

CLASIFICACIÓN DE SUELOS FINOS DE LA ZONA DE POPAYÁN BASADA EN  
LA SENSIBILIDAD QUÍMICA DE LOS FLUIDOS DE PORO



CRISTIAN CAMILO GUERRERO CASTRO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA  
POPAYÁN  
2016

CLASIFICACIÓN DE SUELOS FINOS DE LA ZONA DE POPAYÁN BASADA EN  
LA SENSIBILIDAD QUÍMICA DE LOS FLUIDOS DE PORO

CRISTIAN CAMILO GUERRERO CASTRO

Trabajo de grado en la modalidad Investigación  
para optar al título de Ingeniero Civil

Director

PhD. Lucio Gerardo Cruz Velasco

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA  
POPAYÁN  
2016

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

Firma del director

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Popayán, 29 de Julio de 2016

A mi madre por todo su apoyo, por ser mi motivación, mi inspiración, mi norte, mi fuente de energía, amor y compañía.

## AGRADECIMIENTOS

Al Doctor Lucio Cruz, docente de la Facultad de Ingeniería Civil, por su orientación y apoyo durante todo este proceso, sin los cuales no hubiese sido posible culminarlo exitosamente. Mil gracias por creer en mis cualidades y propagar en mi pasión por este proyecto.

A la Universidad del Cauca en especial a las personas que trabajan en el Laboratorio de Suelos y Pavimentos de la Facultad de Ingeniería Civil por el acompañamiento y guía durante la fase experimental de esta investigación. Al personal del Laboratorio de Genética Humana e Inmunología de la Facultad de Salud, por aportar el agua desionizada con la cual se realizó la mayoría de ensayos.

A Flor Ángela Cuscué por su valiosa ayuda en la realización de los ensayos y a todas las demás personas que de alguna forma aportaron a esta investigación.

## RESUMEN

Este proyecto se basará en una nueva clasificación de suelos finos (Jang & Santamarina, 2015) utilizando parámetros como la sensibilidad química del suelo y propiedades en los fluidos de poro que no han sido tenidos en cuenta por los métodos de clasificación que en la actualidad se utilizan en la Geotecnia. En particular, la clasificación planteada se aplicará a los suelos de la ciudad de Popayán cuya composición es en su mayoría de suelos volcánicos de partículas finas; sin embargo, los dos métodos de clasificación conocidos actualmente en la literatura, el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el sistema de clasificación de la *American Association of State Highway Officials* (AASHTO), presentan limitaciones en la caracterización de las propiedades de dichos suelos.

El método que se utilizara fue publicado en diciembre de 2015 y se espera obtener resultados que representen de una mejor forma el comportamiento de los suelos finos para poder anticipar mediante una visión más clara su comportamiento y propiedades físicas frente a problemas de la ingeniería geotécnica. Por otro lado, se realizará un estudio comparativo entre tres métodos para determinar el límite líquido en suelos derivados de cenizas volcánicas de la ciudad de Popayán. Uno de los productos finales de esta investigación será una correlación entre dichos procedimientos.

## JUSTIFICACIÓN

Con la aplicación de este nuevo modelo de clasificación de suelos se esperan obtener resultados que se ajusten mejor a la caracterización de los suelos finos predominantes en la región del Cauca y la ciudad de Popayán, de tal suerte que se puedan implementar conceptos ingenieriles modernos para corroborar y formular adaptaciones a leyes y teorías que permitan entender de una mejor forma el comportamiento de los suelos.

Esta investigación se enfocará en suelos derivados de cenizas volcánicas los cuales son muy comunes en toda Colombia pero cuyo comportamiento es de difícil comprensión y por ello será fundamento de estudio, debido a que presentan fuertes cambios en su comportamiento al ser expuestos a factores de variaciones climatológicas, lo cual es un problema en el área de construcción por las tendencias a presentar elevados asentamientos, colapso e inestabilidad de las estructuras y demás dificultades geotécnicas; por lo cual, dicho comportamiento merece ser estudiado de una forma más completa.

La nueva clasificación de suelos se basa en el límite líquido de los suelos, parámetro que actualmente se determina por varios métodos. En Popayán no existe un estudio que compare los resultados obtenidos con cada uno de ellos, por lo que una parte de esta investigación estará motivada por el deseo que estudiar a fondo estos métodos y la relación entre sus resultados, para poder difundirlos a la comunidad científica.

En general, el suelo como unidad funcional representa el soporte de toda estructura ingenieril intercontinental, de tal forma, que una mayor comprensión de sus propiedades representa un reto fundamental para obtener estructuras más estables, seguras, resistentes y económicas.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Aplicar un nuevo sistema de clasificación de suelos finos publicado en 2015 en muestras de depósitos de suelos provenientes de la ciudad de Popayán de cenizas volcánicas.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Valorar propiedades mecánicas de suelos derivados de cenizas volcánicas en virtud de mejorar el conocimiento de su comportamiento.
- Prever y modelar propiedades mecánicas de suelos derivados de cenizas volcánicas con fines de mejorar la solución de problemas en la ingeniería geotécnica.
- Conocer y obtener conclusiones al usar un nuevo sistema de clasificación de suelos basado en el límite líquido y la sensibilidad eléctrica.
- Establecer una correlación numérica entre tres métodos utilizados en la determinación del límite líquido de suelos, aplicados a muestras de la ciudad de Popayán.



## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN .....	18
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	18
1.2 ORGANIZACIÓN DE ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....	20
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO.....	22
2.1 SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS .....	22
2.1.1 Introducción.....	22
2.1.2 Mineralogía.....	23
2.1.3 Suelos derivados de ceniza volcánica en Colombia.....	29
2.1.4 Proceso de formación.....	32
2.1.5 Propiedades físico-químicas .....	36
2.1.6 Propiedades mecánicas .....	38
2.2 CLASIFICACIÓN DE SUELOS.....	39
2.2.1 Actuales sistemas de clasificación .....	39
2.2.2 Argumentos para nuevos sistemas de clasificación .....	42
2.3 NUEVA CLASIFICACIÓN DE SUELOS .....	47
2.3.1 Introducción.....	47
2.3.2 Límite líquido.....	49
2.3.3 Sensibilidad eléctrica.....	53
2.3.4 Procedimiento de la nueva clasificación.....	64
2.3.5 Nueva carta de clasificación.....	65
2.4 MÉTODOS PARA DETERMINAR EL LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO .....	67
2.4.1 Introducción.....	67
2.4.2 Método de la copa de Casagrande .....	67
2.4.3 Método del penetrómetro de cono.....	73
2.4.4 Comparación copa de Casagrande y penetrómetro de cono .....	74
2.4.5 Métodos usados para determinar el límite plástico .....	75
CAPITULO 3. MUESTRAS DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO ..	77
3.1 TOMA DE MUESTRAS .....	77
3.2 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO .....	82

CAPITULO 4. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS DE POPAYÁN CON EL SUCS, ASSHTO Y EL NUEVO MÉTODO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS .....	89
4.1 RESULTADOS .....	89
4.2 CLASIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS SEGÚN SUCS Y AASHTO .....	94
4.3 CLASIFICACION DE LAS MUESTRAS SEGÚN EL NUEVO MÉTODO .....	99
4.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	108
CAPITULO 5. ESTUDIO EXPERIMENTAL COMPARATIVO DE TRES MÉTODOS PARA ENCONTRAR EL LÍMITE LÍQUIDO EN SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS DE POPAYÁN .....	116
5.1 RESULTADOS .....	116
5.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	124
5.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	130
CAPITULO 6. CONCLUSIONES.....	140
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	145
ANEXOS.....	150

## LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Permitividad (constante dieléctrica) y conductividad eléctrica de los fluidos usados en la nueva clasificación. Valores según Jang y Santamarina, 2015. ....	64
Tabla 2. Referencia de las muestras tomadas para el estudio. ....	77
Tabla 3. Resumen programa de laboratorio ejecutado para las muestras en el estudio. ....	80
Tabla 4. Resumen de ensayos y normas utilizadas en la investigación .....	82
Tabla 5. Resultados de todos los límites líquidos determinados con cada líquido y a cada suelo por los tres métodos. ....	90
Tabla 6. Resultados promedio de los límites líquidos determinados a cada suelo para el método de Casagrande (Ranurador plano y curvo) y el método del penetrómetro de cono. ....	91
Tabla 7. Resultados de límites de límites plásticos por método de rollo y método de Feng. ....	92
Tabla 8. Contenido de arena, limo y arcilla en cada uno de los cinco suelos teniendo en cuenta toda su gradación. ....	94
Tabla 9. Contenido de limo y arcilla en cada uno de los cinco suelos teniendo en cuenta solo la fracción fina (Pasante Tamiz No 200). ....	94
Tabla 10. Resumen de clasificación de los cinco suelos por SUCS. ....	95
Tabla 11. Resumen de clasificación de los cinco suelos por el sistema AASHTO	97
Tabla 12. Relaciones de LL método de Penetrómetro de cono para la determinación de la sensibilidad eléctrica. ....	99
Tabla 13. Relaciones de LL método de Casagrande-Ranurador curvo para la determinación de la sensibilidad eléctrica. ....	100
Tabla 14. Determinación de la sensibilidad eléctrica de los suelos. Límites líquidos método Penetrómetro de cono y Casagrande-Ranurador curvo. ....	100
Tabla 15. Resumen de clasificación de los cinco suelos según la nueva clasificación (Jang y Santamarina, 2015). ....	103
Tabla 16. Resumen de clasificación de los cinco suelos por los tres Sistemas: SUCS, AASHTO y Nueva clasificación (Jang y Santamarina, 2015). ....	107

Tabla 17. Resumen de las correlaciones obtenidas por los tres métodos de determinación del límite líquido. ....	123
Tabla 18. Variación porcentual entre los límites líquidos obtenidos con cada método.....	124
Tabla 19. Resumen estadística descriptiva para los ensayos con agua desionizada.....	127
Tabla 20. Resumen estadística descriptiva para los ensayos con salmuera .....	128
Tabla 21. Resumen estadística descriptiva para los ensayos con kerosene con penetrómetro de cono.....	129
Tabla 22. Precisión lograda con cada método de determinación del límite líquido según los cinco ensayos que se realizaron a cada suelo por tipo de fluido.....	129

## LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Ubicación de volcanes y de suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. Adaptado (Lizcano et. al., 2006) .....	23
Figura 2. Clasificación de minerales arcillosos propuesta por Grim (1953). .....	24
Figura 3. Estructura atómica del Tetraedro de Sílice. ....	25
Figura 4. Estructura atómica del Octaedro de Aluminio. ....	25
Figura 5. Estructura atómica del Octaedro de Magnesio. ....	26
Figura 6. Perfil estratigráfico típico de suelos derivados de cenizas volcánicas. (Lizcano et. al., 2006). ....	30
Figura 7. Ubicación de volcanes cercanos a la ciudad de Popayán. ....	31
Figura 8. Naturaleza del suelo en Popayán. Proporción mínima de suelo derivado de cenizas volcánicas. Datos según Torres (1997). ....	32
Figura 9. Proceso de formación de suelos derivados de cenizas volcánicas. Adaptado (Herrera, 2006). ....	36
Figura 10. Carta de plasticidad usada actualmente para clasificar suelos finos con SUCS. ....	40
Figura 11. Clasificación granulométrica de los suelos en algunos países del mundo. Modificado (Jang & Santamarina, 2015) .....	41
Figura 12. Carta de plasticidad usada actualmente para clasificar suelos finos AASHTO. ....	42
Figura 13. Modificación a la carta de plasticidad (SUCS) propuesta por Polidori para clasificar suelos finos. (Polidori, 2003).....	44
Figura 14. (a) Varios suelos ubicados en la carta de plasticidad. (b) Minerales de arcilla ubicados en la carta. Regresión lineal entre el límite líquido y el índice de plasticidad (Jang & Santamarina, 2015) .....	46
Figura 15. Representación gráfica de la sensibilidad eléctrica planteada en el nuevo sistema de clasificación. ....	54
Figura 16. Representación del efecto doble capa difusa. ....	62

Figura 17. Formación de la doble capa difusa en torno a un cristal según teoría de Gouy-Chapman-Stern. Modificado de (Juarez & Rico, 2005).	63
Figura 18. Interpretación de las fuerzas de atracción y de repulsión interpartículas en el nuevo método de clasificación.	65
Figura 19. Nueva carta de clasificación de suelos finos propuesta por Jang y Santamarina (2015).	66
Figura 20. Medidas y esquema de la copa de Casagrande para la determinación del límite líquido. (ASTM, 2005).	68
Figura 21. Medidas, esquema y fotografía del ranurador plano para el método de Casagrande. (ASTM, 2005).	70
Figura 22. Fotografías que demuestran la dificultad para la determinación del límite líquido por el método de Casagrande con el kerosene como fluido de poro.	71
Figura 23. Medidas, esquema y fotografía del ranurador curvo para el método de Casagrande. (AASHTO, 2013).	72
Figura 24. Penetrómetro de cono para la determinación del límite líquido de suelos.	73
Figura 25. Mapa de la zona urbana de Popayán con puntos de muestreo. Captura de Google maps.	78
Figura 26. Fotografías de las 5 muestras de suelo utilizadas en el estudio.	79
Figura 27. Registro fotográfico de la prueba de Hidrómetro.	83
Figura 28. Registro fotográfico de la prueba de peso específico.	84
Figura 29. Registro fotográfico prueba de granulometría.	85
Figura 30. Registro fotográfico de la determinación del límite líquido por el método de Casagrande.	86
Figura 31. Registro fotográfico determinación del límite líquido por el método del Penetrómetro de cono.	87
Figura 32. Registro fotográfico determinación del límite plástico por el método de rollo.	88
Figura 33. Gráfica de relación entre los límites plásticos según Feng y método de rollo.	92
Figura 34. Curvas granulométricas de los cinco suelos estudiados en la investigación.	93
Figura 35. Ubicación de los cinco suelos en la carta de plasticidad (SUCS) según resultados con método de Casagrande-Ranurador plano.	95

Figura 36. Ubicación de los cinco suelos en la carta de plasticidad (SUCS) según resultados con método de Casagrande-Ranurador curvo .....	96
Figura 37. Ubicación de los cinco suelos en la carta de plasticidad (SUCS) según resultados con método de Penetrómetro de cono. ....	96
Figura 38. Ubicación de los cinco suelos en la carta de la AASHTO según resultados con método de Casagrande-Ranurador plano. ....	97
Figura 39. Ubicación de los cinco suelos en la carta de la AASHTO según resultados con método de Casagrande-Ranurador curvo. ....	98
Figura 40. Ubicación de los cinco suelos en la carta de la AASHTO según resultados con método de Penetrómetro de cono. ....	98
Figura 41. Representación gráfica de la sensibilidad eléctrica de los cinco suelos. Método Penetrómetro de cono. ....	101
Figura 42. Representación gráfica de la sensibilidad eléctrica de los cinco suelos. Método Casagrande-Ranurador curvo.....	102
Figura 43. Ubicación de los cinco suelos en la nueva carta de clasificación. Límites líquidos determinados por el método de Penetrómetro de cono. ....	105
Figura 44. Ubicación de los cinco suelos en la nueva carta de clasificación. Límites líquidos determinados por el método de Casagrande-Ranurador curvo. ....	106
Figura 45. Correlacion entre limites líquidos determinados con ranurador plano y limites líquidos determinados con ranurador curvo para agua desionizada.....	117
Figura 46. Correlacion entre limites líquidos determinados con ranurador plano y limites líquidos determinados con ranurador curvo para salmuera. ....	117
Figura 47. Curva que relaciona los límites líquidos determinados con ranurador plano y los límites líquidos determinados con ranurador curvo. ....	118
Figura 48. Correlación entre limites líquidos determinados con ranurador plano y limites líquidos determinados con cono para agua desionizada. ....	119
Figura 49. Correlación entre límites líquidos determinados con ranurador plano y límites líquidos determinados con cono para salmuera. ....	119
Figura 50. Curva que relaciona los límites líquidos determinados con ranurador plano y los límites líquidos determinados con cono. ....	120
Figura 51. Correlación entre limites líquidos determinados con ranurador curvo y límites líquidos determinados con cono para agua desionizada.....	121
Figura 52. Correlación entre límites líquidos determinados con ranurador curvo y límites líquidos determinados con cono para salmuera. ....	121

Figura 53. Curva que relaciona los límites líquidos determinados con ranurador curvo y los límites líquidos determinados con cono.....	122
Figura 54. Ranuras típicas logradas con el ranurador plano (a) y con el ranurador curvo (b).....	132
Figura 55. Descripción típica de las muestras con Kerosene y Salmuera luego de ser secadas al horno en el ensayo del límite líquido.....	136



## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Resultados límite líquido, copa de Casagrande-Ranurador plano .....	150
Anexo B. Resultados límite líquido, copa de Casagrande-Ranurador curvo .....	180
Anexo C. Resultados límite líquido, Penetrómetro de cono .....	215
Anexo D. Resultados límite plástico, método del rollo .....	260
Anexo E. Resultados límite plástico, método Feng (2000) .....	262
Anexo F. Resultados gravedad específica.....	265
Anexo G. Resultados ensayo de Hidrómetro .....	269
Anexo H. Resultados granulometría .....	287

# CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la teoría de la mecánica de suelos se han clasificado los suelos en dos grandes grupos: suelos de grano grueso y suelos de grano fino. En los suelos de grano grueso, la principal propiedad para su caracterización es el tamaño, así se distingue entre las arenas y las gravas. Por otra parte, en los suelos de grano fino, la difícil medición de su tamaño y el desarrollo de nuevos comportamientos, han dado lugar a la aplicación de otros parámetros para su caracterización, estos son los límites de Atterberg.

Actualmente se aplican dos sistemas de clasificación de suelos: sistema de clasificación de la *American Association of State Highway Officials* (AASHTO) y Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Estas dos metodologías parten de la misma información: granulometría o distribución de tamaños del suelo y los límites de Atterberg, aunque son dos sistemas de clasificación distintos. El SUCS se utiliza de forma global para caracterizar suelos finos, con base a la carta de plasticidad de Casagrande. Diversos estudios e investigaciones, han demostrado que este método discierne en el comportamiento real de los suelos predominantemente cohesivos, lo cual representa limitaciones para poder entender y predecir de una mejor forma su respuesta frente a las acciones y necesidades del medio. De allí que investigadores dedicados en el área de la Geotécnica han venido proponiendo nuevos métodos e incluso parámetros para clasificar a los suelos finos.

Precisamente, los investigadores Junbong Jang y Juan Carlos Santamarina publicaron en la edición diciembre de 2015 de la prestigiosa revista "Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering" un nuevo sistema de clasificación de suelos finos, la cual será objeto de estudio en esta tesis. Esta clasificación presenta un modelo moderno debido a que involucra las propiedades químicas del suelo, los fluidos de poro y la mineralogía de las partículas; temáticas que han tomado ahínco en las últimas investigaciones alrededor del mundo en el área de geotecnia y que no se tienen en cuenta en la mayoría de los conceptos clásicos aplicados en el área de la mecánica de suelos.

Lo real es que existe una carta de plasticidad usada globalmente, sin embargo, presenta inconsistencias en la clasificación de suelos con un alto contenido de materia orgánica o algunos suelos arcillosos que se ubican por debajo de la línea "A" y son clasificados como limos aun con límites líquidos tan altos como 250 (Jang & Santamarina, 2015). Lo ideal es probar la veracidad de un nuevo sistema de clasificación con conceptos modernos, aplicándolo por primera vez en Colombia particularmente a suelos de la ciudad de Popayán, lo cual representa un liderazgo en investigación para la Universidad del Cauca.

En el departamento del Cauca y Popayán particularmente, la formación geológica está compuesta por depósitos de materiales finos volcánicos en la cubierta superficial, constituidos principalmente por cenizas transportadas por el viento y el agua (IGAC, 1993), de tal forma que cualquier estructura de la región responderá bajo el comportamiento de suelos que en su mayoría son finos, y que como se mencionó, son el objetivo de la clasificación propuesta.

Los sistemas de clasificación de suelos actualmente empleados a nivel mundial y el nuevo sistema de clasificación, usan el límite líquido del suelo como uno de los parámetros básicos para clasificarlo. Actualmente existen tres métodos para poder determinar dicho parámetro. El primero de ellos es la copa de Casagrande con ranurador plano, aceptado por la *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2005); el segundo es la copa de Casagrande con ranurador curvo, reglamentado por la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO, 2013) y el tercero es el penetrómetro de cono Británico recomendado por la *British Standards Institution* (BSI, 1990).

Actualmente en Colombia el Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2013) establece el método de Casagrande con ranurador plano como principal y único método para determinar el límite líquido de suelos en base a las normas de la ASTM. Dado que no hay mayores estudios en el tema, surge la necesidad de establecer realmente qué tan divergentes son los resultados obtenidos con cada método aplicado a muestras de suelo de la ciudad de Popayán.

## 1.2 ORGANIZACIÓN DE ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En esta tesis se busca aplicar un nuevo sistema de clasificación de suelos propuesto por Jang y Santamarina (2015). El Dr Junbong Jang es Ph.D. del Georgia Institute of Technology (Atlanta, EUA) y actualmente aspirante a Posdoctorado en King Abdullah University of Science and Technology (KAUST) (Thuwal, Arabia Saudí), por otra parte el Dr Juan Carlos Santamarina es Ph.D. de Purdue University (West Lafayette, EUA) y en la actualidad se desempeña como docente en KAUST; con dos libros y más de doscientas publicaciones es un importante académico miembro del *Committee on Geological and Geotechnical Engineering at the USA National Academies*.

Esta investigación es motivada por el deseo de estudiar el comportamiento de suelos finos y así poder comprender de una mejor manera su incidencia en obras ingenieriles. El desarrollo de este estudio parte de los hallazgos en el estado del arte, la revisión del método de clasificación planteado, seguido por el programa experimental con la revisión y discusión de resultados.

El desarrollo de este trabajo investigativo es de la siguiente forma:

En el capítulo 2 se plantea el marco teórico de este trabajo de investigación, iniciando con la descripción de los suelos que son derivados de cenizas volcánicas, haciendo un breve recuento de su proceso de formación, desde la emanación hasta la depositación y se detallan algunos pormenores de sus propiedades físico-químicas y mecánicas. Se continúa haciendo un breve recuento de la ubicación de este tipo de suelos en Colombia y específicamente en la ciudad de Popayán. Seguidamente se caracterizan los tres métodos para determinar el límite líquido de suelos y los métodos empleados para el límite plástico.

Al final de este capítulo se detallan los actuales y el nuevo sistema de clasificación de suelos. Para este último se explican las bases teóricas en que se apoya el método de clasificación para suelos finos propuesto por Jang y Santamarina, 2015, con base a sus dos parámetros fundamentales: límite líquido de suelos y sensibilidad eléctrica. Para ello, se hace una descripción de las principales propiedades relacionadas con estos parámetros y su incidencia en el comportamiento de los suelos.

En el Capítulo 3 se aprecian los datos generales de las muestras tomadas aleatoriamente en la ciudad de Popayán y los ensayos realizados a cada una de estas.

El Capítulo 4 describe el estudio experimental de clasificación de suelos derivados de cenizas volcánicas de Popayán con el SUCS, AASHTO y el nuevo método de clasificación; iniciando con el proceso de clasificación y finalmente los resultados obtenidos.

En el Capítulo 5 se presenta el estudio experimental comparativo de los tres métodos para determinar el límite líquido de un suelo; dicho estudio se realizó a las mismas muestras obtenidas para el estudio de clasificación de suelos. Se describen los resultados obtenidos con cada método y se realiza un análisis estadístico para determinar la correlación y el nivel de confianza obtenido en la investigación.

Finalmente en el Capítulo 6 se detallan las conclusiones que se han derivado de esta tesis de investigación.

## **CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS**

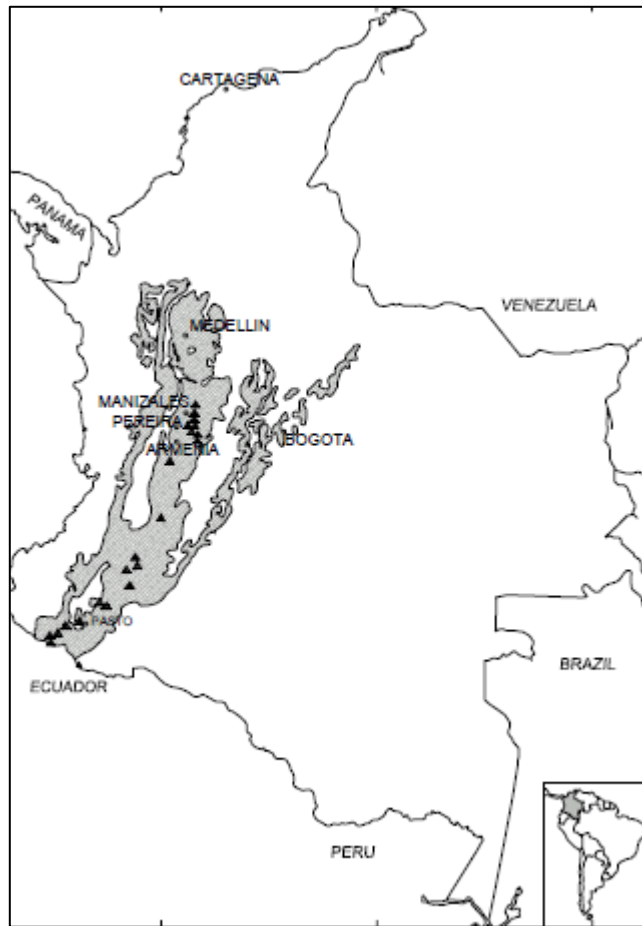
#### **2.1.1 Introducción**

Las cenizas volcánicas son generadas a partir de la fragmentación del magma y de otros materiales en el cono del volcán que provienen de erupciones anteriores (Büttner et. al., 1999), los cuales al meteorizarse generan depósitos de suelos residuales cuyas características dependerán de los elementos químicos presentes durante el proceso.

En Colombia, los suelos derivados de cenizas volcánicas o suelos alofánicos, cubren gran parte de la región Andina debido a que las cordilleras oriental, central y occidental la atraviesan de sur a norte y comprenden la mayoría de macizos volcánicos en el país. Esta región se caracteriza porque concentra la mayor población en Colombia y es la que proyecta un mayor crecimiento económico ya que la mayoría de las grandes urbes se concentran allí. En la Figura 1 se aprecia la ubicación de los suelos derivados de cenizas volcánicas y la de los principales macizos volcánicos en el país.

Las propiedades de estos suelos pueden diferir según las técnicas usadas en laboratorio y en la exploración de las condiciones in situ, dada la alta sensibilidad que presentan durante la fabricación de la muestra. Los principales problemas de tipo geotécnico abarcan la inestabilidad de taludes, alta sensibilidad, agrietamiento y dificultades tales como humedad excesiva y consistencia muy blanda al ser usados como materiales de construcción (Lizcano et. al., 2006).

Lizcano et. al., (2006) sostienen que los criterios conocidos para el diseño y construcción de estructuras geotécnicas resultan inaplicables en presencia de estos materiales y sugieren métodos diferentes a los convencionales (e.g. SUCS) para su caracterización, los cuales involucren ensayos de mineralogía, capacidad de intercambio catiónico y conductividad eléctrica; permitiendo analizar la influencia de la composición del suelo sobre su comportamiento general.



**Figura 1. Ubicación de volcanes y de suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. Adaptado (Lizcano et. al., 2006)**

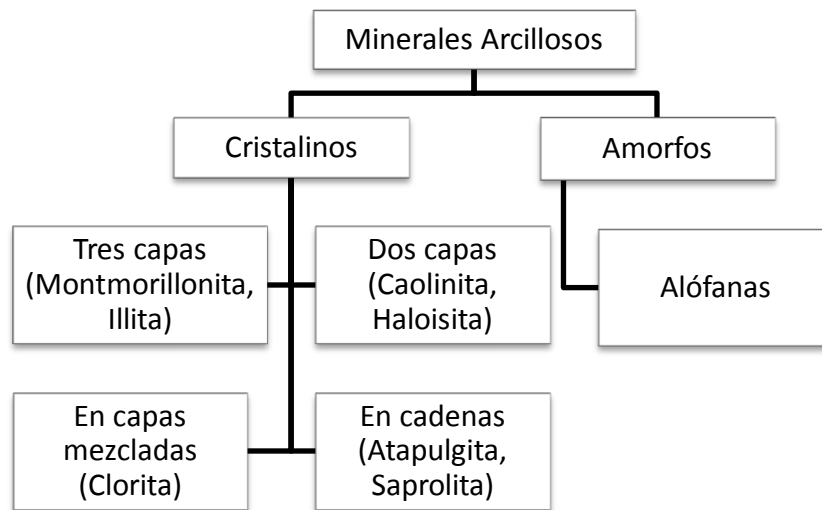
Polidori (2015) por otra parte señala que los minerales de arcilla no laminares como las alófanas y haloisitas, presentes muy frecuentemente en estos suelos derivados de cenizas volcánicas, desarrollan un comportamiento variado aun siendo del grupo de las arcillas, por lo que asegura que caracterizar a los suelos que presentan estos minerales no es fácil aunque presentan características que hacen al suelo más “seguro” comparado con aquellos que contienen minerales de arcilla laminares (e.g., caolinitas, illitas, montmorillonitas) en el manejo de la ingeniería (e.g., menor plasticidad, mayor ángulo de fricción interna).

### **2.1.2 Mineralogía**

Como ya se mencionó, los suelos derivados de cenizas volcánicas están compuestos principalmente por minerales arcillosos que no son de tipo laminar. Esta comparación fue estudiada por Grim (1953) quien planteó una clasificación

de minerales arcillosos dividiendolos en dos grandes grupos: amorfos y cristalinos (ver Figura 2). Los minerales amorfos se caracterizan por tener una estructura irregular, no laminar y porosa, estos minerales no han tenido las condiciones o el tiempo necesario para una buena formación del cristal. Los minerales arcillosos amorfos estan compuestos por el grupo de la alófana, mineral típico en suelos derivados de cenizas volcánicas (Lizcano et.al., 2006; Luna, 1975).

Entre los minerales arcillosos cristalinos Grim distinguió aquellos conformados por (1) dos capas, (2) tres capas, (3) minerales con estructura de cadenas y (4) minerales de capas mezcladas regularmente. Del grupo (1) se destacan los minerales equidimensionales (e.g. caolinita) y los elongados (e.g. haloisita). En el grupo (2) los minerales expansibles montmorillonita, illita y vermiculita, son los más comunes. En el grupo (3) atapulgita y saprolita son los que más se destacan. Finalmente en el grupo (4) la crolita es el único representante.



**Figura 2. Clasificación de minerales arcillosos propuesta por Grim (1953).**

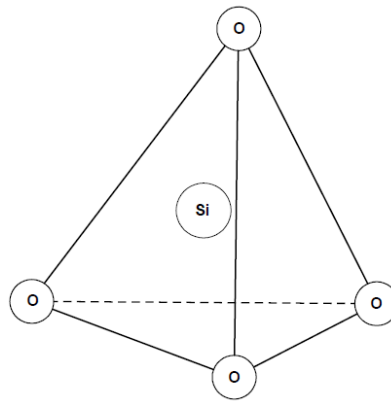
Los minerales arcillosos estan compuestos por una estructura cristalina compleja, y se presentan en granos extremadamente finos con superficie específica elevada, su comportamiento está influenciado por la actividad electroquímica y presentan afinidad por el agua debido principalmente a que tienen una carga neta negativa (Polanco, 2009). Resultados obtenidos por difracción de rayos X muestran que los minerales arcillosos con estructura cristalina presentan un patrón definido y que los átomos se disponen en capas, en forma laminar.



### 2.1.2.1 Estructuras básicas de los minerales arcillosos.

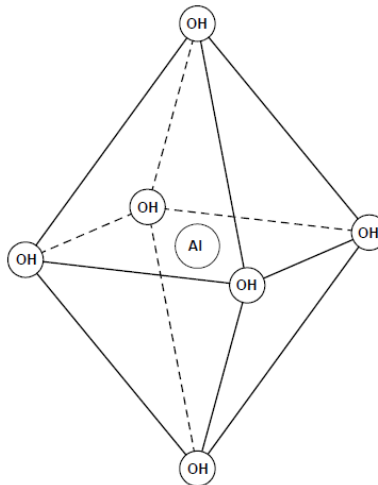
Los minerales arcillosos cristalinos y amorfos están constituidos principalmente por tres estructuras básicas: Tetraedro de sílice, Octaedro de aluminio y Octaedro de magnesio.

- Tetraedro de Sílice: Está compuesto por un ión de Silicio rodeado por cuatro iones de Oxígeno equidistantes del Silicio y ubicados en forma de triángulo equilátero. La unión de estos tetraedros da lugar a una lámina de Sílice la cual se representa en la literatura como un trapecio y tridimensionalmente como se aprecia en la Figura 3.



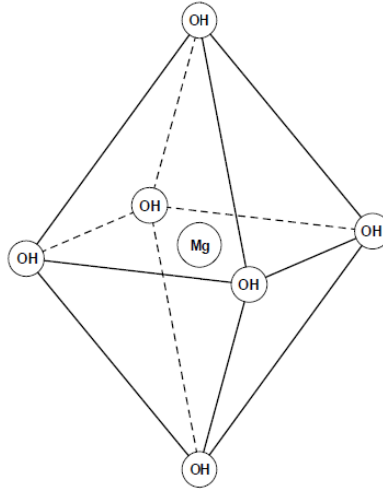
**Figura 3. Estructura atómica del Tetraedro de Sílice.**

- Octaedro de Aluminio: Está compuesto por seis iones de Hidróxilo que rodean un ión de Aluminio ubicado en el centro (ver Figura 4).. Usualmente se lo suele representar con un rectángulo.



**Figura 4. Estructura atómica del Octaedro de Aluminio.**

- Octaedro de Magnesio: Esta formado por un ión de Magnesio rodeado por seis iones de Hidróxilo (ver Figura 5Figura 4). La unión de estos octaedros origina una lámina magnésica la cual se simboliza mediante un rectángulo.



**Figura 5. Estructura atómica del Octaedro de Magnesio.**

La unión de algunas de estas capas originan los minerales de arcilla junto a la presencia de otros cationes en la naturaleza como Hidrógeno, Potasio, Hierro, etc. que generan enlaces y estructuras de dos capas (Bicapa) y de tres capas (Tricapa). Estas uniones conforman los grupos de arcilla conocidos: Caolinita, Illita, Esmeclita y otros menos comunes.

#### 2.1.2.2 Origen de la carga superficial neta negativa en los minerales de arcilla.

La carga neta de la partícula se define teóricamente como la sumatoria de dos tipos de carga: carga permanente y carga variable. La carga permanente es generada durante el proceso de formación de las láminas e involucra procesos químicos que dependen de las estructuras que conforman la partícula. La carga variable adquirida por la partícula es dependiente de la actividad iónica y el pH del medio que la rodea, ya sean otros minerales, fluidos de poro, gases, etc.

Todas las partículas de suelo poseen una carga eléctrica en su superficie (Polanco, 2009). En teoría, esta carga puede ser netamente positiva o negativa, lo cierto es que en el caso de los minerales de arcilla se han medido generalmente cargas negativas. Estas cargas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- Sustituciones isomórficas dentro de la estructura.
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- Disociación de los grupos Hidróxilos accesibles.

Sustituciones isomórficas dentro de la estructura: Este proceso es el responsable de la carga permanente de la partícula y supone alrededor del 80% de la carga neta de la partícula. Este fenómeno se da cuando un Cation ( $\text{Si}^{+4}$ ,  $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ) que forma parte de la red cristalina de una unidad estructural básica es reemplazado por otro Cation también formador de red cristalina. Este proceso se puede dar durante la unión de las unidades de Sílice, Magnesio y Aluminio para formar un mineral arcilloso o por alteraciones químicas del medio. La carga eléctrica negativa se da, por ejemplo, cuando un ion de Aluminio ( $\text{Al}^{+3}$ ) ocupa el lugar que le correspondía a un Silicio ( $\text{Si}^{+4}$ ), produciéndose así un déficit de carga positiva. En otras ocasiones puede suceder que dicha sustitución produzca carga positiva cuando por ejemplo, un ión de Magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ) es sustituido por un Hierro ( $\text{Fe}^{+3}$ ), e incluso puede pasar que una sustitución no produzca cambios en la carga neta.

La mayoría de los minerales de arcilla están compuestos por la unión de Tetraedros de Sílice con Octaedros de Aluminio o Tetraedros de Sílice con Octaedros de Magnesio y el caso más común en la generación de carga negativa. La complejidad de este tema es tal que muchos autores simplemente asumen como postulado el que la mayoría de minerales de arcilla tienen carga superficial negativa.

Esta sustitución se da sólo cuando el radio iónico del ión desplazado es igual al ión que desplaza, es decir, que la distancia entre el centro de sus núcleos y el electrón estable más alejado es la misma. Los minerales de caolinita no muestran sustitución isomórfica lo que ocasiona que su capacidad de intercambio catiónico sea baja. La illita y montmorillonita presentan mayor sustitución isomórfica lo que les confiere una capacidad de intercambio catiónico mayor.

Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas: Este proceso genera carga variable en una partícula. El término variable se debe a que depende de las condiciones del medio, principalmente a la cantidades de cationes presentes y que pueden ser atraídos por el fenómeno de intercambio catiónico. Básicamente se debe a la discontinuidad de la estructura en las caras de una lámina lo cual conduce a que los Oxígenos ( $\text{O}^{-2}$ ) e Hidróxilos ( $\text{OH}^{-}$ ) que quedan en la superficie atraigan cationes. De allí que las superficies basales poseen carga negativa, mientras que los bordes son generalmente positivos. Teniendo en cuenta la forma y la carga superficial es posible formar diversas asociaciones entre partículas en

suspensión acuosa, tales como borde-cara, borde-borde y cara-cara (Linares et. al., 1969).

Disociación de los grupos hidróxilos accesibles: Este fenómeno depende en gran medida del pH del medio que rodea la lámina de arcilla. El pH define la concentración de iones Hidronio presentes en una sustancia. En los bordes laterales de los paquetes estructurales de los minerales de arcilla existen grupos de Si-OH ó Al-OH en contacto directo con la fase líquida del suelo. Estos grupos pueden captar y disociar iones  $H^+$ ; por lo tanto en función de la abundancia de estos iones en la solución, se puede tener alguna de las siguientes situaciones:

- Si el pH del medio es menor a 7, es decir que la sustancia es ácida y por tal posee una alta concentración de iones hidronio ( $H_3O^+$ ), en los bordes de los cristales aparecerán cargas eléctricas positivas por la ruptura de los enlaces primarios, ya que los Hidróxilos y Oxígenos que componen los Octaedros y Tetraedros se verán fuertemente atraídos por los hidronios cuya carga es positiva. Esto además de influir en la carga superficial de las partículas induce a la unión con las caras de los cristales de otras partículas de arcilla (unión cara-borde).
- Si el pH es ligeramente ácido (~7) la influencia en la carga eléctrica superficial será nula.
- Si el pH es muy alcalino, es decir mayor a 7, la concentración de iones  $H^+$  será baja por lo tanto los iones  $OH^-$  que están en la solución compiten con el Oxígeno de las aristas por el Hidrógeno, si el pH es suficientemente alto, el hidrógeno será “arrancado” por la fuerza del Oxígeno de la arista quedando expuesto un sitio con carga negativa.

El conocimiento de la mineralogía de las partículas en un suelo fino ayudara a entender su comportamiento matricial. Los minerales de arcilla cristalinos tenderán a presentar un comportamiento similar según se tenga la misma composición. Caso distinto sucede en los minerales amorfos en donde no existe un patrón definido, lo cual dificulta preveer de una mejor manera el comportamiento de los suelos compuestos por dichos minerales.

### 2.1.2.3 Minerales de arcilla amorfos.

Los minerales más conocidos en el grupo de las arcillas amorfas son las alófanos. Dentro de este grupo existe una gran variedad de minerales con estructura molecular distinta (e.g., imogolita, hissingerita), pero que han sido clasificados en el mismo grupo debido a que se han encontrado en suelos derivados de cenizas volcánicas, de allí que en la literatura se suelen citar como suelos alofánicos. La

haloisita es un mineral de arcilla que resulta de la transición de un mineral amorfo (alófana) a un mineral cristalino (caolinita).

La alófana: Inicialmente Grim (1953) se refirió a la alófana como un mineral intermedio entre el cambio de un material vítreo a uno de apariencia terrosa, ocasionado por la pérdida de agua. Posteriormente, el término fue utilizado para referirse a minerales no cristalinos de arcilla, producto de la meteorización del vidrio volcánico (Van Olphen, 1977).

Actualmente, se define como un tipo de mineral arcilloso amorfo compuesto por Tetraedros de Sílice y Octaedros de Aluminio dispuestos en forma irregular y en ocasiones mezclados con otros Tetraedros. Si bien se considera amorfa por no tener un orden específico de Octaedros y Tetraedros, estos minerales tienen la misma estructura atómica que los minerales arcillosos cristalinos. Se forma a partir de cenizas volcánicas y materiales volcánicos en meteorización y anfótera, es decir, puede donar o recibir cationes, lo cual explica su alta capacidad de intercambio catiónico. Proporciona una estructura estable lo cual da lugar a una gran permeabilidad y lixiviación excesiva.

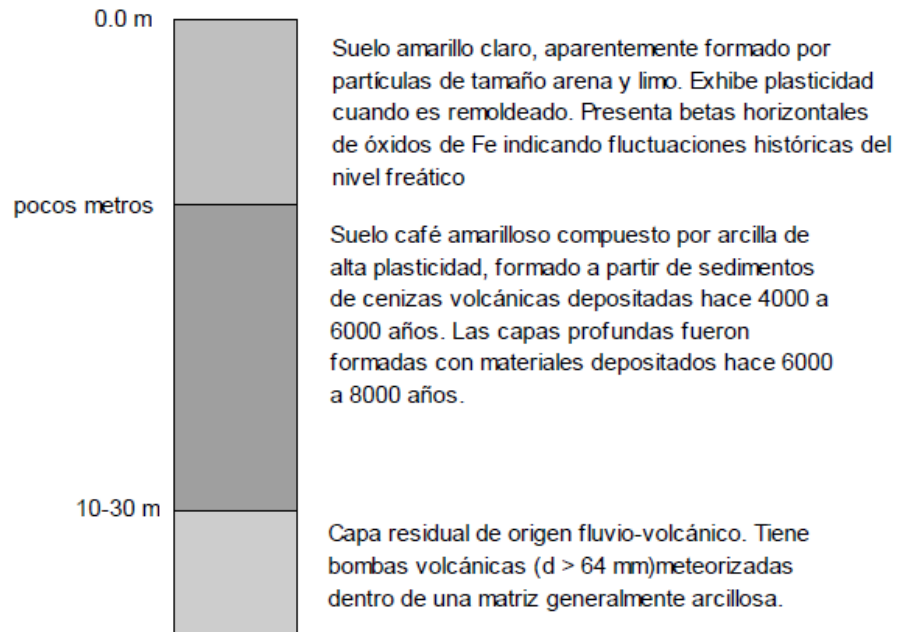
La haloisita: Debido a condiciones de meteorización de las cenizas volcánicas, sobre todo en ambientes húmedos, se desarrolla con el tiempo una serie mineralógica que inicia con el alofán, se meteoriza en haloisita, luego en metahaloisita y finalmente, debido a su deshidratación y envejecimiento, de manera muy poco probable forma la caolinita. La haloisita muchas veces es clasificada en la familia de la caolinita, sin embargo la forma de sus minerales es elongada como un bastón y no en forma de placa equidimensional como la caolinita.

Por otro lado, la estructura de la haloisita permite la introducción de una capa de moléculas de agua que separan cada una de sus estructuras básicas (Grim, 1953). La haloisita puede estar completamente hidratada, parcialmente hidratada o deshidratada; en este punto es donde se forma la metahaloisita. En suelos derivados de cenizas volcánicas es muy común encontrar este tipo de mineral, cuya estructura molecular es intermedia entre un mineral amorfo y uno cristalino.

### **2.1.3 Suelos derivados de ceniza volcánica en Colombia**

Diversos estudios en Colombia, han demostrado que el perfil estratigráfico de estos suelos consiste en una capa superficial de ceniza volcánica meteorizada, de espesor entre 10 y 30 metros hasta encontrar la capa de suelo residual volcánico. Lo anterior se puede apreciar en la Figura 6. La regla general planteada por

Lizcano et. al., (2006) es “...los suelos más profundos y más antiguos son suelos más finos y arcillosos”.

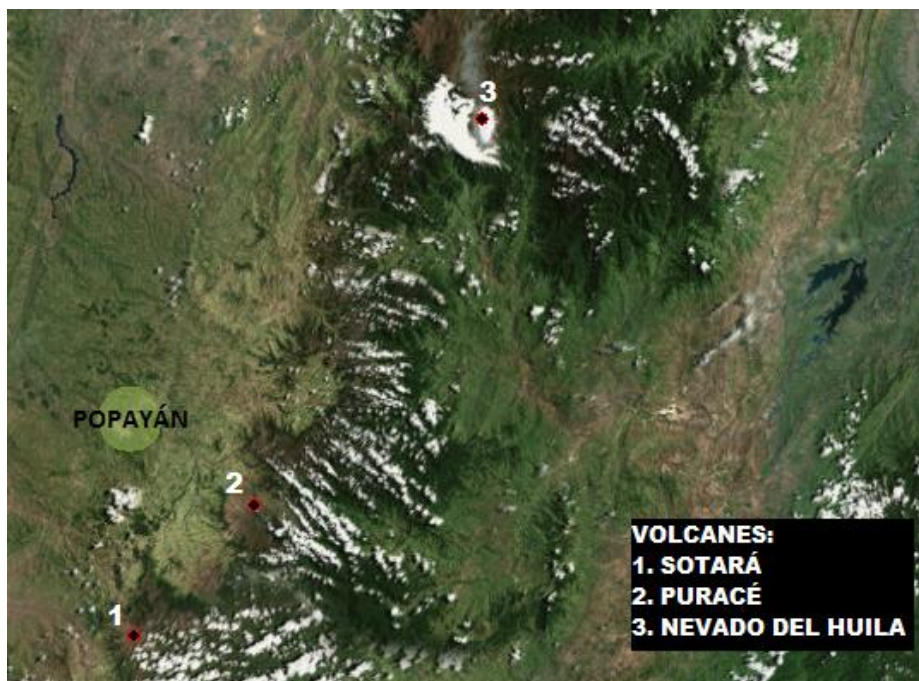


**Figura 6. Perfil estratigráfico típico de suelos derivados de cenizas volcánicas. (Lizcano et. al., 2006).**

#### 2.1.3.1 Suelos derivados de ceniza volcánica en Popayán.

El valle andino que va en dirección norte desde la planicie de Popayán al Quindío y en dirección sur hasta Quito ha sido producto del relleno volcánico que vino desde los centros de la cordillera central y de rocas cristalinas provenientes de la cordillera occidental y central (IGAC, 1993).

La planicie Popayán es una formación de relleno de materiales provenientes de la cadena volcánica de los Coconucos. Su área está delimitada al Norte con Santander de Quilichao, al Sur con la ciudad de Popayán, al Este con la Población de San Gabriel y al Oeste con el municipio del Tambo. El espesor de esta formación es variable, ya que se han encontrado zonas donde las cenizas fluctúan entre 1 y 2 m de profundidad hasta espesores de 1200 m en las áreas próximas a las fuentes volcánicas (Torres, 1997). Los principales macizos volcánicos generadores del material residual que constituyen esta formación se pueden apreciar en la Figura 7.



**Figura 7. Ubicación de volcanes cercanos a la ciudad de Popayán.**

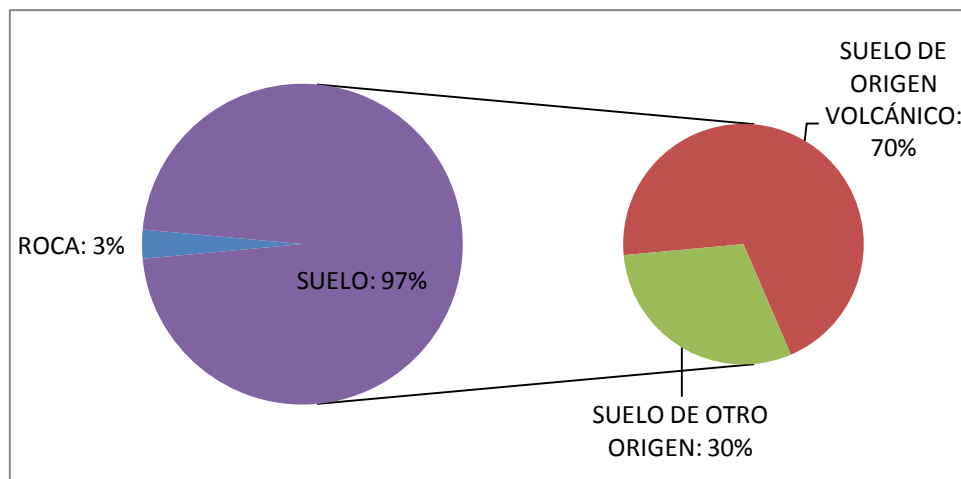
La formación Popayán está compuesta por tres tipos de materiales, en ocasiones estratificados (Polanco, 2009):

- Lavas ácidas andesíticas y micas, las cuales provienen de los volcanes Puracé y Sotará.
- Capas de materiales volcánicos depositados por arrastre.
- Materiales finos depositados superficialmente, constituidos de forma mayoritaria por cenizas volcánicas meteorizadas (i. e. areniscas, arcillas y conglomerados).

El material más común en la mayoría de los suelos encontrados en Popayán y sus inmediaciones es la alófana (Luna, 1975; IGAC, 1988), mineral típico de los suelos derivados de las cenizas volcánicas. Otros de los minerales presentes en suelos de la región (zona centro-occidental del país) son haloisita, cristobalita, caolinita, metahaloisita, imogolita y ocasionalmente gibsita (Herrera, 2006). De los diversos estudios que se han realizado en la ciudad de Popayán, se han encontrado suelos de textura mediana, carentes de plasticidad y subangulares en la superficie, que paulatinamente se tornan arcillosos y plásticos a medida que se profundiza en el perfil (Luna, 1975; Polanco, 2009; Torres, 1997).

El pH ácido a ligeramente ácido es una característica común de los suelos derivados de ceniza volcánica en Colombia, la cual se halla ligada a factores principalmente geológicos, ambientales y químicos. Entre los primeros se encuentran la mineralogía peculiar de estos suelos en relación con su origen y al régimen pluviométrico que contribuyó a su formación; entre los segundos, son importantes el alto contenido de Aluminio y la acidez orgánica intercambiable, contrarrestados parcialmente por las bases de cambio (Ca, Mg, Na y K). En el estudio realizado por Luna (1975) realizado de forma exhaustiva a suelos del departamento del Cauca, valores de pH iguales o superiores a 6.0 no se encontraron en la región debido al clima húmedo.

En la mecánica de suelos clásica, se ha hecho referencia básicamente a los minerales de arcilla cristalinos, lo cual no es de mayor aplicación en suelos de la región ya que según datos de Torres (1997) la mayoría del suelo residual en la zona de Popayán es de origen volcánico cuyo mineral principal es de tipo amorfo. La proporción en magnitud de los suelos de origen volcánico se puede apreciar en la Figura 8.



**Figura 8. Naturaleza del suelo en Popayán. Proporción mínima de suelo derivado de cenizas volcánicas. Datos según Torres (1997).**

#### 2.1.4 Proceso de formación

Las cenizas volcánicas emanadas durante una erupción, las cuales tienen un tamaño menor a 2 mm, pueden permanecer en el aire días o meses, tiempo durante el cual las partículas más finas pueden ser transportadas a una gran distancia y depositarse de forma irregular y en cantidades inusualmente grandes lejos de la fuente volcánica. Durante su expulsión y transporte, la distancia recorrida y las propiedades físico-químicas desarrolladas por las partículas



dependerán de la forma, propiedades aerodinámicas, carga electrostática, superficie específica, rugosidad y reacción partícula-aire (Riley et. al., 2003). Este proceso es lento y dará lugar a la formación de nuevas estratificaciones de suelo.

Tres mecanismos han sido identificados como los principales generadores de cenizas volcánicas, el primero de ellos es la ruptura del magma debido a vesiculación. La vesiculación se da por la explotación de las burbujas de aire producto del escape de gases que quedan atrapados dentro del magma, los cuales se expanden rápidamente y lo fracturan. Dicho fenómeno se da (1) por la despresurización del magma, lo cual se conoce como primera ebullición, o (2) durante la cristalización del magma cuando este inicia su enfriamiento lo cual ocasiona la liberación de calor latente de fusión, que en su momento hace que la presión de vapor permanezca alta, causando finalmente la formación de burbujas. Esto se conoce como la segunda ebullición.

El segundo mecanismo es la fragmentación del magma debido a los elevados esfuerzos térmicos que se producen cuando entra en contacto con el agua. El tercer y último es debido a la pulverización de la lava en las paredes de la chimenea del volcán durante la erupción.

#### 2.1.4.1 Emanación y transporte.

Durante la emanación se produce una nube de cenizas volcánicas cuya altura y formación dependerá de la energía de la erupción (Herrera, 2006). Las corrientes de viento son el principal agente que interviene en el movimiento de la nube de partículas suspendidas, la cual puede llegar hasta varios kilómetros lejos de la fuente. En todo este proceso desde la inmediata formación de la nube de cenizas, las partículas se van sedimentando y la nube se hace cada vez menos densa hasta llegar a desaparecer luego de días e incluso meses (Riley et. al., 2003).

Las propiedades del aire como temperatura y humedad, las características de las partículas como su composición química y tamaño y la interacción fluido-partículas, determinaran las condiciones de depositación de las cenizas. Mientras que las cenizas secas son producidas en las erupciones donde los fluidos presentes fueron totalmente consumidos en el proceso de conversión de la energía térmica en mecánica, las cenizas húmedas se producen cuando los fluidos fueron parcialmente consumidos durante la conversión. La depositación de las cenizas húmedas es distinta de las secas. Según Büttner et. al., (1999) los depósitos de cenizas secas alcanzan espesores del orden de metros por sus cenizas gruesas, mientras que las cenizas húmedas conforman espesores

generalmente del orden de centímetros, ya que sus sedimentos son delgados y de estructura pobremente organizada.

Otro tipo de transporte es el arrastre de las cenizas por la acción del agua (Luna, 1975). La dependencia arrastre-topografía influye en las propiedades del suelo, en relieves suaves los espesores de cenizas volcánicas son altos mientras que en relieves fuertes o quebrados el espesor de los suelos seguramente es menor.

#### 2.1.4.2 Cementación.

La cementación de suelos es la unión de partículas por la deposición de un cemento. Los cementos más abundantes son la Sílice, los carbonatos y los sesquióxidos (Jimenez & Justo, 1975). La cementación consiste en un sistema de enlaces que unen las partículas del suelo y llevan a la formación de agregaciones, estos enlaces son resultado de los procesos químicos, físicos, térmicos y biológicos que transforman el material original. En general, si la cementación es mayor, el suelo es aún más resistente.

Una vez depositadas las cenizas, entran en contacto con el suelo y junto con ello, con los minerales de sus partículas y fluidos. Los agentes cementantes llenan los intersticios entre los granos de los minerales o recubren las partículas de arcilla o grupos de partículas, con lo cual se forman agregados que unidos entre sí, generan toda una matriz de suelo. La manera como las partículas del suelo se agrupan depende principalmente de la distribución de tamaños y de la composición química del material y de los fluidos disponibles (Imeson & Vis, 1982). Las partículas se unen unas con otras a través de enlaces o agregaciones formados como resultado de los procesos de floculación y cementación.

La floculación es producida por fenómenos electrocinéticos de dos tipos. El primero se genera por el acercamiento de partículas cargadas negativamente a través de puentes de carga contraria o agentes floculantes tales como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ . La atracción entre las partículas se mantiene estable mientras persista el agente floculante. El segundo fenómeno de floculación, ocurre por la atracción electrostática entre los bordes positivos y las caras negativas de los minerales arcillosos. Este proceso es electrostáticamente más estable que el primero y ocurre comúnmente en suelos con pH ácidos que favorecen el incremento de cargas positivas. La cementación causada por partículas de arcilla se incrementa mientras mayores sean su superficie específica y su capacidad de intercambio catiónico (Herrera, 2006).

#### 2.1.4.3 Lixiviación.

Se conoce como un proceso de percolación debido principalmente a la precipitación, en donde los estratos más superficiales son lavados por los solventes líquidos que logran penetrar la estructura del suelo. En el proceso de formación de suelos, generalmente la lixiviación se da durante y después de la cementación. El proceso de la lixiviación dependerá de la distribución de tamaños en el suelo, área expuesta, superficie específica, tamaño de partículas, porosidad, presión capilar, y rugosidad o aspereza de las superficies.

La lixiviación produce el desplazamiento de sustancias solubles o de fácil dispersión; en general, las partículas más gruesas irán disminuyendo de tamaño. Por otra parte, este proceso produce la disolución de sales y minerales, de tal manera que el suelo se vuelve cada vez más ácido.

En Colombia, la infiltración y disolución son los procesos de mayor influencia en la formación de suelos derivados de cenizas volcánicas (Herrera, 2006). La lixiviación, disolución y factores climáticos (e.g. precipitación, humedad, viento) alteran físico-químicamente los minerales y dan paso a la formación de suelos derivados de cenizas volcánicas (Lizcano et. al.,2006). Este proceso dependerá principalmente de dos propiedades del suelo: su tasa de infiltración y permeabilidad. La infiltración hace referencia a la facilidad con la que el agua penetra el suelo desde el exterior, dependiendo así de la porosidad superficial. La permeabilidad representa la velocidad con la que el agua se desplaza a través de los poros del suelo.

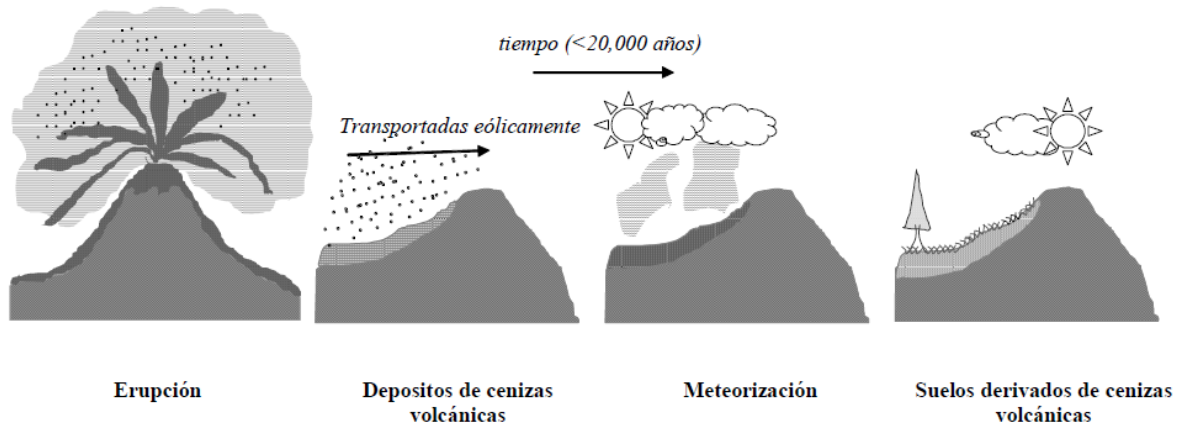
#### 2.1.4.4 Generación de suelos derivados de cenizas volcánicas.

