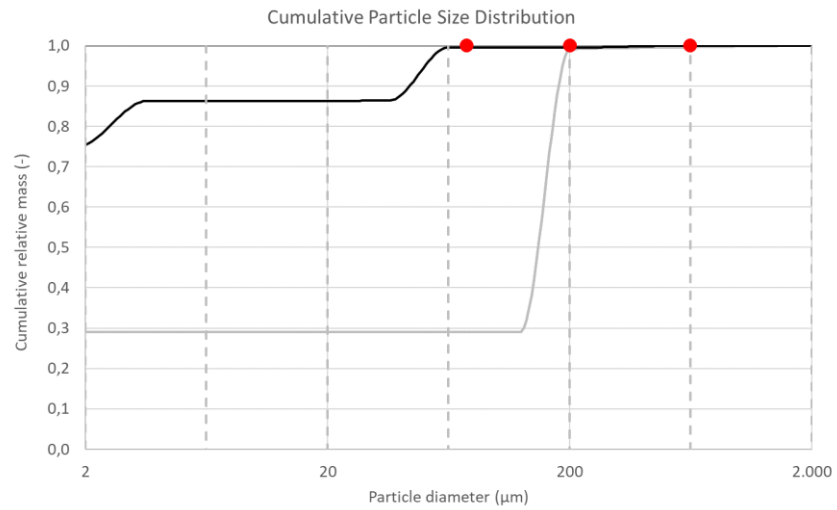
Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Grafica 8. Presion vs Tiempo (Ensayo 1)



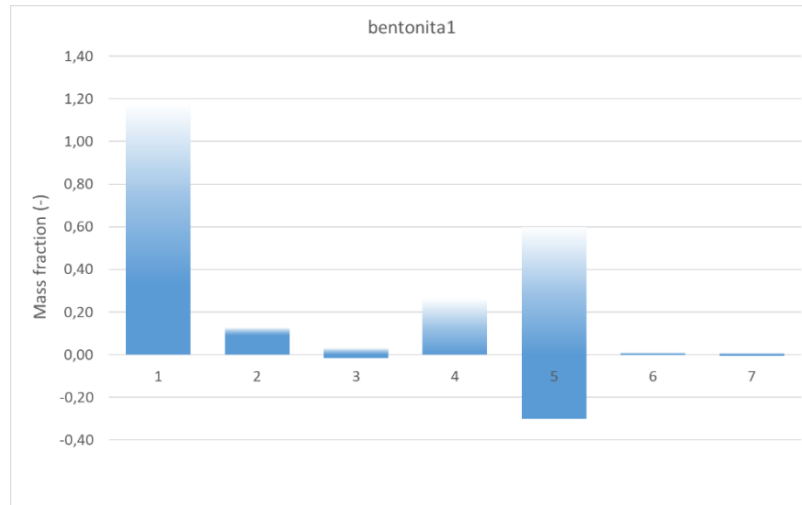
Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Grafica 9. Peso acumulado vs diámetro de las partículas (Ensayo 1)



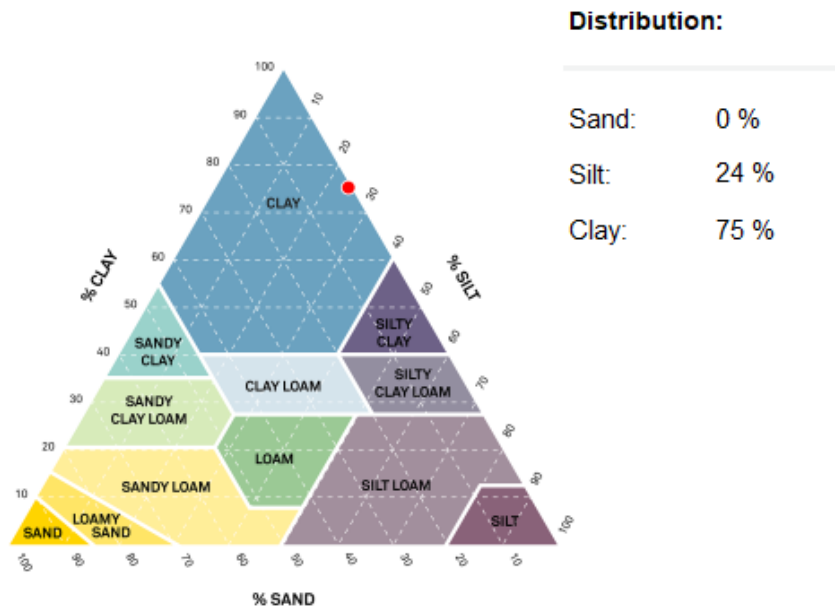
Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Grafica 10. Clase de Texturas (Ensayo 1)



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

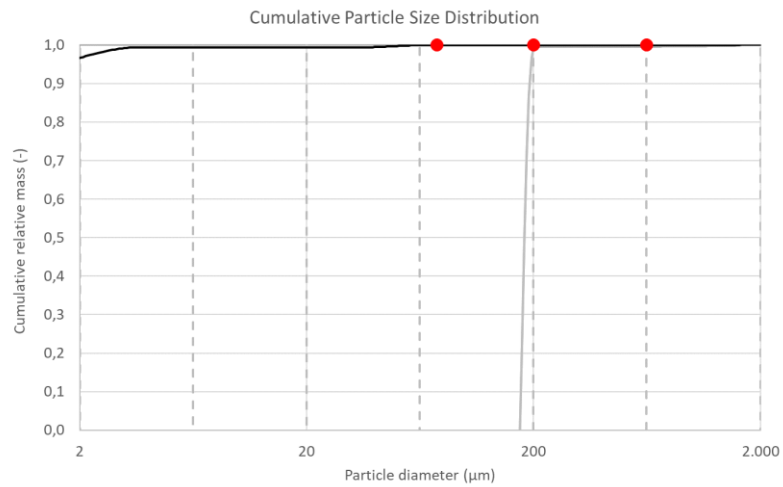
Figura 24. Triangulo del suelo (Ensayo 1)



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

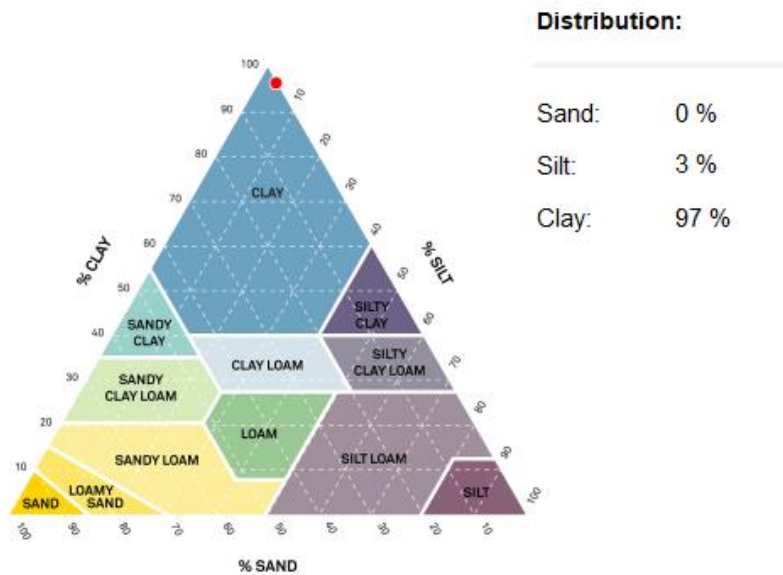
Ensayo 2. Método automatizado para un suelo Bentonítico.

Grafica 11. Peso acumulado vs diámetro de las partículas (Ensayo 2)



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

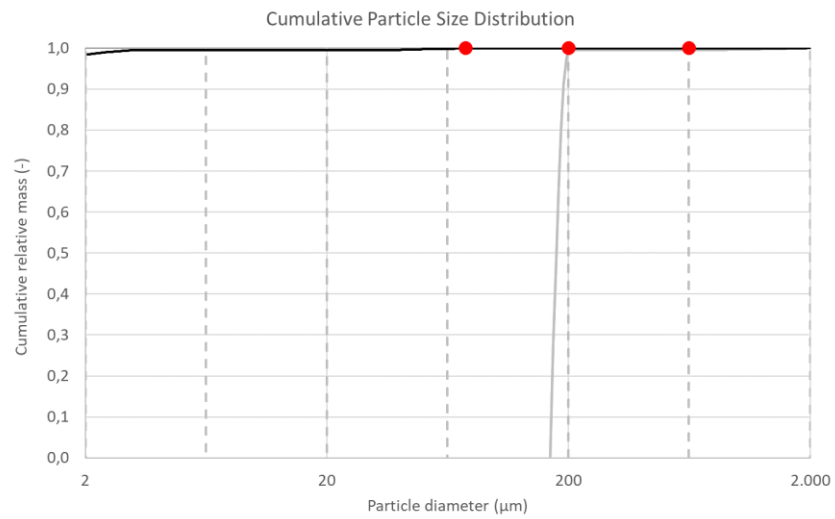
Figura 25. . Triangulo del suelo (Ensayo 2)



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

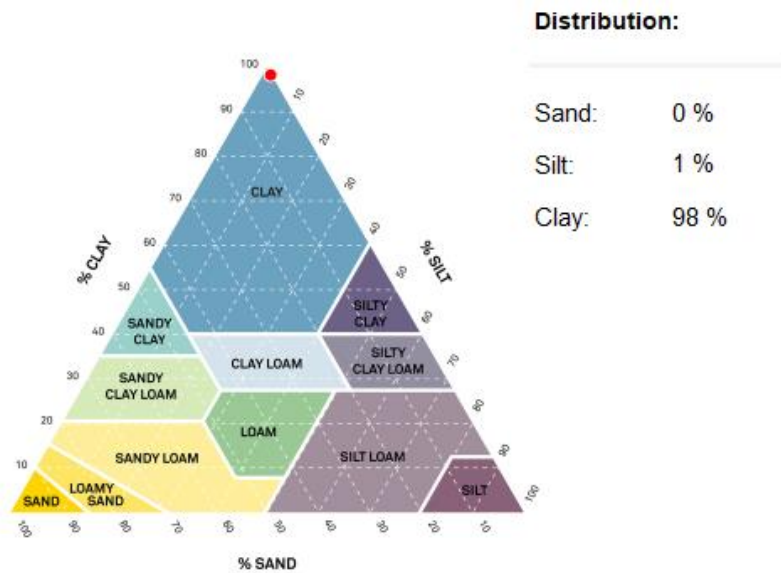
Ensayo 3. Método automatizado para un suelo Bentonítico.

Grafica 12. Peso acumulado vs diámetro de las partículas (Ensayo 3)



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

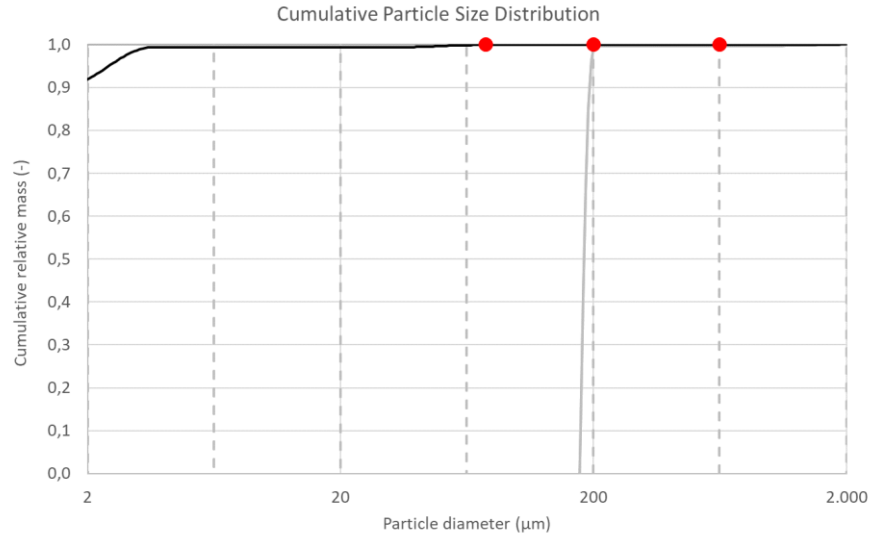
Figura 26. . Triangulo del suelo (Ensayo 3)



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

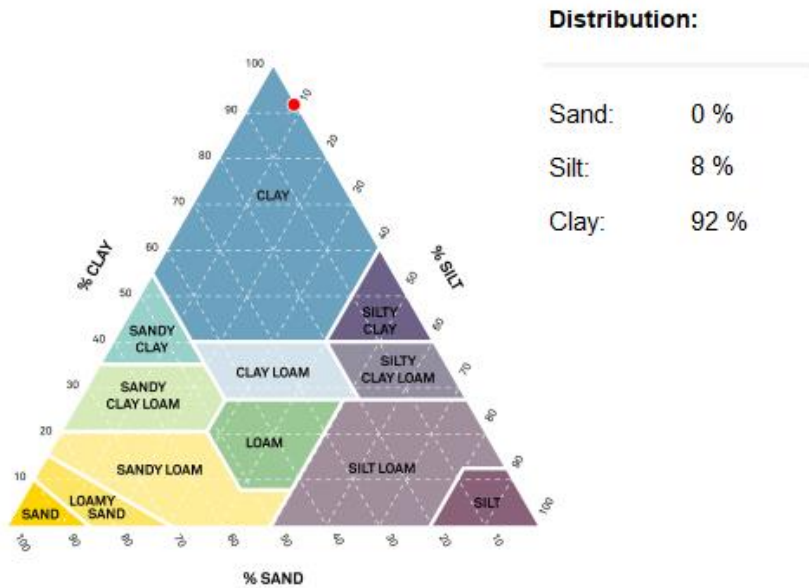
Ensayo 4. Método automatizado para un suelo Bentonítico.

