

**DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA PARA DIVERSAS
MUESTRAS DE SUELO CAOLÍNICO NO SATURADO CON ADICIÓN DE
DIATOMEAS POR MEDIO DEL INFILTRÓMETRO MINIDISCO**

**YESICA ANDREA SÁNCHEZ BLANDÓN
CÓDIGO: 505725**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2019**

**DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA PARA DIVERSAS
MUESTRAS DE SUELO CAOLINÍTICO NO SATURADO CON ADICIÓN DE
DIATOMEAS POR MEDIO DEL INFILTRÓMETRO MINIDISCO**

**YESICA ANDREA SÁNCHEZ BLANDÓN
CÓDIGO 505725**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniera Civil**

**Director
ING. JUAN CARLOS RUGE CÁRDENAS**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2019**



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

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/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.

Nota de aceptación

Director de Investigación
Ing. Juan Carlos Ruge Cárdenas

Asesor Metodológico

Jurado

Bogotá D.C., junio de 2019

Dedicatoria

A mi familia, amigos y a cada persona que me brindó su apoyo durante este proceso. A mis padres por su apoyo incondicional, ustedes son mi razón de vivir, la razón de todo.

A mi compañero de vida por ayudarme a creer más y hacerme ver la vida desde un punto de vista más optimista, por acompañarme y por su amor incondicional. A Dios, por darme la capacidad de llevar a cabo este proyecto y porque a pesar de las circunstancias de la vida, jamás me ha abandonado y jamás lo hará.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. GENERALIDADES	14
1.1 TÍTULO	14
1.2 ALTERNATIVA	14
1.3 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.....	14
1.4 EJE TEMÁTICO.....	14
1.5 ANTECEDENTES.....	15
1.6 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	16
1.7 JUSTIFICACIÓN.....	18
1.8 OBJETIVOS.....	18
1.8.1 Objetivo general.....	18
1.8.2 Objetivos específicos	18
1.9 ALCANCES Y LIMITACIONES	19
2. MARCO TEÓRICO	21
2.1 SUELO.....	21
2.2 SUELOS SATURADOS	21
2.3 SUELOS NO SATURADOS.....	22
2.4 CAOLÍN.....	23
2.5 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN LOS SUELOS	23
2.5.1 Conductividad hidráulica saturada	26
2.5.2 Conductividad hidráulica no saturada	26
2.6 MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN SUELOS.....	27
2.6.1 Método de Gaylon S. Campbell	27
2.7 INFILTRACIÓN	28
2.8 AGUAS SUBTERRÁNEAS	30
2.8.1 Por precipitación	30
2.8.2 Por condensación de vapor de agua interno.....	30
2.9 DIATOMEAS.....	30
3. MARCO CONCEPTUAL	32
3.1 ESTADO DEL ARTE.....	32
4. METODOLOGÍA	36
4.1 DESARROLLO METODOLÓGICO.....	36
4.2 PROCESO DE MONTAJE DE MUESTRAS EN SECO	41
4.2.1 Medidas para montaje.....	41
4.2.2 Porcentaje de diatomeas.	43
4.2.3 Compactación.....	45

4.2.4 Enrasado.....	46
4.2.5 Peso de muestras	47
4.3 PROCESO DE MEDIDA DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.....	49
4.3.1 Infiltrómetro	49
4.3.2 Uso de cronómetro.....	51
4.4 MUESTRAS EN SUELO CON PORCENTAJE DE HUMEDAD (3%).....	52
4.5 INFILTRACIÓN	54
4.6 RECOLECCIÓN DE DATOS	55
5. RESULTADOS.....	62
5.1 EN SUELO SECO.....	62
5.2 EN SUELO CON PORCENTAJE DE HUMEDAD	65
5.3 RESULTADOS POR GRUPOS DE MUESTRAS.....	68
5.3.1 Muestras de Caolín con 0, 5, 10, 20 y 40% de diatomea en suelo seco.....	68
5.3.2 Muestra de Caolín con 0, 5, 20 y 40% de diatomea en suelo húmedo.	73
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	79
6.1 ANÁLISIS PARA RESULTADOS GLOBALES EN SUELO SECO.....	79
6.1.1 Succión de 0,5cm.....	79
6.1.2 Succión de 1cm	79
6.1.3 Succión 2cm	80
6.2 ANÁLISIS PARA RESULTADOS GLOBALES EN SUELO HÚMEDO	80
6.2.1 Succión de 0,5cm con humedad.....	80
6.2.2 Succión de 1cm con humedad.....	81
6.2.3 Succión de 2cm con humedad.....	81
6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS POR GRUPOS DE MUESTRAS.....	82
6.3.1 Grupo de muestra de caolín puro con succiones de 0.5cm, 1cm y 2 cm. Suelo seco	82
6.3.2 Grupo de muestra de caolín+5% de diatomea con succiones de 0.5cm, 1cm y 2 cm. Suelo seco.....	83
6.3.3 Grupo de muestra de caolín+10% de diatomea con succiones de 0.5cm, 1cm y 2 cm. Suelo seco	83
6.3.4 Grupo de muestra de caolín+20% de diatomea con succiones de 0.5cm, 1cm y 2 cm. Suelo seco	83
6.3.5 Grupo de muestra de caolín+40% de diatomea con succiones de 0.5cm, 1cm y 2 cm. Suelo seco	84
6.3.6 Grupo de muestra de caolín puro con succiones de 0.5cm, 1cm y 2 cm. Suelo húmedo.....	84
6.3.7 Grupo de muestra de caolín+5% de diatomea con succiones de 0.5cm, 1cm y 2 cm. Suelo húmedo.....	84
6.3.8 Grupo de muestra de caolín+10% de diatomea con succiones de 0.5cm, 1cm y 2 cm. Suelo húmedo.....	85
6.3.9 Grupo de muestra de caolín+20% de diatomea con succiones de 0.5cm, 1cm y 2 cm. Suelo húmedo.....	85

6.3.10 Grupo de muestra de caolín+40% de diatomea con succiones de 0.5cm, 1cm y 2 cm. Suelo húmedo	86
7. CONCLUSIONES	87
8. RECOMENDACIONES	88
BIBLIOGRAFÍA.....	89
Anexo A. Tablas de muestras de ensayo y permeabilidad	93

LISTADO DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Dimensión de anillo en acrílico.....	41
Tabla 2. Porcentaje de diatomeas en caolín.....	43
Tabla 3. Medidas pisón.....	45
Tabla 4. Peso inicial y final de las muestras.....	48
Tabla 5. Medida de conductividad hidráulica con caolín 5% y succión 0,5cm.....	49
Tabla 6. Peso muestra húmeda.....	53
Tabla 7. Parámetros de van Genuchten.....	57
Tabla 8. Paso a paso macro.....	58
Tabla 9. Paso a paso 4 macro.....	58
Tabla 10. Ejemplo macro.....	59
Tabla 11. Succión de 0.5 con diferentes porcentajes de Diatomea.....	62
Tabla 12. Succión de 1cm con diferentes porcentajes de Diatomea.....	63
Tabla 13. Succión de 2cm con diferentes porcentajes de Diatomea.....	64
Tabla 14. Succión de 0.5cm y 3% de humedad con diferentes porcentajes de Diatomea.....	65
Tabla 15. Succión de 1cm 3% de humedad con diferentes porcentajes de Diatomea.....	66
Tabla 16. Succión de 2cm y humedad con diferentes porcentajes de Diatomea.....	67
Tabla 17. Conductividad hidráulica en caolín puro suelo seco.....	68
Tabla 18. Conductividad hidráulica en caolín con 5% de diatomea suelo seco.....	69
Tabla 19. Conductividad hidráulica en caolín con 10% de diatomea suelo seco.....	70
Tabla 20. Conductividad hidráulica en caolín con 20% de diatomea suelo seco.....	71
Tabla 21. Conductividad hidráulica en caolín con 40% de diatomea suelo seco.....	72
Tabla 22. Conductividad hidráulica en caolín puro suelo húmedo.....	73
Tabla 23. Conductividad hidráulica en caolín con 5% de diatomea suelo húmedo.....	74
Tabla 24. Conductividad hidráulica en caolín con 10% de diatomea suelo húmedo.....	75
Tabla 25. Conductividad hidráulica en caolín con 20% de diatomea suelo húmedo.....	76
Tabla 26. Conductividad hidráulica en caolín con 40% de diatomea suelo húmedo.....	77
Tabla 27. Muestra A ensayo succión 0,5 cm con 5% de diatomea suelo seco.....	97
Tabla 28 Muestra A permeabilidad 0,5 cm con 0% de diatomea suelo seco.....	97

LISTADO DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema de fases de suelo saturado.....	21
Figura 2. Esquema condición trifásica del suelo.....	22
Figura 3. Ley de Darcy.....	25
Figura 4. Estudio de conductividad hidráulica.....	25
Figura 5. Diatomea en microscopio.....	31
Figura 6. Arcilla en banco.....	32
Figura 7. Diagrama de flujo proceso para determinación conductividad hidráulica.....	36
Figura 8. Anillo en acrílico.....	42
Figura 9. Muestra tipo.....	42
Figura 10. Muestra tipo altura.....	43
Figura 11. Porcentaje de diatomeas.....	44
Figura 12. Llenado capas de la muestra.....	45
Figura 13. Compactación de la muestra.....	46
Figura 14. Enrasado muestra.....	47
Figura 15. Peso muestra.....	47
Figura 16. Cámara superior.....	50
Figura 17. Infiltrómetro en muestra.....	51
Figura 18. Muestra para húmedo.....	52
Figura 19. Infiltrómetro en muestra húmeda.....	53
Figura 20. Infiltración en muestra.....	55
Figura 21. Infiltración en muestra medición.....	55
Figura 22. Ejemplo en macro curva.....	60
Figura 23. Lista dinámica succión.....	60
Figura 24. Valor de C1 coincidente con fórmula.....	61
Figura 25. Succión de 0.5 con diferentes porcentajes de Diatomea.....	63
Figura 26. Succión de 1 con diferentes porcentajes de Diatomea.....	64
Figura 27. Succión de 2 con diferentes porcentajes de Diatomea.....	65
Figura 28. Succión de 0.5cm con diferentes porcentajes de diatomea húmedo....	66
Figura 29. Succión de 1cm y humedad con diferentes porcentajes de Diatomea.....	67
Figura 30. Succión de 2cm y humedad con diferentes porcentajes de Diatomea.....	68
Figura 31. Permeabilidad en caolín con 0% de diatomea en suelo seco.....	69
Figura 32. Permeabilidad en caolín con 5% de diatomea en suelo seco.....	70
Figura 33. Permeabilidad en caolín con 10% de diatomea en suelo seco.....	71
Figura 34. Permeabilidad en caolín con 20% de diatomea en suelo seco.....	72
Figura 35. Permeabilidad en caolín con 40% de diatomea en suelo seco.....	73

Figura 36. Permeabilidad Caolín puro en suelo seco	74
Figura 37. Permeabilidad en caolín con 5% de diatomea en suelo húmedo	75
Figura 38. Permeabilidad en caolín con 10% de diatomea en suelo húmedo	76
Figura 39. Permeabilidad en caolín con 20% de diatomea en suelo húmedo	77
Figura 40. Permeabilidad en caolín con 40% de diatomea en suelo húmedo	78

INTRODUCCIÓN

En cualquier ámbito o rama de la Ingeniería Civil es necesario conocer las condiciones sobre las cuales se trabajará, esto implica la investigación de todo tipo de factores y variables influyentes en la zona de ejecución de un proyecto. Para ello es necesario, realizar los estudios pertinentes basados en análisis de muestras o datos que se puedan obtener a raíz de pruebas y verificaciones en laboratorio o *in-situ*.

Es claro entonces que, no todos los factores influyentes en la ejecución de una obra de Ingeniería Civil necesitan análisis en laboratorio, debido a que, para el caso de los factores demográfico, climatológico, forestal, político, económico, entre otros, no es necesario aplicar dichos análisis, pero sí es ideal tenerlos en cuenta para la planeación de un proyecto.

Sin embargo, para la ejecución de obras, se hace necesario conocer el terreno, es decir que, es obligatorio realizar un estudio del suelo, en el cual, es vital la evaluación de las condiciones del mismo por medio de recolección de muestreo inalterado, enviado posteriormente a laboratorio en dónde se determinan las características más importantes de éste, que le permiten al Ingeniero planear y diseñar debidamente cualquier proyecto de construcción.

“En muchas regiones del mundo se presenta la condición expansiva del suelo, sobretudo en lugares como Suramérica, Centroamérica, algunas zonas de Norteamérica, Sudáfrica, entre otros lugares”¹, lo cual representa un significativo problema para la construcción de cualquier tipo de estructura. La conductividad hidráulica se relaciona directamente con un cambio volumétrico.

La permeabilidad o conductividad hidráulica de un suelo es muy importante, ya que, dependiendo de su valor, y según el tipo de suelo, puede presentarse deformación a largo plazo del material. Generalmente la permeabilidad en una condición saturada es ampliamente conocida por ensayos tradicionales.² No obstante, la permeabilidad no saturada es complicada de estimar y existe poca información que estudie a fondo este parámetro. A partir de este hecho se basa la esencia de este proyecto.

¹ ANDRADE PACHECO, Martín. Resistencia al esfuerzo cortante de los suelos. [En línea]. Slideshare. [Citado el 26 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/martinandradepacheco/cap-ii-resistencia-al-esfuerzo-cortante-de-los-suelos-7>

² INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Permeabilidad de suelos granulares (cabeza constante). Norma I.N.V. E – 130. [En línea]. Popayán: INVÍAS – 07. [Citado el 26 de agosto de 2018]. Disponible en: ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-130-07.pdf

Según Aitchison, Russam y Richards “un aumento de succión se traduce en un efecto benéfico para el suelo al ocasionar un aumento en los esfuerzos efectivos debido a la succión (presión de poros negativa) que genera una tensión en los meniscos generados en los poros del suelo.”³

El siguiente trabajo pretende investigar el comportamiento de la conductividad hidráulica de diversas muestras de suelo caolinítico no saturado con adición de diatomea, en laboratorio para determinar su conductividad hidráulica y realizar una comparación de las mismas haciendo uso de un infiltrómetro minidisco de operación manual, que permite variar el nivel de succión en la prueba. Variando el porcentaje de diatomeas (0, 5 10, 20 y 40%).

³ AITCHISON, G.D., RUSSAM, K. y RICHARDS, B.G. Engineering concepts of equilibria and moisture in soils. [En línea]. Reino Unido: Road Research Laboratory. [Citado el 26 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://trl.co.uk/sites/default/files/LR038%281%29.pdf>

1. GENERALIDADES

1.1 TÍTULO

Determinación de la conductividad hidráulica para diversas muestras de suelo caolinítico no saturado con adición de diatomeas por medio del infiltrómetro minidisco

1.2 ALTERNATIVA

La Universidad Católica en reglamentación de sus principios de evaluación y según el Acuerdo No. 213 del 03 de Julio del 2015, Artículo 2, presenta las Alternativas de la asignatura trabajo de grado (Católica, 2015). El presente trabajo se orienta al estudio previo y planteamiento de un futuro trabajo de investigación alternativa escogida como modalidad de grado, donde se realizarán diversas pruebas a muestras de suelo caolinítico no saturado adicionando partículas diatomeas en diversas cantidades haciendo uso de un infiltrómetro minidisco.

1.3 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Según el anexo del Consejo Superior de acuerdos académicos⁴, específicamente el acuerdo No. 242 del 23 de septiembre del 2016, se describe la Investigación en la Universidad Católica de Colombia y presenta la estructura del sistema institucional de investigaciones, a saber, sus elementos para los cuales tiene en cuenta las líneas de investigación que hacen operativas las áreas transversales y se apoyan sobre los ejes temáticos.

A partir de esto se puede afirmar que la línea de investigación del presente trabajo corresponde a *Materiales*, bajo la cual se llevará a cabo el estudio y ensayo en laboratorio de diversas muestras de suelo en condición no saturada, sometidas a infiltración con agua desionizada, haciendo uso de un infiltrómetro minidisco, que permite la gradación de succión dependiendo del requerimiento y según el manual operativo, con la adición de diatomeas durante los procesos para analizar su conductividad hidráulica y cómo esta se afecta al agregarle las partículas fosilizadas.

1.4 EJE TEMÁTICO

El tema central bajo el cual se realizará la investigación es el estudio y determinación de la conductividad hidráulica no saturada, para desarrollarlo es

⁴ UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA. Consejo, Superior. La investigación en la Universidad Católica de Colombia. [En línea]. Bogotá: Ucatólica. [Citado el 26 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://www.ucatolica.edu.co/portal/wp-content/uploads/adjuntos/acuerdos/consejo-superior-acuerdos-academicos-242-16.pdf>

necesario tener en cuenta que el área de conocimiento que obedece a esta exploración de conceptos aplicados es la Geotecnia basado en suelos en esta condición de no saturación.

1.5 ANTECEDENTES

Karl Terzaghi, profesor del Instituto tecnológico de Massachusetts e investigador dedicado al estudio de las ciencias de la tierra y la construcción, es considerado “el padre de la Mecánica de Suelos”⁵, la cual consolida como ciencia en el año 1925, al publicar el tratado *Erdbaumechanik*. Esta publicación se vio acompañada de muchas más publicaciones acerca de la mecánica del suelo y su aplicación en la Ingeniería, a raíz de esto nacen las investigaciones de los suelos dependiendo de sus fases y condiciones de saturación y no saturación tal como lo plantean Sánchez, Becerra y Rojas.⁶

El estudio de la mecánica de suelos no saturados, en principio sólo se tenía en cuenta la noción de esfuerzo o tensión efectiva y su validez en este tipo de suelos⁷, ya que al haber establecido las principales fórmulas matemáticas y gráficas para la determinación de dichos esfuerzos para suelos saturados (dos fases) se llegó a la conclusión de que las mismas sólo servían para describir la influencia de las presiones negativas de poros en el comportamiento de los parámetros físicos de un suelo saturado, pero que no era trabajable para suelos no saturados⁸.

Luego de esto, fue necesario la modificación de la concepción inicial de esfuerzos efectivos a fin de que pudiera aplicarse a todo tipo de suelos *saturados* y *no-saturados*, es allí cuando nacen las investigaciones de Coleman⁹, para el análisis del cambio volumétrico en los suelos no saturados teniendo en cuenta parámetros de compresibilidad del suelo y los cambios en los esfuerzos que a su vez

⁵ EL MUNDO. Karl von Terzaghi: creador de la mecánica de suelos. [En línea]. El Mundo. [Citado el 29 de agosto de 2018]. Disponible en: https://www.elmundo.com/portal/opinion/editorial/karl_von_terzaghi_creador_de_la_mecanica_de_suelos.php#.XQo6YlwzblU

⁶ SÁNCHEZ CONTRERAS, Luisa Fernanda, BECERRA AYALA, Diego Andrés y ROJAS BOTELLO, Brayan Orlando. Brayan. Terzaghi y la mecánica de suelos. [En línea]. Scribd. [Citado el 02 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/411992547/Terzaghi-y-La-Mecanica-de-Suelos>

⁷ AITCHISON, G. D. y WOODBURN, J. A. Soil suction in foundation design. [En línea]. Australia: SCIRO. [Citado el 02 de septiembre de 2018]. Disponible en: https://www.issmge.org/uploads/publications/1/38/1969_02_0001.pdf

⁸ AITCHISON, G.D., RUSSAM, K. y RICHARDS, B.G. Engineering concepts of equilibria and moisture in soils, Op. cit.

⁹ COLEMAN, David. Fundamentals of Soil Ecology. [En línea]. London: Academic Press. [Citado el 29 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://www.elsevier.com/books/fundamentals-of-soil-ecology/coleman/978-0-12-805251-8>

producen cambios en el volumen del suelo. Al año siguiente Bishop y Blight¹⁰ explican la dificultad que se tiene al utilizar una sola variable de esfuerzos efectivos para explicar el comportamiento de los suelos no saturados, por tal motivo Fredlund¹¹ es uno de los investigadores de la viabilidad de uso de dos variables de estado tensional.

La relación entre el coeficiente de permeabilidad del suelo no saturado y el grado de saturación, fueron propuestas inicialmente por Burdine¹², pero Brooks y Corey¹³ retoman este concepto y se implementan las curvas de grado de saturación versus succión matricial. Teniendo en cuenta lo anterior se considera que entre 1965 y 1987 se investigaron los conceptos de *Tensión neta y succión*, con una relación directa entre las presiones de poros de agua (μ_w) y presiones de poros de aire (μ_a), presentes en este tipo de suelos.

A partir de ese punto hasta la fecha se ha intentado profundizar en la investigación de los suelos no saturados, basada principalmente en el cambio de volumen, la resistencia al corte de los mismos y la capacidad hidráulica que estos poseen, todo ello soportado por ensayos y teoría de los más representativos investigadores. En este caso, se hará uso de un infiltrómetro minidisco para la determinación de la permeabilidad no saturada.

1.6 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuál será el efecto sobre la conductividad hidráulica no saturada de un suelo patrón de caolín con la adición de suelos diatomáceos, determinada a raíz de ensayos de infiltración, realizados con ayuda de un infiltrómetro, en muestras reconstituidas?

En términos geológicos, la alteración hidrotermal o meteórica da paso a la formación de la caolinita, este fenómeno se produce en rocas cuyos componentes principales son feldespatos y moscovita, o a partir de la erosión de rocas ácidas

¹⁰ BISHOP, A. W. y BLIGHT, G. E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. En: Géotechnique, 13(3), 177-197. [En línea]. London: Science Direct. [Citado el 29 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674237015301666#bbib5>

¹¹ FREDLUND, D. G. RAHARDJO, H. y FREDLUND, M. D. Unsaturated soils mechanics in engineering practice. [En línea]. London: John Wiley & Sons, Inc. [Citado el 30 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://geoerapg09.files.wordpress.com/2017/06/d-g-fredlund-h-rahardjo-m-d-fredlundauth-unsaturated-soil-mechanics-in-engineering-practice.pdf>

¹² BURDINE, N.T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. [En línea]. Society of Petroleum Engineers [Citado el 31 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://www.onepetro.org/download/journal-paper/SPE-225-G?id=journal-paper%2FSPE-225-G>

¹³ BROOKS, R. H. y COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. [En línea]. Fort Collins: Colorado State University. [Citado el 01 de septiembre de 2018]. Disponible en: https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/61288/HydrologyPapers_n3.pdf?sequence

que estén caolinizadas. Según Barboza¹⁴ este tipo de suelos se forman en zonas con presencia de humedad y calor. Este tipo de suelo obedece a una permeabilidad o conductividad hidráulica suele ser muy baja.

Las diatomeas, son partículas provenientes de micro algas fosilizadas, que lograron resurgir hacia la corteza terrestre, y que logran aumentar el ángulo de fricción de los suelos en donde se encuentren.

El ángulo de fricción, como uno de los parámetros geotécnicos de los suelos, es fundamental en la determinación sus propiedades, y está relacionado directamente con la permeabilidad tal como lo plantea Das¹⁵, y otros parámetros de resistencia y tensión, sin embargo, el objeto de este estudio es la conductividad hidráulica, a partir de esto la intención es comprender el comportamiento de la permeabilidad las muestras de caolín al adicionarle las partículas diatomeas en diferentes porcentajes siendo 0% caolín puro, 5%, 10%, 20% y 40%, esperando que con la adición de dichas partículas, la conductividad hidráulica de este tipo de arcilla aumente.

Muchos de los problemas presentados en las estructuras construidas sobre este tipo de suelos, se deben al desconocimiento de información del estado de suelo y la relevancia que tiene la determinación de las características del mismo.

Debido a la corta información que se posee acerca del comportamiento de este tipo de suelos en relación con los suelos saturados, y, entendiendo que su composición y características físicas – químicas pueden traducirse en grandes problemas para cualquier tipo de estructura, se ve la necesidad de analizar por medio de ensayos en laboratorio la conductividad hidráulica de diversas muestras de suelo caolinítico, que tengan una baja permeabilidad, y con la adición de las diatomeas se pretende mejorar este parámetro en el suelo, para observar si es posible acelerar el flujo del agua infiltrada en el medio poroso.

Se desea comprender el comportamiento de este tipo de suelo bajo diversas condiciones infiltración y succión, ya que, el infiltrómetro minidisco permite ajustar el nivel de succión dependiendo del requerimiento del operador. De ésta manera se intentará enriquecer el conocimiento acerca de la conductividad hidráulica en suelos no saturados.

¹⁴ BARBOZA NAVARRO, Alexis Jhosep. La Caolinita. [En línea]. Cajamarca: Universidad Privada del Norte. [Citado el 02 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/alexisjhosepbarbozavarro/la-caolinita>

¹⁵ DAS, Braja M. Fundamentos de Ingeniería geotécnica. 4 ed. México: Cengage Learning, 2015. p. 63.

1.7 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad no se cuenta con muchas investigaciones que tengan en cuenta el uso de diatomeas y su influencia en la permeabilidad del suelo, por tal motivo, se pretende realizar un estudio que determine si la adición de estas partículas a un tipo de suelo no saturado puede mejorar las condiciones de permeabilidad del suelo, las cuales a su vez se relacionan directamente con la resistencia al corte que se tiene muy en cuenta para el diseño de cimentaciones y taludes.

Las diatomitas están constituidas por restos de microorganismos vegetales unicelulares, eucariotas y con capacidad para realizar fotosíntesis, estos elementos suelen encontrarse en ambientes de agua tanto dulce como salada.

Debido a esta composición y formación, se presentan como especies de piedras porosas que permiten el paso de agua, entonces, basándose en este hecho, se deduce que son materiales permeables y que, al mezclarlas con un tipo de suelo no saturado, podrían ayudar a este a mejorar la conductividad hidráulica del mismo.

Existe una gran cantidad de regiones en el mundo en las que se presenta la condición de suelo no saturado y también, expansivo o de cambio volumétrico, es necesario comprender que la conductividad hidráulica es fundamental en la caracterización de un suelo y que según esta se puede observar situaciones más beneficiosas para las estructuras si se trata de un suelo no saturado.

Se desea realizar una investigación de la conductividad hidráulica de este tipo de suelo (no saturado), con el fin de comprender su comportamiento según las condiciones en las que se encuentre, es decir, si posee humedad o se encuentra en estado seco. La adición de partículas diatomeas permitirá la evaluación de las condiciones de suelo para observar cómo afecta la conductividad hidráulica del medio poroso.

1.8 OBJETIVOS

1.8.1 Objetivo general. Determinar la conductividad hidráulica en muestras de suelo caolinítico no saturado con adición de diatomea en diferentes cantidades.

1.8.2 Objetivos específicos

- Generar un estado del conocimiento sobre el estudio de la permeabilidad en condiciones no saturadas.

- Caracterizar mediante ensayos índice los materiales que hacen parte de la investigación.
- Desarrollar ensayos a diversas muestras de suelo caolinítico con proporciones de 10,86cm de diámetro y 10,07cm de alto, mediante un infiltrómetro minidisco.

1.9 ALCANCES Y LIMITACIONES

1.9.1 Alcances. La siguiente investigación se realizará teniendo en cuenta la capacidad del equipo a utilizar y según las condiciones de las muestras de suelo a evaluar. Los ensayos pertinentes en laboratorio se llevarán a cabo en las instalaciones de la Universidad Católica de Colombia, donde se cuenta con los aparatos y herramientas necesarias para llevar a cabo dichas pruebas, tales como el laboratorio para ensayos de muestras, el infiltrómetro minidisco, cronómetros, entre otros, para realizar su posterior análisis y determinación de las características de las muestras.

El uso del infiltrómetro minidisco se puede efectuar tanto en campo como en laboratorio, por temas de tiempo y atendiendo a las recomendaciones realizadas, se llevará a cabo el estudio en el laboratorio, realizando 26 ensayos.

También debe tenerse en cuenta que, para la clarificación de la obtención de datos, es necesario realizar investigaciones mucho más profundas sobre el tema de permeabilidad no saturada en suelos con esta misma condición, lo cual implica el aumento del tiempo de estudio.

Sin embargo, aunque se consideren diversos parámetros del suelo no saturado que afectan su condición de permeabilidad y volumétrica, el estudio que se pretende realizar sólo se enfoca al análisis de este primer factor por medio de los ensayos correspondientes.