La formación de suelos derivados de cenizas volcánicas está ampliamente ligada al clima (Imeson & Vis, 1982); por ejemplo, el contenido de alófana y materia orgánica disminuye si disminuye también la precipitación y humedad en el suelo. En climas húmedos estos suelos desarrollan propiedades bien particulares, como una alta superficie específica, contenido elevado de materia orgánica y bajas densidades aparentes (Imeson & Vis, 1982), además muestran una tendencia a formar agregación en las partículas de arcilla mostrando diferentes estructuras y niveles de cementación. (Ontiveros et. al., 2016).

Los suelos derivados de cenizas volcánicas se encuentran dentro del grupo de suelos residuales por lo que su comportamiento queda definido por su estructura, el tamaño de las partículas y la mineralogía de las arcillas presentes. La infiltración superficial en estos suelos es alta debido a la estructura poco cementada que se presenta generalmente en los suelos más jóvenes o superficiales, sin embargo,

las condiciones topográficas y vegetación pueden llegar a favorecer el escurrimiento superficial.

En la Figura 9, se resume a grosso modo el proceso anteriormente descrito, desde la generación de la nube de piroclastos durante la erupción hasta la conformación de suelos derivados de cenizas volcánicas.



**Figura 9. Proceso de formación de suelos derivados de cenizas volcánicas. Adaptado (Herrera, 2006).**

Las cenizas volcánicas se han clasificado según su composición, con relación a su contenido de sílice en riolíticas, dacíticas, andesíticas y basalto-andesíticas (Shoji et. al., 1993); sin embargo, en el caso de los suelos derivados de cenizas volcánicas, existen diversos sistemas de clasificación desarrollados desde el punto de vista geológico y agrónomo, siendo el más usado el propuesto por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), el cual no es de mayor manejo en Ingeniería Civil.

### 2.1.5 Propiedades físico-químicas

Los minerales de las partículas del suelo influyen en sus características, pero es la fracción fina la que desarrolla propiedades que pueden modificar completamente el comportamiento de toda la matriz de suelo. De los minerales más comunes en suelos derivados de cenizas volcánicas, los contenidos de alófana e imogolita disminuyen y los de haloisita aumentan conforme se reduce la precipitación, el drenaje y la altitud (Shoji et. al., 1993).

Los estratos de suelo cercanos a la superficie son más densos y con mayor fracción de limos y arenas que los suelos más profundos, en donde la densidad de la fracción arcilla toma importancia y la densidad de limo y arena tiende a disminuir.

Los suelos derivados de cenizas volcánicas tienen una estructura cementada muy porosa conformada por agregaciones aleatoriamente distribuidas de tamaño limo y minerales de la fracción arcilla (Lizcano et. al., 2006). Esta porosidad y demás características de su estado de cementación, dependen del grado de meteorización que han sufrido las partículas y de la distancia recorrida hasta su deposición.

Con respecto a la presencia de alofán, las partículas arcillosas con contenido de humedad natural pueden tener un comportamiento plástico, mientras que al ser secadas en horno, pueden sufrir un cambio en su estructura y no se comporten plásticamente. Este aspecto fue estudiado por investigadores de la Universidad de Chile, concluyendo que el secado al horno y al sol alteraba la estructura original del suelo, modificándose significativamente los límites de Atterberg (Paredes & Verdugo, 2004). Estos cambios irreversibles dependerán de la pérdida de humedad del suelo y se da en estos suelos residuales con contenido de alofán y haloisita.

Los procesos de secado modifican algunas propiedades del suelo, en especial la plasticidad, reduciéndose cuando el suelo es expuesto a secado al aire o al horno. Los límites de Atterberg pueden alcanzar valores significativamente altos cuando los ensayos son realizados a partir de la humedad natural y sin previo secado del material. De los minerales presentes en la fracción arcillosa, la alófana y la imogolita son los que más contribuyen en el incremento de la plasticidad. En su estudio Rants et. al. (2002), corroboraron que al someterse estos suelos a secado antes del ensayo se reducirían sus límites de Atterberg y su plasticidad.

La interacción de la superficie de los minerales de arcilla con iones disponibles en los fluidos tiene gran influencia sobre el comportamiento físico-químico de los suelos. Las fuerzas de repulsión o atracción entre las partículas, y consecuentemente su organización, están determinadas por el tipo y concentración de los iones que se adsorben sobre la superficie de los minerales. Estos iones permiten conocer la carga eléctrica de la superficie de las partículas. Por lo general se utiliza la capacidad de intercambio catiónico como la medida de la carga negativa o cantidad total de cationes adsorbidos en la superficie de las partículas bajo ciertas condiciones de temperatura, presión y pH. La haloisita,

alófana e imogolita desarrollan carga eléctrica dependiendo de las condiciones de pH (Grim, 1953).

La presencia de partículas en la escala nanométrica resalta la importancia de la superficie específica y por tal, de las fuerzas superficiales electromagnéticas sobre el comportamiento mecánico del suelo (Lizcano et. al., 2006). Este incremento de carga negativa con la profundidad es consecuencia del incremento de minerales de arcilla.

La humedad natural de los suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia es gobernada por el grado de alteración de los sedimentos inicialmente depositados. Suelos jóvenes, densos y con menor contenido de arcilla presentan una humedad natural inferior que suelos más evolucionados, porosos y con mayor contenido de arcilla, bajo similares condiciones climáticas. En cuanto a la permeabilidad de los suelos residuales, esta es generalmente mayor que en el caso de suelos sedimentarios, esto se debe a las características micro-estructurales que presentan las partículas de arcillas y su estructura abierta (Sanhueza et. al., 2011).

### **2.1.6 Propiedades mecánicas**

Actualmente los suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia presentan propiedades mineralógicas y físicas notablemente distintas de las que exhiben los sedimentos de cenizas volcánicas recién depositadas. Mientras que las cenizas emanadas se sedimentan alcanzando relaciones de vacíos que varían entre  $e = 0,8$  y  $e = 1,7$  (Herrera, 2006); la meteorización química lleva a la disolución y precipitación de nuevos minerales y a la formación de suelos residuales con una relación de vacíos muy alta y evidentes características de cementación.

La acción cementante es realizada por los minerales de la fracción de arcilla derivados de la meteorización de las cenizas volcánicas, principalmente por haloisita y posiblemente por alófana e imogolita. Estos minerales arcillosos se caracterizan porque presentan una estructura cristalina amorfa y débil, distinta a la de otras arcillas, como se mencionó anteriormente.

Los suelos volcánicos presentan un comportamiento geo-mecánico diferente a los tradicionales. Por ejemplo, poseen gran capacidad de retención de agua, humedades naturales elevadas, bajas densidades secas, elevados ángulos de fricción y cambios en su estructura dependiendo del tipo de secado completo (Paredes & Verdugo, 2004). La conductividad hidráulica de estos suelos es baja,

similar a la que exhiben arcillas y limos arcillosos de baja permeabilidad (Lizcano et. al., 2006).

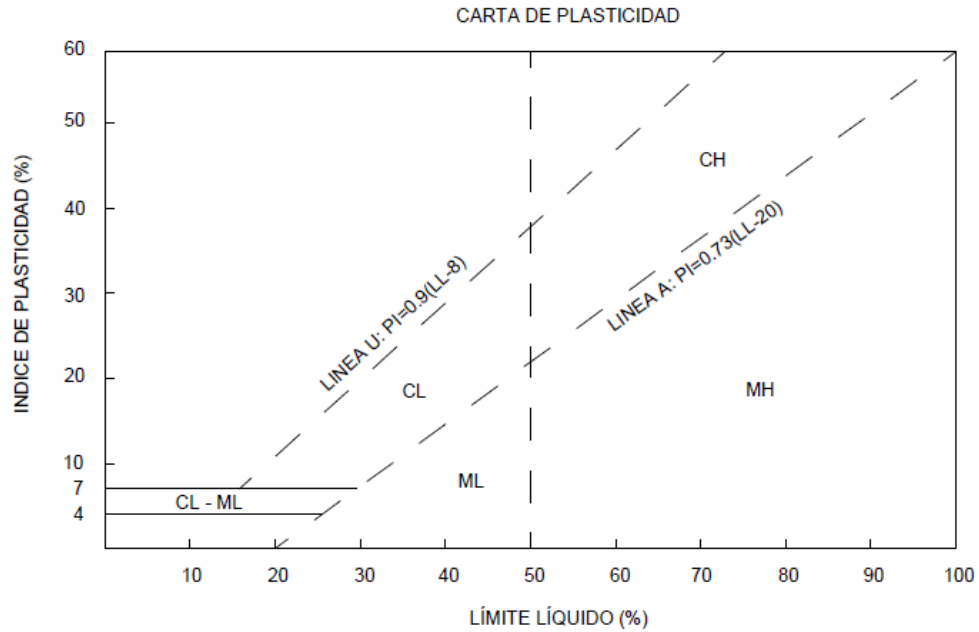
## **2.2 CLASIFICACIÓN DE SUELOS**

### **2.2.1 Actuales sistemas de clasificación**

Actualmente para clasificar suelos finos se utiliza la carta de plasticidad de Casagrande, empleada en el SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos). Esta carta fue planteada por Casagrande (1932, 1948) en donde sugirió además un método para determinar el límite líquido de los suelos por medio de la copa de Casagrande. Esta carta incluye la definición de plasticidad de suelos investigada por Atterberg (1911).

La carta de plasticidad de Casagrande (ver Figura 10) es una gráfica en donde se relaciona el índice de plasticidad (IP) vs el límite líquido (LL). La carta está dividida en dos grandes zonas separadas por la línea "A" ( $IP = 0.73 (LL - 20)$ ), por encima de ella se ubican las arcillas inorgánicas (C) y por debajo los limos inorgánicos (M). Esta línea fue definida por Casagrande (1948) producto de sus resultados experimentales. Además en la carta se puede distinguir entre los suelos de baja (L) con los de alta (H) plasticidad cuando el límite líquido es menor o mayor a 50%, respectivamente.

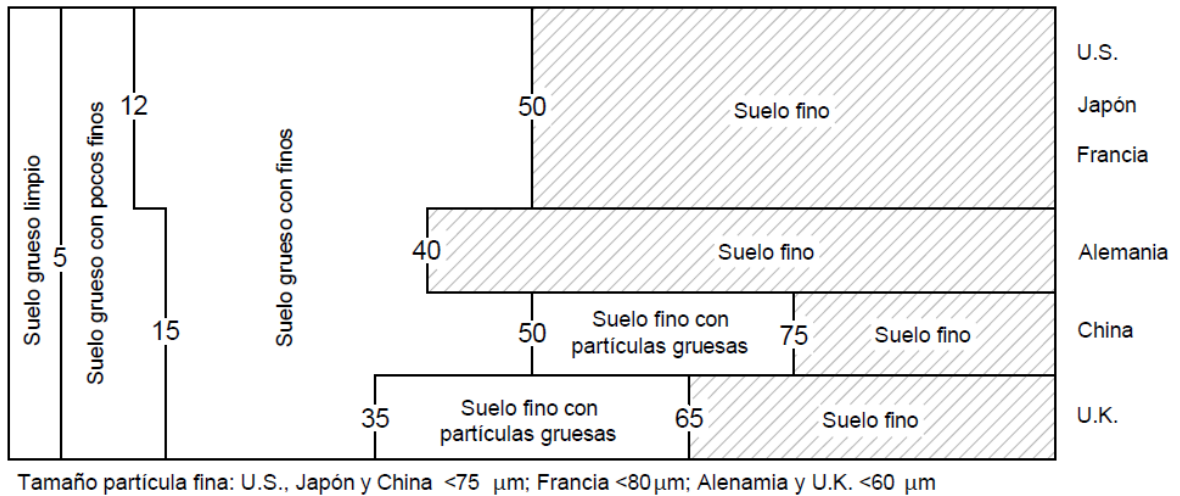
Otra línea importante conocida como la línea "U" ( $IP = 0.9 (LL - 8)$ ) es una referencia según la cual cualquier suelo en el planeta Tierra se debe ubicar por debajo de ella. Por último, el grupo limo arcilloso de baja plasticidad (ML-CL) está definido para índices de plasticidad de 4 a 7 y por encima de la línea "A". Actualmente el SUCS es el sistema más utilizado en la clasificación de suelos finos.



**Figura 10. Carta de plasticidad usada actualmente para clasificar suelos finos con SUCS.**

A menudo es usual asumir que la fracción  $<2\mu\text{m}$  está compuesta enteramente por minerales de arcilla y esto no es cierto, ya que también hay partículas no arcillosas (Polidori, 2003). Como se puede apreciar en la Figura 11, no existe un acuerdo global en la definición de lo que se considera como fracción fina y fracción gruesa del suelo, esto evidentemente influye en la caracterización y clasificación de los suelos.



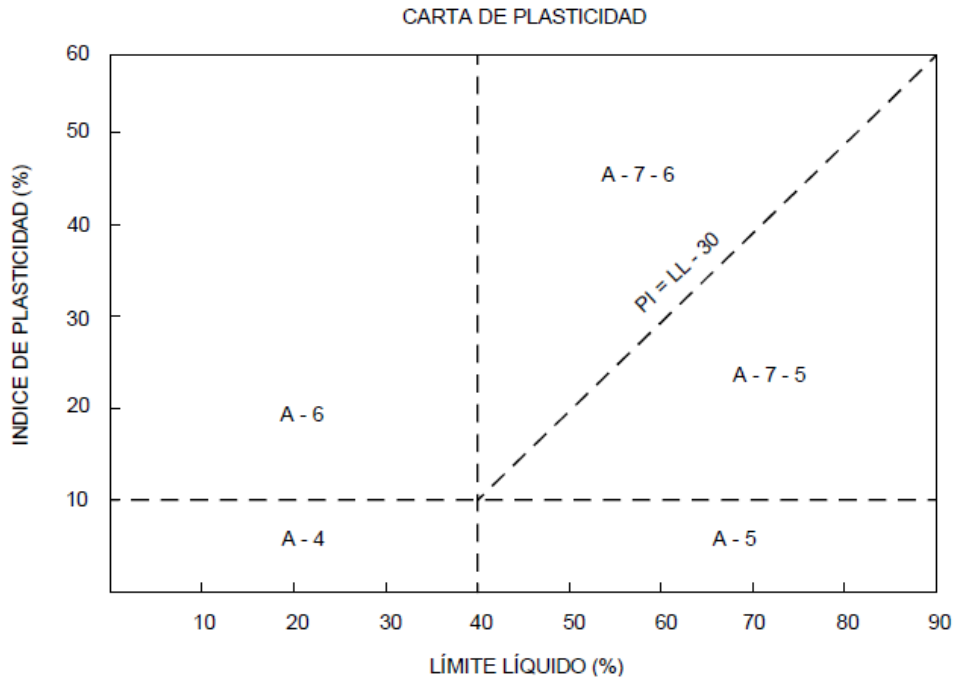


**Figura 11. Clasificación granulométrica de los suelos en algunos países del mundo. Modificado (Jang & Santamarina, 2015)**

Por otra parte se tiene el sistema de clasificación propuesto por la ASSHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) aunque su aplicación se enfoca principalmente en suelos gruesos utilizados con fines de la Ingeniería de pavimentos. En el estudio de la mecánica de suelos es poco común clasificar los suelos finos por el sistema AASHTO; sin embargo, existe una carta de plasticidad en donde se ubica cada uno de los grupos de clasificación definidos por este sistema, la cual se puede apreciar en la Figura 12.

El sistema AASHTO clasifica los suelos finos con base en su límite líquido, índice de plasticidad y contenido de material pasante del Tamiz No 200 o también llamada fracción fina del suelo. Los suelos finos se distinguen por grupos que inician en A-4 hasta A-7; según Polanco (2009) los grupos A-4 y A-5 corresponden a suelos limosos con poca o nula plasticidad, así como mezclas de suelos limosos con suelos gruesos como gravas o arenas en porcentajes mayores al 64%. Los grupos A-6 y A-7 (A-7-5 y A-7-6) son en general suelos arcillosos con plasticidad alta o muy alta, inestables volumétricamente y susceptibles al agua; en caso de tener fracción de suelos gruesos se espera que sea menor al 64%.

Cabe destacar que la principal diferencia entre los sistemas SUCS y AASHTO, teniendo en cuenta las anteriormente nombradas como la nomenclatura, es que el SUCS define a un suelo como fino si su fracción pasante del Tamiz No 200 es mayor al 50% mientras que en el sistema AASHTO el porcentaje del pasante Tamiz No 200 en un suelo deberá ser mayor al 35% para considerarlo como fino.



**Figura 12. Carta de plasticidad usada actualmente para clasificar suelos finos AASHTO.**

### 2.2.2 Argumentos para nuevos sistemas de clasificación

The New Zealand Geotechnical Society, por sus siglas NZGS (2005), recomienda que aquellos suelos que no encajan fácilmente en un sistema de clasificación no sean forzados a hacerlo. Ejemplo de ello son suelos derivados de cenizas volcánicas con un alto contenido de alófanos y loess encontrados en las islas Norte y Sur (Nueva Zelanda), que al ser clasificados con la carta de Casagrande: "...se ubican por debajo de la línea "A", pero su comportamiento no es el de un limo. Estos suelos no presentan un comportamiento "rápido" o "dilatante" asociado a los limos, pero tampoco tienen la plasticidad de las arcillas...". En este caso recomiendan describirlo como un limo arcilloso o arcilla limosa.

Por otro lado, estos materiales pueden sufrir considerables cambios al ser retirados de la matriz de suelo in situ. El material no perturbado puede parecer estar conformado por partículas de tamaño arena o grava, pero que remoldeado muestran ser tan frágiles que se rompen en partículas de tamaño limo o arcilla (New Zealand Geotechnical Society, 2005). En esta situación, la descripción es difícil y la NZGS recomienda realizar dos descripciones: uno de la muestra sin perturbar y otro de la muestra perturbada.

Polidori (2003) planteó una modificación a la carta de plasticidad planteada por Casagrande (fracciones menores a 425 micras, i.e. partículas de limos y arcillas). Él señala que el comportamiento del suelo depende del porcentaje de arcilla y asegura que el porcentaje de arcilla en un suelo fino podría ser más útil en su clasificación (Polidori, 2009).

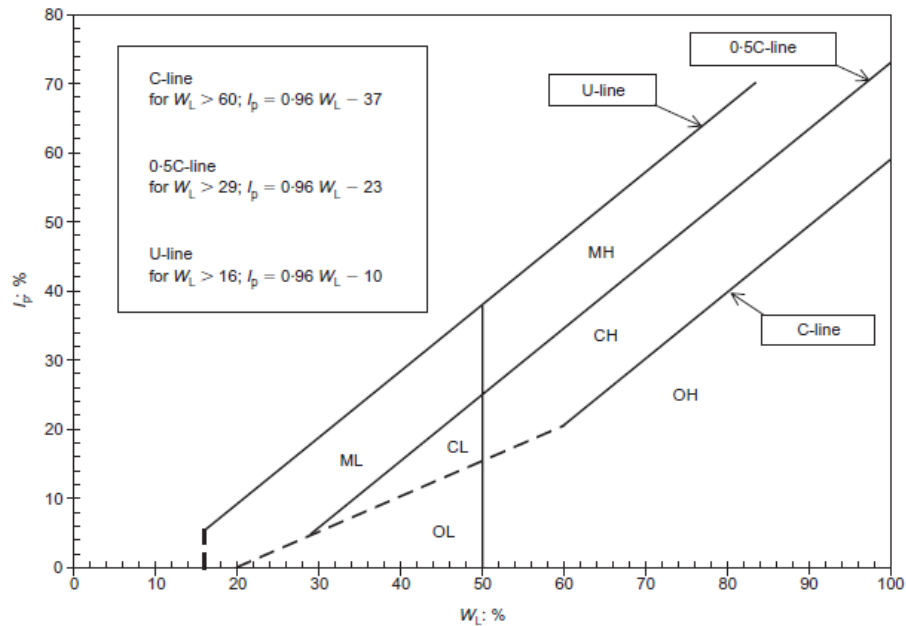
El porcentaje de arcilla, correlacionado con la adsorción de cationes, el pH y la estructura cristalina; junto con los límites de Atterberg, son dos parámetros importantes para caracterizar suelos inorgánicos, con el fin de obtener correlaciones con sus propiedades mecánicas intrínsecas, pero más que el porcentaje de arcilla, Polidori plantea la necesidad de estudiar el tipo de mineral de arcilla ya que incluso si el porcentaje es el mismo, distintos tipos de minerales pueden causar fuertes variaciones en los valores de los límites de Atterberg.

Polidori (2003) plantea una carta con base al límite líquido y el índice de plasticidad de un suelo (ver Figura 13), sin embargo, introduce el contenido de arcilla para establecer el límite entre suelos tipo limo y arcilla. Esta propuesta, sustenta, es aplicable a suelos con minerales de arcilla tipo laminar, y no aplica para suelos orgánicos ni los de estructura no laminar (e.g., alófana, haloisita y atapulgita).

Incluso asegura que suelos con el mismo valor de límite líquido o índice de plasticidad pueden tener características muy diferentes por la cantidad y tipo de minerales de arcilla. Por ejemplo, un suelo con alto contenido de limo o arena (<425  $\mu\text{m}$ ), con el mismo límite líquido que otro más fino, puede mostrar un mayor índice de plasticidad, sucede porque debe contener minerales de arcilla que son cada vez más expansivos incluso si la fracción de arcilla disminuye. Así pues, concluye que ni los límites de Atterberg ni el porcentaje de arcilla de forma solitaria son suficientes para caracterizar y predecir el comportamiento de un suelo fino.

Polidori propone una nueva carta de plasticidad la cual se enfoca en clasificar suelos (<425  $\mu\text{m}$ ) usando los límites de Atterberg. Esta difiere de la carta de Casagrande especialmente en las zonas consideradas de los limos y las arcillas. Afirma que contrario a lo que comúnmente se cree, en suelos inorgánicos, manteniendo igual el límite líquido, el índice de plasticidad aumenta a medida que el contenido de arcilla disminuye. Él diferencia las zonas por el contenido de arcilla, así pues un material con más del 50% de partículas de arcilla, caería en ese campo, y los que tienen menos del 50% en el campo de los limos. En la carta de plasticidad de Casagrande no es posible realizar esta distinción y puede que ambos suelos terminen por encima de la línea A. Incluso en casos como de

muestras de caolinita relativamente pura se han ubicado por debajo de la línea A, en la zona de limos.



**Figura 13. Modificación a la carta de plasticidad (SUCS) propuesta por Polidori para clasificar suelos finos. (Polidori, 2003).**

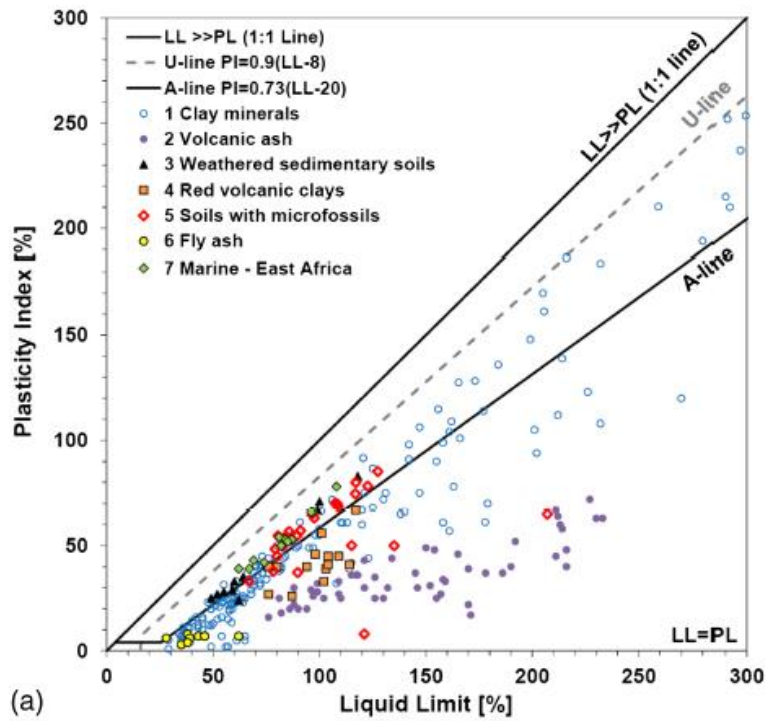
En Septiembre de 2015, el profesor Polidori publica una nueva propuesta para la clasificación de suelos tanto finos como gruesos basándose en el contenido de arcilla (CF) y lo sustenta en un término que define como el estado físico del suelo. Define tres estados según la relación de volumen: (a) cuando las partículas no arcillosas están en contacto unas con otras, el comportamiento del suelo está dominado por las características de la fracción granular (e.g., tamaño, forma, rugosidad, gradación, etc.); (b) cuando las partículas gruesas están dispersas en una matriz arcilla-agua, la plasticidad de las arcillas domina el suelo; (c) cuando parte de las partículas en un suelo están en contacto las unas con las otras, su comportamiento es intermedio entre (a) y (b) (Polidori, 2015).

Posteriormente para suelos predominantemente finos, incluye el límite líquido para estimar el índice de plasticidad mediante una nueva fórmula deducida empíricamente ( $IP = 0.96LL - (0.26CF + 10)$ ) e incluso afirma que otros parámetros como la compresibilidad y el ángulo de fricción interna residual ( $\Phi'$ ) se pueden estimar conociendo el límite líquido (fracción  $<425\mu\text{m}$ ) y el contenido de arcilla ( $<2\mu\text{m}$ ).

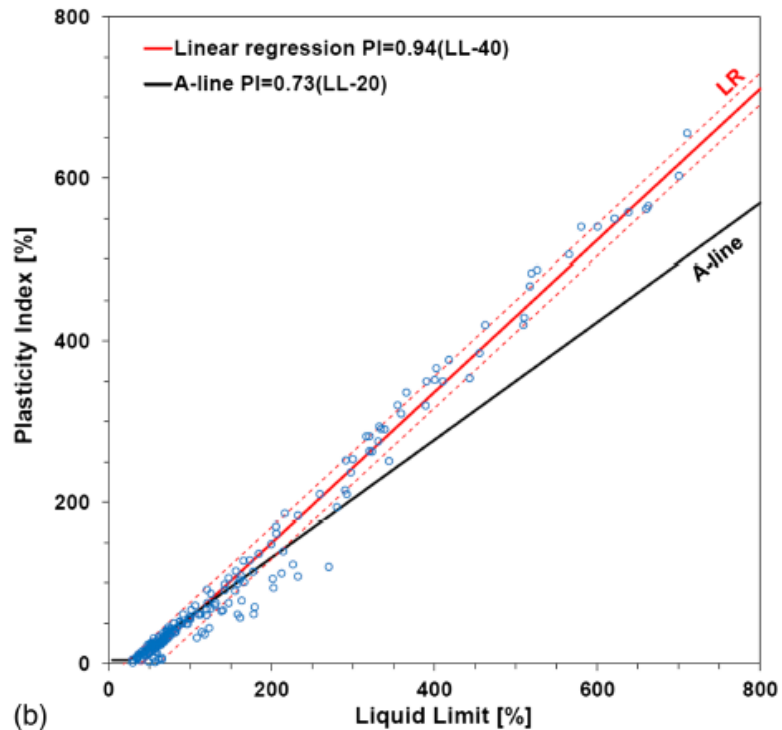
Recientemente Jang y Santamarina (2015), compilaron información de clasificación de suelos publicados por diversos autores y lograron correlacionar el índice de plasticidad con el límite líquido de los suelos cuyo contenido era 100% de minerales de arcilla. Lograron establecer una relación directamente proporcional entre estos dos parámetros, señalando así la importancia del límite líquido en arcillas altamente plásticas (ver Figura 14).

En la misma imagen se puede observar como algunos minerales de arcilla puros se ubicaron por debajo de la línea A, en la zona de limos. Este detalle ya había sido comentado por autores anteriormente quienes llegaban a la conclusión de que el límite líquido es directamente proporcional al porcentaje de arcilla ( $<2 \mu\text{m}$ ) cuando dichos porcentajes no eran tan bajos.

Por otra parte, el sistema de clasificación que se aplicará en esta investigación tendrá en cuenta sólo el límite líquido de un suelo y define además la sensibilidad eléctrica como un nuevo parámetro a tener en cuenta para su clasificación. La omisión del límite plástico como parámetro de medición que actualmente se tiene en cuenta en los sistemas de clasificación de suelos se debe a problemas en su medición y determinación, así como una relación aparentemente más fuerte del límite líquido con algunos parámetros o propiedades del suelo, expuestos más adelante.



(a)



(b)

Figura 14. (a) Varios suelos ubicados en la carta de plasticidad. (b) Minerales de arcilla ubicados en la carta. Regresión lineal entre el límite líquido y el índice de plasticidad (Jang & Santamarina, 2015)

## 2.3 NUEVA CLASIFICACIÓN DE SUELOS

### 2.3.1 Introducción

La mineralogía de los suelos es un claro y relevante factor que ha sido ignorado en la literatura. En un suelo granular la clase de material influye poco en sus propiedades ingenieriles; otros factores en sentido macro como la fricción, tamaño y acomodo de las partículas toman importancia. Cuando los suelos están conformados por partículas de tamaño fino, la composición mineralógica toma relevancia e influye en sus propiedades.

El SUCS usa el índice de plasticidad y el límite líquido para distinguir entre arcillas y limos. Además, la carta de plasticidad de Casagrande discierne entre materiales limosos con alto límite líquido aunque con baja plasticidad (e.g. diatomeas) de materiales con alto límite líquido y alta plasticidad (e.g. bentonita) (Jang J. , 2014).

Sin embargo, el uso de la carta de plasticidad de Casagrande tiene sus limitantes:

- A menudo suelos arcillosos caen por debajo de la línea "A" y son clasificados como limos aun con límites líquidos tan altos como 250 (Jang & Santamarina, 2015).
- Suelos orgánicos pueden ubicarse por debajo o por encima de la línea "A". (Howard, 1984).
- Muestras de caolinita pura a menudo se ubican por debajo de la línea "A", en la zona de limos (Polidori, 2003).
- Los métodos para determinar el límite plástico de un suelo tienen sus limitaciones y no se consideran muy precisos dada su subjetividad, lo cual afecta la exactitud del valor del índice de plasticidad (Whyte, 1982).
- En arcillas altamente plásticas, el índice de plasticidad está fuertemente dominado por el límite líquido (Jang & Santamarina, 2015).

Últimamente, muchas investigaciones se han enfocado en la interacción entre las partículas de arcilla y limo con diferentes fluidos de poro y se ha demostrado que causan variaciones en las propiedades geotécnicas de los suelos. La adición de solutos a los fluidos de poro en contacto con el suelo modifica sus límites de Atterberg.

Yong et. al., (1992), fueron los primeros en afirmar que el aumento de la concentración de la sal NaCl conduce a un incremento en la permeabilidad en un suelo natural debido a la disminución de la fuerza de repulsión entre partículas

(placas cargadas negativamente). Posteriores estudios mejoraron la teoría de Yong et. al., y se pudo distinguir diversos comportamientos para suelos arcillosos.

Schmitz & Van Paassen (2003), expusieron tres suelos arcillosos de origen vulcanológico a soluciones salinas, NaCl, KCl y CaCl<sub>2</sub>. Determinaron que a mayor contenido de esmectita, mayor será la disminución del límite líquido de los suelos conforme se aumenta la concentración de la solución.

Sivapullaiah & Manju, (2005), concluyeron que el límite líquido de un suelo de baja plasticidad expuesto a soluciones NaOH, aumenta a medida que aumenta la concentración de la solución y lo atribuyeron a la formación de nuevos componentes expansivos.

Arasan & Yetimoglu, (2008), estudiaron los efectos de cuatro soluciones salinas, NH<sub>4</sub>Cl, KCl, CuSO<sub>4</sub> y FeSO<sub>4</sub>, en los límites de Atterberg en dos diferentes tipos de arcillas con baja y alta plasticidad (CL y CH). Ellos concluyeron que el límite líquido del suelo CL aumentó a medida que se incrementó la concentración de sal. Caso contrario ocurrió en el suelo CH en donde el límite líquido disminuyó con el aumento de la concentración de sal. Así pues y luego de una nueva clasificación, el suelo CL se convirtió en un limo de baja plasticidad (ML) y el suelo CH se convirtió en un limo de alta plasticidad (MH), de acuerdo a SUCS.

El aumento del límite líquido para el suelo CL lo atribuyeron a la dispersión de las partículas de arcilla cuando fueron permeadas por las soluciones salinas. Estuvieron de acuerdo con Sivapullaiah y Manju (2005) en que se pudieron haber generado nuevos componentes expansivos que aumentaron el límite líquido. Para el segundo suelo CH, señalaron este comportamiento como un efecto debido al aumento de la concentración de cationes o la valencia de los cationes, lo cual resultaría en una disminución de las fuerzas repulsivas (i.e., disminución del espesor de la doble capa difusa) causando así la floculación de las partículas.

Yilmaz et. al., (2008), evaluaron el efecto de cinco sales inorgánicas, NaCl, NH<sub>4</sub>Cl, KCl, CaCl<sub>2</sub> y FeCl<sub>3</sub>, en la conductividad hidráulica de dos suelos arcillosos con diferente plasticidad, CL y CH. De acuerdo a los resultados, la conductividad hidráulica de la arcilla CH aumentó conforme se aumentaba la concentración de la sal, sin embargo en el caso de la arcilla CL, el aumento de la concentración de sal condujo a una disminución de la conductividad hidráulica.



Shariatmadary et. al., 2001, expusieron mezclas de bentonita con arcillas de baja plasticidad a tres sales inorgánicas, NaCl, CaCl<sub>2</sub> y MgCl<sub>2</sub> y corroboraron la disminución del límite líquido con el incremento de las soluciones salinas. Este comportamiento lo atribuyeron a la teoría de Gouy-Chapman, según la cual con el incremento de la concentración de iones, el espesor de la doble capa difusa disminuye lo cual conlleva a la floculación de las partículas de arcilla, creando mayores canales en los poros por donde el fluido podrá correr con mayor facilidad.

### 2.3.2 Límite líquido

Atterberg (1911) definió el límite líquido como la frontera entre los estados líquido y plástico de un suelo y lo hizo a partir de ciertas técnicas de laboratorio que consistían en colocar el suelo en una cápsula, formar una ranura de dos milímetros de espesor en la parte profunda del suelo y cerrarla golpeando la cápsula contra una superficie dura; la humedad del suelo correspondía a su límite líquido cuando los bordes de la ranura se juntaban al cabo de cierta cantidad de golpes. Así pues, desde un inicio se relacionó el límite líquido con un estado de resistencia al corte del suelo; a medida que se desarrollaba la teoría de estabilidad de taludes, parecía racional admitir que el suelo en su límite líquido presenta una resistencia fija (Haigh et. al., 2013).

Posteriormente Casagrande (1932) desarrolló un dispositivo estándar para determinar el límite líquido y notó que los minerales no arcillosos como el cuarzo y el feldespato no desarrollaban plasticidad al ser mezclados con agua, incluso cuando el tamaño de las partículas era menor a 2  $\mu\text{m}$ . También dedujo que el límite líquido de un suelo correspondía al contenido de agua en el cual un suelo tenía una resistencia al corte en condiciones drenadas de aproximadamente 2.5 kPa. Otros estudios más recientes han indicado que el límite líquido para cualquier suelo corresponde a una resistencia al corte de cerca de 1.7 a 2.0 kPa. El tamaño de los poros que controlan el flujo de los fluidos debe ser el mismo para todas las arcillas en su límite líquido (Mitchell & Soga, 2005).

Mitchell y Soga (2005) también indican que además de la succión, la conductividad hidráulica es aproximadamente la misma para todas las arcillas en su límite líquido. Lo anterior se debe principalmente a que el promedio del espesor de la capa de agua adsorbida es relativamente el mismo en la superficie de todas las partículas. Este concepto puede explicar el por qué diferentes arcillas tienen distintos valores de límite líquido. Todas las arcillas tienen esencialmente la misma estructura en la superficie, la cual es, una capa de átomos de Oxígeno en coordinación tetraédrica con el Silicio, o una capa de Hidroxilos en coordinación octaédrica con Aluminio o Magnesio. Las fuerzas de interacción entre estas

superficies y el agua sería aproximadamente la misma para diferentes minerales de arcilla.

Los límites de Atterberg de un suelo dependen de su composición y factores dinámicos como su pH, temperatura, capacidad de intercambio catiónico, tipo y cantidad de cationes en la solución, etc., los cuales varían en espacio y tiempo para suelos naturales (Polidori, 2007). Para un suelo dado, los valores de sus límites de Atterberg serán el resultado de la combinación de todos estos factores, los cuales dan una idea de las características de plasticidad del suelo para cada posible combinación de los factores que influyen en la plasticidad de un suelo (Polidori, 2007). En general, la mineralogía de las arcillas y el límite líquido han sido vistos como los parámetros más influyentes en el comportamiento del suelo (e.g. conductividad hidráulica, conductividad eléctrica, sensibilidad, etc.)

Los límites de Atterberg son sensibles a la variación de la temperatura. Para el grupo de arcillas esmectita (cuyo principal representante es la Montmorillonita) el límite líquido tiende a aumentar con la temperatura, mientras que una pequeña variación ocurre con la caolinita (Jefferson & Rogers, 1998). Razón de esto Jefferson y Rogers señalan que en la caolinita los contactos son más sólidos en su naturaleza, luego los efectos térmicos son muy leves; mientras que en la esmectita los enlaces están dominados por fuerzas físico-químicas; así los cambios térmicos están controlados por la coagulación y reorganización de partículas. Es por ello que a través de los límites de Atterberg se puede evaluar la susceptibilidad térmica del suelo.

Mitchell y Soga (2005) observaron que los cambios de temperatura pueden ocurrir durante el muestreo y mostraron además, que tal cambio alteraría el complejo de ión que está asociado con un suelo. En consecuencia, los parámetros medidos en el laboratorio pueden no ser representativos del verdadero comportamiento de un suelo en el campo. De allí que Jefferson y Rogers, consideren que el ensayo del límite plástico (método manual) sea siempre evaluado a altas temperaturas por la variación de la temperatura en las manos de quien realiza el enrollamiento del suelo.

Se ha estudiado la relación entre el límite líquido y la capacidad de intercambio catiónico del suelo. Teniendo muestras obtenidas del mismo suelo expuestas a fluidos de poro con distinto contenido de cationes intercambiables, se ha observado que el aumento del límite líquido es mayor con el contenido de cationes di- y tri-valentes comparado con cationes mono-valentes (Olchawa & Goraczko, 2012), esto se sustenta en la variación de la doble capa difusa, lo cual se explicará de forma detallada más adelante.

Un factor importante a tener en cuenta a la hora de determinar el límite líquido de un suelo es estimar si existe o no contenido de materia orgánica. Se ha demostrado que un aumento incluso del 1% o 2% de carbón orgánico puede incrementar el límite líquido hasta en un 10 a 20% en la cantidad de material fino ( $<2 \mu\text{m}$ ) (Mitchell & Soga, 2005).

#### 2.3.2.1 Conductividad hidráulica.

La conductividad hidráulica es un parámetro complejo, ya que su valor dependerá de la estructura del suelo y del grado de disgregación en el que se encuentre. Este valor puede estar estrechamente relacionado con la capacidad de intercambio catiónico de un suelo.

Shariatmadari et. al., (2011), concluyeron que las moléculas de agua y cationes absorbidos pueden ocupar una gran parte del espacio poroso, el cual tiende a aumentar en partículas con una alta carga negativa que conllevan a la absorción de un gran número de cationes lo que reduciría el espacio de moléculas de agua circulando y por tal conduciría a una baja conductividad hidráulica. Este efecto puede tomar gran relevancia en suelos con alta superficie específica como la bentonita y a ello atribuyeron su baja permeabilidad.

Además dedujeron que la valencia de los cationes juega un papel importante en la conductividad hidráulica del suelo, diferenciando entre cationes monovalentes, divalentes y trivalentes. Básicamente la relación que se tiende a presentar entre la conductividad hidráulica y el límite líquido es que la conductividad hidráulica tiende a disminuir con el incremento de este último (Sivapullaiah & Manju, 2005); esta disminución en la conductividad hidráulica se ha atribuido a la formación de nuevos componentes expansivos.

#### 2.3.2.2 Superficie específica.

La superficie específica está definida como la relación entre el área superficial de una partícula y su masa. La presencia de partículas de escala nanométrica en suelos derivados de cenizas volcánicas, resalta la importancia de la superficie específica sobre el comportamiento mecánico del suelo (Lizcano et. al., 2006). Las fuerzas eléctricas y de capilaridad toman importancia a medida que el tamaño de las partículas disminuye o la superficie específica aumenta (Santamarina et. al, 2002).

Santamarina et. al., (2002) plantean dos relaciones que involucran la superficie específica de un suelo. La primera es con las fuerzas eléctricas, en donde

sustentan, que estas son directamente proporcionales a la superficie específica. La segunda relación está dada entre las fuerzas de capilaridad y la superficie específica, en donde argumentan que las primeras crecen exponencialmente conforme aumenta la segunda.

Incluso pequeñas cantidades de finos pueden tener un considerable efecto en el comportamiento de suelos granulares. Los finos llenan los espacios de poro entre las partículas más grandes, controlan la permeabilidad del suelo, determinan si para una condición dada el suelo ha drenado o no. Además, un porcentaje relativamente pequeño de finos pueden formar estabilización entre los apoyos de las partículas lo cual provee resistencia y fuerza al suelo. El SUCS reconoce estas observaciones cuando considera separar suelos finos de los gruesos, aceptando la importancia de los finos en los suelos gruesos. A mayor plasticidad en un suelo fino, mayor será su superficie específica. (Santamarina et. al., 2002).

La dependencia del límite líquido y el índice de plasticidad con la superficie específica ha sido estudiada por diversos autores. Farrar y Coleman (1967) estudiaron diecinueve arcillas de Gran Bretaña y lograron relacionar la superficie específica con el límite líquido ( $S_s = 1.8LL - 34$ ) y la capacidad de intercambio catiónico, con coeficientes de correlación mayores a 0.9. La variación del límite líquido parece estar muy ampliamente relacionada con la superficie específica y el resultado del contacto natural entre partículas.

### 2.3.2.3 Índice de plasticidad.

Como se mencionó anteriormente, Jang y Santamarina (2015), establecieron que para suelos de minerales de arcilla, se podía plantear una relación en la cual el índice de plasticidad dependía tan sólo del límite líquido; pero esta estimación sólo la realizaron para suelos con un 100% de minerales de arcilla, es decir, no aplica a la mayoría de suelos naturales con los cuales el ingeniero geotécnico se encontrará en la cotidianidad.

Polidori (2015) afirma que el índice de plasticidad sí es directamente proporcional al límite líquido, pero añade una nueva propiedad y es el contenido de arcilla. Esto se da según él, en suelos que son dominados por las arcillas, es decir, por su comportamiento plástico. Whyte (1982) reportó que el límite plástico de una arcilla determinado en diferentes laboratorios para su estudio osciló entre 19% y 39%, con un límite plástico promedio del 23%, por lo cual afirmó que el mayor grado de variabilidad el verdadero índice de plasticidad de un suelo radica en la estimación de su límite plástico.

### 2.3.3 Sensibilidad eléctrica

La sensibilidad eléctrica  $S_E$  es un concepto planteado por Jang y Santamarina (2015) en su propuesta de clasificación de suelos, el cual lo definen para captar en un solo parámetro los cambios en el límite líquido con la permitividad del fluido de poro y la conductividad eléctrica, es decir, fuerzas de van der Waals y Doble capa difusa, respectivamente.

Para el primer cuadrante (ver Figura 15), donde  $LL_{ker}/LL_{NaCl} > 1.0$  y  $LL_{AD}/LL_{NaCl} > 1.0$  la sensibilidad eléctrica se define matemáticamente como sigue:

$$S_E = \sqrt{\left(\frac{LL_{AD}}{LL_{NaCl}} - 1\right)^2 + \left(\frac{LL_{ker}}{LL_{NaCl}} - 1\right)^2} \quad [1]$$

En donde gráficamente,  $S_E$  es la distancia desde el origen ( $LL_{ker}/LL_{NaCl} = 1.0$ ,  $LL_{AD}/LL_{NaCl} = 1.0$ ) al punto dibujado (ver Figura 15). Las relaciones de LL deben haber sido corregidas previamente. Si alguna de las relaciones anteriores de LL dan menor a 1.0 se deberá reemplazar en la Ecuación [ 1 por el recíproco de las relaciones y el punto se graficará en el cuadrante opuesto.

La relación entre el límite líquido obtenido con agua desionizada y el obtenido con la solución NaCl refleja la sensibilidad del suelo a la fuerza doble capa difusa (repulsión). La relación entre el límite líquido obtenido con kerosene y el obtenido con la solución NaCl refleja la sensibilidad del suelo tanto a la fuerza de van der Waals (atracción).

- Corrección de las relaciones:

Con los límites líquidos determinados con agua desionizada  $LL_{AD}$ , salmuera NaCl 2-M  $LL_{NaCl}$ , y kerosene  $LL_{ker}$  se procede a calcular las relaciones  $LL_{ker}/LL_{NaCl}$  y  $LL_{AD}/LL_{NaCl}$ . Dichos valores se deben corregir debido a las diferencias entre el peso unitario del agua  $\gamma_{AD}$ , y del kerosene  $\gamma_{ker}$  mediante la gravedad específica  $G_{ker} = \gamma_{ker}/\gamma_{agua}$  y también por la precipitación de las sales en exceso durante el secado al horno cuando la salmuera con una concentración de  $C_{NaCl}$  (g/g) es usada para ejecutar la prueba.

$$\frac{LL_{AD}}{LL_{ker}} \Big|_{corregida} = \frac{LL_{AD}}{LL_{ker}} G_{ker} \quad [2]$$

$$\left. \frac{LL_{AD}}{LL_{NaCl}} \right|_{\text{corregida}} = \frac{LL_{AD}}{LL_{NaCl}} (1 - C_{NaCl} LL_{NaCl}) \quad [3]$$

Los valores de las relaciones de límite líquido corregidos se representan como  $LL_{AD}/LL_{NaCl}$  vs  $LL_{ker}/LL_{NaCl}$  en la Figura 15. Cuando cualquier relación LL es inferior a 1, el valor recíproco se representa en el cuadrante opuesto para lograr una evaluación simétrica de sensibilidad eléctrica a los cambios en el fluido de poro. Como se dijo anteriormente, la sensibilidad eléctrica es la distancia desde el origen del gráfico (en 1) hasta el punto de la pareja de coordenadas.

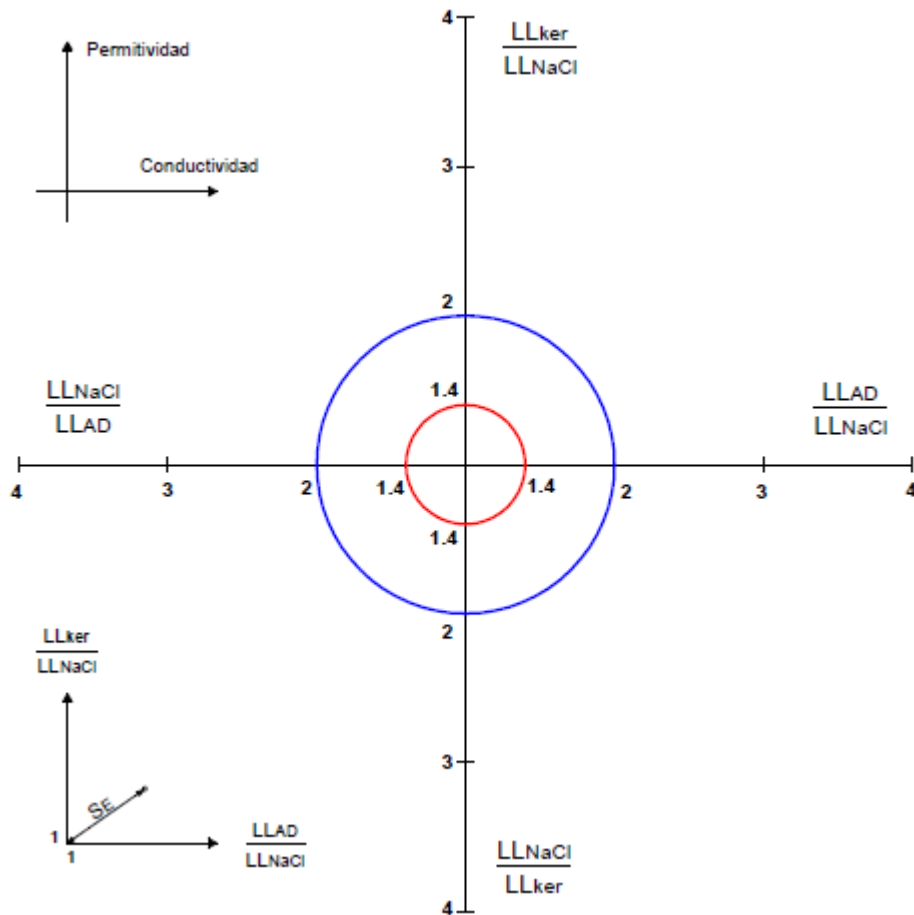


Figura 15. Representación gráfica de la sensibilidad eléctrica planteada en el nuevo sistema de clasificación.

### 2.3.3.1 Permitividad de los fluidos de poro.

La permitividad dieléctrica, también llamada constante dieléctrica, es un parámetro complejo que representa la capacidad que tiene un fluido de polarizarse en campos eléctricos variables y es afectada por muchos factores como el peso molecular, la forma de la molécula, la geometría, etc. La constante dieléctrica de un material ( $k'$ ) es la relación entre su permitividad y la permitividad del vacío ( $\sim 1$ ), luego este parámetro es adimensional. La polaridad de un disolvente puede definirse como la capacidad que tiene para solvatar y estabilizar cargas; la solvatación ocurre cuando al disolverse los iones de un soluto, se dispersan y quedan rodeados por moléculas de un solvente.

Acorde con la teoría, el espesor de la doble capa difusa es proporcional a la raíz cuadrada de la constante dieléctrica del fluido de poro (Van Olphen, 1977), y así también lo atribuyó Chen et. al., (2000) en su estudio a minerales de caolinita inmersos en distintos fluidos de poro para medir el índice de expansión. Ellos concluyeron que el espesor de la doble capa difusa en los fluidos no polares sería aproximadamente el 15% que en el agua. Además, la solubilidad de sales inorgánicas en líquidos no polares (e.g. kerosene) es menor que en el agua, en grandes magnitudes. Así, en fluidos no polares, el efecto doble capa esencialmente, no puede formarse (Olson & Mesri, 1970; Sridharan & Rao, 1973), y la fuerza de van der Waals es el mayor factor físico-químico.

Chen et. al., (2000), concluyeron que en fluidos no polares, algunas propiedades como el potencial expansivo de los suelos, es altamente sensible a las constantes dieléctricas. Teóricamente, todo material dieléctrico debe ser un aislante, es decir, tener baja conductividad eléctrica, sin embargo, no todo aislante, es un dieléctrico.

Fuerzas intramoleculares e intermoleculares: Las fuerzas intermoleculares son las que se desarrollan entre moléculas mientras que las fuerzas intramoleculares se desarrollan entre los átomos de una molécula. En física cuántica se conocen tres fuerzas intramoleculares definidas como enlaces: iónico, covalente (apolar o polar) y metálico. El rango de las fuerzas intermoleculares es más amplio, siendo las más conocidas en la mecánica de suelos las fuerzas de van der Waals y doble capa difusa.

En el caso de la mecánica de suelos, las fuerzas intermoleculares pese a que son de menor magnitud que las intramoleculares, determinan el comportamiento de suelos predominantemente finos, en general, se han venido estudiando dos tipos de fuerzas una atractiva y la otra repulsiva. La fuerza atractiva es la conocida como la fuerza de van der Waals y la fuerza repulsiva es la doble capa difusa.

pH: Esta característica del fluido de poro, junto con el tipo de iones y la concentración, afecta no solo el campo de adsorción en la superficie del mineral, sino que también promueve su disolución. Por otro lado la capacidad de intercambio catiónico crece con el grado de acidez de los cristales, es decir, es mayor si el pH del suelo es menor. La actividad catiónica se hace notable, en general, para valores de pH menores que 7 (Juarez & Rico, 2005).

El pH influye en las fuerzas de repulsión entre partículas debido a su efecto en la carga superficial de la partícula. Las cargas de extremo positivo pueden existir en ambientes de bajos pH. Estos efectos son uno de los de mayor importancia en la caolinita, menor importancia en la illita y relativamente poco importante en la esmectita. En la caolinita, el pH puede ser el factor más importante en el control de la estructura de sedimentos, formada por suspensión (Mitchell & Soga, 2005).

En las condiciones de operación (pH cercano a la neutralidad, temperatura de 25°C y ausencia de electrolitos) las partículas de arcilla poseen sus dobles capas iónicas inalteradas, formadas exclusivamente por sus cationes de cambio. Las interacciones de las partículas dependerán solamente de su carga eléctrica (densidad superficial de carga).

Otro factor importante a tener en cuenta es la hidratación y consiguiente ordenación de las moléculas de agua sobre las superficies de los cristales. Así se tiene que al aumentar la concentración de arcilla la proporción de agua libre vaya siendo menor, lo que conducirá a un aumento en la viscosidad. Una alta densidad de carga impide las asociaciones cara-cara, entonces y debido a la flexibilidad de los mismos se producen enlaces borde-cara y borde-borde, aumentado por consiguiente la rigidez de la suspensión. A esta rigidez de la suspensión deben contribuir además las fuerzas de interacción provenientes del equilibrio entre fuerzas electrostáticas de las dobles capas y fuerza de atracción entre átomos tipo van der Waals.

Intercambio catiónico: Se define teóricamente como la capacidad que tiene el suelo para retener y liberar iones con carga positiva (cationes) y negativa (aniones). La intensidad de la carga depende de la estructuración y composición de la arcilla. Se sabe que esta propiedad está influenciada en su mayoría por el contenido de materia orgánica y de arcilla que portan carga variable principalmente negativa (Juarez & Rico, 2005). Las partículas de suelo atraen los iones positivos del agua  $H^+$  y los cationes de diferentes elementos químicos, siendo los más usuales  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^+$ ,  $Mg^{++}$ , y  $(NH_4)^+$ .



La capacidad de intercambio crece con el grado de acidez de los cristales de arcilla; luego a menor pH, la capacidad de intercambio es mayor. Esta capacidad de intercambio, produce una variación de cationes en las películas de adsorción lo cual se refleja en las propiedades mecánicas del suelo, por ejemplo una arcilla Hidrogena (cationes  $H^+$ ) puede transformarse en Sódica, si se hace que circule a través de su masa, agua con sales de sodio en disolución. Por esta razón el intercambio catiónico forzado del suelo se ha usado y se usa para tratar suelos con fines de mejorar su comportamiento mecánico.

El tipo de catión ejerce una influencia en la cantidad de expansión de los minerales de arcilla en presencia del agua. En los suelos compuestos principalmente de minerales de arcilla no expansivos, el tipo de cationes adsorbidos es uno de los factores más importantes e influyentes en el comportamiento del material en suspensión y de la naturaleza del tejido que lo conforma. Cationes monovalentes especialmente Sodio y Litio promueven la defloculación, mientras que las arcillas en suspensión generalmente se flocculan en presencia de cationes di-valentes y tri-valentes (Mitchell & Soga, 2005).

El tipo de catión adsorbido tiene una mayor influencia en minerales de alta plasticidad (e.g., Montmorillonita) que en minerales de baja plasticidad (e.g., caolinita). Al aumentar la valencia del catión disminuyen los valores del límite líquido de las arcillas expansivas aunque tiende a aumentar el límite líquido de los minerales no expansivos.

Factores que inciden en el intercambio catiónico:

- Concentraciones relativas de la solución: Mientras mayor sea la concentración de un cierto catión en la solución intercambiadora en relación con el catión que está intercambiando en el suelo, mayor será la cantidad de catión que se reemplazara.
- Histéresis: Este fenómeno consiste en un comportamiento diferente que presenta la superficie de intercambio según haya sido el tipo de ión que originalmente la saturaba. La histéresis es más frecuente en iones heterovalentes que en iones monovalentes.
- Densidad de energía de superficie: Depende también de la superficie total o externa como superficie total limitante de las partículas y la superficie interna que presentan los minerales arcillosos expansibles entre paquetes laminares. La superficie externa aumenta mucho con la disminución del tamaño de las partículas. Por ejemplo, la montmorillonita presenta mayor superficie que la illita.

- La valencia de los cationes: Es el factor más importante para determinar la proporción relativa de adsorción o des-adsorción de un ion dado. Los iones bivalentes se retienen con más fuerza que los iones monovalentes, los iones trivalentes se retienen aún más fuertemente.
- Peso atómico: Todos los cationes no son adsorbidos con igual tenacidad en una arcilla saturada con un catión dado; se ha demostrado que la fuerza de sustitución de los cationes alcalinos metálicos aumentan con el peso atómico. El ion Potasio por ejemplo es un sustituto mucho más poderoso, que el ion de Sodio y es adsorbido con más rapidez por la arcilla.
- Tamaño y grado de hidratación: La afinidad de los cationes  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Fe^{+2}$ ,  $H^+$  por el poder adsorbente depende principalmente de su carga y de sus radios hidratados y sin hidratar. Por ejemplo los iones  $Li^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  y  $Rd^+$ , están enlistados en orden ascendente de tamaño y se esperaría que su eficiencia de reemplazamiento fuera en ese mismo orden, sin embargo, durante la hidratación, el ion  $Li^+$  se asocia con tantas moléculas de agua que su velocidad se reduce mucho. Debido a ese gran radio hidratado, el  $Li^+$  por lo tanto no puede llegar tan cerca de las micelas como los otros iones.
- Fuerzas atractivas de van der Waals:

Este es el primer término que se involucra en el concepto de sensibilidad eléctrica planteado por Jang y Santamarina (2015) y aunque representa junto con la doble capa difusa las dos principales fuerzas físico-químicas presentes en una matriz de suelo fino, ha sido un concepto desarrollado recientemente y aún involucra una complejidad inherente en la explicación del comportamiento de las arcillas (Anandarajah & Zhao, 2000). Se consideran a Moore y Mitchell (1974) en ser los primeros en estudiar la fuerzas de van der Waals.