Grafica 13. Peso acumulado vs diámetro de las partículas (Ensayo 4)



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

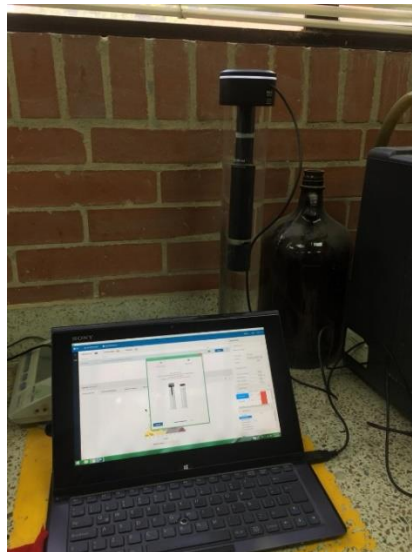
Figura 27. . Triangulo del suelo (Ensayo 4)



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

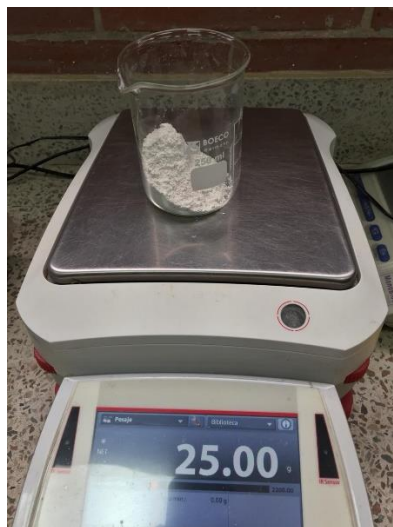
14.2.1. REGISTRO FOTOGRÁFICO ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE TAMAÑO DE PARTICULAS- PARIO

Figura 28. Configuración inicial sistema PARIO



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Figura 29. Muestra de suelo.



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Figura 30. Preparación Muestra de suelo.



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Figura 31. Preparación material en suspensión.



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Figura 32. Baño termostático sistema PARIO



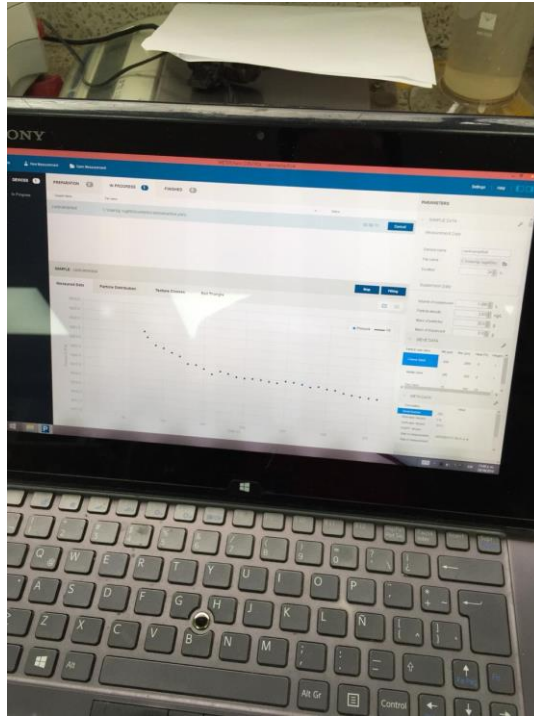
Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Figura 33. Toma de datos (LED)



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Figura 34. Resultados sistema PARIO



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

15. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de resultados se graficaron todos los resultados en una sola gráfica, las memorias de cálculo se presentan como Anexo 2.

15.1. DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Se realizó un ensayo de difracción de Rayos X (DRX), para obtener la estructura del material Bentonita y sus componentes químicos. Esta se lleva a cabo pulverizando cierta cantidad de muestra hasta obtener partículas de máximo 2 cm de diámetro, seguido de esto se cuartea la muestra para nuevamente pulverizar hasta obtener un tamaño de partícula menos a 75 micras. A continuación, se presenta el resultado para la bentonita.

Este procedimiento consiste en distribuir la muestra, previamente pulverizada, en el portamuestras con una lámina de metal afilada mediante movimientos verticales (40-50 veces). Luego debe removerse el polvo excedente activando una pistola de aire a 0.5 m de distancia del portamuestras.

Esta preparación permite que las partículas con tamaño arcilla (diámetro entre 0.98 y 3.9 μm) se orienten, haciendo posible a la vez que los rayos X se difracten a lo largo del eje z de los minerales. Este fenómeno da información sobre la distancia entre las capas que componen los minerales de la arcilla.

Previo a la preparación del montaje de agregados orientados, los patrones obtenidos en la difracción del montaje en polvo son estudiados con el fin de identificar si la muestra presenta óxidos o materia orgánica, pues estos compuestos afectan la identificación de los minerales de la arcilla. Las muestras analizadas para este informe no contienen óxidos ni materia orgánica, por lo que procedimientos adicionales para retirar estos compuestos no fueron requeridos.

La preparación de agregados orientados consiste en tres tratamientos: (1) Deshidratación sobre platina de vidrio, (2) solvatación con etilenglicol y (3) calcinación. Antes de los tratamientos, las muestras fueron trituradas utilizando un mortero de ágata hasta que las partículas alcanzaron diámetros de aproximadamente 5mm.²³

²³ INVIAS. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro. Bogotá. Norma Invias E124-07. Año 2007

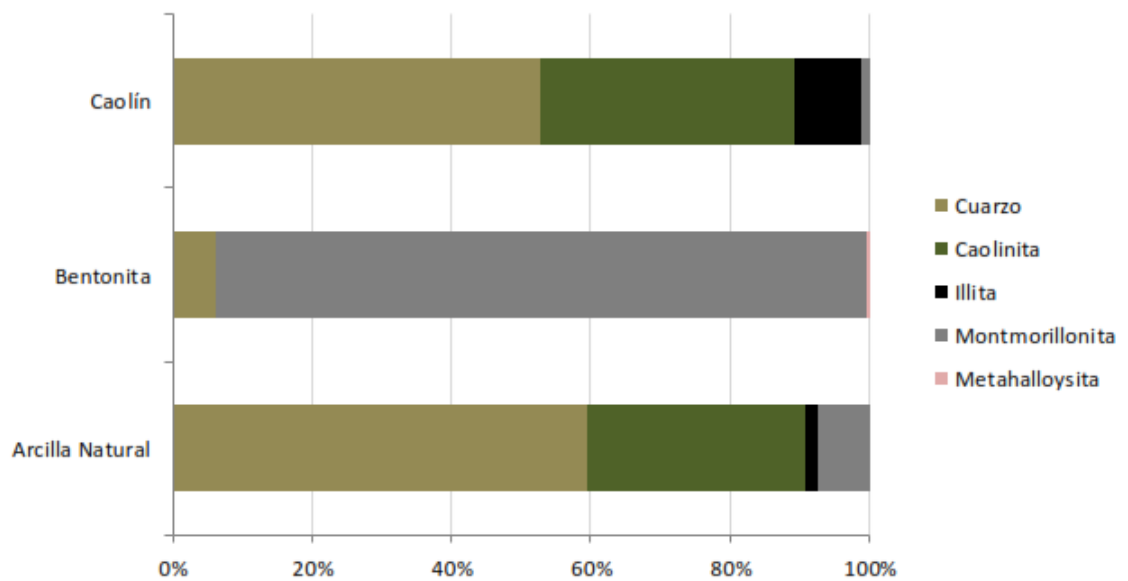
Como resultado se obtiene un porcentaje en peso de cada fase mineral que se identificó en el ensayo, la proporción composicional de la muestra y el difractograma en donde se muestra los picos de cada mineral presente en la muestra.

Tabla 18. Porcentaje en peso (%Peso) en cada fase mineral identificada en la muestra.

Mineral (% Peso)	Fórmula química	Bentonita
Cuarzo	SiO_2	6.23
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	-
Illita	$(\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}$	-
Montmorillonita	$(\text{Na},\text{Ca})_{0.3}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	93.43
Metahalloysita	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	0.34

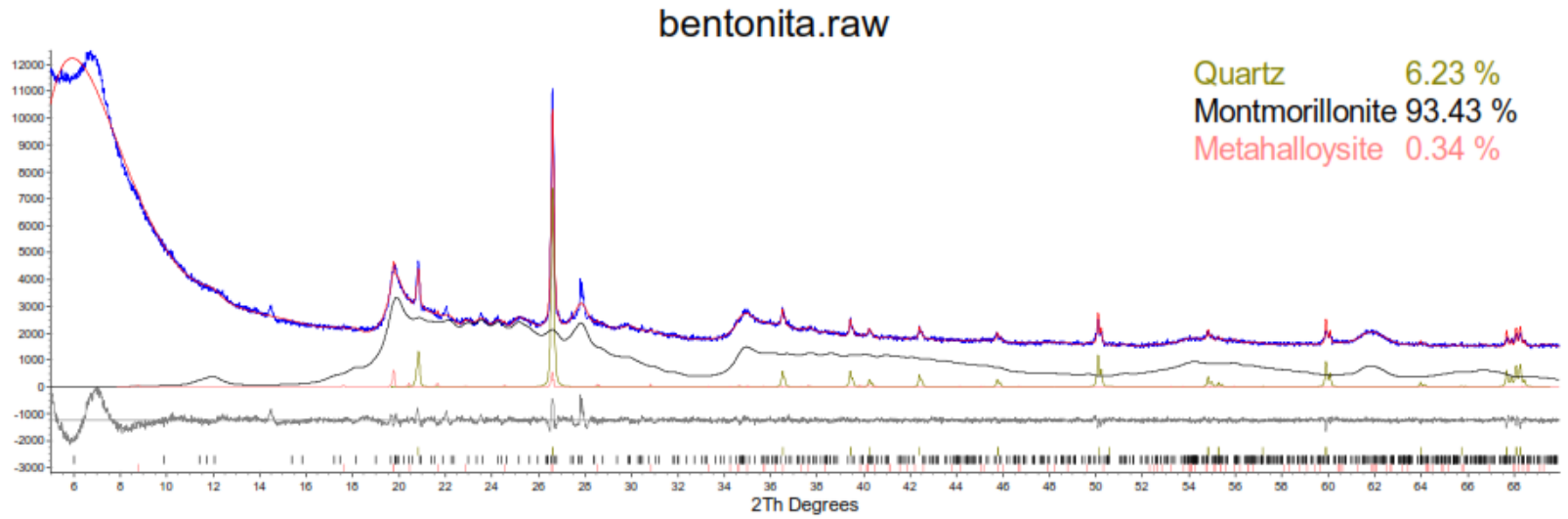
Fuente: gmas consultorios. 2018

Figura 35. Proporción composicional de la muestra (%Peso)



Fuente: gmas consultorios. 2018

Grafica 14. Difractograma de muestra Bentonita en polvo



Fuente: gmas consultorios. 2018

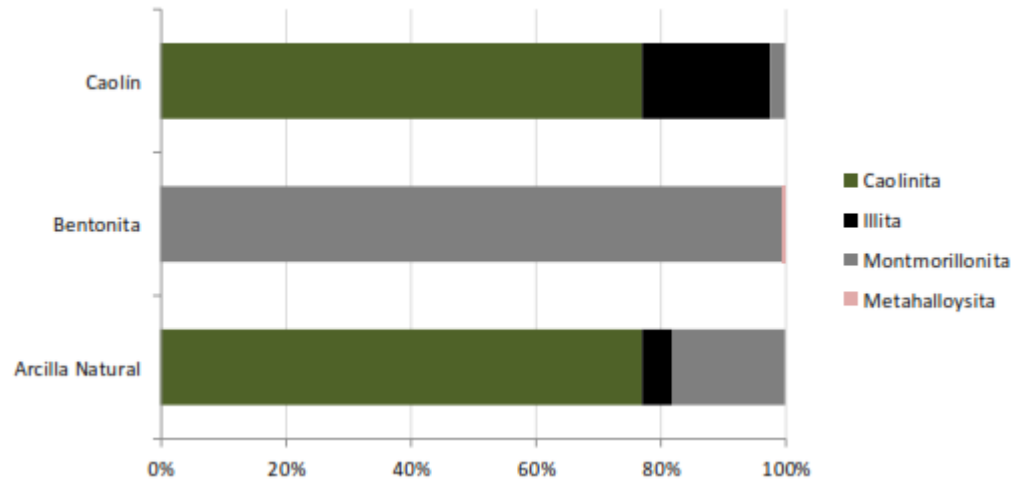
A parte de lo mencionado, también se muestra un análisis de minerales de la arcilla presentes en la muestra.

Tabla 19. Minerales presentes en la muestra.

Mineral (% Peso recalculado)	Caolín	Bentonita	Arcilla Natural
Caolinita	77.11	-	77.13
Illita	20.60	-	4.57
Montmorillonita	2.29	99.64	18.30
Metahalloysita	-	0.36	-

Fuente: gmas consultorios. 2018

Figura 36. Proporción minerales presentes en la muestra.

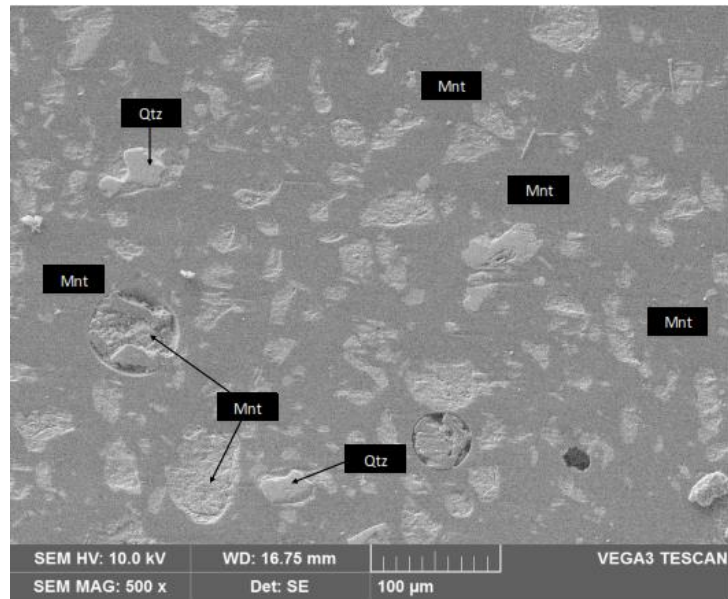


Fuente: gmas consultorios. 2018

Según estos resultados se puede observar que la Bentonita tiene un alto contenido de Montmorillonita, poca cantidad de cuarzo y una pequeña fracción de Metahalloysita.