Es importante recalcar que, para el adecuado uso del equipo se asistió a diversas capacitaciones, en las cuales se indicó la manipulación adecuada del mismo, para evitar al máximo errores durante los ensayos, y de esta manera, pudieran obtenerse los resultados más cercanos a la realidad y a partir de estos, se pudiera realizar un análisis adecuado de los resultados arrojados por las pruebas realizadas.

1.9.2 Limitaciones. Debido a que el tema geotécnico del suelo es una amplia gama de temáticas y conocimientos, el estudio sólo se puede enfocar a la determinación de conductividad hidráulica por disponibilidad de equipos y tiempo, es válido recordar que el infiltrómetro minidisco sólo es apto para la medición de conductividad, en este caso no saturada, en este orden de ideas se afirma que la determinación de parámetros como el ángulo de fricción interna del suelo, la

resistencia al esfuerzo cortante, esfuerzos y tensiones totales, efectivas y de poros quedan fuera del enfoque principal y desarrollo de la investigación en curso.

También se debe tener en cuenta que las pruebas y resultados varían dependiendo de las muestras, se sabe bien que lo ideal es el uso de muestras inalteradas de suelo para la evaluación de sus características, pero a pesar de esto, los resultados suelen variar para pruebas en laboratorio versus pruebas *in situ*, debido a que por diversos factores y efectos de transporte se tienden a afectar las muestras, a su vez, la determinación en laboratorio no cuenta con todas los factores del medio como el clima, la vegetación, el nivel freático, entre otros, que puedan influir en los resultados verdaderos de los estudios en laboratorio correspondientes a la determinación de conductividad hidráulica.

Otra de las principales limitaciones en este proyecto, tiene que ver con la breve información acerca de suelos no saturados, que, si bien se han encontrado algunas investigaciones de hace varios años y algunas recientes, la información teórica que aportan es muy reducida en comparación con el tema de suelo saturado. Adicionalmente no existen investigaciones en las que se intente determinar la conductividad hidráulica de suelos no saturados donde se añadan diatomitas para la revisión de este parámetro en este tipo de suelo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 SUELO

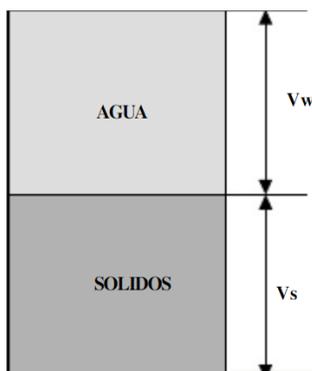
En Ingeniería Civil, suelo se define como la parte superficial de la corteza compuesta de los sedimentos no afirmados que provienen de cambios físicos en las rocas y de los residuos trasladados por medio de factores naturales tales como el agua o el viento entre otros, adicionando la potencia que ejerce la gravedad sobre dichos elementos. De acuerdo con lo anterior, se afirma que, el suelo es producto de elementos orgánicos y minerales, lo cual hace que sea un cuerpo heterogéneo.

La aplicación de la mecánica a los problemas geotécnicos que puedan generar deformaciones, deterioros y perjuicios, es lo que se conoce como la mecánica de suelos, dicha ciencia es la que se encarga de verificar la estabilidad, firmeza y garantía para poder utilizar el suelo como un componente estructural.

2.2 SUELOS SATURADOS

Se consideran saturados a todos aquellos suelos que poseen dos fases en su estructura, es decir que, una parte de la misma, constituida por sus poros esté cubierta por agua, a lo que se llama *fase líquida (W)*, y la otra parte está compuesta por las partículas del medio poroso (granos del suelo). Esta última representaría la fase sólida (S)¹⁶.

Figura 1. Esquema de fases de suelo saturado.



Fuente: GABRIELS, Donald, LOBO L., Deyanira y PULIDO M., Mansonia. Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos. . [En línea]. Slideshare. [Citado el 06 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/mobile/renanfernandezgalvez/980-18911sm>

¹⁶ MEZA OCHOA, Victoria Elena. Suelos parcialmente saturados: de la investigación a la cátedra universitaria. En: Boletín de Ciencias de la Tierra, nro. 31. 2012. p. 23-38. . [En línea]. Medellín. [Citado el 07 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/bcdt/n31/n31a02.pdf>

Estos suelos se encuentran en “saturación” debido a su ubicación bajo el nivel freático, por esta razón sus poros se hallan llenos con el agua subterránea que alcanza dicho nivel, la presión en este punto equivale a la presión atmosférica.¹⁷

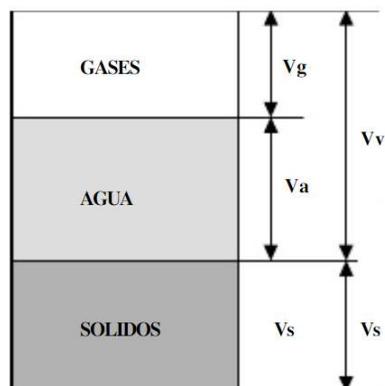
Según lo anterior, introduciendo el concepto al análisis matemático y teniendo en cuenta las fórmulas básicas de la mecánica de suelos, basadas en las propiedades o relaciones volumétricas y gravimétricas del suelo, se puede afirmar que la condición de saturación se presenta cuando el volumen del aire (V_a) equivale a cero ($V_a=0$)¹⁸, ratificando el hecho de que la estructura de este tipo de suelos se compone de agua y partículas minerales o sólidas.

2.3 SUELOS NO SATURADOS

Los suelos no saturados, son aquellos en los que su estructura se compone por tres fases; sólida (S), líquida (W) y gaseosa (a), es decir que, a diferencia del suelo saturado, sus poros no sólo están cubiertos por agua, sino que también, algunos de ellos pueden estar llenos de aire, es por eso que a su vez reciben el nombre de *parcialmente saturados*, debido a esa condición en la que el agua cubre “parcialmente” o sólo una parte del total de los poros existentes.

Para hacer un comparativo de la definición dada de la condición saturada, se puede analizar la siguiente figura, en la que se observa que en este caso el volumen del aire es diferente de cero ($V_a \neq 0$), es decir que ese aire ocupa un espacio dentro de la estructura del suelo.

Figura 2. Esquema condición trifásica del suelo.



Fuente: GABRIELS, Donald, LOBO L., Deyanira y PULIDO M., Mansonia. Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos. . [En línea]. Slideshare. [Citado el 06 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/mobile/renanfernandezgalvez/980-18911sm>

¹⁷ SUÁREZ, Jaime. Deslizamientos: análisis geotécnico. Bucaramanga: Editorial de la U., 2009. p. 210.

¹⁸ LEONI, Augusto. Relaciones Volumétricas y Gravimétricas. La Plata: UNLP, 2010. p. 14.

A diferencia de los suelos saturados, este tipo de suelos se encuentra sobre el nivel freático, por esta razón la mayoría de sus poros no se llenan de agua, en cambio, y como se ha mencionado anteriormente, sus cavidades están ocupadas por aire.

2.4 CAOLÍN

“Es un tipo de suelo, roca o material arcilloso formado principalmente por caolinita, la cual está representada por la fórmula $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$. También se compone de otros minerales como la dickita, halloysita, nacrita, cuarzo, mica, entre otros”¹⁹. Se alude a un polvo arcilloso que “posee un contenido de caolinita mayor al 50% del total de sus componentes. Es altamente plástico.”²⁰ La formación de la caolinita se logra por medio de la descomposición de feldespato y micas.

En Colombia se encuentran depósitos de Caolín en departamentos como Santander, Boyacá, Cundinamarca, Cauca, Antioquia, entre otros.

2.5 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN LOS SUELOS

Se refiere a la cantidad de agua que se desplaza por medio de un suelo, en un tiempo determinado.²¹ Sus unidades pueden ser expresadas como unidad de longitud sobre unidad de tiempo, dependiendo de las mediciones que se realicen (si es en campo o laboratorio) o de las variables que se utilicen para cálculos convencionales.

“La conductividad hidráulica constituye un parámetro fundamental en el estudio de un suelo, ya que permite dar una idea del movimiento que realiza el agua a través de éste, es decir, que a partir de dicha medida se puede estimar la rapidez en que el fluido atraviesa el medio poroso”.²²

Esta característica es dependiente de la capacidad que tiene el material en sí para transportar el agua que se infiltra en él, y llega hasta aguas subterráneas. También depende de la cantidad de poros del suelo y de su grado de saturación, su valor es inverso al de la porosidad del medio, la compactación y la densidad aparente, a

¹⁹ TORRES, Janneth, DE GUTIÉRREZ, Ruby M., CASTELLÓ, Ricardo y VIZCAYNO, Carmina. Análisis comparativo de caolines de diferentes fuentes para la producción de Metacaolín. [En línea]. Caracas. [Citado el 03 de septiembre de 2018]. Disponible en: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522011000100006

²⁰ FERRARI, Bongona, MORENO, Rodrigo y LANGE, F. F. Comportamiento coloidal de un caolín deshidratado. Madrid: Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 2000. p. 235.

²¹ DE RIDDER, N.A. Drainage principles and applications. Wageningen: Groundwater investigations, 1994. p. 69.

²² METER Group Inc. Mini Disk Infiltrometer. [En línea]. Estados Unidos. [Citado el 29 de septiembre de 2018]. Disponible en: http://manuals.decagon.com/Manuals/10564_Mini%20Disk%20Infiltrometer_Web.pdf

su vez, tiene en cuenta el contenido hídrico junto con el potencial hídrico, ya que al disminuir estos dos últimos, disminuye la conductividad hidráulica.

También se puede afirmar que la escorrentía, la infiltración, el transporte de contaminantes (plaguicidas, derrames de petróleo, derrames químicos), obedecen a este parámetro, es decir, que el conocimiento del mismo es muy importante, para tener una predicción aproximada del comportamiento que el fluido (agua), podría tener en su paso por el medio poroso, lo cual es de gran relevancia, puesto que mediante el estudio de estos factores es probable evitar posibles problemáticas de desestabilización, que suelen presentarse mayormente en suelos no saturados reptación de laderas en suelos parcialmente saturados, y deformaciones en suelos saturados por fluctuaciones granulares que pueden presentarse por grandes esfuerzos efectivos.

“Se puede definir la permeabilidad hidráulica de un suelo dependiendo de los espacios que existan entre los granos del suelo, los cuales dan la posibilidad al agua de que fluya a través de estos”²³. También se enfatiza la importancia para la mecánica de suelos y la Ingeniería de cimentaciones del conocimiento de este parámetro para la determinación de la cantidad de agua que fluye a través del suelo en una unidad de tiempo. Sumado a esto se debe conocer la velocidad de flujo de agua en un suelo, y para ello, existe la ecuación de Darcy para la determinación de la permeabilidad.²⁴

Según la Ley de Darcy, para determinar el coeficiente de permeabilidad es necesario conocer el gradiente hidráulico, el cual depende de las diferencias de altura y distancia entre dos puntos.

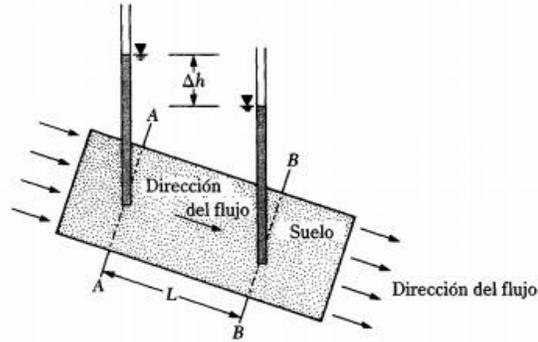
$$Q = \frac{kA(h_1 - h_2)}{L}$$

Donde Q: caudal, k: permeabilidad, h₁: altura 1 (ortogonal a superficie de referencia), h₂: altura 2, (ortogonal a superficie referencia) y L: longitud de la muestra.

²³ DAS, Braja M. Op. cit., p. 130.

²⁴ DARCY, Henry. Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau. Paris: Victor Dalmont, Éditeur, 1856. p. 246.

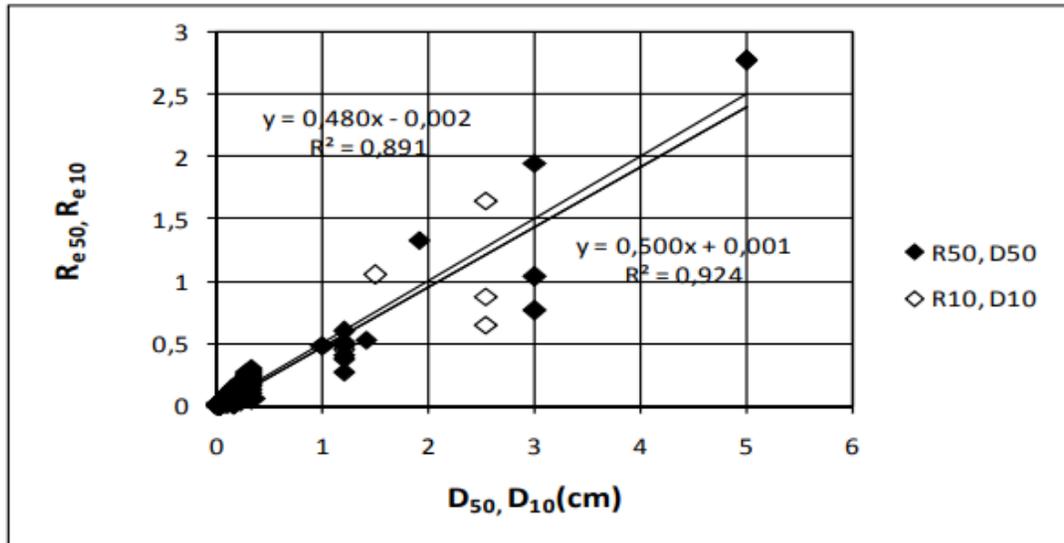
Figura 3. Ley de Darcy



Fuente: DAS, Braja M. Fundamentos de Ingeniería geotécnica. 4 ed. México: Cengage Learning, 2015. p. 129.

Se debe tener claro que, la conductividad hidráulica se halla de diferentes maneras y por distintos métodos como la Ley de Darcy, el método de Gaylon S. Campbell y el método de Zhang. Existe la conductividad saturada y no saturada, las cuales se presentan de diferente manera, debido a la condición de saturación en que se encuentre el suelo, sin embargo, la determinación de esta característica es de igual importancia en ambos casos o tipos de suelo, ya que, como se ha mencionado ya, es una tarea beneficiosa que permitirá realizar la descripción del flujo del agua a través del material mineral.

Figura 4. Estudio de conductividad hidráulica



Fuente: ROMAÑA GARCÍA, Jhon Francisco. Los límites de la Ley de Darcy. Tesis de investigación. Magister en Ingeniería - Geotecnia. [En línea]. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Civil. [Citado el 29 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/45359/1/200722150.2014.pdf>

2.5.1 Conductividad hidráulica saturada. “Sucede en el caso en que los poros del suelo están llenos de agua, en un porcentaje aproximado al 95% con respecto al espacio total del poro”²⁵ en esta situación se asume que todos los poros se encuentran ocupados por agua, incluso las posibles grietas y los llamados *macropores* o macroporos que puedan existir en el medio.

Dicho esto, también es necesario agregar que la cuantificación del movimiento de un lugar a otro de los macroporos es de alto grado de complejidad, puesto que, este es en exceso inconstante. Es por esto que, al aplicar tensión al agua de infiltración, este tipo de poros no llegan a llenarse y de esta manera se reduce la variabilidad espacial del suelo o de la matriz.

En términos de presión del agua de poros, se dice que la conductividad hidráulica saturada, sucede cuando se obtiene un valor positivo de dicha presión de medida del suelo.

2.5.2 Conductividad hidráulica no saturada. Tal como se mencionó antes, la conductividad hidráulica depende del contenido hídrico y el potencial hídrico de la matriz del suelo, y no es diferente para el caso de no saturación. En este caso, como en cualquier otro, la conductividad hidráulica de dicho suelo aumentará a medida que los dos parámetros recién nombrados también aumenten, la diferencia radica en que, en una condición no saturada, se presenta mayor cantidad de aire entre los poros del suelo y una cantidad muy reducida de agua en dichas cavidades, motivo por el cual se dificulta el flujo de agua a través de este tipo de suelos y en consecuencia de esto su conductividad hidráulica suele ser muy baja.

Lo anterior quiere decir que el valor de esta medida decrecerá al disminuir el contenido de agua en el medio poroso, es decir, que mientras más se seque el suelo menor será su conductividad hidráulica. El secado ocurre cuando el aire ingresa en la matriz, y a medida que este se mueve, va reemplazando el agua existente en los poros, es decir que, con un mayor movimiento de aire, menor es el espacio para el flujo del agua a través del suelo.

La permeabilidad de los suelos no saturados, por lo general se determina por métodos directos en campo y cálculos, que dependen de la precisión en los ensayos y en la parte analítica.²⁶

²⁵ BARBECHO CHUISACA, Juan Gabriel y Calle Ortiz, Jhoana Elizabeth. Caracterización de la conductividad hidráulica en suelos de la subcuenca del río Tarqui. 2012. 132. Universidad de Cuenca. Facultad de Ingeniería. Azuay. Trabajo de grado. Ingeniero Civil. [En línea]. Cuenca: Universidad de Cuenca. [Citado el 14 de septiembre de 2019]. Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/771/1/ti897.pdf>

²⁶ *Ibíd.*, p. 20.

2.6 MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN SUELOS

2.6.1 Método de Gaylon S. Campbell. A su vez se basa en los métodos de Childs & Collis-George²⁷ y Marshall, para el cálculo de la conductividad hidráulica no saturada, en los cuales se establece la suposición de que el control del flujo del agua en los suelos está dado por el diámetro más pequeño de una sucesión de poros, o sea que, según esta continuidad se aporta al total de la conductividad hidráulica del medio. Partiendo de estas suposiciones, el comportamiento de la conductividad dependiendo de cada tipo de poro, se obtiene con la suma de los diámetros del poro más pequeño (radio cero) y el poro de mayor dimensión, de esta manera se obtiene el valor total de conductividad para un determinado contenido de agua.

El Doctor Campbell basó su método en una resolución matemática, proponiendo en principio una doble integral para hallar el valor de permeabilidad (k).

$$k = M \int_0^R \int_0^R r^2 F(r) dr F(r) dr$$

En la que r equivale al radio del poro, M será una constante que debe determinarse, R es el valor del radio del poro mayor lleno de agua y $F(r)$ es la función de distribución de tamaño del poro.

En la publicación de Campbell, se plantea una fórmula empírica para relacionar el contenido de agua con el tamaño de los poros, más específicamente con su radio, teniendo en cuenta una ecuación de incremento capilar y una función de retención de humedad, la presenta de la siguiente manera:

$$\psi = \psi_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-b}$$

Donde:

- θ = contenido de agua saturado.
- ψ_s = potencial de entrada de agua.

²⁷ CHILDS, E. C. y COLLIS-GEORGE, N. The permeability of porous materials. London: The Royal Society of London, 1950. p. 206-209.

Finalmente, el autor plantea una fórmula para la determinación de la conductividad hidráulica insaturada de suelos,²⁸ y se expresa de la siguiente manera:

$$k = k_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+3}$$

Donde:

- k_s : Equivale a la conductividad hidráulica saturada
- θ : Es la humedad volumétrica
- θ_s : Humedad volumétrica en condición saturada

Teniendo en cuenta el modelo para la determinación de la succión de suelos de y basándose en las curvas características de humedad proporcionadas por dicho método, se reestructura la ecuación para potencial hídrico como una función de la siguiente manera:²⁹

$$K(\Psi) = \frac{K_s \left(\frac{\Psi}{a} \right)^{2+\frac{b}{3}}}{\theta_s^{2b+3}}$$

Donde:

- a : Es un parámetro de ajuste
- Ψ : Es la tensión hídrica

2.7 INFILTRACIÓN

La infiltración se conoce como un “proceso que se presenta en los suelos, en el cual el agua procedente de fuentes externas o en superficie ingresa en un medio poroso”.³⁰ Estas llamadas fuentes pueden ser precipitaciones, es decir por lluvia o por nieve, en el caso de lugares en los que se presenten estaciones en el año, o por riego.

Luego, el agua absorbida por el suelo, tendrá una velocidad de infiltración, es decir, “qué tan rápido atraviesa el medio poroso, dependerá del tipo de suelo y de sus propiedades físicas, a esta velocidad se le conoce como tasa de infiltración”.³¹

²⁸ CAMPBELL, Gaylon S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. En: Soil Science, nro. 117, 1974. p. 311-314. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-197406000-00001>

²⁹ GARDNER, R. A method for measuring the capillary tension of soil moisture. En: Soil Science, nro. 43, 1937. p. 229.

³⁰ JEJURKAR, Chandrakant L. y RAJURKAR, Milind P. An Investigational Approach for the Modelling of Infiltration Process in a Clay Soil. En: Maharashtra: Journal of Civil Engineering. 2015. p. 1918.

³¹ *Ibíd.*, p. 1916.

La tasa de infiltración deberá expresarse en unidades de longitud sobre unidades de tiempo, al igual que la conductividad hidráulica.

Este proceso es muy importante para la recarga de aguas subterráneas, ya que, el agua que atraviesa el medio poroso se infiltra a grandes profundidades hasta llegar a tal punto. Luego se presenta un proceso de evaporación, en donde la atmósfera recibe de vuelta un porcentaje del agua para repetir el ciclo. En el caso en el que el agua que reciba la atmósfera viene desde las plantas, se estaría hablando de un proceso de evapotranspiración.

Para poder estudiar a fondo este proceso, es necesario tener en cuenta más propiedades físicas que sólo la permeabilidad del suelo y el tipo de suelo, (suelo granular o arcilloso), también es importante considerar la pendiente del medio, la intensidad de lluvia dependiendo del clima de la zona, el tipo de lluvia y su duración.³²

Se dice que “cuando un suelo tiene una compactación mayor, el proceso de infiltración se mucho más lento”³³, esto se debe a que hay menos espacio para que el agua pueda atravesar el suelo. Por análisis, se presentaría el fenómeno contrario en el caso de los suelos que no se encuentren con una compactación tan considerable, es decir, se observaría una infiltración mucho más rápida.

Para lograr comprender mejor este fenómeno, se hace necesario conocer el medio poroso y sus propiedades hidráulicas, y así, “se podrán ajustar mejor los procesos de infiltración, evaporación, evapotranspiración y transporte de sedimentos”.³⁴

Los métodos propuestos para poder determinar la infiltración en suelos no saturados, suelen estar basados en datos experimentales resultantes de una medición de la longitud de ingreso del agua en una matriz porosa sobre el tiempo en que demora el paso de dicha agua a través de estos. Todo ello por medio de Infiltrómetros con succión ajustable.

Uno de estos métodos, es el de Zhang, el cual relaciona la conductividad hidráulica con la sortividad del medio poroso, de la siguiente manera:

$$I = C1 + C2\sqrt{t}$$

Donde: C1 = pendiente en curva infiltración acumulada vs raíz cuadrada del tiempo.

³² ZHANG, Gui-rong, QIAN, Ya-jun, WANG, Zhang-chung y ZHAO, Bo. Analysis of rainfall infiltration law in unsaturated soil slope. En: Scientific World Journal, nro. 25, 2014. p. 13-19.

³³ METER Group Inc. Mini Disk Infiltrometer. Op. cit.

³⁴ ANGULO-JARAMILLO, Rafael, GAUDET, J. P. y THONY, J. L. Measurement of hydraulic properties and mobile water content of field soil. En: Soil Science Society of America Journal. vol. 60, nro. 3, 1996. p. 712.

C2 = Sortividad del suelo.
t = tiempo de infiltración

La infiltración en suelos no saturados puede determinarse dependiendo del tamaño, forma y número de conductos de agua

2.8 AGUAS SUBTERRÁNEAS

También denominadas en ocasiones como acuíferos, se trata del agua que se encuentra bajo la superficie ubicada entre los espacios de dos matrices de suelo. Para hablar de su origen, se han propuesto diferentes teorías, las cuales presentan diferentes fuentes posibles de ingreso de agua en el suelo. Su origen principalmente se atribuye a la entrada de agua lluvia en el suelo, es decir, por precipitaciones que se deben a la naturaleza del ciclo hidrológico, sin embargo, también se consideran teorías como la condensación, debido al vapor de agua existente en el interior del suelo que se halla en el aire que ingresa a este, al existir una posible diferencia de temperaturas, puede presentarse dicho fenómeno.³⁵

2.8.1 Por precipitación. Se debe especialmente al ciclo hidrológico, originadas en su mayoría sobre mares que tengan una cantidad de agua de aproximadamente el 73% del total en la superficie del planeta. Se presenta una condensación que lleva una cantidad de agua hacia las nubes creando una presión en el aire que depende de las temperaturas de las posibles superficies de origen.

2.8.2 Por condensación de vapor de agua interno. A pesar de que muchas veces se considera poco relevante en cuanto al aporte de caudal de las posibles aguas subterráneas, sin embargo, su participación sí es importante sin importar el tipo de terreno. Se presenta una condensación del aire externo que ingresa al suelo, por la diferencia de temperaturas en los medios en los que se mueve, sobretodo en épocas de verano donde la temperatura que encuentra en el suelo, resulta menor que la temperatura exterior. Si la temperatura es considerablemente menor, se presentará este fenómeno.

En regiones húmedas, en las cuales hay niebla, también se presenta condensación, en el caso en el que el suelo permita en grandes profundidades el movimiento del aire, allí surge otra contribución de agua en el medio.

³⁵ DUQUE ESCOBAR, Darío. Manual de geología para ingenieros. [En línea]. Manizales: Universidad Nacional de Colombia. [Citado el 04 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/408/manualgeo.pdf>

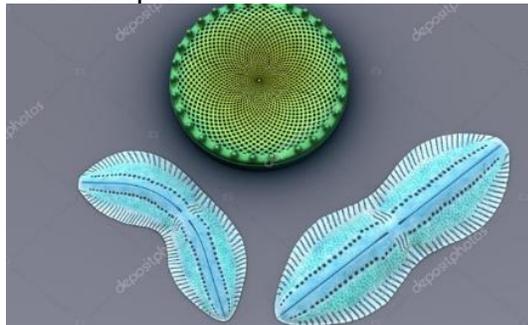
2.9 DIATOMEAS

Las diatomeas son algas microscópicas, éstas vivieron hace aproximadamente 30 millones de años en el fondo de lugares de agua dulce como los lagos, estas algas reaparecieron junto a la superficie de la corteza terrestre con el origen de la Cordillera de los Andes.

Algunas de sus principales características encontradas en unas cuantas investigaciones, es que, tienen un corteza rica en sílice, contribuyen a un gran enriquecimiento de minerales y oligoelementos que usualmente no se hallan en suelos pobres.³⁶ Pueden ser clasificadas como rocas sedimentarias con poros que admiten paso de contenido hídrico. En muchas situaciones se usan como filtros para agua, ya que, colaboran en la eliminación de microorganismos y bacterias presentes en el medio en que se usen.³⁷

Los usos de las diatomitas en temas de construcción, es casi nulo, generalmente se utilizan como materia prima para bloques y para cemento se usa como una puzolana de origen natural.

Figura 5. Diatomea en microscopio.



Fuente: DEPOSITPHOTOS. Diatomeas, algas unicelulares. [En línea]. Depositphotos. [Citado el 05 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://sp.depositphotos.com/124935052/stock-photo-diatoms-unicellular-algae.html>

³⁶ SÁNCHEZ CALLE, César Luciano. Caracterización geológica, propiedades físicas mecánicas, calcinación y filtración de las diatomitas del sector de Angostura, pueblo de Villingota (Santa Elena – Ecuador). Trabajo de grado. Ingeniero en Geología y Minas. [En línea]. Loja: Universidad Técnica Popular de Loja. [Citado el 14 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/17070/1/S%C3%A1nchez%20Calle%2c%20C%C3%A9sar%20Luciano%20vALIDO.pdf>

³⁷ TELLO ROBLES, Víctor Leonardo. Caracterización de las diatomitas de la Formación San Cayetano (Loja - Ecuador). Trabajo de grado. Ingeniero en Geología y Minas. [En línea]. Loja: Universidad Técnica Popular de Loja. [Citado el 15 de septiembre de 2018]. Disponible en: http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/7726/3/UTPL_Tello_Robles_Victor_Leonardo_1132549.pdf

3. MARCO CONCEPTUAL

En Ingeniería Civil, la Geotecnia, es una rama que se preocupa por las características físicas y mecánicas de un medio poroso. Es claro que cualquier proyecto se realizará sobre suelo, sin importar la especialidad (acueducto, estructuras verticales, vías, etc). Es por eso que se hace fundamental el entendimiento del comportamiento del suelo no saturado, que generalmente hace referencia a materiales arcillosos y cambiantes en volumen, debido a las diversas problemáticas que pueden presentarse, no sólo en cualquier tipo de estructura ya construida, sino también en el desarrollo de cualquier obra civil debido a que, representa un reto para la planeación, proyección y adecuada ejecución de las mismas, ahora bien, al realizar el estudio de los parámetros más influyentes y logrando su comprensión, se pueden comprender los conceptos y lograr un mayor entendimiento para así, presentar soluciones acordes con la Ingeniería.