Las fuerzas atractivas de van der Waals son una fuerza universal que actúan entre todos los pares de interacción de átomos. A diferencia de las fuerzas de Coulomb que actúan entre partículas cargadas como iones o moléculas polares, la fuerza de van der Waals actúa entre átomos neutros (Anandarajah & Chen, 1997). En un átomo neutro, los electrones circulan continuamente a una muy elevada frecuencia alrededor del núcleo positivo, polarizando el átomo en cada momento. Las ondas electromagnéticas emitidas por átomos a diferentes localizaciones hace que interactúen unas con otras, dando lugar a la fuerza de van der Waals entre moléculas (o coloides).

Este concepto de fuerzas atractivas entre moléculas fue introducido por Johannes van der Waals en 1873, para tener en cuenta las propiedades de los líquidos y gases no ideales (i.e. viscosos y/o compresibles). En el caso de un suelo, esta

fuerza puede ejercerse entre las moléculas que forman dos láminas de un cristal de arcilla dando lugar a un nexo especial entre ellas. La magnitud de la fuerza está en función de la forma geométrica de las partículas, distancia entre partículas y orientación y de las propiedades de interacción entre partículas y los fluidos de poro (Anandarajah & Zhao, 2000).

Cuando dos moléculas están próximas, el campo de cada una orienta a la otra de manera que el centro de carga positiva de una queda próximo al contrario de la otra, ejerciéndose entre ambas moléculas una fuerza neta de atracción, distinta a los nexos iónicos, nexos covalentes, nexos con núcleos de hidrógeno (Juarez & Rico, 2005). Este fenómeno de atracción se considera en la actualidad como un importante componente de un sistema inter-partícula en suelos cohesivos. Muchos aspectos como la permeabilidad, resistencia al corte, efecto de la consolidación, cohesión, etc. son afectados por el efecto de estas fuerzas atractivas de van der Waals.

Esta fuerza disminuye con el incremento de la valencia y concentración de cationes de los fluidos de poro, la adsorción de cationes intercambiables por parte de las partículas de arcilla denominado complejo de intercambio, el cual conduce a un cambio eléctrico entre las partículas de arcilla que influye en el estado de repulsión o atracción entre las mismas y por tal, afecta las propiedades de la matriz de suelo (Abdullah et. al., 1999). La capacidad de intercambio catiónico es alta en suelos con un alto contenido de materia orgánica y de partículas de arcilla, aunque depende de su naturaleza (Luna, 1975). El tipo de fluido de poro modifica químicamente el comportamiento del suelo.

Chen et. al., (2000) sustentan que las propiedades mecánicas de las partículas como rugosidad y forma geométrica, probablemente no cambiaran con las propiedades del fluido de poro, a menos que haya un contacto sostenido durante un largo tiempo (mayor a 30 años), sin embargo la fricción entre partículas si podría variar según el fluido de poro, debido a la fuerza atractiva de van der Waals. Aunque la variación de la fuerza atractiva con el fluido de poro aún no es claro. La teoría indica que en los fluidos no polares, el efecto doble capa no puede desarrollarse, de tal forma que la fuerza atractiva de van der Waals es relativamente grande.

Algunos investigadores han indicado que los líquidos con baja constante dieléctrica pueden causar compresibilidad en las arcillas. Este posible problema por tal, se daría cuando el fluido de poro fuese no polar, así que el efecto físico-químico mayor sería la fuerza de van der Waals. Cuando la fuerza atractiva de van der Waals es grande, la resistencia al corte en el contacto entre partículas

también lo es, lo que conduce a una alta relación de vacíos y compresibilidad (Chen et. al., 2000). La compresibilidad puede conducir a la rotura inter-partícula y por tal un gran aumento en la conductividad hidráulica.

Para estimar la fuerza de atracción de van der Waals existen dos métodos muy conocidos. El primero de ellos fue desarrollado por Hamaker (1937), (teoría de Hamaker), quien desarrolló una teoría basada en la energía y fuerza entre dos macro-cuerpos (coloides) como una sumatoria de las fuerzas entre todos los pares de moléculas individuales en cada partícula, omitiendo la influencia de las moléculas de partículas vecinas. En su estudio planteó la constante de Hamaker, la cual es proporcional a la fuerza de van der Waals (Hough & White, 1980), pero que debido a la omisión anterior, solo es aplicable a gases.

Años más tarde, Lifshitz (1956) planteó una teoría sofisticada que utilizaba algunas propiedades como la susceptibilidad dieléctrica de los coloides y del medio, parámetro que lamentablemente sólo está disponible en la literatura para unos pocos materiales, lo cual requerirá de más investigación para lograr su aplicación. Posteriormente otros métodos han sido planteados (e.g., Ninham y Parsegian (1970)), sin embargo a lo largo de los años, diversas investigaciones han adoptado por combinar la teoría de Hamaker con la de Lifshitz en un solo método.

Cuando la separación entre partículas es menor a 200 nm apróx., La fuerza de van der Waals es mucho mayor en magnitud que la fuerza de gravedad. Incluso Anandarajah y Chen (1997) encontraron que para separaciones muy pequeñas la fuerza de van der Waals puede ser miles de veces mayor a la fuerza de gravedad. La orientación de las partículas por su parte, también influyen en gran medida ya que una pequeña desviación en su orientación podría significar un cambio significativo en la fuerza de van der Waals.

#### 2.3.3.2 Conductividad eléctrica.

La conductividad eléctrica se define como la capacidad que tiene un material de dejar circular a través de él la corriente eléctrica producto del movimiento de las cargas en su interior. La unidad de medida es Siemens por metro (S/m).

En suelos de grano grueso, las fuerzas de gravitación predominan sobre cualquier tipo de fuerza, por ello este tipo de partículas tienen un comportamiento similar. En el caso de suelos finos, sin embargo, otros tipos de fuerzas recobran importancia por la elevada área superficial que tienen las partículas comparada con su volumen. Las fuerzas de gravitación llegan a ser superadas en gran medida por

las fuerzas físico-químicas, siendo sus dos principales representantes la fuerza de van der Waals y la doble capa difusa.

- Doble capa difusa:

La doble capa difusa (también llamada doble capa eléctrica; doble capa) es una relación de carácter químico-eléctrico que hoy por hoy está muy lejos de ser comprendida totalmente, a tal grado que es posible ver interpretaciones diferentes y hasta contradictorias de los pocos sucesos experimentales, dado el reducido número de investigadores en este campo de la mecánica de suelos. Aunque los pocos que se interesen en el tema de minerales de arcilla lo hagan inducidos por las interacciones entre las interfaces sólido-líquido (Ontiveros et. al., 2016).

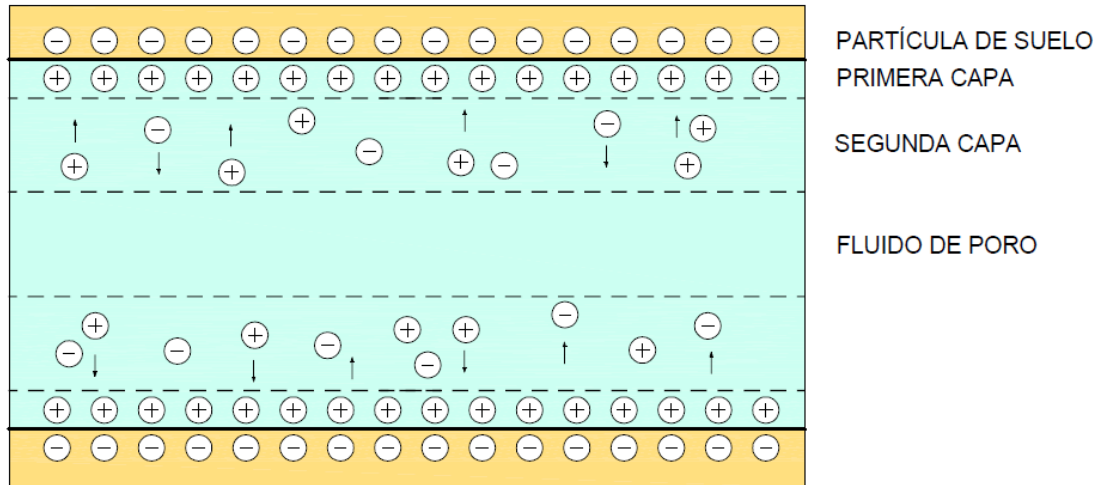
Cuando una partícula de arcilla queda rodeada de agua, los átomos de oxígeno del cristal quedan en su superficie. La partícula al no ser eléctricamente neutra esta eléctricamente desbalanceada en sus caras y aristas. Las cargas negativas de los átomos de oxígeno crean un campo eléctrico superficial con lo cual, las moléculas de agua y los cationes que pudiese haber por disolución, que circundan la partícula se ionizan y logran ser captados por el cristal. Lo anterior conduce al hecho de que cada partícula individual se vea rodeada de una capa de moléculas de agua orientadas en forma definida y ligadas a su estructura (agua adsorbida).

Cuando esto ocurre, las moléculas de agua son polarizadas, es decir, en ellas no coinciden los centros de gravedad de sus cargas negativas y positivas, sino que funcionan como pequeños dipolos permanentes de tal forma que el polo de carga negativo queda en posibilidad de actuar como origen de atracción para otros cationes positivos. Así pues, cuando las partículas de arcilla atraen a los cationes, la película de agua circundante se ve reforzada. El espesor de dicha película de agua adsorbida es función de la mineralogía de la partícula y del tipo de cationes atraídos (Juarez & Rico, 2005).

Esta atracción disminuye con la distancia, de manera que la concentración de cationes atraídos también lo hará. Como en principio el agua se considera eléctricamente neutra, la concentración de iones positivos estará balanceada por iones negativos, para una mayor concepción del fenómeno ver Figura 16.

Según Mitchell (2005) la disminución de la constante dieléctrica (permitividad) de los fluidos de poro reduce el espesor de la doble capa difusa, permitiendo así que las partículas de arcilla se acerquen aún más entre sí. Este comportamiento había sido observado por Bowders y Daniel (1987) quienes luego de realizar un estudio con distintos fluidos de poro, declararon que al reducirse el espesor de la doble

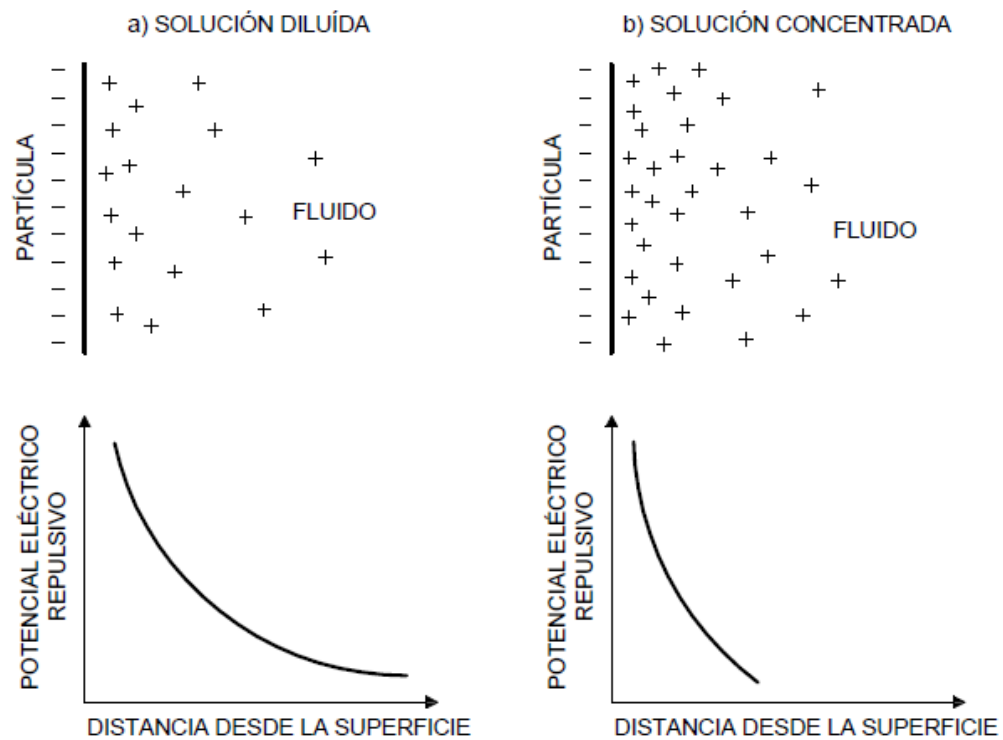
capa difusa, el esqueleto del suelo reduciría su tamaño, lo que conllevaría a la reducción de las fuerzas de repulsión, promoviendo así la floculación de las partículas de arcilla.



**Figura 16. Representación del efecto doble capa difusa.**

La atmósfera de cationes muy cercanos al cristal al igual que el grupo de cationes más desvinculados por su lejanía, se consideran como dos estratos diferentes, de allí el nombre de doble capa. El espesor de la atmósfera (aprox. 0.1-1 micrón) varía inversamente con la raíz cuadrada de la concentración de cationes en la solución (ver Figura 17) y es inversamente proporcional a la valencia de dichos cationes, además puede influenciar en la estructura del suelo, lo cual es evidenciado en cambios de permeabilidad (Arasán, 2010).

Cuando dos cristales de arcilla quedan suficientemente cerca, sus respectivas atmósferas de adsorción reaccionan entre así causando una fuerza de repulsión. El efecto doble capa difusa disminuye exponencialmente cuando la distancia entre partículas aumenta, aunque en teoría está influenciado por la concentración, valencia, tamaño de cationes en la solución, constante dieléctrica del fluido y temperatura (Yong et. al., 1992). La fuerza neta entre partículas (repulsión-atracción) dependerá de las cantidades de electrolitos en suspensión, que afectará en mayor medida a la fuerza repulsiva.



**Figura 17. Formación de la doble capa difusa en torno a un cristal según teoría de Gouy-Chapman-Stern. Modificado de (Juarez & Rico, 2005).**

El aumentar la concentración de cationes en la suspensión disminuye el potencial repulsivo entre las partículas de arcilla, lo cual aumenta el efecto de las fuerzas de atracción, aumentando el contacto entre partículas; de modo que la posibilidad de atracción aumenta al disminuir la distancia. Si se llega a esta situación, se dice que el suelo se flocula, lo cual produce agrupaciones de partículas sueltas, ya que cada unidad posee una alta proporción de vacíos.

Las propiedades electrolíticas del agua influyen en las propiedades del suelo; la presencia de un electrolito disuelto produce el aumento de iones libres, disminuyendo la tendencia de tales iones a difundirse en el fluido y tiene el efecto final de reducir el espesor de la atmósfera de absorción; por ende, a mayor riqueza electrolítica mayor floculación (e.g. las arcillas marinas son más floculadas que las arcillas en agua dulce) (Juarez & Rico, 2005).

### 2.3.4 Procedimiento de la nueva clasificación

El nuevo estudio se basa principalmente en el límite líquido y la sensibilidad eléctrica. El primer concepto está estrechamente correlacionado con la superficie específica (Santamarina et. al, 2002) y el segundo abarca las interacciones eléctricas entre partícula-poro logradas con el uso de diferentes fluidos de poro: agua desionizada, solución NaCl 2-M y kerosene.

Las interacciones eléctricas explican la sensibilidad del límite líquido al tamaño de la partícula, la polaridad del fluido y la concentración iónica (Jang J. , 2014). El uso del límite líquido se preserva de clasificaciones anteriores ya que permite evaluar el comportamiento plástico del suelo debido a su estrecha relación con la superficie específica.

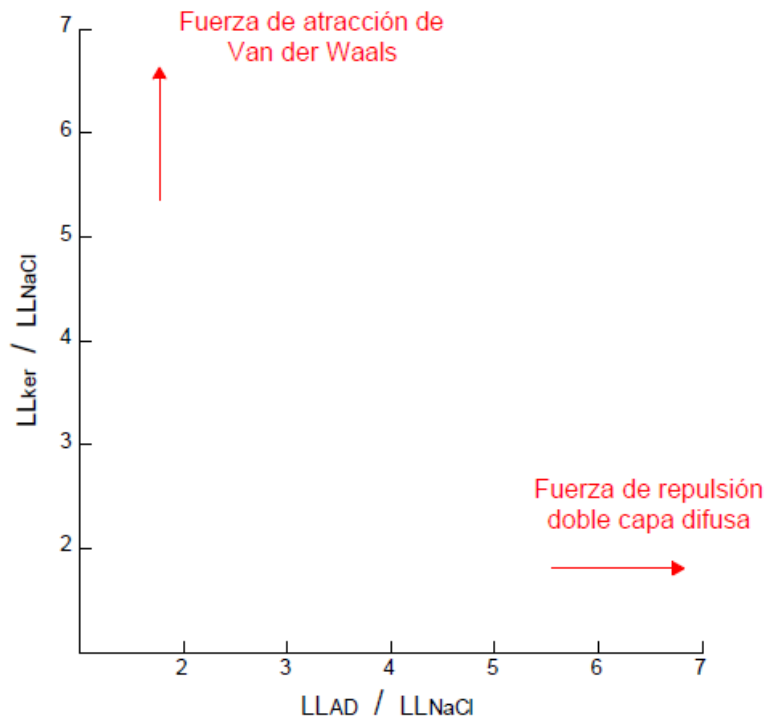
Tres fluidos con diferentes permitividad (constante dieléctrica) y conductividad eléctrica se han identificado para explorar distintas interacciones eléctricas entre partículas y fluido (Ver Tabla 1). Estos fluidos son muy comunes y de fácil acceso para cualquier laboratorio de geotécnica en el mundo.

**Tabla 1. Permitividad (constante dieléctrica) y conductividad eléctrica de los fluidos usados en la nueva clasificación. Valores según Jang y Santamarina, 2015.**

Fluido	Permitividad	Conductividad eléctrica (S/m)
Agua desionizada	80	$10^{-6}$
Salmuera NaCl (C:2M)	55	12
Kerosene	2	$10^{-11}$

La relación entre el límite líquido obtenido con agua desionizada y el obtenido con la solución NaCl refleja la sensibilidad del suelo a la repulsión de la doble capa, ya que el aumento de sales en el fluido de poro, tiende a disminuir el espesor de la doble capa difusa. La relación entre el límite líquido obtenido con kerosene y el obtenido con la solución NaCl da lugar a la sensibilidad eléctrica del sedimento a ambas, la fuerza de van der Waals y la doble capa difusa, aunque en mayor medida al efecto van der Waals. Ambas relaciones se pueden apreciar gráficamente en la Figura 18.





**Figura 18. Interpretación de las fuerzas de atracción y de repulsión interpartículas en el nuevo método de clasificación.**

### 2.3.5 Nueva carta de clasificación

La carta propuesta (Jang & Santamarina, 2015) identifica los suelos en función de su sensibilidad eléctrica  $S_E$  y el límite líquido medido con salmuera ( $LL_{NaCl}$ ), el valor obtenido con salmuera NaCl se selecciona para minimizar cualquier ambigüedad asociada con iones existentes en el suelo. El procedimiento que se recomienda para la clasificación de granos finos es el siguiente:

1. Usar la fracción pasante al tamiz No. 200.
2. Determinar el límite líquido para pastas de suelos preparados con los siguientes tres fluidos de poro: agua desionizada, kerosene, y salmuera 2-M NaCl.

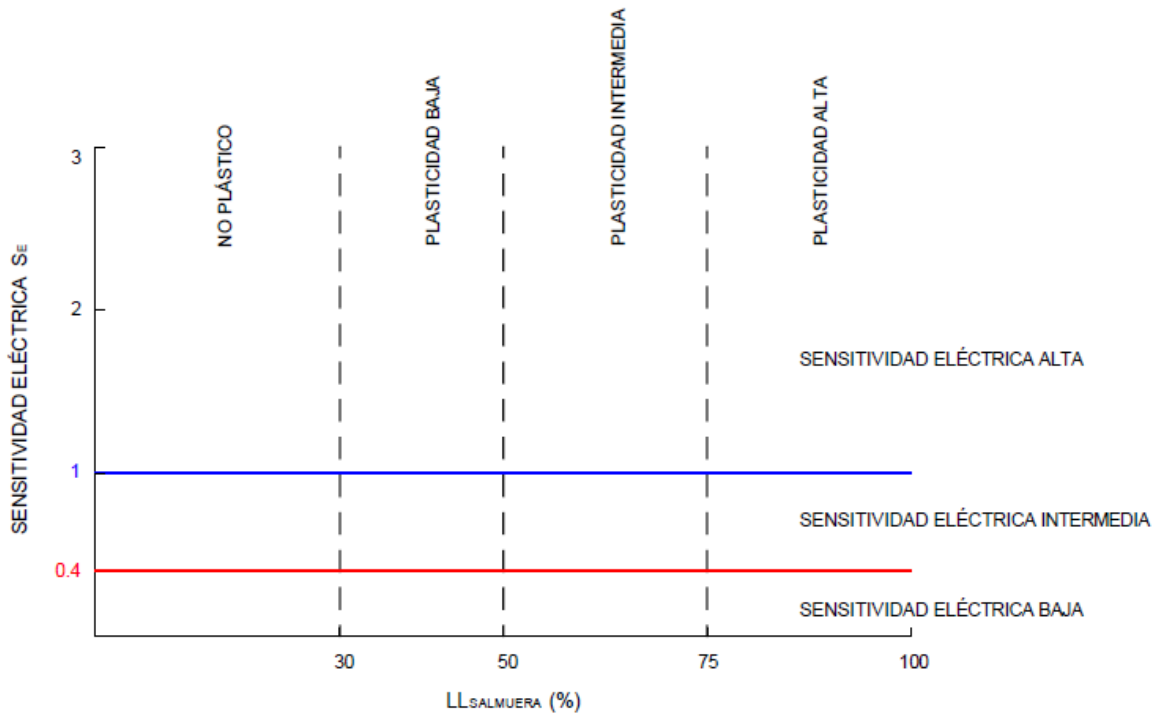
- Preparación de la solución 2M NaCl:

La molaridad expresa la cantidad de moles de soluto que habrá por cada litro de disolución.

$$\text{gramos de NaCl} = \frac{58.5 \text{ g}}{1 \text{ mol}_{\text{NaCl}}} * \frac{2 \text{ mol}_{\text{NaCl}}}{1 \text{ L}_{\text{disolución}}} = 117 \text{ g NaCl/L}_{\text{disolución}} \quad [ 4 ]$$

3. Calcular las proporciones LL (Ecuaciones [ 2 y [ 3) y calcular la sensibilidad eléctrica  $S_E$  (Ecuación [ 1 y Figura 15)

4. Identificar los tipos de suelo mediante el uso de la siguiente carta (ver Figura 19).



**Figura 19. Nueva carta de clasificación de suelos finos propuesta por Jang y Santamarina (2015).**

5. Informar de la clasificación como no (N), baja (L), intermedia (I) o alta (H) plasticidad de los granos finos de baja (L), intermedia (I) o alta (H) sensibilidad eléctrica.

## **2.4 MÉTODOS PARA DETERMINAR EL LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO**

### **2.4.1 Introducción**

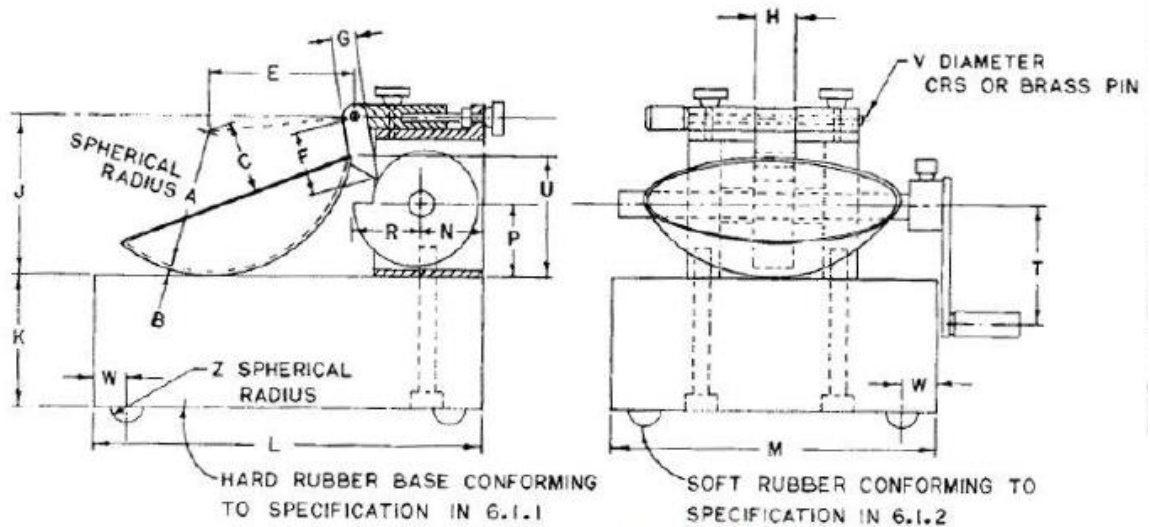
Desde que Atterberg (1911) propusiera los límites de consistencia, inicialmente con propósitos agrícolas, para tener un concepto claro del rango del contenido de agua en que el estado del suelo era plástico, se han desarrollado diversos métodos para estimar el límite líquido de un suelo. El primero de ellos fue la copa de Casagrande y aunque es el método más antiguo y uno de los más usados para determinar este parámetro, se han desarrollado alrededor del mundo otros dispositivos.

### **2.4.2 Método de la copa de Casagrande**

Casagrande en 1932, propuso el aparato para determinar el límite líquido de los suelos el cual consiste en una copa de latón la cual se eleva por medio de una leva en forma de caracol y luego cae a una distancia de 10 mm en una base de caucho duro. El límite líquido fue definido como el contenido de humedad en el cual veinticinco golpes son necesarios para causar el cierre de la ranura a lo largo de 13 mm. En la Figura 20, se puede apreciar la copa de Casagrande aprobada actualmente por la ASTM con sus respectivas medidas (ASTM, 2005).

La prueba de Casagrande aún se lleva a cabo alrededor de todo el mundo, variando un poco a lo inicialmente planteado en las publicaciones de Casagrande (Casagrande, 1932; Casagrande, 1958). En particular, como señaló Casagrande, el dispositivo de límite líquido de la British Standard utilizado en el Reino Unido hasta la década de 1970 y todavía en uso en otros países tiene una base más suave que la del dispositivo estándar ASTM (Haigh, 2012).

LETRA	A*	B*	C*	E*	F	G	H	J*	K*	
mm	54 ± 0.5	2 ± 0.1	27 ± 0.5	56 ± 2.0	32	10	16	60 ± 1.0	50 ± 2.0	
LETRA	L*	M*	N	P	R	T	U*	V	W	Z
mm	150 ± 2.0	125 ± 2.0	24	28	24	45	47 ± 1.0	3.8	13	6.5



**Figura 20. Medidas y esquema de la copa de Casagrande para la determinación del límite líquido. (ASTM, 2005).**

La herramienta de ranurado utilizada también tiene dos variantes: la herramienta de la ASTM, conocida como ranurador plano, que corta la superficie del suelo para hacer una garganta de profundidad 8 mm y la de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) con su herramienta sin cortador de superficie, conocida como ranurador curvo, que se utiliza con la especificación de un surco de 10 mm de profundidad, aunque esto no es controlado por la herramienta. Este ranurador curvo fue reconocido por Casagrande (1958) como insatisfactorio, ya que no controla la altura de la ranura; sin embargo, su uso ha persistido. Estas diferencias, claramente dan lugar a diferentes límites líquidos.

Casagrande en 1958, criticó el método de la copa para determinar el límite líquido, señalando varias fuentes de error como que el equipo no era estándar y errores en la rigidez de la plataforma sobre la que caía la copa. Sugirió realizar una prueba de resistencia al corte de los suelos para reemplazar la prueba de la copa en la medición del límite líquido de un suelo y así eliminar dichos problemas.

#### 2.4.2.1 Procedimiento.

Para la determinación del límite líquido de los suelos recolectados por el método de Casagrande, se siguió la norma INV-E 125 (INVIAS, 2013). En primera medida se determinó el método a escoger entre la determinación del límite líquido por multipuntos (A) o por un único punto (B). Para esta investigación se llevó a cabo el método A, con el fin de obtener resultados más confiables.

Cada suelo fue almacenado en un lugar libre de humedad y de los rayos del sol, con el fin de perturbar lo menos posible su estructura. Básicamente, la prueba se puede hacer mediante dos formas de preparación. La primera es mediante preparación por método húmedo y la segunda es por medio de la preparación en seco. Para el caso de esta investigación todos los límites líquidos se determinaron mediante la preparación de la muestra por vía seca. La razón es que, a diferencia de lo que se plantea comúnmente, Jang y Santamarina (2015) recomiendan determinar el límite líquido al suelo pasante al tamiz No. 200; es decir, a la fracción de suelo compuesta por limos y arcillas únicamente.

Los suelos compuestos mayoritariamente por partículas finas, en su condición natural suelen tener algún grado de humedad lo cual dificulta su tamización por el tamiz No. 200; de allí que el secado a la temperatura ambiente se debió realizar para obtener la fracción fina del suelo.

Posteriormente se realizó la determinación del límite líquido por el método de Casagrande siguiendo como norma principal la INV-E 125 de 2013 y como norma de verificación la ASTM D4318-05 (ASTM, 2005).

#### 2.4.2.2 Ranurador plano.

Este es el tipo de ranurador recomendado por la norma de INVIAS para la determinación del límite líquido por el método de Casagrande en Colombia (INVIAS, 2013). En la norma anterior, del año 2007, el INVIAS permitía el uso del ranurador curvo pero a partir del 2013 ya no lo permite porque considera que no es tan preciso como el ranurador plano puesto que no controla la profundidad de la ranura en la cazuela. En la Figura 21, se puede apreciar el ranurador plano con sus dimensiones admisibles, según lo estima la norma de INVIAS (2013).

La American Society for Testing and Materials (ASTM) solo estipula el uso del ranurador plano para determinar el límite líquido de suelos mediante la copa de Casagrande (ASTM, 2005).

LETRA	A*	B*	C*	D*	E*	F*
mm	$2 \pm 0.1$	$11 \pm 0.2$	$40 \pm 0.5$	$8 \pm 0.1$	$50 \pm 0.5$	$2 \pm 0.1$
LETRA	G	H	J	K*	L*	N
mm	10 (mínimo)	13	60	$10 \pm 0.05$	$60^\circ \pm 1^\circ$	20

\* Dimensiones especiales

NOTA: La dimensión "A" DEBE SER 1.9 - 2.0 Y LA DIMENSIÓN "D" debe ser 8.0 - 8.1 cuando el ranurador es nuevo con el fin de permitir una vida de servicio adecuada

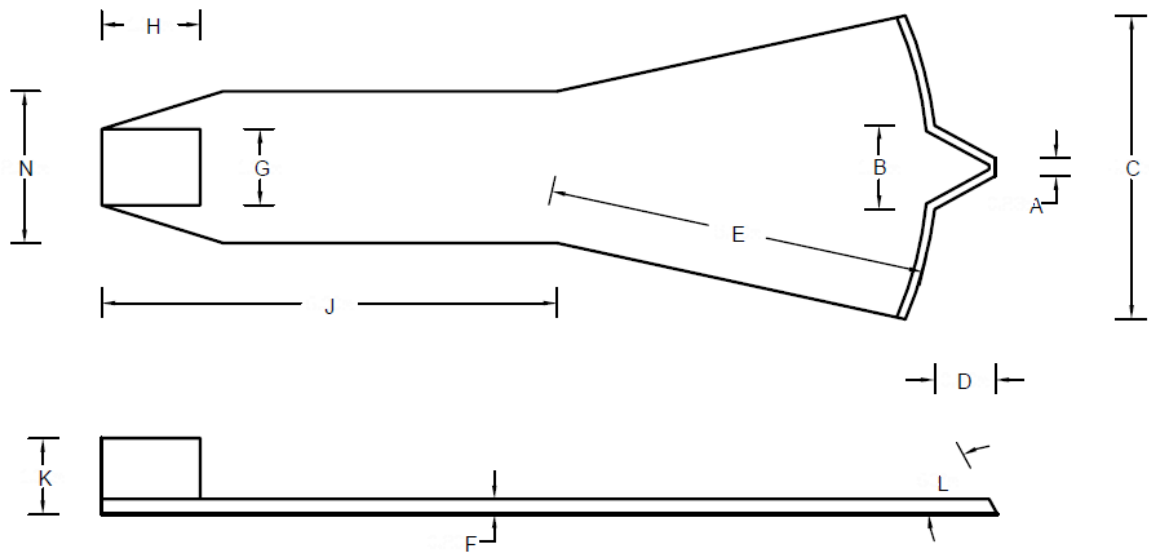
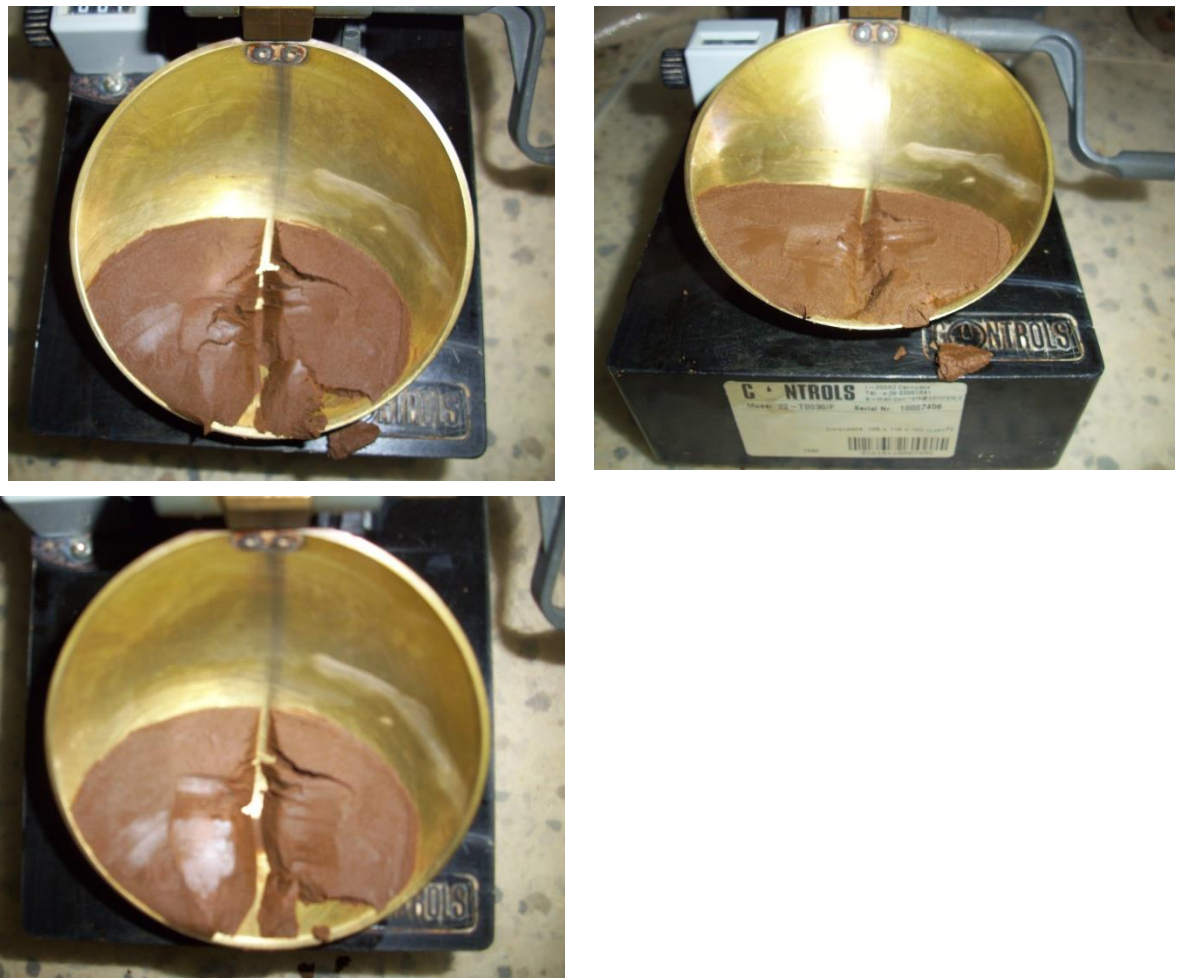


Figura 21. Medidas, esquema y fotografía del ranurador plano para el método de Casagrande. (ASTM, 2005).

Para el caso en que el fluido de poro era agua desionizada o salmuera 2-M se realizaron cinco pruebas de límite líquido con el ranurador plano para cada fluido y cada uno de los cinco suelos. Para el caso del kerosene no se pudo realizar ninguna determinación del límite líquido con el ranurador plano debido a la consistencia obtenida por el suelo. Como se puede apreciar en la Figura 22, el comportamiento de los suelos con el ranurador plano era poco plástico, reactivo al moldeo y a su acomodación en la copa de Casagrande. El ranurador plano, a diferencia del curvo, realiza un corte en el suelo, lo cual para el caso del kerosene imposibilitaba la estimación de un límite líquido confiable, más adelante se presenta un análisis más detallado del por qué pudo haber sucedido esto. En total se realizaron cincuenta determinaciones de límites líquidos con el ranurador plano.

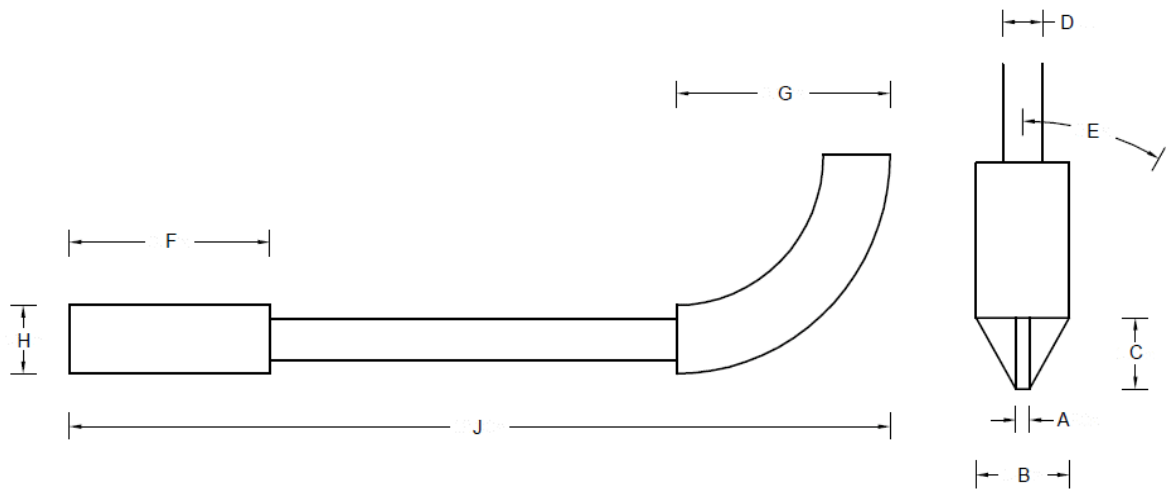


**Figura 22. Fotografías que demuestran la dificultad para la determinación del límite líquido por el método de Casagrande con el kerosene como fluido de poro.**

### 2.4.2.3 Ranurador curvo.

La American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) reglamenta el uso del ranurador curvo para poder determinar el límite líquido de los suelos (AASHTO, 2013). En la Figura 23 se puede apreciar el ranurador curvo con las dimensiones admisibles según la norma AASHTO T 89-02.

LETRA	A*	B*	C*	D*	E*	F*	G*	H*	J*
mm	2 ± 0.1	14 ± 0.2	11 ± 0.2	6	30 ± 0.5	30 ± 0.5	32 ± 0.5	10 ± 0.05	123



**Figura 23. Medidas, esquema y fotografía del ranurador curvo para el método de Casagrande. (AASHTO, 2013).**

Para los casos en que el fluido de poro era agua desionizada o salmuera 2-M se realizaron cinco determinaciones del límite líquido con cada fluido y para cada suelo. En el caso del kerosene, el ranurador curvo permitía un desplazamiento de la muestra al momento de la ranuración y no su corte como lo hace el ranurador



plano, luego se realizaron dos determinaciones del límite líquido con este fluido para cada suelo ya que las condiciones, aunque no eran las más óptimas, al menos permitía la ejecución del ensayo.

### 2.4.3 Método del penetrómetro de cono

En algunos países como Reino Unido, el penetrómetro de cono ha sido introducido como método principal para determinar el límite líquido de suelos. Existen diversos tipos de conos entre los cuales se pueden mencionar: Cono Sueco, Cono de Vasilev, Cono de Georgia Institute of Technology, Cono Hindú, Cono Francés y Cono Británico.

Para esta investigación se empleó el penetrómetro de cono Británico (BSI, 1990), el cual se puede apreciar en la Figura 24, como tercer método para determinar el límite líquido de los suelos. Este es un aparato automático que utiliza un cono de 30 grados para penetrar una muestra de suelo y según la profundidad de penetración, se puede estimar la consistencia del suelo. Este equipo no es de manejo en Colombia dado que la norma a seguir para los ensayos de caracterización y determinación de las propiedades de los suelos (INVIAS, 2013) plantea la copa de Casagrande como el equipo a usar para determinar el límite líquido de los suelos.



Equipo de penetración con el cono de 30 grados.



Copas para la colocación del suelo a penetrar

**Figura 24. Penetrómetro de cono para la determinación del límite líquido de suelos.**

Ensayos de límite líquido realizados con el penetrómetro de cono (BSI, 1990) son preferidos a aquellos ejecutados con la copa de Casagrande porque los resultados tienen una mayor repetitividad, son más fáciles de determinar y menos subjetivos (Jefferson & Rogers, 1998).

El ensayo de penetrómetro de cono se realizó cinco veces para cada uno de los tres fluidos empleados por muestra, es decir, que se obtuvieron 15 resultados de límites líquidos por muestra, 5 por cada tipo de fluido.

#### 2.4.3.1 Procedimiento.

Para el ensayo de las muestras por este método se siguió la norma BS 1377-2:1990 (BSI, 1990) por el método multipuntos y a la porción de suelo pasante del tamiz No. 200. Esta norma es británica y como ya se mencionó anteriormente, en América y particularmente Colombia, aún se aplica el método de la copa de Casagrande como primera alternativa para determinar el límite líquido de suelos. El método en general consiste en realizar penetraciones a la muestra con distintas humedades. El límite líquido se define como la humedad en la cual la penetración del cono es de 20 mm.

#### **2.4.4 Comparación copa de Casagrande y penetrómetro de cono**

Littleton & Farmilo (1977), determinaron el límite líquido de varios suelos empleando varias metodologías entre ellas el penetrómetro de cono y la copa de Casagrande, y llegaron a la conclusión de que para valores de límites líquidos menores al 100% ambos métodos presentaron pequeñas variaciones y concluyeron que no habría mayor diferencia si esa usaba un método u otro. Posteriormente, Wasti & Bezirci (1986), con base a sus estudios, dedujeron que el penetrómetro de cono no es un método recomendable para suelos muy expansivos, precisaron ventajas y desventajas para cada método como los efectos dinámicos, subjetividad, preparación de las muestras y demás.

El penetrómetro de cono británico arroja límites líquidos que corresponden razonablemente a los límites líquidos obtenidos con la copa de Casagrande, aunque en suelos extremadamente plásticos se conduce a diferentes valores. Valores de límites líquidos por encima de 100% obtenidos con el penetrómetro de cono tiende a ser ligeramente menores. Para valores altos de límites líquidos se recomienda usar el penetrómetro de cono y la copa de Casagrande para suelos finos con límites líquidos más pequeños (Schmitz & Van Paassen, 2003). A pesar de estos estudios no existe una correlación definida ya que los resultados dependen del rango del límite líquido de la zona de estudio.

El método de Casagrande tiene muchas deficiencias tales como la dificultad de cortar una ranura ideal, la velocidad de operación, o la estimación del cierre de la ranura. Por su parte, el penetrómetro de cono es el más usado en Gran Bretaña y produce resultados comparables con los obtenidos por el método de Casagrande, pero con menor variabilidad debido a su técnica (Spagnoli, 2012).

El contenido de agua determinado por el método de la copa de Casagrande está influenciado por varios factores como (a) el material de la base, (b) las dimensiones de la base, (c) el material, las dimensiones y el peso de la copa, (d) la altura de caída vertical de la copa, (e) el tipo de suelo y (f) el criterio del operador.

Los suelos derivados de cenizas volcánicas presentan cambios notables en sus valores de los límites de Atterberg según si los ensayos se hacen con muestras secadas previamente o sin secado previo; Vásquez (1979) notó que las variaciones son notables en los valores de los límites líquidos superiores al 50% en muestras tomadas en la ciudad de Pereira y concluyó que si a estos suelos se les va a dejar secar en la obra, de tal manera que su humedad natural disminuya de manera notable hasta valores similares a los cuales se realizan los ensayos normales (dejar secar para agregar agua), estos ensayos son válidos.

En resumen, se utilizará el método de Casagrande para determinar el límite líquido de las muestras de suelo. Por otro lado, aunque no se recomienda secar las muestras previamente debido a la variación en las propiedades del suelo, para el caso de las muestras tomadas en esta investigación, si se debió secarlas a temperatura ambiente, esto con el objetivo de obtener la fracción pasante del tamiz No. 200 como lo recomienda el método planteado por Jang y Santamarina (2015), además por los tipos de fluidos a emplear.

## **2.4.5 Métodos usados para determinar el límite plástico**

### **2.4.5.1 Método del rollo.**

Para la determinación del límite plástico de las muestras por este método, se siguió la norma INV-E 126 (INVIAS, 2013) con apoyo en la norma ASTM (ASTM, 2005). Este método describe el procedimiento del rollo y se realizó dos veces para cada muestra, de tal forma que para los cinco suelos se obtuvieron diez valores de límites plásticos en total.

#### 2.4.5.2 Método de Feng con el penetrómetro de cono.

Feng (2000) usó la relación entre el logaritmo de la profundidad de penetración y el logaritmo del contenido de humedad para inferir el límite plástico de un suelo. La relación entre el contenido de humedad y la penetración no necesariamente es lineal para todos los suelos, por lo cual sugirió un método que lo denomina bilineal y el cual relaciona ambos parámetros en escala logarítmica.

Algunos autores (Belviso et. al., 1985; Wood & Wroth, 1978) han planteado que la resistencia al corte sin drenaje en el límite plástico es alrededor de 100 veces la resistencia al corte sin drenar en el límite líquido. Así, dicha resistencia se lograría cuando la penetración del cono es de 2 mm en el cono de 30 grados, lo cual correspondería al límite plástico del suelo.

Se tiene que:

$$\log w = \log C + m \log d \quad [ 5 ]$$

Dónde:

$w$ : Humedad del suelo

$C$ : Punto de corte de la recta con el eje de vertical en una penetración de 1 mm

$m$ : Pendiente de la recta

$d$ : Penetración del cono

Aplicando propiedades de los logaritmos y según lo planteado para hallar la humedad en el límite plástico, se puede plantear la ecuación de la siguiente forma:

$$LP = C * 2^m \quad [ 6 ]$$

Este método teórico que se deriva de la prueba para determinar el límite líquido con el penetrómetro de cono se aplicó a los resultados con agua desionizada, de tal forma que se obtuvieron cinco valores de límite plástico según Feng para cada suelo.

## CAPITULO 3. MUESTRAS DE SUELOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

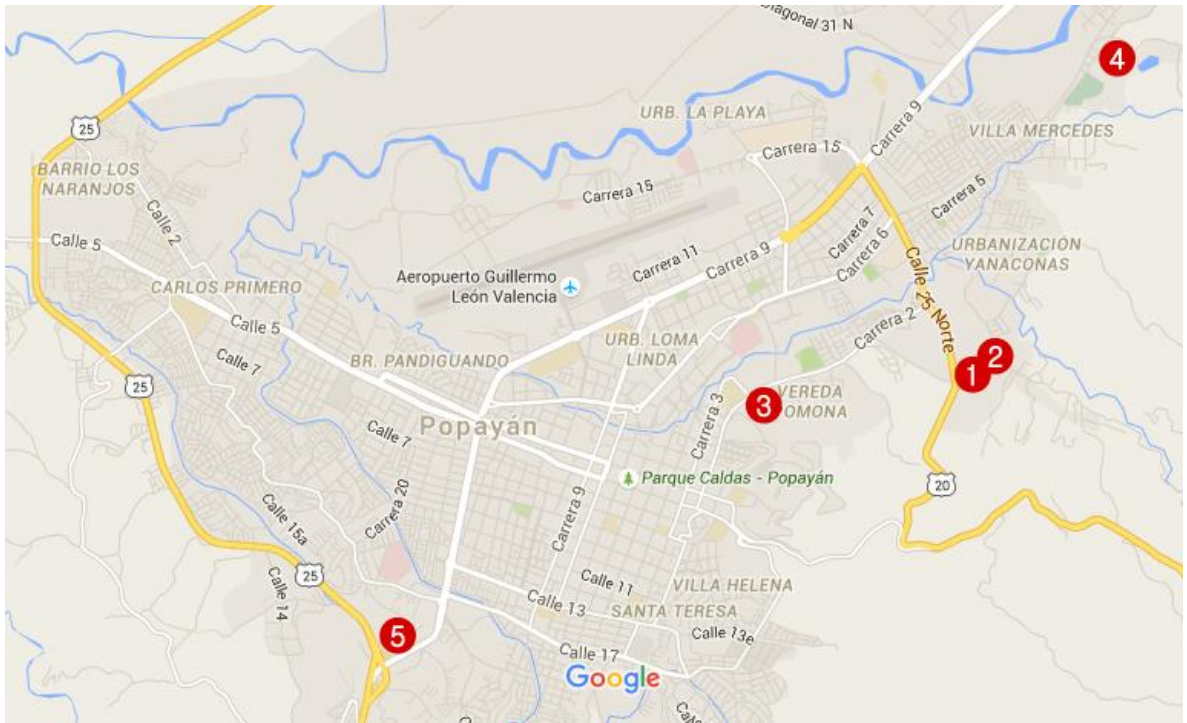
### 3.1 TOMA DE MUESTRAS

En total se tomaron cinco muestras de forma aleatoria en la ciudad de Popayán. Las muestras obtenidas fueron de tipo alterado tomadas durante los meses de Febrero y Marzo del año 2016; el tiempo climatológico durante este tiempo y en los meses previos fue seco con escasez de lluvia, las referencias de la muestras se resumen en la siguiente tabla (ver Tabla 2).

**Tabla 2. Referencia de las muestras tomadas para el estudio.**

Muestra	Localización	Profundidad	Descripción
1	K0+500 Vía a Coconuco	4.50-5.00 m	Suelo fino color rojizo
2	K0+500 Vía a Coconuco	0.50-1.00 m	Suelo fino color café claro.
3	Facultad Ingeniería Civil Unicauca	1.60-2.00 m	Suelo fino color café claro.
4	Calle 42N, a la altura de la Carrera 5	1.00-1.50 m	Suelo fino color amarillo marrón claro.
5	Vía a Timbío, intersección de la Panamericana	1.50-2.00 m	Suelo fino color amarillo.

En la Figura 25 se puede apreciar la ubicación de los puntos en donde se tomó cada muestra, durante la consecución de las mismas, se trató de que estuvieran repartidas en la ciudad para poder realizar un estudio representativo de los suelos en Popayán.



**Figura 25. Mapa de la zona urbana de Popayán con puntos de muestreo. Captura de Google maps.**

Las muestras de suelos fueron tomadas a distintas profundidades, según el sitio en donde se realizó el muestreo (ver Tabla 2). En la siguiente figura se muestran las fotografías de las muestras (ver Figura 26):



Muestra No 1



Muestra No 2



Muestra No 3



Muestra No 4



Muestra No 5

**Figura 26. Fotografías de las 5 muestras de suelo utilizadas en el estudio**

Se resume a continuación el programa de laboratorio ejecutado (ver Tabla 3):



**Tabla 3. Resumen programa de laboratorio ejecutado para las muestras en el estudio.**

<b>Ensayo</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>	<b>Muestra 4</b>	<b>Muestra 5</b>
Hidrómetro (INV-123)	2	2	2	2	2
Peso específico, Gs (INV-128)	1 (con dos puntos)	1 (con dos puntos)	1 (con dos puntos)	1 (con dos puntos)	1 (con dos puntos)
Granulometría (INV-123)	1	1	1	1	1
<b>Agua desionizada</b>					
Límite líquido – Casagrande ranurador plano (INV-125)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)
Límite líquido – Casagrande ranurador curvo (INV-125)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)
Límite líquido y límite plástico – Cono de caída (BS 1377-90)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)
Límite plástico – Casagrande (INV-126)	2	2	2	2	2
<b>Salmuera (concentración 2 Molar)</b>					
Límite líquido – Casagrande ranurador plano (INV-125)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)
Límite líquido – Casagrande ranurador curvo (INV-125)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)
Límite líquido y límite plástico – Cono de caída (BS 1377-90)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)



Ensayo	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Kerosene					
Límite líquido – Casagrande ranurador plano (INV-125)	0 *	0 *	0 *	0 *	0 *
Límite líquido – Casagrande ranurador curvo (INV-125)	2 (cada uno con 4 puntos)	2 (cada uno con 4 puntos)	2 (cada uno con 4 puntos)	2 (cada uno con 4 puntos)	2 (cada uno con 4 puntos)
Límite líquido y límite plástico – Cono de caída (BS 1377-90)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)	5 (cada uno con 4 puntos)

\* No se pudo realizar el ensayo porque al realizar la ranura en la muestra, ella se desgarraba y no permitía continuar con el procedimiento. La manipulación de la muestra cuando el fluido de poro era kerosene en general fue complicada durante la prueba de Casagrande. Para el caso de la determinación del límite líquido empleando el ranurador curvo solo se pudieron realizar dos pruebas por muestra dado que este tipo de ranurador no corta la muestra sino que la desplaza aunque los resultados obtenidos con este método no se consideran del todo confiables.

### 3.2 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

La secuencia de ensayos para cada una de las muestras fue la misma. El procedimiento inicio con la toma de las muestras en los puntos anteriormente indicados, con implementos operados de forma manual. Seguidamente cada muestra fue llevada al laboratorio y se trabajó con el pasante del Tamiz No 200 para todas las pruebas excepto la granulometría que si involucró las fracciones originales del suelo. Los ensayos realizados se pueden observar en la Tabla 4.

**Tabla 4. Resumen de ensayos y normas utilizadas en la investigación**

Ensayo	Norma usada	Norma(s) de apoyo o verificación usada(s)	Observaciones
Hidrómetro	INV-E 123	INV-E 124 (2007)	Ensayo realizado al pasante Tamiz No 200
Peso específico, Gs	INV-E 128		Ensayo realizado al pasante Tamiz No 200
Granulometría	INV-E 123		
Límite líquido – Casagrande ranurador plano	INV-E 125	ASTM D4318-05	Ensayo realizado al pasante Tamiz No 200
Límite líquido – Casagrande ranurador curvo	INV-E 125 (2007)	AASHTO T-89	Ensayo realizado al pasante Tamiz No 200
Límite líquido y limite plástico – Cono de caída	BS 1377-90		Ensayo realizado al pasante Tamiz No 200
Límite plástico – Casagrande	INV-E 126	ASTM D4318-05	Ensayo realizado al pasante Tamiz No 200

Se muestra a continuación un registro fotográfico de las pruebas de laboratorio realizadas por ensayo.

- Hidrómetro



Preparación de las muestras previamente al ensayo.



Agitación de la lechada: 60 vueltas durante un minuto.



Inicio de la sedimentación de la solución.



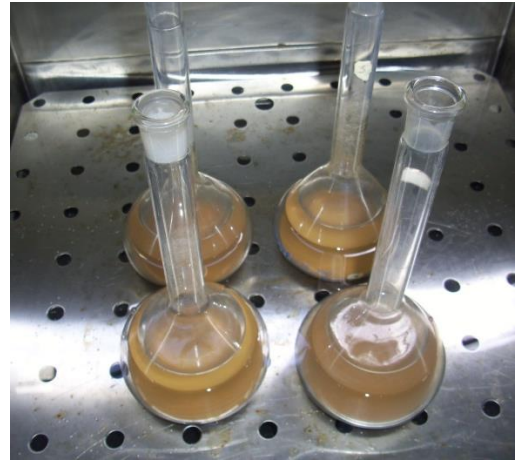
Toma de lectura del hidrómetro en los tiempos establecidos según norma.

**Figura 27. Registro fotográfico de la prueba de Hidrómetro.**

- Peso específico



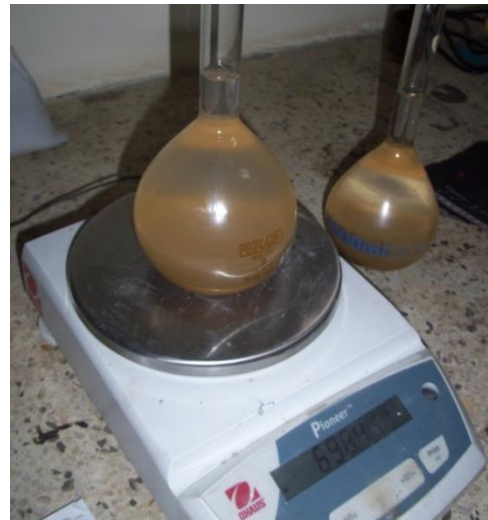
Matraces con las muestras de suelo seco.



Estabilización de la temperatura de las muestras.



Extracción de los vacíos con aire de cada lecha en la bomba de vacíos.

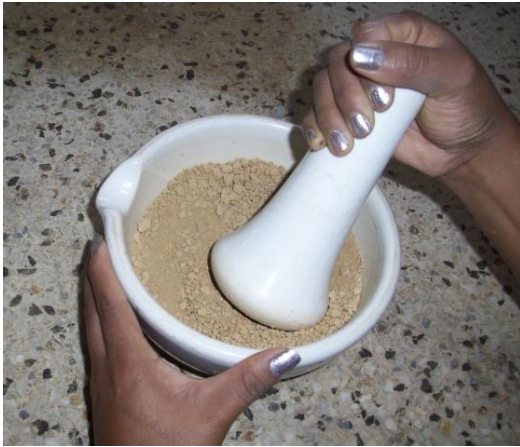


Obtención de las masas durante del ensayo.

**Figura 28. Registro fotográfico de la prueba de peso específico.**



- Granulometría



Disgregación de la muestra con el motero.



Lavado de la muestra por el tamiz No 200.