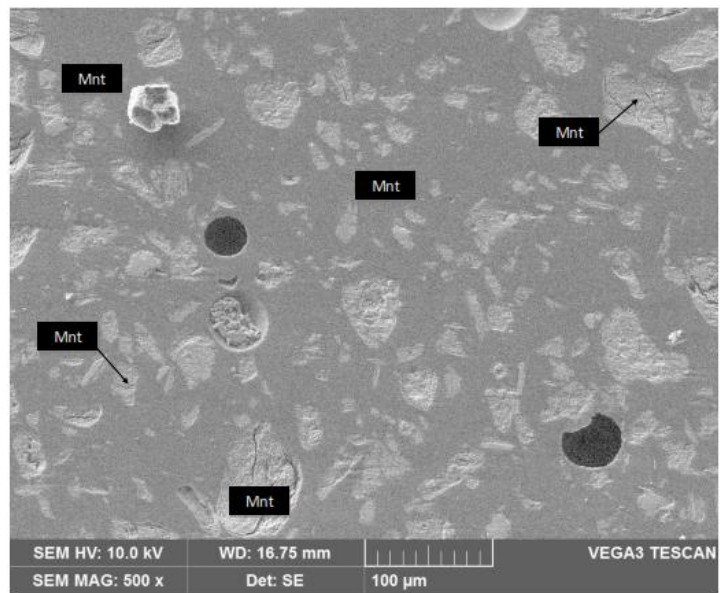
Continuando con el análisis, se muestran una serie de imágenes de la Bentonita, en donde se observa la variación de la forma de los agregados finos de la muestra y se puede observar el alto contenido de Montmorillonita. En estas la abreviación "Qtz", pertenece al Cuarzo y la abreviación "Mnt" a Montmorillonita.

Figura 37. Micrografía 1 Bentonita.



Fuente: gmas consultorios. 2018

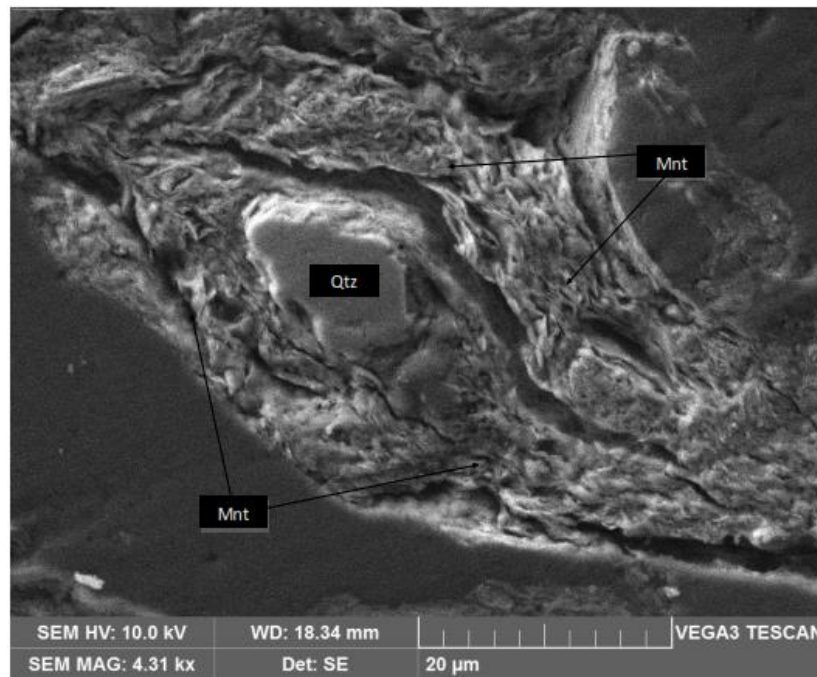
Figura 38. Micrografía 2 Bentonita.



Fuente: gmas consultorios. 2018

En estas imágenes se generaliza la superficie de la muestra con detección de electrones secundarios. Se observa una matriz arcillosa compuesta por Montmorillonita. El material granular está compuesto principalmente por fragmentos muy finos de Montmorillonita y algunos pocos granos de cuarzo.

Figura 39. Micrografía 3 Bentonita.

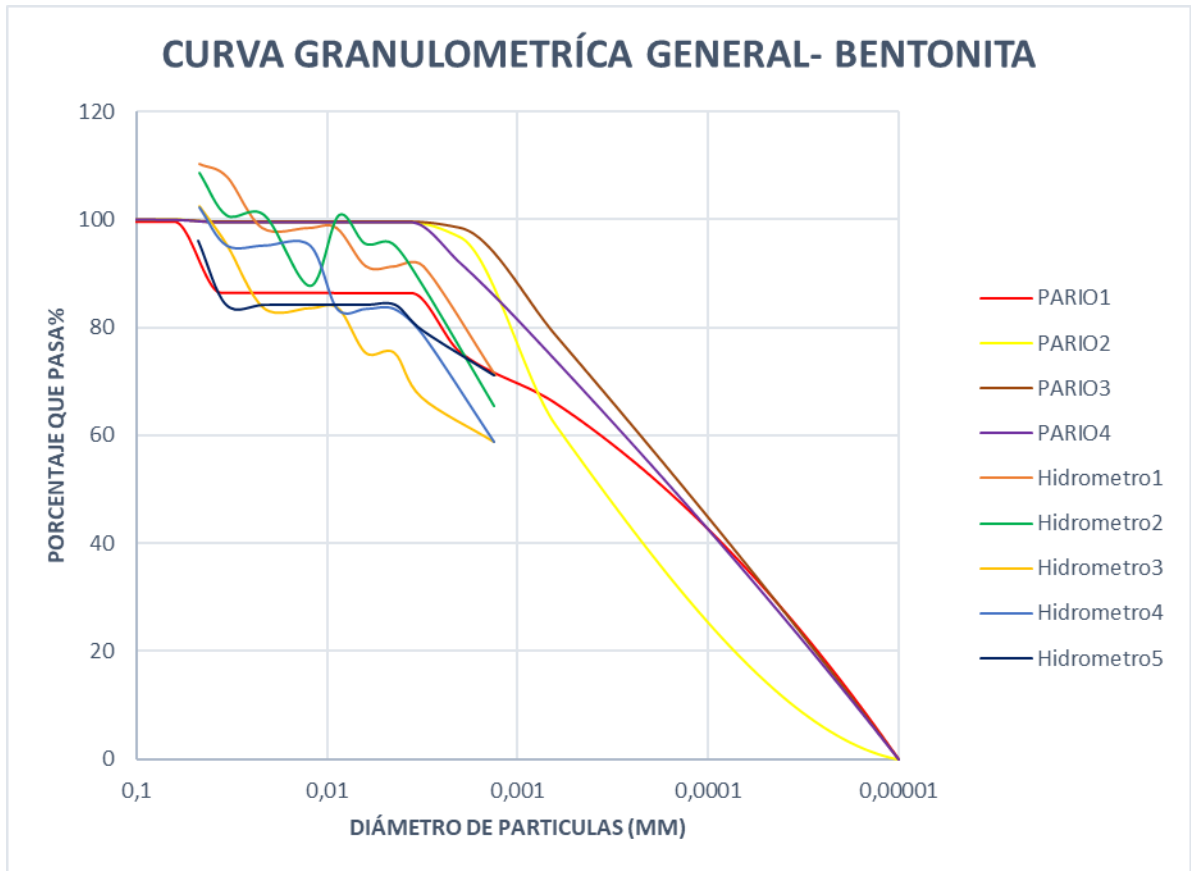


Fuente: gmas consultorios. 2018

En esta ilustración se observa un fragmento granular con estructuras fibrosas características de arcillas como la Montmorillonita. En el centro se observa una partícula no granular maciza que corresponde a un fragmento de cuarzo.

Teniendo presente los resultados mencionados anteriormente, se puede iniciar un análisis de resultados con más autoridad, a continuación, se presenta una gráfica en la cual se encuentra el resultado de los ensayos realizados para el presente trabajo con el fin de hacer una comparación de los dos métodos que se mencionan al inicio del presente, teniendo en cuenta las propiedades físicas y químicas de la Bentonita, las cuales ayudaran a entender estos resultados para así determinar si se puede cumplir con los objetivos planteados.

Grafica 15. Granulometría General Bentonita



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Para el análisis de resultados se debe tener el rango según la clasificación para suelos finos.

Tabla 20. Clasificación de Suelos Finos en diferentes países.

Clasificación de suelos finos	Arena	Limo	Arcilla
Clasificación Alemana	2000-63	63-2	<2
Diámetro Equivalente [μm]			
Clasificación Americana	2000-50	50-2	<2
Diámetro Equivalente [μm]			
Clasificación Colombiana	2000-75	75-2	<2
Diámetro Equivalente [μm]			

Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

ANÁLISIS DE GRÁFICA.

Para los resultados del Hidrómetro la mayor parte los ensayos tienen un rango de entre 80% al 110% de arenas y un 60% al 100% de limos, pero para arcillas no se tienen datos.

Para los resultados del sistema PARIO el primer ensayo tiene entre un 80% y 100% de arenas, 70% al 80% limos y por ultimo del 0% al 70% tiene arcilla en la muestra. Para los otros tres ensayos se tiene un 100% de arenas y limos y las arcillas varían entre el 0% al 90%.

El sistema PARIO arroja datos más precisos es decir tiene un rango más amplio que toma datos de hasta $0.001 \mu\text{m}$ (0.00001mm), mientras que el método convencional toma datos hasta menos de $10 \mu\text{m}$ (0.01mm).

El rango máximo en el eje y (Porcentaje que pasa%) para el sistema PARIO es del 100%, mientras que para el método convencional por Hidrómetro presenta un rango máximo de 108%

En el sistema PARIO se ve un cambio en el rango de Limos (0.075mm - 0.002mm) descendiendo hasta llegar al rango de 0.00001mm . Mientras que en el sistema convencional se ve el cambio desde el rango de 0.075mm en adelante.

ANÁLISIS SEGÚN MUESTRA

Debido a que la Bentonita al tener alto contenido de Montmorillonita, se constituye como un mineral que tiene la característica de variación química inestable. Esta condición hace que tenga una variante en el contenido de agua, forjando que esta absorba hasta 4 veces más su tamaño en contenido de líquido.

Al iniciar el ensayo de Granulometría por Hidrómetro, en las mediciones se demuestra una variación en la lectura del hidrómetro, es decir, a medida que pasa el tiempo cada vez que se toma lectura el hidrómetro debe bajar, pero en este caso subía la mayoría de las veces. Este problema se debe a que la bentonita después de entrar en contacto con el agua, absorbe gran cantidad de la misma aumentando su tamaño, hasta que al final del ensayo queda una especie de masa, generando errores el cálculo.

Es por esto que en el ensayo de "Hidrómetro2" se ven cambios bruscos en la gráfica.

A demás los resultados para los ensayos "Hidrómetro1", "Hidrómetro2" e "Hidrómetro4", se observa que el porcentaje que pasa es superior al 100%, esto se debe a que el Hidrómetro no toma datos en los primeros segundos del ensayo, es

decir, el hidrómetro no alcanza a tomar los datos de las partículas más finas que se presenta en la suspensión.

Otro problema que se evidencia en los dos métodos con los que se hicieron los ensayos, es que se debe utilizar una muestra con una masa de 10 g, ya que la bentonita en gran cantidad absorbe más agua y esto hace que el litro de agua que se utilizó para estos ensayos era de una u otra manera insuficiente para la cantidad que la norma pide que se utilice para el ensayo.

Aunque el método de Granulometría por hidrómetro presenta ciertas correcciones (menisco, temperatura y defloculante) puede generar errores humanos involuntarios al estar manipulando el hidrómetro en la lectura de los resultados en el tiempo dado.

En el método del sistema PARIO, se ve que la Bentonita tiene un mejor comportamiento

15.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE CADA EQUIPO.

- ✓ Una ventaja para el Hidrómetro es que se pueden hacer varias muestras ya que se necesitaría de un solo penetrometro para las diferentes muestras, se puede tomar una lectura, se sumerge en la muestra patrón se seca bien y se puede tomar lectura en otro ensayo.
- ✓ Otra ventaja es que este método es económico y fácil de adquirir.
- ✓ Una de las desventajas que presenta el hidrómetro es que puede ocasionar alteraciones en los resultados por errores humanos que se puedan presentar durante los ensayos, ya sea desde el tiempo de lectura, toma de temperatura, entre otros.
- ✓ Otra desventaja es que debido al tiempo en los que se debe tomar lectura, en los laboratorios en donde generalmente se hacen este tipo de ensayos, no va a estar el personal las 24 horas del día para tomar los datos en los tiempos estipulados.
- Una ventaja que presenta el sistema PARIO es que como antes se ha mencionado opera mediante un software que se encarga de hacer todo el análisis a los suelos finos, sin necesidad de participación humana en los ensayos, solamente se necesita preparar la muestra, pero el software arroja los datos al tiempo establecido al inicio del ensayo.
- Una ventaja de este sistema es que se basa en la norma ASTM. Standard test Method for Particle-size analysis of soils- ASTM 422, la cual está sirviendo de guía para las normas INV 124--13. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro

- Una desventaja que presenta el sistema PARIO es el tema económico, aunque es un buen equipo tiene un costo alto, lo cual haría que algunos laboratoristas consideraran el adquirir este equipo.
- Otra desventaja es que por cada equipo de PARIO solo se puede hacer un ensayo por día, si se quiere hacer varios ensayos se deben tener varios equipos.
- Otra desventaja es que, al ser un método nuevo, que está en pleno desarrollo no se encuentra mucha información sobre estudios realizados a diferentes tipos de suelos.
- Otra desventaja o incertidumbre, es que este equipo tiene un efecto “caja negra”, es decir, aunque se tiene cierta información sobre este equipo (se sabe que trabaja con la Ley de Stokes), no se sabe cómo trabaja mediante el sensor de presión y temperatura que este tiene.

16. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

16.1. CONCLUSIONES

Se realizaron ensayos de laboratorio que permitieron hacer una comparación entre el análisis de granulometría por método del hidrómetro y el método automatizado Pario.

Se analizó técnicamente los resultados obtenidos por el análisis de granulometría por el método del hidrómetro y el sistema automatizado Pario para suelos bentónicos, determinando así que ventajas o desventajas presenta cada uno.

La investigación aclaró algunas dudas sobre la utilización del hidrómetro para una muestra de suelo bentonítico, ya que en los resultados obtenidos se evidencia que no es el mejor método para el análisis granulométrico para este tipo de suelo fino con las características que el mismo presenta.