Figura 6. Arcilla en banco.



Fuente: AGRONOMASTER. 5 Diferentes tipos de suelo que debes conocer para sembrar. [En línea]. Agronomaster. [Citado el 06 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://agronomaster.com/tipos-de-suelo/>

3.1 ESTADO DEL ARTE

Según investigaciones recientes, se afirma que, aunque la búsqueda de información sobre la Mecánica de Suelos *Parcialmente Saturados* o *No saturados*, tuvo inicio en la década de los años 70s, y que se realizaron planteamientos de conceptos que luego se sumaron a las teorías principales, aún no se aplican directamente dichos estudios en la práctica profesional. Tampoco componen las áreas de formación en la Ingeniería Civil ni en las disciplinas asociadas³⁸ (Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria, 2011).

En la condición de suelo no saturado, se presentan suelos ubicados por encima del nivel freático, habitualmente se trata de un suelo seco en donde los poros que

³⁸ MEZA OCHOA, Victoria Elena. Suelos parcialmente saturados: de la investigación a la cátedra universitaria. Op. Cit.

lo componen están llenos de aire, establece las respectivas fórmulas para el cálculo de porosidad y vacíos en las capas de suelo, dichas formulaciones siguen siendo aplicadas hoy en día. Según Lambe: “debido a que los vacíos están compuestos principalmente por aire, esto impide que la poca cantidad de agua contenida tenga una gran influencia sobre el comportamiento del suelo.”³⁹

En gran parte del territorio colombiano, mayormente en la región antioqueña, los suelos sobresalientes son suelos que se producen por roca meteorizada, y en estado de saturación parcial en esta condición se presentan tres fases en el suelo, agua, aire y sólido, éstas condiciones se dan por factores climáticos y de humedad en las zonas en donde se encuentran este tipo de suelos.

En relación con las dos condiciones de saturación en el suelo, se generaron dos teorías diferentes con diferentes metodologías de análisis para la determinación de los parámetros del suelo, esto debido también a que sólo se tenía en cuenta una variable para la medición de esfuerzos efectivos en el suelo, cuyo comportamiento no había podido ser simulado, a raíz de esto se empezaron a utilizar dos variables independientes de esfuerzo, una correspondiente a la succión y la otra al esfuerzo neto en sí.⁴⁰

Una manera muy aproximada de explicar la estructura de los suelos es por medio de una malla compuesta por diferentes elementos a la vez, tales como; los sólidos, microporos, mesoporos y macroporos⁴¹, en los últimos años se ha tenido como base el *modelo sólido-poroso*, y se establece un principio constructivo para asegurar la factibilidad de la malla.

Actualmente se ha demostrado la sensibilidad que tiene la conductividad hidráulica de los suelos (no saturados) con respecto al tamaño de poros y la relación de vacíos, encontrando que cuanto mayor sea el poro, mayor el flujo. Esto quiere decir que la infiltración será mayor en los poros de grandes proporciones.⁴²

Comprendiendo la infiltración como un tipo de flujo de agua por gravedad y fuerzas capilares a través de los suelos, revisando las pocas investigaciones sobre infiltración y permeabilidad los suelos no saturados, se ha demostrado que el estudio de los procesos del flujo de agua a través de estos, es de vital importancia en el estudio de suelo, debido a que de esta manera pueden controlarse las

³⁹ LAMBE, T. William. Mecánica de suelos. México: Limusa-Wiley, 1991. p. 308.

⁴⁰ ROJAS GONZÁLEZ, Eduardo. La última pieza del rompecabezas: el comportamiento volumétrico de los suelos no saturados. [En línea]. Universidad Autónoma de Querétaro. [Citado el 19 de septiembre de 2018]. Disponible en: https://www.uaq.mx/investigacion/revista_ciencia@uaq/ArchivosPDF/v6-n1/art8.pdf

⁴¹ METER Group Inc. Mini Disk Infiltrrometer. Op. cit.

⁴² REN, X.W. y SANTAMARINA, J.C. The hydraulic conductivity of sediments: a pore size perspective. En: Engineering Geology, vol. 233, nro. 2018. 2017, p. 48-54.

posibles inundaciones urbanas, para ello es necesario comprender y analizar la conductividad hidráulica de los suelos en la condición no saturada.⁴³

Sin embargo, dichas investigaciones son muy limitadas y continúan basándose en las teorías y ecuaciones de Hagen-Poiseuille, Kozeny-Carman, además, no se ha avanzado mucho en la investigación respecto a suelos no saturados.

Se ha encontrado leyes iniciales establecidas desde el principio del estudio de este tipo de suelos. Una de ellas es la ley establecida por Poseuille en el año 1840, que calcula la permeabilidad saturada de un suelo cuya clasificación de tamaño de grano es conocida, esta ley es usada para investigaciones de conductividad hidráulica de suelos en condición no saturada.

Sin embargo, no se encontró ningún estudio de arcillas en el que se evalúe su conductividad hidráulica, buscando mejorarla con la adición de partículas diatomeas.

Ahora bien, partiendo del hecho de que las diatomeas son algas microscópicas, y que vivieron hace cerca de 30 millones de años en el fondo de lagos de agua dulce, estas algas quedaron expuestas y resurgieron cerca de la superficie de los suelos con el nacimiento de la Cordillera de los Andes.

A raíz de lo anterior, algunas de sus principales características encontradas en diversas investigaciones, es que, poseen un revestimiento silíceo, aportan una gran riqueza en minerales que generalmente están ausentes en suelos empobrecidos, pueden clasificarse como rocas sedimentarias porosas, que permiten el paso del agua, que en muchos casos se usan como filtros para agua, ya que ayudan a eliminar microorganismos y bacterias presentes en ésta, así que, al mezclarse con suelos no saturados, podrían mejorar la permeabilidad de este tipo de suelos, sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, no se cuenta con investigaciones que involucren diatomitas para tal fin.

Pocos son los usos de las diatomitas en temas de construcción, generalmente se utilizan como material para ladrillos y como puzolana natural para cemento, Las investigaciones de diatomitas para mejoramiento en la conductividad hidráulica de suelos no saturados es prácticamente nula.

Teniendo en cuenta el punto de vista y la investigación empírica en el factor agrícola, en el que se tiene en cuenta que las diatomeas ayudan a los suelos empobrecidos a con el aporte de minerales y que funcionan como piedras porosas

⁴³ TAN, Jinqiang, SONG, Hongqing, ZHANG, Hailong, ZHU, Qinghui, XING, Yi y ZHANG, Jie. Numerical investigation on infiltration and runoff in unsaturated soils with unsteady rainfall intensity. En: Water, vol. 10, nro. 914, 2018. p. 1-18. [En línea]. MDPI. [Citado el 19 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/7/914/pdf-vor>

permeables, desde un punto de vista de Ingeniería, el aporte de diatomeas podría significar “enriquecimiento” en el suelo en términos de permeabilidad, ya que por sus componentes logra mejorar la condición no saturada y permite el paso del agua por los poros del geomaterial.

Se encontró que en algunos casos se utilizó el número de Reynolds para calcular la conductividad hidráulica utilizando la Ley de Darcy, lo cual arrojó unos resultados de la siguiente manera.

4. METODOLOGÍA

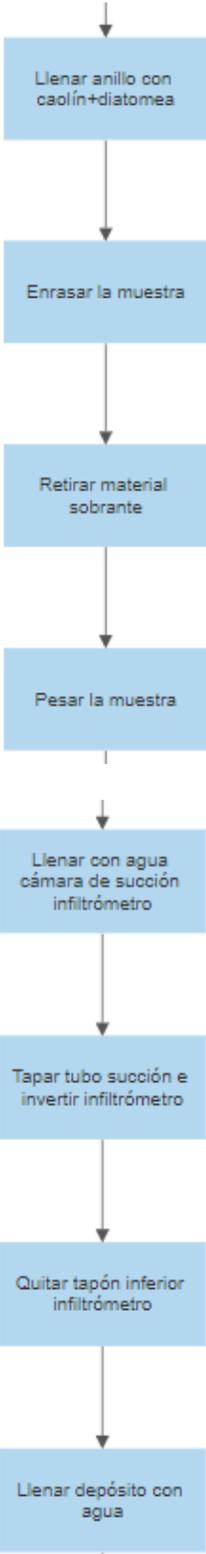
4.1 DESARROLLO METODOLÓGICO

A continuación, se muestra el proceso general o la metodología con la cual se llevó a cabo la determinación de la conductividad hidráulica a las muestras de suelo caolinítico, no se muestran porcentajes de diatomea dentro del cuadro, ni las diferentes succiones, sólo los pasos más importantes.

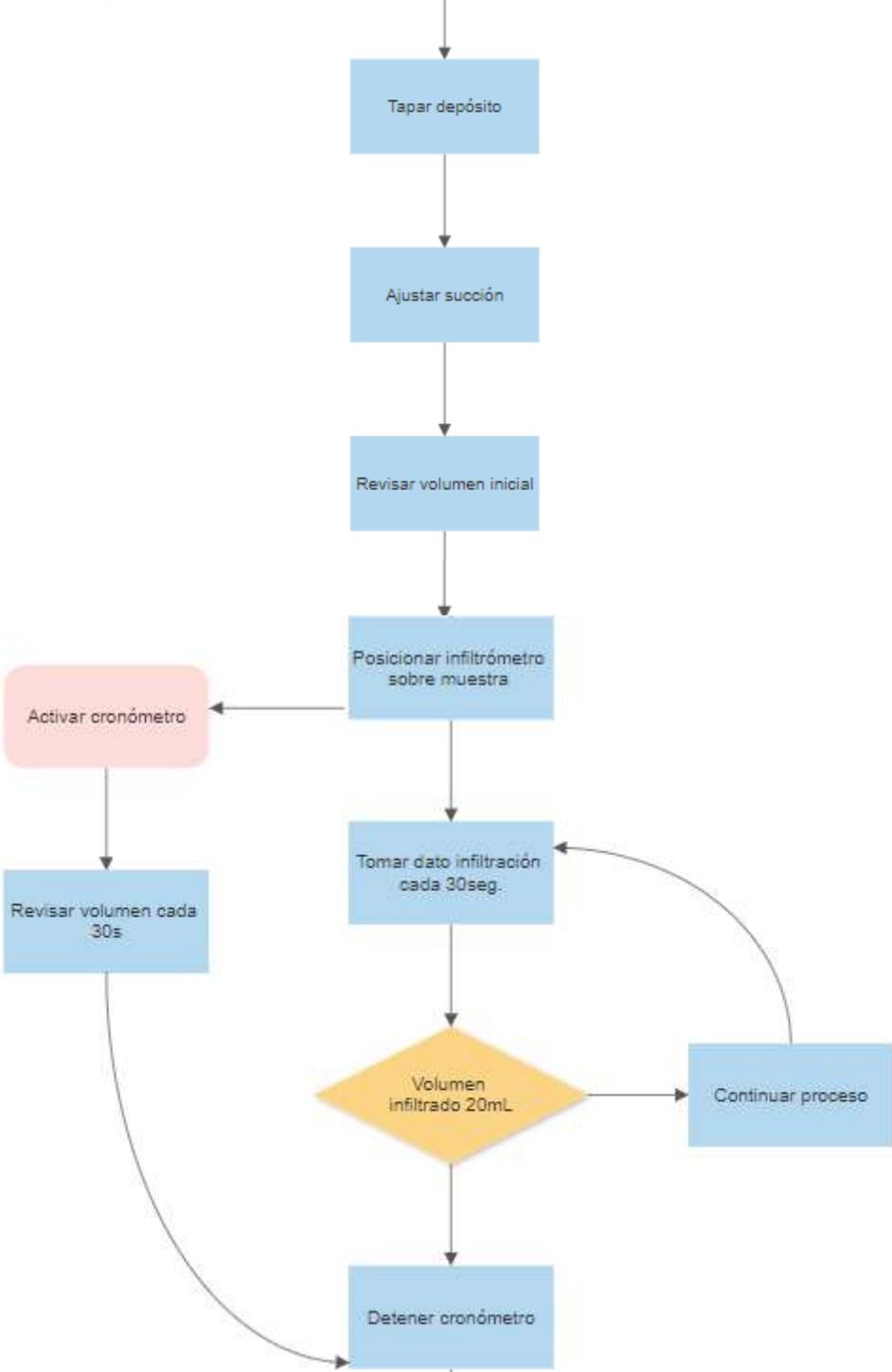
Figura 7. Diagrama de flujo proceso para determinación conductividad hidráulica



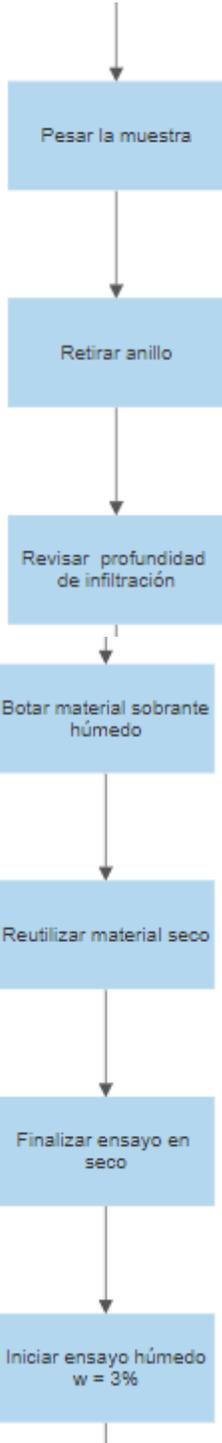
Continuación Figura 7.



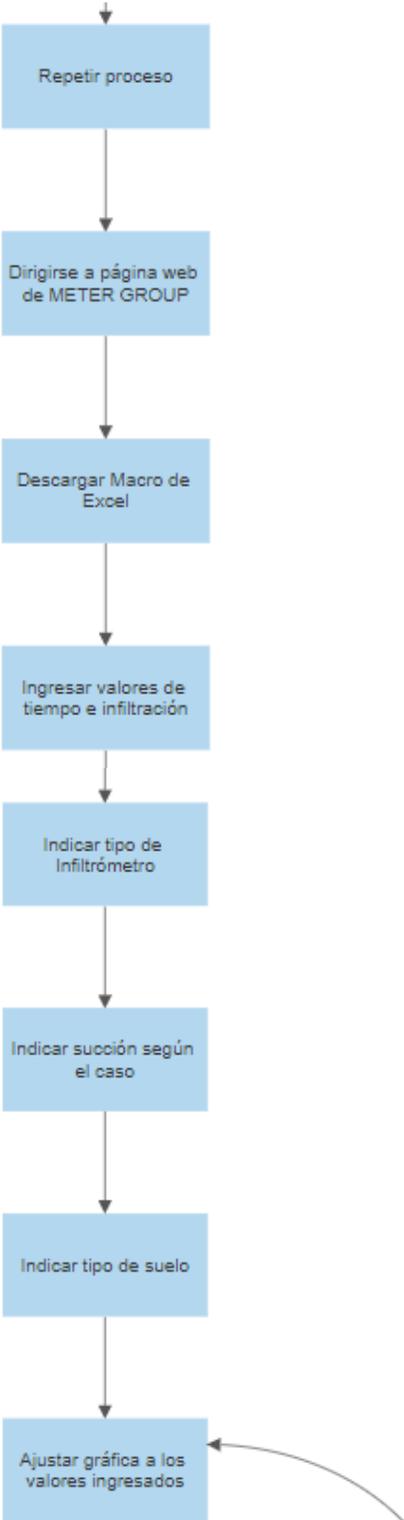
Continuación Figura 7.



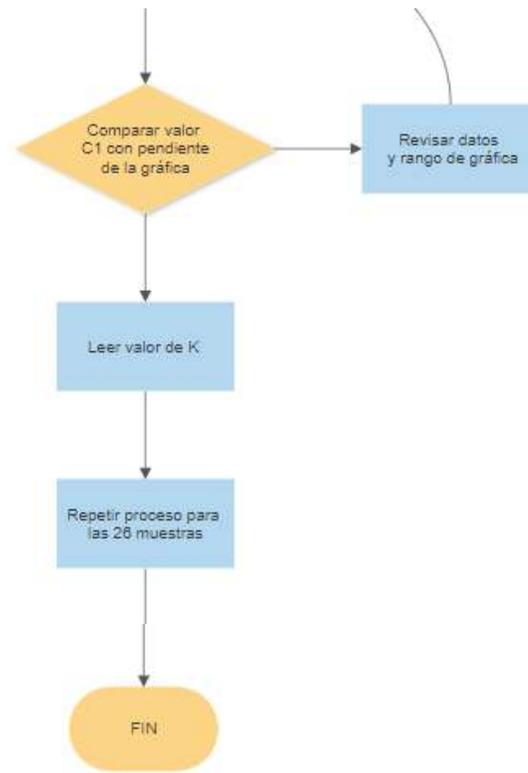
Continuación Figura 7.



Continuación Figura 7.



Continuación Figura 7.



Fuente: Autor.

4.2 PROCESO DE MONTAJE DE MUESTRAS EN SECO

Para el montaje de las veintiséis muestras, en laboratorio, se utilizó un anillo en acrílico, palustre y espátula metálicos con mango de plástico, recipientes plásticos, una regla metálica, lámina de plástico, una balanza y caolín común.

4.2.1 Medidas para montaje. Cada una de las muestras se elaboraron con un diámetro nominal igual al diámetro interno del anillo en acrílico y una altura igual a la altura del anillo en acrílico (revisar ilustración 8), para el cuál se tomaron tres diámetros y tres alturas, se determinó el promedio de estas medidas y fue:

Tabla 1. Dimensión de anillo en acrílico.

	D interior(mm)	Altura (mm)
1	108,6	100,7
2	108,4	100,6
3	108,7	100,8
Promedio	108,6	100,7

Fuente: Autor.

Las veintiséis muestras realizadas obedecen a estas medidas, teniendo un diámetro aproximado de 10,86cm y una altura aproximada de 10,07cm. Revisar Ilustraciones 9 y 10.

Figura 8. Anillo en acrílico



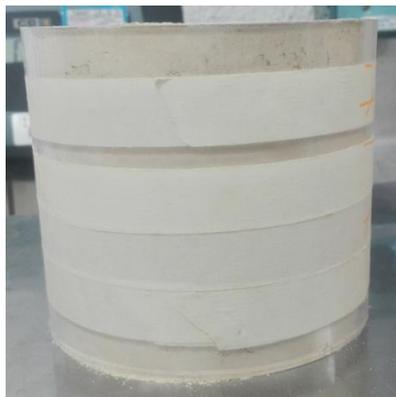
Fuente: Autor.

Figura 9. Muestra tipo.



Fuente: Autor.

Figura 10. Muestra tipo altura.



Fuente: Autor.

Las muestras se hicieron para el estado seco del suelo y para estado húmedo con un porcentaje de humedad aproximado al 3%.

4.2.2 Porcentaje de diatomeas. Para aplicar el porcentaje del material diatomáceo se pesó la muestra con ayuda de la balanza y se sacaron porcentajes para la cantidad de diatomea en el suelo de 5, 10, 20 y 40 (%) para cada muestra, se mezcló el material en un recipiente plástico, limpio y seco, de tal forma que se evitara contaminar la muestra y se permitiera dejarla lo más homogénea posible, esto se hizo con ayuda de la espátula metálica. Revisar Figura 11.

También se dejó una muestra sin porcentaje de diatomeas, es decir, caolín puro para comparar los resultados de la conductividad con las muestras que poseían las diatomitas, tal como lo indica la Tabla 6.

Tabla 2. Porcentaje de diatomeas en caolín.

Muestra	Peso inicial (g)	Porcentaje de diatomea (%)	Peso de (%) de diatomea (g)	Peso con diatomea (g)
1	744,0	0	0,0	744,0
2	894,0	0	0,0	894,0
3	910,0	0	0,0	910,0
4	756,0	5	37,8	793,8
5	750,1	5	37,5	787,6
6	802,0	5	40,1	842,1
7	865,7	5	43,3	909,0
8	794,5	5	39,7	834,2
9	844,0	10	84,4	928,4
10	840,0	10	84,0	924,0
11	696,2	10	69,6	765,8
12	844,0	10	84,4	928,4

Continuación Tabla 2.

Muestra	Peso inicial (g)	Porcentaje de diatomea (%)	Peso de (%) de diatomea (g)	Peso con diatomea (g)
13	754,3	10	75,4	829,7
14	730,6	10	73,1	803,7
15	753,0	20	150,6	903,6
16	790,0	20	158,0	948,0
17	753,0	20	150,6	903,6
18	782,8	20	156,6	939,4
19	787,5	20	157,5	945,0
20	715,0	20	143,0	858,0
21	864,0	40	345,6	1209,6
22	872,3	40	348,9	1221,2
23	768,2	40	307,3	1075,5
24	840,8	40	336,3	1177,1
25	874,0	40	349,6	1223,6
26	810,0	40	324,0	1134,0

Fuente: Autor.

El procedimiento anterior se realizó montando la muestra dos veces para sacar el porcentaje adecuado, es decir, primero se realizó un procedimiento normal de montaje de muestra con compactación, capas y enrasado igual al del ensayo real, para sacar el peso verdadero de la muestra, puesto que el peso compactado del caolín no es igual al peso suelto, y luego se procedió a agregar el material completo que ya incluía las diatomeas homogenizadas con el suelo para realizar el ensayo de conductividad hidráulica.

Figura 11. Porcentaje de diatomeas



Fuente: Autor.

Este proceso se realizó sobre la balanza calibrada, descontando el peso del anillo y de la lámina plástica.

4.2.3 Compactación. El armado de las muestras sobre el anillo se hizo por capas con dimensiones específicas (Figura 12), por capa se realizó la compactación del material (Figura 13). Todas las muestras se montaron en igualdad de condición para evitar márgenes de error grandes.

Este procedimiento se llevó a cabo con ayuda de un pisón de neopreno con un peso aproximado de 74g y con las características que se indican en la tabla 7.

Tabla 3. Medidas pisón.

	Diámetro(mm)	Altura (mm)
1	44	75
2	47	74
3	48	76
Promedio	46,3	75,0

Fuente: Autor.

Figura 12. Llenado capas de la muestra.



Fuente: Autor.

Figura 13. Compactación de la muestra.



Fuente: Autor.

La compactación se realizó de la misma manera en todas las muestras, iniciando por el extremo derecho, dando nueve golpes con el pisón en el rededor del centro de la muestra y finalizando con el décimo golpe justo en la mitad de la muestra.

4.2.4 Enrasado. El enrasado de las muestras se realizó con ayuda de una regla metálica de 25cm. Empezando por el retiro del material sobrante y luego con cuidado se pasó la regla sobre la última capa de la muestra para no retirar material necesario para el ensayo, es decir, evitando generar huecos e inconsistencias sobre la capa e intentando dejarla lo más homogénea posible, tal como se muestra en la Figura 14.

El enrasado es necesario, sobre todo, para que el infiltrómetro pueda tener un contacto directo con el material a evaluar, y el disco quede lo más horizontal posible sobre la muestra para permitir el paso en igualdad de condición en todo el material, de lo contrario el ensayo no tendrá resultados verdaderos y deberá descartarse.

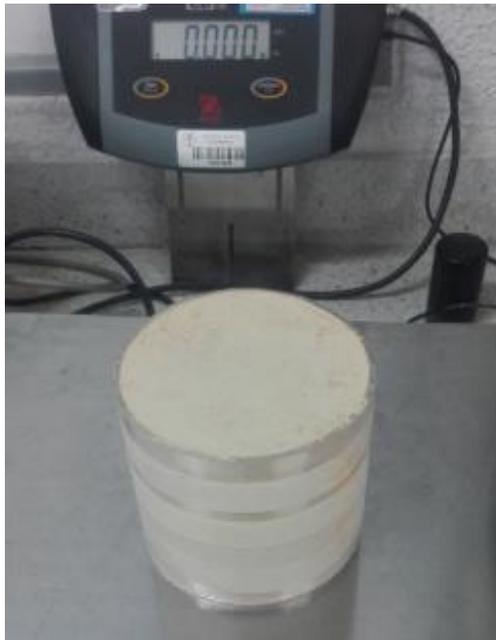
Figura 14. Enrasado muestra



Fuente: Autor.

4.2.5 Peso de muestras. El montaje de las muestras usando el anillo como estructura de armado, se tomó el peso inicial y final de la muestra tras cada ensayo, ya que, el peso inicial no corresponderá al total inicial de la prueba, debido a las dimensiones y capacidad del anillo, y fueron las descritas en la Tabla 8.

Figura 15. Peso muestra



Fuente: Autor.

Tabla 4. Peso inicial y final de las muestras.

Muestra	Peso inicial (g)	Porcentaje de diatomea (%)	Peso Final (g)
1	744	0	765
2	894	0	914
3	910	0	934
4	720	5	739
5	716	5	737
6	736	5	756
7	803	5	828
8	710	5	730
9	868	10	888
10	690	10	710
11	627	10	647
12	696	10	716
13	679	10	699
14	658	10	678
15	602	20	622
16	632	20	652
17	602	20	624
18	626	20	646
19	630	20	650
20	572	20	592
21	518	40	582
22	523	40	570
23	461	40	481
24	504	40	524
25	524	40	544
26	486	40	506

Fuente: Autor.

4.3 PROCESO DE MEDIDA DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Para la medición de la conductividad hidráulica en las muestras, se hizo uso de un infiltrómetro minidisco que permite la adecuación de la succión según el criterio del usuario, dependiendo del ensayo y del tipo de suelo, ya que, en el manual se recomienda usar succiones pequeñas para suelos arcillosos. El ajuste de succión se realiza a través de un tubo de control para tal fin graduado en centímetros y similar a una regla para facilidad de manejo. También se utilizó un cronómetro común para realizar la toma de medidas de volumen de agua infiltrado, requeridas para cada ensayo, en los mismos intervalos de tiempo (30, 60, 90, etc) y hasta completar un volumen de infiltración de aproximadamente 20ml por cada ensayo. (Ver Anexo A, Tablas de tiempo vs infiltración)

Tabla 5. Medida de conductividad hidráulica con caolín 5% y succión 0,5cm.

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0,00	75	0,00
30	5,48	74	0,06
60	7,75	73	0,13
90	9,49	71	0,25
120	10,95	69	0,38
150	12,25	66	0,57
180	13,42	64	0,69
210	14,49	62	0,82
240	15,49	60	0,94
270	16,43	58	1,07
300	17,32	56	1,19

Fuente: Autor.

4.3.1 Infiltrómetro. Se llenó la cámara superior del infiltrómetro tal como lo especifica el manual⁴⁴ retirando el tapón y agregando agua hasta tres cuartas partes de la cámara. El agua utilizada fue agua común, puesto que, se especifica en el manual que no se debe manejar el ensayo con agua destilada por ningún motivo, esto se debe a que, en el suelo, existen sales o minerales naturales, y al utilizar este tipo de agua no se simulan las condiciones normales del suelo así que los resultados pueden no ser verídicos, y se dañaría el propósito principal del ensayo.

⁴⁴ METER Group Inc. Mini Disk Infiltrometer. Op. cit.

Figura 16. Cámara superior



Fuente: Autor.

Teniendo la cámara que controla la succión lista, se invirtió el infiltrómetro y se retiró el elastómero de la cámara para depósito de agua, el disco de acero sinterizado que está contenido en el recubrimiento de goma y se procedió a hacer el llenado del depósito con agua común hasta los niveles de agua deseados. Fue necesario tapar el tubo de succión para evitar que el agua saliera desde la cámara superior.

En el llenado del depósito, se tuvo en cuenta que no ingresara agua por el tubo Mariotte, ya que este sobresale hasta la cámara superior y se alteraría el funcionamiento al estar invertido el infiltrómetro, adicionalmente se ubicó este tubo de manera opuesta al tubo de succión y a 6mm del borde inferior de la cámara más grande del infiltrómetro.