Obtención de las fracciones de suelo entre cada abertura de tamiz.



Ejemplo de gradación final de una muestra.

**Figura 29. Registro fotográfico prueba de granulometría.**

- Límite Líquido Casagrande



Disposición de la muestra en la copa de Casagrande.



Ranuración a lo largo de la muestra. En figura el ranurador plano.



Toma de los testigos de humedad con su correspondiente referencia.



Introducción de los testigos de humedad en el horno durante el tiempo necesario para obtener masa constante.

**Figura 30. Registro fotográfico de la determinación del límite líquido por el método de Casagrande.**



- Límite Líquido Cono



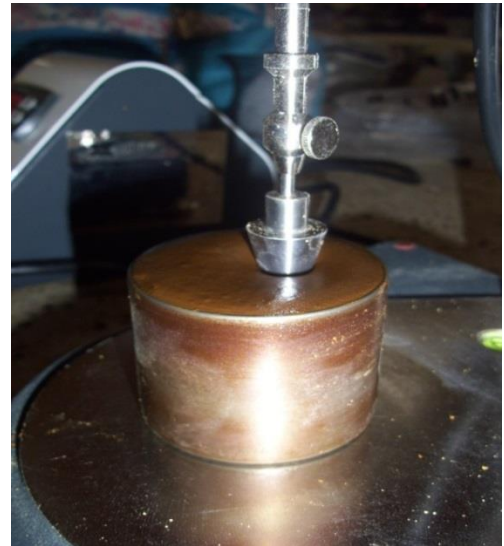
Equipo de penetrómetro de cono.



Disposición de la muestra en la copa antes de proceder a la penetración.



Descenso del cono para el registro de la lectura inicial.



Lectura final y penetración del cono en la muestra.

**Figura 31. Registro fotográfico determinación del límite líquido por el método del Penetrómetro de cono.**

- Límite plástico



El método indica el amasado del suelo con la mano del operador.



Se deben realizar rollos del suelo en donde se presenten grietas cuando este tenga un diámetro determinado.

**Figura 32. Registro fotográfico determinación del límite plástico por el método de rollo.**



## **CAPITULO 4. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS DE POPAYÁN CON EL SUCS, ASSHTO Y EL NUEVO MÉTODO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS**

### **4.1 RESULTADOS**

En la Tabla 5 se presentan los resultados de todos los límites líquidos determinados para cada una de las cinco muestras de suelo. Dichos resultados se muestran para cada método (a) Copa de Casagrande con ranurador plano, (b) copa de Casagrande con ranurador curvo y (c) penetrómetro de cono. Los resultados también se pueden apreciar según el fluido de poro (a) agua desionizada, (b) salmuera y (c) kerosene.

Precisión según INVIAS 2007: La norma INV-E 125 2007 titulada “Determinación del límite líquido de los suelos” plantea una repetibilidad aplicable a suelos con límite líquido entre 21% y 67%, según la cual, “...dos resultados obtenidos por el mismo operador, con la misma muestra, en el mismo laboratorio y usando los mismos aparatos y en días diferentes deben cuestionarse si difieren en más del 7% de su promedio...”. Para este proyecto se realizó un mayor número de determinaciones para cada suelo y dado que no se encontró con otro parámetro que cuestionara la precisión u homogeneidad de los resultados, se adoptó el anterior enunciado como permisible. La norma INV-E 125 2013 no plantea una precisión para estimar dos o más resultados como aceptables.

De igual forma, todos los valores de límites líquidos obtenidos en esta investigación cumplieron con la precisión asumida y no hubo lugar a repetición de pruebas debido a valores por fuera del rango de precisión.

**Tabla 5. Resultados de todos los límites líquidos determinados con cada líquido y a cada suelo por los tres métodos.**

No. Muestra	LL obtenidos con la copa de Casagrande (%)					LL obtenidos con el penetrómetro de cono (%)		
	Ranurador plano		Ranurador curvo			Agua desionizada	Salmuera	Kerosene
	Agua desionizada	Salmuera	Agua desionizada	Salmuera	Kerosene			
1	78.2	51.6	73.1	53.5	56.9	86.6	53.4	70.6
	78.0	51.7	73.0	51.7		86.3	53.4	70.3
	77.4	51.4	74.3	50.1	56.8	88.6	53.6	70.0
	80.1	52.5	71.7	49.4		87.5	53.7	69.9
	80.2	51.9	73.6	53.8		88.4	54.4	71.0
2	75.4	47.9	73.4	44.9	64.0	77.5	54.1	77.2
	73.8	47.7	71.8	47.6		78.8	53.0	77.0
	72.9	48.6	74.0	47.1	63.3	77.5	52.9	76.8
	74.9	49.1	71.8	47.9		80.1	52.7	76.8
	74.3	47.7	72.8	46.3		81.6	53.9	77.0
3	77.2	44.0	71.5	43.1	53.8	77.8	43.7	60.9
	78.4	43.8	71.2	41.7		79.0	44.1	61.4
	77.1	43.4	71.0	42.1	53.5	77.4	44.0	62.0
	77.3	45.2	72.8	43.6		76.9	44.2	61.3
	75.4	43.5	71.2	43.5		75.9	44.2	61.2
4	80.6	49.1	73.4	43.9	66.2	87.2	48.0	73.2
	77.4	47.2	74.3	46.0		86.7	47.6	73.2
	81.2	48.2	74.1	44.2	66.0	87.3	47.5	73.3
	79.7	48.5	75.1	44.7		87.4	47.6	73.5
	78.1	48.8	74.1	45.8		86.6	48.5	73.2
5	96.1	58.4	92.6	54.0	69.9	94.0	56.5	81.7
	94.8	58.9	93.2	54.4		96.2	56.3	81.8
	95.3	59.5	90.6	55.1	71.2	96.2	57.3	81.3
	94.9	59.4	91.4	53.9		96.1	57.0	81.6
	93.9	58.6	91.6	54.8		95.3	56.3	81.6

En la Tabla 6 se muestran los resultados promedio de todos los límites líquidos con agua desionizada, kerosene y salmuera NaCl 2-M realizados a los cinco suelos para esta investigación. Para ver cada una de las cinco pruebas realizadas a cada suelo con cada fluido de poro ver Anexo A, Anexo B y Anexo C de este documento. De cada conjunto de cinco resultados de límites líquidos se obtuvo el promedio aritmético para estimar valor planteado en la Tabla 6.

**Tabla 6. Resultados promedio de los límites líquidos determinados a cada suelo para el método de Casagrande (Ranurador plano y curvo) y el método del penetrómetro de cono.**

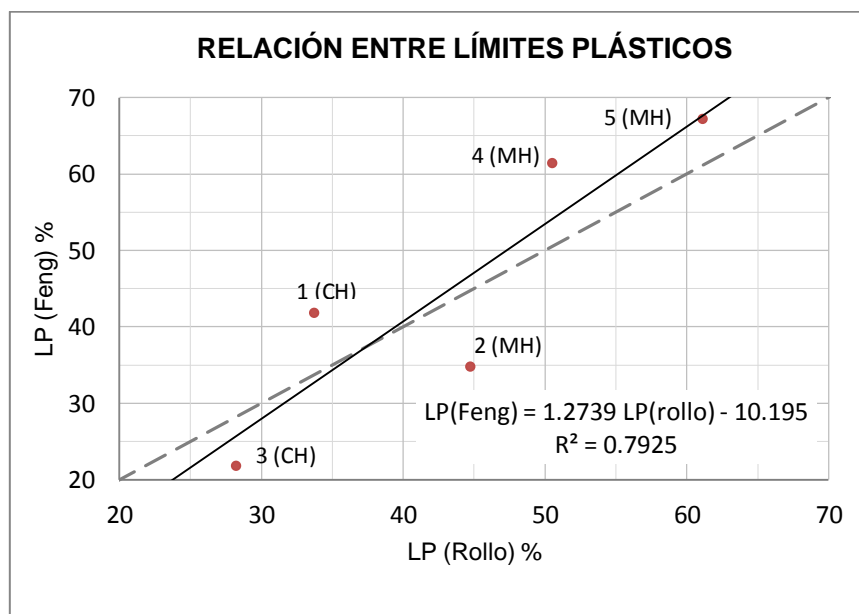
Suelo	Método de Casagrande					Método de Penetrómetro de cono		
	Ranurador plano		Ranurador curvo			Agua desionizada	Salmuera	Kerosene
	Agua desionizada	Salmuera	Agua desionizada	Salmuera	Kerosene			
1	78.8	51.8	73.1	51.7	56.9	87.5	53.7	70.4
2	74.3	48.2	72.8	46.8	63.7	79.1	53.3	77.0
3	77.1	44.0	71.5	42.8	53.7	77.4	44.0	61.4
4	79.4	48.4	74.2	44.9	66.1	87.0	47.8	73.3
5	95.0	59.0	91.9	54.4	70.6	95.6	56.7	81.6

A continuación se presentan en la Tabla 7 los resultados promedios de los límites plásticos determinados por el método de rollo y los resultados inferidos por el método de Feng. En el Anexo D y Anexo E de este documento se detallan todos los resultados de las dos determinaciones del límite plástico por el método de rollo realizado a cada suelo; además de la aplicación del método Feng (Feng, 2000) a partir de la determinación del límite líquido con el penetrómetro de cono. Así se tiene que se obtuvieron cinco valores de límite plástico según Feng y dos valores de límite plástico por el método de rollo para cada suelo; además se obtuvo el promedio aritmético de dichos valores el cual se puede apreciar en la Tabla 7.

**Tabla 7. Resultados de límites de límites plásticos por método de rollo y método de Feng.**

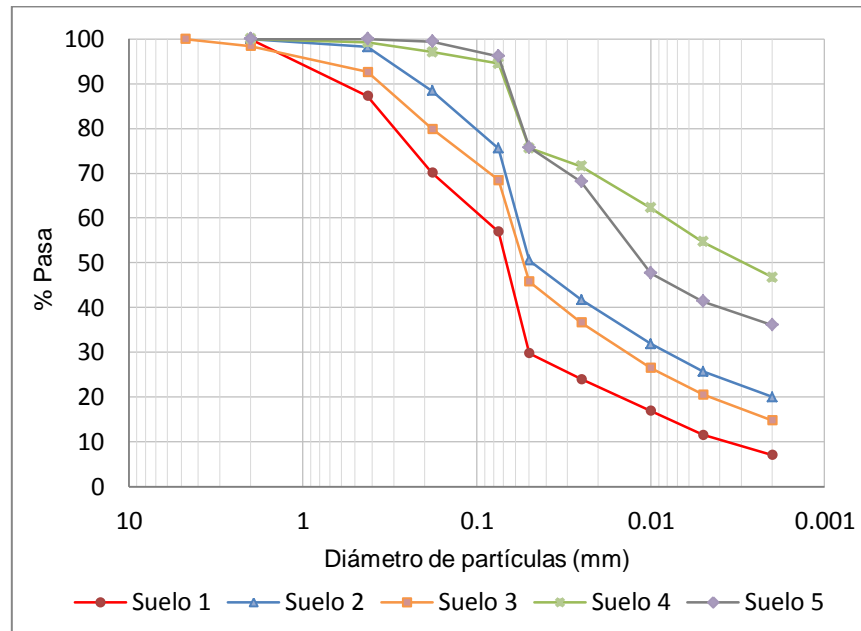
Suelo	LP (Método rollo)	LP (Feng)
1	33.7	41.8
2	44.7	34.8
3	28.2	21.8
4	50.5	61.4
5	61.1	67.2

En la Figura 33 se graficó el límite plástico estimado para cada suelo por los dos métodos. Cabe destacar que tan sólo se determinaron cinco puntos lo cual dificulta establecer una correlación lineal confiable entre ambos métodos. Lo que se puede apreciar es que la tendencia podría ser lineal hacia la línea LP (Rollo) = LP (Feng). Para este caso es imposible aceptar o descartar una relación entre ambos métodos pero si se podría investigar aún más para poder estimar el límite plástico de un suelo mediante una prueba más confiable, reproducible y objetiva que el método del rollo.



**Figura 33. Gráfica de relación entre los límites plásticos según Feng y método de rollo.**

Según los resultados obtenidos con el ensayo de granulometría e hidrómetro (INV-E 123) se logró determinar la curva granulométrica de cada suelo desde su tamaño máximo nominal hasta un diámetro de partícula de 2  $\mu\text{m}$  (Según granulometría, frontera entre una partícula tipo limo y una tipo arcilla), las cuales se pueden apreciar en la Figura 34. En el Anexo G y Anexo H de este documento, se pueden apreciar en detalle los resultados de los ensayos de hidrómetro y granulometría para cada uno de los cinco suelos.



**Figura 34. Curvas granulométricas de los cinco suelos estudiados en la investigación.**

Además se estableció el contenido de arena, limo y arcilla presente en cada suelo con base en cada curva granulométrica. Como se ha mencionado anteriormente, la determinación de los límites de Atterberg se realizó sobre la fracción pasante del Tamiz No 200 de cada muestra de suelo, por lo cual se obtuvo una gradación de las muestras inalteradas en distribución de tamaños y otra para la muestra teniendo en cuenta únicamente la fracción fina. Los contenidos de las muestras teniendo en cuenta toda la gradación se muestran en la Tabla 8, en la Tabla 9 se aprecian los contenidos teniendo en cuenta sólo la fracción pasante del Tamiz No 200 de cada muestra.

**Tabla 8. Contenido de arena, limo y arcilla en cada uno de los cinco suelos teniendo en cuenta toda su gradación.**

Suelo	Contenido de arena (%)	Contenido de limo (%)	Contenido de arcilla (%)
1	43.0	50.0	7.0
2	24.4	55.6	20.0
3	31.5	53.7	14.8
4	5.5	47.8	46.7
5	3.8	60.1	36.1

**Tabla 9. Contenido de limo y arcilla en cada uno de los cinco suelos teniendo en cuenta solo la fracción fina (Pasante Tamiz No 200).**

Suelo	Contenido de limo (%)	Contenido de arcilla (%)
1	87.7	12.3
2	73.5	26.5
3	78.4	21.6
4	50.6	49.4
5	62.5	37.5

#### **4.2 CLASIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS SEGÚN SUCS Y AASHTO**

A continuación se presenta la clasificación de las muestras por el método SUCS. Los resultados que se muestran corresponden a cada una de las cinco determinaciones del límite líquido realizadas por muestras y por método de ensayo. Los valores de límites líquidos graficados a continuación corresponden a los determinados con agua desionizada únicamente, con cada uno de los tres métodos y los cuales se aprecian en la Tabla 5. Para el cálculo de los índices de plasticidad se tuvo en cuenta el límite plástico determinado por el método de rollo. El límite plástico según Feng no se tuvo en cuenta dado que su determinación se deriva del ensayo del límite plástico por el método del penetrómetro de cono y por lo tanto es una estimación teórica.

En la Tabla 10 se aprecia la clasificación de los suelos por SUCS obtenida con cada uno de los tres métodos que se usó para determinar el límite líquido de las

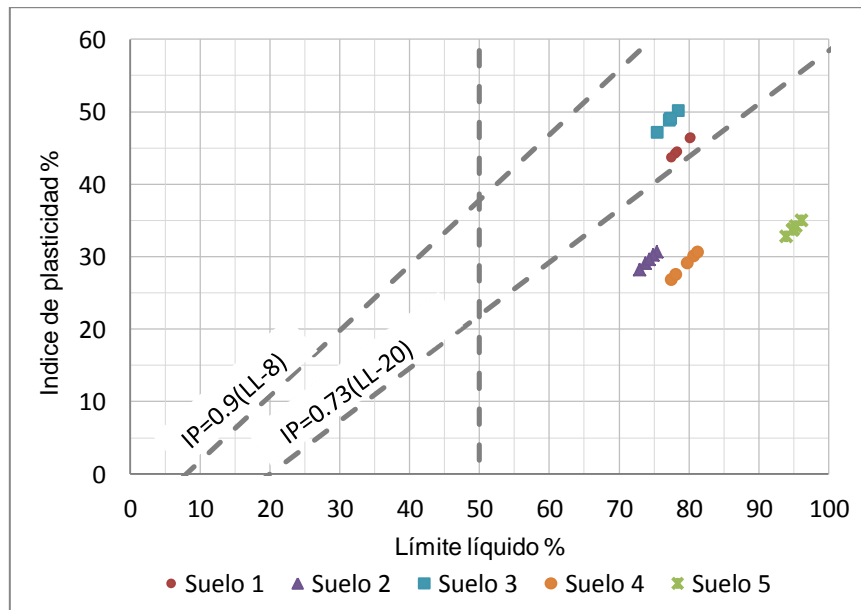
muestras, según los resultados promedio del límite líquido (ver Tabla 6) y límite plástico (ver Tabla 7).

**Tabla 10. Resumen de clasificación de los cinco suelos por SUCS.**

Suelo	Pasa No 200 (%)	LP (%)	Ranurador plano			Ranurador curvo			Penetrómetro de cono		
			LL (%)	IP (%)	SUCS	LL (%)	IP (%)	SUCS	LL (%)	IP (%)	SUCS
1	57.0	33.7	78.8	45.1	CH	73.1	39.4	CH	87.5	53.8	CH
2	75.6	44.7	74.3	29.6	MH	72.8	28.1	MH	79.1	34.4	MH
3	68.5	28.2	77.1	48.9	CH	71.5	43.3	CH	77.4	49.2	CH
4	94.5	50.5	79.4	28.9	MH	74.2	23.7	MH	87.0	36.5	MH
5	96.2	61.1	95.0	33.9	MH	91.9	30.8	MH	95.6	34.5	MH

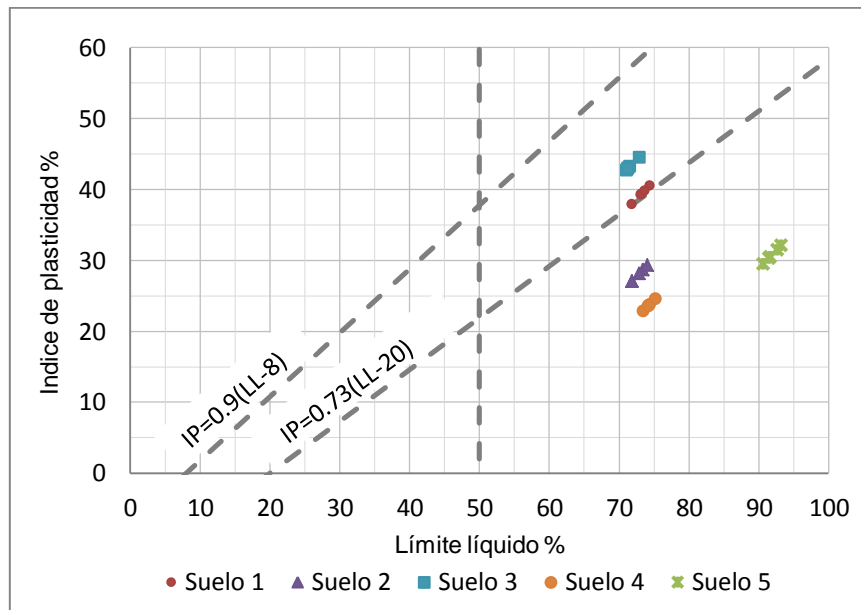
Dado que todos los suelos son finos (% Pasa 200 > 50%), con los valores de los límites líquidos e índice de plasticidad se ubican los suelos en la carta de plasticidad SUCS. En las Figura 35, Figura 36 y Figura 37 se puede apreciar la ubicación de los suelos en la carta, teniendo en cuenta cada uno de los cinco límites líquidos que se realizaron por muestra.

- Clasificación SUCS según datos obtenidos con el método de Casagrande-Ranurador plano:



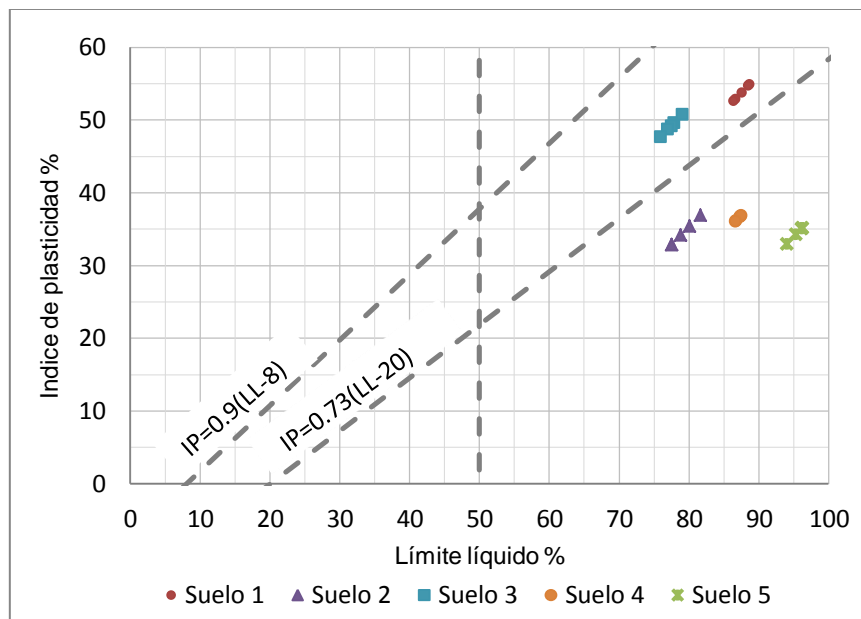
**Figura 35. Ubicación de los cinco suelos en la carta de plasticidad (SUCS) según resultados con método de Casagrande-Ranurador plano.**

- Clasificación SUCS según datos obtenidos con el método de Casagrande-Ranurador curvo:



**Figura 36. Ubicación de los cinco suelos en la carta de plasticidad (SUCS) según resultados con método de Casagrande-Ranurador curvo**

- Clasificación SUCS según datos obtenidos con el método del penetrómetro de cono:



**Figura 37. Ubicación de los cinco suelos en la carta de plasticidad (SUCS) según resultados con método de Penetrómetro de cono.**

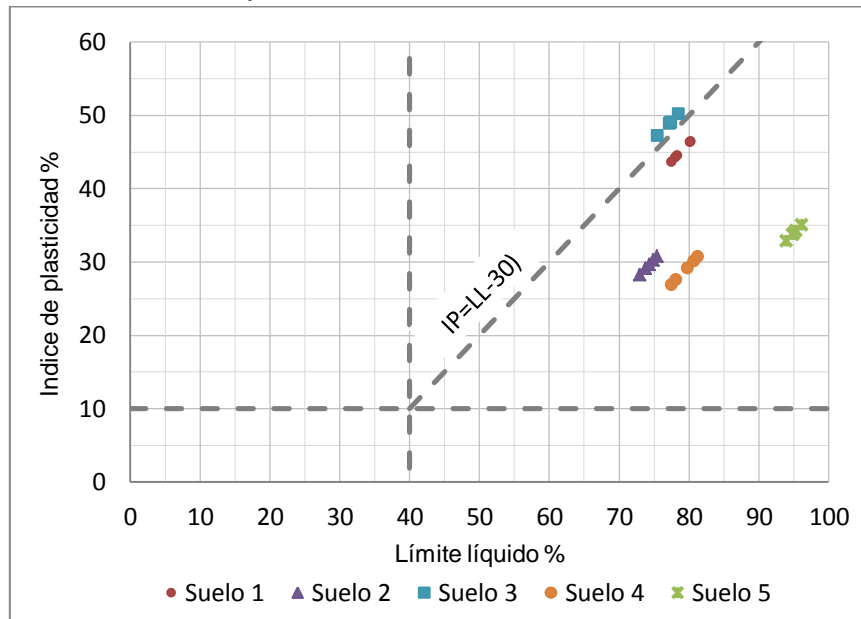


A continuación se presenta en la Tabla 11 la clasificación de los suelos por el sistema AASHTO según cada método de determinación del límite líquido. Los valores presentados son los de agua desionizada de la Tabla 6 y con los límites plásticos según el método de rollo (ver Tabla 7) se determinó el índice de plasticidad.

**Tabla 11. Resumen de clasificación de los cinco suelos por el sistema AASHTO**

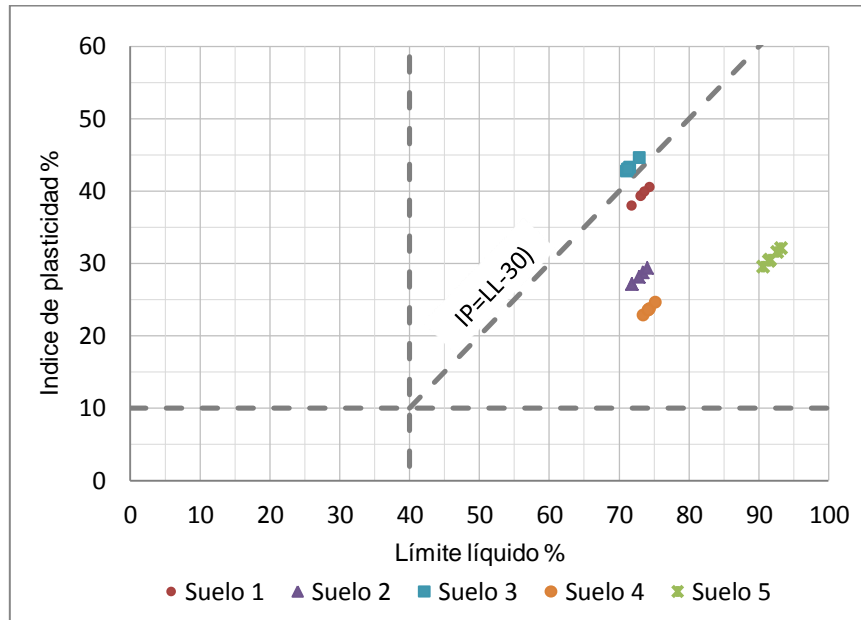
Suelo	Pasa No 200 (%)	LP (%)	Ranurador plano			Ranurador curvo			Penetrómetro de cono		
			LL (%)	IP (%)	AASHTO	LL (%)	IP (%)	AASHTO	LL (%)	IP (%)	AASHTO
1	57.0	33.7	78.8	45.1	A-7-5	73.1	39.4	A-7-5	87.5	53.8	A-7-5
2	75.6	44.7	74.3	29.6	A-7-5	72.8	28.1	A-7-5	79.1	34.4	A-7-5
3	68.5	28.2	77.1	48.9	A-7-6	71.5	43.3	A-7-6	77.4	49.2	A-7-6
4	94.5	50.5	79.4	28.9	A-7-5	74.2	23.7	A-7-5	87.0	36.5	A-7-5
5	96.2	61.1	95.0	33.9	A-7-5	91.9	30.8	A-7-5	95.6	34.5	A-7-5

- Clasificación AASHTO según datos obtenidos con el método de Casagrande-Ranurador plano:



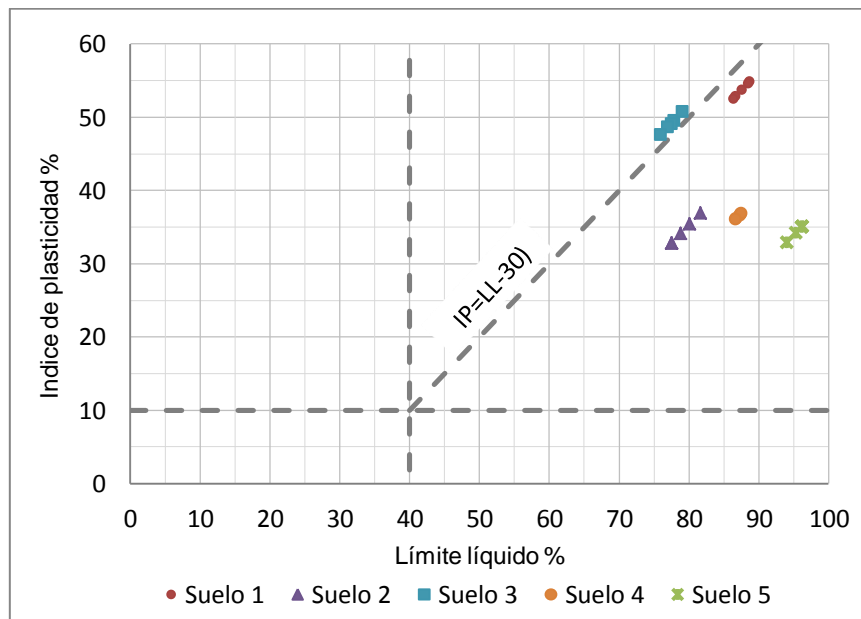
**Figura 38. Ubicación de los cinco suelos en la carta de la AASHTO según resultados con método de Casagrande-Ranurador plano.**

- Clasificación AASHTO según datos obtenidos con el método de Casagrande-Ranurador curvo:



**Figura 39. Ubicación de los cinco suelos en la carta de la AASHTO según resultados con método de Casagrande-Ranurador curvo.**

- Clasificación AASHTO según datos obtenidos con el método del penetrómetro de cono:



**Figura 40. Ubicación de los cinco suelos en la carta de la AASHTO según resultados con método de Penetrómetro de cono.**

### 4.3 CLASIFICACION DE LAS MUESTRAS SEGÚN EL NUEVO MÉTODO

Para realizar la clasificación de las muestras por el nuevo sistema se partió de los resultados de los límites líquidos obtenidos con los tres fluidos de poro: agua desionizada, salmuera y kerosene. La clasificación se realizó con los resultados de la prueba de penetrómetro de cono y de Casagrande-Ranurador curvo. Con la prueba de Casagrande-Ranurador plano no se pudo determinar el límite líquido cuando el fluido de poro era el kerosene, por lo cual la clasificación por este método no fue posible.

Siguiendo el procedimiento de la nueva clasificación (ver Numeral 2.3.5) se procedió a calcular las relaciones de LL según las ecuaciones [ 2 ] y [ 3 ] de este documento. Con las relaciones obtenidas, las cuales se pueden apreciar en la Tabla 12 para los resultados del Penetrómetro de cono y la Tabla 13 para el método de Casagrande-Ranurador curvo, se calcula y grafica la sensibilidad eléctrica del fluido. Los valores de límites líquidos que se muestran corresponden al promedio de cada una de las cinco determinaciones realizadas por tipo de fluido y suelo; para el caso en que el fluido de poro es kerosene por el método de Casagrande-Ranurador curvo, se promediaron los dos valores de límite líquido de cada suelo.

**Tabla 12. Relaciones de LL método de Penetrómetro de cono para la determinación de la sensibilidad eléctrica.**

Suelo	LL <sub>AD</sub>	LL <sub>NaCl</sub>	LL <sub>Ker</sub>	$\frac{LL_{Ker}}{LL_{NaCl}}$	$\frac{LL_{AD}}{LL_{NaCl}}$	$\frac{LL_{ker}}{LL_{NaCl}} _{\text{correg.}}$	$\frac{LL_{AD}}{LL_{NaCl}} _{\text{correg.}}$
1	87.5	53.7	70.4	1.31	1.63	1.50	1.53
2	79.1	53.3	77.0	1.44	1.48	1.65	1.39
3	77.4	44.0	61.4	1.39	1.76	1.61	1.67
4	87.0	47.8	73.3	1.53	1.82	1.76	1.72
5	95.6	56.7	81.6	1.44	1.69	1.64	1.57

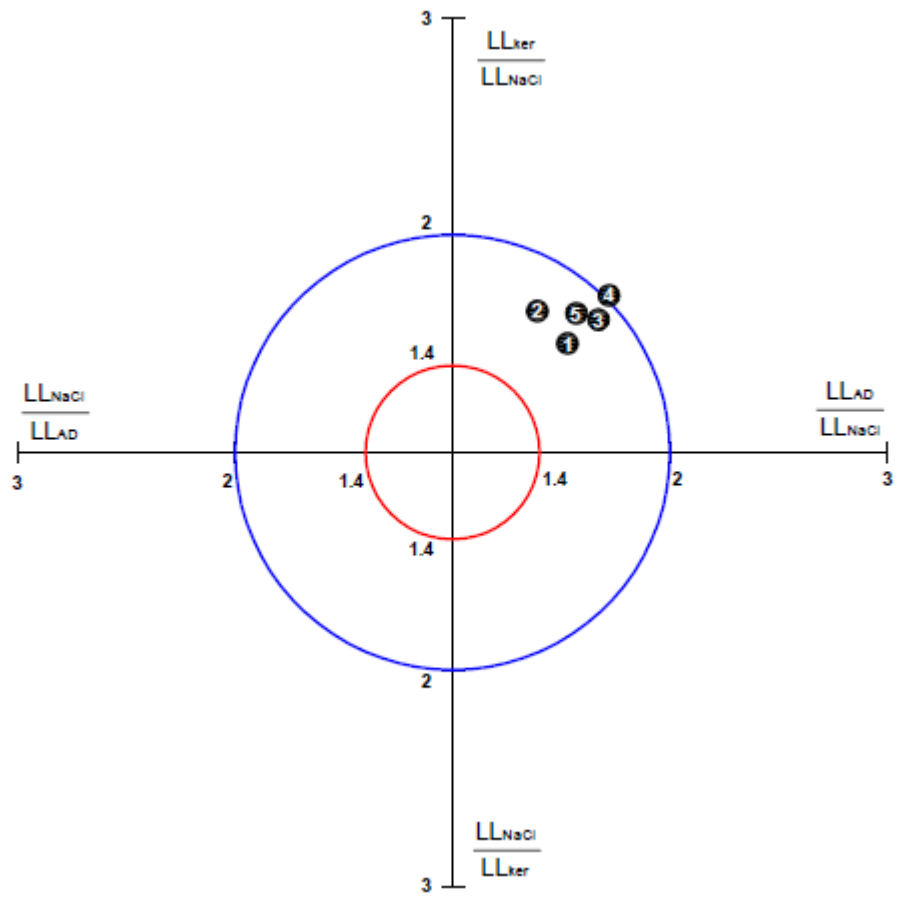
**Tabla 13. Relaciones de LL método de Casagrande-Ranurador curvo para la determinación de la sensibilidad eléctrica.**

Suelo	LL <sub>AD</sub>	LL <sub>NaCl</sub>	LL <sub>Ker</sub>	$\frac{LL_{Ker}}{LL_{NaCl}}$	$\frac{LL_{AD}}{LL_{NaCl}}$	$\frac{LL_{ker}}{LL_{NaCl}} _{\text{correg.}}$	$\frac{LL_{AD}}{LL_{NaCl}} _{\text{correg.}}$
1	73.1	51.7	56.9	1.10	1.41	1.26	1.33
2	72.8	46.8	63.7	1.36	1.56	1.57	1.47
3	71.5	42.8	53.7	1.25	1.67	1.45	1.59
4	74.2	44.9	66.1	1.47	1.65	1.70	1.57
5	91.9	54.4	70.6	1.30	1.69	1.48	1.58

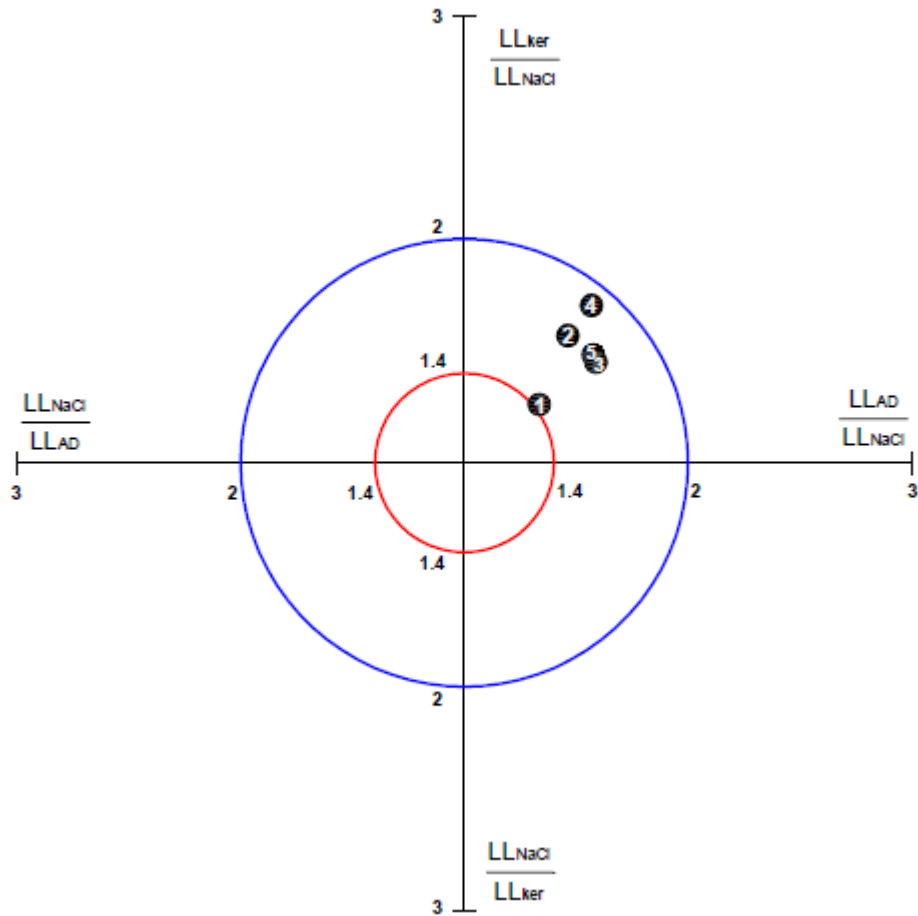
De acuerdo con las relaciones de LL obtenidas, se determina la sensibilidad eléctrica de cada suelo por ambos métodos (ver Tabla 14) y se ubican en la gráfica que representa la sensibilidad eléctrica de los suelos (ver Figura 41 y Figura 42).

**Tabla 14. Determinación de la sensibilidad eléctrica de los suelos. Límites líquidos método Penetrómetro de cono y Casagrande-Ranurador curvo.**

Suelo	Penetrómetro de cono			Casagrande-Ranurador curvo		
	$\frac{LL_{ker}}{LL_{NaCl}} _{\text{correg.}}$	$\frac{LL_{AD}}{LL_{NaCl}} _{\text{correg.}}$	S <sub>E</sub>	$\frac{LL_{ker}}{LL_{NaCl}} _{\text{correg.}}$	$\frac{LL_{AD}}{LL_{NaCl}} _{\text{correg.}}$	S <sub>E</sub>
1	1.50	1.53	0.72	1.26	1.33	0.42
2	1.65	1.39	0.76	1.57	1.47	0.74
3	1.61	1.67	0.90	1.45	1.59	0.74
4	1.76	1.72	1.05	1.70	1.57	0.90
5	1.64	1.57	0.86	1.48	1.58	0.75



**Figura 41. Representación gráfica de la sensibilidad eléctrica de los cinco suelos. Método Penetrómetro de cono.**



**Figura 42. Representación gráfica de la sensibilidad eléctrica de los cinco suelos. Método Casagrande-Ranurador curvo.**

Finalmente se ubica cada suelo en la nueva carta planteada por Jang y Santamarina. Dicha carta tiene en el eje de las abscisas el límite líquido determinado con salmuera y en las ordenadas la sensibilidad eléctrica del suelo. El límite líquido determinado con salmuera se utiliza en lugar del agua desionizada para evitar ambigüedades asociadas con la existencia de iones en el suelo. La sensibilidad eléctrica como se ha mencionado, permite establecer la vulnerabilidad del suelo a cambios en la permitividad del fluido de poro y conductividad eléctrica.

El resumen de la clasificación de los suelos por el nuevo método se aprecia en la Tabla 15 para el método de Penetrómetro de cono y Casagrande-Ranurador curvo. Se informa la clasificación como no (N), baja (L), intermedia (I) o alta (H) plasticidad de los granos finos de baja (L), intermedia (I) o alta (H) sensibilidad eléctrica.

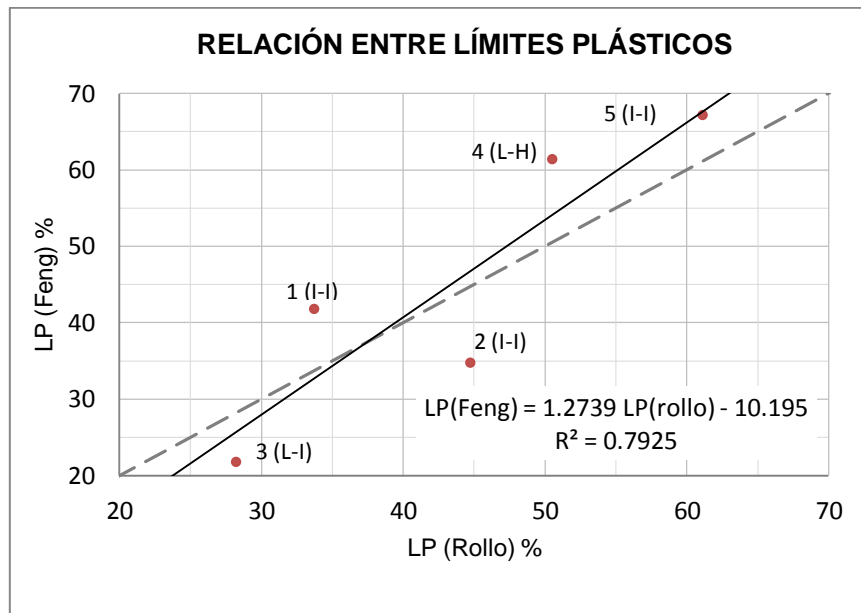
**Tabla 15. Resumen de clasificación de los cinco suelos según la nueva clasificación (Jang y Santamarina, 2015).**

Suelo	Pasa No 200 (%)	Penetrómetro de cono				Ranurador curvo			
		LL-NaCl	S <sub>E</sub>	Nueva clasificación		LL-NaCl	S <sub>E</sub>	Nueva clasificación	
				Plasticidad	Sensitividad S <sub>E</sub>			Plasticidad	Sensitividad S <sub>E</sub>
1	57.0	53.7	0.72	I	I	51.7	0.42	I	I
2	75.6	53.3	0.76	I	I	46.8	0.74	L	I
3	68.5	44.0	0.90	L	I	42.8	0.74	L	I
4	94.5	47.8	1.05	L	H	44.9	0.90	L	I
5	96.2	56.7	0.86	I	I	54.4	0.75	I	I

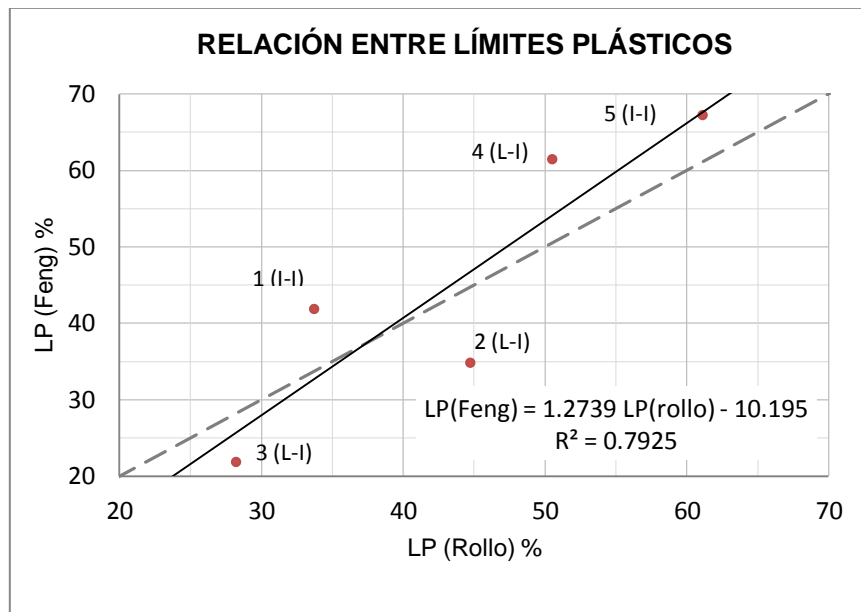
En la Figura 43 y 44 se grafica el mismo análisis de la figura 33, pero ahora con referencia al nuevo sistema de clasificación de suelos.

En las Figura 45 y Figura 46 se aprecia la ubicación de los suelos estudiados en la nueva carta para los métodos de Penetrómetro de cono y Casagrande-Ranurador plano, respectivamente.

Finalmente se presenta en la Tabla 16 la clasificación de cada uno de los cinco suelos por el nuevo Sistema de clasificación propuesto por Jang y Santamarina en 2015 y por los dos actuales sistemas de clasificación de suelos: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y Sistema de clasificación de la *American Association of State Highway Officials* (AASHTO).

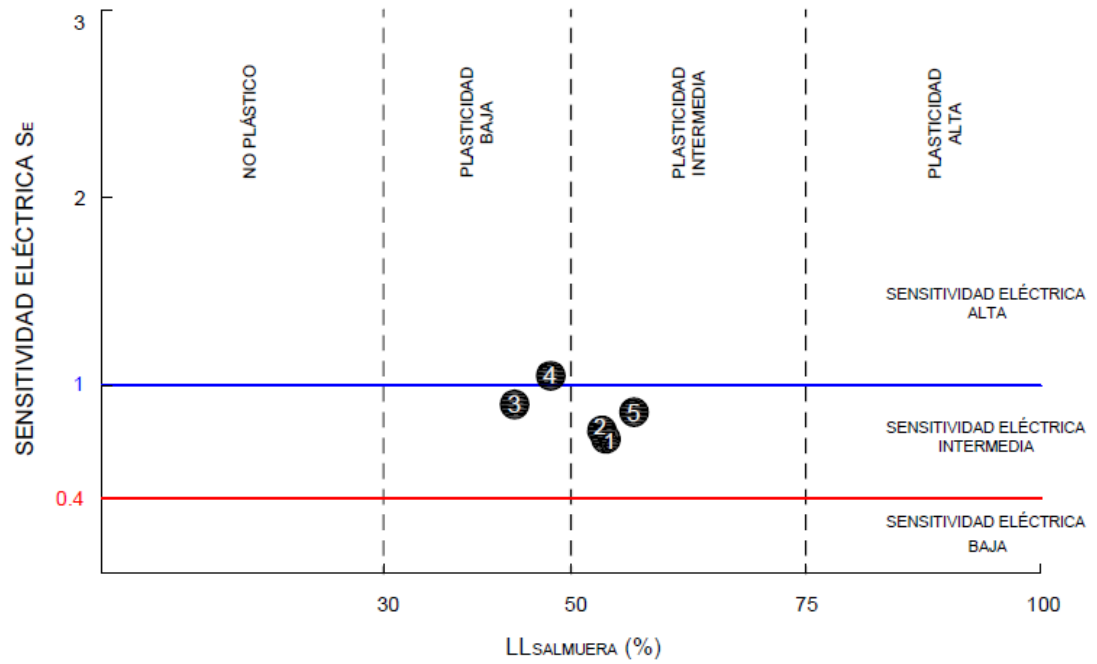


**Figura 43.** Gráfica de relación entre los límites plásticos según Feng y método de rollo, clasificando los suelos con el nuevo sistema (LL m. cono).

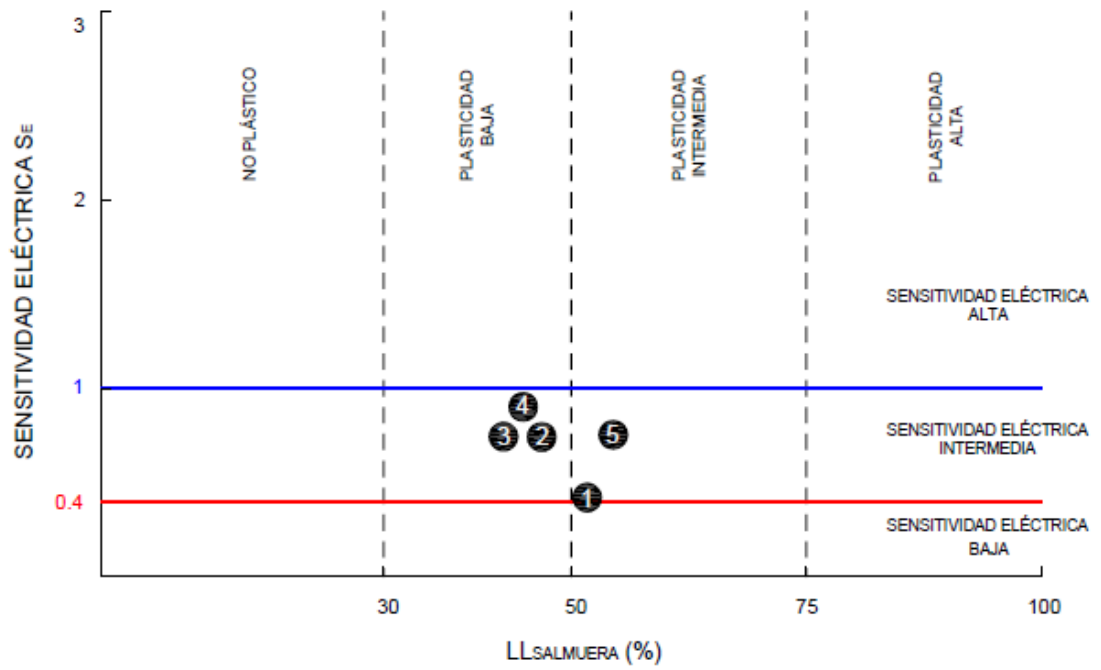


**Figura 44.** Gráfica de relación entre los límites plásticos según Feng y método de rollo, clasificando los suelos con el nuevo sistema (LL r. curvo).





**Figura 45. Ubicación de los cinco suelos en la nueva carta de clasificación. Límites líquidos determinados por el método de Penetrómetro de cono.**



**Figura 46. Ubicación de los cinco suelos en la nueva carta de clasificación. Límites líquidos determinados por el método de Casagrande-Ranurador curvo.**

**Tabla 16. Resumen de clasificación de los cinco suelos por los tres Sistemas: SUCS, AASHTO y Nueva clasificación (Jang y Santamarina, 2015).**

Suelo	Clasificación SUCS			Clasificación AASHTO			Nueva Clasificación Jang y Santamarina (2015)			
	R. plano	R. curvo	Penetrómetro de cono	R. plano	R. curvo	Penetrómetro de cono	R. curvo		Penetrómetro de cono	
							P <sup>1</sup>	S <sup>2</sup>	P <sup>1</sup>	S <sup>2</sup>
1	CH	CH	CH	A-7-5	A-7-5	A-7-5	I	I	I	I
2	MH	MH	MH	A-7-5	A-7-5	A-7-5	L	I	I	I
3	CH	CH	CH	A-7-6	A-7-6	A-7-6	L	I	L	I
4	MH	MH	MH	A-7-5	A-7-5	A-7-5	L	I	L	H
5	MH	MH	MH	A-7-5	A-7-5	A-7-5	I	I	I	I

<sup>1</sup> : Plasticidad

<sup>2</sup> : Sensibilidad eléctrica

#### 4.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Luego de realizar la clasificación de los cinco suelos con cada uno de los tres sistemas planteados se obtuvo la siguiente información:

- Clasificación SUCS y AASHTO.

De acuerdo al Sistema de clasificación SUCS, los suelos 1 y 3 se clasifican como arcillas de alta compresibilidad (CH) mientras que los suelos 2, 4 y 5 son limos de alta compresibilidad (MH). La clasificación lograda con cada suelo fue la misma para los tres métodos de determinación del límite líquido. Los suelos con mayor porcentaje de partículas pasante del Tamiz No 200, es decir, con mayor fracción fina son en orden descendente el suelo 5, 4, 2, 3 y 1 (ver Tabla 10).

Del ensayo de Granulometría e Hidrómetro se obtuvo el contenido de arcilla de cada suelo (ver Tabla 8). Según los resultados, el suelo 4 es el que tiene mayor porcentaje en masa de partículas de tamaño arcilla (46.7%) seguido del suelo 5 (36.1%), el suelo 2 (20.0%), el suelo 3 (14.8%) y finalmente el suelo con menor contenido de arcilla de los cinco que se estudiaron fue el suelo 1 (7.0%) (Porcentajes del suelo teniendo en cuenta toda su distribución de tamaños).

En general con los tres métodos para determinar el límite líquido se obtuvo la misma clasificación para cada uno de los cinco suelos, por lo cual no se tendría un error en la clasificación si se usa uno u otro. Con el método Casagrande-Ranurador curvo se obtuvo en promedio los límites líquidos más bajos; de manera opuesta, con el Penetrómetro de cono se obtuvo los límites líquidos más altos por lo cual cabe la posibilidad de que en algún suelo, sí pueda existir una diferencia en su clasificación si se utiliza alguno de estos dos métodos.

Por otra parte, se puede notar que los suelos clasificados como MH (Suelos 2, 4 y 5) tienen los mayores porcentajes de contenido de arcilla mientras que los suelos clasificados como CH (Suelos 1 y 3) tienen los porcentajes de arcilla más bajos. Lo anterior podría deberse a alguna de las siguientes hipótesis:

- Tal como se conoce en la literatura, no toda las partículas cuyo tamaño es menor a  $2\mu\text{m}$  son minerales de arcilla, ya que en este rango de tamaño también se pueden encontrar partículas no arcillosas (e.g. micas y feldspatos). Además no existe un acuerdo común global que defina la fracción fina de un suelo en tamaño y proporción (ver Figura 11). Se podría justificar, que los suelos con mayor porcentaje de partículas menores a  $2\mu\text{m}$

tuviesen minerales menos expansivos que aquellos con porcentaje menor, por lo cual un mayor contenido de arcilla no necesariamente aportaría mayor plasticidad o actividad a un suelo.

- El porcentaje de arcilla a menudo se ha correlacionado con la actividad y el comportamiento en general de un suelo; sin embargo, dicho valor en solitario no es suficiente para caracterizarlo por lo cual se debería estudiar y tener en cuenta la mineralogía de dicho contenido ya que un mineral de arcilla puede aportar menor o mayor expansión al suelos, según el tipo. Tal cual como se plantea en los anteriores resultados, no se logró obtener una relación directa entre este porcentaje y los límites de Atterberg de los suelos estudiados.
- Por otra parte hay que tener en cuenta que todos los ensayos se realizaron con muestras previamente secadas, en algunos casos a temperatura ambiente (e.g. determinación de los límites líquidos) y en otros, secadas al horno a una alta temperatura (e.g. Granulometría e hidrómetro). Según varios autores que se han mostrado previamente en el Capítulo 2 (Paredes & Verdugo, 2004; Herrera, 2006; Luna, 1975) los cambios en la fracción más fina de un suelo pueden ser significativos si se producen cambios de temperatura sobre todo con procesos de secado. Los minerales de arcilla más expansivos son más susceptibles a cambios si se produce un aumento de la temperatura, tendiendo a disminuir sus propiedades expansivas y aportar un comportamiento menos plástico en el suelo. Probablemente este fenómeno alteró en mayor medida a los suelos clasificados como limos, en donde los porcentajes de contenido de arcilla son mayores, pero se pudo producir una pérdida de plasticidad debido al secado de las muestras.
- Contrario a lo que se podría pensar el comportamiento de los suelos estudiados no dependió de su estado físico según la relación de volumen. Se ha planteado que en un suelo domina el comportamiento de las partículas que conforman en su mayoría la matriz de suelo. Así pues, un suelo en donde las partículas tipo limo o arena están dispersas en una matriz de arcilla estará dominado por la plasticidad de estas últimas. Con base a los resultados, se obtuvo una respuesta totalmente opuesta de los suelos, en donde las muestras con menor contenido de arcilla tienen un mayor índice de plasticidad y por tal un mayor potencial de expansión. Polidori (2003) ya había observado este comportamiento en suelos con minerales de arcilla de estructura laminar y dedujo que posiblemente alguno suelos contienen minerales de arcilla que son cada vez más expansivos incluso si la fracción de arcilla disminuye.

Por otra parte, al realizar la clasificación de los cinco suelos con el Sistema AASHTO se obtuvo que los suelos 1, 2, 4 y 5 se clasifican como A-7-5 y el suelo 3 clasifica como A-7-6. Al igual que con la clasificación SUCS, no hubo variación en la clasificación de cada suelo con este sistema entre los tres métodos para determinar el límite líquido.

De acuerdo a esta clasificación y si sólo se tuviese en cuenta este resultado, los suelos estarían dominados por arcillas plásticas a muy plásticas susceptibles a cambios volumétricos. Cabe resaltar además, que solo un suelo (3) fue clasificado en el grupo A-7-6, distinto a la clasificación de los demás (1, 2, 4 y 5) lo cual según AASHTO indicaría que estos últimos suelos al ser clasificados en un mismo grupo, presentarían propiedades mecánicas similares. Caso contrario ocurre con el Sistema SUCS, en donde la clasificación de los suelos indicó que el suelo 1 clasifica como CH al igual que el suelo 3, por lo cual sus propiedades mecánicas serían similares.

También hay que destacar que no se logró encontrar una relación entre la profundidad del suelo y el contenido de arcilla, tal como lo han planteado varios autores, en donde afirman que los suelos derivados de cenizas volcánicas suelen presentar un perfil estratigráfico en donde los suelos más profundos tienden a ser más arcillosos y finos. Los suelos con mayor contenido de arcilla fueron tomados a una menor profundidad. Aunque posiblemente los cambios térmicos y las alteraciones durante el muestreo pudieron afectar esta propiedad.

Durante la toma de muestras, los suelos 2, 4 y 5 presentaban una estructura matricial gruesa con terrones y aglomerados porosos con lo cual se intuía que estos suelos fuesen más gruesos y menos plásticos que los suelos 1 y 3, los cuales en condiciones in situ presentaban características pegajosa, plástica y estructura matricial fina.

- Clasificación según Jang y Santamarina, 2015

Esta nueva clasificación define el grado de plasticidad de un suelo con base al valor de su límite líquido determinado con salmuera 2-M, el cual fue menor que el límite líquido con agua desionizada para todos los suelos estudiados. Por una parte, este resultado era el esperado teóricamente, ya que todos los suelos según la clasificación SUCS son de alta plasticidad con lo cual el aumento de iones en el fluido de poro, tiende a disminuir el espesor de la doble capa difusa y por tal, reducir el valor del límite líquido si en lugar de agua desionizada, se usa salmuera.

Sin embargo, esta disminución en el límite líquido permite considerar a los suelos en rangos de plasticidad baja a intermedia. Para los límites determinados con la copa de Casagrande-Ranurador curvo, los suelos 1 y 5 son de plasticidad intermedia (I) mientras que los suelos 2, 3 y 4 son de plasticidad baja (L). Mientras que con el Penetrómetro de cono se obtuvo que los suelos 1, 2 y 5 son de plasticidad intermedia mientras que los suelos 3 y 4 de plasticidad baja. Esta consideración puede diferir un poco con la realidad de los suelos, sobre todo para aquellos que se consideran de baja plasticidad, ya que los suelos con agua

desionizada presentaron una alta plasticidad y esta reducción tan drástica, indica que los suelos mostraron una notoria reducción en el efecto de la doble capa difusa. Dicha sensibilidad es propia de suelos con un considerable potencial expansivo y alta-intermedia plasticidad.