El método automatizado PARIO demuestra ser una mejor opción para el análisis granulométrico para suelos finos en general, si se sabe que su rango de resultados es más amplio que los que se tienen en cuenta con el hidrómetro y esto ayuda a un mejor resultado para lo que se necesite.

Los ensayos de PARIO realizados con las diferentes muestras fueron válidos gracias a que no presento gran variación en tres de los cuatro resultados obtenidos, mientras que en los cinco ensayos realizados con el hidrómetro presentan gran variación según el porcentaje que pasa, esto genera dudas e incertidumbres al saber si el ensayo se realizó de la manera correcta.

Si bien es cierto hay una gran influencia del laboratorista u operador en la realización del ensayo de granulometría mediante el hidrómetro, lo cual pudo tener influencia en la variación de los resultados obtenidos.

Al realizar el ensayo con el hidrómetro se evidenció cierta dificultad con la preparación de la muestra, se tuvo que reducir el peso ya que al ser bentonita trata de tener una textura densa haciendo que la lectura del hidrómetro se tornara difícil, mientras tanto en el sistema PARIO se optó por hacer lo mismo para facilitar la lectura del sensor.

Una vez terminado el proyecto de grado se tiene como objetivo dar a conocer el método automatizado Pario, en las áreas de estudio de suelos en la Universidad

Católica de Colombia. De igual manera, se pretende proponer una nueva alternativa de estudio para que permita el análisis de la sedimentación gravitacional (análisis de tamaño de partículas) de un material granular fino teniendo la certeza de los resultados obtenidos.

16.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar una revisión a cada una de las normas descritas en el proyecto, para una mejor comprensión de este proyecto.

El presente trabajo de investigación fue realizado específicamente para material arcilloso bentonita que tiene las mismas características; se recomienda seguir una investigación con suelos finos de diferentes características, es decir, que varíen los porcentajes de arcilla presentes en los mismos.

Se recomienda seguir buscando más información sobre el sistema PARIO ya que al ser un método nuevo no se cuenta con mucha información al respecto para futuras investigaciones al transcurrir el tiempo.

Se sugiere seguir las instrucciones del sistema automatizado PARIO para no tener inconvenientes con los resultados y graficas producto del software del equipo, como también con algunos parámetros regidos por una normal internacional diferente a Colombia.

Se recomienda usar esta investigación como guía para posibles proyectos no como resultados debido a que se tienen diferentes equipos de medición en laboratorios del país.

17. BIBLIOGRAFÍA

1. E.T.S.A. de La Coruña. Juan Pérez Valcárcel, Catedrático de Estructuras Conceptos generales de la mecánica del suelo.
2. INVIAS. Método de ensayo normal para el uso del penetrómetro dinámico de cono en aplicaciones de pavimentos a poca profundidad. Bogota. Norma Invias. E-172 – 07. Año 2007)
3. Braja M Das. Principios de ingeniería de cimentaciones. Cuarta Edición. Internacional Thomson Editores. Pag, 2.
4. Ingeniería y construcción. Granulometría De Suelos. [En línea]. Bogotá. [Citado 7 marzo, 2018] Disponible en internet:< <https://civilgeeks.com/2013/11/25/granulometria-suelos-ing-nestor-luis-sanchez/> >
5. SlideShare. Difracción de rayos x. [En línea]. Bogotá [Citado 25 octubre, 2018] Disponible en internet:< <https://es.slideshare.net/maoxro/difraccion-rayos-x>>
6. BADILLO Juarez y RODRIGUEZ Rico, Mecanica de suelos. Fundamentos de la mecánica de suelos. Tomo 1. Limusa Noriega Editores. Pág.. 38.
7. DUARTE, María Carolina y ROJAS, Herman Daniel, Obtención del límite líquido y limite plástico usando el penetrometro de cono de caída, considerando los diferentes conos existentes en la literatura para un suelo bentonítico. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería, 2017. Pág. 37.
8. Scrib. Desarrollo e Historia de la Mecánica de Suelos [En línea]. Bogotá. [Citado 19 abril, 2018] Disponible en Internet: < <https://es.scribd.com/doc/98588051/Desarrollo-e-Historia-de-la-Mecanica-de-Suelos> >
9. W.P Miller, D.E.Radcliffe and D.M. Miller, An historical perspective on the theory and practice of soil mechanical analysis,1988.
- 10.Linked in. New method and apparatus for particle-size analysis replaces conventional operations, which require manual readings for up to 24 hours. [En línea]. Bogotá- [Citado 1 marzo, 2018]. Disponible en internet:< <https://www.linkedin.com/pulse/new-method-apparatus-particle-size-analysis-replaces-which-hertel>>
11. Bowles Joseph. Manual de laboratorios en suelos en Ingeniería Civil. Tomo 1. McGRAW Hill. Pág,47.
- 12.Meter Environment. Automated particle size analysis. [En Línea]. Bogotá. [Citado 1 marzo, 2018] Disponible en internet: < <https://www.metergroup.com/environment/products/pario/>>

13. Geophysical Research Abstracts. Testing the ISP method with the PARIO device: Accuracy of results and influence of homogenization technique. Vol. 19, EGU2017-9422-1, 2017
14. Medina González, Hanoi; García Coronado, Jorge; Núñez Acosta, Daniel El método del hidrómetro: base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelo Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, vol. 16, núm. 3, 2007, pp. 19-24 Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez La Habana, Cuba Disponible en internet:< <http://www.redalyc.org/pdf/932/93216305.pdf>>
15. Ingeplan. Pliego de prescripciones técnicas particulares. [En línea]. Bogotá [Citado 10 marzo, 2018] Disponible en internet:< http://www.elorrio.eus/es-ES/Ayuntamiento/Perfil-Contratante/2014%20Proyecto%20de%20urbanizacion%20del%20vial%20y%20puente6/P1201_PPTP_284_V03.pdf>
16. TECHNICAL PAPER; THE OF TYPE, CONCETRATION AND VOLUME OF DISPERSING AGENT ON THE MAGNITUDE OF THE CLAY CONTENT DETERMINED BY THE HYDROMETER ANALYSIS, Journal of the South African Institution of Civil Engineering, ISSN 1021-2019, Vol 58 No 4, December 2016, Pages 48–54, Paper 1376
17. AGU PUBLICATIONS, Water Resources Research, The integral suspension pressure method (ISP) for precise particle-size analysis by gravitational sedimentation. Article 10.1002/2016WR019830. Pág. 1-9.
18. INVIAS. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro. Bogotá. Norma Invias E124-13. Año 2013
19. ASTM. Standard test Method for Particle-size analysis of soils. Bogotá. Norma ASTM D 422 (Reaprobada 1988). Año 1998.
20. SHORTCOMINGS IN THE ESTIMATION OF CLAY FRACTION BY HYDROMETER – differences the estimation de arcillas fraccion por hidrometro TECHNICAL PAPER, Journal of the South African Institution of Civil Engineering, Vol 58 No 2, June 2016, Pages 14–24, Paper 1232
21. Norma SANS 3001-GR32014 – SOUTH AFRICAN NATIONAL STANDARD
22. Manual User. Meter Environment. Automated particle size analysis. [En Línea]. Bogotá. [Citado 12 Septiembre, 2018] Disponible en internet: < <https://www.metergroup.com/environment/products/pario/>>
23. INVIAS. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro. Bogotá. Norma Invias E124-07. Año 2007.

18. ANEXOS

18.1. ANEXO 1. DATOS Y RESULTADOS ENSAYO GRAVEDAD ESPECIFICA.

Tabla 21. Datos de entrada.

ENSAYO	BENTONITA
MUESTRA	BENTONITA DE COLOR AMARILLO VERDOZO
TEMPERATURA	PESO PICNOMETRO+AGUA
20,8	654,45
23,8	654,06
25,3	654,01
28,2	653,51
29,8	653,41

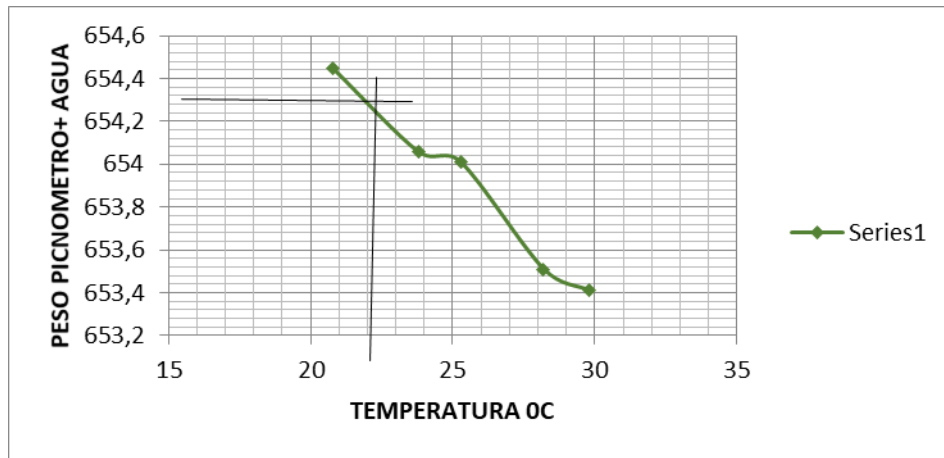
Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Tabla 22. Resultados.

PESO PICNOMETRO		g	154,41
PESO PICNOMETRO+ AGUA		g	654,2
PESO PICNOMETRO+AGUA+SUELO		g	668,9
PESO RECIPIENTE		g	115,2
PESO RECIPIENTE+ SUELO SECO		g	138,6
PESO SUELO SECO		g	23,4
TEMPERATURA		°C	22,00
CONSTANTE K			0,9996
GRAVEDAD ESPECIFICA			2,69

Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Grafica 16. Curva Gravedad Especifica.



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

18.2. ANEXO 2. RESULTADOS SISTEMA PARIO.

Tabla 23. Resultados sistema PARIO, ensayo 1

Diámetro mm	% Pasa
0,00001	0
1,02476E-05	0,535835
1,05014E-05	1,06983
1,07614E-05	1,602
1,10279E-05	2,13233
0,000011301	2,66083
1,15808E-05	3,1875
1,18676E-05	3,71235
1,21615E-05	4,23537
1,24626E-05	4,75656
1,27712E-05	5,27593
1,30875E-05	5,79348
1,34116E-05	6,30921
1,37437E-05	6,82313
0,000014084	7,33523
1,44328E-05	7,84551
1,47902E-05	8,35398
1,51564E-05	8,86064
1,55317E-05	9,36549
1,59163E-05	9,86854
1,63105E-05	10,3698

1,67143E-05	10,8692
1,71282E-05	11,3668
1,75524E-05	11,8627
0,000017987	12,3567
1,84324E-05	12,8489
1,88889E-05	13,3394
1,93566E-05	13,828
1,98359E-05	14,3149
2,03271E-05	14,7999
2,08305E-05	15,2832
2,13463E-05	15,7647
2,18749E-05	16,2444
2,24166E-05	16,7223
2,29717E-05	17,1984
2,35405E-05	17,6728
2,41234E-05	18,1453
2,47208E-05	18,6161
2,53329E-05	19,0852
2,59603E-05	19,5524
2,66031E-05	20,0179
2,72619E-05	20,4816
2,79369E-05	20,9435
2,86287E-05	21,4037
2,93377E-05	21,8621
3,00641E-05	22,3187
3,08086E-05	22,7736
3,15715E-05	23,2267
3,23533E-05	23,678
3,31545E-05	24,1276
3,39755E-05	24,5755
3,48168E-05	25,0215
3,56789E-05	25,4659
3,65624E-05	25,9085
3,74678E-05	26,3493
3,83956E-05	26,7884
3,93464E-05	27,2257
4,03207E-05	27,6613
4,13192E-05	28,0952
4,23424E-05	28,5273
4,33909E-05	28,9576

4,44653E-05	29,3863
4,55664E-05	29,8132
4,66948E-05	30,2383
4,78511E-05	30,6618
0,000049036	31,0835
5,02502E-05	31,5034
5,14946E-05	31,9217
5,27697E-05	32,3382
5,40764E-05	32,753
5,54155E-05	33,1661
5,67878E-05	33,5774
0,000058194	33,987
0,000059635	34,395
6,11117E-05	34,8012
0,000062625	35,2056
6,41758E-05	35,6084
0,000065765	36,0095
6,73935E-05	36,4088
6,90623E-05	36,8065
7,07725E-05	37,2024
0,000072525	37,5967
7,43209E-05	37,9892
7,61613E-05	38,38
7,80473E-05	38,7692
7,99799E-05	39,1566
8,19605E-05	39,5423
0,00008399	39,9264
8,60698E-05	40,3087
8,82012E-05	40,6894
9,03853E-05	41,0684
9,26234E-05	41,4456
0,000094917	41,8212
9,72674E-05	42,1952
0,000099676	42,5674
0,000102144	42,9379
0,000104674	43,3068
0,000107266	43,674
0,000109922	44,0395
0,000112644	44,4034
0,000115433	44,7656

0,000118292	45,1261
0,000121221	45,4849
0,000124223	45,8421
0,000127299	46,1976
0,000130451	46,5514
0,000133681	46,9036
0,000136992	47,2541
0,000140384	47,6029
0,00014386	47,9501
0,000147422	48,2957
0,000151073	48,6396
0,000154814	48,9818
0,000158648	49,3224
0,000162576	49,6613
0,000166602	49,9986
0,000170728	50,3343
0,000174955	50,6683
0,000179288	51,0006
0,000183727	51,3313
0,000188277	51,6604
0,000192939	51,9879
0,000197717	52,3137
0,000202613	52,6378
0,00020763	52,9604
0,000212771	53,2813
0,00021804	53,6005
0,000223439	53,9182
0,000228972	54,2342
0,000234642	54,5486
0,000240453	54,8614
0,000246407	55,1726
0,000252509	55,4821
0,000258762	55,79
0,000265169	56,0963
0,000271735	56,401
0,000278464	56,7041
0,00028536	57,0056
0,000292426	57,3054
0,000299667	57,6037
0,000307088	57,9003