Luego se cerró la cámara inferior de nuevo con el elastómero que contiene el disco y se ubicó el infiltrómetro completamente en posición vertical, lo que garantizó que no se presentara filtración de agua a través del medio poroso. Se verificó que el tubo de succión estuviera en la posición deseada y requerida para el ensayo (0.5cm, 1.0cm y 2.0cm), esto se hace verificando que la línea del número en centímetros de la succión concuerde con la altura de la lámina de agua en la cámara.

Finalmente se procedió a montar el infiltrómetro sobre cada muestra, verificando el volumen de agua igual para cada muestra y las tres diferentes succiones para cada combinación, se observó que el infiltrómetro estuviera haciendo contacto directo y que estuviera en una posición ortogonal (lo más perpendicular posible) al plano de superficie en el suelo.

Figura 17. Infiltrómetro en muestra



Fuente: Autor.

4.3.2 Uso de cronómetro. Con ayuda de un cronómetro común se realizaron las medidas para los intervalos de tiempo escogidos, anotando el volumen infiltrado en el suelo por cada 30 segundos. Los ensayos arrojaron diferentes tiempos de infiltración, aunque similares en los ensayos con las mismas características, es decir, porcentaje de diatomea y succión.

En casi todos los casos, se realizaron dos ensayos para muestras con misma cantidad de diatomea y succión, de esta manera se pretendió evitar márgenes de error muy grandes.

4.3.3 Recopilación de datos y cálculo de conductividad hidráulica. Los datos se tomaron de forma manual en el momento del ensayo, en forma de tabla, enfrentando el tiempo con el volumen de infiltración, luego se introdujeron en una tabla de Excel para organizar los datos obtenidos y a su vez introducirlos en la Macro preparada por el equipo de Meter Group.

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, la macro está programada para hacer el cálculo de conductividad hidráulica o permeabilidad (K) teniendo en cuenta las diferentes succiones escogidas y el tipo de suelo (arcilla).

Para grupos de datos con igualdad de condición y características similares, es decir, revisando si estaban en estado seco o húmedo, y según la succión para el ensayo se promediaron los datos recibidos de conductividad hidráulica y se realizaron las respectivas gráficas para el análisis de las muestras.

4.4 MUESTRAS EN SUELO CON PORCENTAJE DE HUMEDAD (3%)

El proceso de evaluación para estas muestras, fue similar al anterior, con respecto a las dimensiones, uso del infiltrómetro, cronómetro, y toma de los volúmenes de agua infiltrada en los tiempos especificados (Anexo A). Sin embargo, para este caso no fue necesario sacar el porcentaje de diatomeas aparte, ya que se usó sobre la misma muestra inicial, con una humedad aproximada al 3%.

Figura 18. Muestra para húmedo.



Fuente: Autor.

Figura 19. Infiltrómetro en muestra húmeda



Fuente: Autor.

Tabla 6. Peso muestra húmeda

Muestra	Peso inicial (g)	Porcentaje de diatomea (%)	Peso Final (g)
1	765	0	785,0
2	914	0	934,0
3	934	0	954,0
4	739	5	759,0
5	737	5	757,0
6	756	5	776,0
7	828	5	848,0
8	730	5	750,0
9	888	10	908,0
10	710	10	730,0

Continuación Tabla 6.

Muestra	Peso inicial (g)	Porcentaje de diatomea (%)	Peso Final (g)
11	646,58	10	666,6
12	716	10	736,0
13	698,87	10	718,9
14	677,54	10	697,5
15	622,4	20	642,4
16	652	20	672,0
17	624	20	644,0
18	646,24	20	666,2
19	650	20	670,0
20	582	40	602,0
21	570	40	590,0
22	481	40	500,9
23	524	40	544,5
24	544	40	564,4
25	506	40	526,0

Fuente: Autor.

4.5. INFILTRACIÓN

Al final se observó cuánto se infiltró en cada grupo de muestras para corroborar los resultados obtenidos.

Figura 20. Infiltración en muestra



Fuente: Autor.

Figura 21. Infiltración en muestra medición



Fuente: Autor.

4.6 RECOLECCIÓN DE DATOS

La recolección de datos obedece a la recomendación encontrada en el manual del usuario del infiltrómetro minidisco, la cual sugiere que se escoja un intervalo de tiempo para tomar los datos de volumen infiltrado en el suelo. Este es el Método de Zhang.

Es necesario realizar una tabla con estos valores, pero deben agregarse dos columnas más, una con la medida de la raíz del tiempo y otra con el cálculo que infiltración, el cual también se basa en el manual de usuario creado por Gaylon S. Campbell, y es de la siguiente manera:

$$I = C1t + C2\sqrt{t}$$

En donde, C1 corresponde a la pendiente de la curva de la acumulación de la infiltración versus la raíz cuadrada del tiempo, C2 es la sorptividad del suelo y finalmente I será la infiltración.

Después debe tenerse en cuenta el valor A de relación entre los parámetros de van Genuchten, tal como se indica en la tabla y dependiendo de las características de la muestra.

Este valor A se encuentra ya calculado con base en las fórmulas nombradas y que se explicarán más adelante, sin embargo, y por facilidad, se utilizó la tabla directamente.

También existen fórmulas para el cálculo de dicho parámetro, pero constituyen procedimientos más complejos y tal vez innecesarios, por la naturaleza del ensayo, el cual, es un ensayo bastante simple que puede realizarse tanto en laboratorio como *in situ*.

Tabla 7. Parámetros de van Genuchten

	radio disco (cm)	2,25		A							
	alpha	n	/ ho	-0,5	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7
sand	0,145	2,68		2,8357	2,4041	1,7279	1,2419	0,8926	0,6416	0,4611	0,3314
loamy sand	0,124	2,28		2,9853	2,7868	2,4286	2,1164	1,8444	1,6073	1,4007	1,2206
sandy loam	0,075	1,89		3,8771	3,8880	3,9099	3,9320	3,9541	3,9765	3,9989	4,0214
loam	0,036	1,56		5,4611	5,7177	6,2674	6,8700	7,5305	8,2545	9,0481	9,9181
silt	0,016	1,37		7,9215	8,1774	8,7144	9,2866	9,8964	10,5463	11,2388	11,9768
silt loam	0,02	1,41		7,1021	7,3679	7,9299	8,5347	9,1856	9,8862	10,6402	11,4517
sandy clay loam	0,059	1,48		3,2107	3,5233	4,2429	5,1095	6,1531	7,4098	8,9232	10,7457
clay loam	0,019	1,31		5,8575	6,1090	6,6448	7,2277	7,8616	8,5512	9,3012	10,1170
silty clay loam	0,01	1,23		7,8932	8,0941	8,5112	8,9498	9,4110	9,8960	10,4060	10,9422
sandy clay	0,027	1,23		3,3363	3,5705	4,0893	4,6835	5,3641	6,1435	7,0362	8,0586
silty clay	0,005	1,09		6,0763	6,1693	6,3596	6,5557	6,7579	6,9663	7,1812	7,4026
clay	0,008	1,09		3,9981	4,0964	4,3004	4,5146	4,7394	4,9754	5,2232	5,4833

Fuente: Autor.

- Cálculo de A. Este parámetro es adimensional, ya que se relacionan unidades de metros sobre metros, teniendo en cuenta el radio y la succión ajustada, adicionalmente se tiene en cuenta n y alpha que hacen parte de los parámetros de van Genuchten y que se relacionan con el tipo de suelo y succión.

$$A = \frac{11.65(n^{0.1} - 1)\exp(2.92(n - 1.9)) \alpha h_0}{(\alpha r_0)^{0.91}}$$

Luego con estos valores se calcula la permeabilidad o conductividad hidráulica, donde sólo se utiliza la pendiente de la curva la cual se divide entre el parámetro que relaciona la succión con el tipo de suelo de la siguiente manera:

$$K = \frac{C1}{A}$$

Para mayor facilidad, el equipo de Meter Group creó una macro en Excel, la cual está programada para recibir los valores de tiempo y volumen. En la hoja se muestra un paso a paso para el ingreso de datos:

Tabla 8. Paso a paso macro

Instrucciones	
Paso 1:	Introduzca los tiempos de medición comenzando con cero.
Paso 2:	Introduzca las medidas de volumen correspondientes.
Paso 3:	Ajuste el campo de selección en el gráfico para ajustar los datos.

Fuente: METER Group Inc. Mini Disk Infiltrrometer. [En línea]. Estados Unidos. [Citado el 29 de septiembre de 2018]. Disponible en: http://manuals.decagon.com/Manuals/10564_Mini%20Disk%20Infiltrrometer_Web.pdf

Tabla 9. Paso a paso 4 macro.

Step 4:	Select Infiltrrometer Type
Step 5:	Select Soil Type
Step 6:	Select Suction

Fuente: METER Group Inc. Mini Disk Infiltrrometer. [En línea]. Estados Unidos. [Citado el 29 de septiembre de 2018]. Disponible en: http://manuals.decagon.com/Manuals/10564_Mini%20Disk%20Infiltrrometer_Web.pdf

Automáticamente se calcula la raíz cuadrada del tiempo y el valor de la infiltración. Presenta una tabla de la siguiente manera con un ejemplo básico.⁴⁵

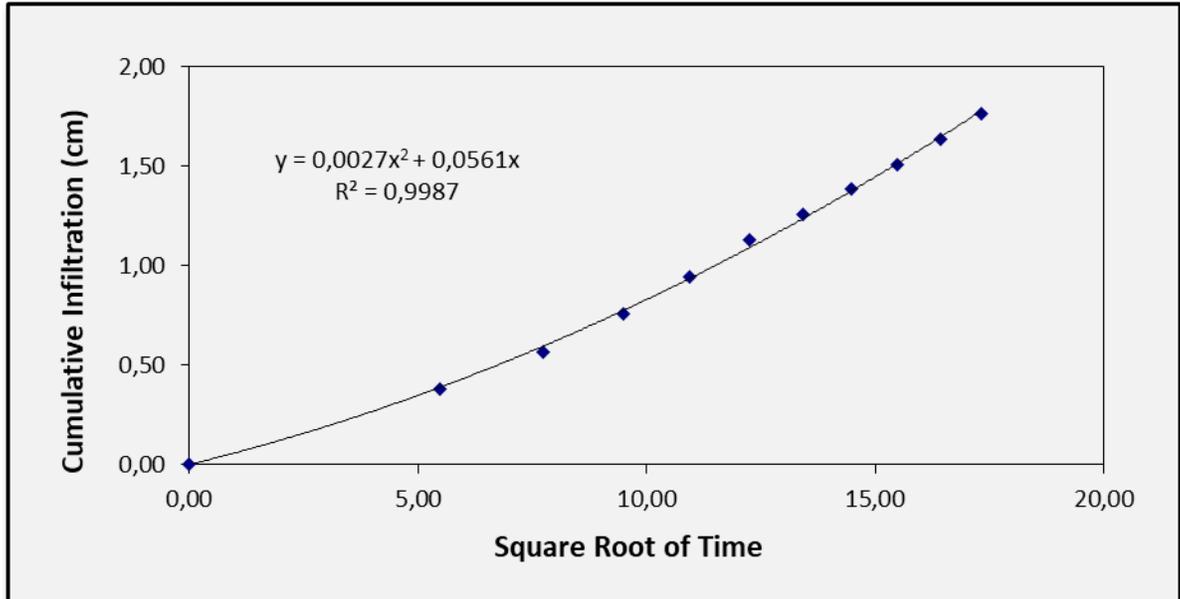
Tabla 10. Ejemplo macro

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0,00	95	0,00
30	5,48	89	0,38
60	7,75	86	0,57
90	9,49	83	0,75
120	10,95	80	0,94
150	12,25	77	1,13
180	13,42	75	1,26
210	14,49	73	1,38
240	15,49	71	1,51
270	16,43	69	1,63
300	17,32	67	1,76

Fuente: METER Group Inc. Mini Disk Infiltrometer. [En línea]. Estados Unidos. [Citado el 29 de septiembre de 2018]. Disponible en: http://manuals.decagon.com/Manuals/10564_Mini%20Disk%20Infiltrometer_Web.pdf

⁴⁵ METER Group Inc. Mini Disk Infiltrometer. Op. cit.

Figura 22. Ejemplo en macro curva



Fuente: METER Group Inc. Mini Disk Infiltrometer. [En línea]. Estados Unidos. [Citado el 29 de septiembre de 2018]. Disponible en: http://manuals.decagon.com/Manuals/10564_Mini%20Disk%20Infiltrometer_Web.pdf

Figura 23. Lista dinámica succión

Step 4: Select Infiltrometer Type	⇒	MiniDisk
Step 5: Select Soil Type	⇒	clay
Step 6: Select Suction	⇒	0,5

Radius	2,25 cm
alpha	0,008
n/h ₀	1,09
Suction	-0,5 cm

A	3,998055794
C1	0,00268497 cm/s
K	0,00067157 cm/s

0,5

1

2

3

4

5

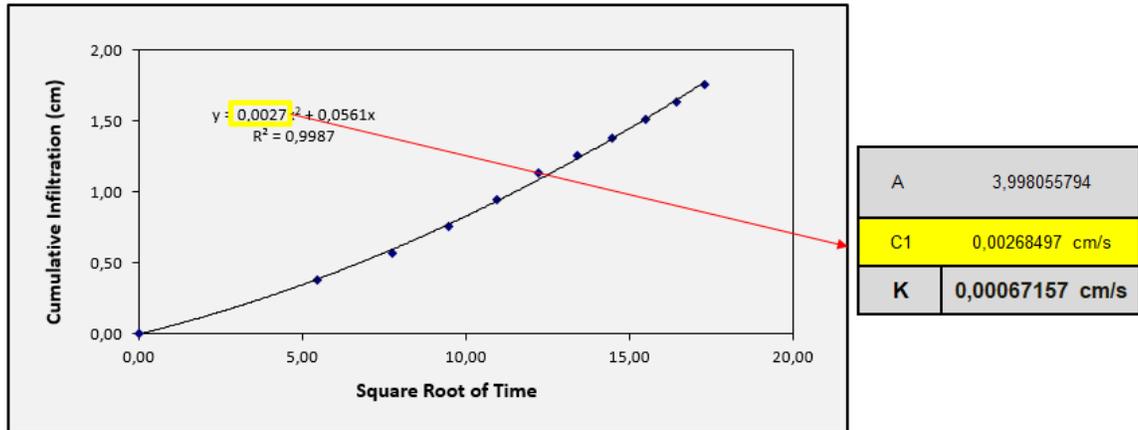
6

7

Fuente: METER Group Inc. Mini Disk Infiltrometer. [En línea]. Estados Unidos. [Citado el 29 de septiembre de 2018]. Disponible en: http://manuals.decagon.com/Manuals/10564_Mini%20Disk%20Infiltrometer_Web.pdf

La macro en Excel es una herramienta para facilitar el cálculo de la conductividad hidráulica o permeabilidad, sin embargo, es necesario ingresar los datos de manera adecuada y verificar que los resultados sean correctos, esto puede hacerse ajustando la gráfica al rango de datos del ensayo y verificando el cálculo de C1 al compararlo con la pendiente de la curva.

Figura 24. Valor de C1 coincidente con fórmula.



Fuente: METER Group Inc. Mini Disk Infiltrometer. [En línea]. Estados Unidos. [Citado el 29 de septiembre de 2018]. Disponible en: http://manuals.decagon.com/Manuals/10564_Mini%20Disk%20Infiltrometer_Web.pdf

5. RESULTADOS

5.1 EN SUELO SECO

Para un porcentaje de humedad en el suelo equivalente al cero por ciento (0%), se evaluaron las diversas muestras de caolín, utilizando tres valores de succión diferentes, empleando el Infiltrómetro Mini Disco y agregando 5 porcentajes diferentes de diatomeas en el suelo (0%, 5%, 10%, 20% y 40%).

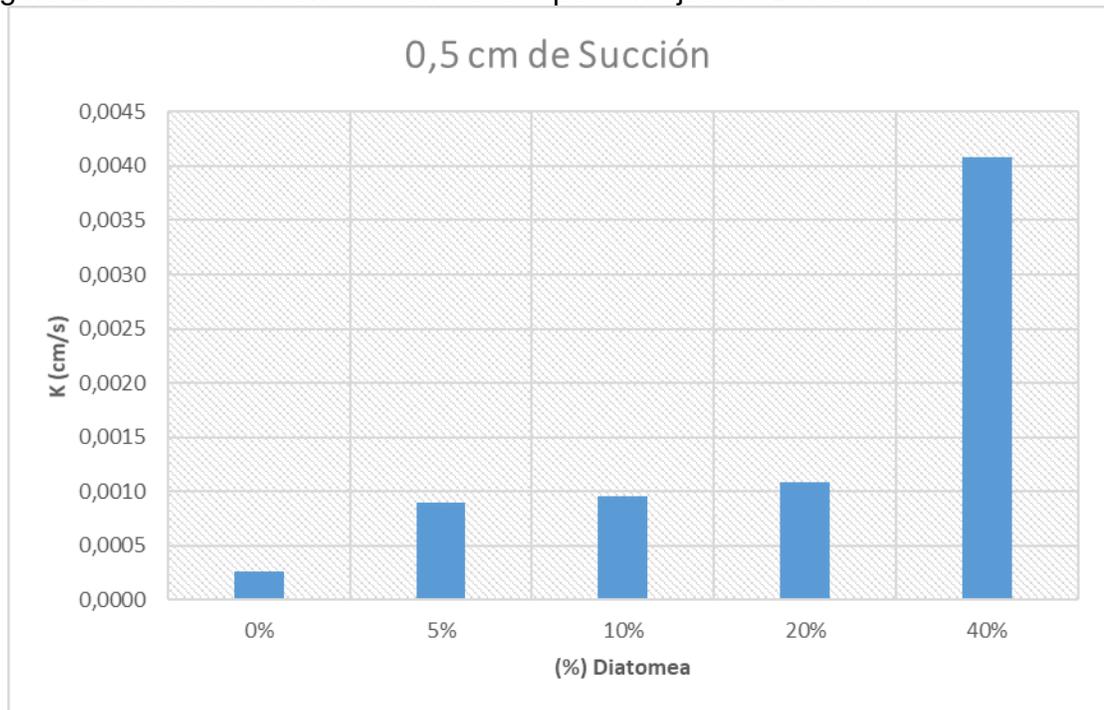
Empleando una succión de 0.5cm, 1cm y 2cm se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 11. Succión de 0.5 con diferentes porcentajes de Diatomea.

DIATOMEA	K
0%	0,0003
5%	0,0009
10%	0,0010
20%	0,0011
40%	0,0041

Fuente: Autor.

Figura 25. Succión de 0.5 con diferentes porcentajes de Diatomea



Fuente: Autor.

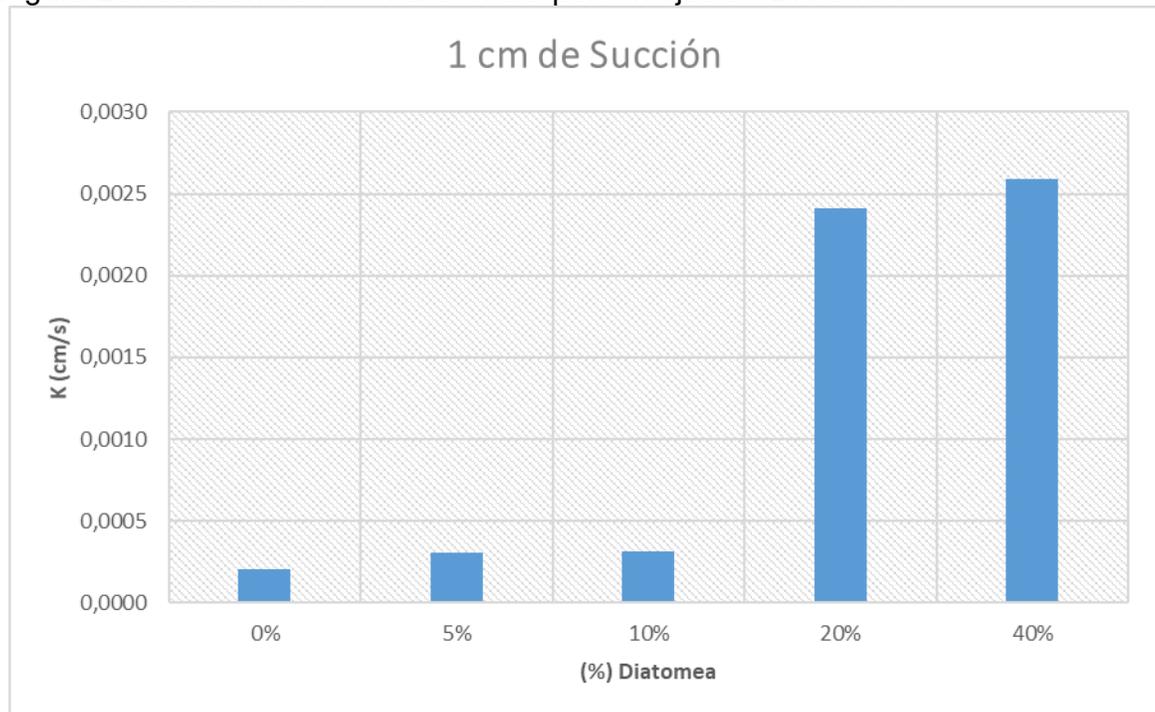
Empleando una succión de 1cm se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 12. Succión de 1cm con diferentes porcentajes de Diatomea

DIATOMEA	K
0%	0,0002
5%	0,0003
10%	0,0003
20%	0,0024
40%	0,0026

Fuente: Autor.

Figura 26. Succión de 1 con diferentes porcentajes de Diatomea



Fuente: Autor.

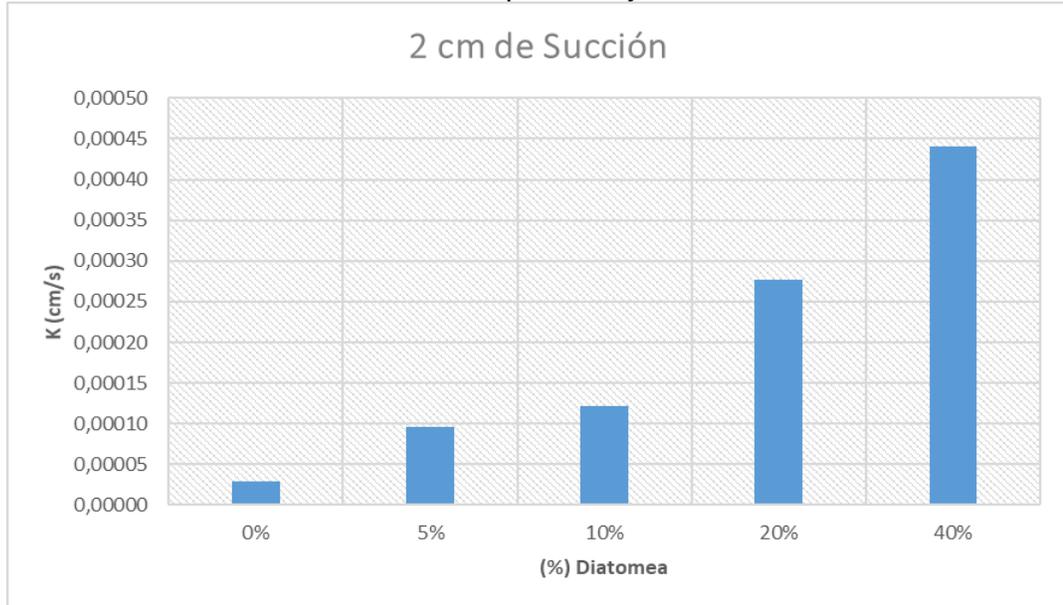
Empleando una succión de 2cm se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 13. Succión de 2cm con diferentes porcentajes de Diatomea.

DIATOMEA	K
0%	0,00003
5%	0,00010
10%	0,00012
20%	0,00028
40%	0,00044

Fuente: Autor.

Figura 27. Succión de 2 con diferentes porcentajes de Diatomea



Fuente: Autor.

5.2 EN SUELO CON PORCENTAJE DE HUMEDAD

Para un porcentaje de humedad en el suelo equivalente al 3% aproximadamente, se evaluaron las diversas muestras de caolín, utilizando tres valores de succión diferentes, empleando el Infiltrómetro Mini Disco y agregando 5 porcentajes diferentes de diatomeas en el suelo (0%, 5%, 10%, 20% y 40%).

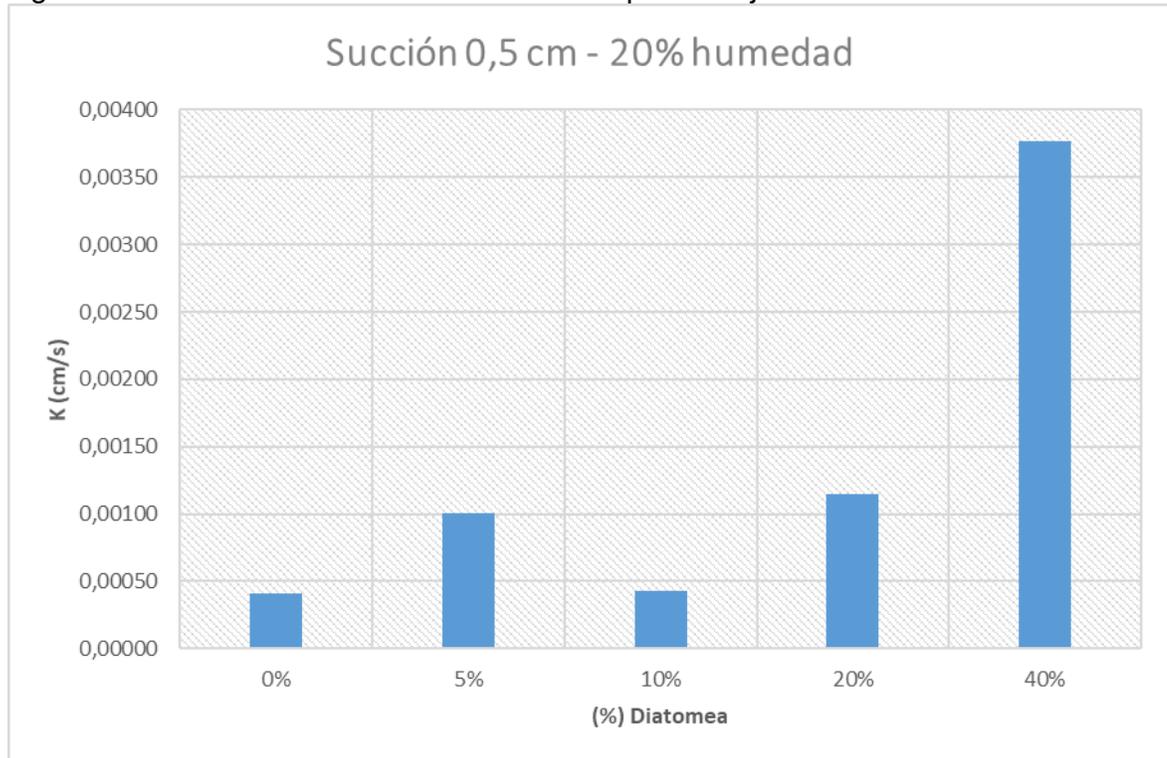
Empleando una succión de 0.5cm, 1cm y 2cm se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 14. Succión de 0.5cm y 3% de humedad con diferentes porcentajes de Diatomea

DIATOMEA	K
0%	0,00041
5%	0,00101
10%	0,00042
20%	0,00115
40%	0,00377

Fuente: Autor.