El estimar la plasticidad de un suelo con el límite líquido determinado con salmuera, disminuye la incertidumbre de efecto de posibles iones presentes en el agua normal o en la que se considera está desionizada, pero podría modelar un suelo con características propias de laboratorio y no del esperado en condiciones in situ o de obra ingenieriles. Aunque bien es cierto, el agua natural dista de las condiciones del agua desionizada utilizada para esta investigación, se aparta aún más de las propiedades de la salmuera 2-M; el efecto de este fluido puede ser favorable o contraproducente en la plasticidad de un suelo, por lo cual no hay una representación de las condiciones reales de plasticidad. De acuerdo a la literatura, el límite líquido con salmuera puede aumentar o disminuir, si se compara con el límite líquido con agua desionizada, según el tipo de suelo.

Como se pudo observar anteriormente, la clasificación con este nuevo sistema se realizó teniendo en cuenta los límites líquidos determinados con dos métodos: Casagrande-Ranurador curvo y Penetrómetro de cono. La clasificación con cada método vario en los suelos 2 y 4. En general los límites líquidos determinados con el Penetrómetro de cono fueron mayores a los determinados con la copa de Casagrande-Ranurador plano.

El origen de las diferencias en la clasificación de cada suelo (2 y 4) fue distinto, ya que para el suelo 2 la divergencia estuvo determinada por la plasticidad, es decir, el límite líquido con salmuera; mientras que para el suelo 4, la sensibilidad eléctrica fue notoriamente distinta con cada método, por lo cual se da una clasificación diferente.

Los límites líquidos con kerosene determinados con el ranurador curvo, fueron estimados con una alta complejidad dada la dificultad de adecuar la muestra en la copa y sobretodo de realizar la ranura (desgarre, comportamiento aparentemente no plástico), por lo cual la clasificación con este método, aunque se realizó y no presentó diferencias abismales con el Penetrómetro de cono, no se considera confiable ni se podría considerar representativa del verdadero comportamiento del suelo.

Las grandes diferencias en los valores de los límites líquidos entre estos dos métodos y la dificultad para realizar el ensayo con el kerosene con la copa de

Casagrande-Ranurador curvo, resultan ser una buena explicación de las diferencias en la clasificación con este nuevo sistema. En el Capítulo 5 se plantea un análisis completo de las diferencias entre los límites líquidos determinados con cada método.

Jang y Santamarina (2015) realizaron la clasificación con este nuevo sistema a más de quince suelos y establecieron que suelos arenosos, no arcillosos, limos y arcillas de baja plasticidad presentan una baja sensibilidad eléctrica. Suelos arcillosos de intermedia-alta plasticidad como illita, caolinita y sedimentos marinos, presentan una sensibilidad eléctrica intermedia; mientras que suelos orgánicos y arcillas con un alto grado de expansión como la bentonita tienen una alta sensibilidad eléctrica.

La sensibilidad eléctrica como se planteó, es la sensibilidad que tiene el suelo a la doble capa difusa (repulsión) y a las fuerzas de van der Waals (atracción). La relación entre los límites líquidos con agua desionizada y salmuera 2-M, indica la variación del efecto doble capa difusa, es decir, la conductividad eléctrica. La relación entre los límites líquidos con kerosene y salmuera 2-M señala la variación de las fuerzas de van der Waals o permitividad.

La doble capa difusa es una propiedad que se desarrolla en presencia de láminas de arcillas, el efecto de este fenómeno aporta mayores características de expansión, plasticidad e inestabilidad volumétrica al suelo. Las arcillas más plásticas tienden a presentar una mayor susceptibilidad a desarrollar la doble capa difusa en presencia del agua.

Según la experiencia de algunos autores y de esta misma investigación, en arcillas de alta compresibilidad el espesor de la doble capa tiende a disminuir cuando el fluido de poro es salmuera, debido al aumento de cationes y contracciones (Teoría Gouy-Chapman-Stern). Dado que se tiene la misma concentración de iones para cualquier suelo expuesto a salmuera, la adsorción de los mismos será mayor en los suelos con unión entre láminas más débiles, es decir, en los suelos con mayor susceptibilidad a desarrollar la doble capa difusa. Al ser mayor esta adsorción la atmósfera reducirá en mayor medida su espesor y por tal la variación de la doble capa difusa será alta entre el suelo con agua desionizada como fluido de poro y el mismo suelo con salmuera.

Por lo tanto un suelo con alta sensibilidad a la doble capa difusa (conductividad eléctrica) es un suelo con mayor capacidad de adsorción de cationes, con enlaces



entre láminas más débiles y por tal, con mayor potencial expansivo. Este efecto dependerá del tipo de cationes presentes en el suelo.

El uso de agua desionizada, representa el máximo efecto de la doble capa difusa que puede llegar a desarrollarse en el suelo expuesto a cada uno de los tres fluidos, mientras que el uso de la salmuera 2-M, desarrolla el efecto doble capa en sus expresiones mínimas.

En suelos de baja plasticidad, la variación de la doble capa difusa puede ser un tema complejo de explicar, ya que algunas mediciones y observaciones han indicado que en estos suelos, el límite líquido puede aumentar si se aumenta la concentración de iones en la solución. La explicación no está en la variación del espesor de la doble capa difusa sino en la posible generación de nuevos componentes expansivos en el suelo.

En el otro extremo se tienen las fuerzas de van der Waals, las cuales producen atracción entre las partículas y si las condiciones se dan, la floculación. Este efecto se mide de forma cualitativa en esta nueva clasificación, exponiendo el suelo a la solución salmuera y al kerosene. La doble capa difusa teóricamente no se desarrolla en presencia de fluidos no polares como es el caso del kerosene, por lo cual la única fuerza existente cuando el suelo está expuesto a este líquido es de atracción. Se podría deducir entonces que el uso de kerosene, desarrolla el máximo efecto de atracción por fuerza de van der Waals de los tres fluidos utilizados.

Cuando el suelo está en contacto con la salmuera, el efecto doble capa difusa se desarrolla en menor medida que con el agua desionizada, por lo cual, las fuerzas de van der Waals aumentan y la probabilidad de atracción es mayor. Las fuerzas de van der Waals originan atracción entre las partículas, lo cual genera nuevas aglomeraciones porosas y con una alta relación de vacíos. Esta fuerza, aunque aumenta si disminuye la distancia entre partículas y depende de su geometría, origina una matriz menos estable y/o rígida que la doble capa difusa.

Una alta variación de las fuerzas de van der Waals indica el grado de estabilidad de dichas fuerzas y su influencia en el comportamiento del suelo, ya que a mayor estabilidad y magnitud, mayor será la atracción y por tal mayor la probabilidad de floculación. Un alto efecto de las fuerzas de van der Waals, suponiendo que el efecto de la doble capa es nulo, sugiere una mayor resistencia al corte del suelo.

Una alta sensibilidad del suelo a las fuerzas de van der Waals indica una alta susceptibilidad a la floculación y un aumento en su capacidad de intercambio catiónico, dado que la presencia de hidrocarburos y Carbono orgánico, aportados por el kerosene, tendería a disminuir el pH del suelo.

En el estudio llevado a cabo por Jang y Santamarina (2015) se encontró que en suelos con alta plasticidad el límite líquido con salmuera es mayor al límite líquido con kerosene; mientras que en suelos granulares y de baja-intermedia plasticidad, el límite líquido con kerosene es mayor que el límite líquido con salmuera. Para el caso de los 5 suelos estudiados en esta investigación, todos los suelos son considerados de alta plasticidad según SUCS, cumplen con que le LL con kerosene fueron mayores que los de salmuera que determinan una intermedia plasticidad según la nueva clasificación.

Un suelo con un límite líquido con salmuera mayor que en kerosene, indica que aun con la reducción del efecto doble capa difusa, este fenómeno incluso sigue siendo de gran magnitud y el suelo sigue conservando, sus características plásticas. Al exponer el mismo suelo al kerosene el efecto doble capa es casi nulo, por lo cual aunque hay un aumento en la fuerzas de van der Waals, el efecto es menos estable que el aportado por la doble capa reducida al haber expuesto el suelo en salmuera, por lo cual el límite líquido disminuye de salmuera a kerosene.

En general, la sensibilidad eléctrica indica la sensibilidad que tiene el suelo a generar propiedades de plasticidad, potencial expansivo, aumento en el intercambio catiónico, floculación e inestabilidad volumétrica. Se logra a partir del cambio de las propiedades del fluido de poro como la concentración de iones disponibles y la capacidad de polarización de las moléculas lo cual se ve reflejado en cambios en los efectos doble capa difusa y fuerzas de van der Waals.

Resumiendo, según esta nueva clasificación, tomando como punto de partida los resultados determinados con el Penetrómetro de cono, todos los cinco suelos estudiados presentan una sensibilidad eléctrica intermedia, por lo cual tienen características similares a las de arcillas de compresibilidad intermedia como la caolinita. Aunque cabe destacar que estos suelos son de origen volcánico, por lo cual se espera que la mayor proporción de minerales presentes sea de tipo amorfo, cuyo comportamiento se puede comparar al de arcillas intermedias.

La plasticidad se considera baja en los suelos 3 y 4 e intermedia en los suelos 1, 2 y 5. Esta característica tampoco concuerda con el contenido de arcilla en los suelos, como sucedió con el sistema SUCS y AASHTO. Incluso, el suelo con

mayor contenido de arcilla y el de menor contenido, 5 y 1 respectivamente, clasifican como suelos con plasticidad intermedia según este método.

Desde el punto de vista de la sensibilidad eléctrica, se obtuvo que solo el suelo 3 fue más sensible al efecto de la doble capa difusa que a las fuerzas de van der Waals. Los demás suelos fueron más sensibles al efecto van der Waals. Esta característica confirma la hipótesis, de que los suelos no son altamente plásticos, sensibles o con un alto potencial expansivo. Los suelos derivados de cenizas volcánicas en general, no suelen desarrollar características similares a las de arcillas de muy alta plasticidad, sino que desarrollan una plasticidad del orden intermedio o incluso bajo.

La mayor susceptibilidad de los suelos en las fuerzas de van der Waals y el aumento del límite líquido cuando de salmuera se pasó a kerosene, indican que el cambio de pH afectó en gran medida su comportamiento, promoviendo la atracción en las partículas y dadas las características de sensibilidad intermedia, se podría pensar que los suelos no llegaron a la floculación pero si se logró una atracción con efecto moderado de la resistencia al corte en el contacto entre partículas.

La sensibilidad intermedia a la doble capa difusa, demuestra que los suelos no contienen minerales de arcilla altamente expansivos como la bentonita o material orgánico, en los cuales la adsorción de cationes aumenta dramáticamente. Probablemente, dado que no se realizó análisis mineralógico experimentalmente, los minerales de arcilla en los suelos como la alófana presentan un comportamiento similar al de arcillas intermedias, con un potencial expansivo moderado.

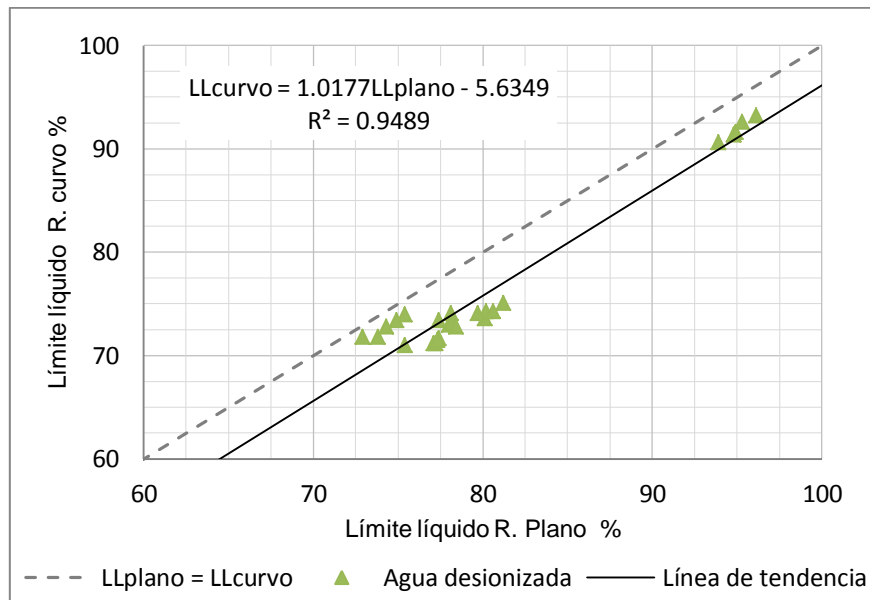
## **CAPITULO 5. ESTUDIO EXPERIMENTAL COMPARATIVO DE TRES MÉTODOS PARA ENCONTRAR EL LÍMITE LÍQUIDO EN SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS DE POPAYÁN**

### **5.1 RESULTADOS**

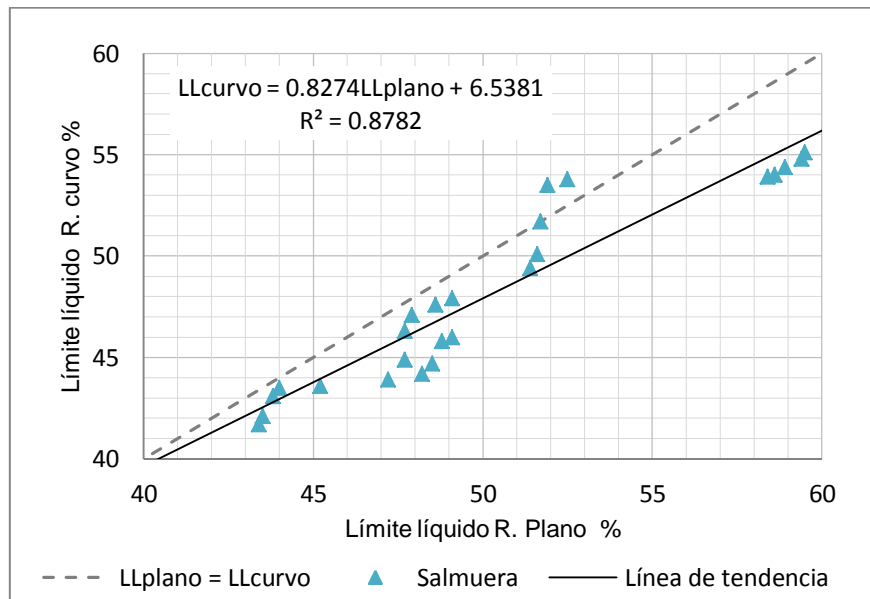
Al realizar el estudio comparativo de los tres métodos para determinar el límite líquido de suelos, se compararon los resultados obtenidos con dos de los tres líquidos (a) agua desionizada y (b) salmuera. Los valores se pueden apreciar en la Tabla 5. Los límites líquidos determinados con kerosene no se tuvieron en cuenta para realizar el análisis de correlación dado que los resultados obtenidos con la copa de Casagrande no se consideran confiables y fueron de dificultosa ejecución, como se expuso anteriormente.

- Relación límites líquidos ranurador plano y límites líquidos con ranurador curvo:

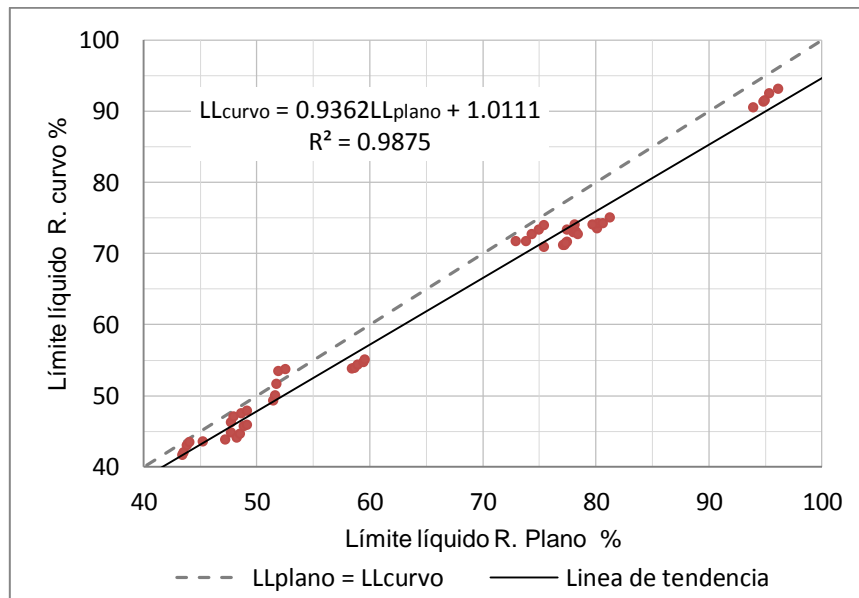
La correlación también se realizó por el tipo de fluido de poro, es decir, relacionando los límites determinados con agua desionizada y con salmuera, los cuales se pueden detallar en las Figura 47 y Figura 48, respectivamente. Para determinar la relación entre estos dos métodos se tomaron todos los resultados de límites líquidos con los dos fluidos de poro y se relacionó para cada uno de los cinco suelos. En la Figura 49 se puede apreciar la correlación obtenida en este estudio para los valores de límite líquido según ranurador plano y el límite líquido con ranurador curvo con ambos fluidos de poro.



**Figura 47. Correlación entre límites líquidos determinados con ranurador plano y límites líquidos determinados con ranurador curvo para agua desionizada.**



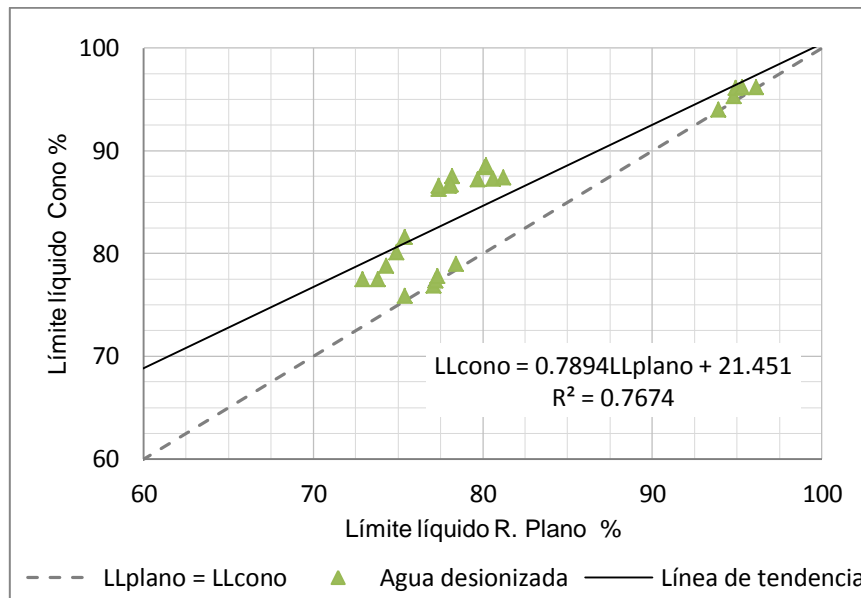
**Figura 48. Correlación entre límites líquidos determinados con ranurador plano y límites líquidos determinados con ranurador curvo para salmuera.**



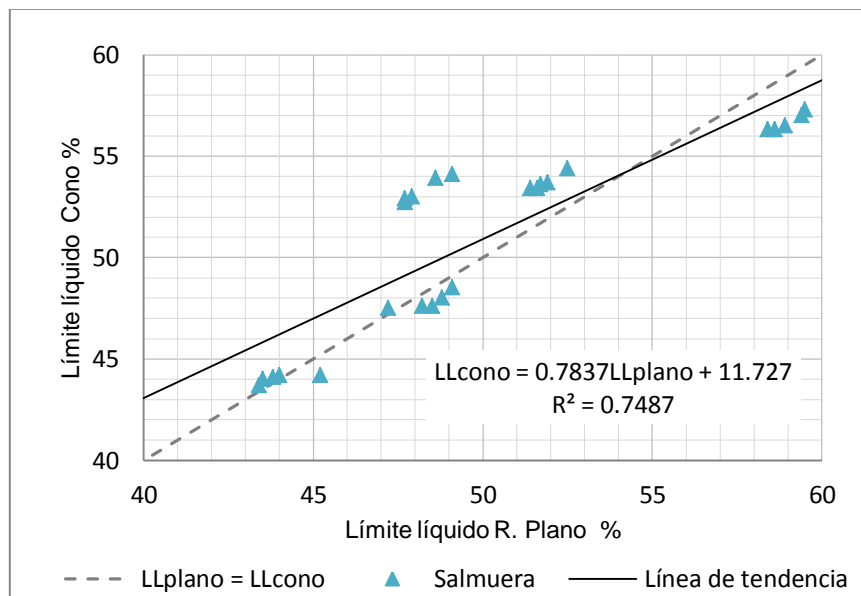
**Figura 49. Curva que relaciona los límites líquidos determinados con ranurador plano y los límites líquidos determinados con ranurador curvo.**

- Relación límites líquidos ranurador plano y límites líquidos con penetrómetro de cono:

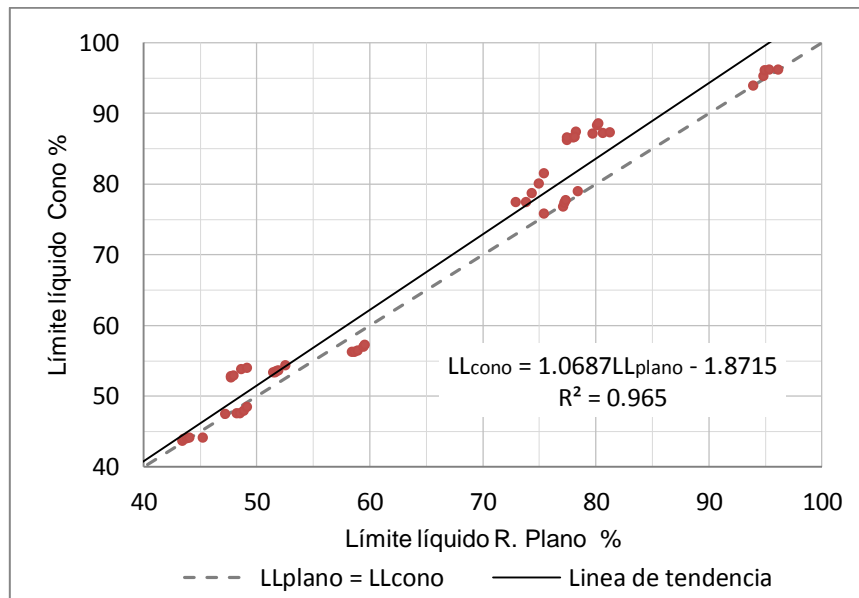
En las Figura 50 y Figura 51 se aprecian las correlaciones por tipo de fluido para agua desionizada y salmuera, respectivamente. En la Figura 52 se aprecia la correlación obtenida reuniendo los resultados obtenidos con agua desionizada y con salmuera.



**Figura 50. Correlación entre límites líquidos determinados con ranurador plano y límites líquidos determinados con cono para agua desionizada.**



**Figura 51. Correlación entre límites líquidos determinados con ranurador plano y límites líquidos determinados con cono para salmuera.**

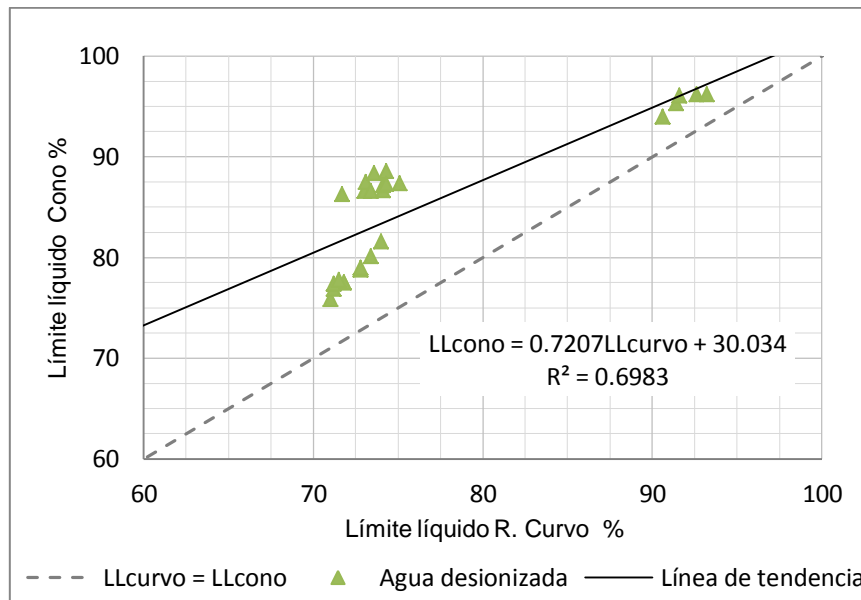


**Figura 52. Curva que relaciona los límites líquidos determinados con ranurador plano y los límites líquidos determinados con cono.**

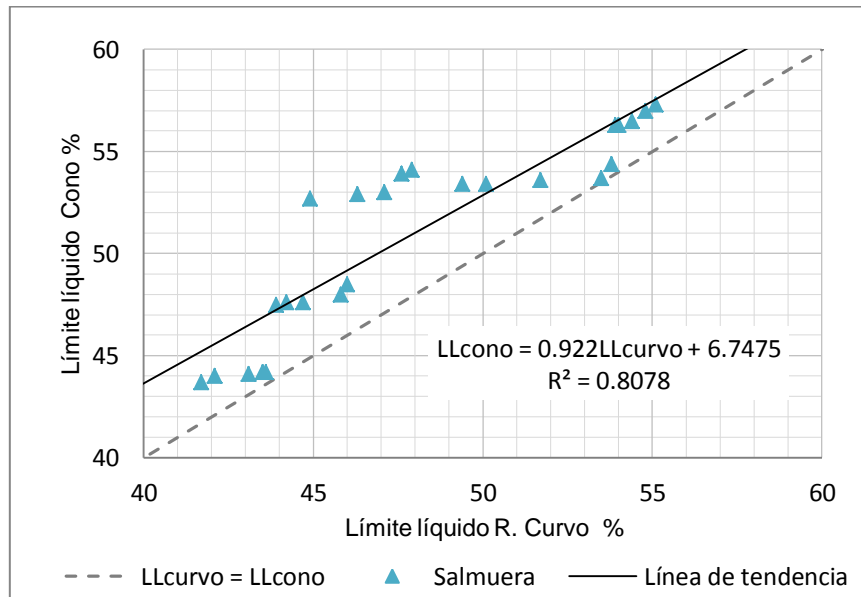
- Relación límites líquidos ranurador curvo y límites líquidos con penetrómetro de cono:

A continuación se aprecia la correlación según el tipo de fluido para agua desionizada y salmuera en las Figura 53 y Figura 54. La curva de correlación entre estos dos métodos se presenta en la Figura 55 en donde se presentan los resultados obtenidos para los cinco suelos con los fluidos de poro excluyendo el kerosene.

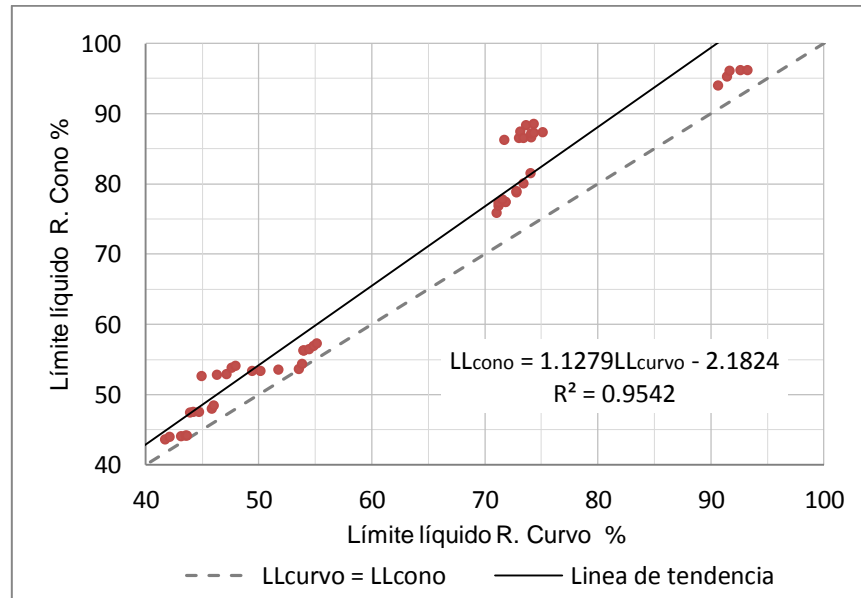




**Figura 53. Correlación entre límites líquidos determinados con ranurador curvo y límites líquidos determinados con cono para agua desionizada.**



**Figura 54. Correlación entre límites líquidos determinados con ranurador curvo y límites líquidos determinados con cono para salmuera.**



**Figura 55. Curva que relaciona los límites líquidos determinados con ranurador curvo y los límites líquidos determinados con cono.**

### 5.1.1 Correlación LLplano vs LLcurvo (método standard)

$$LL_{plano (INV)} = \frac{LL_{curvo} + 5.6349}{1.0177}$$

Nota: Generalmente  $LL_{plano (INV)} > LL_{curvo}$ , rango experimental LL=[60-100%]

### 5.1.2 Correlación LLplano vs LLcono (método standard)

$$LL_{plano (INV)} = \frac{LL_{cono} - 21.451}{0.7894}$$

Nota: Generalmente  $LL_{plano (INV)} < LL_{cono}$ , rango experimental LL=[60-100%]

### 5.1.3 Correlación LLcurvo vs LLcono (método standard)

$$LL_{curvo} = \frac{LL_{cono} - 30.034}{0.7207}$$

Nota: Generalmente  $LL_{curvo} < LL_{cono}$ , rango experimental LL=[60-100%]

El resumen de todas las ecuaciones de regresión lineal planteadas anteriormente para cada correlación se puede apreciar en la Tabla 17.

**Tabla 17. Resumen de las correlaciones obtenidas por los tres métodos de determinación del límite líquido.**

Relación	Fluido	Ecuación	R <sup>2</sup>	Rango de LL (%)
LLplano vs LLcurvo	Agua desionizada	$LL_{curvo} = 1.0177LL_{plano} - 5.6349$	0.95	73 - 96
	Salmuera	$LL_{curvo} = 0.8274LL_{plano} + 6.5381$	0.88	43 - 60
	Ambos	$LL_{curvo} = 0.9362LL_{plano} + 1.0111$	0.99	43 - 96
LLplano vs LLcono	Agua desionizada	$LL_{cono} = 0.7894LL_{plano} + 21.451$	0.77	73 - 96
	Salmuera	$LL_{cono} = 0.7837LL_{plano} + 11.727$	0.75	43 - 60
	Ambos	$LL_{cono} = 1.0687LL_{plano} - 1.8715$	0.97	43 - 96
LLcurvo vs LLcono	Agua desionizada	$LL_{cono} = 0.7207LL_{curvo} + 30.034$	0.70	71 - 93
	Salmuera	$LL_{cono} = 0.9220LL_{curvo} + 6.7475$	0.81	42 - 55
	Ambos	$LL_{cono} = 1.1279LL_{curvo} - 2.1824$	0.95	42 - 93

Además de las correlaciones también se plantea en la Tabla 18 la variación de los resultados obtenidos con cada método. Dicha variación se define como el porcentaje en que aumentan o disminuyen los límites líquidos determinados con un método respecto al otro. Por ejemplo, se obtuvo que los resultados obtenidos con agua desionizada con el ranurador curvo fueron en promedio 5.2% inferiores a los resultados obtenidos con el ranurador plano (ver Tabla 18).

**Tabla 18. Variación porcentual entre los límites líquidos obtenidos con cada método.**

Relación	Fluido	Variación máxima (%)	Variación mínima (%)	Variación promedio (%)	Promedio
LLplano vs LLcurvo	Agua desionizada	-1.5	-8.1	-5.2	-4.7
	Salmuera	3.1	-8.3	-4.1	
LLplano vs LLcono	Agua desionizada	11.9	-0.3	5.6	3.8
	Salmuera	10.9	-4.1	1.9	
LLcurvo vs LLcono	Agua desionizada	20.4	3.2	11.6	9.0
	Salmuera	17.4	0.4	6.3	

## 5.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico se realizó con el fin de comparar los resultados obtenidos en cada uno de los tres métodos: Cazuela de Casagrande con ranurador plano, Cazuela de Casagrande con ranurador curvo y Penetrómetro de Cono.

*Media* ( $\bar{X}$ ): La media de una muestra es el promedio de sus datos

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad [7]$$

*Varianza de la muestra* ( $S^2$ ): Es el promedio de los cuadrados de las distancias de los datos respecto a su media.

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad [8]$$

*Desviación estándar de la muestra* ( $S$ ): Se interpreta como la distancia promedio de los datos a su media.

$$S = \sqrt{S^2} \quad [9]$$

*Mínimo* ( $X_{min}$ ): Es el dato de menor valor numérico en la muestra de datos.

*Máximo* ( $X_{max}$ ): Es el dato de mayor valor numérico en la muestra de datos.

*Rango* ( $R$ ): Es el intervalo entre el valor máximo y el valor mínimo en un conjunto de datos.

$$R = X_{max} - X_{min} \quad [ 10 ]$$

*Rango en % de la media*: Se usa para establecer la variación porcentual de los datos con respecto a su media.

$$R (\%) = \frac{R}{\bar{X}} * 100 \quad [ 11 ]$$

*Coficiente de variación* ( $Cv$ ): Mide la variación de los datos con respecto a su media, con ello se determina la homogeneidad de la muestra.

$$Cv = \frac{S}{\bar{X}} \quad [ 12 ]$$

*Error* ( $E$ ):

$$E = |\bar{X} - Xi| \quad [ 13 ]$$

*Media del Error* ( $E$ ): Se define como la diferencia entre los valores medidos y la media de la muestra. Cuantifica la desviación en términos absolutos respecto al valor que experimentalmente resulta ser el verdadero.

$$\bar{E} = \frac{\sum |\bar{X} - Xi|}{n} \quad [ 14 ]$$

*Error estándar con un nivel de confianza (95%)*: Este error representa la precisión lograda con el nivel de confianza establecido. Representa el límite de error estimado experimentalmente para cumplir con el nivel de confianza.

$$E_{nc} = \frac{S * Z}{\sqrt{n}} \quad [ 15 ]$$

Dónde:

$S$ : Desviación estándar de la muestra.

$Z$ : Valor que depende de la probabilidad de acierto (95%) tomado de una tabla de distribución t de Student.

$n$ : Tamaño de cada muestra (5 ensayos).

*Intervalo de confianza (I)*: Rango de valores entre los cuales se espera que este cierto valor dada una probabilidad. Se utiliza dado que no se aplica la intervención a la población completa sino a una muestra de ella. Para conocer dicho parámetro es necesario conocer la distribución que sigue la variable de la muestra. La distribución de probabilidad dado el reducido tamaño de cada muestra es la distribución t de Student. El nivel de confianza definido es del 95%.

$$I = \bar{X} \mp Z * \frac{S}{\sqrt{n}} \quad [ 16 ]$$

De las Tabla 19 a la Tabla 21 se presenta el resumen de análisis estadístico realizado.

**Tabla 19. Resumen estadística descriptiva para los ensayos con agua desionizada.**

Parámetros estadísticos	Copa de Casagrande: Agua desionizada- Ranurador plano					Copa de Casagrande: Agua desionizada-Ranurador curvo					Penetrómetro de cono: Agua desionizada				
	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5
Media	78.8	74.3	77.1	79.4	95.0	73.1	72.8	71.5	74.2	91.9	87.5	79.1	77.4	87.0	95.6
Desviación estándar	1.29	0.97	1.08	1.62	0.80	0.96	0.97	0.73	0.61	1.03	1.03	1.76	1.14	0.36	0.95
Varianza de la muestra	1.65	0.94	1.16	2.62	0.64	0.91	0.95	0.53	0.37	1.05	1.07	3.11	1.30	0.13	0.90
Rango	2.8	2.5	3.0	3.8	2.2	2.6	2.2	1.8	1.7	2.6	2.3	4.1	3.1	0.8	2.2
Rango en % de la media	3.6	3.4	3.9	4.8	2.3	3.6	3.0	2.5	2.3	2.8	2.6	5.2	4.0	0.9	2.3
Mínimo	77.4	72.9	75.4	77.4	93.9	71.7	71.8	71.0	73.4	90.6	86.3	77.5	75.9	86.6	94.0
Máximo	80.2	75.4	78.4	81.2	96.1	74.3	74.0	72.8	75.1	93.2	88.6	81.6	79.0	87.4	96.2
Coefficiente de variación	0.016	0.013	0.014	0.020	0.008	0.013	0.013	0.010	0.008	0.011	0.012	0.022	0.015	0.004	0.010
$\bar{E}$ (x-xi)	1.10	0.73	0.67	1.32	0.56	0.65	0.77	0.50	0.40	0.82	0.82	1.40	0.80	0.31	0.73
E calculado con 95%	1.60	1.21	1.34	2.01	0.99	1.19	1.21	0.90	0.76	1.27	1.28	2.19	1.42	0.45	1.18
$x - Z * S/\sqrt{n}$ (95%)	77.2	73.1	75.7	77.4	94.0	72.0	71.6	70.6	73.4	90.6	86.2	76.9	76.0	86.6	94.4
$x + Z * S/\sqrt{n}$ (95%)	80.4	75.5	78.4	81.4	96.0	74.3	74.0	72.4	75.0	93.2	88.8	81.3	78.8	87.5	96.7

**Tabla 20. Resumen estadística descriptiva para los ensayos con salmuera**

Parámetros estadísticos	Copa de Casagrande: Salmuera- Ranurador plano					Copa de Casagrande: Salmuera-Ranurador curvo					Penetrómetro de cono: Salmuera				
	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5
Media	51.8	48.2	44.0	48.4	59.0	51.7	46.8	42.8	44.9	54.4	53.7	53.3	44.0	47.8	56.7
Desviación estándar	0.42	0.62	0.72	0.73	0.48	1.97	1.20	0.85	0.94	0.51	0.41	0.63	0.21	0.42	0.45
Varianza de la muestra	0.18	0.39	0.52	0.53	0.23	3.88	1.45	0.73	0.89	0.26	0.17	0.40	0.04	0.17	0.20
Rango	1.1	1.4	1.8	1.9	1.1	4.4	3.0	1.9	2.1	1.2	1.0	1.4	0.5	1.0	1.0
Rango en % de la media	2.1	2.9	4.1	3.9	1.9	8.5	6.4	4.4	4.7	2.2	1.9	2.6	1.1	2.1	1.8
Mínimo	51.4	47.7	43.4	47.2	58.4	49.4	44.9	41.7	43.9	53.9	53.4	52.7	43.7	47.5	56.3
Máximo	52.5	49.1	45.2	49.1	59.5	53.8	47.9	43.6	46.0	55.1	54.4	54.1	44.2	48.5	57.3
Coeficiente de variación	0.008	0.013	0.016	0.015	0.008	0.038	0.026	0.020	0.021	0.009	0.008	0.012	0.005	0.009	0.008
$\bar{E} (x-x_i)$	0.30	0.52	0.50	0.53	0.39	1.56	0.93	0.72	0.78	0.41	0.28	0.54	0.15	0.33	0.38
E calculado con 95%	0.52	0.78	0.90	0.91	0.60	2.44	1.49	1.06	1.17	0.64	0.51	0.79	0.26	0.36	0.56
$x - Z * S/\sqrt{n}$ (95%)	51.3	47.4	43.1	47.5	58.4	49.3	45.3	41.7	43.8	53.8	53.2	52.5	43.8	47.5	56.1
$x + Z * S/\sqrt{n}$ (95%)	52.3	49.0	44.9	49.3	59.6	54.1	48.3	43.9	46.1	55.1	54.2	54.1	44.3	48.2	57.2



**Tabla 21. Resumen estadística descriptiva para los ensayos con kerosene con penetrómetro de cono.**

Parámetros estadísticos	Penetrómetro de cono: Kerosene				
	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5
Media	70.4	77.0	61.4	73.3	81.6
Desviación estándar	0.45	0.17	0.40	0.13	0.19
Varianza de la muestra	0.20	0.03	0.16	0.02	0.04
Rango	1.1	0.4	1.1	0.3	0.5
Rango en % de la media	1.6	0.5	1.8	0.4	0.6
Mínimo	69.9	76.8	60.9	73.2	81.3
Máximo	71.0	77.2	62.0	73.5	81.8
Coefficiente de variación	0.006	0.002	0.007	0.002	0.002
$\bar{E} (x-x_i)$	0.35	0.13	0.27	0.10	0.12
E calculado con 95%	0.56	0.21	0.50	0.16	0.23
$x - Z * S/\sqrt{n}$ (95%)	69.8	76.8	60.9	73.1	81.4
$x + Z * S/\sqrt{n}$ (95%)	70.9	77.2	61.9	73.4	81.8

Para poder comparar la precisión lograda con cada método por cada tipo de fluido, teniendo en cuenta la variabilidad de cada una de las cinco determinaciones del límite líquido que se realizó a cada suelo, se tuvo en cuenta dos de los parámetros estadísticos mostrados anteriormente: Rango en porcentaje de la media y el coeficiente de variación (ver Tabla 22).

**Tabla 22. Precisión lograda con cada método de determinación del límite líquido según los cinco ensayos que se realizaron a cada suelo por tipo de fluido.**

Parámetros estadísticos	Copa Casagrande-Ranurador plano		Copa Casagrande-Ranurador curvo		Penetrómetro de cono		
	Agua desionizada	NaCl	Agua desionizada	NaCl	Agua desionizada	NaCl	Kerosene
Rango en % de la media	3.6	3.0	2.8	5.2	3.0	1.9	1.0
Coefficiente de variación	0.014	0.012	0.011	0.023	0.013	0.008	0.004

### 5.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- Método Casagrande-Ranurador plano/ curvo y Penetrómetro de cono

Los anteriores resultados fueron producto de un arduo trabajo siguiendo el programa de laboratorio que fue llevado a cabo por las mismas personas, las cuales realizaron los mismos ensayos para cada método. Con base al programa experimental, se pudo establecer que el método del penetrómetro de cono es mucho más sencillo y arroja resultados más consistentes que el método de Casagrande.

Resultados erróneos por el método del cono fueron inusuales mientras que el método de Casagrande arrojó resultados erróneos con una frecuencia un poco mayor. La razón es que este último método depende en mayor medida de las condiciones de operación tal como la mezcla de la muestra, colocación, ranurado, velocidad de golpeteo, etc. Se podría afirmar que el 100% del procedimiento de ensayo se ve afectado en gran medida por el juicio y la experticia del operador. Caso contrario ocurre con el método del penetrómetro de cono en donde las posibilidades de variación se reducen dado que el proceso es más mecanizado y sistematizado.

Una vez realizado el análisis estadístico de todas las determinaciones de límite líquido que se determinó a cada suelo, se pudo estimar que para el agua desionizada el método que arrojó menor variabilidad entre las cinco determinaciones fue el de Casagrande-Ranurador curvo (2.8%), seguido por el Penetrómetro de cono (3.0%) y finalmente el método Casagrande-Ranurador plano (3.6%). Para el caso en que los límites líquidos eran determinados con salmuera los resultados más homogéneos y con menor rango de variación se lograron con el método de Penetrómetro de cono (1.9%), seguido por el de Casagrande-Ranurador plano (3.0%) y finalmente Casagrande-Ranurador curvo (5.2%).

Se puede afirmar según estos porcentajes de variación que el método de Penetrómetro de cono fue el más preciso de los tres, seguido por el método Casagrande-Ranurador plano y el método con mayor variación en los valores de límite líquido fue el de Casagrande-Ranurador curvo.

Por otra parte, el método de cono tiene un paso importante que depende también del juicio del operador y es la adecuación de la muestra en la copa. La norma BS-1377 solo especifica que no se debe dejar aire atrapado en la copa, al momento de colocar la muestra. Se podría recurrir a muchas maneras de lograr lo anterior,

como es la aplicación de presión a la muestra, percusión con algún objeto de caída, vibración, golpeteo de la copa con alguna superficie rígida, etc. Algunas de estas maneras de lograr que la copa quede con el menor volumen de vacíos posibles pueden conducir a alteraciones en la muestra como una compactación excesiva y/o exudación. Cualquier variación mínima en las condiciones de la muestra puede producir una mayor o menor penetración.

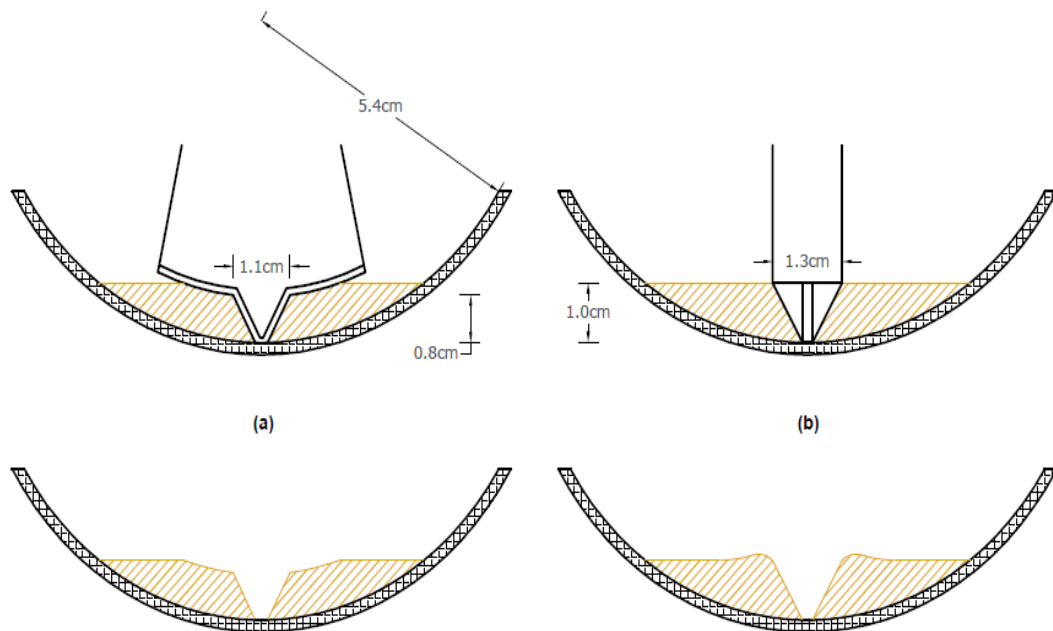
Otro inconveniente con el método del penetrómetro de cono se observó en las muestras con mayor valor de límite líquido. El límite líquido de un suelo se suele relacionar con una resistencia al corte constante la cual se obtiene con un único valor de humedad que proporciona una consistencia al suelo. Aunque un suelo este en su límite líquido, su consistencia puede variar bastante con otro, así se puede tener un suelo excesivamente húmedo y fluido y otro suelo poco húmedo y con comportamiento aparentemente en estado plástico, pero ambos estar en la humedad de su límite líquido.

En suelos excesivamente húmedos, la penetración con el cono en algunas ocasiones no fue proporcional al contenido de agua, ya que el exceso de esta, produciría amortiguamiento en la caída del cono y por tal disminuiría el valor de penetración. Este problema aunque fue poco común, se presentó y requeriría de una observación detallada en caso de que fuese común en futuros ensayos.

Otro factor importante a tener en cuenta, es la variación entre las dos formas de ranuración utilizadas en el método de Casagrande, (a) el ranurador plano y (b) el ranurador curvo. Con el ranurador plano se controla la altura de ranuración de la muestra, por lo cual, si en la zona central de ranuración de la muestra el operario la ha dejado con una altura mayor, este ranurador corta el espesor sobrante y se obtendrá un canal de ranuración uniforme. La norma INV-E 125, 2013 especifica que se debe dejar la muestra con una profundidad de 10 mm en la zona de máximo espesor. El ranurador plano tiene una altura de corte de 8 mm (ver Figura 56).

Por otro lado, se tiene el ranurador curvo el cual presenta las siguiente diferencias con el ranurador plano (ver Figura 56): (1) difieren en medidas, su altura de ranuración es de 11 mm mientras que el ranurador plano tiene 8 mm; (2) el ranurador curvo no controla la altura de la ranura debido a su forma geométrica, el ranurador plano sí; (3) El mecanismo de ranuración es distinto, al no controlar la altura de la ranura, el ranurador curvo desplaza lateralmente la muestra a medida que se produce el canal de ranuración, lo cual conduce a que la altura de los taludes del canal de ranuración tiendan a aumentar, mientras que el ranurador plano corta la muestra. De allí que durante el ensayo es común que con el

ranurador plano se extraiga gran parte del suelo ranurado, mientras que con el curvo no; (4) No hay posibilidad de que haya corte y arrastre de muestra por exceso de profundidad con el ranurador curvo, mientras que con el ranurador plano puede ser común e incluso la norma indirectamente lo permite, al plantear una profundidad de muestra mayor a la altura de corte del ranurador plano.



**Figura 56. Ranuras típicas logradas con el ranurador plano (a) y con el ranurador curvo (b).**

Con base a las diferencias expuestas anteriormente entre el ranurador plano y el curvo, se explica el motivo por el cual los resultados de límites líquidos determinados con este último fueron en general menores a los determinados con el ranurador plano y la principal causa es la altura de los taludes de la ranuración los cuales no son controlados por el ranurador. Dado que el método de Casagrande involucra la percusión para estimar el límite líquido de un suelo, es lógico pensar que los taludes con mayor altura (ranurador curvo) se cerraran con menos golpes que aquellos de menor altura (ranurador plano).

Aunque esta diferencia en alturas se puede amplificar o reducir según la experiencia del operador, en conclusión, la humedad necesaria para lograr cerrar la ranura a lo largo de 1.3 cm con 25 golpes será menor si se emplea el ranurador curvo que si se utiliza el ranurador plano.

La forma para determinar el límite líquido de un suelo por el método de Casagrande incluye la aplicación de efectos dinámicos en la muestra, lo cual incluso el mismo Casagrande criticó (1932) y concluyó que debería encontrarse otra forma para estimar dicho parámetro. Este efecto de golpeteo puede amplificarse según el estado de desgaste que tenga la base de soporte de la copa. Por su parte, el ensayo del penetrómetro de cono no involucra perturbación de la muestra por efectos dinámicos, pero si puede modificar su estado de compactación durante el proceso. El efecto de sobre-compactación y la dinámica son contraproducentes y pueden ser la principal razón por la cual los límites determinados por el método de cono fueron mayores que los de Casagrande.

Tal y como en su momento lo sugirió Casagrande, lo ideal sería realizar una prueba de resistencia al corte de los suelos para así poder reemplazar o verificar los resultados de la prueba de la copa en la determinación del límite líquido de un suelo. Al ser metodologías distintas, la prueba de Casagrande puede permitir una resistencia al corte en el suelo cuando está en su límite líquido distinta a la generada con el penetrómetro de cono, sería ideal poder llevar una muestra a la humedad de su límite líquido determinada con cada prueba y realizar el ensayo de resistencia al corte para poder apreciar un poco mejor las diferencias.

- Límite líquido con agua desionizada, salmuera 2-M y kerosene

En general, los mayores valores de límite líquido se obtuvieron con agua desionizada, seguido kerosene y finalmente salmuera 2-M; aun tratándose de suelos con distinto contenido de arcilla y clasificación, la tendencia ha sido la misma.

Según la precisión lograda con cada método, se pudo establecer que los resultados determinados con salmuera presentaron una mayor variación que los de agua desionizada. Los datos obtenidos con cada fluido de poro, indican que el rango de humedad con agua desionizada es mayor que con salmuera para pasar de un número de golpes (copa de Casagrande) o penetración (Penetrómetro de cono) a otro. Dicho rango de humedad al ser menor en salmuera, arroja una mayor probabilidad de error e imprecisión en los resultados, ya que con pequeñas variaciones de humedad se pueden lograr consistencias en el suelo completamente distintas, en el caso de esta investigación.

En contraste, el kerosene por ser un fluido no polar, no permite la generación de la doble capa difusa en las partículas más finas del suelo (Chen et. al., 2000), por lo cual las fuerzas de atracción de van der Waals toman mayor relevancia y pueden producir un efecto de aglomeración y floculación de las partículas. Este aumento en las fuerzas de atracción genera un aumento en la resistencia al corte en el

contacto entre partículas. Así pues, las partículas más cercanas tenderán a flocularse y se formaran flocs de mayor tamaño. El suelo está ahora conformado por agrupaciones de partículas sueltas ya que cada unidad posee una alta proporción de vacíos.

La fuerza de doble capa difusa genera repulsión inter-partícula por la naturaleza de las cargas, pero genera unión partícula-fluido desde el punto de vista macro en el suelo, lo cual se ve reflejado en el aumento de su plasticidad. En segunda instancia, la magnitud de la doble capa difusa es mucho mayor que las fuerzas de van der Waals y mucho más estable, a tal punto que es común que se considere que dichas zonas en donde se genera la doble capa, hacen parte del esqueleto del suelo dado el comportamiento rígido que le aportan.

Por otro lado, la consistencia del suelo en el límite líquido con kerosene era poco plástica o casi nula con el método de Casagrande, mientras que se necesitaba una consistencia mucho más fluida de los suelos humedecidos con kerosene para lograr una penetración cercana al límite líquido con el método del penetrómetro de cono. Lo más curioso que se pudo observar es que en varias ocasiones se tomó muestra de suelo que con el penetrómetro de cono se lograba una penetración cercana a la del límite líquido, mientras que dicha muestra con la prueba de Casagrande no permitía ni siquiera el desarrollo de la prueba ya que en uno o dos golpes se cerraba totalmente la ranura, es decir, el suelo colapsaba de manera instantánea.

Entre las posibles teorías sobre el comportamiento del kerosene se tienen:

- El kerosene por ser un fluido no polar, genera una alta resistencia al corte en el contacto entre partículas pero con una alta relación de vacíos. Durante la prueba de Casagrande, por ser un método dinámico, se induce a la disminución de la relación de vacíos durante cada golpeteo; en el caso del kerosene, al tener un suelo con partículas unidas con una alta porosidad y relación de vacíos, la probabilidad de colapso aumenta y es lo que generaría un cierre prematuro de la ranura. Este fenómeno no se presentaría durante la prueba del penetrómetro de cono, ya que durante el ensayo se proporciona un grado de compactación a la muestra cuando se está disponiendo en la copa, previo a la penetración.
- Es conocido y aceptado por muchas investigaciones previas (Olson & Mesri, 1970; Sridharan & Rao, 1973; Mitchell & Soga, 2005) que el efecto doble capa no se genera en suelos cuando el fluido de poro es no polar como el kerosene. Así pues la fuerza neta es de atracción y aunque toma importancia en el comportamiento del suelo, esta fuerza es de magnitud mucho menor que la fuerza de repulsión entre las partículas. Según los resultados obtenidos, se podría inferir que el efecto dinámico de golpeteo

afectaría en mayor medida las agregaciones o flocs, que al estar débilmente unidos, provocarían el colapso de la muestra que aumentó dramáticamente con el contenido de kerosene.

- El efecto del kerosene en las muestras al reducir el espesor de la doble capa difusa, redujo la plasticidad de las muestras, al punto en que aparentemente eran no plásticas. Lo que esto provoca es un aumento en la compresibilidad del suelo lo cual se ve magnificando con la disposición de la muestra en la copa. Al proporcionar un mayor contenido de kerosene en la muestra el contacto entre partículas llega a un punto en que tendería a disminuir por lo tanto se limitaría el efecto de las fuerzas de atracción y con ello la relación de vacíos.

Las muestras además de presentar un cambio en su comportamiento durante el ensayo para la determinación del límite líquido, también sufrieron cambios en su consistencia durante el secado en el horno. En la Figura 57 se aprecia la comparación entre muestras con kerosene y con salmuera luego del secado en el horno.

Las muestras preparadas con agua desionizada y con salmuera una vez secadas al horno adquirirían una consistencia alta, dura y rígida. Debido a procesos de evaporación de los fluidos de poro, ocurre un cambio de estado del suelo, ya que el agua provocó un ablandamiento del material ahora ocurre un endurecimiento y con ello una reducción volumétrica gradual y global en la muestra. Si se omite el hecho de que el suelo es anisotrópico y heterogéneo, la reducción volumétrica debería ser homogénea.

Sin embargo, las muestras preparadas con kerosene presentaron un comportamiento totalmente distinto al ser secadas al horno puesto que no ocurrió un endurecimiento ni una reducción volumétrica como en el caso del agua desionizada o la salmuera. El efecto fue totalmente opuesto ya que hubo desprendimiento de las partículas del suelo, por lo cual el grado de compacidad aumentó, la consistencia era baja, suelta, estructura débil y desmoronable.



Muestra secada al horno. Fluido de poro: Kerosene. Descripción: ceniza, suelo desmoronable, suelto, traza color gris.



Muestra secada al horno. Fluido de poro: Salmuera NaCl 2-M. Descripción: compacto, suelo de consistencia dura, con cubierta blanca exceso de sal.

**Figura 57. Descripción típica de las muestras con Kerosene y Salmuera luego de ser secadas al horno en el ensayo del límite líquido.**

Este comportamiento se puede explicar por la naturaleza del kerosene el cual al ser un fluido no polar, no permite que el suelo desarrolle un comportamiento plástico por lo cual no hay mayor interacción fluido-partícula. Con la evaporación del kerosene, el suelo no se contrae dado que no existió repulsión entre partículas o si la existió fue muy mínima. Los vacíos no se reducen y al no existir una matriz fluido-poro-aire, se podría pensar que el suelo adquiere una consistencia distinta.

El kerosene no tiene una fórmula química definida debido a que está formado por una gran cantidad de hidrocarburos y pequeñas cantidades de otras materias menores. Los hidrocarburos en el kerosene generan disminución en el pH del suelo debido a la acumulación de carbono orgánico y generación de ácidos



orgánicos lo cual según la literatura genera un aumento en la capacidad de intercambio catiónico en los suelos.

En general no se conoce la composición mineralógica de los suelos, pero al ser de la zona y del mismo origen volcánico podrían ser similares. Lo ideal sería conocer su mineralogía ya que como se hace énfasis en esta investigación, este conocimiento ayuda a entender de una mejor forma el comportamiento matricial del suelo.

Para poder ejecutar el programa de laboratorio se debió secar cada muestra de manera previa aunque esto significara cambios irreversibles en el suelo dado su posible y muy probable contenido de alofán y haloisita, minerales típicos en suelos derivados de cenizas volcánicas. Estos cambios se pudieron haber magnificado gracias a la alta capacidad de retención de agua y humedades naturales altas, características típicas en suelos de este origen.