0,000314692	58,1954
0,000322485	58,4888
0,000330471	58,7806
0,000338654	59,0709
0,00034704	59,3595
0,000355634	59,6466
0,00036444	59,932
0,000373465	60,2159
0,000382713	60,4982
0,00039219	60,7788
0,000401901	61,0579
0,000411853	61,3354
0,000422052	61,6114
0,000432503	61,8857
0,000443213	62,1585
0,000454188	62,4297
0,000465435	62,6993
0,000476961	62,9673
0,000488771	63,2337
0,000500875	63,4986
0,000513278	63,7619
0,000525988	64,0237
0,000539013	64,2839
0,00055236	64,5425
0,000566038	64,7995
0,000580055	65,055
0,000594418	65,3089
0,000609138	65,5613
0,000624222	65,8121
0,000639679	66,0601
0,000655519	66,3009
0,000671752	66,5342
0,000688386	66,7606
0,000705432	66,9803
0,000722901	67,1938
0,000740802	67,4014
0,000759146	67,6035
0,000777944	67,8005
0,000797208	67,9927
0,000816949	68,1806

0,000837179	68,3644
0,00085791	68,5447
0,000879154	68,7216
0,000900924	68,8957
0,000923234	69,0673
0,000946096	69,2368
0,000969523	69,4046
0,000993531	69,5709
0,00101813	69,7363
0,00104335	69,901
0,00106918	70,0655
0,00109566	70,2301
0,00112279	70,3952
0,00115059	70,5611
0,00117908	70,7284
0,00120828	70,8972
0,0012382	71,068
0,00126886	71,2413
0,00130028	71,4172
0,00133248	71,5963
0,00136548	71,7789
0,00139929	71,9653
0,00143394	72,156
0,00146945	72,3514
0,00150584	72,5517
0,00154313	72,7574
0,00158134	72,9688
0,0016205	73,1864
0,00166062	73,4105
0,00170174	73,6414
0,00174388	73,8796
0,00178707	74,1254
0,00183132	74,3792
0,00187667	74,6414
0,00192314	74,9123
0,00197076	75,1923
0,00201956	75,4862
0,00206957	75,8325
0,00212082	76,2352
0,00217334	76,6878

0,00222716	77,1838
0,00228231	77,7169
0,00233882	78,2805
0,00239674	78,8683
0,00245609	79,4737
0,00251691	80,0903
0,00257923	80,7118
0,0026431	81,3315
0,00270855	81,9432
0,00277562	82,5403
0,00284435	83,1164
0,00291479	83,6651
0,00298697	84,1799
0,00306093	84,6543
0,00313673	85,082
0,0032144	85,4564
0,003294	85,7712
0,00337557	86,0198
0,00345916	86,1959
0,00354481	86,293
0,00363259	86,3107
0,00372255	86,3109
0,00381473	86,311
0,00390919	86,3112
0,00400599	86,3113
0,00410519	86,3114
0,00420685	86,3115
0,00431102	86,3116
0,00441777	86,3116
0,00452717	86,3117
0,00463927	86,3118
0,00475415	86,3118
0,00487188	86,3119
0,00499252	86,3119
0,00511615	86,312
0,00524284	86,3121
0,00537266	86,3121
0,00550571	86,3122
0,00564204	86,3122
0,00578175	86,3123

0,00592493	86,3124
0,00607164	86,3125
0,00622199	86,3126
0,00637607	86,3127
0,00653396	86,3128
0,00669575	86,3129
0,00686156	86,313
0,00703147	86,3132
0,00720559	86,3133
0,00738402	86,3135
0,00756687	86,3136
0,00775424	86,3138
0,00794626	86,3139
0,00814303	86,3141
0,00834467	86,3142
0,00855131	86,3144
0,00876306	86,3145
0,00898006	86,3147
0,00920243	86,3148
0,00943031	86,315
0,00966383	86,3151
0,00990313	86,3153
0,0101484	86,3154
0,0103997	86,3155
0,0106572	86,3156
0,0109211	86,3157
0,0111915	86,3158
0,0114686	86,3159
0,0117526	86,316
0,0120437	86,316
0,0123419	86,3161
0,0126475	86,3161
0,0129607	86,3162
0,0132817	86,3162
0,0136105	86,3163
0,0139476	86,3163
0,014293	86,3164
0,0146469	86,3164
0,0150096	86,3164
0,0153813	86,3165

0,0157621	86,3165
0,0161525	86,3166
0,0165524	86,3166
0,0169623	86,3167
0,0173823	86,3168
0,0178128	86,3168
0,0182539	86,3169
0,0187059	86,317
0,0191691	86,3171
0,0196438	86,3172
0,0201302	86,3173
0,0206287	86,3176
0,0211395	86,318
0,021663	86,3186
0,0221994	86,3194
0,0227491	86,3203
0,0233125	86,3214
0,0238897	86,3228
0,0244813	86,3243
0,0250875	86,3259
0,0257088	86,3278
0,0263454	86,3299
0,0269978	86,3321
0,0276663	86,3345
0,0283514	86,3371
0,0290535	86,34
0,0297729	86,343
0,0305102	86,3462
0,0312657	86,3496
0,0320399	86,3532
0,0328333	86,357
0,0336463	86,361
0,0344795	86,3652
0,0353333	86,3696
0,0362083	86,3783
0,0371049	86,4891
0,0380237	86,7334
0,0389653	87,0981
0,0399301	87,5702
0,0409189	88,1365

0,0419322	88,784
0,0429705	89,4994
0,0440346	90,2697
0,045125	91,0819
0,0462424	91,9227
0,0473875	92,779
0,048561	93,6378
0,0497635	94,486
0,0509957	95,3104
0,0522585	96,098
0,0535526	96,8356
0,0548787	97,51
0,0562377	98,1083
0,0576302	98,6173
0,0590573	99,0239
0,0605197	99,315
0,0620184	99,4774
0,0635541	99,5078
0,0651279	99,5078
0,0667406	99,5078
0,0683933	99,5078
0,0700869	99,5079
0,0718225	99,5079
0,073601	99,5079
0,0754235	99,5079
0,0772912	99,5079
0,0792052	99,508
0,0811665	99,508
0,0831764	99,508
0,0852361	99,508
0,0873467	99,508
0,0895097	99,508
0,0917262	99,508
0,0939976	99,508
0,0963252	99,508
0,0987105	99,508
0,101155	99,5081
0,10366	99,5081
0,106227	99,5081
0,108857	99,5081

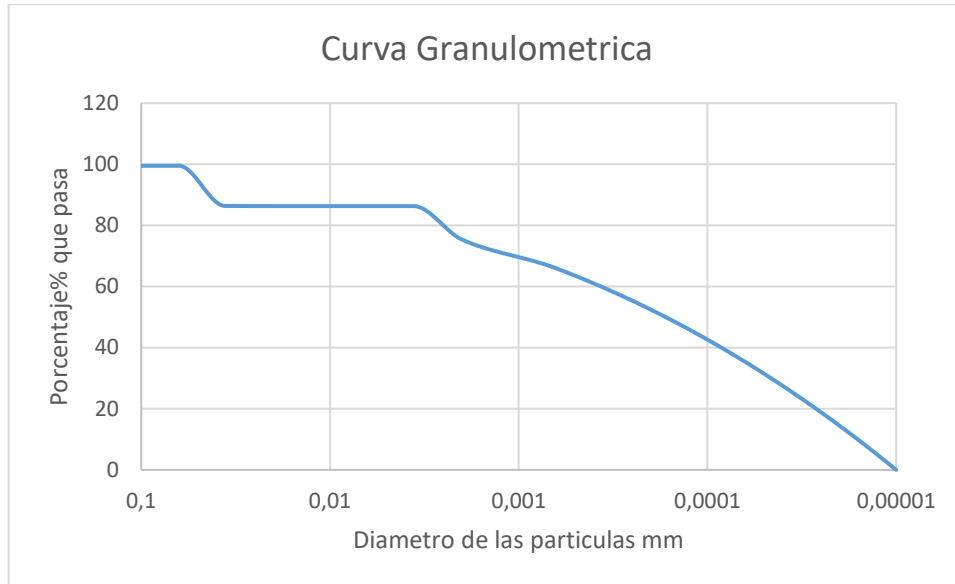
0,111553	99,5081
0,114315	99,5081
0,117146	99,5081
0,120047	99,5082
0,123019	99,5082
0,126066	99,5082
0,129187	99,5082
0,132386	99,5083
0,135664	99,5083
0,139024	99,5083
0,142467	99,5084
0,145994	99,5084
0,14961	99,5084
0,153314	99,5085
0,157111	99,5085
0,161001	99,5086
0,164988	99,5087
0,169074	99,5087
0,17326	99,5088
0,177551	99,5088
0,181947	99,5089
0,186453	99,509
0,19107	99,5091
0,195801	99,5092
0,20065	99,5093
0,205619	99,5102
0,21071	99,5124
0,215928	99,5158
0,221275	99,5203
0,226754	99,5259
0,232369	99,5326
0,238124	99,5402
0,24402	99,5487
0,250063	99,5582
0,256255	99,5684
0,2626	99,5794
0,269103	99,591
0,275767	99,6033
0,282596	99,6162
0,289593	99,6296

0,296765	99,6435
0,304113	99,6578
0,311644	99,6725
0,319361	99,6874
0,327269	99,7026
0,335373	99,718
0,343678	99,7335
0,352188	99,7491
0,36091	99,7647
0,369847	99,7803
0,379005	99,7958
0,38839	99,8111
0,398008	99,8262
0,407864	99,841
0,417963	99,8556
0,428313	99,8697
0,43892	99,8834
0,449788	99,8966
0,460926	99,9093
0,47234	99,9214
0,484037	99,9328
0,496023	99,9435
0,508305	99,9534
0,520892	99,9625
0,533791	99,9707
0,547009	99,978
0,560555	99,9842
0,574436	99,9894
0,58866	99,9935
0,603237	99,9964
0,618175	99,9981
0,633482	99,9986
0,649169	99,9987
0,665244	99,9987
0,681717	99,9988
0,698599	99,9988
0,715898	99,9989
0,733625	99,9989
0,751792	99,999
0,770408	99,999

0,789486	99,9991
0,809036	99,9991
0,829069	99,9992
0,849599	99,9992
0,870638	99,9993
0,892197	99,9993
0,91429	99,9994
0,936931	99,9994
0,960132	99,9994
0,983907	99,9995
1,00827	99,9995
1,03324	99,9995
1,05882	99,9996
1,08504	99,9996
1,11191	99,9996
1,13945	99,9997
1,16766	99,9997
1,19658	99,9997
1,22621	99,9997
1,25657	99,9998
1,28769	99,9998
1,31957	99,9998
1,35225	99,9998
1,38574	99,9999
1,42005	99,9999
1,45521	99,9999
1,49125	99,9999
1,52818	99,9999
1,56602	99,9999
1,6048	99,9999
1,64454	100
1,68526	100
1,72699	100
1,76976	100
1,81358	100
1,85849	100
1,90451	100
1,95167	100
2	100

Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Grafica 17. Curva granulometrica ensayo 1.



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Tabla 24. Resultados sistema PARIO, ensayo 2.

Diámetro mm	% Pasa
0,00001	0
1,02476E-05	0,0769771
1,05014E-05	0,158946
1,07614E-05	0,245879
1,10279E-05	0,337747
0,000011301	0,434523
1,15808E-05	0,536178
1,18676E-05	0,642684
1,21615E-05	0,754013
1,24626E-05	0,870137
1,27712E-05	0,991029
1,30875E-05	1,11666
1,34116E-05	1,247
1,37437E-05	1,38202
0,000014084	1,5217
1,44328E-05	1,666
1,47902E-05	1,8149
1,51564E-05	1,96838
1,55317E-05	2,12639

1,59163E-05	2,28892
1,63105E-05	2,45593
1,67143E-05	2,6274
1,71282E-05	2,8033
1,75524E-05	2,9836
0,000017987	3,16828
1,84324E-05	3,3573
1,88889E-05	3,55063
1,93566E-05	3,74826
1,98359E-05	3,95015
2,03271E-05	4,15626
2,08305E-05	4,36659
2,13463E-05	4,58109
2,18749E-05	4,79974
2,24166E-05	5,0225
2,29717E-05	5,24936
2,35405E-05	5,48029
2,41234E-05	5,71525
2,47208E-05	5,95421
2,53329E-05	6,19716
2,59603E-05	6,44406
2,66031E-05	6,69488
2,72619E-05	6,9496
2,79369E-05	7,20818
2,86287E-05	7,4706
2,93377E-05	7,73684
3,00641E-05	8,00685
3,08086E-05	8,28062
3,15715E-05	8,55812
3,23533E-05	8,83931
3,31545E-05	9,12418
3,39755E-05	9,41269
3,48168E-05	9,70481
3,56789E-05	10,0005
3,65624E-05	10,2998
3,74678E-05	10,6026
3,83956E-05	10,9089
3,93464E-05	11,2186
4,03207E-05	11,5319
4,13192E-05	11,8485

4,23424E-05	12,1685
4,33909E-05	12,4919
4,44653E-05	12,8186
4,55664E-05	13,1486
4,66948E-05	13,4819
4,78511E-05	13,8185
0,000049036	14,1582
5,02502E-05	14,5012
5,14946E-05	14,8473
5,27697E-05	15,1966
5,40764E-05	15,5489
5,54155E-05	15,9044
5,67878E-05	16,2629
0,000058194	16,6244
0,000059635	16,9889
6,11117E-05	17,3564
0,000062625	17,7268
6,41758E-05	18,1001
0,000065765	18,4764
6,73935E-05	18,8554
6,90623E-05	19,2373
7,07725E-05	19,622
0,000072525	20,0095
7,43209E-05	20,3997
7,61613E-05	20,7926
7,80473E-05	21,1882
7,99799E-05	21,5865
8,19605E-05	21,9874
0,00008399	22,3909
8,60698E-05	22,7969
8,82012E-05	23,2056
9,03853E-05	23,6167
9,26234E-05	24,0303
0,000094917	24,4464
9,72674E-05	24,8649
0,000099676	25,2858
0,000102144	25,7091
0,000104674	26,1348
0,000107266	26,5627
0,000109922	26,993