Figura 28. Succión de 0.5cm con diferentes porcentajes de diatomea húmedo



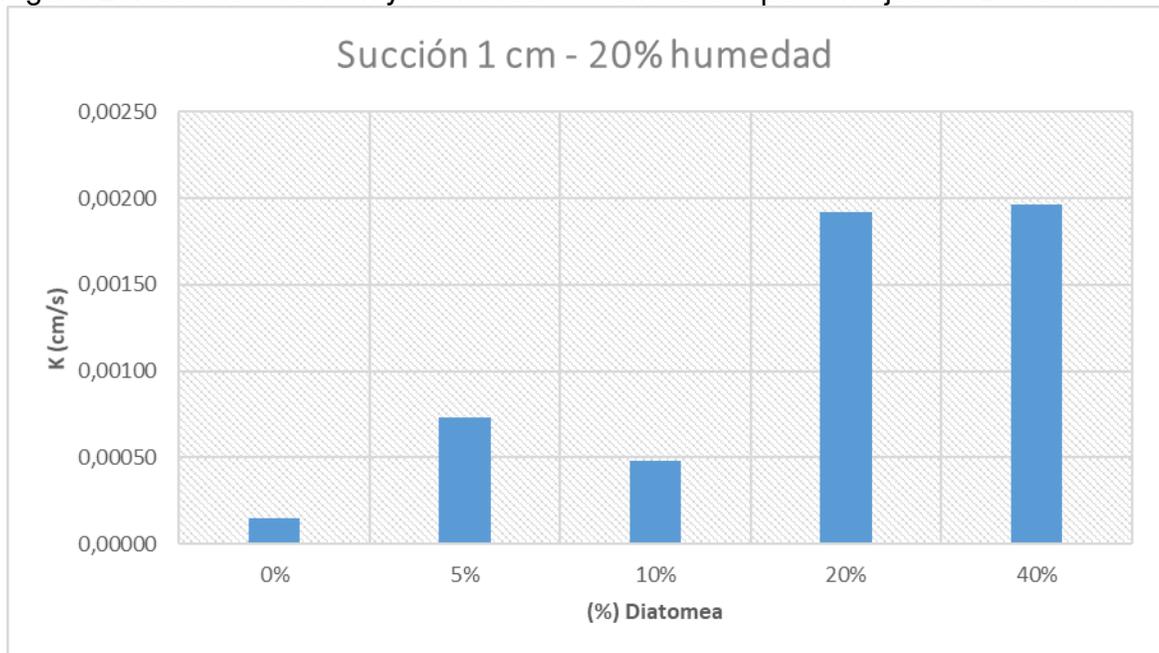
Por el autor.

Tabla 15. Succión de 1cm 3% de humedad con diferentes porcentajes de Diatomea.

DIATOMEA	K
0%	0,00015
5%	0,00073
10%	0,00048
20%	0,00192
40%	0,00197

Fuente: Autor.

Figura 29. Succión de 1cm y humedad con diferentes porcentajes de Diatomea



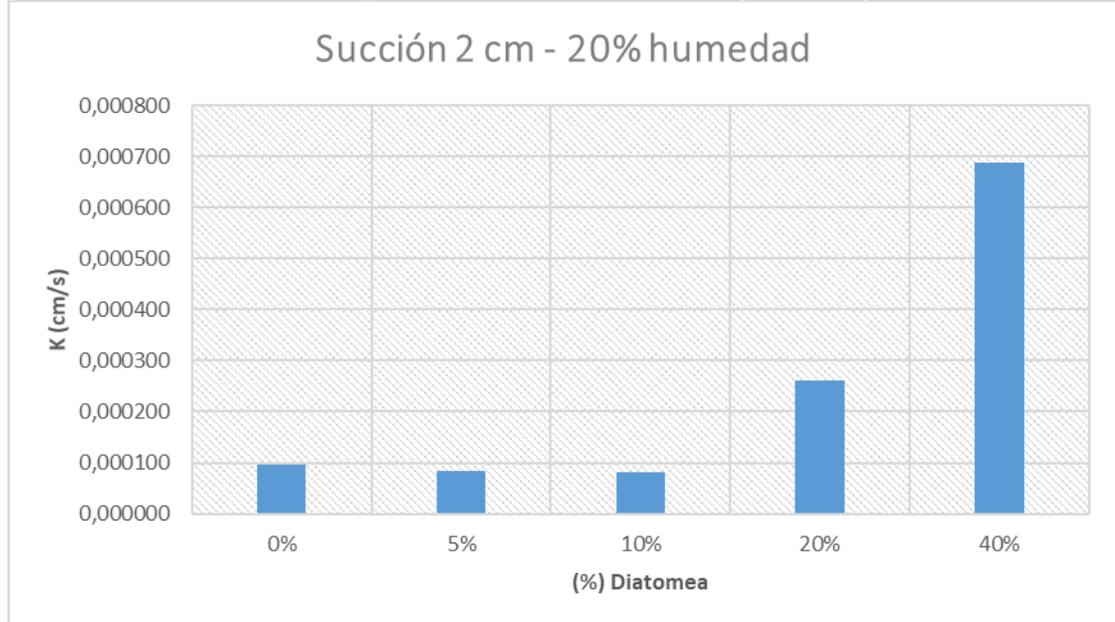
Fuente: Autor.

Tabla 16. Succión de 2cm y humedad con diferentes porcentajes de Diatomea.

DIATOMEA	K
0%	0,000097
5%	0,000084
10%	0,000082
20%	0,000261
40%	0,000690

Fuente: Autor.

Figura 30. Succión de 2cm y humedad con diferentes porcentajes de Diatomea



Fuente: Autor.

5.3 RESULTADOS POR GRUPOS DE MUESTRAS

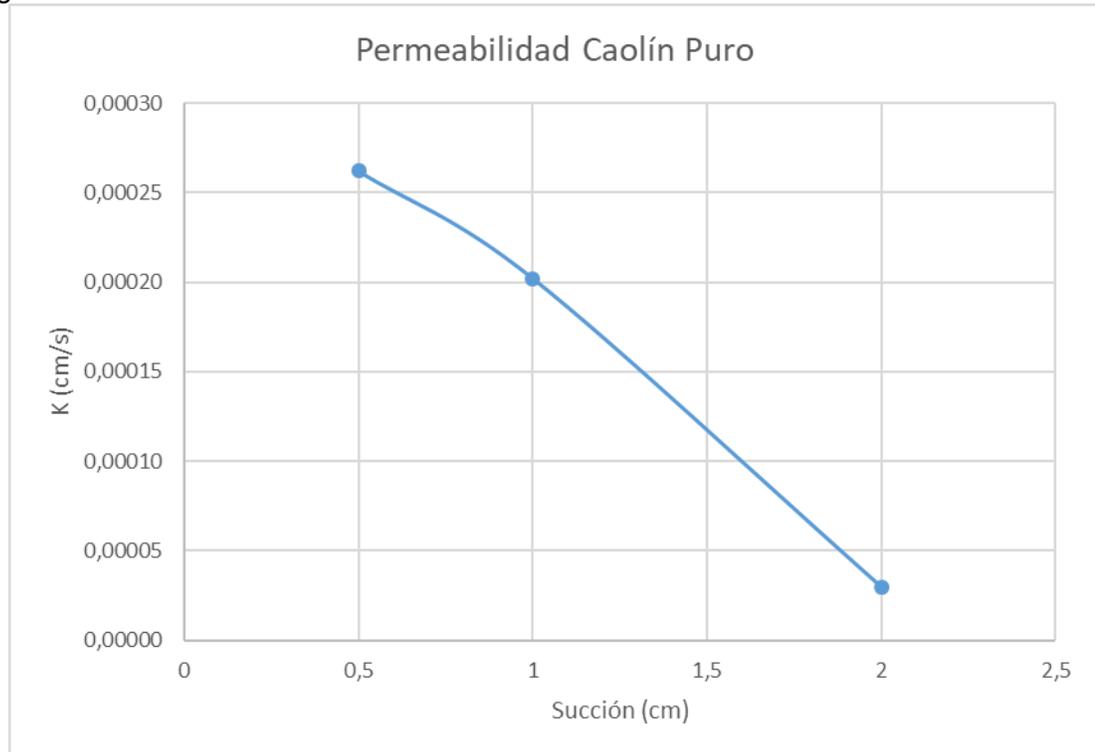
5.3.1 Muestras de Caolín con 0, 5, 10, 20 y 40% de diatomea en suelo seco.

Tabla 17. Conductividad hidráulica en caolín puro suelo seco.

(%) Diatomea	Succión (cm)	Tiempo (s)	Tiempo (min)	K (cm/s)
0	0,5	1200	20	0,000262
	1	810	13,5	0,000202
	2	6030	100,5	2,99E-05

Fuente: Autor.

Figura 31. Permeabilidad en caolín con 0% de diatomea en suelo seco



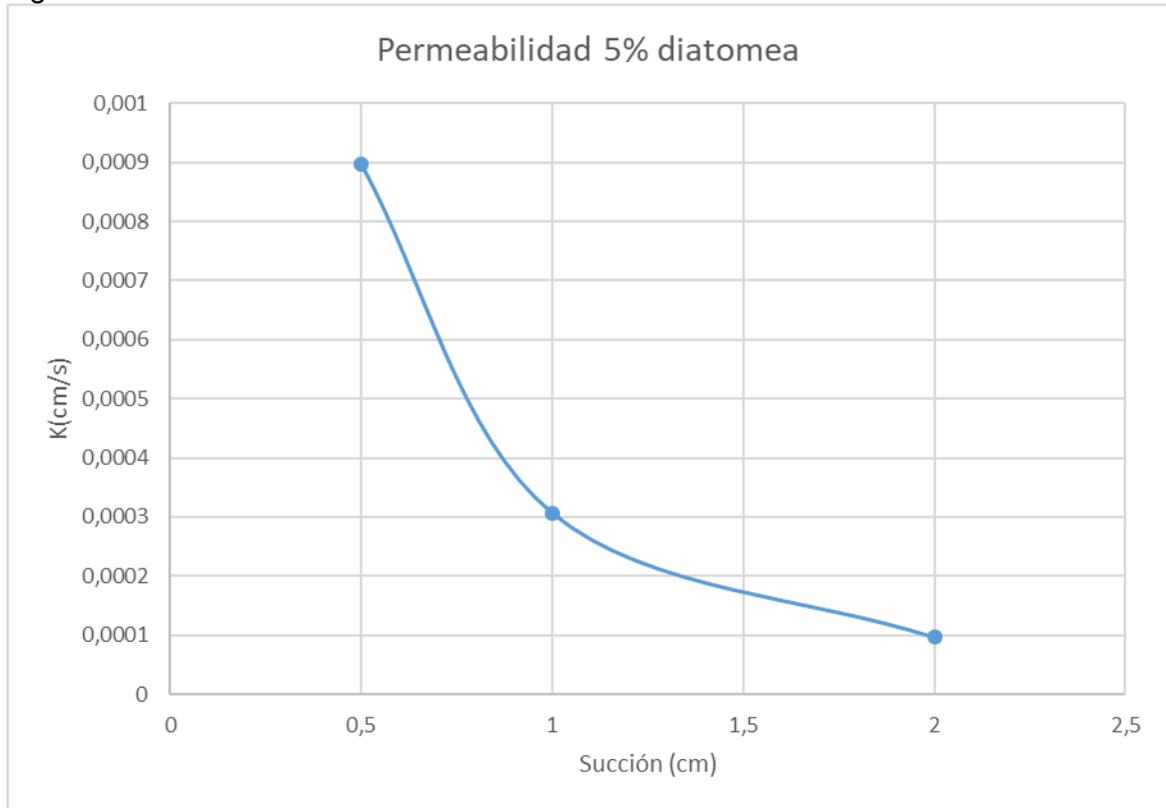
Fuente: Autor.

Tabla 18. Conductividad hidráulica en caolín con 5% de diatomea suelo seco.

(%) Diatomea	Succión (cm)	Tiempo (s)	Tiempo (min)	K (cm/s)
5	0,5	510	8,5	0,000896357
	1	450	7,5	0,000306847
	2	2760	46	9,67183E-05

Fuente: Autor.

Figura 32. Permeabilidad en caolín con 5% de diatomea en suelo seco



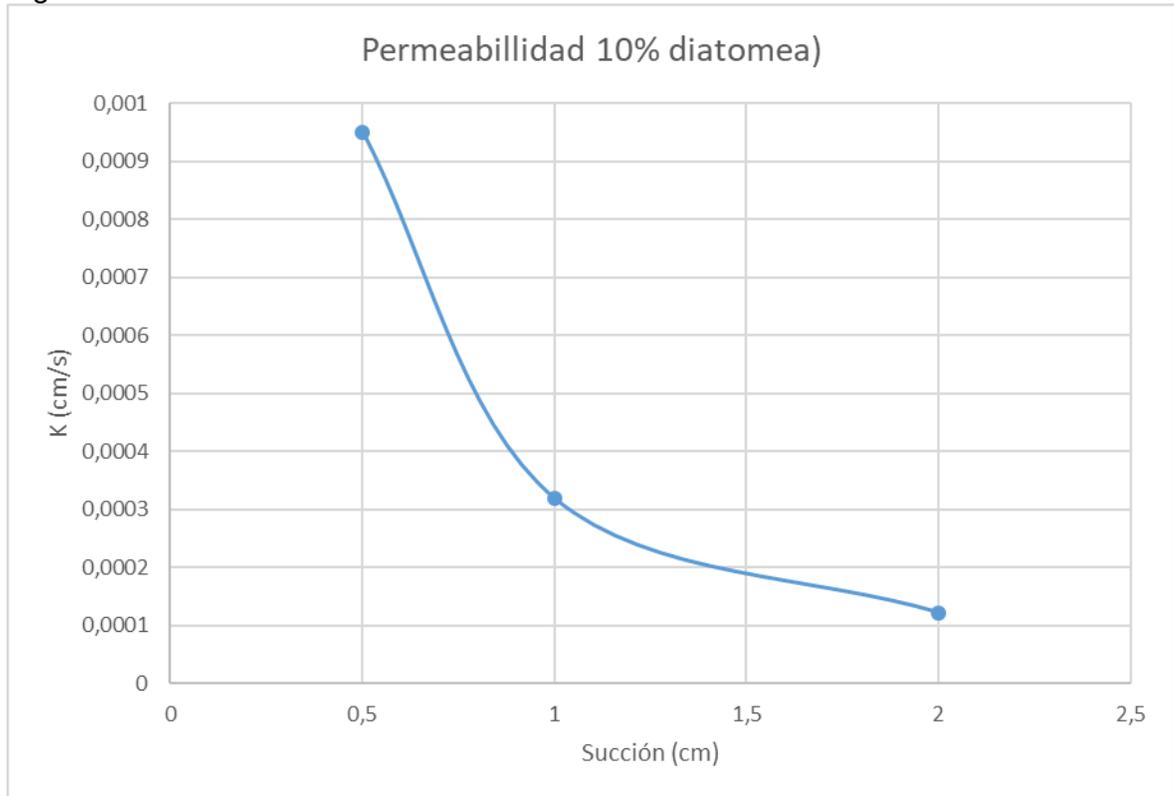
Fuente: Autor.

Tabla 19. Conductividad hidráulica en caolín con 10% de diatomea suelo seco.

(%) Diatomea	Succión (cm)	Tiempo (s)	Tiempo (min)	K (cm/s)
10	0,5	345	5,75	0,00095013
	1	405	6,75	0,00031806
	2	960	16	0,00012157

Fuente: Autor.

Figura 33. Permeabilidad en caolín con 10% de diatomea en suelo seco



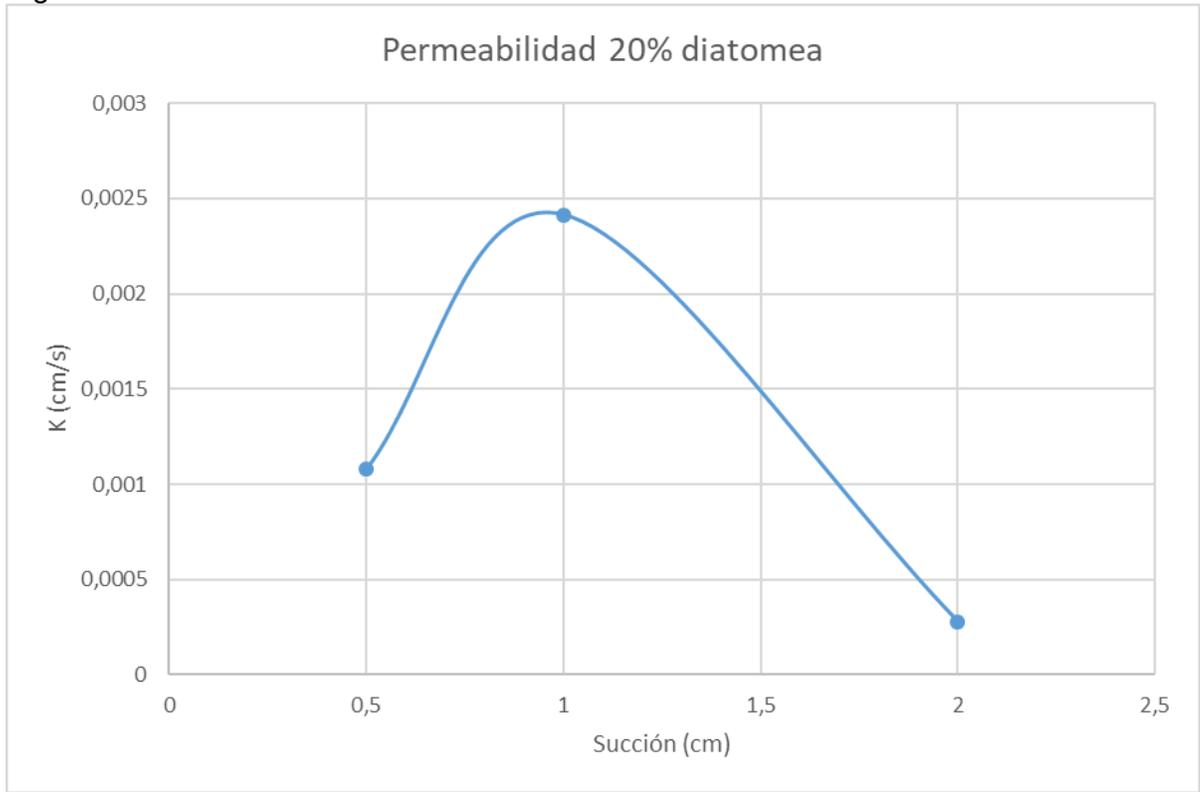
Fuente: Autor.

Tabla 20. Conductividad hidráulica en caolín con 20% de diatomea suelo seco.

(%) Diatomea	Succión (cm)	Tiempo (s)	Tiempo (min)	K (cm/s)
20	0,5	255	4,25	0,0011
	1	150	2,5	0,0024
	2	511	8,52	0,0003

Fuente: Autor.

Figura 34. Permeabilidad en caolín con 20% de diatomea en suelo seco



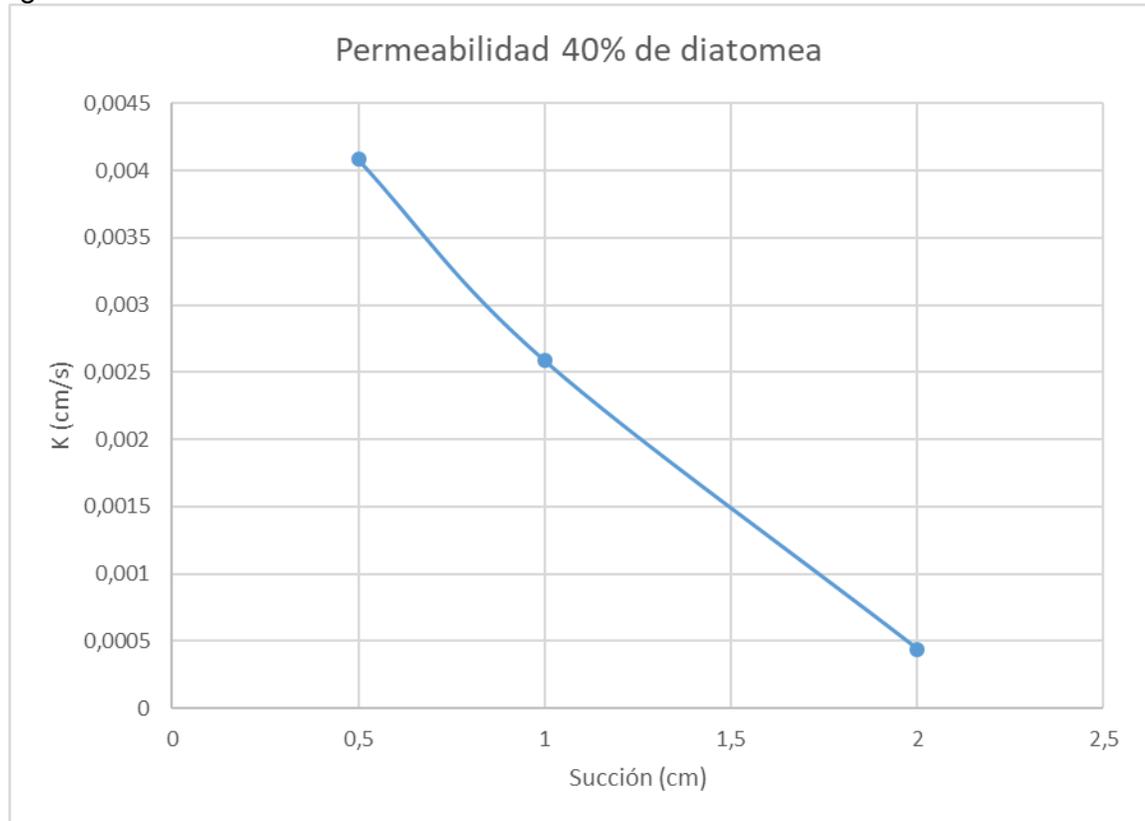
Fuente: Autor.

Tabla 21. Conductividad hidráulica en caolín con 40% de diatomea suelo seco.

(%) Diatomea	Succión (cm)	Tiempo (s)	Tiempo (min)	K (cm/s)
40	0,5	285	4,75	0,00408
	1	120	2	0,00259
	2	375	6,25	0,00044

Fuente: Autor.

Figura 35. Permeabilidad en caolín con 40% de diatomea en suelo seco



Fuente: Autor.

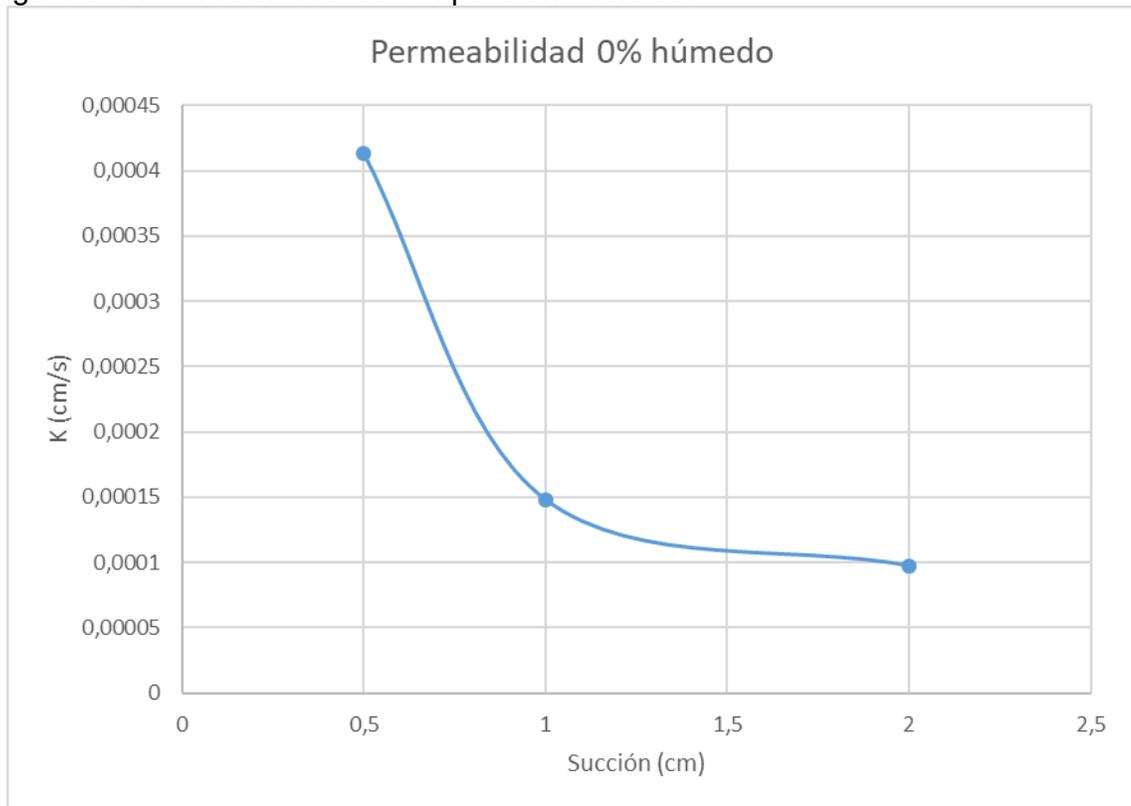
5.3.2 Muestra de Caolín con 0, 5, 20 y 40% de diatomea en suelo húmedo.

Tabla 22. Conductividad hidráulica en caolín puro suelo húmedo

(%) Diatomea	Succión (cm)	Tiempo (s)	Tiempo (min)	K (cm/s)
0	0,5	720	12	0,00041
	1	810	13,5	0,00015
	2	2520	42	0,00010

Fuente: Autor.

Figura 36. Permeabilidad Caolín puro en suelo seco



Fuente: Autor.

Tabla 23. Conductividad hidráulica en caolín con 5% de diatomea suelo húmedo

(%) Diatomea	Succión (cm)	Tiempo (s)	Tiempo (min)	K (cm/s)
	0,5	375	6,25	0,0010
5	1	510	8,5	0,00073
	2	3720	62	8,42001E-05

Fuente: Autor.

Figura 37. Permeabilidad en caolín con 5% de diatomea en suelo húmedo



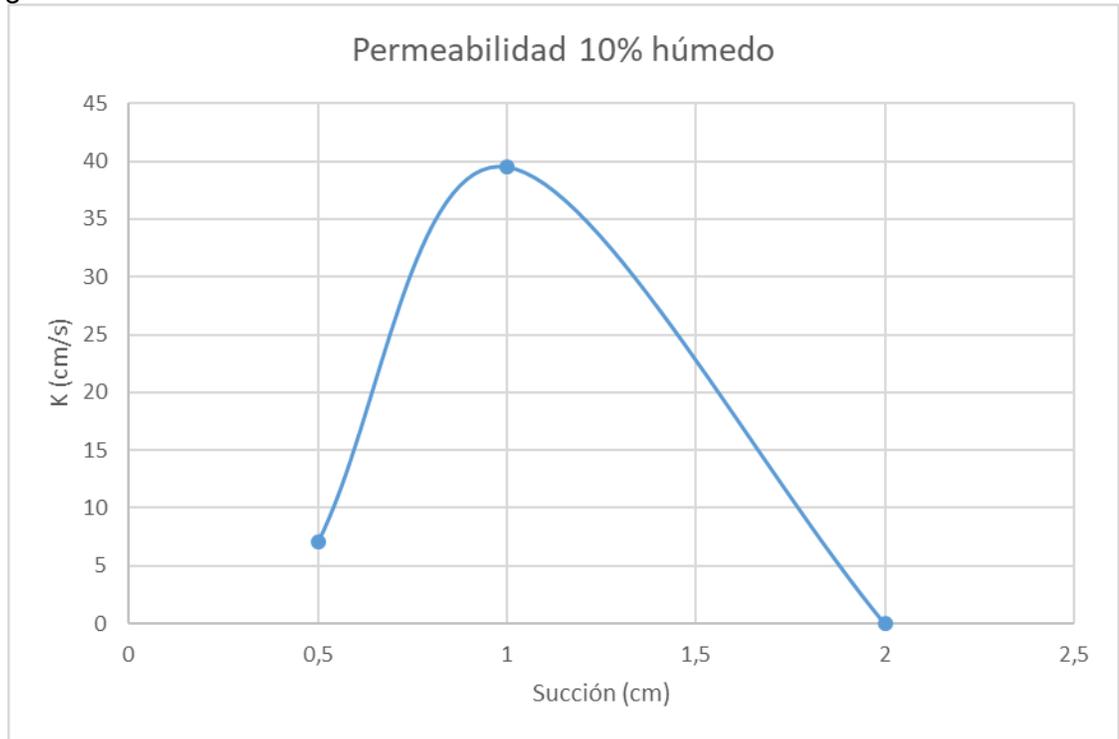
Fuente: Autor.