No fue posible establecer algún tipo de relación entre el contenido de arcilla y el límite líquido de los suelos estudiados, por lo cual no es factible predecir el comportamiento de un suelo según la relación de volúmenes. Lo anterior es consistente con la propuesta planteada en esta investigación de conocer y analizar la mineralogía del suelo para poder entender mejor su comportamiento. Se observó que suelos con los menores porcentajes de arcilla obtuvieron un límite líquido mayor que otros con contenido de arcilla mayor. La posible explicación a esto es por la naturaleza de las partículas, al ser unas mas expansivas que otras, con lo cual el contenido de arcilla no es una medida valiosa si no se estudia la química de las partículas finas.

Se obtuvo para todos los suelos que incluir la sal NaCl en el fluido de poro condujo a una reducción en sus límites líquidos con respecto al agua desionizada, lo cual es consistente con teorías e investigaciones previas, en donde esta reducción en suelos de alta plasticidad se explica en un incremento de la permeabilidad (conductividad hidráulica) del suelo natural debido a la disminución de la fuerza de repulsión entre las partículas por el aumento en la concentración de iones (teoría de Gouy-Chapman-Stern).

En general todos los suelos estudiados se consideran de alta plasticidad, lo cual permitió una tendencia similar en cuanto a la reducción del límite líquido con salmuera. No se pudo establecer qué sucede con suelos de baja plasticidad, en donde teorías previas han indicado que el efecto es contraproducente y puede

haber generación de componentes más expansivos, con lo cual el límite líquido con salmuera aumentaría si se compara con el de agua desionizada.

Según Mitchell y Soga (2005) el tamaño de los poros que controlan el flujo de los fluidos debe ser el mismo para todas las arcillas en su límite líquido, para el caso de la salmuera, la floculación aumenta la relación de vacíos por lo cual será necesaria una menor cantidad de solución NaCl para lograr una proporción de vacíos igual a la lograda con agua desionizada, con lo cual el límite líquido tiende a ser menor.

La relación entre el límite líquido con agua desionizada y con NaCl refleja la variación de la doble capa difusa en el suelo, por el aumento de iones lo cual disminuye la tendencia de los iones a difundirse en el suelo y tiende a reducir el espesor en suelos muy expansivos. La relación entre el límite líquido con kerosene y con NaCl genera una variación tanto en la doble capa difusa como en las fuerzas de van der Waals, ya que por un lado el kerosene por ser un fluido no polar genera una reducción en el espesor de la doble capa difusa pero además aumenta la capacidad de intercambio catiónico del suelo lo cual aumenta el contacto entre partículas y con ello la atracción al disminuir la distancia, aunque se afecta en mayor medida la fuerza repulsiva.

#### - Precisión y análisis estadístico

La norma INV-E (2007) plantea una precisión según la cual dos resultados de límites líquidos determinados en el mismo laboratorio, por el mismo operador en horarios diferentes se deben cuestionar si difieren en más del 7%. Dado que no se encontró otro indicador de precisión y tolerancia permitido, se asumió este porcentaje como el máximo permisible para cada una de las cinco determinaciones. No hubo lugar a repetición de ensayos debido a resultados por fuera de esa precisión.

Esta precisión anteriormente descrita, fue planteada cuando se empezó a desarrollar el plan de laboratorio, para poder controlar los errores de tipo sistemático que se pudiesen presentar durante la ejecución de los ensayos, como error en las mediciones, calibración del equipo, criterio del operador, etc.

Por tratarse de un estudio experimental, también hay lugar a errores de tipo aleatorio que son más difíciles de controlar, observar y mitigar dado que depende de factores inherentes al operador como la temperatura del ambiente, heterogeneidad del suelo, muestreo, etc. Para este caso se hizo uso del error permisible dado un nivel de confianza, planteando un margen de error en el cual

se espera esté el verdadero valor del parámetro medido de toda la población, es decir todo el suelo.

En general para cada una de las cinco determinaciones del límite líquido realizadas por tipo de fluido a cada suelo, el error determinado experimentalmente cumplió dentro del rango del máximo error permisible para lograr un nivel de confianza del 95%.

## **CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS**

1. Los límites líquidos determinados con el ranurador curvo fueron en general (muestras en agua desionizada y salmuera) 5% inferiores a los del ranurador plano y se debe principalmente a la imposibilidad de controlar la altura de los taludes de la ranura y la técnica de ranuración de desplazamiento lateral de la muestra lo cual tiende a aumentar aún más la altura de los taludes; todo esto produce un cierre anticipado de la muestra y por tal la disminución de la humedad para tener la muestra en su límite líquido.
2. Los resultados estimados con el penetrómetro de cono fueron en general (muestras en agua desionizada y salmuera) 4% mayores a los límites líquidos determinados con el ranurador plano. Las principales hipótesis son la sobre-compactación de las muestras en el método de cono y los efectos del golpeteo en el cierre de la muestra con el método de Casagrande.
3. La correlación obtenida entre el método de Casagrande con ranurador curvo y el penetrómetro de cono para las muestras en agua desionizada y salmuera es menos precisa y la variación es mayor, debido a que los resultados con el cono fueron mayores a los del ranurador plano y los resultados del curvo menores a los del plano, con mayor razón los límites determinados con el cono serán mayores a los determinados con el ranurador curvo. Los resultados fueron 9% mayores.
4. En suelos con plasticidad muy baja o nula, la determinación del límite líquido se realiza con mayor facilidad con el método de penetrómetro de cono que con la prueba de Casagrande. Los suelos expuestos al kerosene presentaron características no plásticas por lo cual el método de Casagrande fue de imposible a muy difícil ejecución, para el ranurador plano y el curvo, respectivamente.
5. El método de Casagrande por ser un ensayo más subjetivo que el del penetrómetro de cono es vulnerable a errores durante su procedimiento lo cual afecta la repetibilidad de los ensayos comparado con este segundo método, en donde resultados erróneos fueron poco comunes e inusuales durante esta investigación.

6. Para el agua desionizada el método que arrojó menor variabilidad entre las cinco determinaciones fue el de Casagrande-Ranurador curvo, seguido por el Penetrómetro de cono y finalmente el método Casagrande-Ranurador plano. Para el caso en que los límites líquidos fueron determinados con salmuera los resultados más homogéneos y con menor rango de variación se lograron con el método de Penetrómetro de cono, seguido por el de Casagrande-Ranurador plano y finalmente Casagrande-Ranurador curvo. Aunque es de aclarar que la variabilidad es mínima en todos los métodos.
7. La determinación del límite líquido cuando el fluido de poro es kerosene es poco viable con el método de la copa de Casagrande dadas las implicaciones de los efectos dinámicos durante el ensayo, los cuales producen un colapso prematuro de la muestra. Dicho colapso es inducido por la disminución y posible pérdida de espesor de la doble capa difusa en las partículas de las muestras las cuales tienden a flocularse y aumentar la resistencia al corte en el contacto inter-partícula, produciendo aglomerados con alta relación de vacíos. La muestra genera nuevas propiedades como una alta compresibilidad.
8. Las variaciones en la prueba de la copa de Casagrande entre el ranurador curvo y el plano se deben principalmente en las dimensiones de la ranura y forma de corte de la muestra. El ranurador plano permite una ranura estandarizada aunque su mecanismo de ranurador corta la muestra y puede producir arrastre de sobrantes, por otra parte, el ranurador curvo permite el desplazamiento de la muestra ranurada, aunque no se garantiza una ranura con medidas estándar durante todas las repeticiones del ensayo. La imposibilidad en el control de un buen ranurador posiciona a este método como el menos indicado de los tres empleados.
9. Según la clasificación SUCS, el suelo 1 y 3 son CH mientras que el suelo 2, 4 y 5 clasifican como MH. Con el Sistema AASHTO, se clasificó al suelo 3 como A-7-6 y los suelos 1, 2, 4 y 5 como A-7-5. AASHTO indicaría que todos los suelos excepto el suelo 3, al ser clasificados en un mismo grupo, presentarían propiedades mecánicas similares. Caso contrario ocurre con el Sistema SUCS, en donde la clasificación de los suelos indicó que el suelo 1 clasifica como CH al igual que el suelo 3, por lo cual sus propiedades mecánicas serían similares.
10. En general con los tres métodos con los cuales se determinó el límite líquido se obtuvo la misma clasificación SUCS y AASHTO para cada uno

de los cinco suelos, por lo cual no se tendría un error en la clasificación si se usa uno u otro. Con el método Casagrande-Ranurador curvo se obtuvo en promedio los límites líquidos más bajos; de manera opuesta, con el Penetrómetro de cono se obtuvo los límites líquidos más altos por lo cual cabe la posibilidad de que en algún suelo, sí pueda existir una diferencia en su clasificación si se utiliza alguno de estos dos métodos.

11. El porcentaje de arcilla a menudo se ha correlacionado con la actividad y el comportamiento en general de un suelo; sin embargo, dicho valor en solitario no es suficiente para caracterizar el suelo por lo cual se debería estudiar y tener en cuenta la mineralogía de dicho contenido ya que un mineral de arcilla puede aportar menor o mayor expansión al suelos, según el tipo. No se logró obtener una relación directa entre este porcentaje y los límites de Atterberg de los suelos estudiados.
12. Suelos que son potencialmente expansivos de acuerdo a los sistemas clásicos de la mecánica de suelos, con la nueva clasificación muestran mejor cuál es su verdadero comportamiento, lo cual ahorra el ensayo de determinación del potencial expansivo.
13. Para todas las determinaciones del límite líquido realizadas por tipo de fluido a cada suelo, el error determinado experimentalmente cumplió con el rango del máximo error permisible para lograr un nivel de confianza del 95%.
14. De acuerdo con el estudio experimental realizado con los tres métodos para determinar el límite líquido de los suelos, se cumple con una alta precisión en repetibilidad y reproducibilidad de los resultados, según INV-E 125 (2007).
15. Todos los suelos presentaron un mayor valor de límite líquido con agua desionizada que con salmuera, lo cual es congruente con la teoría para suelos de plasticidad alta según SUCS. El principal motivo se debe a la reducción del espesor de la doble capa difusa por el aumento en la concentración de iones cuando se utiliza salmuera el lugar de agua desionizada (Teoría Gouy-Chapman-Stern).
16. Los límites líquidos determinados con kerosene fueron en general mayores a los estimados con salmuera. Este efecto se debe al aumento en la

atracción entre partículas, con tendencias a la floculación lo cual aumenta el límite líquido de los suelos de alta plasticidad. La sensibilidad de los suelos fue mayor en las fuerzas de van der Waals que en la doble capa difusa.

17. Utilizando la nueva clasificación de suelos finos y teniendo en cuenta los resultados de límites líquidos determinados con el Penetrómetro de cono, los suelos 1, 2 y 5 tienen una plasticidad y sensibilidad eléctrica intermedia (I-I), el suelo 3 tiene una baja plasticidad y sensibilidad eléctrica intermedia (L-I) mientras que el suelo 4 es de baja plasticidad y sensibilidad eléctrica alta (L-H).
18. En general, la sensibilidad eléctrica indica la sensibilidad que tiene el suelo a generar propiedades de plasticidad, potencial expansivo, aumento en el intercambio catiónico, floculación e inestabilidad volumétrica. Se logra a partir del cambio de las propiedades del fluido de poro como la concentración de iones disponibles y la capacidad de polarización de las moléculas lo cual se ve reflejado en cambios en los efectos de doble capa difusa y fuerzas de van der Waals.
19. Durante toda esta investigación el programa de laboratorio se llevó a cabo a la fracción fina del suelo, es decir, al pasante del Tamiz No 200. Incluso los límites de Atterberg que usualmente se suelen realizar a la fracción pasante del Tamiz No 40. Evidentemente los límites de Atterberg no serán los mismos para cada fracción de suelo, en teoría la fracción gruesa del suelo puede aportar fricción y cohesión al mismo, mas no plasticidad. La cohesión, fricción y plasticidad tal vez sean las propiedades del suelo más influyentes en la determinación de su límite plástico y líquido. **Como línea para una investigación futura** se podría estimar en qué proporción cambian algunos parámetros del suelo y su influencia en la clasificación si sólo se tiene en cuenta la fracción fina o si además se incluye parte de la fracción gruesa.
20. Por otro lado, dado que se emplearon fluidos de poro distintos al agua en estado natural del suelo, se debió secar las muestras previamente a todos los ensayos, generalmente a temperatura ambiente. Algunos autores e incluso la misma norma INV-E 2013 indican que los parámetros del suelo pueden cambiar drásticamente si se proporciona secado al horno previo a los ensayos, siempre y cuando se tenga importante fracción fina de arcilla. Incluso con secado a temperatura ambiente ya se deben de estar modificando las propiedades del suelo, por la deshidratación de algunos minerales como la halosita por ejemplo, que es muy común en suelos derivados de cenizas volcánicas como son los suelos del área de Popayán.

No se encontró un indicador del efecto que causa estos cambios de temperatura en los suelos de Popayán. Como investigación se podría estimar las propiedades el suelo sin secado previo y en condiciones naturales como la calidad del agua y demás; y compararlas con pruebas realizadas a muestras secadas previamente, al horno y a temperatura ambiente. Se podría incluso estimar si el secado del suelo podría ser un método para aumentar o disminuir el efecto de ciertas propiedades, lo cual sería muy útil en la cotidianidad de la ingeniería como problemas de estabilidad de taludes, compactación de suelos, etc.

21. A pesar de que se determinó el límite plástico de las muestras de suelos por el método de rollo y de Feng, no se logró establecer una correlación directa entre ambos métodos ya que el número de puntos era reducido aunque se puede apreciar una posible tendencia. Se podría profundizar más en estos métodos y en general en la caracterización del límite plástico de los suelos, dada la gran importancia de este parámetro en los actuales sistemas de clasificación, aunque el método actualmente utilizado a nivel mundial para determinado es calificado como subjetivo e impreciso.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (2013). Standard method of test for determining the liquid limit of soils. *T-89*.
- Abdullah, W. S., Alshibli, K. A., & Al-Zou'bi, M. S. (1999). Influence of pore water chemistry on the swelling behavior of compacted clays. pp. 447 - 462.
- American Society for Testing and Materials. (2005). Standard test methods for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils. *ASTM D 4318*.
- Anandarajah, A., & Chen, J. (1997). Van der Waals attractive force between clay particles in water and contaminants. *Japanese Geotechnical Society, Vol. 37(2)*, pp. 27 - 37.
- Anandarajah, A., & Zhao, D. (2000). Triaxial behavior of kaolinite in different pore fluids. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 126(2)*, pp. 148-156.
- Arasán, S. (2010). Effect of chemical on geotechnical properties of clay liners: A review. *Journal or Applied Sciences, Engineering and Techonology, Vol 2(8)*, pp. 765 - 775.
- Arasan, S., & Yetimoglu, T. (2006). Effect of leachate components on the consistency limits of clay liners. *National Soil Mechanic and Foundation Engineering Congress*, pp. 439 - 445.
- Arasan, S., & Yetimoglu, T. (2008). Effect of inorganic salt solution on the consistency limits of two clays. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Science, Vol. 32*, pp. 107 - 115.
- Atterberg, A. (1911). Die Plastizität der Tone. *Int. Mitt. Bodenkd, Vol. 1*, pp 10-43.
- Belviso, R., Ciampoli, S., Cotecchia, V., & Federico, A. (1985). Use of the cone penetrometer to determine consistency limits. *Ground Engineering, Vol. 18(5)*, 21 - 22.
- Bowders, J., & Daniel, D. (1987). Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals. *Journal of Geotechnical Engineering, Vol 113*, pp. 1443 - 1448.
- BSI (British Standards Institution). (1990). *Methods of test for soils for civil engineering purposes - Part 2. BS 1377-2:1990*. London.

- Büttner, R., Dellino, P., & Zinranowski, B. (1999). Identifying magma - water interaction from the surface features of ash particles. *Nature*, Vol. 401(6754), pp. 688-690.
- Casagrande, A. (1932). Research on the Atterberg Limits of soils. *Public Roads Magazine*, Vol. 13(8), pp. 121 - 130.
- Casagrande, A. (1958). Notes on the design of the liquid limit device. *Geotechnique*, Vol. 8(2), pp. 84 - 91.
- Chen, J., Anandarajah, A., & Inyang, H. (2000). Pore fluid properties and compressibility of kaolinite. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126(9).
- Di Matteo, L. (2012). Liquid limit of low to medium plasticity soils: comparison between Casagrande cup and cone penetrometer test. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71, pp. 79-85.
- Farrar, D., & Coleman, J. (1967). The correlation of surface area with other properties of nineteen British clays. *Journal of Soil Science*, Vol. 18(1), pp. 118 - 124.
- Feng, T. W. (2000). Fall-cone penetration and water content relationship of clays. *Géotechnique*, Vol 50(2), 181 - 187.
- Grim, R. E. (1953). *Clay mineralogy*. New York: McGraw-Hill.
- Haigh, S. K. (2012). Mechanics of the Casagrande liquid limit test. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 49, pp. 1015 - 1023.
- Haigh, S., Vardanega, P., & Bolton, M. (2013). The plastic limit of clays. *Géotechnique*, Vol. 63(6), pp. 435 - 440.
- Hamacker, H. C. (1937). The london-van der Waals attraction between spherical particles. *Physica*, vol. 4(10), pp. 1058 - 1072.
- Herrera, M. C. (2006). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia: Estudio fundamental e implicaciones en ingeniería. *Tesis Ph.D. Universidad de los Andes*, 265 pp.
- Hough, D., & White, L. (1980). The calculation of Hamaker constants from Lifshitz theory with applications to wetting phenomena. *Advances in Colloid and Interface Science*. Elsevier, Vol. 14.
- Howard, A. K. (1984). The revised ATM standard on the unified classification system. *Geotechnical Testing Journal*, 7(4), pp. 216 - 222.
- IGAC. (1988). *Suelos y bosques de Colombia*. Bogotá D. C.: Impreso en IGAC.
- IGAC. (1993). *Cauca: Características geográficas*. Bogotá D. C.: Antares Ltda.
- Imeson, A., & Vis, M. (1982). A survey of soil erosion processes in tropical forest ecosystems on volcanic ash soils in the Central Andean Cordillera, Colombia. *Geografiska Annaler*, Vol. 64(3/4), pp. 191 - 198.

- INVIAS. (2013). Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. *Sección-100 Suelos*.
- Jang, J. (2014). Gas-charged sediments: Phenomena and characterization. *Tesis Ph.D., Georgia Institute of Technology*, 158 pp.
- Jang, J., & Santamarina, J. (2015). Fines classification based on sensitivity to pore-fluid chemistry. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Jefferson, I., & Rogers, C. (1998). Liquid limit and the temperature sensitivity of clays. *Engineering Geology, Vol. 49*, pp. 95 -109.
- Jimenez, J., & Justo, J. (1975). *Geotecnia y cimientos I. Propiedades de los suelos y de las rocas* (Segunda ed.). Madrid: Rueda.
- Juarez, E., & Rico, A. (2005). *Mecánica de suelos I: Fundamentos de la mecánica de suelos*. (Segunda ed.). México D. F.: Limusa S. A.
- Lifshitz, E. M. (1956). The theory of molecular attractive forces between solids. *Soviet Physics, Vol. 2(1)*, pp. 73 - 83.
- Linares, J., Huertas, F., & Barahona, E. (1969). Reología de suspensiones de minerales de arcilla. *Ciencia y técnica, Noviembre - Diciembre*, pp. 635 - 643.
- Littleton, I., & Farmilo, M. (1977). Some observations on liquid limit values. *Ground Engineering, Vol. 10(4)*, pp. 39 - 40.
- Lizcano, A., Herrera, M., & Santamarina, J. (2006). Suelos derivados de cenizas volcánicas. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, Vol. 6(2)*, pp. 167-197.
- Luna, C. (1975). *Suelos de ceniza volcánica del cauca* (Vol. XI). Bogota D. C.: Impreso en IGAC.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior* (Tercera ed.). New York: Wiley.
- Moore, C., & Mitchell, J. (1974). Electromagnetic forces and soil strength. *Géotechnique, Vol. 24(4)*, pp. 627 - 640.
- New Zealand Geotechnical Society. (2005). *Field description of soils and rocks. Guideline for field classification and description of soils and rocks for engineering purposes*. Retrieved from [http://www.nzgs.org/Publications/Guidelines/soil\\_and\\_rock.pdf](http://www.nzgs.org/Publications/Guidelines/soil_and_rock.pdf)
- Ninham, B., & Parsegian, V. (1970). Van der Waals forces across triple-layer films. *Journal of Chemical Physics, Vol. 52(9)*, pp. 4578 - 4587.
- Olchawa, A., & Goraczko, A. (2012). The relationship between the liquid limit of clayey soils, external specific surface area and the composition of

- exchangeable cations. *Journal of Water and Land Development*(17), pp. 83 - 88.
- Olson, R., & Mesri, G. (1970). Mechanisms controlling compressibility of clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 6*(11), pp. 1863 - 1878.
- Ontiveros, A., Moleon, J., Plaza, I., & Guillén, C. (2016). Effect of interfacial properties on mechanical stability of ash deposit. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Paredes, P., & Verdugo, A. (2004). Génesis y estructura de los suelos alofánicos en Chile. *V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Polanco, M. (2009). *Principios básicos de mecánica de suelos*. Popayán: Universidad del Cauca.
- Polidori, E. (2003). Proposal for a new plasticity chart. *Géotechnique, Vol. 53*(4), pp. 397 - 406.
- Polidori, E. (2009). Reappraisal of the activity of clays. Activity chart. *Japanese Geotechnical Society, Vol. 49*(3), pp. 431 - 441.
- Polidori, E. (2015). Proposal for a new classification of common inorganic soils for engineering purposes. *Geotechnical and geological engineering, Vol. 33*, pp. 1569 - 1579.
- Rants, E., Utami, S., & Shamshuddin, J. (2002). Andisols on volcanic ash from Java Island, Indonesia: Physico-chemical properties and classification. *Soil Science Society of America Journal, Vol. 167*(1), pp. 68 - 79.
- Riley, C. M., Rose, I., & Bluth, J. S. (2003). Quantitative shape measurements of distal volcanic ash. *Journal of Geophysical Research, Vol. 108*(B10), pp. ECV8.1 - ECV8.15.
- Sanhueza, C., Palma, J., Valenzuela, P., Araneda, O., & Calderón, K. (2011). Evaluación del comportamiento geotécnico de suelos volcánicos chilenos para su uso como material de filtro en la depuración de aguas residuales domésticas. *Revista de la Construcción, Vol. 10*(2), pp. 66 - 81.
- Santamarina, J., Klein, K., Wang, Y., & Prencke, E. (2002). Specific surface: Determination and relevance. *Canadian Geotechnical Journal, Vol. 39*(1), pp. 233 - 241.
- Schmitz, R., & Van Paassen, L. (2003). The decay of the liquid limit of clays with increasing salt concentration. *Ingeokring Newsletter, Vol. 9*(1), pp. 10 - 14.
- Shariatmadari, N., Salami, M., & Karimpour-Fard, M. (2011). Effect of inorganic salt solutions on some geotechnical properties of soil-bentonite mixtures as barriers. *International Journal of Civil Engineering, Vol. 9*(2), pp. 102 - 110.

- Shoji, S., Nanzyo, M., & Dahlgren, R. (1993). *Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization*. Amsterdam: Elsevier Science.
- Sivapullaiah, P., & Manju, M. (2005). Kaolinite-alkali interaction and effects on basic properties. *Geotechnical Geological Engineering, Vol. 23(5)*, pp. 601 - 614.
- Spagnoli, G. (2012). Comparison between Casagrande and drop-cone methods to calculate liquid limit for pure clay. *Canadian Journal of Soil Science, Vol. 92*, pp. 859 - 864.
- Sridharan, A., & Rao, G. (1973). Mechanisms controlling volume change of saturated clays. *Géotechnique, Vol. 23(3)*, pp. 359 - 382.
- Torres, M. P. (1997). *Aporte al conocimiento de la geología y la estratigrafía de la formación Popayán. Departamento del Cauca*. Popayán: Universidad del Cauca.
- Van Olphen, H. (1977). *An introduction to clay colloid chemistry*. New York: Wiley Interscience.
- Vargas, L. (2008). *Química Inorgánica General*. Popayán: Universidad del Cauca.
- Vásquez, L. C. (1979). Algunos aspectos geotécnicos de las cenizas volcánicas en las vías del distrito de obras públicas No 5. *Segunda conferencia regional de geotecnia del occidente colombiano* (pp. 1 - 12). Popayán: Universidad del Cauca.
- Wasti, Y., & Bezirci, M. (1986). Determination of consistency limits of soils by fall-cone test. *Canadian Geotechnical Journal, Vol. 23(2)*, pp. 241 - 246.
- Whyte, I. (1982). Soil plasticity and strength: a new approach using extrusion. *Ground Engineering, Vol 15(1)*, pp. 16 - 24.
- Wood, D. M., & Wroth, C. P. (1978). The use of the cone penetrometer to determine the plastic limit of soils. *Ground Engineering, Vol 11(3)*, 37.
- Yilmaz, G., Yetimoglu, T., & Arasan, S. (2008). Hydraulic conductivity of compacted clay liners with inorganic salt solutions. *Waste Management & Research, Vol. 26(5)*, pp. 464 - 473.
- Yong, R. N., Mohamed, A. M., & Warkentin, B. P. (1992). *Principles of contaminant transport in soils, developments in geotechnical engineering* (Vol. 73). Amsterdam: Elsevier Science Publishers.

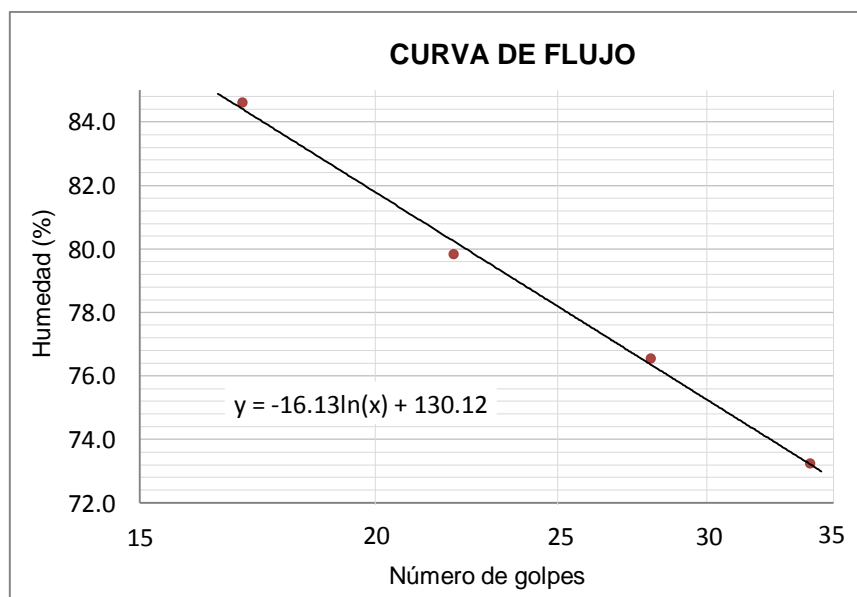
## ANEXOS

### Anexo A. Resultados límite líquido, copa de Casagrande-Ranurador plano

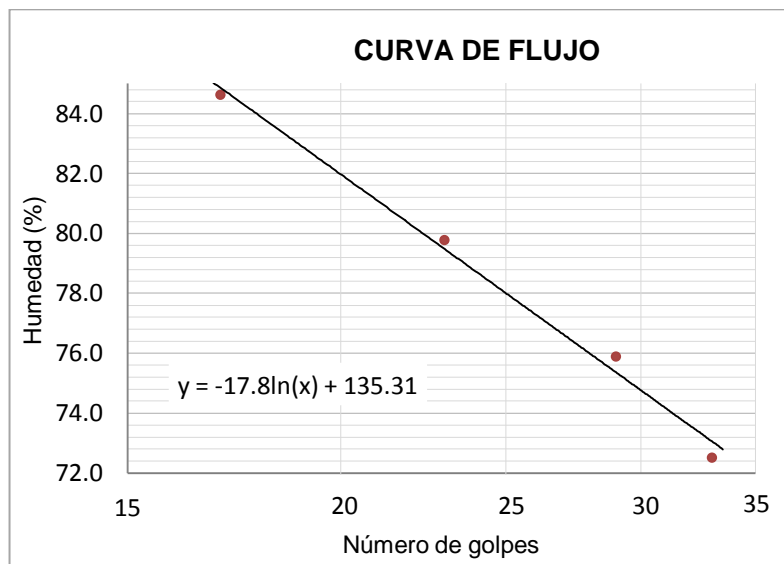
#### A.1 Ranurador plano-Suelo 1

Con Agua desionizada:

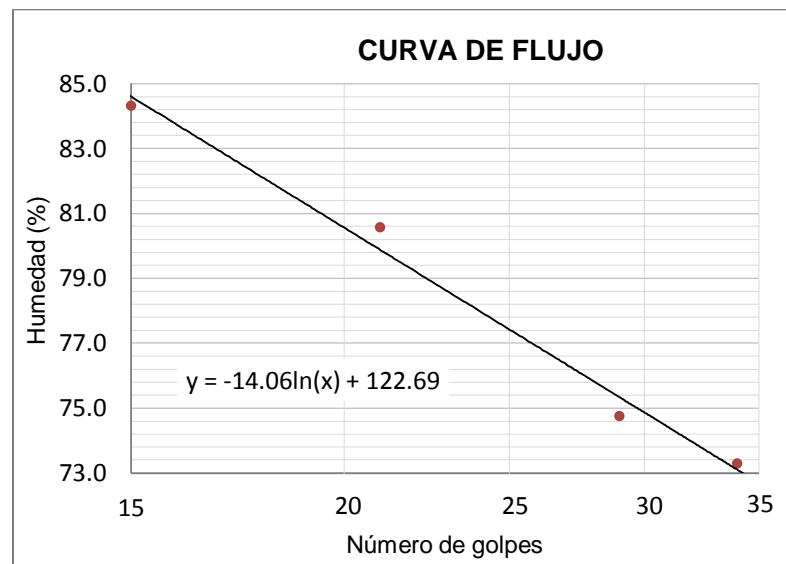
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	22	28	34
Peso del recipiente (g)	11.32	12.38	14.48	11.65
Recipiente + suelo húmedo (g)	24.52	26.39	28.71	24.73
Recipiente + suelo seco (g)	18.47	20.17	22.54	19.20
Peso del agua (g)	6.05	6.22	6.17	5.53
Peso suelo seco (g)	7.15	7.79	8.06	7.55
Humedad (%)	84.6	79.8	76.6	73.2
Límite líquido (%)	78.2			



LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	23	29	33
Peso del recipiente (g)	13.71	11.35	12.06	11.82
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.95	22.28	23.44	22.74
Recipiente + suelo seco (g)	20.34	17.43	18.53	18.15
Peso del agua (g)	5.61	4.85	4.91	4.59
Peso suelo seco (g)	6.63	6.08	6.47	6.33
Humedad (%)	84.6	79.8	75.9	72.5
Límite líquido (%)	78.0			

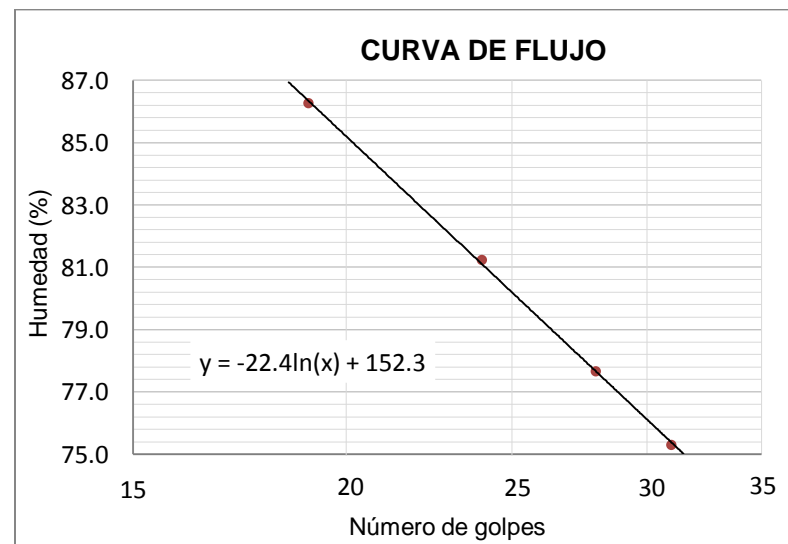
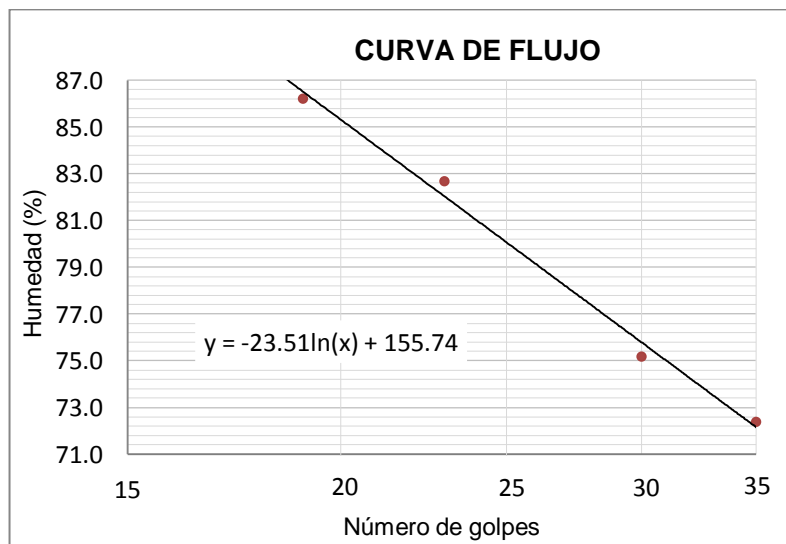


LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 3				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	21	29	34
Peso del recipiente (g)	14.66	11.19	12.36	12.88
Recipiente + suelo húmedo (g)	26.53	22.62	24.82	23.52
Recipiente + suelo seco (g)	21.10	17.52	19.49	19.02
Peso del agua (g)	5.43	5.10	5.33	4.50
Peso suelo seco (g)	6.44	6.33	7.13	6.14
Humedad (%)	84.3	80.6	74.8	73.3
Límite líquido (%)	77.4			



LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 4				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	19	23	30	35
Peso del recipiente (g)	12.66	11.24	15.02	12.18
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.52	23.06	27.23	24.11
Recipiente + suelo seco (g)	20.64	17.71	21.99	19.10
Peso del agua (g)	6.88	5.35	5.24	5.01
Peso suelo seco (g)	7.98	6.47	6.97	6.92
Humedad (%)	86.2	82.7	75.2	72.4
Límite líquido (%)	80.1			

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 5				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	19	24	28	31
Peso del recipiente (g)	13.85	16.15	11.93	12.02
Recipiente + suelo húmedo (g)	26.74	30.74	27.76	26.36
Recipiente + suelo seco (g)	20.77	24.20	20.84	20.20
Peso del agua (g)	5.97	6.54	6.92	6.16
Peso suelo seco (g)	6.92	8.05	8.91	8.18
Humedad (%)	86.3	81.2	77.7	75.3
Límite líquido (%)	80.2			

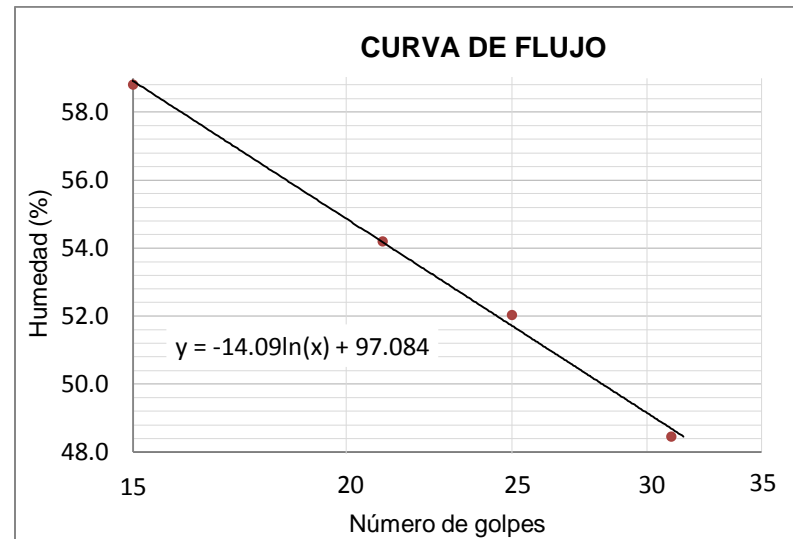
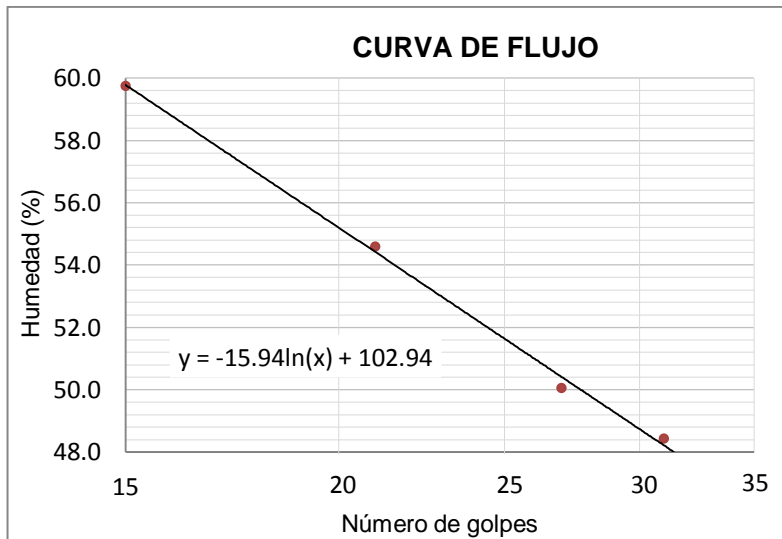




Con Salmuera:

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	21	27	31
Peso del recipiente (g)	14.86	13.15	12.84	11.60
Recipiente + suelo húmedo (g)	29.11	26.94	28.10	28.06
Recipiente + suelo seco (g)	23.78	22.07	23.01	22.69
Peso del agua (g)	5.33	4.87	5.09	5.37
Peso suelo seco (g)	8.92	8.92	10.17	11.09
Humedad (%)	59.8	54.6	50.0	48.4
Límite líquido (%)	51.6			

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	21	25	31
Peso del recipiente (g)	11.99	11.76	12.25	11.03
Recipiente + suelo húmedo (g)	26.41	28.86	26.07	25.40
Recipiente + suelo seco (g)	21.07	22.85	21.34	20.71
Peso del agua (g)	5.34	6.01	4.73	4.69
Peso suelo seco (g)	9.08	11.09	9.09	9.68
Humedad (%)	58.8	54.2	52.0	48.5
Límite líquido (%)	51.7			

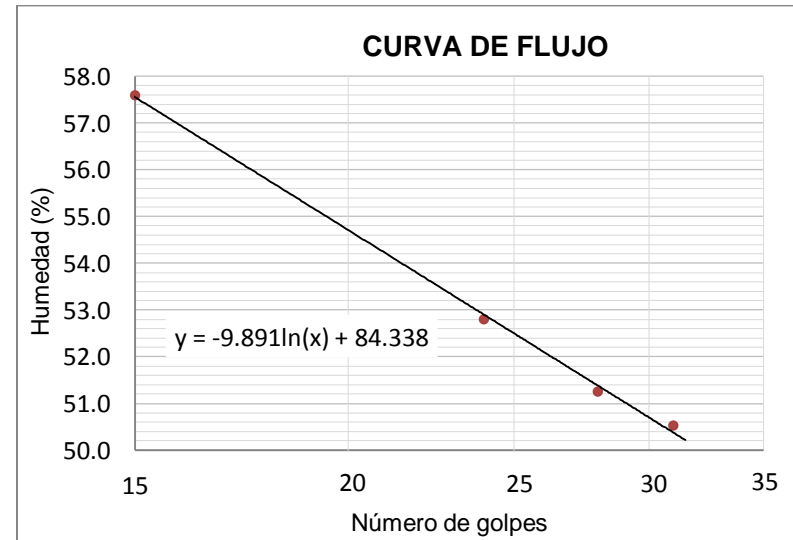
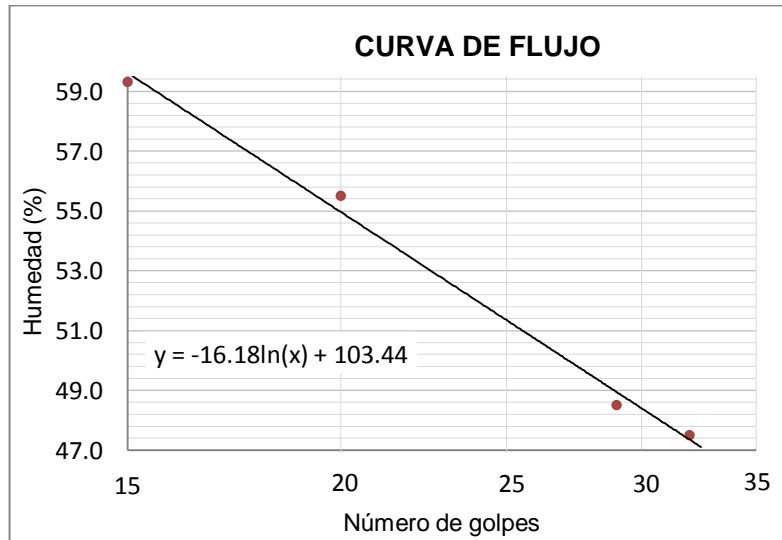


LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 3

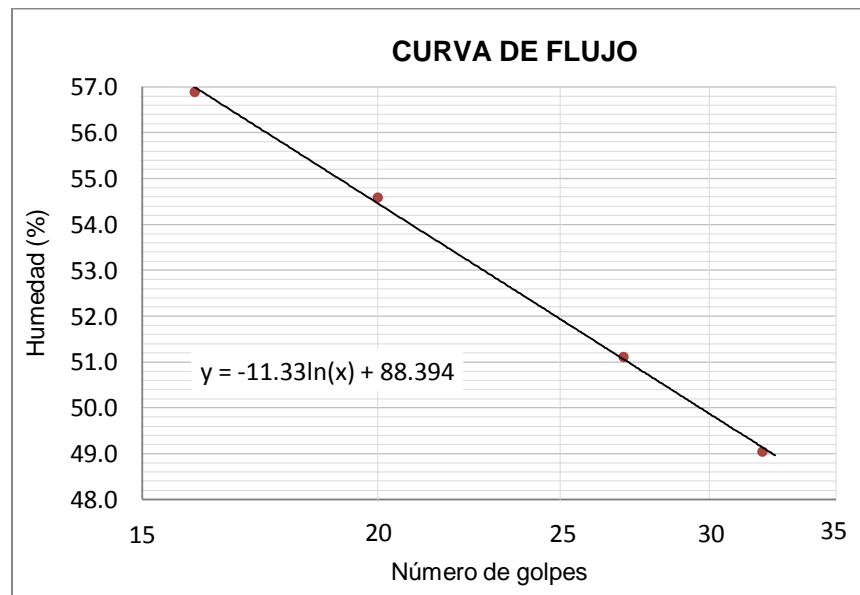
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	20	29	32
Peso del recipiente (g)	14.90	14.03	16.04	12.68
Recipiente + suelo húmedo (g)	28.57	28.12	30.58	28.11
Recipiente + suelo seco (g)	23.48	23.09	25.83	23.14
Peso del agua (g)	5.09	5.03	4.75	4.97
Peso suelo seco (g)	8.58	9.06	9.79	10.46
Humedad (%)	59.3	55.5	48.5	47.5
Límite líquido (%)	51.4			

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 4

Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	24	28	31
Peso del recipiente (g)	16.04	11.25	11.02	11.23
Recipiente + suelo húmedo (g)	32.62	24.85	25.39	26.63
Recipiente + suelo seco (g)	26.56	20.15	20.52	21.46
Peso del agua (g)	6.06	4.70	4.87	5.17
Peso suelo seco (g)	10.52	8.90	9.50	10.23
Humedad (%)	57.6	52.8	51.3	50.5
Límite líquido (%)	52.5			



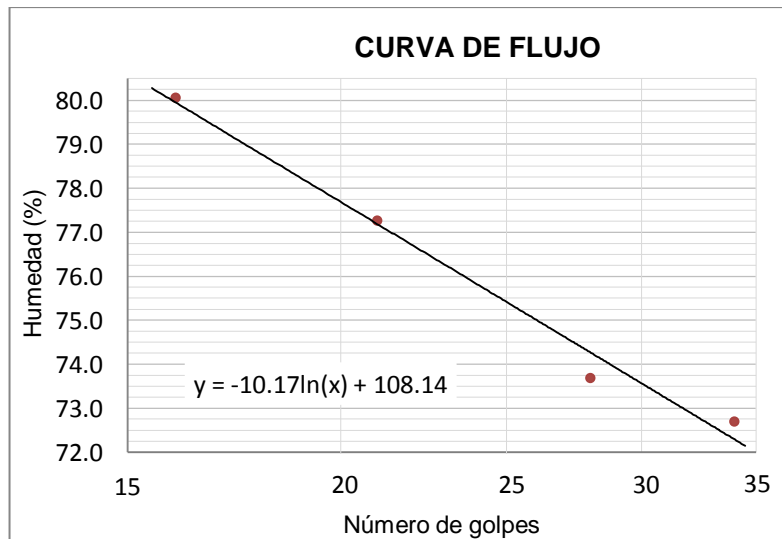
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 5				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	20	27	32
Peso del recipiente (g)	12.89	13.15	11.53	10.75
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.99	26.94	27.73	23.36
Recipiente + suelo seco (g)	21.24	22.07	22.25	19.21
Peso del agua (g)	4.75	4.87	5.48	4.15
Peso suelo seco (g)	8.35	8.92	10.72	8.46
Humedad (%)	56.9	54.6	51.1	49.1
Límite líquido (%)	51.9			



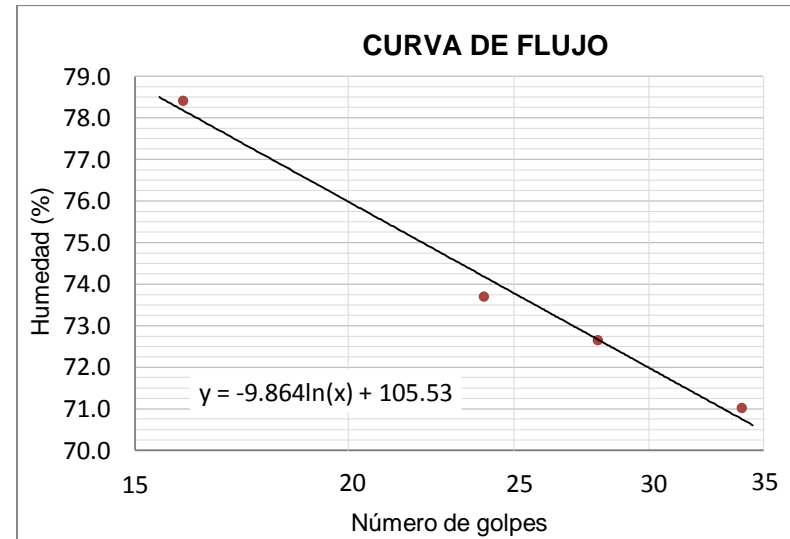
## A.2 Ranurador plano - Suelo 2

Con Agua desionizada:

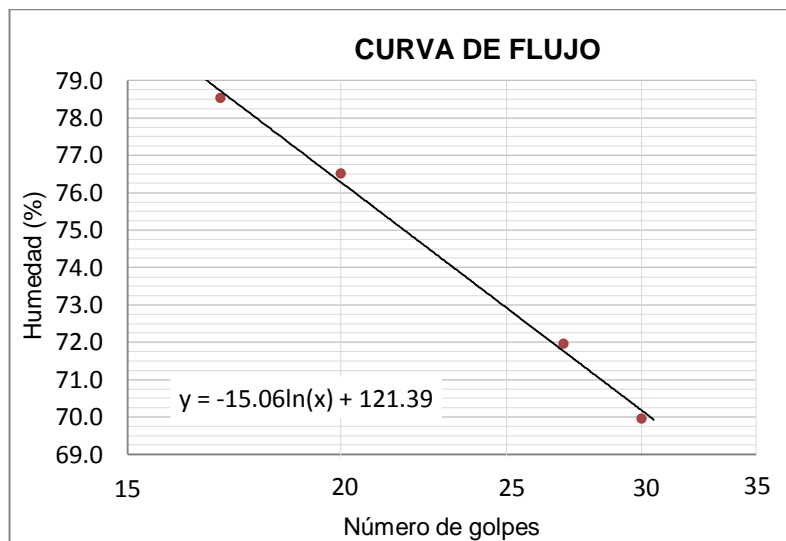
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	21	28	34
Peso del recipiente (g)	15.99	15.94	14.80	12.42
Recipiente + suelo húmedo (g)	29.53	32.16	29.32	26.65
Recipiente + suelo seco (g)	23.51	25.09	23.16	20.66
Peso del agua (g)	6.02	7.07	6.16	5.99
Peso suelo seco (g)	7.52	9.15	8.36	8.24
Humedad (%)	80.1	77.3	73.7	72.7
Límite líquido (%)	75.4			



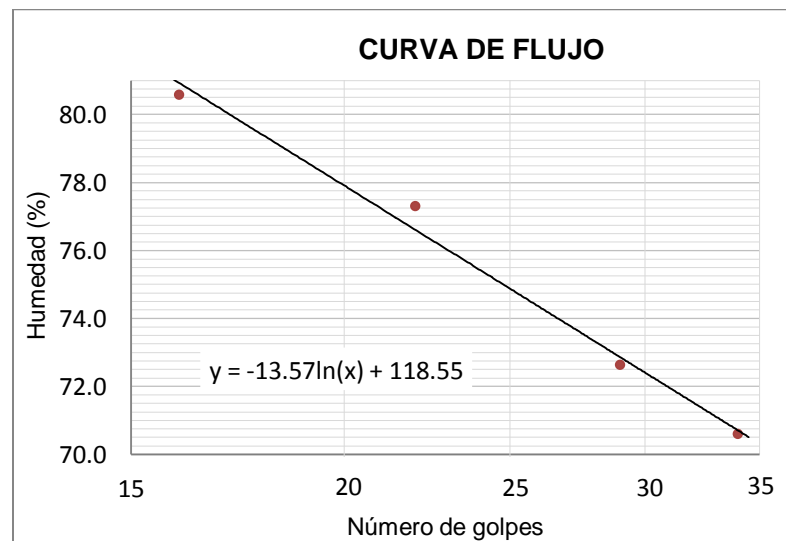
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	24	28	34
Peso del recipiente (g)	11.14	11.32	12.06	12.63
Recipiente + suelo húmedo (g)	26.68	25.25	26.77	28.33
Recipiente + suelo seco (g)	19.85	19.34	20.58	21.81
Peso del agua (g)	6.83	5.91	6.19	6.52
Peso suelo seco (g)	8.71	8.02	8.52	9.18
Humedad (%)	78.4	73.7	72.7	71.0
Límite líquido (%)	73.8			



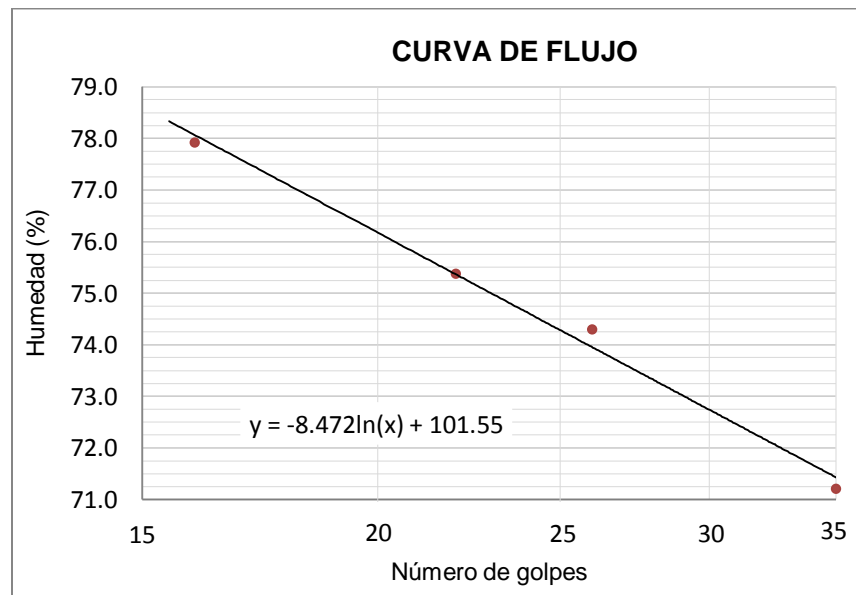
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 3				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	20	27	30
Peso del recipiente (g)	11.31	15.95	12.12	15.34
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.86	31.13	27.39	29.14
Recipiente + suelo seco (g)	19.46	24.55	21.00	23.46
Peso del agua (g)	6.40	6.58	6.39	5.68
Peso suelo seco (g)	8.15	8.60	8.88	8.12
Humedad (%)	78.5	76.5	72.0	70.0
Límite líquido (%)	72.9			



LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 4				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	22	29	34
Peso del recipiente (g)	14.75	12.04	13.85	11.96
Recipiente + suelo húmedo (g)	32.05	26.10	27.73	23.39
Recipiente + suelo seco (g)	24.33	19.97	21.89	18.66
Peso del agua (g)	7.72	6.13	5.84	4.73
Peso suelo seco (g)	9.58	7.93	8.04	6.70
Humedad (%)	80.6	77.3	72.6	70.6
Límite líquido (%)	74.9			



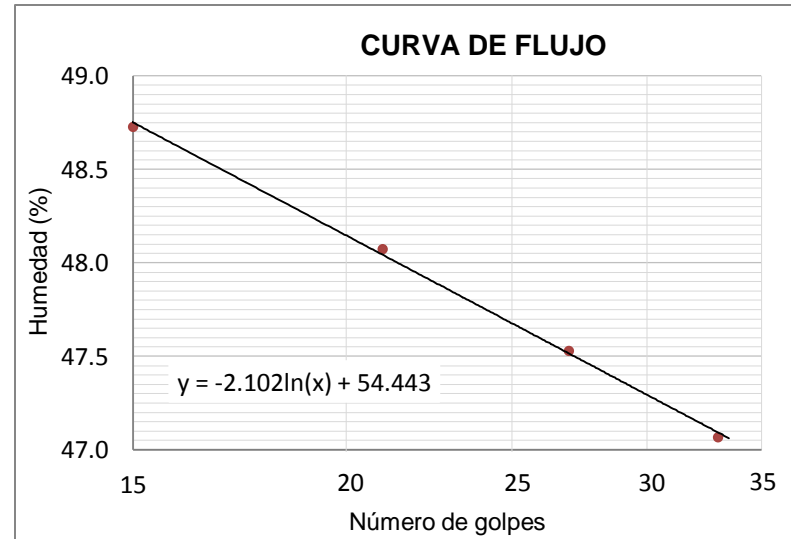
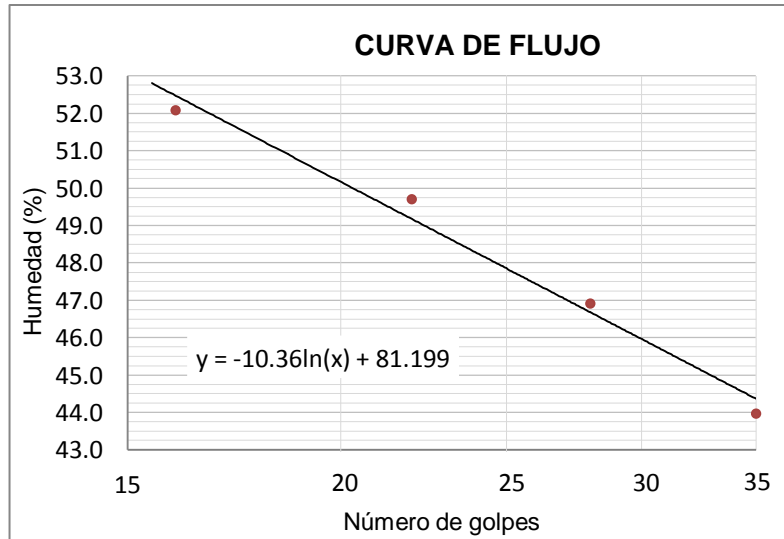
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 5				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	22	26	35
Peso del recipiente (g)	14.95	13.84	14.60	15.93
Recipiente + suelo húmedo (g)	32.92	29.73	31.42	31.51
Recipiente + suelo seco (g)	25.05	22.90	24.25	25.03
Peso del agua (g)	7.87	6.83	7.17	6.48
Peso suelo seco (g)	10.10	9.06	9.65	9.10
Humedad (%)	77.9	75.4	74.3	71.2
Límite líquido (%)	74.3			



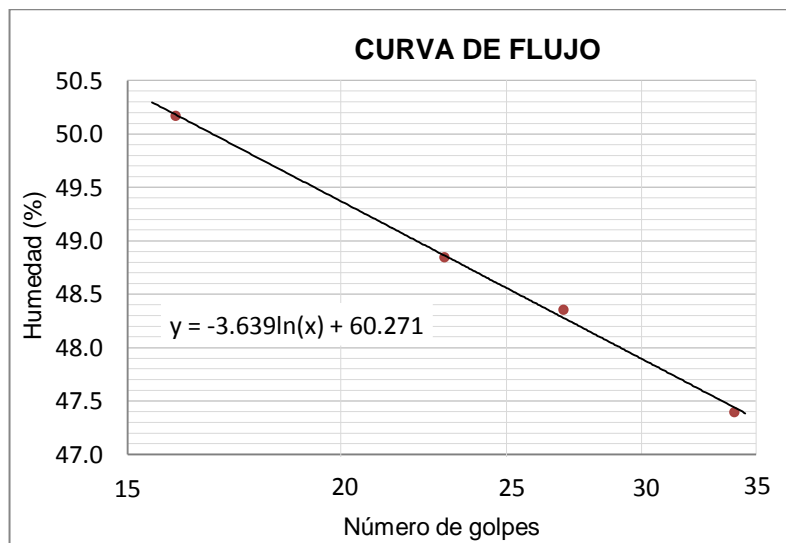
Con Salmuera:

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	22	28	35
Peso del recipiente (g)	12.37	11.80	12.23	12.24
Recipiente + suelo húmedo (g)	30.18	29.45	28.89	31.13
Recipiente + suelo seco (g)	24.08	23.59	23.57	25.36
Peso del agua (g)	6.10	5.86	5.32	5.77
Peso suelo seco (g)	11.71	11.79	11.34	13.12
Humedad (%)	52.1	49.7	46.9	44.0
Límite líquido (%)	47.9			