0,000112644	27,4255
0,000115433	27,8603
0,000118292	28,2973
0,000121221	28,7364
0,000124223	29,1777
0,000127299	29,6211
0,000130451	30,0666
0,000133681	30,5142
0,000136992	30,9639
0,000140384	31,4155
0,00014386	31,8691
0,000147422	32,3247
0,000151073	32,7822
0,000154814	33,2416
0,000158648	33,7029
0,000162576	34,166
0,000166602	34,6309
0,000170728	35,0976
0,000174955	35,5661
0,000179288	36,0363
0,000183727	36,5082
0,000188277	36,9818
0,000192939	37,457
0,000197717	37,9338
0,000202613	38,4123
0,00020763	38,8922
0,000212771	39,3738
0,00021804	39,8568
0,000223439	40,3413
0,000228972	40,8273
0,000234642	41,3146
0,000240453	41,8034
0,000246407	42,2935
0,000252509	42,785
0,000258762	43,2778
0,000265169	43,7718
0,000271735	44,2671
0,000278464	44,7637
0,00028536	45,2614
0,000292426	45,7603

0,000299667	46,2603
0,000307088	46,7615
0,000314692	47,2637
0,000322485	47,767
0,000330471	48,2713
0,000338654	48,7766
0,00034704	49,2829
0,000355634	49,7901
0,00036444	50,2983
0,000373465	50,8073
0,000382713	51,3172
0,00039219	51,8279
0,000401901	52,3394
0,000411853	52,8517
0,000422052	53,3647
0,000432503	53,8785
0,000443213	54,3929
0,000454188	54,908
0,000465435	55,4237
0,000476961	55,9401
0,000488771	56,457
0,000500875	56,9745
0,000513278	57,4925
0,000525988	58,0109
0,000539013	58,5299
0,00055236	59,0493
0,000566038	59,5691
0,000580055	60,0892
0,000594418	60,6098
0,000609138	61,1306
0,000624222	61,6518
0,000639679	62,1811
0,000655519	62,7481
0,000671752	63,3534
0,000688386	63,9951
0,000705432	64,671
0,000722901	65,3791
0,000740802	66,1174
0,000759146	66,8836
0,000777944	67,6759

0,000797208	68,492
0,000816949	69,33
0,000837179	70,1877
0,00085791	71,0631
0,000879154	71,954
0,000900924	72,8585
0,000923234	73,7744
0,000946096	74,6998
0,000969523	75,6324
0,000993531	76,5702
0,00101813	77,5112
0,00104335	78,4532
0,00106918	79,3943
0,00109566	80,3322
0,00112279	81,2651
0,00115059	82,1907
0,00117908	83,107
0,00120828	84,0119
0,0012382	84,9034
0,00126886	85,7794
0,00130028	86,6378
0,00133248	87,4765
0,00136548	88,2934
0,00139929	89,0866
0,00143394	89,8538
0,00146945	90,5931
0,00150584	91,3024
0,00154313	91,9795
0,00158134	92,6225
0,0016205	93,2291
0,00166062	93,7975
0,00170174	94,3254
0,00174388	94,8109
0,00178707	95,2517
0,00183132	95,646
0,00187667	95,9915
0,00192314	96,2863
0,00197076	96,5282
0,00201956	96,7194
0,00206957	96,8988

0,00212082	97,0754
0,00217334	97,249
0,00222716	97,419
0,00228231	97,585
0,00233882	97,7464
0,00239674	97,903
0,00245609	98,0541
0,00251691	98,1993
0,00257923	98,3382
0,0026431	98,4703
0,00270855	98,5951
0,00277562	98,7122
0,00284435	98,8212
0,00291479	98,9215
0,00298697	99,0126
0,00306093	99,0943
0,00313673	99,1659
0,0032144	99,227
0,003294	99,2771
0,00337557	99,3159
0,00345916	99,3428
0,00354481	99,3573
0,00363259	99,36
0,00372255	99,36
0,00381473	99,3601
0,00390919	99,3601
0,00400599	99,3602
0,00410519	99,3602
0,00420685	99,3603
0,00431102	99,3603
0,00441777	99,3603
0,00452717	99,3604
0,00463927	99,3604
0,00475415	99,3604
0,00487188	99,3604
0,00499252	99,3604
0,00511615	99,3605
0,00524284	99,3605
0,00537266	99,3605
0,00550571	99,3605

0,00564204	99,3606
0,00578175	99,3606
0,00592493	99,3606
0,00607164	99,3606
0,00622199	99,3607
0,00637607	99,3607
0,00653396	99,3607
0,00669575	99,3608
0,00686156	99,3608
0,00703147	99,3609
0,00720559	99,3609
0,00738402	99,3609
0,00756687	99,361
0,00775424	99,361
0,00794626	99,3611
0,00814303	99,3611
0,00834467	99,3611
0,00855131	99,3612
0,00876306	99,3612
0,00898006	99,3613
0,00920243	99,3613
0,00943031	99,3614
0,00966383	99,3614
0,00990313	99,3614
0,0101484	99,3615
0,0103997	99,3615
0,0106572	99,3615
0,0109211	99,3616
0,0111915	99,3616
0,0114686	99,3617
0,0117526	99,3617
0,0120437	99,3617
0,0123419	99,3617
0,0126475	99,3618
0,0129607	99,3618
0,0132817	99,3618
0,0136105	99,3618
0,0139476	99,3618
0,014293	99,3619
0,0146469	99,3619

0,0150096	99,3619
0,0153813	99,3619
0,0157621	99,3619
0,0161525	99,362
0,0165524	99,362
0,0169623	99,362
0,0173823	99,3621
0,0178128	99,3621
0,0182539	99,3621
0,0187059	99,3622
0,0191691	99,3622
0,0196438	99,3623
0,0201302	99,3623
0,0206287	99,3624
0,0211395	99,3625
0,021663	99,3627
0,0221994	99,3628
0,0227491	99,3631
0,0233125	99,3633
0,0238897	99,3636
0,0244813	99,3639
0,0250875	99,3643
0,0257088	99,3647
0,0263454	99,3652
0,0269978	99,3657
0,0276663	99,3662
0,0283514	99,3667
0,0290535	99,3673
0,0297729	99,368
0,0305102	99,3687
0,0312657	99,3694
0,0320399	99,3702
0,0328333	99,371
0,0336463	99,3718
0,0344795	99,3727
0,0353333	99,3737
0,0362083	99,3748
0,0371049	99,38
0,0380237	99,3905
0,0389653	99,4057

0,0399301	99,4252
0,0409189	99,4484
0,0419322	99,4747
0,0429705	99,5038
0,0440346	99,535
0,045125	99,5679
0,0462424	99,6018
0,0473875	99,6363
0,048561	99,6709
0,0497635	99,7051
0,0509957	99,7383
0,0522585	99,7699
0,0535526	99,7996
0,0548787	99,8267
0,0562377	99,8507
0,0576302	99,8712
0,0590573	99,8876
0,0605197	99,8993
0,0620184	99,9059
0,0635541	99,9072
0,0651279	99,9072
0,0667406	99,9073
0,0683933	99,9074
0,0700869	99,9074
0,0718225	99,9075
0,073601	99,9075
0,0754235	99,9075
0,0772912	99,9076
0,0792052	99,9076
0,0811665	99,9076
0,0831764	99,9076
0,0852361	99,9077
0,0873467	99,9077
0,0895097	99,9077
0,0917262	99,9077
0,0939976	99,9077
0,0963252	99,9078
0,0987105	99,9078
0,101155	99,9078
0,10366	99,9078

0,106227	99,9079
0,108857	99,9079
0,111553	99,908
0,114315	99,908
0,117146	99,9081
0,120047	99,9081
0,123019	99,9082
0,126066	99,9083
0,129187	99,9087
0,132386	99,9096
0,135664	99,9107
0,139024	99,9122
0,142467	99,9139
0,145994	99,9158
0,14961	99,918
0,153314	99,9202
0,157111	99,9226
0,161001	99,9251
0,164988	99,9276
0,169074	99,9301
0,17326	99,9325
0,177551	99,9349
0,181947	99,9371
0,186453	99,9392
0,19107	99,9411
0,195801	99,9428
0,20065	99,9442
0,205619	99,9454
0,21071	99,9467
0,215928	99,9479
0,221275	99,9492
0,226754	99,9504
0,232369	99,9516
0,238124	99,9528
0,24402	99,954
0,250063	99,9551
0,256255	99,9563
0,2626	99,9574
0,269103	99,9585
0,275767	99,9597

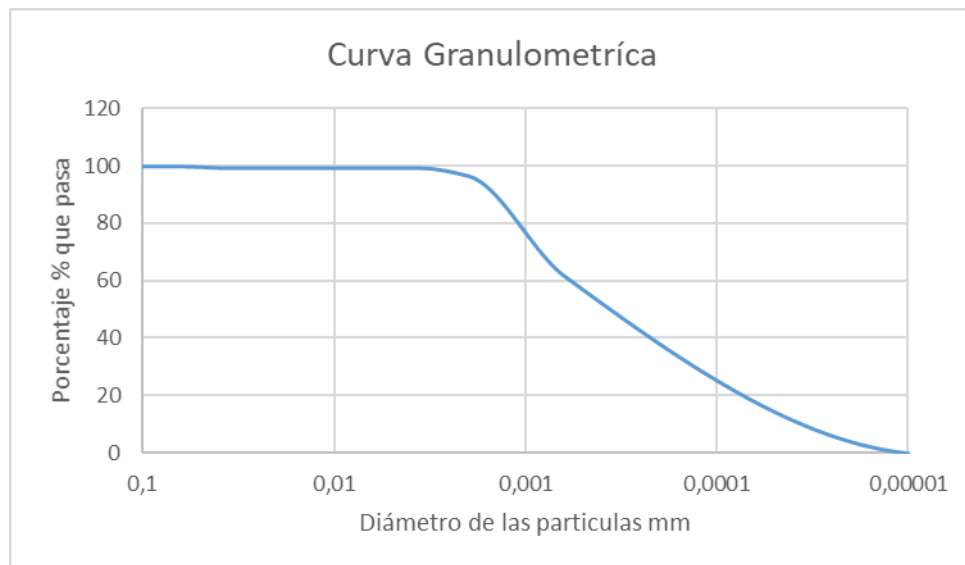
0,282596	99,9607
0,289593	99,9618
0,296765	99,9629
0,304113	99,9639
0,311644	99,965
0,319361	99,966
0,327269	99,967
0,335373	99,9679
0,343678	99,9689
0,352188	99,9698
0,36091	99,9708
0,369847	99,9717
0,379005	99,9726
0,38839	99,9734
0,398008	99,9743
0,407864	99,9751
0,417963	99,9759
0,428313	99,9767
0,43892	99,9775
0,449788	99,9782
0,460926	99,979
0,47234	99,9797
0,484037	99,9804
0,496023	99,981
0,508305	99,9817
0,520892	99,9823
0,533791	99,9829
0,547009	99,9835
0,560555	99,9841
0,574436	99,9846
0,58866	99,9851
0,603237	99,9856
0,618175	99,9861
0,633482	99,9865
0,649169	99,9869
0,665244	99,9874
0,681717	99,9878
0,698599	99,9882
0,715898	99,9887
0,733625	99,9891

0,751792	99,9895
0,770408	99,99
0,789486	99,9904
0,809036	99,9908
0,829069	99,9912
0,849599	99,9916
0,870638	99,992
0,892197	99,9924
0,91429	99,9928
0,936931	99,9932
0,960132	99,9936
0,983907	99,9939
1,00827	99,9943
1,03324	99,9946
1,05882	99,995
1,08504	99,9953
1,11191	99,9957
1,13945	99,996
1,16766	99,9963
1,19658	99,9966
1,22621	99,9969
1,25657	99,9972
1,28769	99,9974
1,31957	99,9977
1,35225	99,9979
1,38574	99,9982
1,42005	99,9984
1,45521	99,9986
1,49125	99,9988
1,52818	99,999
1,56602	99,9992
1,6048	99,9993
1,64454	99,9995
1,68526	99,9996
1,72699	99,9997
1,76976	99,9998
1,81358	99,9999
1,85849	99,9999
1,90451	100
1,95167	100

2	100
---	-----

Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Grafica 18. Curva granulometrica ensayo 2.



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Tabla 25. Resultados sistema PARIO, ensayo 3.

Diametro mm	% Pasa
0,00001	0
1,02476E-05	0,495494
1,05014E-05	0,990526
1,07614E-05	1,4851
1,10279E-05	1,97921
0,000011301	2,47286
1,15808E-05	2,96605
1,18676E-05	3,45879
1,21615E-05	3,95108
1,24626E-05	4,44291
1,27712E-05	4,93429
1,30875E-05	5,42522
1,34116E-05	5,9157
1,37437E-05	6,40573

0,000014084	6,89532
1,44328E-05	7,38447
1,47902E-05	7,87317
1,51564E-05	8,36143
1,55317E-05	8,84925
1,59163E-05	9,33663
1,63105E-05	9,82358
1,67143E-05	10,3101
1,71282E-05	10,7962
1,75524E-05	11,2818
0,000017987	11,767
1,84324E-05	12,2518
1,88889E-05	12,7362
1,93566E-05	13,2201
1,98359E-05	13,7036
2,03271E-05	14,1867
2,08305E-05	14,6693
2,13463E-05	15,1515
2,18749E-05	15,6334
2,24166E-05	16,1147
2,29717E-05	16,5957
2,35405E-05	17,0763
2,41234E-05	17,5564
2,47208E-05	18,0362
2,53329E-05	18,5155
2,59603E-05	18,9944
2,66031E-05	19,4729
2,72619E-05	19,951
2,79369E-05	20,4287
2,86287E-05	20,906
2,93377E-05	21,3829
3,00641E-05	21,8594
3,08086E-05	22,3355
3,15715E-05	22,8111
3,23533E-05	23,2864
3,31545E-05	23,7613
3,39755E-05	24,2358
3,48168E-05	24,71
3,56789E-05	25,1837
3,65624E-05	25,657