Tabla 24. Conductividad hidráulica en caolín con 10% de diatomea suelo húmedo

(%) Diatomea	Succión (cm)	Tiempo (s)	Tiempo (min)	K (cm/s)
	0,5	1110	18,5	0,00042
10	1	421,6583312	7,027638854	0,00048
	2	2370	39,5	8,24823E-05

Fuente: Autor.

Figura 38. Permeabilidad en caolín con 10% de diatomea en suelo húmedo



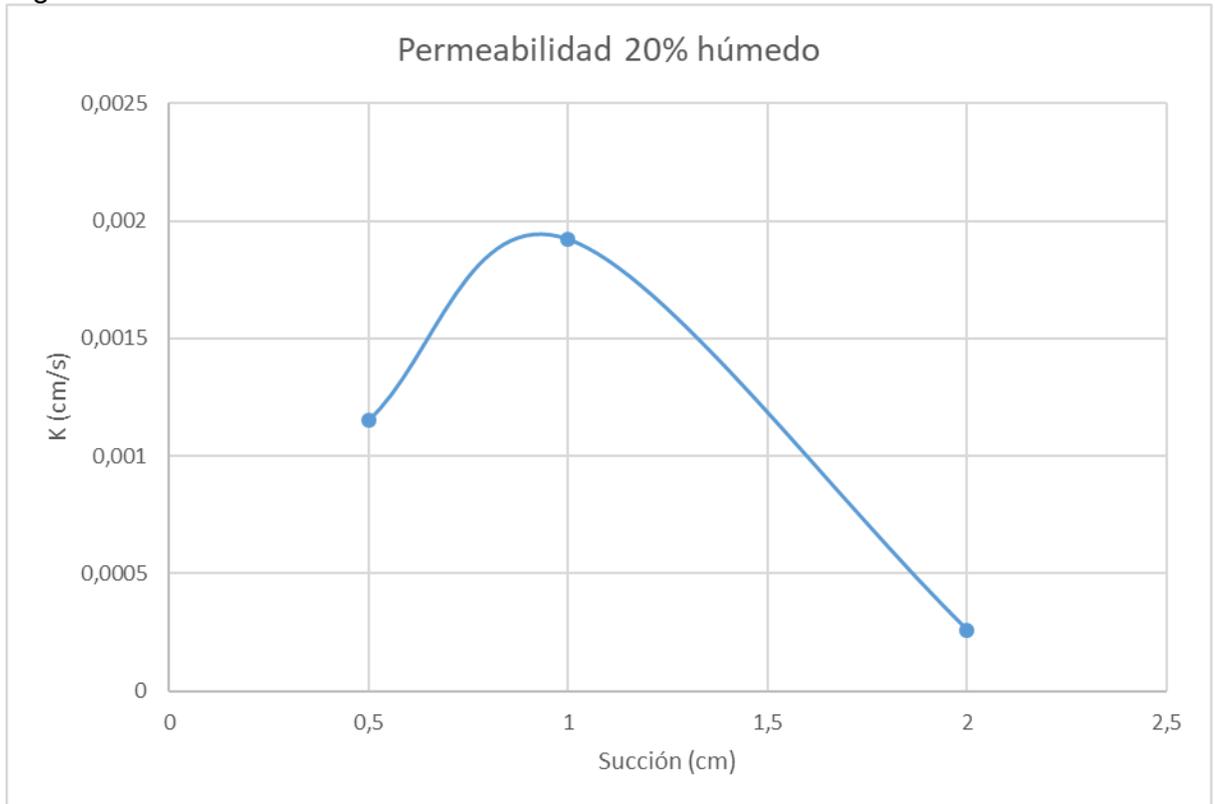
Fuente: Autor.

Tabla 25. Conductividad hidráulica en caolín con 20% de diatomea suelo húmedo

(%) Diatomea	Succión (cm)	Tiempo (s)	Tiempo (min)	K (cm/s)
20	0,5	255	4,25	0,0012
	1	150	2,5	0,0019
	2	1080	18	0,0003

Fuente: Autor.

Figura 39. Permeabilidad en caolín con 20% de diatomea en suelo húmedo



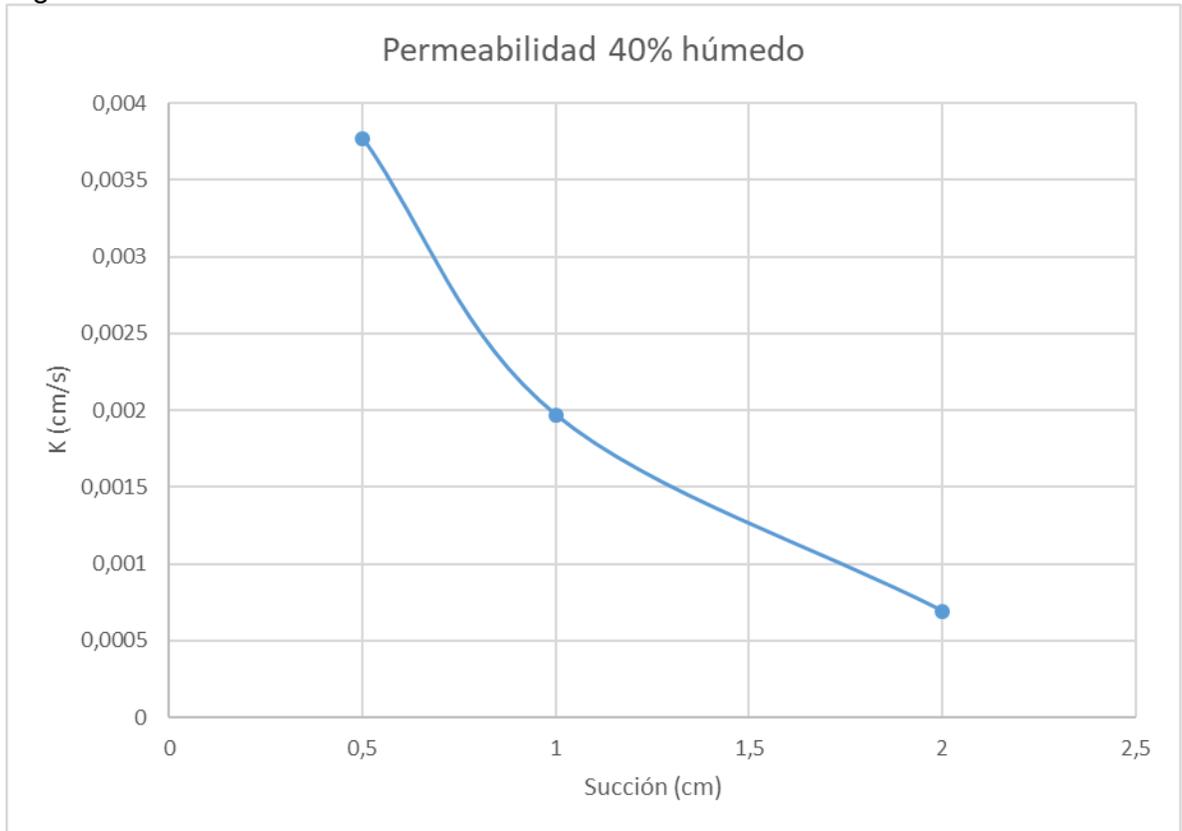
Fuente: Autor.

Tabla 26. Conductividad hidráulica en caolín con 40% de diatomea suelo húmedo

(%) Diatomea	Succión (cm)	Tiempo (s)	Tiempo (min)	K (cm/s)
40	0,5	150	2,5	0,0038
	1	165	2,75	0,0020
	2	495	8,25	0,0010

Fuente: Autor.

Figura 40. Permeabilidad en caolín con 40% de diatomea en suelo húmedo



Fuente: Autor.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 ANÁLISIS PARA RESULTADOS GLOBALES EN SUELO SECO

6.1.1 Succión de 0,5cm. Para las muestras de caolín sometidas a un estado seco, con cantidad de diatomea de 0, 5, 10, 20 y 40%, se obtuvo una conductividad hidráulica ascendente (parámetro k), es decir, iniciando por el grupo de muestras de caolín puro el cual arrojó una permeabilidad aproximada 0,0003 cm/s y finalizando con el grupo de muestras de 40% de diatomea que presentó una permeabilidad de 0,0041cm/s. Se nota un incremento considerable en este parámetro del suelo.

Esto quiere decir que se obtuvo un resultado esperado para este conjunto de muestras, al lograr aumentar la conductividad hidráulica de esta arcilla con ayuda de las partículas diatomáceas.

A su vez y analizando la gráfica realizada de porcentaje de diatomea versus conductividad hidráulica, se puede observar el incremento considerable de la conductividad hidráulica, en especial para el caso del caolín+40% de diatomea, cuyo valor es mucho mayor que los demás.

6.1.2 Succión de 1cm. Para las muestras de caolín sometidas a un estado seco, con cantidad de diatomea de 0, 5, 10, 20 y 40%, se obtuvo una conductividad hidráulica ascendente (parámetro k), es decir, iniciando por el grupo de muestras de caolín puro el cual arrojó una permeabilidad aproximada 0,0002 cm/s y finalizando con el grupo de muestras de 40% de diatomea que presentó una permeabilidad de 0,0026cm/s. Se nota un incremento considerable en este parámetro del suelo.

Esto quiere decir que se obtuvo un resultado esperado para este conjunto de muestras, al lograr aumentar la conductividad hidráulica de esta arcilla con ayuda de las partículas diatomáceas.

A su vez y analizando la gráfica realizada de porcentaje de diatomea versus conductividad hidráulica, se puede observar el incremento considerable de la conductividad hidráulica, en especial para el caso del caolín+40% y caolín+20% de diatomea, cuyo valor es mucho mayor que los demás.

También se observa que los valores de permeabilidad para 5% y 10% de cantidad de diatomea en la muestra son aproximados, casi iguales, en la tabla se encuentran aproximados (revisar Anexo A Tabla Muestra ensayo succión 1cm y 10% diatomea en seco)

En este grupo de muestras el valor de la conductividad hidráulica es menor para la mayoría de resultados, exceptuando el segundo que corresponde a caolín con 5%

de diatomea, la comparación con el valor de permeabilidad para una cantidad del 5% en el primer grupo de datos (0,0009cm/s) es mayor a este valor (0,0003cm/s). Esto se traduce en que, el valor de la conductividad hidráulica disminuye al aumentar la succión en la muestra, para este caso.

6.1.3 Succión 2cm. Para las muestras de caolín sometidas a un estado seco, con cantidad de diatomea de 0, 5, 10, 20 y 40%, se obtuvo una conductividad hidráulica ascendente (parámetro k), es decir, iniciando por el grupo de muestras de caolín puro el cual arrojó una permeabilidad aproximada 0,00003 cm/s y finalizando con el grupo de muestras de 40% de diatomea que presentó una permeabilidad de 0,00044cm/s. Se nota un incremento considerable en este parámetro del suelo.

Esto quiere decir que se obtuvo un resultado esperado para este conjunto de muestras, al lograr aumentar la conductividad hidráulica de esta arcilla con ayuda de las partículas diatomáceas. Adicionalmente este incremento es progresivo, no sólo aumenta este parámetro en el primer y último grupo de ensayos, sino que, este fenómeno sucede en forma ordenada y progresiva.

A su vez y analizando la gráfica realizada de porcentaje de diatomea versus conductividad hidráulica, se puede observar el incremento considerable de la conductividad hidráulica, en especial para el caso del caolín+40% y caolín+20% de diatomea, cuyos valores son mucho mayores que los demás. (revisar Anexo A Tablas Muestra ensayo succión 1cm y 0%, 5%,10%, 20% y 40% de diatomea en seco).

En este grupo de muestras el valor de la conductividad hidráulica es bastante menor en comparación con los dos conjuntos de datos de ensayo anteriores, siendo el valor de permeabilidad de 40% de diatomea 0,00044cm/s el valor más alto del conjunto de datos de ensayos, en comparación con los resultados para esta misma cantidad de diatomea con succiones de 1cm y 0,5cm, de 0,0041cm/s y 0,0026cm/s respectivamente.

Lo que indica que, en este caso el valor de la conductividad hidráulica disminuye al aumentar la succión en la muestra.

6.2 ANÁLISIS PARA RESULTADOS GLOBALES EN SUELO HÚMEDO

6.2.1 Succión de 0,5cm con humedad. Para las muestras de caolín sometidas a un estado húmedo, con cantidad de diatomea de 0, 5, 10, 20 y 40%, se obtuvo una conductividad hidráulica no ordenada ascendente (parámetro k), es decir, iniciando por el grupo de muestras de caolín puro el cual arrojó una permeabilidad aproximada 0,00041 cm/s, un segundo valor para 5% de diatomea de 0,00101cm/s pero un valor intermedio de 0,00042cm/s para el caso de 10%, un valor siguiente que incrementa con relación a los tres anteriores de 0,00115 para 20% y finalizando con el grupo de muestras de 40% de diatomea que presentó

una permeabilidad de 0,0038cm/s. Se nota un incremento considerable en este parámetro del suelo.

Esto quiere decir que se obtuvo un resultado esperado para este conjunto de muestras, al lograr aumentar la conductividad hidráulica de esta arcilla con ayuda de las partículas diatomáceas. Sin embargo, no se logró hacer en forma ordenada como en el caso de suelo seco.

A su vez y analizando la gráfica realizada de porcentaje de diatomea versus conductividad hidráulica, se puede observar el incremento considerable de la conductividad hidráulica, en especial para el caso del caolín+40% de diatomea, cuyo valor es mucho mayor que los demás, seguido del valor de caolín+20% de diatomea y el valor de caolín+5% de diatomea.

6.2.2 Succión de 1cm con humedad. Para las muestras de caolín sometidas a un estado húmedo, con cantidad de diatomea de 0, 5, 10, 20 y 40%, se obtuvo una conductividad hidráulica no ordenada ascendente (parámetro k), es decir, iniciando por el grupo de muestras de caolín puro el cual arrojó una permeabilidad aproximada 0,00015 cm/s, un segundo valor para 5% de diatomea de 0,00073cm/s pero un valor intermedio de 0,00048cm/s para el caso de 10%, un valor siguiente que incrementa con relación a los tres anteriores de 0,00192 para 20% y finalizando con el grupo de muestras de 40% de diatomea que presentó una permeabilidad de 0,00197cm/s. Se nota un incremento considerable en este parámetro del suelo sólo para el conjunto de datos de 1cm de succión, ya que al comparar los resultados con los de 0,5cm de succión, se encontró que, los resultados para 0%, 5% y 40% de conductividad hidráulica son menores en el caso en el que la succión aumenta comparados con el ensayo de succión menor.

Esto quiere decir que se obtuvo un resultado esperado para este conjunto de muestras, al lograr aumentar la conductividad hidráulica de esta arcilla con ayuda de las partículas diatomáceas. Sin embargo, y al igual que en el ensayo de 0,5cm de succión en suelo húmedo, no se logró hacer en forma ordenada como en el caso de suelo seco.

A su vez y analizando la gráfica realizada de porcentaje de diatomea versus conductividad hidráulica, se puede observar el incremento considerable de la conductividad hidráulica, en especial para el caso del caolín+40% de diatomea, cuyo valor es mucho mayor que los demás, seguido del valor de caolín+20% de diatomea y el valor de caolín+5% de diatomea.

6.2.3 Succión de 2cm con humedad. Para las muestras de caolín sometidas a un estado húmedo, con cantidad de diatomea de 0, 5, 10, 20 y 40%, se obtuvo una conductividad hidráulica no ordenada ascendente (parámetro k), es decir, iniciando por el grupo de muestras de caolín puro el cual arrojó una permeabilidad aproximada 0,000097 cm/s, un segundo valor para 5% de diatomea de

0,000084cm/s pero un valor intermedio de 0,000082cm/s para el caso de 10%, un valor siguiente que incrementa con relación a los tres anteriores de 0,000261 para 20% y finalizando con el grupo de muestras de 40% de diatomea que presentó una permeabilidad de 0,000690cm/s.

Se nota un incremento considerable pero no ordenado en este parámetro del suelo sólo para el conjunto de datos de 2cm de succión, ya que al comparar los resultados con los de 1cm y 0,5cm de succión, se encontró que, los resultados para todos los casos de la conductividad hidráulica en el suelo son menores en el caso en el que la succión aumenta comparados con los ensayos de succión menor.

Esto quiere decir que se obtuvo un resultado esperado para este conjunto de muestras, al lograr aumentar la conductividad hidráulica de esta arcilla con ayuda de las partículas diatomáceas. Sin embargo, y al igual que los ensayos de 0,5cm y 1cm de succión en suelo húmedo, no se logró hacer en forma ordenada como en el caso de suelo seco, ya que el caolín puro arroja un resultado mayor que el caolín+5% y caolín+10% de diatomea. Lo que quiere decir que, para este tipo de suelos y ensayos, es necesario agregar más de un diez por ciento de diatomeas para lograr aumentar la conductividad hidráulica en la muestra del suelo arcilloso.

A su vez y analizando la gráfica realizada de porcentaje de diatomea versus conductividad hidráulica, se puede observar el incremento considerable de la conductividad hidráulica, en especial para el caso del caolín+40% de diatomea, cuyo valor es mucho mayor que los demás, seguido del valor de caolín+20% de diatomea y el valor de caolín+0% de diatomea.

Los porcentajes de 5 y 10, no arrojaron el resultado esperado en el ensayo, al contrario, generaron un efecto opuesto al esperado.

6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS POR GRUPOS DE MUESTRAS

6.3.1 Grupo de muestra de caolín puro con succiones de 0.5cm, 1cm y 2 cm. Suelo seco. Para las muestras de caolín con una cantidad de diatomea equivalente al 0% se observó que la conductividad hidráulica para este conjunto de datos agrupados disminuyó a medida que la succión y el tiempo aumentaron. Se observa una diferencia considerable entre los dos primeros valores de conductividad 0,000262cm/s y 0,000202, con relación al último de 0,00003cm/s aproximadamente.

Se observa un tiempo máximo de 6030 segundos, equivalentes a una hora y treinta y cinco minutos aproximadamente (1,675h).

La gráfica muestra este fenómeno de disminución de permeabilidad a medida que la succión aumenta graduando el infiltrómetro según el ensayo.

6.3.2 Grupo de muestra de caolín+5% de diatomea con succiones de 0.5cm, 1cm y 2 cm. Suelo seco. Para las muestras de caolín con una cantidad de diatomea equivalente al 5% se observó que la conductividad hidráulica para este conjunto de datos agrupados disminuyó a medida que la succión y el tiempo aumentaron. Se observa una diferencia considerable entre los dos primeros valores de conductividad 0,00089cm/s y 0,00031, con relación al último de 0,0001cm/s aproximadamente.

Se observa un tiempo máximo de 2760 segundos, equivalentes a cuarenta y seis minutos aproximadamente (0,75h).

La gráfica muestra este fenómeno de disminución de permeabilidad a medida que la succión aumenta graduando el infiltrómetro según el ensayo, la cual muestra el punto máximo en 0,5cm de succión y el mínimo en 2cm, con una diferencia aproximada de 0,0008cm/s.

6.3.3 Grupo de muestra de caolín+10% de diatomea con succiones de 0.5cm, 1cm y 2 cm. Suelo seco. Para las muestras de caolín con una cantidad de diatomea equivalente al 10% se observó que la conductividad hidráulica para este conjunto de datos agrupados disminuyó a medida que la succión y el tiempo aumentaron. Se observa una diferencia considerable entre los dos primeros valores de conductividad 0,0095cm/s y 0,00032cm/s, con relación al último de 0,0001cm/s aproximadamente.

Se observa un tiempo máximo de 960 segundos, equivalentes a dieciséis minutos aproximadamente (0,27h).

La gráfica muestra este fenómeno de disminución de permeabilidad a medida que la succión aumenta graduando el infiltrómetro según el ensayo, la cual muestra el punto máximo en 0,5cm de succión y el mínimo en 2cm, con una diferencia aproximada de 0,0008cm/s.

6.3.4 Grupo de muestra de caolín+20% de diatomea con succiones de 0.5cm, 1cm y 2 cm. Suelo seco. Para las muestras de caolín con una cantidad de diatomea equivalente al 20% se observó que la conductividad hidráulica para este conjunto de datos agrupados disminuyó en el primer ajuste de succión y disminuyó en el segundo ajuste. Se observa una diferencia considerable entre el primer y el último valor de conductividad 0,0011cm/s y 0,0003cm/s, con relación al valor intermedio de 0,0024cm/s aproximadamente.

Se observa un tiempo máximo de 511 segundos, equivalentes a ocho minutos y medio aproximadamente (0,14h).

La gráfica muestra este fenómeno de disminución de permeabilidad a medida que la succión aumenta graduando el infiltrómetro según el ensayo, la cual muestra el

punto máximo en 0,5cm de succión y el mínimo en 2cm, con una diferencia aproximada de 0,0008cm/s.

6.3.5 Grupo de muestra de caolín+40% de diatomea con succiones de 0.5cm, 1cm y 2 cm. Suelo seco. Para las muestras de caolín con una cantidad de diatomea equivalente al 40% se observó que la conductividad hidráulica para este conjunto de datos agrupados disminuyó en el primer ajuste de succión y disminuyó en el segundo ajuste. Se observa una diferencia considerable entre el primer y el último valor de conductividad 0,0041cm/s y 0,0026cm/s, y también con relación al valor intermedio de 0,00044cm/s aproximadamente.

Se observa un tiempo máximo de 375 segundos, equivalentes a 6 minutos aproximadamente (0,10h).

La gráfica muestra este fenómeno de disminución de permeabilidad a medida que la succión aumenta graduando el infiltrómetro según el ensayo, la cual muestra el punto máximo en 0,5cm de succión y el mínimo en 2cm, con una diferencia aproximada de 0,0037cm/s.

6.3.6 Grupo de muestra de caolín puro con succiones de 0.5cm, 1cm y 2 cm. Suelo húmedo. Para las muestras de caolín con una cantidad de diatomea equivalente al 0% se observó que la conductividad hidráulica para este conjunto de datos agrupados disminuyó a medida que la succión y el tiempo aumentaron. Se observa una diferencia considerable entre los dos primeros valores de conductividad 0,00041cm/s y 0,00015, con relación al último de 0,0001cm/s aproximadamente.

Se observa un tiempo máximo de 6030 segundos, equivalentes a cuarenta y dos minutos aproximadamente (0,70h).

La gráfica muestra este fenómeno de disminución de permeabilidad a medida que la succión aumenta graduando el infiltrómetro según el ensayo. Con una diferencia de 0,00031cm/s aproximadamente entre el punto más alto de la gráfica y el punto más bajo que representan la permeabilidad de la muestra.

6.3.7 Grupo de muestra de caolín+5% de diatomea con succiones de 0.5cm, 1cm y 2 cm. Suelo húmedo. Para las muestras de caolín con una cantidad de diatomea equivalente al 5% se observó que la conductividad hidráulica para este conjunto de datos agrupados disminuyó a medida que la succión y el tiempo aumentaron. Se observa una diferencia considerable entre los dos primeros valores de conductividad 0,0001cm/s y 0,00073, con relación al último de 0,0001cm/s aproximadamente.

Se observa un tiempo máximo de 3720 segundos, equivalentes a una hora y dos minutos aproximadamente (1,03h).

La gráfica muestra este fenómeno de disminución de permeabilidad a medida que la succión aumenta graduando el infiltrómetro según el ensayo, la cual muestra el punto máximo en 0,5cm de succión y el mínimo en 2cm, con una diferencia aproximada de 0,0001cm/s.

Los valores de conductividad hidráulica en este conjunto de muestras con 5% de diatomeas, es mayor que el resultado para el conjunto de muestras anteriores, quiere decir que, al aumentar la cantidad de diatomea en el suelo húmedo, aumenta su conductividad hidráulica.

6.3.8 Grupo de muestra de caolín+10% de diatomea con succiones de 0.5cm, 1cm y 2 cm. Suelo húmedo. Para las muestras de caolín con una cantidad de diatomea equivalente al 10% se observó que la conductividad hidráulica para este conjunto de datos agrupados disminuyó a medida que la succión y el tiempo aumentaron. Se observa una diferencia considerable entre los dos primeros valores de conductividad 0,00042cm/s y 0,00048cm/s, con relación al último de 0,0001cm/s aproximadamente. También se puede apreciar que el segundo valor del parámetro k fue el mayor para el conjunto de datos, es decir, que la conductividad más alta fue la de succión de 1cm.

Se observa un tiempo máximo de 2370 segundos, equivalentes a treinta y nueve minutos y medio aproximadamente (0,66h).

La gráfica muestra este fenómeno de disminución de permeabilidad, sin embargo, no se visualiza como las demás gráficas que disminuyen en forma ordenada, sino que, tiene una forma de parábola invertida, ya que el mayor valor de conductividad hidráulica en las muestras fue la segunda para este conjunto de datos. La imagen muestra el punto máximo en 1cm de succión.

Los valores de conductividad hidráulica en este conjunto de muestras con 10% de diatomeas, es mayor que el resultado para los conjuntos de muestras anteriores, quiere decir que, al aumentar la cantidad de diatomea en el suelo húmedo, aumenta su conductividad hidráulica.

6.3.9 Grupo de muestra de caolín+20% de diatomea con succiones de 0.5cm, 1cm y 2 cm. Suelo húmedo. Para las muestras de caolín con una cantidad de diatomea equivalente al 20% se observó que la conductividad hidráulica para este conjunto de datos agrupados disminuyó a medida que la succión y el tiempo aumentaron. Se observa una diferencia considerable entre los dos primeros valores de conductividad 0,0012cm/s y 0,0019cm/s, con relación al último de 0,0003cm/s aproximadamente. También se puede apreciar que el segundo valor del parámetro k fue el mayor para el conjunto de datos, es decir, que la conductividad más alta fue la de succión de 1cm.

Se observa un tiempo máximo de 1080 segundos, equivalentes a dieciséis minutos aproximadamente (0,30h).

La gráfica muestra este fenómeno de disminución de permeabilidad, sin embargo, no se visualiza como las demás gráficas que disminuyen en forma ordenada, sino que, tiene una forma de parábola invertida, ya que el mayor valor de conductividad hidráulica en las muestras fue la segunda para este conjunto de datos. La imagen muestra el punto máximo en 1cm de succión.

Los valores de conductividad hidráulica en este conjunto de muestras con 20% de diatomeas, es mayor que el resultado para los conjuntos de muestras anteriores, quiere decir que, al aumentar la cantidad de diatomea en el suelo húmedo, aumenta su conductividad hidráulica.

6.3.10 Grupo de muestra de caolín+40% de diatomea con succiones de 0.5cm, 1cm y 2 cm. Suelo húmedo. Para las muestras de caolín con una cantidad de diatomea equivalente al 5% se observó que la conductividad hidráulica para este conjunto de datos agrupados disminuyó a medida que la succión y el tiempo aumentaron. Se observa una diferencia considerable entre los dos primeros valores de conductividad 0,0038cm/s y 0,0020, con relación al último de 0,001cm/s aproximadamente.

Se observa un tiempo máximo de 495 segundos, equivalentes a ocho minutos aproximadamente (0,14h).

La gráfica muestra este fenómeno de disminución de permeabilidad a medida que la succión aumenta graduando el infiltrómetro según el ensayo, la cual muestra el punto máximo en 0,5cm de succión y el mínimo en 2cm, con una diferencia aproximada de 0,0028cm/s.

Los valores de conductividad hidráulica en este conjunto de muestras con 40% de diatomeas, es mayor que el resultado para los conjuntos de muestras anteriores, quiere decir que, al aumentar la cantidad de diatomea en el suelo húmedo, aumenta su conductividad hidráulica.

7. CONCLUSIONES

- ✚ Se logró determinar la conductividad hidráulica en cincuenta y un muestras de suelo caolinítico en condición no saturada, realizando dos grandes grupos de ensayos, uno para suelo completamente seco y otro para suelo con un porcentaje de humedad mínimo.
- ✚ Se adicionaron diferentes cantidades de diatomeas en porcentaje sobre el total de cada una de las muestras, realizando en la mayoría de los seis ensayos por cada muestra y encontrando que, en la mayor parte de los casos al aumentar en grandes cantidades el contenido de partículas diatomáceas en las muestras aumentó la conductividad hidráulica.
- ✚ Se analizaron veintiséis muestras de caolín con diversas cantidades de diatomeas en diferentes tasas de succión, para un estado de suelo seco, lo cual arrojó un resultado positivo en la adición de este material sobre las muestras.
- ✚ Se observó un comportamiento ascendente y ordenado en relación al aumento de porcentaje de diatomeas, en la conductividad hidráulica para el caso de los ensayos realizados a muestras en seco.
- ✚ Se observó un comportamiento ascendente y desordenado en relación al aumento de porcentaje de diatomeas, en la conductividad hidráulica para el caso de los ensayos realizados a muestras con humedad.
- ✚ Se presentó una disminución ordenada de permeabilidad a medida que la succión aumentó, para el conjunto de datos de diatomea con mismo porcentaje en estado seco, excepto para el ensayo con veinte por ciento de diatomea.
- ✚ Se presentó una disminución desordenada de permeabilidad a medida que la succión aumentó, para el conjunto de datos con diez y cuarenta por ciento de diatomea en suelo húmedo y una disminución ordenada para los restantes.
- ✚ Se pudo observar que en la mayoría de los casos la adición de diatomea contribuyó a un aumento de conductividad hidráulica en el suelo tal como se esperaba.