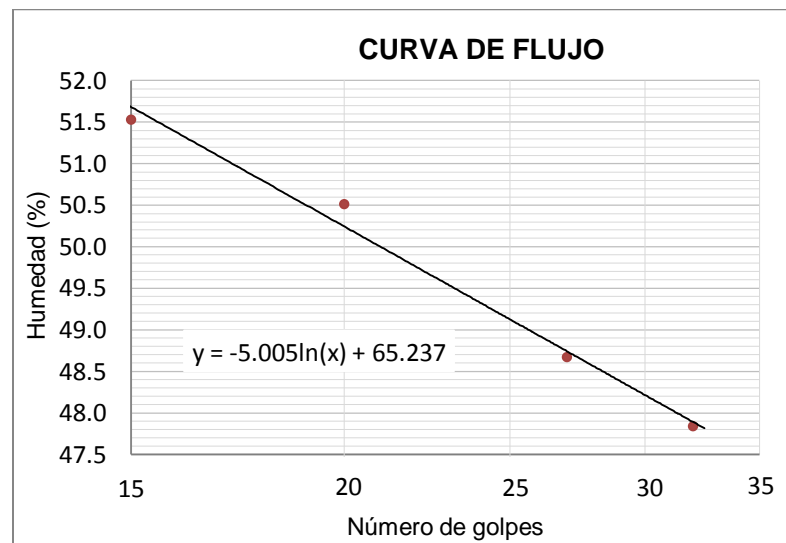
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	21	27	33
Peso del recipiente (g)	12.92	13.09	14.68	11.35
Recipiente + suelo húmedo (g)	33.98	28.86	35.88	28.41
Recipiente + suelo seco (g)	27.08	23.74	29.05	22.95
Peso del agua (g)	6.90	5.12	6.83	5.46
Peso suelo seco (g)	14.16	10.65	14.37	11.60
Humedad (%)	48.7	48.1	47.5	47.1
Límite líquido (%)	47.7			



LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 3				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	23	27	34
Peso del recipiente (g)	14.92	12.70	15.05	15.48
Recipiente + suelo húmedo (g)	37.34	30.07	37.17	34.14
Recipiente + suelo seco (g)	29.85	24.37	29.96	28.14
Peso del agua (g)	7.49	5.70	7.21	6.00
Peso suelo seco (g)	14.93	11.67	14.91	12.66
Humedad (%)	50.2	48.8	48.4	47.4
Límite líquido (%)	48.6			

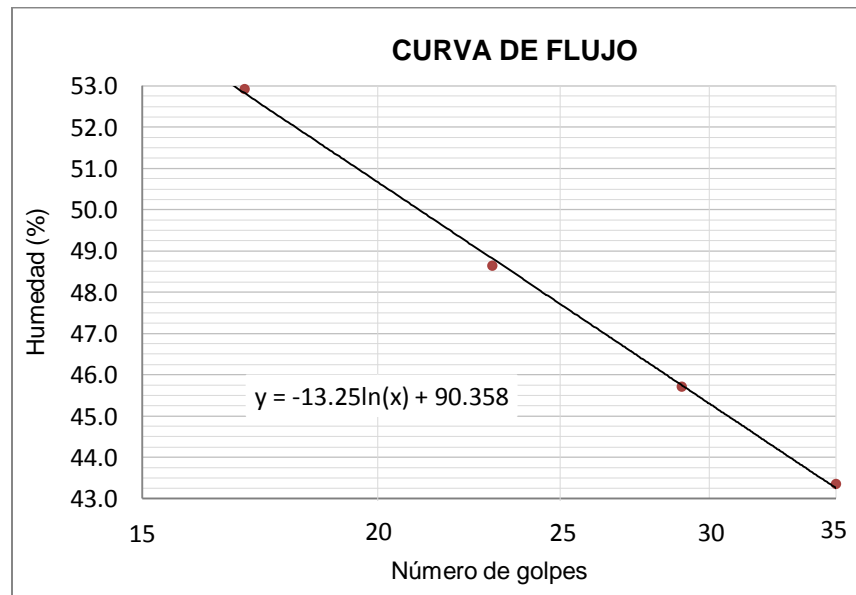


LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 4				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	20	27	32
Peso del recipiente (g)	12.08	11.90	14.02	12.14
Recipiente + suelo húmedo (g)	34.34	28.08	31.95	28.92
Recipiente + suelo seco (g)	26.77	22.65	26.08	23.49
Peso del agua (g)	7.57	5.43	5.87	5.43
Peso suelo seco (g)	14.69	10.75	12.06	11.35
Humedad (%)	51.5	50.5	48.7	47.8
Límite líquido (%)	49.1			





LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 5				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	23	29	35
Peso del recipiente (g)	12.35	14.74	14.25	11.23
Recipiente + suelo húmedo (g)	31.13	29.01	30.38	29.35
Recipiente + suelo seco (g)	24.63	24.34	25.32	23.87
Peso del agua (g)	6.50	4.67	5.06	5.48
Peso suelo seco (g)	12.28	9.60	11.07	12.64
Humedad (%)	52.9	48.6	45.7	43.4
Límite líquido (%)	47.7			

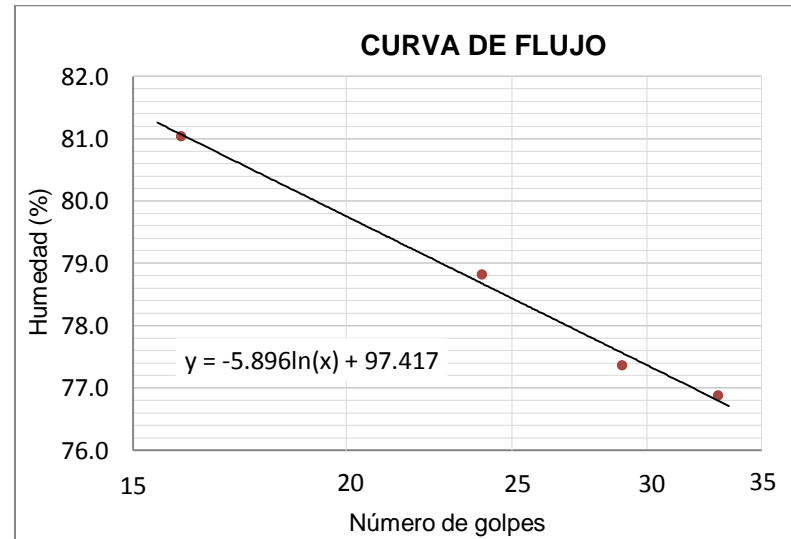
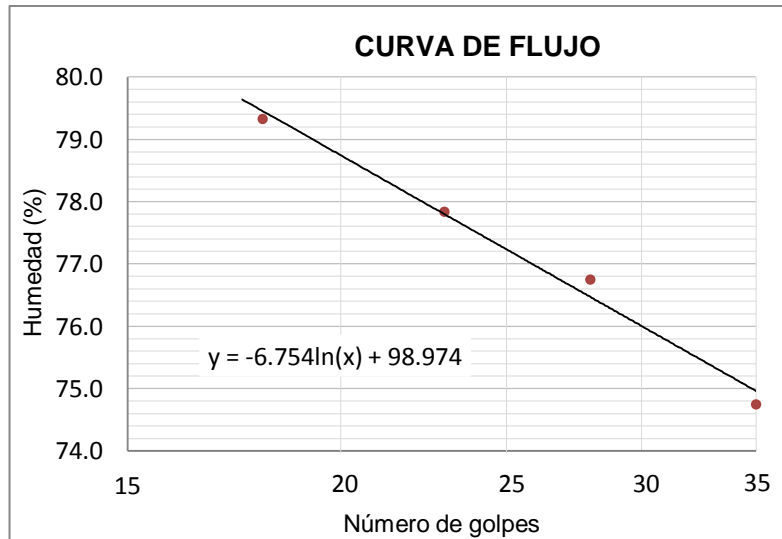


### A.3 Ranurador plano - Suelo 3

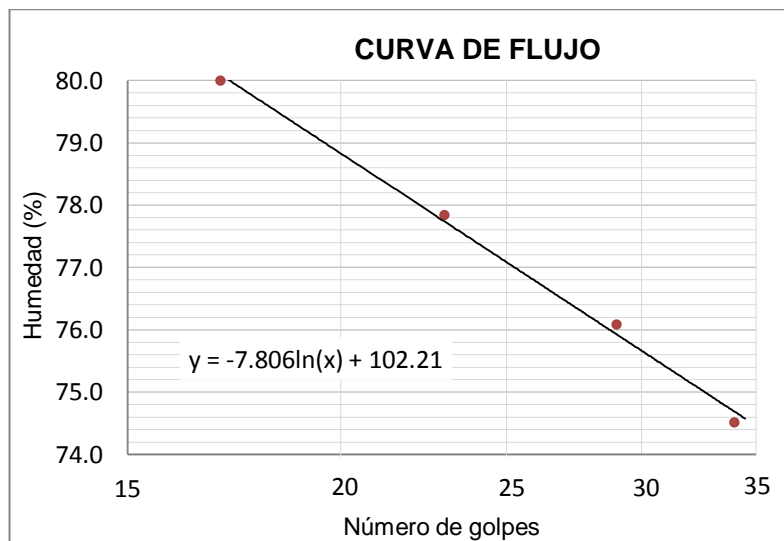
Con Agua desionizada:

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	18	23	28	35
Peso del recipiente (g)	12.11	13.83	15.11	14.90
Recipiente + suelo húmedo (g)	31.80	28.52	33.51	34.42
Recipiente + suelo seco (g)	23.09	22.09	25.52	26.07
Peso del agua (g)	8.71	6.43	7.99	8.35
Peso suelo seco (g)	10.98	8.26	10.41	11.17
Humedad (%)	79.3	77.8	76.8	74.8
Límite líquido (%)	77.2			

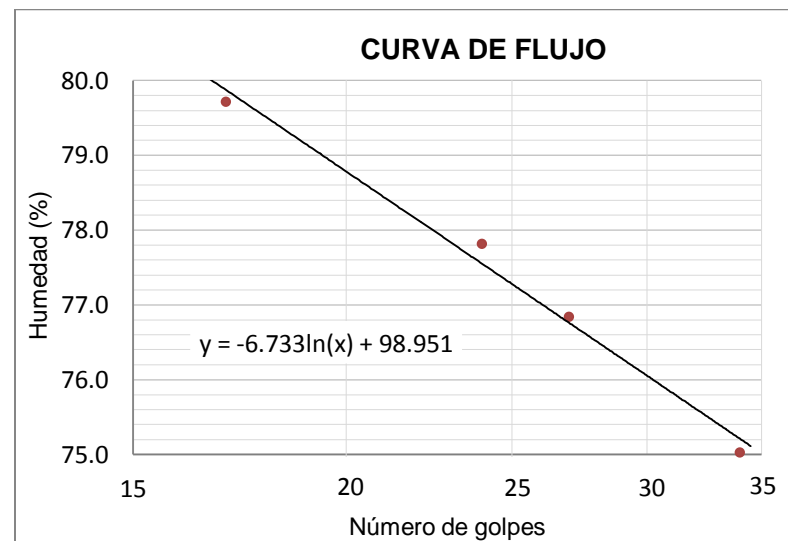
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	24	29	33
Peso del recipiente (g)	13.77	14.13	13.89	15.03
Recipiente + suelo húmedo (g)	32.87	28.99	32.07	32.63
Recipiente + suelo seco (g)	24.32	22.44	24.14	24.98
Peso del agua (g)	8.55	6.55	7.93	7.65
Peso suelo seco (g)	10.55	8.31	10.25	9.95
Humedad (%)	81.0	78.8	77.4	76.9
Límite líquido (%)	78.4			



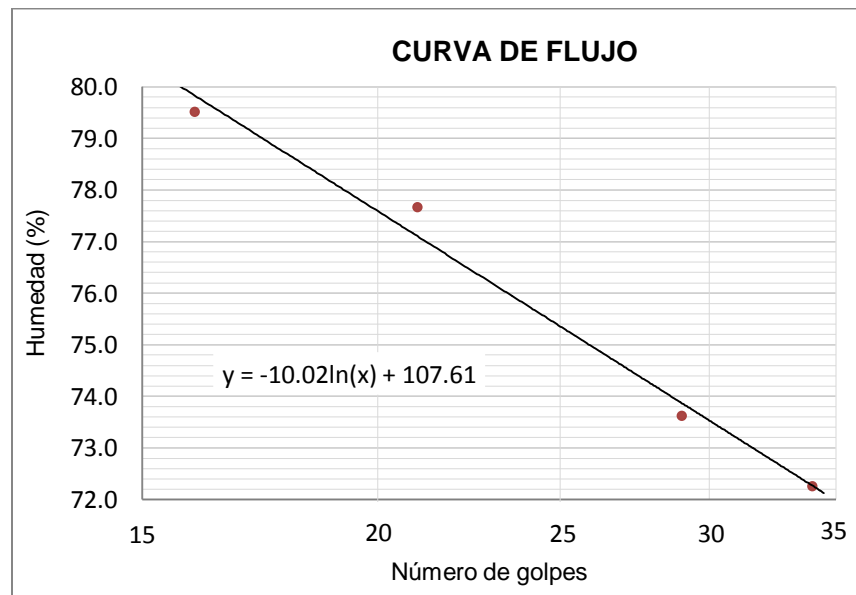
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 3				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	23	29	34
Peso del recipiente (g)	14.52	14.65	12.75	12.26
Recipiente + suelo húmedo (g)	32.16	32.47	32.63	33.08
Recipiente + suelo seco (g)	24.32	24.67	24.04	24.19
Peso del agua (g)	7.84	7.80	8.59	8.89
Peso suelo seco (g)	9.80	10.02	11.29	11.93
Humedad (%)	80.0	77.8	76.1	74.5
Límite líquido (%)	77.1			



LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 4				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	24	27	34
Peso del recipiente (g)	13.92	12.33	11.23	11.99
Recipiente + suelo húmedo (g)	31.82	28.60	27.80	28.32
Recipiente + suelo seco (g)	23.88	21.48	20.60	21.32
Peso del agua (g)	7.94	7.12	7.20	7.00
Peso suelo seco (g)	9.96	9.15	9.37	9.33
Humedad (%)	79.7	77.8	76.8	75.0
Límite líquido (%)	77.3			



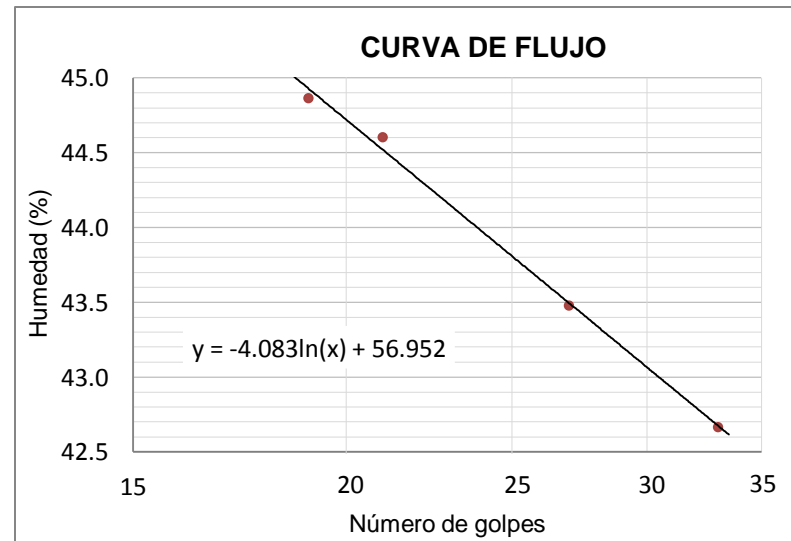
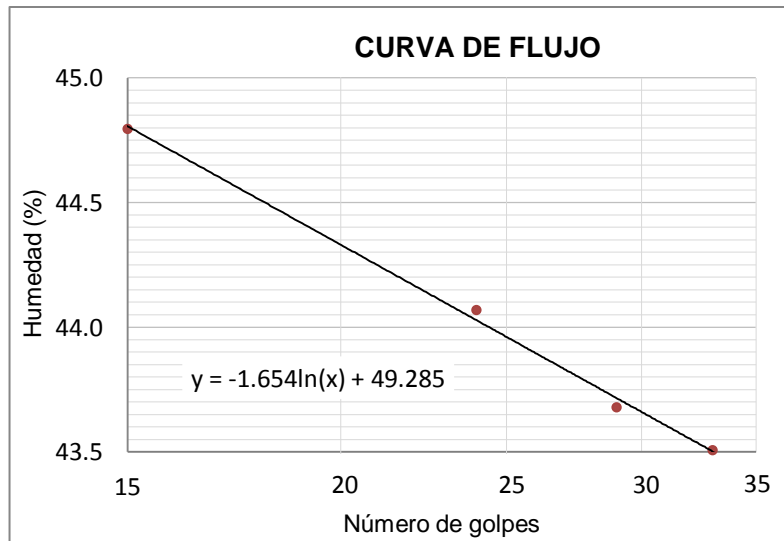
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 5				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	21	29	34
Peso del recipiente (g)	11.44	11.02	11.75	14.91
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.74	28.29	26.56	31.43
Recipiente + suelo seco (g)	20.52	20.74	20.28	24.50
Peso del agua (g)	7.22	7.55	6.28	6.93
Peso suelo seco (g)	9.08	9.72	8.53	9.59
Humedad (%)	79.5	77.7	73.6	72.3
Límite líquido (%)	75.4			



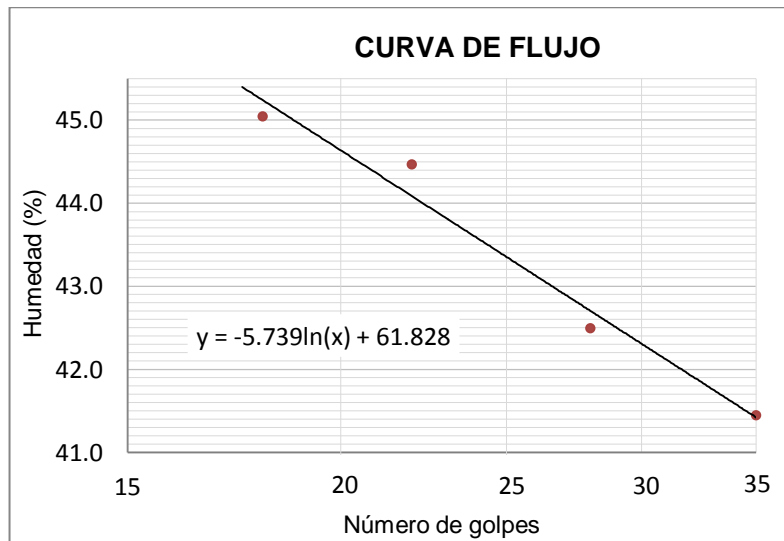
Con Salmuera:

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	24	29	33
Peso del recipiente (g)	12.62	12.32	11.23	11.71
Recipiente + suelo húmedo (g)	28.20	28.96	27.71	28.40
Recipiente + suelo seco (g)	23.38	23.87	22.70	23.34
Peso del agua (g)	4.82	5.09	5.01	5.06
Peso suelo seco (g)	10.76	11.55	11.47	11.63
Humedad (%)	44.8	44.1	43.7	43.5
Límite líquido (%)	44.0			

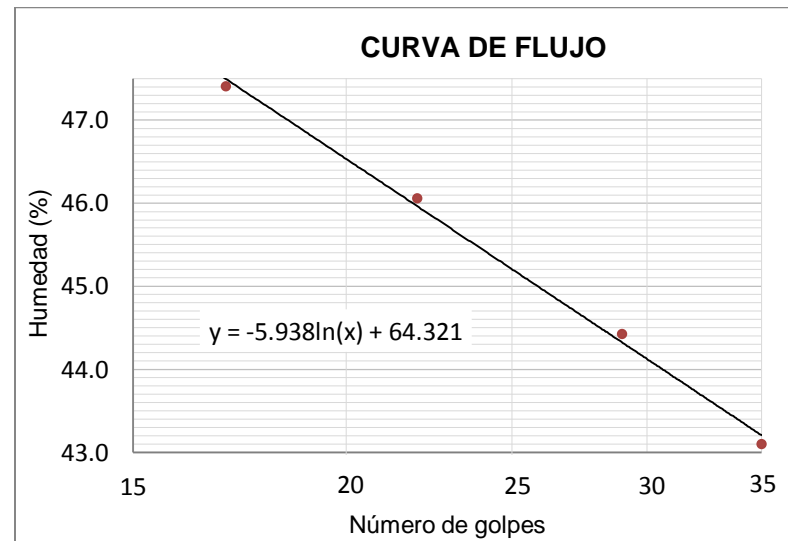
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	19	21	27	33
Peso del recipiente (g)	16.10	14.55	14.94	12.75
Recipiente + suelo húmedo (g)	32.18	29.56	31.01	31.04
Recipiente + suelo seco (g)	27.20	24.93	26.14	25.57
Peso del agua (g)	4.98	4.63	4.87	5.47
Peso suelo seco (g)	11.10	10.38	11.20	12.82
Humedad (%)	44.9	44.6	43.5	42.7
Límite líquido (%)	43.8			



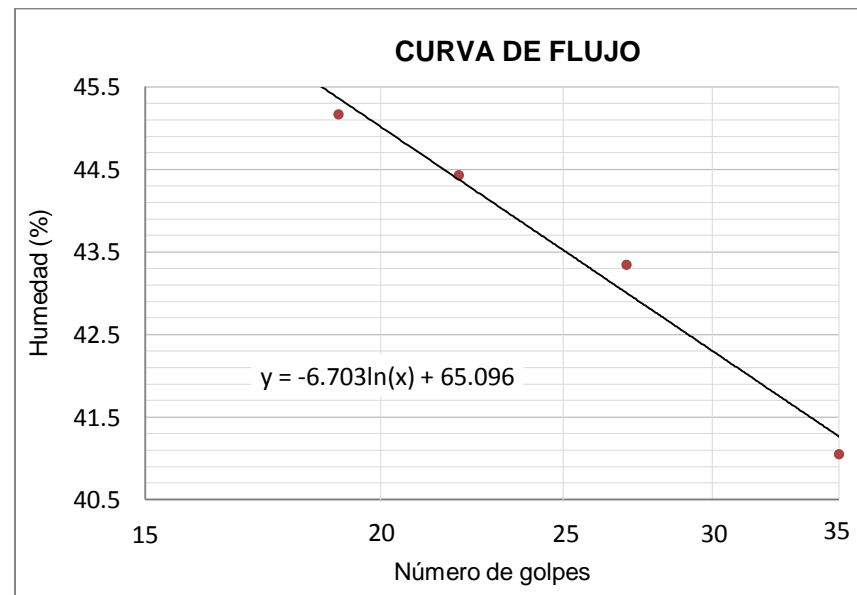
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 3				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	18	22	28	35
Peso del recipiente (g)	12.00	15.18	15.07	12.27
Recipiente + suelo húmedo (g)	26.49	31.10	30.83	30.46
Recipiente + suelo seco (g)	21.99	26.20	26.13	25.13
Peso del agua (g)	4.50	4.90	4.70	5.33
Peso suelo seco (g)	9.99	11.02	11.06	12.86
Humedad (%)	45.0	44.5	42.5	41.4
Límite líquido (%)	43.4			



LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 4				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	22	29	35
Peso del recipiente (g)	11.44	11.22	14.12	15.28
Recipiente + suelo húmedo (g)	28.79	28.28	29.27	33.74
Recipiente + suelo seco (g)	23.21	22.90	24.61	28.18
Peso del agua (g)	5.58	5.38	4.66	5.56
Peso suelo seco (g)	11.77	11.68	10.49	12.90
Humedad (%)	47.4	46.1	44.4	43.1
Límite líquido (%)	45.2			



LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 5				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	19	22	27	35
Peso del recipiente (g)	11.36	14.89	11.86	11.25
Recipiente + suelo húmedo (g)	29.10	31.76	30.18	29.70
Recipiente + suelo seco (g)	23.58	26.57	24.64	24.33
Peso del agua (g)	5.52	5.19	5.54	5.37
Peso suelo seco (g)	12.22	11.68	12.78	13.08
Humedad (%)	45.2	44.4	43.3	41.1
Límite líquido (%)	43.5			

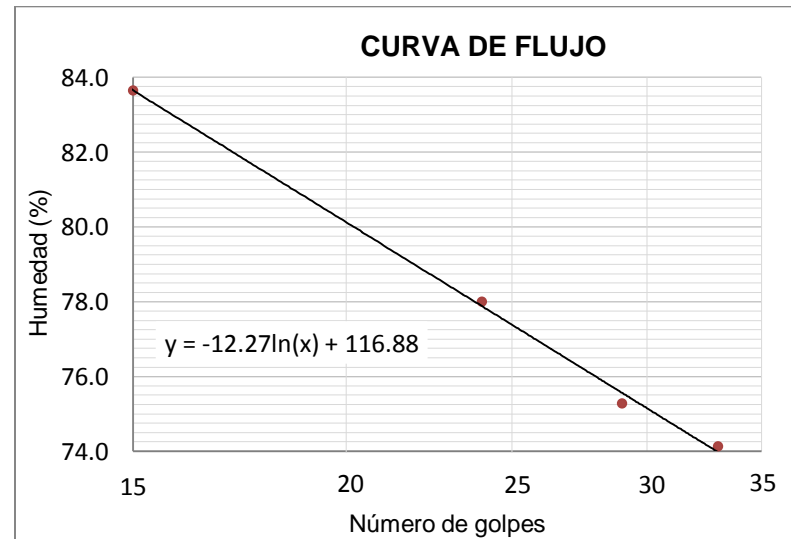
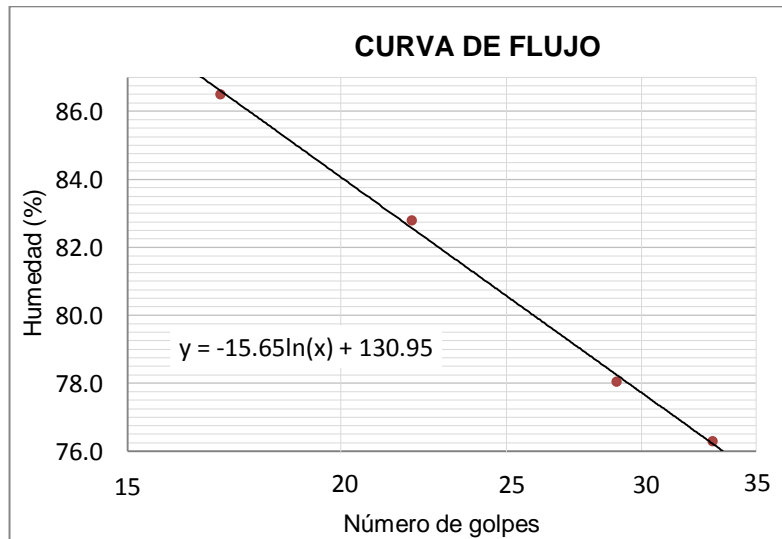


#### A.4 Ranurador plano - Suelo 4

Con Agua desionizada:

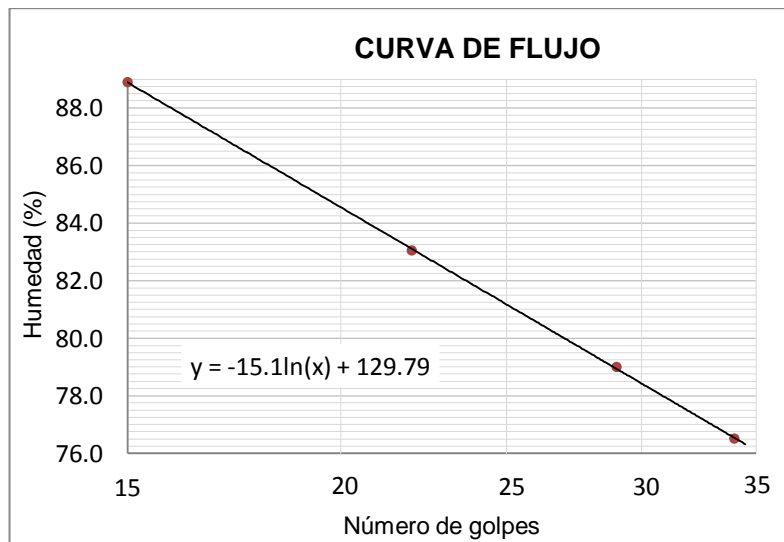
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	22	29	33
Peso del recipiente (g)	12.07	12.39	12.48	11.35
Recipiente + suelo húmedo (g)	24.51	22.59	23.27	22.58
Recipiente + suelo seco (g)	18.74	17.97	18.54	17.72
Peso del agua (g)	5.77	4.62	4.73	4.86
Peso suelo seco (g)	6.67	5.58	6.06	6.37
Humedad (%)	86.5	82.8	78.1	76.3
Límite líquido (%)	80.6			

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	24	29	33
Peso del recipiente (g)	13.96	13.08	11.05	11.85
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.55	26.27	21.62	22.42
Recipiente + suelo seco (g)	21.36	20.49	17.08	17.92
Peso del agua (g)	6.19	5.78	4.54	4.50
Peso suelo seco (g)	7.40	7.41	6.03	6.07
Humedad (%)	83.6	78.0	75.3	74.1
Límite líquido (%)	77.4			

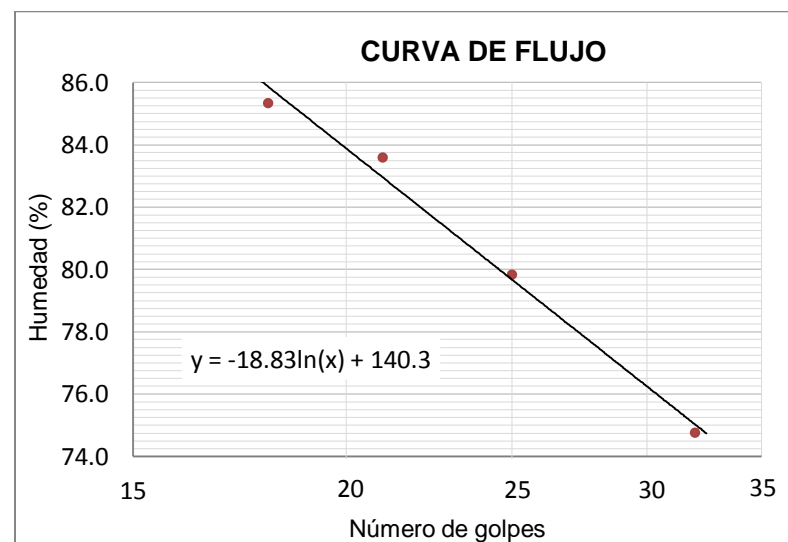




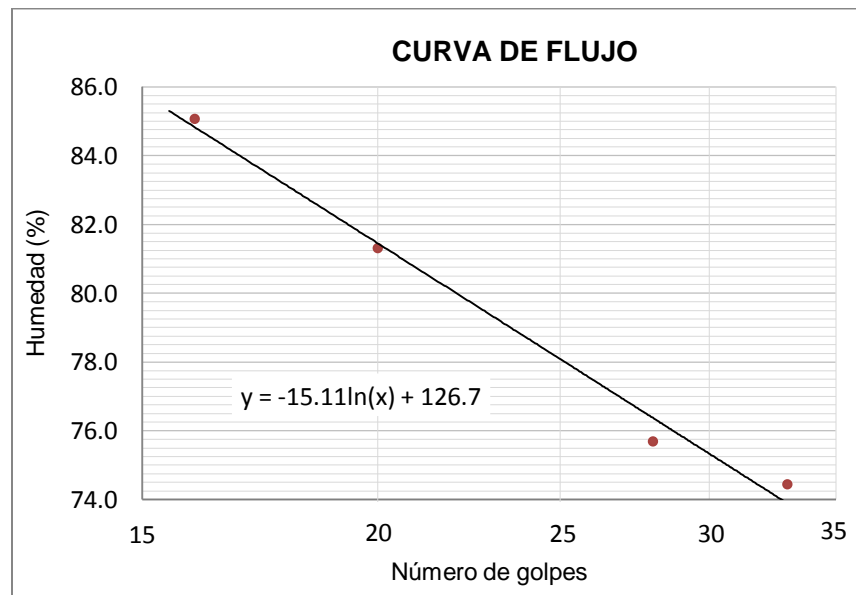
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 3				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	22	29	34
Peso del recipiente (g)	13.65	12.52	14.18	14.00
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.23	22.35	23.47	25.42
Recipiente + suelo seco (g)	19.78	17.89	19.37	20.47
Peso del agua (g)	5.45	4.46	4.10	4.95
Peso suelo seco (g)	6.13	5.37	5.19	6.47
Humedad (%)	88.9	83.1	79.0	76.5
Límite líquido (%)	81.2			



LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 4				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	18	21	25	32
Peso del recipiente (g)	14.31	12.23	14.29	11.20
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.43	24.31	25.80	20.48
Recipiente + suelo seco (g)	20.31	18.81	20.69	16.51
Peso del agua (g)	5.12	5.50	5.11	3.97
Peso suelo seco (g)	6.00	6.58	6.40	5.31
Humedad (%)	85.3	83.6	79.8	74.8
Límite líquido (%)	79.7			



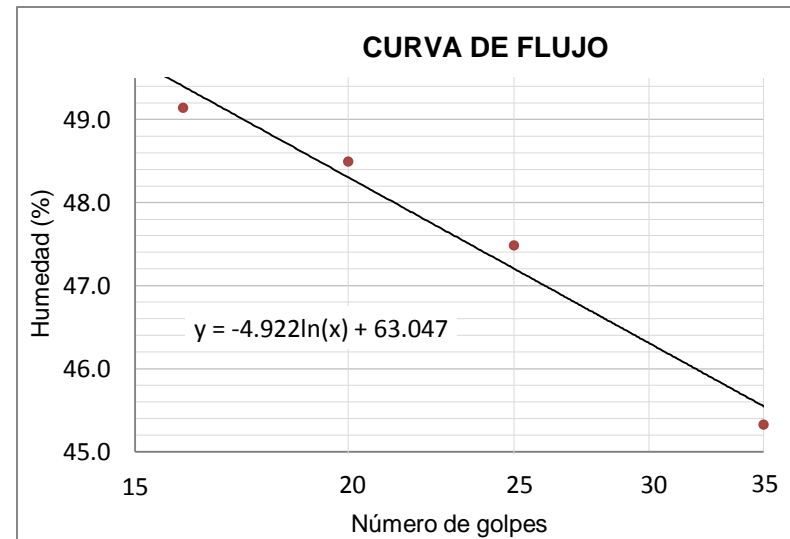
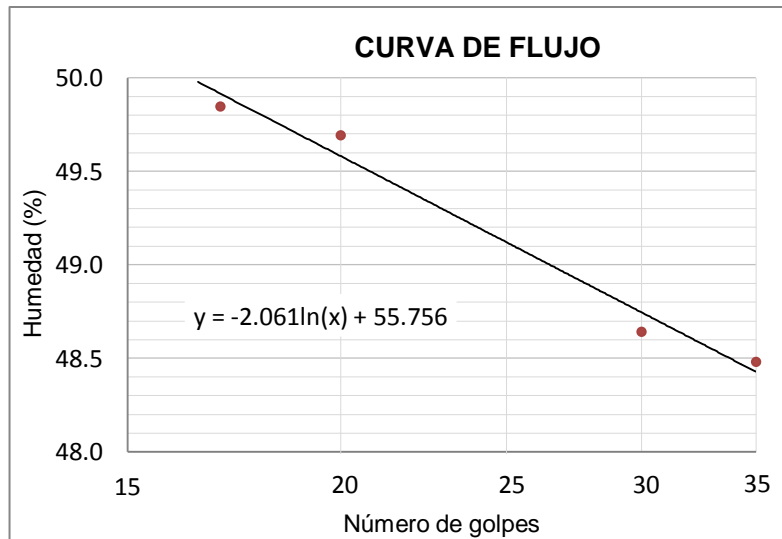
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 5				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	20	28	33
Peso del recipiente (g)	15.04	11.23	12.83	12.54
Recipiente + suelo húmedo (g)	28.18	19.48	24.25	26.13
Recipiente + suelo seco (g)	22.14	15.78	19.33	20.33
Peso del agua (g)	6.04	3.70	4.92	5.80
Peso suelo seco (g)	7.10	4.55	6.50	7.79
Humedad (%)	85.1	81.3	75.7	74.5
Límite líquido (%)	78.1			



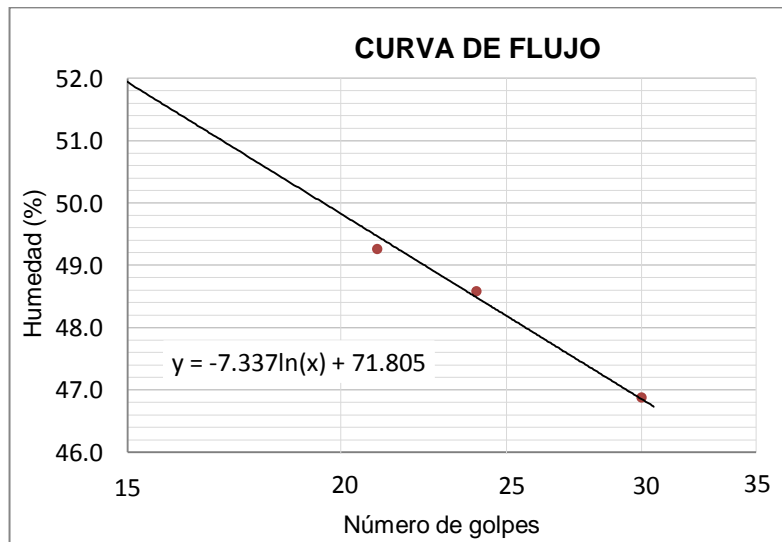
Con Salmuera:

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	20	30	35
Peso del recipiente (g)	13.67	11.59	11.36	15.65
Recipiente + suelo húmedo (g)	23.68	21.35	21.23	27.87
Recipiente + suelo seco (g)	20.35	18.11	18.00	23.88
Peso del agua (g)	3.33	3.24	3.23	3.99
Peso suelo seco (g)	6.68	6.52	6.64	8.23
Humedad (%)	49.9	49.7	48.6	48.5
Límite líquido (%)	49.1			

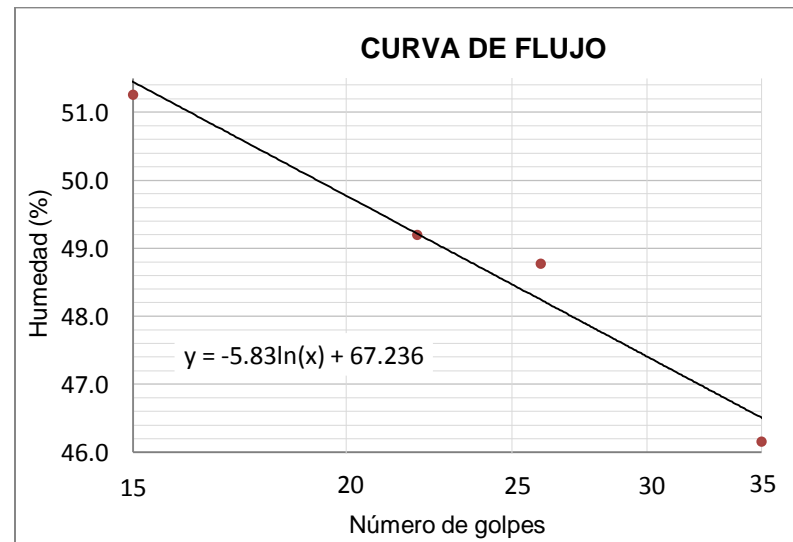
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	20	25	35
Peso del recipiente (g)	11.79	14.04	11.21	15.48
Recipiente + suelo húmedo (g)	23.96	25.89	24.41	27.47
Recipiente + suelo seco (g)	19.95	22.02	20.16	23.73
Peso del agua (g)	4.01	3.87	4.25	3.74
Peso suelo seco (g)	8.16	7.98	8.95	8.25
Humedad (%)	49.1	48.5	47.5	45.3
Límite líquido (%)	47.2			



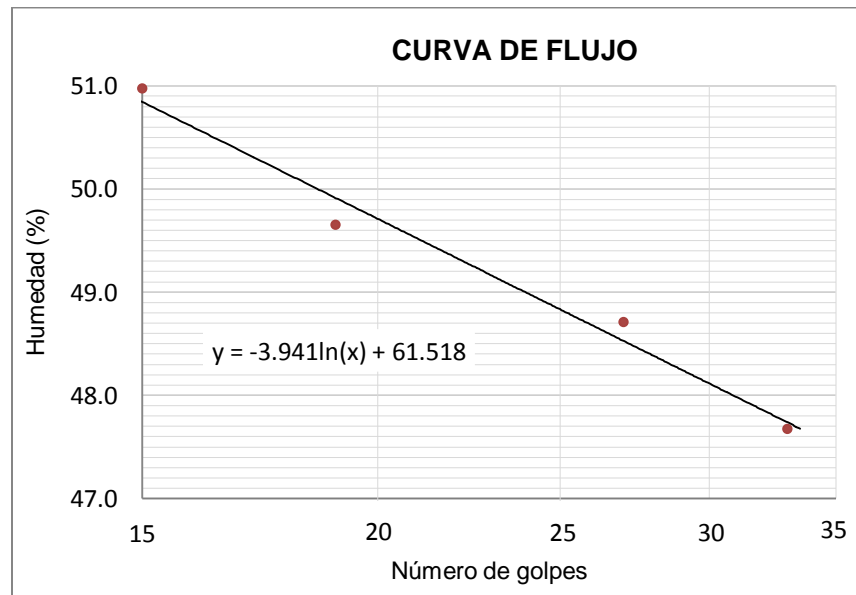
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 3				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	21	24	30
Peso del recipiente (g)	13.32	14.74	11.38	14.33
Recipiente + suelo húmedo (g)	23.55	24.95	21.90	25.86
Recipiente + suelo seco (g)	20.05	21.58	18.46	22.18
Peso del agua (g)	3.50	3.37	3.44	3.68
Peso suelo seco (g)	6.73	6.84	7.08	7.85
Humedad (%)	52.0	49.3	48.6	46.9
Límite líquido (%)	48.2			



LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 4				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	22	26	35
Peso del recipiente (g)	15.23	12.23	14.97	13.77
Recipiente + suelo húmedo (g)	24.79	21.60	24.70	23.87
Recipiente + suelo seco (g)	21.55	18.51	21.51	20.68
Peso del agua (g)	3.24	3.09	3.19	3.19
Peso suelo seco (g)	6.32	6.28	6.54	6.91
Humedad (%)	51.3	49.2	48.8	46.2
Límite líquido (%)	48.5			



LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 5				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	19	27	33
Peso del recipiente (g)	12.01	15.61	11.87	10.76
Recipiente + suelo húmedo (g)	22.82	26.58	21.67	21.26
Recipiente + suelo seco (g)	19.17	22.94	18.46	17.87
Peso del agua (g)	3.65	3.64	3.21	3.39
Peso suelo seco (g)	7.16	7.33	6.59	7.11
Humedad (%)	51.0	49.7	48.7	47.7
Límite líquido (%)	48.8			

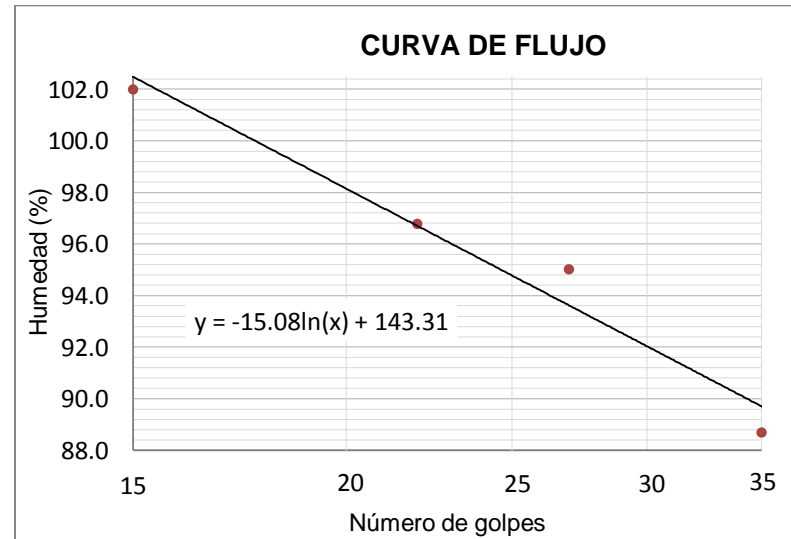
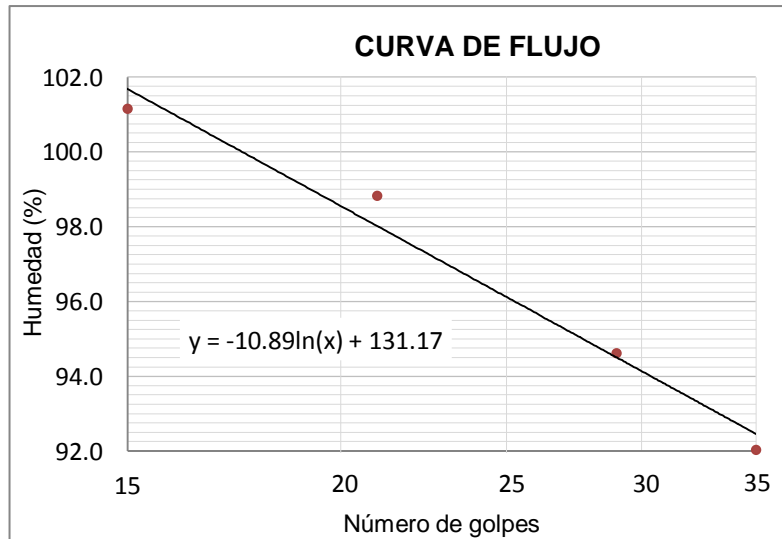


### A.5 Ranurador plano - Suelo 5

Con Agua desionizada:

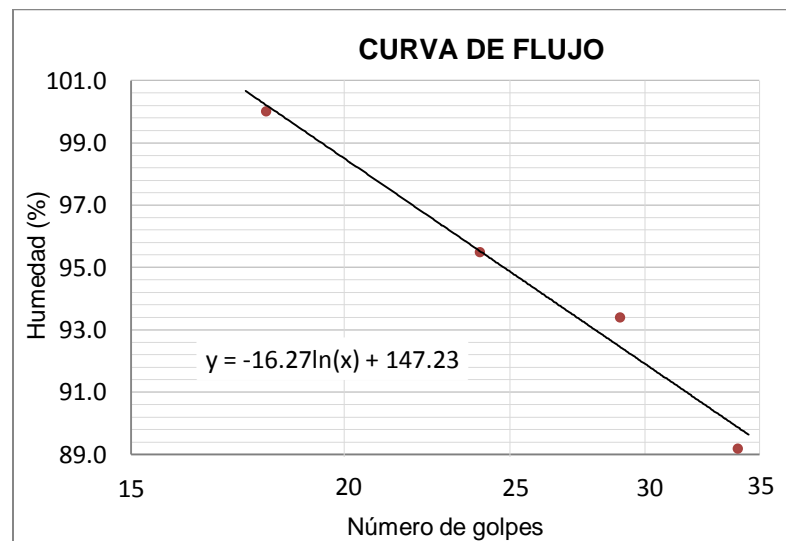
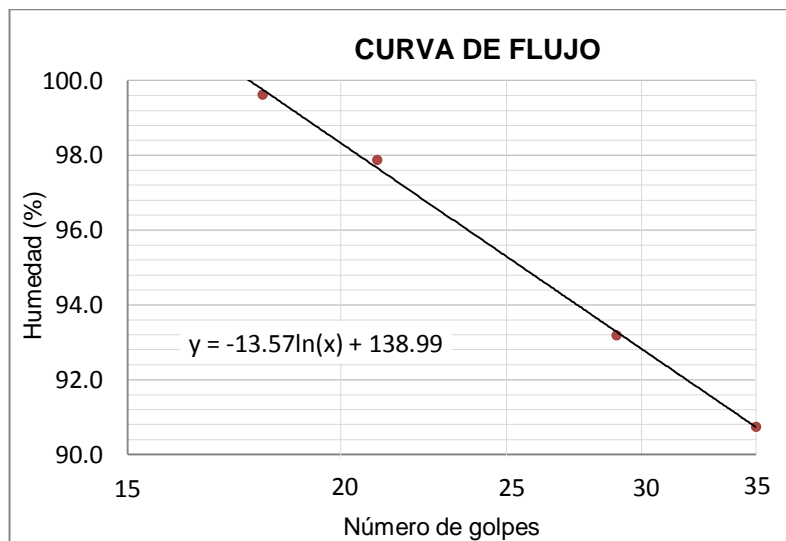
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	21	29	35
Peso del recipiente (g)	12.17	14.97	12.24	12.38
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.74	28.63	25.26	25.17
Recipiente + suelo seco (g)	19.91	21.84	18.93	19.04
Peso del agua (g)	7.83	6.79	6.33	6.13
Peso suelo seco (g)	7.74	6.87	6.69	6.66
Humedad (%)	101.2	98.8	94.6	92.0
Límite líquido (%)	96.1			

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	22	27	35
Peso del recipiente (g)	11.24	11.56	15.04	11.36
Recipiente + suelo húmedo (g)	26.39	25.67	26.82	23.70
Recipiente + suelo seco (g)	18.74	18.73	21.08	17.90
Peso del agua (g)	7.65	6.94	5.74	5.80
Peso suelo seco (g)	7.50	7.17	6.04	6.54
Humedad (%)	102.0	96.8	95.0	88.7
Límite líquido (%)	94.8			

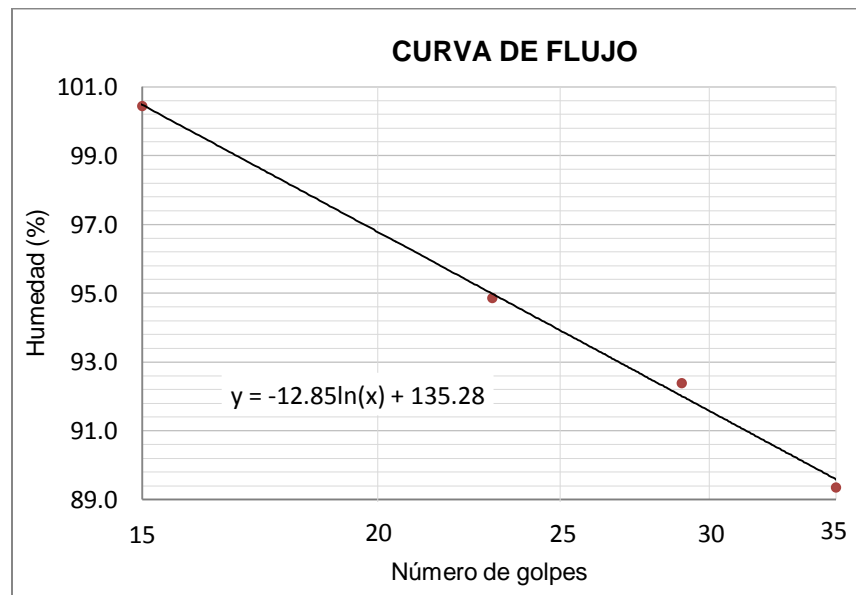


LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 3				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	18	21	29	35
Peso del recipiente (g)	11.79	14.74	16.22	13.80
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.32	25.92	28.99	27.19
Recipiente + suelo seco (g)	19.57	20.39	22.83	20.82
Peso del agua (g)	7.75	5.53	6.16	6.37
Peso suelo seco (g)	7.78	5.65	6.61	7.02
Humedad (%)	99.6	97.9	93.2	90.7
Límite líquido (%)	95.3			

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 4				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	18	24	29	34
Peso del recipiente (g)	11.74	15.58	14.98	14.93
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.82	28.15	30.49	29.27
Recipiente + suelo seco (g)	18.78	22.01	23.00	22.51
Peso del agua (g)	7.04	6.14	7.49	6.76
Peso suelo seco (g)	7.04	6.43	8.02	7.58
Humedad (%)	100.0	95.5	93.4	89.2
Límite líquido (%)	94.9			



LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 5				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	23	29	35
Peso del recipiente (g)	12.54	12.23	13.10	12.17
Recipiente + suelo húmedo (g)	30.22	26.67	28.28	24.44
Recipiente + suelo seco (g)	21.36	19.64	20.99	18.65
Peso del agua (g)	8.86	7.03	7.29	5.79
Peso suelo seco (g)	8.82	7.41	7.89	6.48
Humedad (%)	100.5	94.9	92.4	89.4
Límite líquido (%)	93.9			

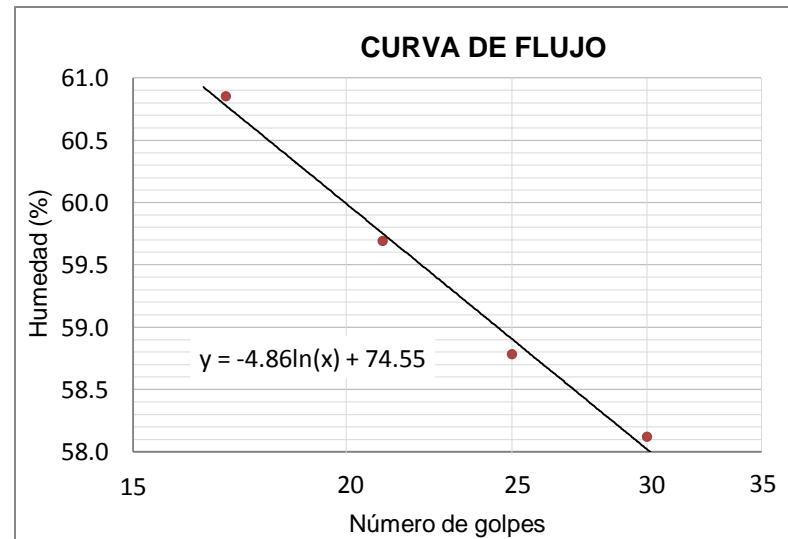
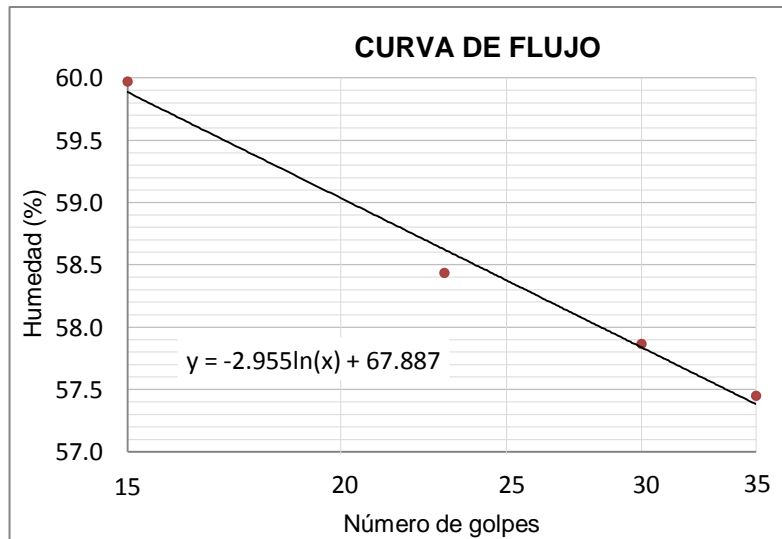




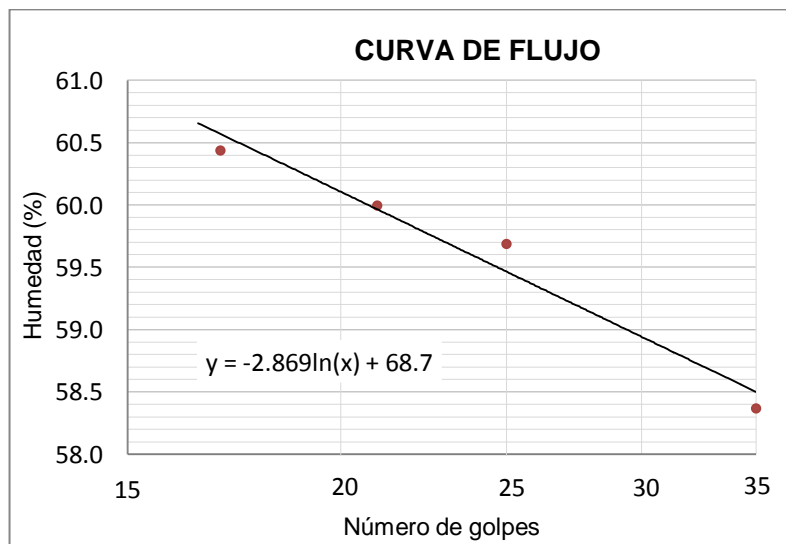
Con Salmuera:

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	23	30	35
Peso del recipiente (g)	13.78	10.77	16.26	12.02
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.17	21.1	25.89	23.01
Recipiente + suelo seco (g)	20.90	17.29	22.36	19.00
Peso del agua (g)	4.27	3.81	3.53	4.01
Peso suelo seco (g)	7.12	6.52	6.10	6.98
Humedad (%)	60.0	58.4	57.9	57.4
Límite líquido (%)	58.4			

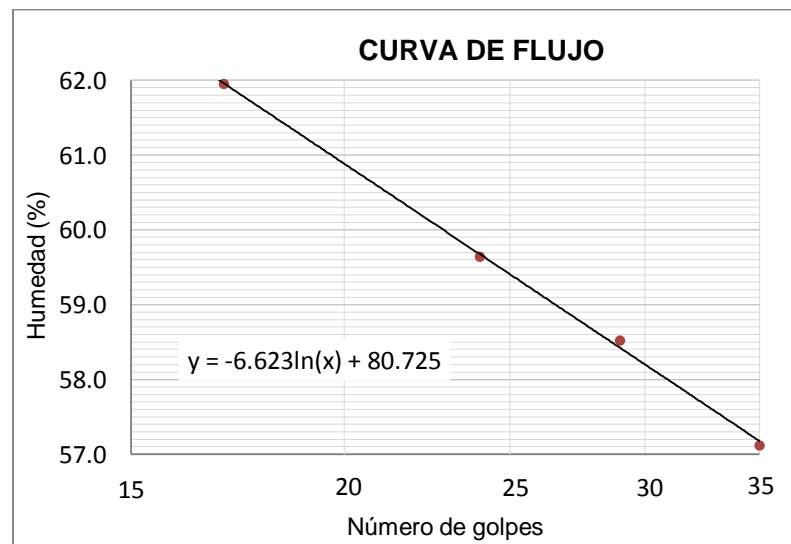
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	21	25	30
Peso del recipiente (g)	14.35	15.58	12.24	13.14
Recipiente + suelo húmedo (g)	24.50	25.96	22.45	23.75
Recipiente + suelo seco (g)	20.66	22.08	18.67	19.85
Peso del agua (g)	3.84	3.88	3.78	3.90
Peso suelo seco (g)	6.31	6.50	6.43	6.71
Humedad (%)	60.9	59.7	58.8	58.1
Límite líquido (%)	58.9			