3,74678E-05	26,1299
3,83956E-05	26,6025
3,93464E-05	27,0747
4,03207E-05	27,5464
4,13192E-05	28,0179
4,23424E-05	28,4889
4,33909E-05	28,9595
4,44653E-05	29,4298
4,55664E-05	29,8997
4,66948E-05	30,3692
4,78511E-05	30,8383
0,000049036	31,3071
5,02502E-05	31,7755
5,14946E-05	32,2435
5,27697E-05	32,7112
5,40764E-05	33,1785
5,54155E-05	33,6454
5,67878E-05	34,1119
0,000058194	34,5781
0,000059635	35,044
6,11117E-05	35,5095
0,000062625	35,9746
6,41758E-05	36,4393
0,000065765	36,9038
6,73935E-05	37,3678
6,90623E-05	37,8315
7,07725E-05	38,2949
0,000072525	38,7579
7,43209E-05	39,2205
7,61613E-05	39,6828
7,80473E-05	40,1448
7,99799E-05	40,6064
8,19605E-05	41,0677
0,00008399	41,5286
8,60698E-05	41,9892
8,82012E-05	42,4495
9,03853E-05	42,9094
9,26234E-05	43,369
0,000094917	43,8283
9,72674E-05	44,2872

0,000099676	44,7458
0,000102144	45,204
0,000104674	45,662
0,000107266	46,1196
0,000109922	46,5769
0,000112644	47,0338
0,000115433	47,4905
0,000118292	47,9468
0,000121221	48,4028
0,000124223	48,8585
0,000127299	49,3138
0,000130451	49,7689
0,000133681	50,2236
0,000136992	50,678
0,000140384	51,1322
0,00014386	51,586
0,000147422	52,0395
0,000151073	52,4927
0,000154814	52,9455
0,000158648	53,3981
0,000162576	53,8504
0,000166602	54,3024
0,000170728	54,7541
0,000174955	55,2054
0,000179288	55,6565
0,000183727	56,1073
0,000188277	56,5578
0,000192939	57,008
0,000197717	57,458
0,000202613	57,9076
0,00020763	58,3569
0,000212771	58,806
0,00021804	59,2547
0,000223439	59,7032
0,000228972	60,1514
0,000234642	60,5994
0,000240453	61,047
0,000246407	61,4944
0,000252509	61,9415
0,000258762	62,3883

0,000265169	62,8348
0,000271735	63,2811
0,000278464	63,7271
0,00028536	64,1728
0,000292426	64,6183
0,000299667	65,0635
0,000307088	65,5084
0,000314692	65,9531
0,000322485	66,3975
0,000330471	66,8417
0,000338654	67,2855
0,00034704	67,7292
0,000355634	68,1726
0,00036444	68,6157
0,000373465	69,0585
0,000382713	69,5012
0,00039219	69,9435
0,000401901	70,3856
0,000411853	70,8275
0,000422052	71,2691
0,000432503	71,7105
0,000443213	72,1517
0,000454188	72,5926
0,000465435	73,0332
0,000476961	73,4736
0,000488771	73,9138
0,000500875	74,3538
0,000513278	74,7935
0,000525988	75,2329
0,000539013	75,6722
0,00055236	76,1112
0,000566038	76,55
0,000580055	76,9886
0,000594418	77,4269
0,000609138	77,865
0,000624222	78,3029
0,000639679	78,7431
0,000655519	79,195
0,000671752	79,6587
0,000688386	80,1332

0,000705432	80,6178
0,000722901	81,1114
0,000740802	81,6133
0,000759146	82,1226
0,000777944	82,6383
0,000797208	83,1596
0,000816949	83,6857
0,000837179	84,2155
0,00085791	84,7483
0,000879154	85,2832
0,000900924	85,8193
0,000923234	86,3557
0,000946096	86,8915
0,000969523	87,4259
0,000993531	87,9579
0,00101813	88,4867
0,00104335	89,0115
0,00106918	89,5312
0,00109566	90,0451
0,00112279	90,5523
0,00115059	91,0519
0,00117908	91,5429
0,00120828	92,0246
0,0012382	92,4961
0,00126886	92,9564
0,00130028	93,4046
0,00133248	93,84
0,00136548	94,2616
0,00139929	94,6686
0,00143394	95,06
0,00146945	95,435
0,00150584	95,7927
0,00154313	96,1322
0,00158134	96,4526
0,0016205	96,7532
0,00166062	97,0329
0,00170174	97,2908
0,00174388	97,5262
0,00178707	97,7382
0,00183132	97,9258

0,00187667	98,0882
0,00192314	98,2244
0,00197076	98,3337
0,00201956	98,4173
0,00206957	98,4947
0,00212082	98,5706
0,00217334	98,6449
0,00222716	98,7174
0,00228231	98,7879
0,00233882	98,8563
0,00239674	98,9224
0,00245609	98,986
0,00251691	99,0469
0,00257923	99,105
0,0026431	99,1601
0,00270855	99,2121
0,00277562	99,2607
0,00284435	99,3058
0,00291479	99,3473
0,00298697	99,3849
0,00306093	99,4184
0,00313673	99,4478
0,0032144	99,4729
0,003294	99,4934
0,00337557	99,5093
0,00345916	99,5202
0,00354481	99,5262
0,00363259	99,5273
0,00372255	99,5273
0,00381473	99,5273
0,00390919	99,5274
0,00400599	99,5274
0,00410519	99,5274
0,00420685	99,5275
0,00431102	99,5275
0,00441777	99,5275
0,00452717	99,5275
0,00463927	99,5275
0,00475415	99,5276
0,00487188	99,5276

0,00499252	99,5276
0,00511615	99,5276
0,00524284	99,5276
0,00537266	99,5276
0,00550571	99,5277
0,00564204	99,5277
0,00578175	99,5277
0,00592493	99,5277
0,00607164	99,5277
0,00622199	99,5277
0,00637607	99,5277
0,00653396	99,5277
0,00669575	99,5277
0,00686156	99,5277
0,00703147	99,5278
0,00720559	99,5278
0,00738402	99,5278
0,00756687	99,5278
0,00775424	99,5278
0,00794626	99,5278
0,00814303	99,5278
0,00834467	99,5278
0,00855131	99,5278
0,00876306	99,5278
0,00898006	99,5278
0,00920243	99,5278
0,00943031	99,5278
0,00966383	99,5278
0,00990313	99,5278
0,0101484	99,5278
0,0103997	99,5278
0,0106572	99,5279
0,0109211	99,5279
0,0111915	99,5279
0,0114686	99,5279
0,0117526	99,5279
0,0120437	99,5279
0,0123419	99,5279
0,0126475	99,528
0,0129607	99,528

0,0132817	99,528
0,0136105	99,528
0,0139476	99,5281
0,014293	99,5281
0,0146469	99,5281
0,0150096	99,5281
0,0153813	99,5282
0,0157621	99,5282
0,0161525	99,5282
0,0165524	99,5283
0,0169623	99,5283
0,0173823	99,5283
0,0178128	99,5283
0,0182539	99,5283
0,0187059	99,5284
0,0191691	99,5284
0,0196438	99,5284
0,0201302	99,5284
0,0206287	99,5284
0,0211395	99,5284
0,021663	99,5284
0,0221994	99,5284
0,0227491	99,5284
0,0233125	99,5284
0,0238897	99,5284
0,0244813	99,5284
0,0250875	99,5284
0,0257088	99,5284
0,0263454	99,5284
0,0269978	99,5284
0,0276663	99,5284
0,0283514	99,5284
0,0290535	99,5284
0,0297729	99,5284
0,0305102	99,5284
0,0312657	99,5284
0,0320399	99,5284
0,0328333	99,5284
0,0336463	99,5284
0,0344795	99,5284

0,0353333	99,5284
0,0362083	99,5285
0,0371049	99,5311
0,0380237	99,5369
0,0389653	99,5457
0,0399301	99,5571
0,0409189	99,5708
0,0419322	99,5864
0,0429705	99,6038
0,0440346	99,6225
0,045125	99,6423
0,0462424	99,6627
0,0473875	99,6836
0,048561	99,7046
0,0497635	99,7253
0,0509957	99,7456
0,0522585	99,7649
0,0535526	99,7831
0,0548787	99,7998
0,0562377	99,8147
0,0576302	99,8274
0,0590573	99,8378
0,0605197	99,8453
0,0620184	99,8498
0,0635541	99,8512
0,0651279	99,8518
0,0667406	99,8523
0,0683933	99,8527
0,0700869	99,8531
0,0718225	99,8535
0,073601	99,8538
0,0754235	99,8541
0,0772912	99,8543
0,0792052	99,8545
0,0811665	99,8547
0,0831764	99,8549
0,0852361	99,8551
0,0873467	99,8552
0,0895097	99,8554
0,0917262	99,8555

0,0939976	99,8557
0,0963252	99,8559
0,0987105	99,8561
0,1011155	99,8563
0,10366	99,8565
0,106227	99,8568
0,108857	99,8571
0,111553	99,8574
0,114315	99,8578
0,117146	99,8582
0,120047	99,8587
0,123019	99,8592
0,126066	99,8599
0,129187	99,8616
0,132386	99,8644
0,135664	99,8682
0,139024	99,8729
0,142467	99,8783
0,145994	99,8843
0,14961	99,8907
0,153314	99,8975
0,157111	99,9045
0,161001	99,9115
0,164988	99,9185
0,169074	99,9253
0,17326	99,9317
0,177551	99,9376
0,181947	99,9429
0,186453	99,9475
0,19107	99,9512
0,195801	99,9539
0,20065	99,9555
0,205619	99,9566
0,21071	99,9576
0,215928	99,9586
0,221275	99,9595
0,226754	99,9604
0,232369	99,9613
0,238124	99,9621
0,24402	99,9629

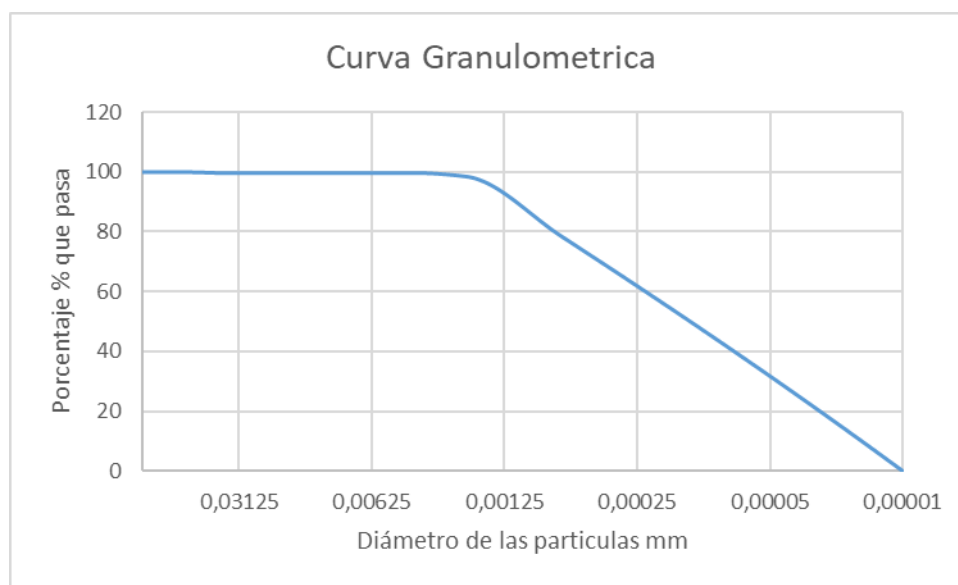
0,250063	99,9637
0,256255	99,9644
0,2626	99,9651
0,269103	99,9658
0,275767	99,9665
0,282596	99,9671
0,289593	99,9677
0,296765	99,9682
0,304113	99,9688
0,311644	99,9693
0,319361	99,9698
0,327269	99,9703
0,335373	99,9707
0,343678	99,9712
0,352188	99,9716
0,36091	99,972
0,369847	99,9724
0,379005	99,9728
0,38839	99,9732
0,398008	99,9736
0,407864	99,974
0,417963	99,9743
0,428313	99,9747
0,43892	99,975
0,449788	99,9754
0,460926	99,9757
0,47234	99,9761
0,484037	99,9764
0,496023	99,9768
0,508305	99,9772
0,520892	99,9775
0,533791	99,9779
0,547009	99,9783
0,560555	99,9787
0,574436	99,9791
0,58866	99,9795
0,603237	99,9799
0,618175	99,9804
0,633482	99,9808
0,649169	99,9813

0,665244	99,9818
0,681717	99,9822
0,698599	99,9827
0,715898	99,9831
0,733625	99,9836
0,751792	99,984
0,770408	99,9845
0,789486	99,9849
0,809036	99,9854
0,829069	99,9858
0,849599	99,9863
0,870638	99,9867
0,892197	99,9871
0,91429	99,9876
0,936931	99,988
0,960132	99,9884
0,983907	99,9888
1,00827	99,9893
1,03324	99,9897
1,05882	99,9901
1,08504	99,9905
1,11191	99,9909
1,13945	99,9913
1,16766	99,9918
1,19658	99,9922
1,22621	99,9926
1,25657	99,993
1,28769	99,9934
1,31957	99,9938
1,35225	99,9941
1,38574	99,9945
1,42005	99,9949
1,45521	99,9953
1,49125	99,9957
1,52818	99,9961
1,56602	99,9964
1,6048	99,9968
1,64454	99,9972
1,68526	99,9975
1,72699	99,9979

1,76976	99,9983
1,81358	99,9986
1,85849	99,999
1,90451	99,9993
1,95167	99,9997
2	100

Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Grafica 19. Curva granulometrica ensayo 3



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Tabla 26. Resultados sistema PARIO, ensayo 4.