8. RECOMENDACIONES

Continuar con la investigación del efecto de las diatomeas en los suelos arcillosos, para lograr ver si es posible mejorar otros parámetros del geomaterial, así como se logró en principio con la conductividad hidráulica, utilizando grandes porcentajes de diatomea.

Revisar los ensayos menos favorables y verificarlos, de tal manera que se logre comprobar si efectivamente se trata de un resultado inamovible o se habría presentado un posible error humano.

Por último, repetir grupos de ensayos usando un caolín completamente puro, blanco, para comparar los posibles resultados en caso de que cambien considerablemente al tratarse de un material mucho más natural.

BIBLIOGRAFÍA

AGRONOMASTER. 5 Diferentes tipos de suelo que debes conocer para sembrar. [En línea]. Agronomaster. [Citado el 06 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://agronomaster.com/tipos-de-suelo/>

AITCHISON, G. D. y WOODBURN, J. A. Soil suction in foundation design. [En línea]. Australia: SCIRO. [Citado el 02 de septiembre de 2018]. Disponible en: https://www.issmge.org/uploads/publications/1/38/1969_02_0001.pdf

AITCHISON, G.D., RUSSAM, K. y RICHARDS, B.G. Engineering concepts of equilibria and moisture in soils. [En línea]. Reino Unido: Road Research Laboratory. [Citado el 26 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://trl.co.uk/sites/default/files/LR038%281%29.pdf>

ANDRADE PACHECO, Martín. Resistencia al esfuerzo cortante de los suelos. [En línea]. Slideshare. [Citado el 26 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/martinandradepacheco/cap-ii-resistencia-al-esfuerzo-cortante-de-los-suelos-7>

ANGULO-JARAMILLO, Rafael, GAUDET, J. P. y THONY, J. L. Measurement of hydraulic properties and mobile water content of field soil. En: Soil Science Society of America Journal, vol. 60, nro. 3, 1996. p. 710-715

BARBOZA NAVARRO, Alexis Jhosep. La Caolinita. [En línea]. Cajamarca: Universidad Privada del Norte. [Citado el 02 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/alexisjhosepbarbozanavarro/la-caolinita>

BISHOP, A. W. y BLIGHT, G. E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. En: Géotechnique, 13(3), 177-197. [En línea]. London: Science Direct. [Citado el 29 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674237015301666#bbib5>

BROOKS, R. H. y COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. [En línea]. Fort Collins: Colorado State University. [Citado el 01 de septiembre de 2018]. Disponible en: https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/61288/HydrologyPapers_n3.pdf?sequence

BURDINE, N.T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. [En línea]. Society of Petroleum Engineers [Citado el 31 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://www.onepetro.org/download/journal-paper/SPE-225-G?id=journal-paper%2FSPE-225-G>

CAMPBELL, Gaylon S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. En: Soil Science, nro. 117, 1974. p. 311-314. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-197406000-00001>

CHILDS, E. C. y COLLIS-GEORGE, N. The permeability of porous materials. London: The Royal Society of London, 1950. 395 p.

COLEMAN, David. Fundamentals of Soil Ecology. [En línea]. London: Academic Press. [Citado el 29 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://www.elsevier.com/books/fundamentals-of-soil-ecology/coleman/978-0-12-805251-8>

DARCY, Henry. Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau. Paris: Victor Dalmont, Éditeur, 1856. 308 p.

DAS, Braja M. Fundamentos de Ingeniería geotécnica. 4 ed. México: Cengage Learning, 2015. 636 p.

DE RIDDER, N.A. Drainage principles and applications. Wageningen: Groundwater investigations, 1994. 156 p.

DEPOSITPHOTOS. Diatomeas, algas unicelulares. [En línea]. Depositphotos. [Citado el 05 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://sp.depositphotos.com/124935052/stock-photo-diatoms-unicellular-algae.html>

DUQUE ESCOBAR, Darío. Manual de geología para ingenieros. [En línea]. Manizales: Universidad Nacional de Colombia. [Citado el 04 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/408/manualgeo.pdf>

EL MUNDO. Karl von Terzaghi: creador de la mecánica de suelos. [En línea]. El Mundo. [Citado el 29 de agosto de 2018]. Disponible en: https://www.elmundo.com/portal/opinion/editorial/karl_von_terzaghi_creador_de_la_mecanica_de_suelos.php#.XQo6YlwzblU

FERRARI, Bongona, MORENO, Rodrigo y LANGE, F. F. Comportamiento coloidal de un caolín deshidratado. Madrid: Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 2000. 260p.

FREDLUND, D. G. RAHARDJO, H. y FREDLUND, M. D. Unsaturated soils mechanics in engineering practice. [En línea]. London: John Wiley & Sons, Inc. [Citado el 30 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://geoerapg09.files.wordpress.com/2017/06/d-g-fredlund-h-rahardjo-m-d-fredlundauth-unsaturated-soil-mechanics-in-engineering-practice.pdf>

GABRIELS, Donald, LOBO L., Deyanira y PULIDO M., Mansonia. Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos. [En línea]. Slideshare. [Citado el 06 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/mobile/renanfernandezgalvez/980-18911sm>

GARDNER, R. A method for measuring the capillary tensin of soil moisture. En: Soil Science, nro. 43, 1937. p. 227-283.

HERNÁNDEZ, Francisco. Extracción y uso de la arcilla por alfareros tradicionales. En: Revista Herencia, vol. 28, nro. 1, 2015. p. 93-102

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Permeabilidad de suelos granulares (cabeza constante). Norma I.N.V. E – 130. [En línea]. Popayán: INVÍAS – 07. [Citado el 26 de agosto de 2018]. Disponible en: ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-130-07.pdf

JEJURKAR, Chandrakant L. y RAJURKAR, Milind P. An Investigational Approach for the Modelling of Infiltration Process in a Clay Soil. En: Maharashtra: Journal of Civil Engineering. 2015. p. 1916-1921.

LAMBE, T. William. Mecánica de suelos. México: Limusa-Wiley, 1991. 582 p.

LEONI, Augusto. Relaciones Volumétricas y Gravimétricas. La Plata: UNLP, 2010. 206 p.

METER Group Inc. Mini Disk Infiltrometer. [En línea]. Estados Unidos. [Citado el 29 de septiembre de 2018]. Disponible en: http://manuals.decagon.com/Manuals/10564_Mini%20Disk%20Infiltrometer_Web.pdf

MEZA OCHOA, Victoria Elena. Suelos parcialmente saturados: de la investigación a la cátedra universitaria. En: Boletín de Ciencias de la Tierra, nro. 31. 2012. p. 23-38. . [En línea]. Medellín. [Citado el 07 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/bcdt/n31/n31a02.pdf>

REN, X.W. y SANTAMARINA, J.C. The hydraulic conductivity of sediments: a pore size perspective. En: Engineering Geology, vol. 233, nro. 2018. 2017, p. 48-54.

ROMAÑA GARCÍA, Jhon Francisco. Los límites de la Ley de Darcy. Tesis de investigación. Magister en Ingeniería - Geotecnia. [En línea]. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Civil. [Citado el 29 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/45359/1/200722150.2014.pdf>

SÁNCHEZ CALLE, César Luciano. Caracterización geológica, propiedades físicas mecánicas, calcinación y filtración de las diatomitas del sector de Angostura, pueblo de Villingota (Santa Elena – Ecuador). Trabajo de grado. Ingeniero en Geología y Minas. [En línea]. Loja: Universidad Técnica Popular de Loja. [Citado el 14 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/17070/1/S%C3%A1nchez%20Calle%2c%20C%C3%A9sar%20Luciano%20vALIDO.pdf>

SÁNCHEZ CONTRERAS, Luisa Fernanda, BECERRA AYALA, Diego Andrés y ROJAS BOTELLO, Brayan Orlando. Brayan. Terzaghi y la mecánica de suelos. [En línea]. Scribd. [Citado el 02 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/411992547/Terzaghi-y-La-Mecanica-de-Suelos>

SUÁREZ, Jaime. Deslizamientos: análisis geotécnico. Bucaramanga: Editorial de la U., 2009. 308 p.

TAN, Jinqiang, SONG, Hongqing, ZHANG, Hailong, ZHU, Qinghui, XING, Yi y ZHANG, Jie. Numerical investigation on infiltration and runoff in unsaturated soils with unsteady rainfall intensity. En: Water, vol. 10, nro. 914, 2018. p. 1-18. [En línea]. MDPI. [Citado el 19 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/7/914/pdf-vor>

TELLO ROBLES, Víctor Leonardo. Caracterización de las diatomitas de la Formación San Cayetano (Loja - Ecuador). Trabajo de grado. Ingeniero en Geología y Minas. [En línea]. Loja: Universidad Técnica Popular de Loja. [Citado el 15 de septiembre de 2018]. Disponible en: http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/7726/3/UTPL_Tello_Robles_Victor_Leonardo_1132549.pdf

TORRES, Janneth, DE GUTIÉRREZ, Ruby M., CASTELLÓ, Ricardo y VIZCAYNO, Carmina. Análisis comparativo de caolines de diferentes fuentes para la producción de Metacaolín. [En línea]. Caracas. [Citado el 03 de septiembre de 2018]. Disponible en: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522011000100006

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA. Consejo, Superior. La investigación en la Universidad Católica de Colombia. [En línea]. Bogotá: Ucatólica. [Citado el 26 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://www.ucatolica.edu.co/portal/wp-content/uploads/adjuntos/acuerdos/consejo-superior-acuerdos-academicos-242-16.pdf>

ZHANG, Gui-rong, QUIAN, Ya-jun, WANG, Zhang-chung y ZHAO, Bo. Analysis of rainfall infiltration law in unsaturated soil slope. En: Scientific World Journal, nro. 25, 2014. p. 13-19.

Anexo A. Tablas de muestras de ensayo y permeabilidad

Muestra ensayo succión 0,5 cm con 0% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	80	0
60	7,745966692	79	0,062876027
120	10,95445115	78	0,125752054
180	13,41640786	77	0,188628081
240	15,49193338	76	0,251504108
300	17,32050808	75	0,314380135
360	18,97366596	74	0,377256161
420	20,49390153	73	0,440132188
480	21,9089023	72	0,503008215
540	23,23790008	71	0,565884242
600	24,49489743	70	0,628760269
660	25,69046516	69	0,691636296
720	26,83281573	68	0,754512323
780	27,92848009	67	0,81738835
840	28,98275349	66	0,880264377
900	30	65	0,943140404
960	30,98386677	64	1,00601643
1020	31,93743885	63	1,068892457
1080	32,86335345	62	1,131768484
1140	33,76388603	61	1,194644511
1200	34,64101615	60	1,257520538

Fuente: Autor.

Permeabilidad 0,5 cm con 0% de diatomea suelo seco

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-0,5
<hr/>	
A	3,998055794
C1	0,001047934
K	0,000262111

Fuente: Autor.

Muestra ensayo succión 1 cm con 0% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	80	0
60	7,745966692	78	0,125752054
90	9,486832981	77	0,188628081
120	10,95445115	76	0,251504108
150	12,24744871	75	0,314380135
180	13,41640786	74	0,377256161
210	14,49137675	73	0,440132188
240	15,49193338	71	0,565884242
270	16,43167673	70	0,628760269
300	17,32050808	69	0,691636296
330	18,16590212	68	0,754512323
360	18,97366596	68	0,754512323
390	19,74841766	67	0,81738835
420	20,49390153	67	0,81738835
450	21,21320344	66	0,880264377
480	21,9089023	66	0,880264377
510	22,58317958	65	0,943140404
540	23,23790008	65	0,943140404
570	23,87467277	64	1,00601643
600	24,49489743	64	1,00601643
630	25,0998008	63	1,068892457
660	25,69046516	63	1,068892457
690	26,26785107	62	1,131768484
720	26,83281573	62	1,131768484
750	27,38612788	61	1,194644511
780	27,92848009	61	1,194644511
810	28,46049894	60	1,257520538

Fuente: Autor.

Permeabilidad 1 cm con 0% de diatomea suelo seco

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-1
A	4,096398575
C1	0,000828346

K 0,000202213

Fuente: Autor.

Muestra ensayo succión 2 cm con 0% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	80	0
90	9,486832981	78	0,125752054
180	13,41640786	78	0,125752054
270	16,43167673	78	0,125752054
360	18,97366596	77	0,188628081
450	21,21320344	77	0,188628081
540	23,23790008	77	0,188628081
630	25,0998008	76	0,251504108
720	26,83281573	76	0,251504108
810	28,46049894	76	0,251504108
900	30	75	0,314380135
990	31,46426545	75	0,314380135
1080	32,86335345	75	0,314380135
1170	34,20526275	74	0,377256161
1260	35,4964787	74	0,377256161
1350	36,74234614	74	0,377256161
1440	37,94733192	74	0,377256161
1530	39,11521443	73	0,440132188
1620	40,24922359	73	0,440132188
1710	41,35214626	73	0,440132188
1800	42,42640687	73	0,440132188
1890	43,47413024	72	0,503008215
1980	44,49719092	72	0,503008215
2070	45,49725266	72	0,503008215
2160	46,47580015	71	0,565884242
2250	47,4341649	71	0,565884242
2340	48,37354649	71	0,565884242
2430	49,29503018	70	0,628760269
2520	50,19960159	70	0,628760269
2610	51,0881591	70	0,628760269
2700	51,96152423	70	0,628760269
2790	52,82045058	69	0,691636296
2880	53,66563146	69	0,691636296
2970	54,49770637	69	0,691636296

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
3060	55,31726674	69	0,691636296
3150	56,1248608	68	0,754512323
3240	56,92099788	68	0,754512323
3330	57,70615219	68	0,754512323
3420	58,48076607	68	0,754512323
3510	59,24525297	67	0,81738835
3600	60	67	0,81738835
3690	60,74537019	67	0,81738835
3780	61,4817046	67	0,81738835
3870	62,20932406	66	0,880264377
3960	62,92853089	66	0,880264377
4050	63,63961031	66	0,880264377
4140	64,34283177	66	0,880264377
4230	65,03845017	65	0,943140404
4320	65,7267069	65	0,943140404
4410	66,40783086	65	0,943140404
4500	67,08203932	65	0,943140404
4590	67,74953874	64	1,00601643
4680	68,41052551	64	1,00601643
4770	69,0651866	64	1,00601643
4860	69,71370023	64	1,00601643
4950	70,3562364	63	1,068892457
5040	70,9929574	63	1,068892457
5130	71,62401832	63	1,068892457
5220	72,24956747	63	1,068892457
5310	72,86974681	62	1,131768484
5400	73,48469228	62	1,131768484
5490	74,09453421	62	1,131768484
5580	74,69939759	62	1,131768484
5670	75,29940239	61	1,194644511
5760	75,89466384	61	1,194644511
5850	76,4852927	61	1,194644511
5940	77,07139547	61	1,194644511
6030	77,65307463	60	1,257520538

Fuente: Autor.

Permeabilidad 2 cm con 0% de diatomea suelo seco

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-2
<hr/>	
A	4,300400644
C1	0,000128416
K	2,98614E-05

Fuente: Autor.

Tabla 27. Muestra A ensayo succión 0,5 cm con 5% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0,00	75	0,00
30	5,48	74	0,06
60	7,75	73	0,13
90	9,49	71	0,25
120	10,95	69	0,38
150	12,25	66	0,57
180	13,42	64	0,69
210	14,49	62	0,82
240	15,49	60	0,94
270	16,43	58	1,07
300	17,32	56	1,19

Fuente: Autor.

Tabla 28 Muestra A permeabilidad 0,5 cm con 0% de diatomea suelo seco

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-0,5
<hr/>	
A	3,998056
C1	0,005265
K	0,001317

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 0,5 cm con 5% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0,00	75	0,00
60	7,75	73	0,13
120	10,95	72	0,19
180	13,42	71	0,25
240	15,49	70	0,31
300	17,32	69	0,38
360	18,97	67	0,50
420	20,49	66	0,57
480	21,91	65	0,63
540	23,24	63	0,75
600	24,49	62	0,82
660	25,69	58	1,07
720	26,83	54	1,32

Fuente: Autor

Muestra B permeabilidad 0,5 cm con 0% de diatomea suelo seco

A	3,998055794
C1	0,001902064
K	0,000475747

Fuente: Autor.

Muestra A ensayo succión 1 cm con 5% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0,00	85	0,00
30	5,48	81	0,25
60	7,75	79	0,38
90	9,49	77	0,50
120	10,95	75	0,63
150	12,25	73	0,75
180	13,42	72	0,82
210	14,49	70	0,94
240	15,49	69	1,01
270	16,43	68	1,07
300	17,32	67	1,13
330	18,17	66	1,19
360	18,97	66	1,19
390	19,75	65	1,26

Fuente: Autor.

Muestra A permeabilidad 1 cm con 5% de diatomea suelo seco

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-1
<hr/>	
A	4,096398575
C1	0,001950548
K	0,000225457

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 1 cm con 5% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0,00	85	0,00
30	5,48	82	0,19
60	7,75	79	0,38
90	9,49	77	0,50
120	10,95	76	0,57

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
150	12,25	74	0,69
180	13,42	73	0,75
210	14,49	72	0,82
240	15,49	71	0,88
270	16,43	70	0,94
300	17,32	68	1,07
330	18,17	67	1,13
360	18,97	65	1,26
390	19,75	64	1,32
420	20,49	63	1,38
450	21,21	62	1,45
480	21,91	61	1,51
510	22,58	60	1,57

Fuente: Autor.

Muestra B permeabilidad 1 cm con 5% de diatomea suelo seco

A 4,096398575

C1 0,001590377

K 0,000388238

Fuente: Autor.

Muestra ensayo succión 2 cm con 5% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0,00	62	0,00
60	7,75	62	0,00
120	10,95	61	0,06
180	13,42	61	0,06
240	15,49	60	0,13
300	17,32	60	0,13
360	18,97	59	0,19
420	20,49	59	0,19
480	21,91	58	0,25
540	23,24	58	0,25
600	24,49	57	0,31
660	25,69	57	0,31
720	26,83	56	0,38
780	27,93	56	0,38

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
840	28,98	55,5	0,41
900	30,00	55	0,44
960	30,98	54	0,50
1020	31,94	54	0,50
1080	32,86	53	0,57
1140	33,76	53	0,57
1200	34,64	52	0,63
1260	35,50	52	0,63
1320	36,33	51,5	0,66
1380	37,15	51	0,69
1440	37,95	50,5	0,72
1500	38,73	50	0,75
1560	39,50	50	0,75
1620	40,25	49,5	0,79
1680	40,99	49	0,82
1740	41,71	49	0,82
1800	42,43	48,5	0,85
1860	43,13	48	0,88
1920	43,82	48	0,88
1980	44,50	47,5	0,91
2040	45,17	47	0,94
2100	45,83	47	0,94
2160	46,48	46	1,01
2220	47,12	46	1,01
2280	47,75	45,5	1,04
2340	48,37	45	1,07
2400	48,99	45	1,07
2460	49,60	44	1,13
2520	50,20	44	1,13
2580	50,79	43,5	1,16
2640	51,38	43	1,19
2700	51,96	43	1,19
2760	52,54	42	1,26

Fuente: Autor.

Muestra permeabilidad 2 cm con 5% de diatomea suelo seco

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-2
<hr/>	
A	4,096398575
C1	0,000396197
K	9,67183E-05

Fuente: Autor.

Muestra A ensayo succión 0,5 cm con 10% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0,00	80	0,00
30	5,48	77,5	0,16
60	7,75	75	0,31
90	9,49	72	0,50
120	10,95	68	0,75
150	12,25	65	0,94
180	13,42	63	1,07
210	14,49	62	1,13
240	15,49	60	1,26

Fuente: Autor.

Muestra A permeabilidad 0,5 cm con 10% de diatomea suelo seco

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-0,5
<hr/>	
A	3,998055794
C1	0,005603845
K	0,001401643

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 0,5 cm con 10% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0,00	80	0,00
30	5,48	76	0,25
60	7,75	75	0,31
90	9,49	74	0,38
120	10,95	73	0,44
150	12,25	72	0,50
180	13,42	71	0,57
210	14,49	70	0,63
240	15,49	69	0,69
270	16,43	66	0,88
300	17,32	65	0,94
330	18,17	63	1,07
360	18,97	62	1,13
390	19,75	61	1,19
420	20,49	60,5	1,23
450	21,21	60	1,26

Fuente: Autor.

Muestra B permeabilidad 0,5 cm con 10% de diatomea suelo seco

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-0,5
<hr/>	
A	3,998055794
C1	0,001993502
K	0,000498618

Fuente: Autor.

Muestra A ensayo succión 1 cm con 10% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0,00	80	0,00
30	5,48	75	0,31
60	7,75	72	0,50
90	9,49	70	0,63
120	10,95	68	0,75
150	12,25	66	0,88

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
180	13,42	64	1,01
210	14,49	62	1,13
240	15,49	61	1,19
270	16,43	59,5	1,29

Fuente: Autor.

Muestra A permeabilidad 1 cm con 10% de diatomea suelo seco

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-1
<hr/>	
A	4,096398575
C1	0,001796918
K	0,000438658

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 1 cm con 10% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0,00	80	0,00
30	5,48	77	0,19
60	7,75	76	0,25
90	9,49	74	0,38
120	10,95	73	0,44
150	12,25	72	0,50
180	13,42	71	0,57
210	14,49	70	0,63
240	15,49	69	0,69
270	16,43	68,5	0,72
300	17,32	68	0,75
330	18,17	67	0,82
360	18,97	66	0,88
390	19,75	65	0,94
420	20,49	64	1,01
450	21,21	63	1,07
480	21,91	62	1,13
510	22,58	61	1,19

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
540	23,24	60	1,26

Fuente: Autor

Muestra B permeabilidad 1 cm con 10% de diatomea suelo seco

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-1
<hr/>	
A	4,096398575
C1	0,000808891
K	0,000197464

Fuente: Autor.

Muestra A ensayo succión 2 cm con 10% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0,00	82	0,00
30	5,48	78	0,25
60	7,75	78	0,25
90	9,49	77	0,31
120	10,95	76	0,38
150	12,25	75	0,44
180	13,42	73	0,57
210	14,49	73	0,57
240	15,49	72	0,63
270	16,43	72	0,63
300	17,32	71,5	0,66
330	18,17	71	0,69
360	18,97	71	0,69
390	19,75	70	0,75
420	20,49	70	0,75
450	21,21	69,5	0,79
480	21,91	69	0,82
510	22,58	69	0,82
540	23,24	69	0,82
570	23,87	68	0,88
600	24,49	68	0,88

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infiltr (cm)
630	25,10	67,5	0,91
660	25,69	67	0,94
690	26,27	67	0,94
720	26,83	66	1,01
750	27,39	66	1,01
780	27,93	65,5	1,04
810	28,46	65	1,07
840	28,98	65	1,07
870	29,50	64	1,13
900	30,00	64	1,13
930	30,50	64	1,13
960	30,98	63	1,19
990	31,46	63	1,19
1020	31,94	62,5	1,23
1050	32,40	62	1,26

Fuente: Autor.

Muestra A permeabilidad 2 cm con 10% de diatomea suelo seco

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-2
A	4,300400644
C1	4,5141E-07
K	1,04969E-07

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 2 cm con 10% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infiltr (cm)
0	0,00	81	0,00
30	5,48	78	0,19
60	7,75	77	0,25
90	9,49	77	0,25
120	10,95	76	0,31
150	12,25	76	0,31

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
180	13,42	75	0,38
210	14,49	75	0,38
240	15,49	74	0,44
270	16,43	72	0,57
300	17,32	69	0,75
330	18,17	67,5	0,85
360	18,97	67,5	0,85
390	19,75	67	0,88
420	20,49	67	0,88
450	21,21	66,5	0,91
480	21,91	66	0,94
510	22,58	66	0,94
540	23,24	65,5	0,97
570	23,87	65	1,01
600	24,49	65	1,01
630	25,10	64,5	1,04
660	25,69	64,5	1,04
690	26,27	64	1,07
720	26,83	64	1,07
750	27,39	63,5	1,10
780	27,93	63	1,13
810	28,46	62	1,19
840	28,98	61,5	1,23
870	29,50	61	1,26

Fuente: Autor.

Muestra B permeabilidad 2 cm con 10% de diatomea suelo seco

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-2
<hr/>	
A	4,300400644
C1	0,001045113
K	0,000243027

Fuente: Autor.

Muestra A ensayo succión 0,5 cm con 20% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0,00	80	0,00
30	5,48	75	0,31
60	7,75	73	0,44
90	9,49	71	0,57
120	10,95	70	0,63
150	12,25	67	0,82
180	13,42	65	0,94
210	14,49	63	1,07
240	15,49	60	1,26

Fuente: Autor.

Muestra A permeabilidad 0,5 cm con 20% de diatomea suelo seco

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-0,5
<hr/>	
A	3,998055794
C1	0,003073911
K	0,000768852

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 0,5 cm con 20% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0,00	80	0,00
30	5,48	79	0,06
60	7,75	76	0,25
90	9,49	74	0,38
120	10,95	71	0,57
150	12,25	69	0,69
180	13,42	67	0,82
210	14,49	64	1,01
240	15,49	61	1,19
270	16,43	60	1,26

Fuente: Autor.

Muestra B permeabilidad 0,5 cm con 20% de diatomea suelo seco

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-0,5
<hr/>	
A	3,998055794
C1	0,005562416
K	0,00139128

Fuente: Autor.

Muestra A ensayo succión 1 cm con 20% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0,00	80	0,00
30	5,48	70	0,63
60	7,75	68	0,75
90	9,49	58	1,38

Fuente: Autor.

Muestra A permeabilidad 1 cm con 20% de diatomea suelo seco

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-1
<hr/>	
A	4,096398575
C1	0,012112323
K	0,002956822

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 1 cm con 20% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0,00	80	0,00
30	5,48	78	0,13
60	7,75	76	0,25
90	9,49	73	0,44
120	10,95	69	0,69
150	12,25	66	0,88
180	13,42	63	1,07
210	14,49	60	1,26

Fuente: Autor.

Muestra B permeabilidad 1 cm con 20% de diatomea suelo seco

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-1
<hr/>	
A	4,096398575
C1	0,007668567
K	0,001872027

Fuente: Autor.

Muestra A ensayo succión 2 cm con 20% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0,00	80	0,00
30	5,48	76	0,25
60	7,75	73,5	0,41
90	9,49	72	0,50
120	10,95	71	0,57
150	12,25	70	0,63
180	13,42	69	0,69
210	14,49	68	0,75
240	15,49	67	0,82
270	16,43	66	0,88
300	17,32	65,5	0,91
330	18,17	64,5	0,97
360	18,97	64	1,01
390	19,75	63	1,07
420	20,49	62,5	1,10
450	21,21	62	1,13
480	21,91	61	1,19
510	22,58	60	1,26

Fuente: Autor.

Muestra A permeabilidad 2 cm con 20% de diatomea suelo seco

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-2
A	4,300400644
C1	0,000278787
K	6,48282E-05

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 2 cm con 20% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0,00	80	0,00
30	5,48	78	0,13
60	7,75	77	0,19
90	9,49	76	0,25
120	10,95	75	0,31
150	12,25	74	0,38
180	13,42	73	0,44
210	14,49	72	0,50
240	15,49	71	0,57
270	16,43	70	0,63
300	17,32	69	0,69
330	18,17	68	0,75
360	18,97	67	0,82
390	19,75	66	0,88
420	20,49	65	0,94
450	21,21	63,5	1,04
480	21,91	62	1,13
510	22,58	61,5	1,16
511	22,61	61	1,19
512	22,63	60	1,26

Fuente: Autor.

Muestra B permeabilidad 2 cm con 20% de diatomea suelo seco

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-2
A	4,300400644
C1	0,002106497
K	0,000489837

Fuente: Autor.

Muestra A ensayo succión 0,5 cm con 40% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	80	0
30	5,477225575	75	0,314380135
60	7,745966692	67	0,81738835
90	9,486832981	58	1,383272592
120	10,95445115	47	2,074908888
150	12,24744871	37	2,703669157
180	13,41640786	28	3,269553399
210	14,49137675	17	3,961189695
240	15,49193338	9	4,46419791

Fuente: Autor.

Muestra A permeabilidad 0,5 cm con 40% de diatomea suelo seco

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-0,5
<hr/>	
A	3,998055794
C1	0,022196312
K	0,005551776

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 0,5 cm con 40% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	80	0
30	5,477225575	76	0,251504108
60	7,745966692	68	0,754512323
90	9,486832981	63	1,068892457
120	10,95445115	60	1,257520538
150	12,24744871	57	1,446148619
180	13,41640786	49	1,949156834
210	14,49137675	40	2,515041076
240	15,49193338	36	2,766545184
270	16,43167673	30	3,143801345
300	17,32050808	21	3,709685587
330	18,16590212	18	3,898313668

Fuente: Autor.

Muestra B permeabilidad 0,5 cm con 40% de diatomea suelo seco

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-0,5
<hr/>	
A	3,998055794
C1	0,010458082
K	0,002615792

Fuente: Autor.

Muestra A ensayo succión 1 cm con 40% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	80	0
30	5,477225575	69	0,691636296
60	7,745966692	61	1,194644511

Fuente: Autor.

Muestra A permeabilidad 1 cm con 40% de diatomea suelo seco

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-1
<hr/>	
A	4,096398575
C1	0,012320934
K	0,003007748

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 1 cm con 40% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	80	0
30	5,477225575	76	0,251504108
60	7,745966692	73	0,440132188
90	9,486832981	70	0,628760269
120	10,95445115	67	0,81738835
150	12,24744871	60	1,257520538
180	13,41640786	59	1,320396565

Fuente: Autor.

Muestra B permeabilidad 1 cm con 40% de diatomea suelo seco

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-1
<hr/>	
A	4,096398575
C1	0,008868436
K	0,002164935

Fuente: Autor.

Muestra A ensayo succión 2 cm con 40% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infiltr (cm)
0	0,00	80	0,00
30	5,48	75	0,31
60	7,75	68	0,75
90	9,49	65	0,94
120	10,95	63	1,07
150	12,25	62	1,13
180	13,42	60	1,26

Fuente: Autor.

Muestra A permeabilidad 2 cm con 40% de diatomea suelo seco

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-2
<hr/>	
A	4,300400644
C1	0,001416959
K	0,000329495

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 2 cm con 40% de diatomea suelo seco

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0,00	80	0,00
30	5,48	79,5	0,03
60	7,75	79	0,06
90	9,49	77	0,19
120	10,95	76	0,25
150	12,25	74,5	0,35
180	13,42	73	0,44
210	14,49	72	0,50
240	15,49	71	0,57
270	16,43	70	0,63
300	17,32	69	0,69
330	18,17	68	0,75
360	18,97	67	0,82
390	19,75	66	0,88
420	20,49	65	0,94
450	21,21	64	1,01
480	21,91	63	1,07
510	22,58	62	1,13
540	23,24	61	1,19
570	23,87	60	1,26

Fuente: Autor.

Muestra B permeabilidad 2 cm con 40% de diatomea suelo seco

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-0,5
A	3,998055794
C1	0,002210306
K	0,000552845

Fuente: Autor.

Muestra ensayo succión 0,5 cm con 0% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	59	0
60	7,745967	57	0,125752
120	10,95445	56	0,188628
180	13,41641	54	0,31438
240	15,49193	52	0,440132
300	17,32051	50	0,565884
360	18,97367	49,5	0,597322
420	20,4939	47	0,754512
480	21,9089	46	0,817388
540	23,2379	44	0,94314
600	24,4949	43	1,006016
660	25,69047	41	1,131768
720	26,83282	39	1,257521

Fuente: Autor.

Muestra permeabilidad 0,5 cm con 0% de diatomea suelo húmedo

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-0,5
<hr/>	
A	3,998055794
C1	0,001651012
K	0,000412954

Fuente: Autor

Muestra ensayo succión 1 cm con 0% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	80	0
60	7,745967	77	0,188628
90	9,486833	76	0,251504
120	10,95445	75	0,31438
150	12,24745	74	0,377256
180	13,41641	73	0,440132
210	14,49138	72	0,503008
240	15,49193	71	0,565884

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
270	16,43168	69	0,691636
300	17,32051	68	0,754512
330	18,1659	68	0,754512
360	18,97367	67	0,817388
390	19,74842	67	0,817388
420	20,4939	66	0,880264
450	21,2132	66	0,880264
480	21,9089	65	0,94314
510	22,58318	65	0,94314
540	23,2379	64	1,006016
570	23,87467	64	1,006016
600	24,4949	63	1,068892
630	25,0998	63	1,068892
660	25,69047	62	1,131768
690	26,26785	62	1,131768
720	26,83282	61	1,194645
750	27,38613	61	1,194645
780	27,92848	60,5	1,226083
810	28,4605	60	1,257521

Fuente: Autor.

Muestra permeabilidad 1 cm con 0% de diatomea suelo húmedo

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-1
A	4,096398575
C1	0,000606163
K	0,000147975

Fuente: Autor.

Muestra ensayo succión 2 cm con 0% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	59	0
90	9,486833	59	0
180	13,41641	58	0,062876
270	16,43168	57	0,125752
360	18,97367	56	0,188628
450	21,2132	55	0,251504
540	23,2379	54	0,31438
630	25,0998	53	0,377256
720	26,83282	52	0,440132
810	28,4605	51	0,503008
900	30	50	0,565884
990	31,46427	49	0,62876
1080	32,86335	48	0,691636
1170	34,20526	47	0,754512
1260	35,49648	46	0,817388
1350	36,74235	45	0,880264
1440	37,94733	45	0,880264
1530	39,11521	44	0,94314
1620	40,24922	44	0,94314
1710	41,35215	43	1,006016
1800	42,42641	43	1,006016
1890	43,47413	42	1,068892
1980	44,49719	42	1,068892
2070	45,49725	41	1,131768
2160	46,4758	41	1,131768
2250	47,43416	40	1,194645
2340	48,37355	40	1,194645
2430	49,29503	39	1,257521
2520	50,1996	39	1,257521

Fuente: Autor.

Muestra permeabilidad 2 cm con 0% de diatomea suelo húmedo

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-2
A	4,300400644
C1	0,000418934
K	9,74174E-05

Fuente: Autor.

Muestra A ensayo succión 0,5 cm con 0,5% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	54	0
30	5,477225575	52	0,125752054
60	7,745966692	50	0,251504108
90	9,486832981	48	0,377256161
120	10,95445115	45	0,565884242
150	12,24744871	43	0,691636296
180	13,41640786	41	0,81738835
210	14,49137675	39	0,943140404
240	15,49193338	36	1,131768484
270	16,43167673	34	1,257520538
300	17,32050808	31	1,446148619
330	18,16590212	29	1,571900673
360	18,97366596	26	1,760528753
390	19,74841766	24	1,886280807
420	20,49390153	22	2,012032861
450	21,21320344	20	2,137784915

Fuente: Autor.

Muestra A permeabilidad 0,5 cm con 0,5% de diatomea suelo húmedo

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-0,5
<hr/>	
A	3,998055794
C1	0,005168723
K	0,001292809

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 0,5 cm con 0,5% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	64	0
30	5,477225575	60	0,251504108
60	7,745966692	59	0,314380135
90	9,486832981	57	0,440132188
120	10,95445115	55	0,565884242
150	12,24744871	53	0,691636296
180	13,41640786	51	0,81738835
210	14,49137675	49	0,943140404
240	15,49193338	47	1,068892457
270	16,43167673	46	1,131768484
300	17,32050808	44,5	1,226082525

Fuente: Autor.

Muestra B permeabilidad 0,5 cm con 0,5% de diatomea suelo húmedo

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-0,5
A	4,096398575
C1	0,002955349
K	0,00072145

Fuente: Autor.

Muestra A ensayo succión 1 cm con 0,5% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	62	0
30	5,477225575	60	0,125752054
60	7,745966692	57	0,314380135
90	9,486832981	55	0,440132188
120	10,95445115	53	0,565884242
150	12,24744871	52	0,628760269
180	13,41640786	49	0,81738835
210	14,49137675	47	0,943140404
240	15,49193338	44	1,131768484

Fuente: Autor

Muestra A permeabilidad 1 cm con 0,5% de diatomea suelo húmedo

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-1
<hr/>	
A	4,096398575
C1	0,004429669
K	0,001081357

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 1 cm con 0,5% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	51	0
60	7,745966692	49	0,125752054
120	10,95445115	48	0,188628081
180	13,41640786	46	0,314380135
240	15,49193338	44	0,440132188
300	17,32050808	43	0,503008215
360	18,97366596	41	0,628760269
420	20,49390153	40	0,691636296
480	21,9089023	38	0,81738835
540	23,23790008	37	0,880264377
600	24,49489743	35	1,00601643
660	25,69046516	34	1,068892457
720	26,83281573	32	1,194644511
780	27,92848009	30,5	1,288958551

Fuente: Autor

Muestra B permeabilidad 1 cm con 0,5% de diatomea suelo húmedo

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-1
<hr/>	
A	3,998055794
C1	0,001540169
K	0,000385229

Fuente: Autor.

Muestra A ensayo succión 2 cm con 0,5% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	62	0
60	7,745966692	62	0
120	10,95445115	62	0
180	13,41640786	61	0,062876027
240	15,49193338	61	0,062876027
300	17,32050808	61	0,062876027
360	18,97366596	60	0,125752054
420	20,49390153	60	0,125752054
480	21,9089023	60	0,125752054
540	23,23790008	59	0,188628081
600	24,49489743	59	0,188628081
660	25,69046516	59	0,188628081
720	26,83281573	58	0,251504108
780	27,92848009	58	0,251504108
840	28,98275349	58	0,251504108
900	30	57	0,314380135
960	30,98386677	57	0,314380135
1020	31,93743885	57	0,314380135
1080	32,86335345	56	0,377256161
1140	33,76388603	56	0,377256161
1200	34,64101615	55	0,440132188
1260	35,4964787	55	0,440132188
1320	36,33180425	55	0,440132188
1380	37,14835124	54	0,503008215
1440	37,94733192	54	0,503008215
1500	38,72983346	54	0,503008215
1560	39,49683532	53	0,565884242
1620	40,24922359	53	0,565884242
1680	40,98780306	53	0,565884242
1740	41,71330723	52	0,628760269
1800	42,42640687	52	0,628760269
1860	43,12771731	52	0,628760269
1920	43,8178046	51	0,691636296
1980	44,49719092	51	0,691636296
2040	45,16635916	51	0,691636296
2100	45,82575695	50	0,754512323
2160	46,47580015	50	0,754512323
2220	47,11687596	50	0,754512323

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
2280	47,74934555	49	0,81738835
2340	48,37354649	49	0,81738835
2400	48,98979486	49	0,81738835
2460	49,59838707	48	0,880264377
2520	50,19960159	48	0,880264377
2580	50,7937004	48	0,880264377
2640	51,38093031	47	0,943140404
2700	51,96152423	47	0,943140404
2760	52,53570215	47	0,943140404
2820	53,10367219	46	1,00601643
2880	53,66563146	46	1,00601643
2940	54,22176685	46	1,00601643
3000	54,77225575	45	1,068892457
3060	55,31726674	45	1,068892457
3120	55,85696018	45	1,068892457
3180	56,39148872	45	1,068892457
3240	56,92099788	44	1,131768484
3300	57,44562647	44	1,131768484
3360	57,96550698	44	1,131768484
3420	58,48076607	44	1,131768484
3480	58,99152482	43	1,194644511
3540	59,49789912	43	1,194644511
3600	60	43	1,194644511
3660	60,49793385	43	1,194644511
3720	60,99180273	42	1,257520538

Fuente: Autor

Muestra A permeabilidad 2 cm con 0,5% de diatomea suelo húmedo

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-2
A	4,096398575
C1	0,000344917
K	8,42001E-05

Muestra A ensayo succión 0,5 cm con 10% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	35	0
30	5,477225575	34	0,062876027
60	7,745966692	33	0,125752054
90	9,486832981	30	0,314380135
120	10,95445115	28	0,440132188
150	12,24744871	27	0,503008215
180	13,41640786	26	0,565884242
210	14,49137675	24	0,691636296
240	15,49193338	22,5	0,785950336
270	16,43167673	21	0,880264377
300	17,32050808	20	0,943140404
330	18,16590212	19	1,00601643
360	18,97366596	17,5	1,100330471
390	19,74841766	16	1,194644511
420	20,49390153	15	1,257520538

Fuente: Autor.

Muestra A permeabilidad 0,5 cm con 10% de diatomea suelo húmedo

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-0,5%
A	4,096398575
C1	0,002802674
K	0,00068418

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 0,5 cm con 10% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	45	0
60	7,745966692	45	0
120	10,95445115	44	0,062876027
180	13,41640786	43,5	0,09431404
240	15,49193338	43	0,125752054
300	17,32050808	42	0,188628081

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infiltr (cm)
360	18,97366596	41	0,251504108
420	20,49390153	41	0,251504108
480	21,9089023	40	0,314380135
540	23,23790008	39	0,377256161
600	24,49489743	39	0,377256161
660	25,69046516	38	0,440132188
720	26,83281573	37	0,503008215
780	27,92848009	37	0,503008215
840	28,98275349	36	0,565884242
900	30	35	0,628760269
960	30,98386677	34,5	0,660198282
1020	31,93743885	34	0,691636296
1080	32,86335345	33	0,754512323
1140	33,76388603	32,5	0,785950336
1200	34,64101615	32	0,81738835
1260	35,4964787	31	0,880264377
1320	36,33180425	30,5	0,91170239
1380	37,14835124	30	0,943140404
1440	37,94733192	29,15217391	0
1500	38,72983346	28,47434783	1,039067351
1560	39,49683532	27,79652174	1,081686362
1620	40,24922359	27,11869565	1,124305373
1680	40,98780306	26,44086957	1,166924384
1740	41,71330723	25,76304348	1,209543396
1800	42,42640687	25,08521739	1,252162407

Fuente: Autor.

Muestra B permeabilidad 0,5 cm con 10% de diatomea suelo húmedo

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-0,5%
A	3,998055794
C1	0,000658803
K	0,000164781

Fuente: Autor.

Muestra A ensayo succión 1 cm con 10% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	32	0
30	5,477225575	31	0,062876027
60	7,745966692	30	0,125752054
90	9,486832981	30	0,125752054
120	10,95445115	29	0,188628081
150	12,24744871	29	0,188628081
180	13,41640786	28,5	0,220066094
210	14,49137675	28	0,251504108
240	15,49193338	27	0,314380135
270	16,43167673	27	0,314380135
300	17,32050808	27	0,314380135
330	18,16590212	26	0,377256161
360	18,97366596	26	0,377256161
390	19,74841766	26	0,377256161
420	20,49390153	25,5	0,408694175
450	21,21320344	25	0,440132188
480	21,9089023	25	0,440132188
510	22,58317958	25	0,440132188
540	23,23790008	24	0,503008215
570	23,87467277	23,5	0,534446229
600	24,49489743	23	0,565884242
630	25,0998008	23	0,565884242
660	25,69046516	23	0,565884242
690	26,26785107	22	0,628760269
720	26,83281573	21	0,691636296
750	27,38612788	20	0,754512323
780	27,92848009	17	0,943140404
810	28,46049894	11	1,320396565

Fuente: Autor.

Muestra A permeabilidad 1 cm con 10% de diatomea suelo húmedo

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-1

A	3,998055794
C1	0,001102623
K	0,00027579

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 1 cm con 10% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	66	0
30	5,477225575	65	0,062876027
60	7,745966692	65	0,062876027
90	9,486832981	64	0,125752054
120	10,95445115	64	0,125752054
150	12,24744871	63,5	0,157190067
180	13,41640786	63	0,188628081
210	14,49137675	63	0,188628081
240	15,49193338	62	0,251504108
270	16,43167673	61	0,314380135
300	17,32050808	60,5	0,345818148
330	18,16590212	60	0,377256161
360	18,97366596	59,5	0,408694175
390	19,74841766	59	0,440132188
420	20,49390153	58	0,503008215
450	21,21320344	58	0,503008215
480	21,9089023	57	0,565884242
510	22,58317958	56,6	0,591034653
540	23,23790008	56	0,628760269
570	23,87467277	55	0,691636296
600	24,49489743	54,5	0,723074309
630	25,0998008	54	0,754512323
660	25,69046516	53,5	0,785950336
690	26,26785107	53	0,81738835
720	26,83281573	52,5	0,848826363
750	27,38612788	52	0,880264377

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
780	27,92848009	51,5	0,91170239
810	28,46049894	51	0,943140404
840	28,98275349	50	1,00601643
870	29,49576241	50	1,00601643
900	30	49,5	1,037454444
930	30,49590136	49	1,068892457
960	30,98386677	48,5	1,100330471
990	31,46426545	48	1,131768484
1020	31,93743885	47,5	1,163206498
1050	32,40370349	47	1,194644511
1080	32,86335345	46,5	1,226082525
1110	33,3166625	46	1,257520538

Fuente: Autor.

Muestra B permeabilidad 1 cm con 10% de diatomea suelo húmedo

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-1
A	4,096398575
C1	0,001148008
K	0,000280248

Fuente: Autor.

Muestra A ensayo succión 2 cm con 10% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	61	0
60	7,745966692	60	0,062876
120	10,95445115	59	0,1257521
180	13,41640786	58,5	0,1571901
240	15,49193338	58	0,1886281
300	17,32050808	57,5	0,2200661
360	18,97366596	57	0,2515041
420	20,49390153	57	0,2515041
480	21,9089023	56	0,3143801
540	23,23790008	55,5	0,3458181
600	24,49489743	55	0,3772562
660	25,69046516	54,5	0,4086942

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
720	26,83281573	54	0,4401322
780	27,92848009	53,5	0,4715702
840	28,98275349	53	0,5030082
900	30	53	0,5030082
960	30,98386677	52	0,5658842
1020	31,93743885	52	0,5658842
1080	32,86335345	51	0,6287603
1140	33,76388603	51	0,6287603
1200	34,64101615	50	0,6916363
1260	35,4964787	50	0,6916363
1320	36,33180425	49,5	0,7230743
1380	37,14835124	49	0,7545123
1440	37,94733192	49	0,7545123
1500	38,72983346	48	0,8173883
1560	39,49683532	48	0,8173883
1620	40,24922359	47,5	0,8488264
1680	40,98780306	47	0,8802644
1740	41,71330723	46,5	0,9117024
1800	42,42640687	46	0,9431404
1860	43,12771731	46	0,9431404
1920	43,8178046	45,5	0,9745784
1980	44,49719092	45	1,0060164
2040	45,16635916	44,5	1,0374544
2100	45,82575695	44	1,0688925
2160	46,47580015	44	1,0688925
2220	47,11687596	43,4	1,1066181
2280	47,74934555	43	1,1317685
2340	48,37354649	42,5	1,1632065
2400	48,98979486	42	1,1946445

Fuente: Autor.

Muestra A permeabilidad 2 cm con 10% de diatomea suelo húmedo

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-2
<hr/>	
A	4,300400644
C1	0,000361211
K	8,39947E-05

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 2 cm con 10% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	61	0
60	7,745966692	59,5	0,09431404
120	10,95445115	59	0,125752054
180	13,41640786	58,5	0,157190067
240	15,49193338	58	0,188628081
300	17,32050808	57	0,251504108
360	18,97366596	56,5	0,282942121
420	20,49390153	56	0,314380135
480	21,9089023	55,5	0,345818148
540	23,23790008	55	0,377256161
600	24,49489743	54,5	0,408694175
660	25,69046516	54	0,440132188
720	26,83281573	53,5	0,471570202
780	27,92848009	53	0,503008215
840	28,98275349	52,5	0,534446229
900	30	52	0,565884242
960	30,98386677	51	0,628760269
1020	31,93743885	51	0,628760269
1080	32,86335345	50	0,691636296
1140	33,76388603	50	0,691636296
1200	34,64101615	49	0,754512323
1260	35,4964787	48,5	0,785950336
1320	36,33180425	48	0,81738835
1380	37,14835124	48	0,81738835
1440	37,94733192	48	0,81738835
1500	38,72983346	47,5	0,848826363
1560	39,49683532	47,5	0,848826363
1620	40,24922359	47	0,880264377

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
1680	40,98780306	46,5	0,91170239
1740	41,71330723	45,5	0,974578417
1800	42,42640687	45	1,00601643
1860	43,12771731	45	1,00601643
1920	43,8178046	44,5	1,037454444
1980	44,49719092	44	1,068892457
2040	45,16635916	44	1,068892457
2100	45,82575695	43	1,131768484
2160	46,47580015	43	1,131768484
2220	47,11687596	42	1,194644511
2280	47,74934555	42	1,194644511
2340	48,37354649	41,5	1,226082525

Fuente: Autor.

Muestra B permeabilidad 2 cm con 10% de diatomea suelo húmedo

Radio	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Succión	-2
A	4,300400644
C1	0,000348203
K	8,09699E-05

Fuente: Autor.

Muestra A ensayo succión 0,5 cm con 20% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	59	0
30	5,4772256	57	0,1257521
60	7,7459667	55	0,2515041
90	9,486833	53	0,3772562
120	10,954451	51	0,5030082
150	12,247449	49,5	0,5973223
180	13,416408	47,5	0,7230743
210	14,491377	46	0,8173883
240	15,491933	44	0,9431404
270	16,431677	42	1,0688925
300	17,320508	40	1,1946445

Fuente: Autor.

Muestra A permeabilidad 0,5 cm con 20% de diatomea suelo húmedo

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-0,5
<hr/>	
A	3,9980558
C1	0,0037364
K	0,0009346

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 0,5 cm con 20% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	56,5	0
30	5,4772256	54	0,1571901
60	7,7459667	52	0,2829421
90	9,486833	49	0,4715702
120	10,954451	46,5	0,6287603
150	12,247449	44	0,7859503
180	13,416408	41,5	0,9431404
210	14,491377	39	1,1003305

Fuente: Autor.

Muestra B permeabilidad 0,5 cm con 20% de diatomea suelo húmedo

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-0,5
<hr/>	
A	3,9980558
C1	0,0054592
K	0,0013655

Fuente: Autor

Muestra A ensayo succión 1 cm con 20% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	52	0
30	5,4772256	50	0,1257521
60	7,7459667	47	0,3143801
90	9,486833	44	0,5030082
120	10,954451	41	0,6916363

Fuente: Autor.

Muestra A permeabilidad 1 cm con 20% de diatomea suelo húmedo

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-1
A	4,0963986
C1	0,0072439
K	0,0017684

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 1 cm con 20% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	55	0
30	5,4772256	53	0,1257521
60	7,7459667	49	0,3772562
90	9,486833	45,5	0,5973223
120	10,954451	42	0,8173883
150	12,247449	38	1,0688925
180	13,416408	35	1,2575205

Fuente: Autor.

Muestra B permeabilidad 1 cm con 20% de diatomea suelo húmedo

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-1
A	4,0963986
C1	0,0085018
K	0,0020754

Fuente: Autor.

Muestra ensayo succión 2 cm con 20% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	60	0
60	7,7459667	59	0,062876
120	10,954451	58	0,1257521
180	13,416408	57	0,1886281
240	15,491933	55,5	0,2829421
300	17,320508	54	0,3772562
360	18,973666	52,5	0,4715702
420	20,493902	51,5	0,5344462
480	21,908902	50,5	0,5973223
540	23,2379	49,5	0,6601983
600	24,494897	48	0,7545123
660	25,690465	47,5	0,7859503
720	26,832816	46,5	0,8488264
780	27,92848	45	0,9431404
840	28,982753	44	1,0060164
900	30	43	1,0688925
960	30,983867	42	1,1317685
1020	31,937439	41	1,1946445
1080	32,863353	40	1,2575205

Fuente: Autor.

Muestra permeabilidad 2 cm con 20% de diatomea suelo húmedo

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-2
A	4,3004006
C1	0,0011213
K	0,0002607

Fuente: Autor.

Muestra A ensayo succión 0,5 cm con 40% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	47	0
30	5,477225575	37	0,628760269
60	7,745966692	28	1,194644511
90	9,486832981	17	1,886280807
120	10,95445115	9	2,389289022

Fuente: Autor.

Muestra A permeabilidad 0,5 cm con 40% de diatomea suelo húmedo

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-0,5
<hr/>	
A	3,998055794
C1	0,019345013
K	0,004838605

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 0,5 cm con 40% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	57	0
30	5,477225575	49	0,503008215
60	7,745966692	40	1,068892457
90	9,486832981	36	1,320396565
120	10,95445115	30	1,697652726
150	12,24744871	21	2,263536968
180	13,41640786	18	2,452165049

Fuente: Autor.

Muestra B permeabilidad 0,5 cm con 40% de diatomea suelo húmedo

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-0,5
<hr/>	
A	3,998055794
C1	0,010808978
K	0,002703558

Fuente: Autor.

Muestra A ensayo succión 1 cm con 40% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	55	0
30	5,477225575	51	0,251504108
60	7,745966692	47	0,503008215
90	9,486832981	43	0,754512323

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
120	10,95445115	38	1,068892457
150	12,24744871	34	1,320396565

Fuente: Autor.

Muestra A permeabilidad 1 cm con 40% de diatomea suelo húmedo

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-1
<hr/>	
A	4,096398575
C1	0,009486909
K	0,002315914

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 1 cm con 40% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	59	0
30	5,477225575	56	0,188628081
60	7,745966692	53	0,377256161
90	9,486832981	51	0,503008215
120	10,95445115	47	0,754512323
150	12,24744871	44	0,943140404
180	13,41640786	41	1,131768484

Fuente: Autor

Muestra B permeabilidad 1 cm con 40% de diatomea suelo húmedo

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-1
<hr/>	
A	4,096398575
C1	0,006624111
K	0,001617057

Fuente: Autor.

Muestra A ensayo succión 2 cm con 40% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	59	0
30	5,477225575	58	0,062876027
60	7,745966692	55	0,251504108
90	9,486832981	54	0,314380135
120	10,95445115	52	0,440132188
150	12,24744871	50	0,565884242
180	13,41640786	49	0,628760269
210	14,49137675	48	0,691636296
240	15,49193338	47	0,754512323
270	16,43167673	46	0,81738835
300	17,32050808	45	0,880264377
330	18,16590212	44	0,943140404
360	18,97366596	43	1,00601643
390	19,74841766	42	1,068892457
420	20,49390153	41	1,131768484

Fuente: Autor.

Muestra A permeabilidad 2 cm con 40% de diatomea suelo húmedo

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-2
A	4,300400644
C1	0,003719196
K	0,000864849

Fuente: Autor.

Muestra B ensayo succión 2 cm con 40% de diatomea suelo húmedo

Time (s)	sqrt (t)	Volume (mL)	Infilt (cm)
0	0	59	0
30	5,477225575	58	0,062876027
60	7,745966692	57	0,125752054
90	9,486832981	56	0,188628081
120	10,95445115	55	0,251504108
150	12,24744871	54	0,314380135
180	13,41640786	53	0,377256161
210	14,49137675	52	0,440132188
240	15,49193338	51	0,503008215
270	16,43167673	50	0,565884242
300	17,32050808	49	0,628760269
330	18,16590212	48	0,691636296
360	18,97366596	47	0,754512323
390	19,74841766	46	0,81738835
420	20,49390153	45	0,880264377
450	21,21320344	44,5	0,91170239
480	21,9089023	43	1,00601643
510	22,58317958	42,5	1,037454444
540	23,23790008	41	1,131768484
570	23,87467277	40	1,194644511

Fuente: Autor.

Muestra B permeabilidad 2 cm con 40% de diatomea suelo húmedo

Radius	2,25
alpha	0,008
n/ho	1,09
Suction	-2
A	3,998055794
C1	0,00205573
K	0,000514182

Fuente: Autor.