Diámetro mm	%Pasa
0,00001	0
1,02476E-05	0,477485
1,05014E-05	0,954377
1,07614E-05	1,43068
1,10279E-05	1,90639
0,000011301	2,38152
1,15808E-05	2,85605
1,18676E-05	3,33001
1,21615E-05	3,80338

1,24626E-05	4,27618
1,27712E-05	4,74839
1,30875E-05	5,22003
1,34116E-05	5,6911
1,37437E-05	6,16159
0,000014084	6,6315
1,44328E-05	7,10085
1,47902E-05	7,56963
1,51564E-05	8,03785
1,55317E-05	8,5055
1,59163E-05	8,97259
1,63105E-05	9,43912
1,67143E-05	9,90508
1,71282E-05	10,3705
1,75524E-05	10,8353
0,000017987	11,2997
1,84324E-05	11,7634
1,88889E-05	12,2266
1,93566E-05	12,6892
1,98359E-05	13,1514
2,03271E-05	13,6129
2,08305E-05	14,0739
2,13463E-05	14,5344
2,18749E-05	14,9943
2,24166E-05	15,4537
2,29717E-05	15,9126
2,35405E-05	16,3709
2,41234E-05	16,8287
2,47208E-05	17,286
2,53329E-05	17,7427
2,59603E-05	18,1989
2,66031E-05	18,6546
2,72619E-05	19,1097
2,79369E-05	19,5644
2,86287E-05	20,0185
2,93377E-05	20,4721
3,00641E-05	20,9251
3,08086E-05	21,3777
3,15715E-05	21,8298
3,23533E-05	22,2813

3,31545E-05	22,7323
3,39755E-05	23,1828
3,48168E-05	23,6328
3,56789E-05	24,0824
3,65624E-05	24,5314
3,74678E-05	24,9799
3,83956E-05	25,4279
3,93464E-05	25,8754
4,03207E-05	26,3224
4,13192E-05	26,7689
4,23424E-05	27,2149
4,33909E-05	27,6605
4,44653E-05	28,1055
4,55664E-05	28,5501
4,66948E-05	28,9941
4,78511E-05	29,4377
0,000049036	29,8808
5,02502E-05	30,3234
5,14946E-05	30,7656
5,27697E-05	31,2073
5,40764E-05	31,6485
5,54155E-05	32,0892
5,67878E-05	32,5294
0,000058194	32,9692
0,000059635	33,4085
6,11117E-05	33,8474
0,000062625	34,2858
6,41758E-05	34,7237
0,000065765	35,1612
6,73935E-05	35,5982
6,90623E-05	36,0347
7,07725E-05	36,4708
0,000072525	36,9064
7,43209E-05	37,3416
7,61613E-05	37,7764
7,80473E-05	38,2106
7,99799E-05	38,6445
8,19605E-05	39,0779
0,00008399	39,5108
8,60698E-05	39,9433

8,82012E-05	40,3754
9,03853E-05	40,807
9,26234E-05	41,2382
0,000094917	41,669
9,72674E-05	42,0993
0,000099676	42,5292
0,000102144	42,9587
0,000104674	43,3877
0,000107266	43,8164
0,000109922	44,2446
0,000112644	44,6723
0,000115433	45,0997
0,000118292	45,5266
0,000121221	45,9531
0,000124223	46,3792
0,000127299	46,8049
0,000130451	47,2302
0,000133681	47,6551
0,000136992	48,0795
0,000140384	48,5036
0,00014386	48,9272
0,000147422	49,3505
0,000151073	49,7733
0,000154814	50,1957
0,000158648	50,6178
0,000162576	51,0394
0,000166602	51,4607
0,000170728	51,8816
0,000174955	52,302
0,000179288	52,7221
0,000183727	53,1418
0,000188277	53,5611
0,000192939	53,9801
0,000197717	54,3986
0,000202613	54,8168
0,00020763	55,2346
0,000212771	55,652
0,00021804	56,069
0,000223439	56,4857
0,000228972	56,902

0,000234642	57,3179
0,000240453	57,7335
0,000246407	58,1487
0,000252509	58,5635
0,000258762	58,978
0,000265169	59,3921
0,000271735	59,8059
0,000278464	60,2192
0,00028536	60,6323
0,000292426	61,045
0,000299667	61,4573
0,000307088	61,8693
0,000314692	62,2809
0,000322485	62,6922
0,000330471	63,1031
0,000338654	63,5137
0,00034704	63,924
0,000355634	64,3339
0,00036444	64,7435
0,000373465	65,1527
0,000382713	65,5617
0,00039219	65,9702
0,000401901	66,3785
0,000411853	66,7864
0,000422052	67,194
0,000432503	67,6013
0,000443213	68,0082
0,000454188	68,4148
0,000465435	68,8211
0,000476961	69,2271
0,000488771	69,6328
0,000500875	70,0381
0,000513278	70,4432
0,000525988	70,8479
0,000539013	71,2523
0,00055236	71,6564
0,000566038	72,0602
0,000580055	72,4637
0,000594418	72,8669
0,000609138	73,2698

0,000624222	73,6724
0,000639679	74,0748
0,000655519	74,4772
0,000671752	74,8796
0,000688386	75,2819
0,000705432	75,6841
0,000722901	76,0861
0,000740802	76,4879
0,000759146	76,8894
0,000777944	77,2905
0,000797208	77,6911
0,000816949	78,0913
0,000837179	78,491
0,00085791	78,89
0,000879154	79,2884
0,000900924	79,6861
0,000923234	80,083
0,000946096	80,479
0,000969523	80,8741
0,000993531	81,2683
0,00101813	81,6614
0,00104335	82,0535
0,00106918	82,4444
0,00109566	82,8341
0,00112279	83,2225
0,00115059	83,6097
0,00117908	83,9954
0,00120828	84,3797
0,0012382	84,7625
0,00126886	85,1437
0,00130028	85,5233
0,00133248	85,9012
0,00136548	86,2774
0,00139929	86,6518
0,00143394	87,0243
0,00146945	87,3949
0,00150584	87,7636
0,00154313	88,1301
0,00158134	88,4946
0,0016205	88,8569

0,00166062	89,217
0,00170174	89,5748
0,00174388	89,9303
0,00178707	90,2834
0,00183132	90,634
0,00187667	90,982
0,00192314	91,3276
0,00197076	91,6704
0,00201956	92,0125
0,00206957	92,3702
0,00212082	92,7451
0,00217334	93,1342
0,00222716	93,5347
0,00228231	93,9435
0,00233882	94,3577
0,00239674	94,7743
0,00245609	95,1904
0,00251691	95,6031
0,00257923	96,0093
0,0026431	96,4062
0,00270855	96,7908
0,00277562	97,1601
0,00284435	97,5112
0,00291479	97,8411
0,00298697	98,1469
0,00306093	98,4257
0,00313673	98,6744
0,0032144	98,8902
0,003294	99,0701
0,00337557	99,2111
0,00345916	99,3102
0,00354481	99,3647
0,00363259	99,3748
0,00372255	99,3751
0,00381473	99,3754
0,00390919	99,3756
0,00400599	99,3759
0,00410519	99,3762
0,00420685	99,3764
0,00431102	99,3766

0,00441777	99,3768
0,00452717	99,377
0,00463927	99,3772
0,00475415	99,3774
0,00487188	99,3775
0,00499252	99,3777
0,00511615	99,3778
0,00524284	99,3779
0,00537266	99,378
0,00550571	99,3781
0,00564204	99,3782
0,00578175	99,3783
0,00592493	99,3783
0,00607164	99,3784
0,00622199	99,3784
0,00637607	99,3784
0,00653396	99,3784
0,00669575	99,3784
0,00686156	99,3784
0,00703147	99,3784
0,00720559	99,3784
0,00738402	99,3785
0,00756687	99,3785
0,00775424	99,3785
0,00794626	99,3785
0,00814303	99,3785
0,00834467	99,3785
0,00855131	99,3785
0,00876306	99,3785
0,00898006	99,3785
0,00920243	99,3785
0,00943031	99,3785
0,00966383	99,3785
0,00990313	99,3785
0,0101484	99,3785
0,0103997	99,3785
0,0106572	99,3785
0,0109211	99,3785
0,0111915	99,3785
0,0114686	99,3785

0,0117526	99,3786
0,0120437	99,3786
0,0123419	99,3786
0,0126475	99,3786
0,0129607	99,3786
0,0132817	99,3786
0,0136105	99,3786
0,0139476	99,3786
0,014293	99,3786
0,0146469	99,3786
0,0150096	99,3786
0,0153813	99,3786
0,0157621	99,3787
0,0161525	99,3787
0,0165524	99,3787
0,0169623	99,3787
0,0173823	99,3787
0,0178128	99,3787
0,0182539	99,3787
0,0187059	99,3787
0,0191691	99,3787
0,0196438	99,3787
0,0201302	99,3787
0,0206287	99,3787
0,0211395	99,3787
0,021663	99,3787
0,0221994	99,3787
0,0227491	99,3787
0,0233125	99,3787
0,0238897	99,3787
0,0244813	99,3787
0,0250875	99,3787
0,0257088	99,3787
0,0263454	99,3787
0,0269978	99,3787
0,0276663	99,3787
0,0283514	99,3787
0,0290535	99,3787
0,0297729	99,3787
0,0305102	99,3787

0,0312657	99,3787
0,0320399	99,3787
0,0328333	99,3787
0,0336463	99,3787
0,0344795	99,3787
0,0353333	99,3787
0,0362083	99,3788
0,0371049	99,3822
0,0380237	99,39
0,0389653	99,4016
0,0399301	99,4167
0,0409189	99,435
0,0419322	99,4559
0,0429705	99,4792
0,0440346	99,5044
0,045125	99,5312
0,0462424	99,5591
0,0473875	99,5877
0,048561	99,6166
0,0497635	99,6455
0,0509957	99,6739
0,0522585	99,7015
0,0535526	99,7278
0,0548787	99,7524
0,0562377	99,775
0,0576302	99,7952
0,0590573	99,8125
0,0605197	99,8266
0,0620184	99,8371
0,0635541	99,8437
0,0651279	99,8493
0,0667406	99,8546
0,0683933	99,8595
0,0700869	99,8642
0,0718225	99,8687
0,073601	99,8729
0,0754235	99,8769
0,0772912	99,8807
0,0792052	99,8843
0,0811665	99,8877

0,0831764	99,8909
0,0852361	99,894
0,0873467	99,897
0,0895097	99,8998
0,0917262	99,9025
0,0939976	99,9052
0,0963252	99,9077
0,0987105	99,9102
0,101155	99,9127
0,10366	99,9151
0,106227	99,9176
0,108857	99,92
0,111553	99,9224
0,114315	99,9249
0,117146	99,9274
0,120047	99,9299
0,123019	99,9326
0,126066	99,9353
0,129187	99,9381
0,132386	99,9411
0,135664	99,9441
0,139024	99,9471
0,142467	99,9502
0,145994	99,9532
0,14961	99,9562
0,153314	99,9592
0,157111	99,9621
0,161001	99,9648
0,164988	99,9674
0,169074	99,9699
0,17326	99,9721
0,177551	99,9742
0,181947	99,976
0,186453	99,9775
0,19107	99,9787
0,195801	99,9796
0,20065	99,9802
0,205619	99,9806
0,21071	99,981
0,215928	99,9814

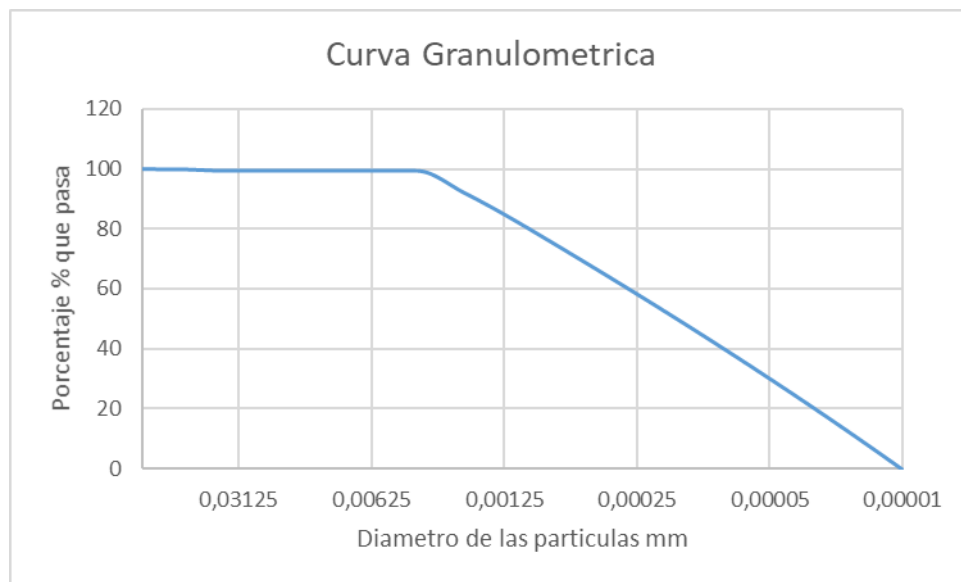
0,221275	99,9817
0,226754	99,9821
0,232369	99,9824
0,238124	99,9827
0,24402	99,983
0,250063	99,9833
0,256255	99,9836
0,2626	99,9839
0,269103	99,9841
0,275767	99,9843
0,282596	99,9846
0,289593	99,9848
0,296765	99,985
0,304113	99,9852
0,311644	99,9854
0,319361	99,9855
0,327269	99,9857
0,335373	99,9859
0,343678	99,986
0,352188	99,9862
0,36091	99,9863
0,369847	99,9865
0,379005	99,9866
0,38839	99,9867
0,398008	99,9869
0,407864	99,987
0,417963	99,9871
0,428313	99,9873
0,43892	99,9874
0,449788	99,9875
0,460926	99,9877
0,47234	99,9878
0,484037	99,9879
0,496023	99,9881
0,508305	99,9882
0,520892	99,9884
0,533791	99,9885
0,547009	99,9887
0,560555	99,9889
0,574436	99,989

0,58866	99,9892
0,603237	99,9894
0,618175	99,9896
0,633482	99,9898
0,649169	99,99
0,665244	99,9902
0,681717	99,9905
0,698599	99,9907
0,715898	99,9909
0,733625	99,9911
0,751792	99,9913
0,770408	99,9915
0,789486	99,9917
0,809036	99,9919
0,829069	99,9922
0,849599	99,9924
0,870638	99,9926
0,892197	99,9928
0,91429	99,993
0,936931	99,9932
0,960132	99,9934
0,983907	99,9937
1,00827	99,9939
1,03324	99,9941
1,05882	99,9943
1,08504	99,9945
1,11191	99,9947
1,13945	99,995
1,16766	99,9952
1,19658	99,9954
1,22621	99,9956
1,25657	99,9958
1,28769	99,996
1,31957	99,9963
1,35225	99,9965
1,38574	99,9967
1,42005	99,9969
1,45521	99,9971
1,49125	99,9974
1,52818	99,9976

1,56602	99,9978
1,6048	99,998
1,64454	99,9982
1,68526	99,9985
1,72699	99,9987
1,76976	99,9989
1,81358	99,9991
1,85849	99,9993
1,90451	99,9996
1,95167	99,9998
2	100

Fuente: (Valencia & Huertas) 2018

Grafica 20. Curva granulometrica ensayo 4.



Fuente: (Valencia & Huertas) 2018