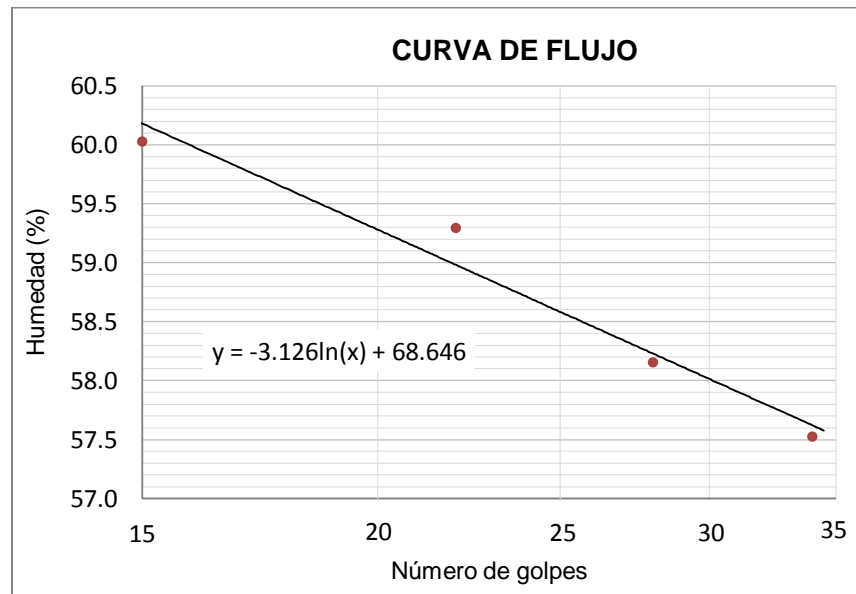
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 3				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	21	25	35
Peso del recipiente (g)	11.36	14.27	13.31	15.63
Recipiente + suelo húmedo (g)	22.27	24.67	24.68	26.89
Recipiente + suelo seco (g)	18.16	20.77	20.43	22.74
Peso del agua (g)	4.11	3.90	4.25	4.15
Peso suelo seco (g)	6.80	6.50	7.12	7.11
Humedad (%)	60.4	60.0	59.7	58.4
Límite líquido (%)	59.5			



LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 4				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	24	29	35
Peso del recipiente (g)	10.79	12.34	15.02	15.21
Recipiente + suelo húmedo (g)	20.41	23.02	27.02	25.80
Recipiente + suelo seco (g)	16.73	19.03	22.59	21.95
Peso del agua (g)	3.68	3.99	4.43	3.85
Peso suelo seco (g)	5.94	6.69	7.57	6.74
Humedad (%)	62.0	59.6	58.5	57.1
Límite líquido (%)	59.4			



LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 5				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	22	28	34
Peso del recipiente (g)	13.15	12.07	12.20	13.12
Recipiente + suelo húmedo (g)	24.16	22.52	22.67	25.36
Recipiente + suelo seco (g)	20.03	18.63	18.82	20.89
Peso del agua (g)	4.13	3.89	3.85	4.47
Peso suelo seco (g)	6.88	6.56	6.62	7.77
Humedad (%)	60.0	59.3	58.2	57.5
Límite líquido (%)	58.6			

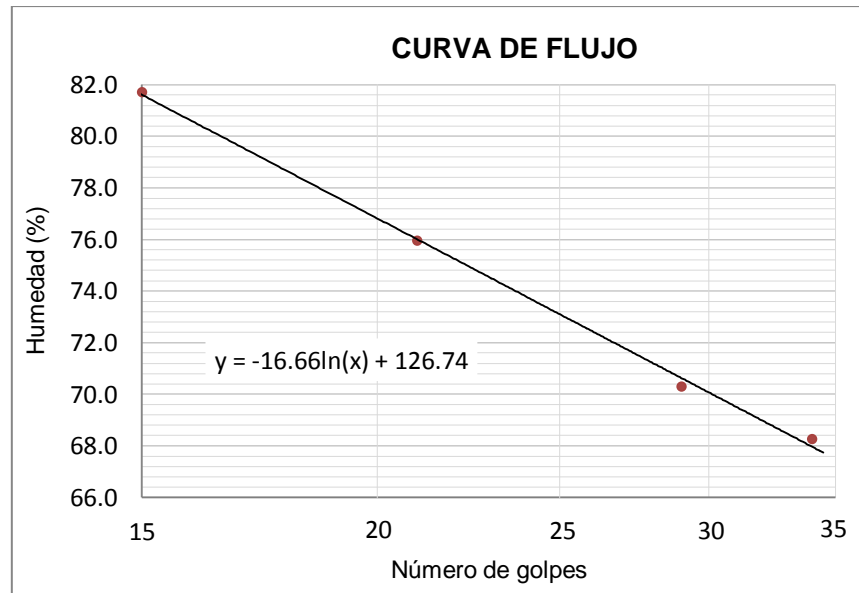


## Anexo B. Resultados límite líquido, copa de Casagrande-Ranurador curvo

### B.1 Ranurador curvo - Suelo 1

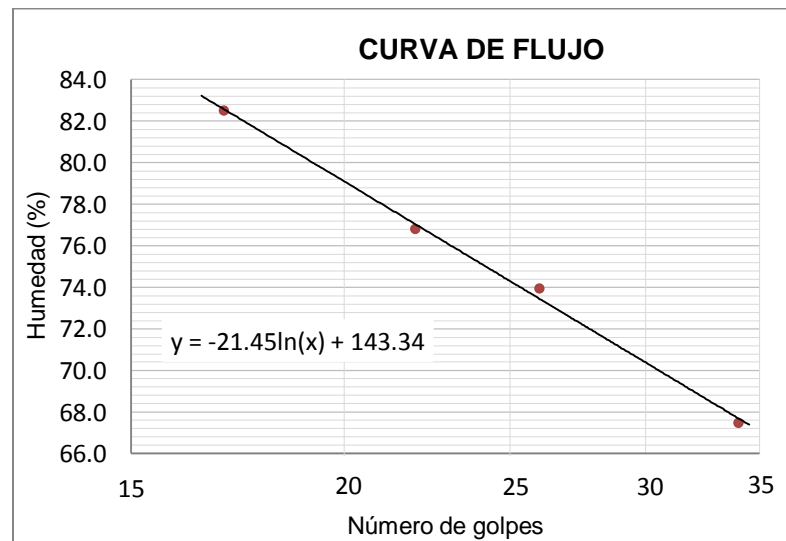
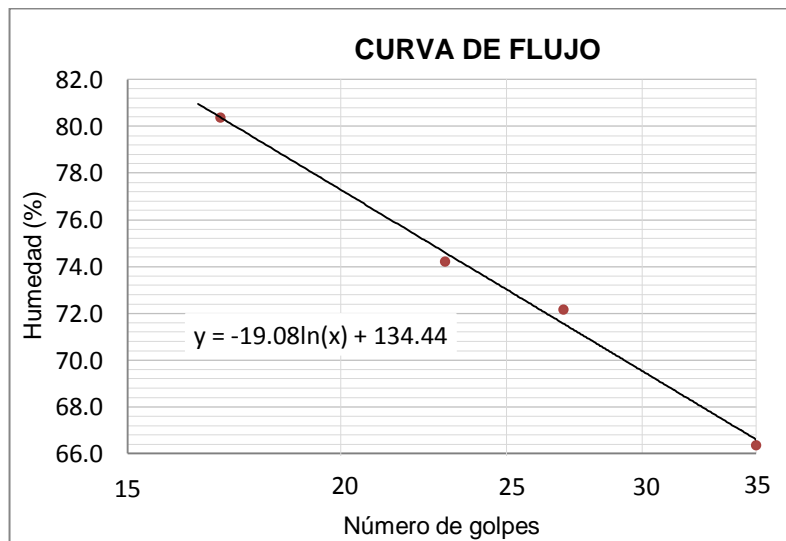
Con Agua desionizada:

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	21	29	34
Peso del recipiente (g)	14.98	11.79	11.58	12.64
Recipiente + suelo húmedo (g)	31.17	26.87	27.06	25.26
Recipiente + suelo seco (g)	23.89	20.36	20.67	20.14
Peso del agua (g)	7.28	6.51	6.39	5.12
Peso suelo seco (g)	8.91	8.57	9.09	7.50
Humedad (%)	81.7	76.0	70.3	68.3
Límite líquido (%)	73.1			



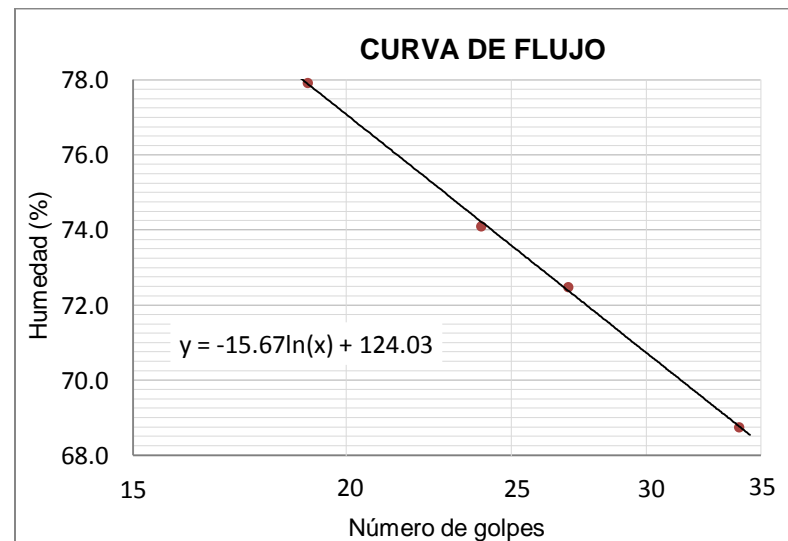
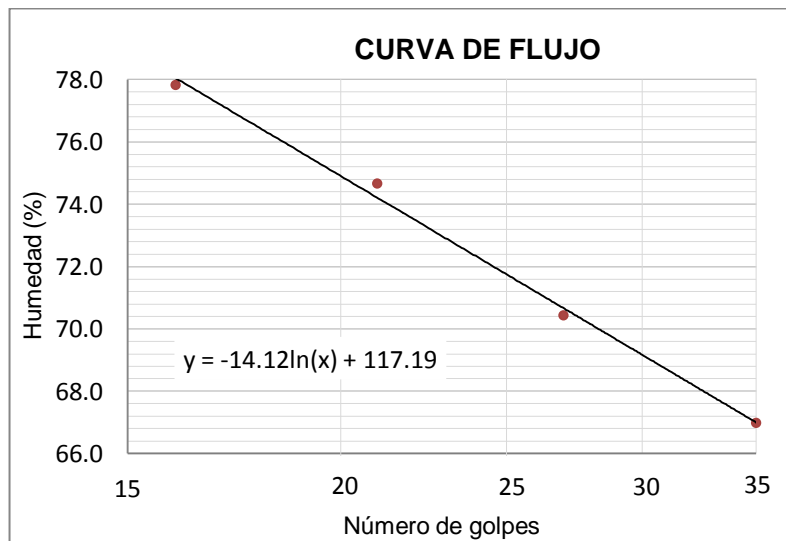
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	23	27	35
Peso del recipiente (g)	11.57	14.97	12.02	12.64
Recipiente + suelo húmedo (g)	31.16	32.67	27.24	31.24
Recipiente + suelo seco (g)	22.43	25.13	20.86	23.82
Peso del agua (g)	8.73	7.54	6.38	7.42
Peso suelo seco (g)	10.86	10.16	8.84	11.18
Humedad (%)	80.4	74.2	72.2	66.4
Límite líquido (%)	73.0			

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 3				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	22	26	34
Peso del recipiente (g)	12.89	14.81	12.07	12.30
Recipiente + suelo húmedo (g)	26.67	28.16	26.77	29.50
Recipiente + suelo seco (g)	20.44	22.36	20.52	22.57
Peso del agua (g)	6.23	5.80	6.25	6.93
Peso suelo seco (g)	7.55	7.55	8.45	10.27
Humedad (%)	82.5	76.8	74.0	67.5
Límite líquido (%)	74.3			



LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 4				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	21	27	35
Peso del recipiente (g)	12.07	11.16	11.15	12.08
Recipiente + suelo húmedo (g)	29.87	27.16	29.54	27.66
Recipiente + suelo seco (g)	22.08	20.32	21.94	21.41
Peso del agua (g)	7.79	6.84	7.60	6.25
Peso suelo seco (g)	10.01	9.16	10.79	9.33
Humedad (%)	77.8	74.7	70.4	67.0
Límite líquido (%)	71.7			

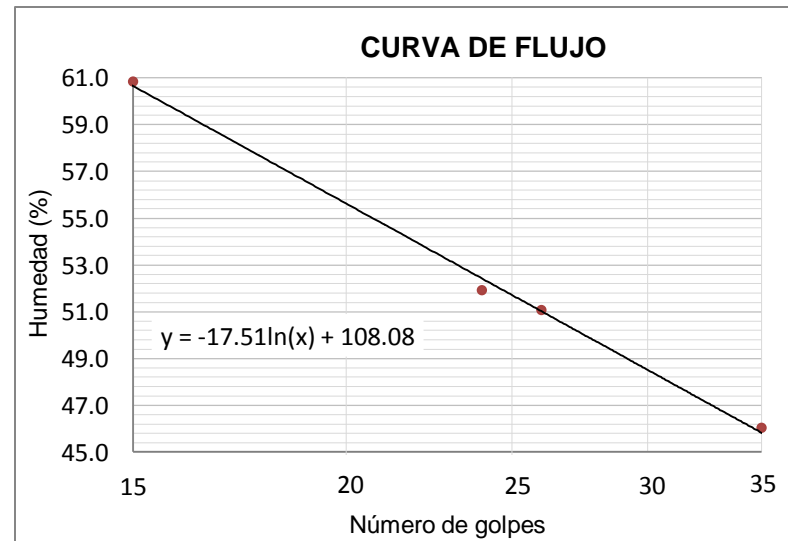
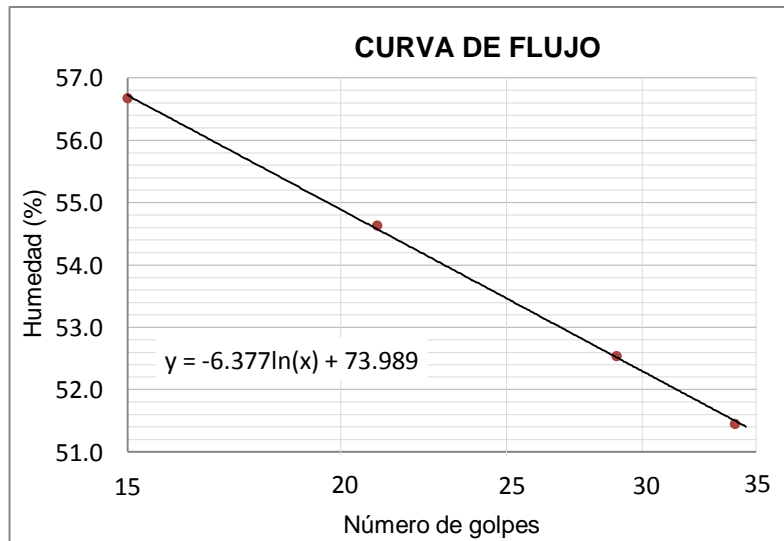
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 5				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	19	24	27	34
Peso del recipiente (g)	14.97	12.02	12.63	11.57
Recipiente + suelo húmedo (g)	33.74	29.03	31.81	30.47
Recipiente + suelo seco (g)	25.52	21.79	23.75	22.77
Peso del agua (g)	8.22	7.24	8.06	7.70
Peso suelo seco (g)	10.55	9.77	11.12	11.20
Humedad (%)	77.9	74.1	72.5	68.8
Límite líquido (%)	73.6			



Con Salmuera:

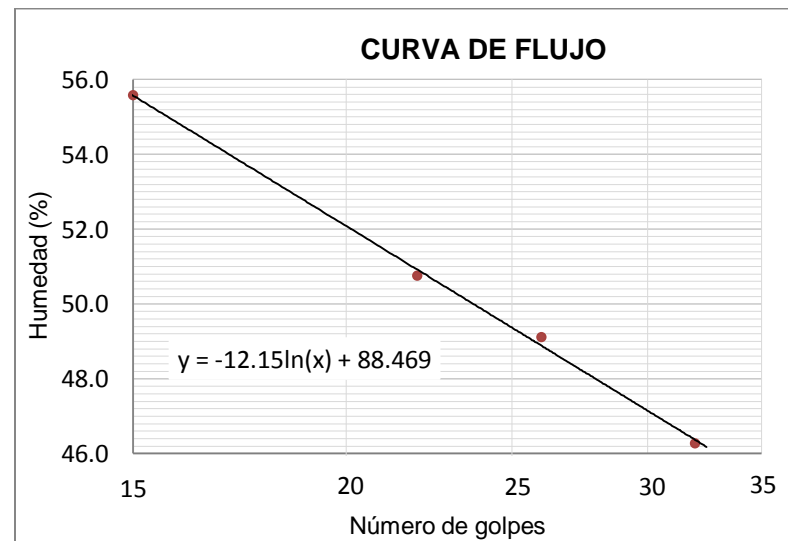
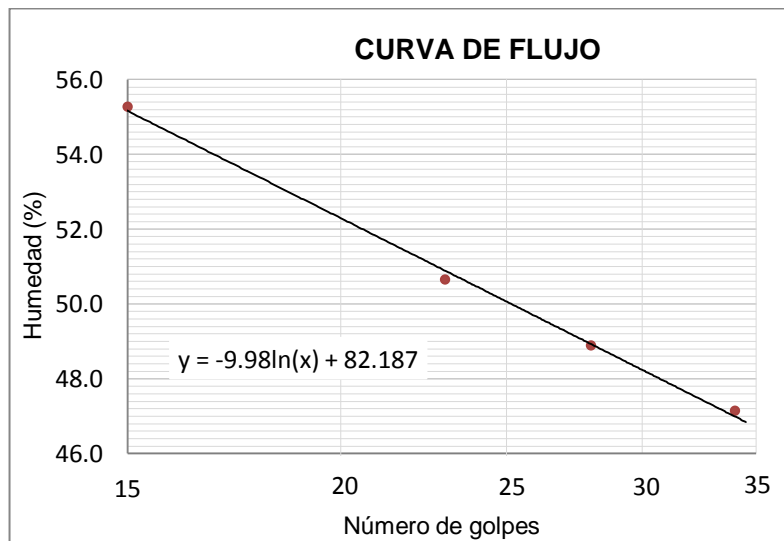
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	21	29	34
Peso del recipiente (g)	11.88	12.65	15.05	13.75
Recipiente + suelo húmedo (g)	28.3	29.66	32.15	32.47
Recipiente + suelo seco (g)	22.36	23.65	26.26	26.11
Peso del agua (g)	5.94	6.01	5.89	6.36
Peso suelo seco (g)	10.48	11.00	11.21	12.36
Humedad (%)	56.7	54.6	52.5	51.5
Límite líquido (%)	53.5			

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	24	26	35
Peso del recipiente (g)	13.81	11.94	14.80	15.34
Recipiente + suelo húmedo (g)	30.25	28.12	31.54	31.10
Recipiente + suelo seco (g)	24.03	22.59	25.88	26.13
Peso del agua (g)	6.22	5.53	5.66	4.97
Peso suelo seco (g)	10.22	10.65	11.08	10.79
Humedad (%)	60.9	51.9	51.1	46.1
Límite líquido (%)	51.7			



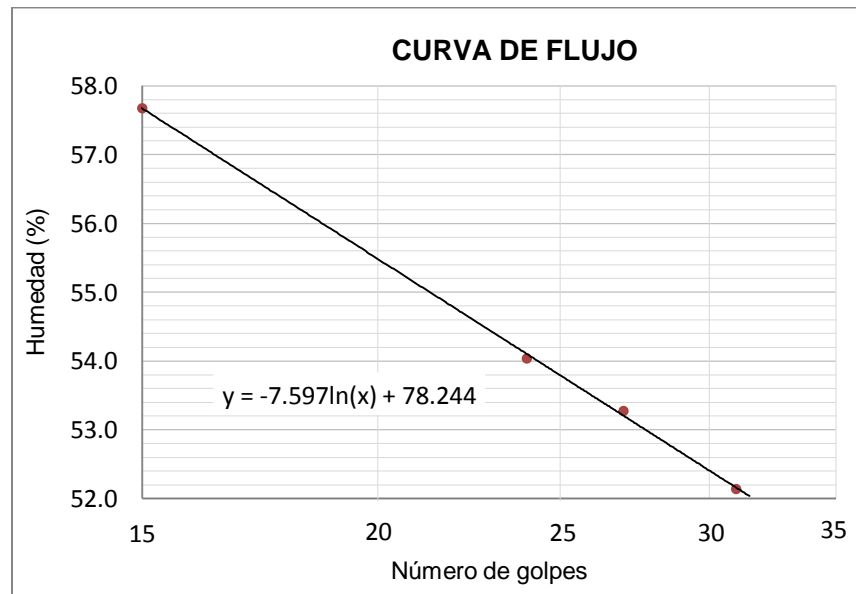
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 3				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	23	28	34
Peso del recipiente (g)	11.94	13.65	11.16	13.64
Recipiente + suelo húmedo (g)	30.17	34.08	28.61	32.46
Recipiente + suelo seco (g)	23.68	27.21	22.88	26.43
Peso del agua (g)	6.49	6.87	5.73	6.03
Peso suelo seco (g)	11.74	13.56	11.72	12.79
Humedad (%)	55.3	50.7	48.9	47.1
Límite líquido (%)	50.1			

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 4				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	22	26	32
Peso del recipiente (g)	11.53	24.03	14.96	14.77
Recipiente + suelo húmedo (g)	31.32	44.61	32.87	30.86
Recipiente + suelo seco (g)	24.25	37.68	26.97	25.77
Peso del agua (g)	7.07	6.93	5.90	5.09
Peso suelo seco (g)	12.72	13.65	12.01	11.00
Humedad (%)	55.6	50.8	49.1	46.3
Límite líquido (%)	49.4			





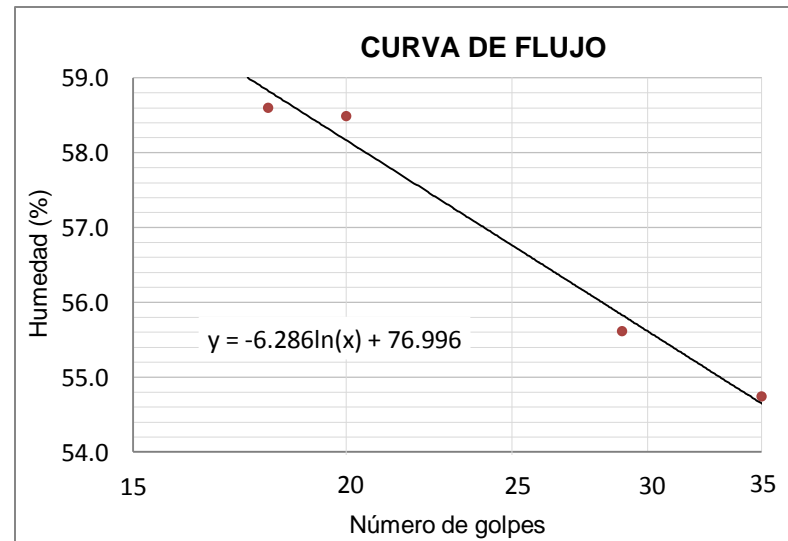
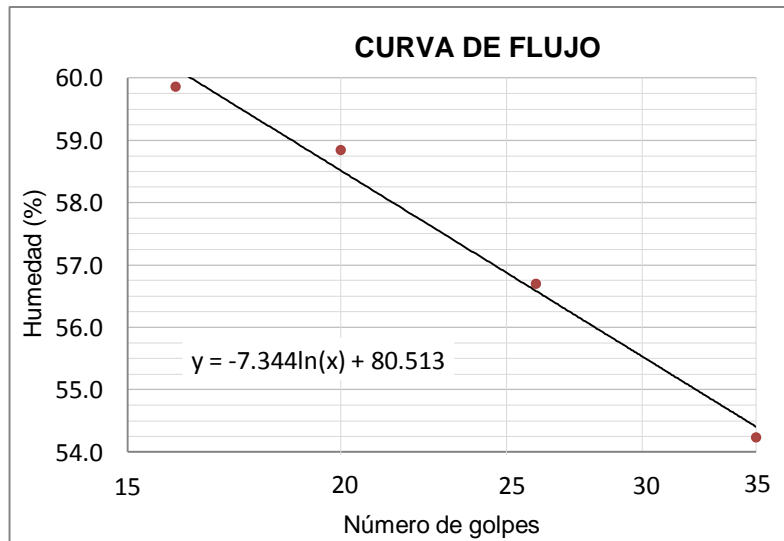
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 5				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	24	27	31
Peso del recipiente (g)	10.41	12.03	10.39	11.54
Recipiente + suelo húmedo (g)	30.12	28.99	27.25	30.01
Recipiente + suelo seco (g)	22.91	23.04	21.39	23.68
Peso del agua (g)	7.21	5.95	5.86	6.33
Peso suelo seco (g)	12.50	11.01	11.00	12.14
Humedad (%)	57.7	54.0	53.3	52.1
Límite líquido (%)	53.8			



Con Kerosene:

LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	20	26	35
Peso del recipiente (g)	11.11	15.00	14.69	11.25
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.61	30.17	27.90	26.18
Recipiente + suelo seco (g)	20.18	24.55	23.12	20.93
Peso del agua (g)	5.43	5.62	4.78	5.25
Peso suelo seco (g)	9.07	9.55	8.43	9.68
Humedad (%)	59.9	58.8	56.7	54.2
Límite líquido (%)	56.9			

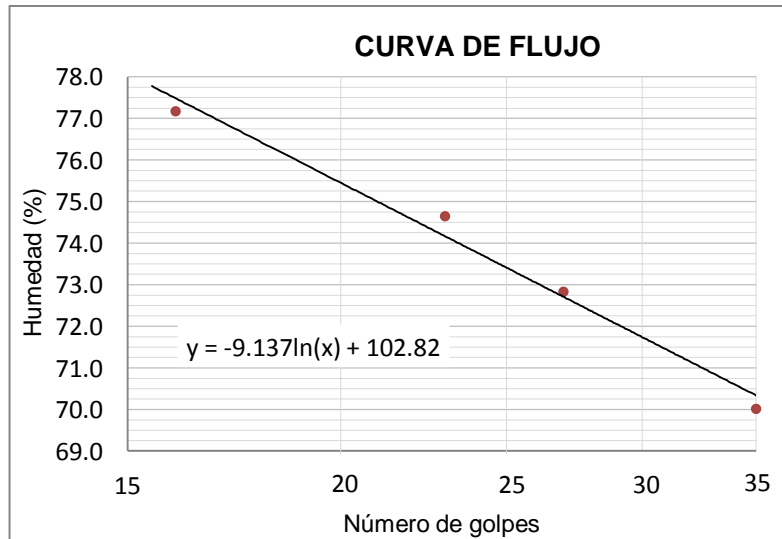
LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	18	20	29	35
Peso del recipiente (g)	14.98	12.01	15.56	13.94
Recipiente + suelo húmedo (g)	28.89	26.56	26.92	27.14
Recipiente + suelo seco (g)	23.75	21.19	22.86	22.47
Peso del agua (g)	5.14	5.37	4.06	4.67
Peso suelo seco (g)	8.77	9.18	7.30	8.53
Humedad (%)	58.6	58.5	55.6	54.7
Límite líquido (%)	56.8			



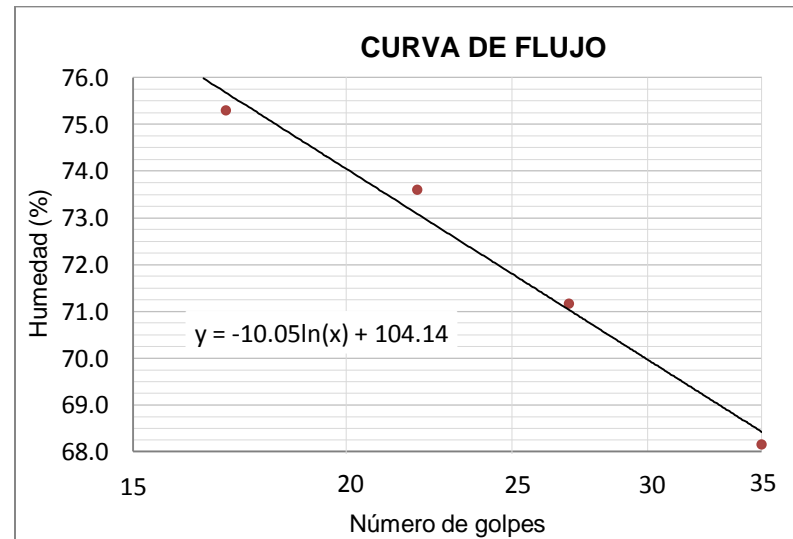
## B.2 Ranurador curvo - Suelo 2

Con Agua desionizada:

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	23	27	35
Peso del recipiente (g)	11.97	12.3	13.26	15.00
Recipiente + suelo húmedo (g)	28.59	27.39	28.85	29.35
Recipiente + suelo seco (g)	21.35	20.94	22.28	23.44
Peso del agua (g)	7.24	6.45	6.57	5.91
Peso suelo seco (g)	9.38	8.64	9.02	8.44
Humedad (%)	77.2	74.7	72.8	70.0
Límite líquido (%)	73.4			

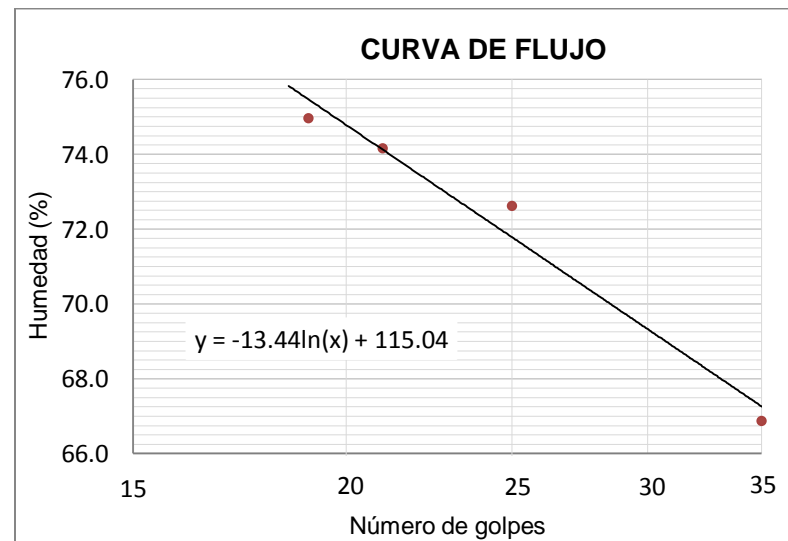
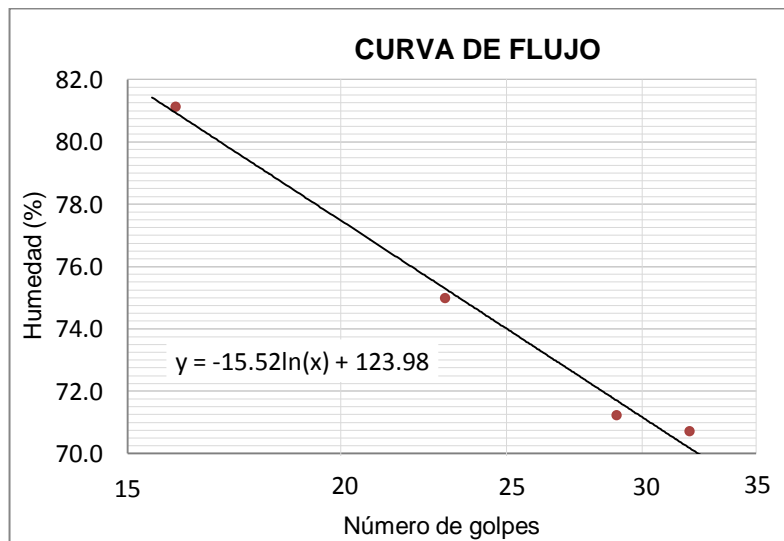


LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	22	27	35
Peso del recipiente (g)	11.38	12.71	14.04	11.02
Recipiente + suelo húmedo (g)	23.30	28.63	28.76	25.75
Recipiente + suelo seco (g)	18.18	21.88	22.64	19.78
Peso del agua (g)	5.12	6.75	6.12	5.97
Peso suelo seco (g)	6.80	9.17	8.60	8.76
Humedad (%)	75.3	73.6	71.2	68.2
Límite líquido (%)	71.8			

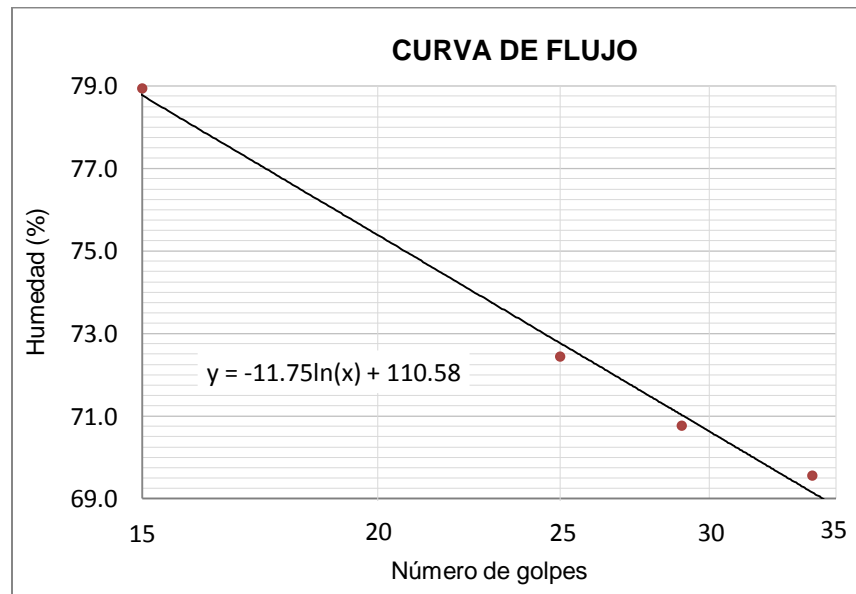


LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 3				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	23	29	32
Peso del recipiente (g)	14.88	13.89	11.69	12.82
Recipiente + suelo húmedo (g)	33.90	30.62	30.80	30.61
Recipiente + suelo seco (g)	25.38	23.45	22.85	23.24
Peso del agua (g)	8.52	7.17	7.95	7.37
Peso suelo seco (g)	10.50	9.56	11.16	10.42
Humedad (%)	81.1	75.0	71.2	70.7
Límite líquido (%)	74.0			

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 4				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	19	21	25	35
Peso del recipiente (g)	12.25	11.21	12.10	14.65
Recipiente + suelo húmedo (g)	31.55	32.51	25.34	33.09
Recipiente + suelo seco (g)	23.28	23.44	19.77	25.70
Peso del agua (g)	8.27	9.07	5.57	7.39
Peso suelo seco (g)	11.03	12.23	7.67	11.05
Humedad (%)	75.0	74.2	72.6	66.9
Límite líquido (%)	71.8			



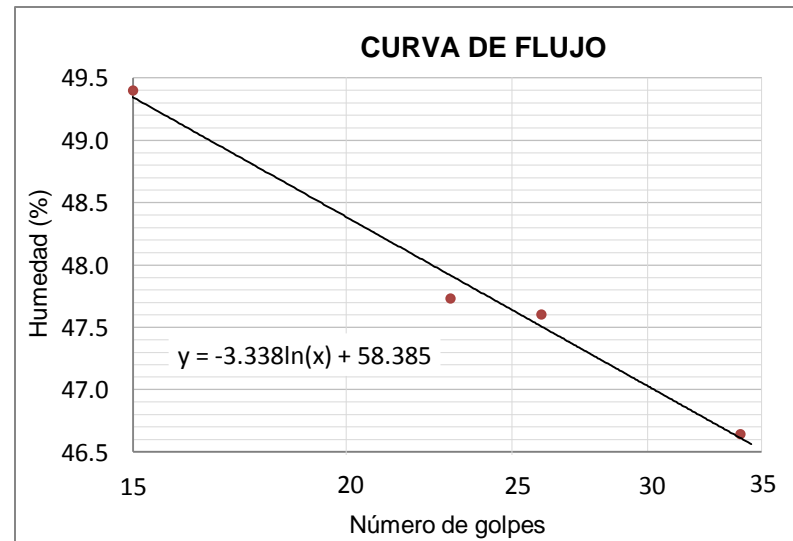
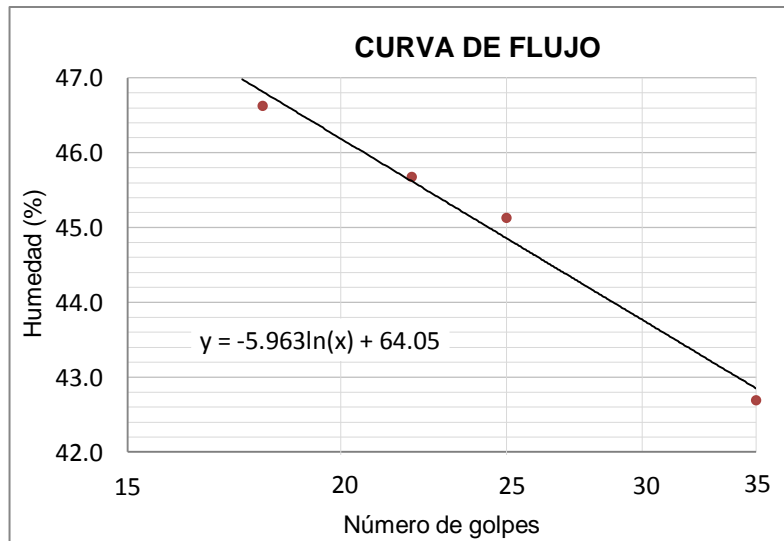
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 5				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	25	29	34
Peso del recipiente (g)	13.13	11.92	12.16	12.09
Recipiente + suelo húmedo (g)	30.63	25.94	25.07	30.47
Recipiente + suelo seco (g)	22.91	20.05	19.72	22.93
Peso del agua (g)	7.72	5.89	5.35	7.54
Peso suelo seco (g)	9.78	8.13	7.56	10.84
Humedad (%)	78.9	72.4	70.8	69.6
Límite líquido (%)	72.8			



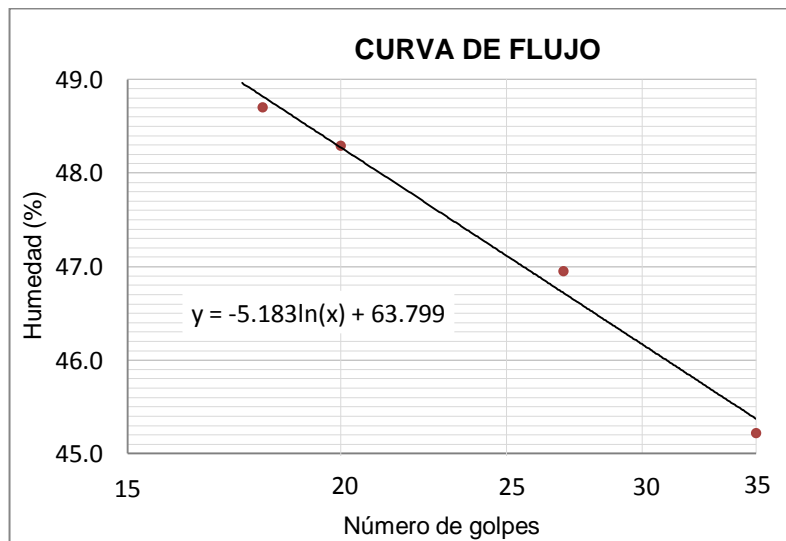
Con Salmuera:

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	18	22	25	35
Peso del recipiente (g)	14.77	13.43	14.23	14.01
Recipiente + suelo húmedo (g)	32.19	26.92	30.92	30.42
Recipiente + suelo seco (g)	26.65	22.69	25.73	25.51
Peso del agua (g)	5.54	4.23	5.19	4.91
Peso suelo seco (g)	11.88	9.26	11.50	11.50
Humedad (%)	46.6	45.7	45.1	42.7
Límite líquido (%)	44.9			

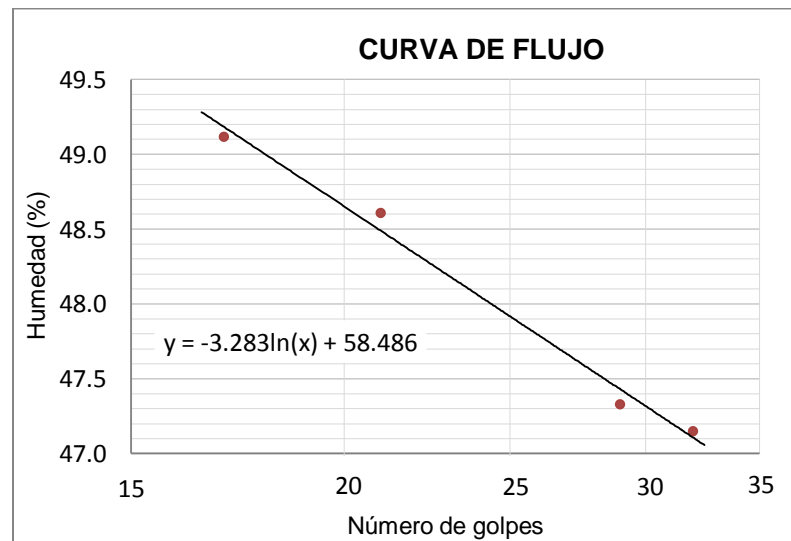
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	23	26	34
Peso del recipiente (g)	4.77	5.31	5.13	4.92
Recipiente + suelo húmedo (g)	20.98	21.93	20.85	22.18
Recipiente + suelo seco (g)	15.62	16.56	15.78	16.69
Peso del agua (g)	5.36	5.37	5.07	5.49
Peso suelo seco (g)	10.85	11.25	10.65	11.77
Humedad (%)	49.4	47.7	47.6	46.6
Límite líquido (%)	47.6			



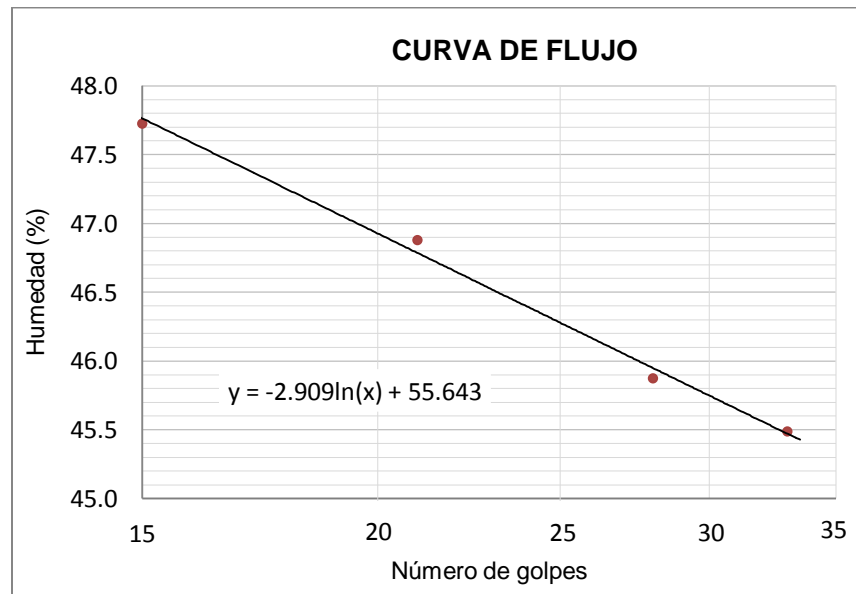
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 3				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	18	20	27	35
Peso del recipiente (g)	14.88	15.19	11.66	12.99
Recipiente + suelo húmedo (g)	29.23	33.03	25.9	30.01
Recipiente + suelo seco (g)	24.53	27.22	21.35	24.71
Peso del agua (g)	4.70	5.81	4.55	5.30
Peso suelo seco (g)	9.65	12.03	9.69	11.72
Humedad (%)	48.7	48.3	47.0	45.2
Límite líquido (%)	47.1			



LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 4				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	21	29	32
Peso del recipiente (g)	13.91	15.07	12.78	16.05
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.45	29.50	27.41	31.28
Recipiente + suelo seco (g)	22.99	24.78	22.71	26.40
Peso del agua (g)	4.46	4.72	4.70	4.88
Peso suelo seco (g)	9.08	9.71	9.93	10.35
Humedad (%)	49.1	48.6	47.3	47.1
Límite líquido (%)	47.9			



LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 5				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	21	28	33
Peso del recipiente (g)	11.81	14.84	14.48	15.50
Recipiente + suelo húmedo (g)	29.02	33.67	32.16	27.27
Recipiente + suelo seco (g)	23.46	27.66	26.60	23.59
Peso del agua (g)	5.56	6.01	5.56	3.68
Peso suelo seco (g)	11.65	12.82	12.12	8.09
Humedad (%)	47.7	46.9	45.9	45.5
Límite líquido (%)	46.3			

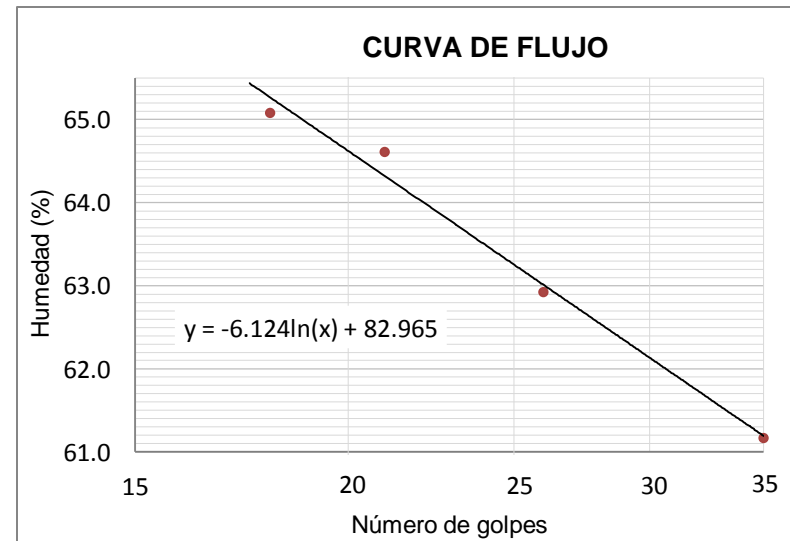
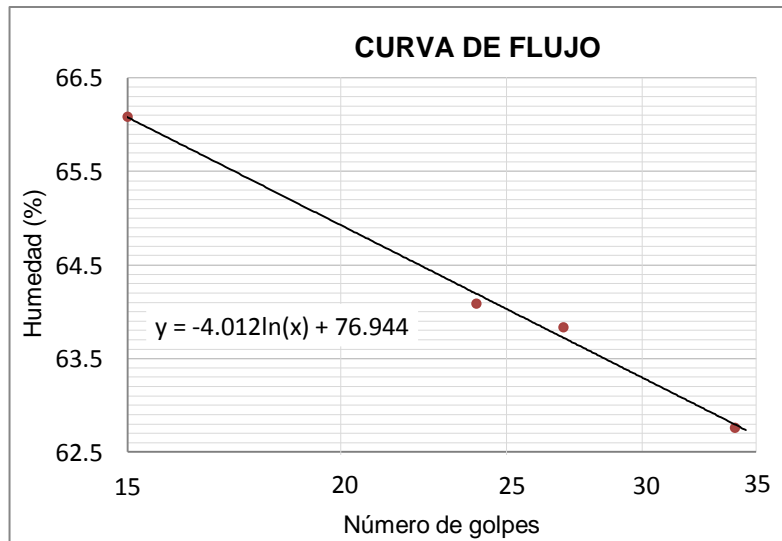




Con Kerosene:

LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	24	27	34
Peso del recipiente (g)	12.75	14.85	11.38	13.91
Recipiente + suelo húmedo (g)	26.12	28.24	24.52	24.62
Recipiente + suelo seco (g)	20.80	23.01	19.4	20.49
Peso del agua (g)	5.32	5.23	5.12	4.13
Peso suelo seco (g)	8.05	8.16	8.02	6.58
Humedad (%)	66.1	64.1	63.8	62.8
Límite líquido (%)	64.0			

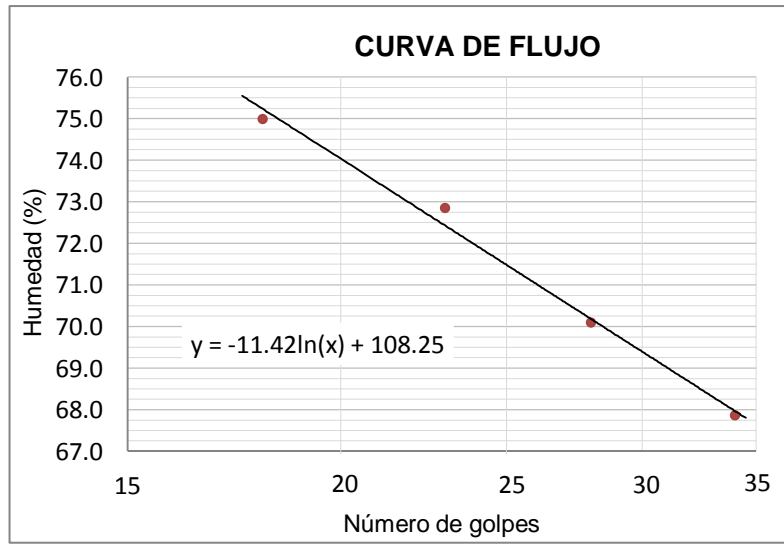
LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	18	21	26	35
Peso del recipiente (g)	15.02	14.25	11.68	14.76
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.50	26.53	24.47	26.59
Recipiente + suelo seco (g)	22.58	21.71	19.53	22.10
Peso del agua (g)	4.92	4.82	4.94	4.49
Peso suelo seco (g)	7.56	7.46	7.85	7.34
Humedad (%)	65.1	64.6	62.9	61.2
Límite líquido (%)	63.3			



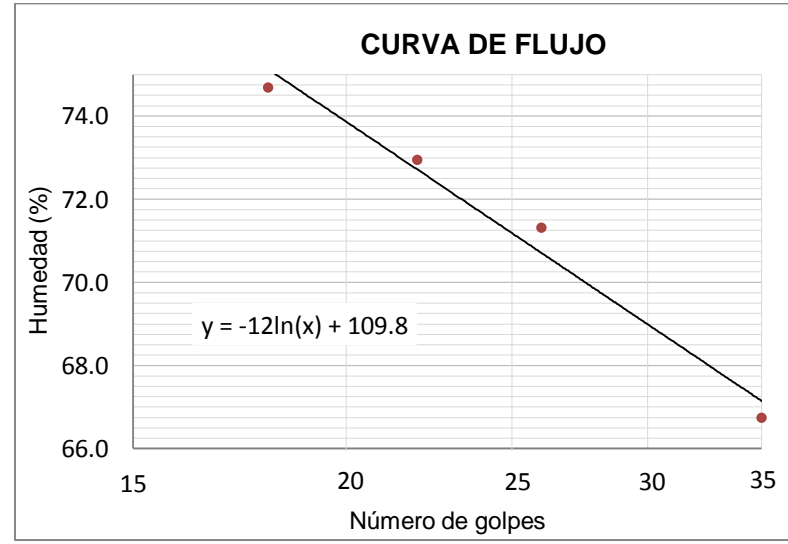
### B.3 Ranurador curvo - Suelo 3

Con Agua desionizada:

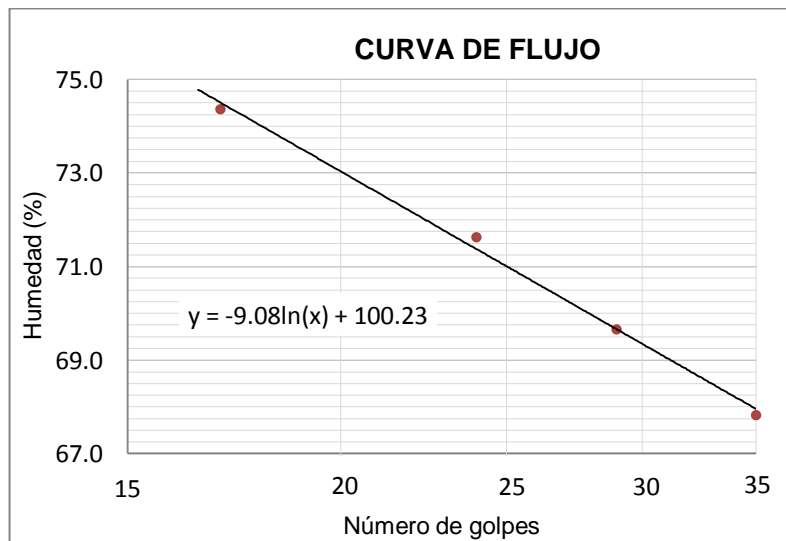
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	18	23	28	34
Peso del recipiente (g)	12.01	11.99	12.3	11.8
Recipiente + suelo húmedo (g)	31.47	25.30	29.14	27.68
Recipiente + suelo seco (g)	23.13	19.69	22.20	21.26
Peso del agua (g)	8.34	5.61	6.94	6.42
Peso suelo seco (g)	11.12	7.70	9.90	9.46
Humedad (%)	75.0	72.9	70.1	67.9
Límite líquido (%)	71.5			



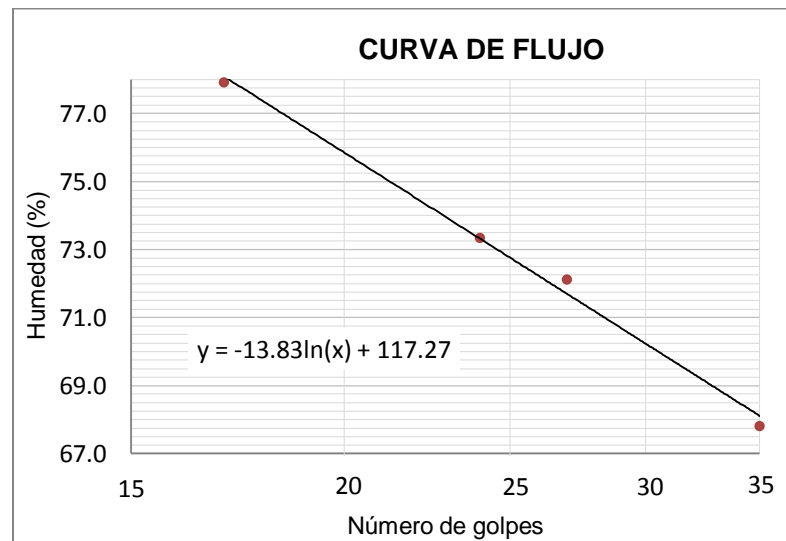
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	18	22	26	35
Peso del recipiente (g)	12.06	16.12	12.46	15.56
Recipiente + suelo húmedo (g)	29.11	30.25	29.66	29.95
Recipiente + suelo seco (g)	21.82	24.29	22.50	24.19
Peso del agua (g)	7.29	5.96	7.16	5.76
Peso suelo seco (g)	9.76	8.17	10.04	8.63
Humedad (%)	74.7	72.9	71.3	66.7
Límite líquido (%)	71.2			



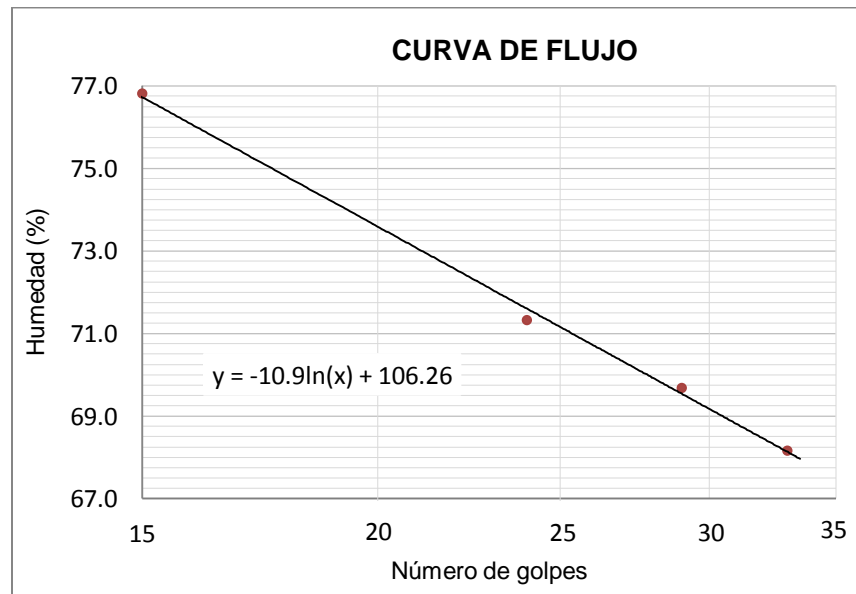
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 3				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	24	29	35
Peso del recipiente (g)	15.04	11.37	12.09	11.75
Recipiente + suelo húmedo (g)	31.71	27.95	30.04	29.12
Recipiente + suelo seco (g)	24.60	21.03	22.67	22.10
Peso del agua (g)	7.11	6.92	7.37	7.02
Peso suelo seco (g)	9.56	9.66	10.58	10.35
Humedad (%)	74.4	71.6	69.7	67.8
Límite líquido (%)	71.0			



LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 4				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	24	27	35
Peso del recipiente (g)	12.30	12.09	15.36	11.19
Recipiente + suelo húmedo (g)	30.68	28.87	31.23	30.07
Recipiente + suelo seco (g)	22.63	21.77	24.58	22.44
Peso del agua (g)	8.05	7.10	6.65	7.63
Peso suelo seco (g)	10.33	9.68	9.22	11.25
Humedad (%)	77.9	73.3	72.1	67.8
Límite líquido (%)	72.8			



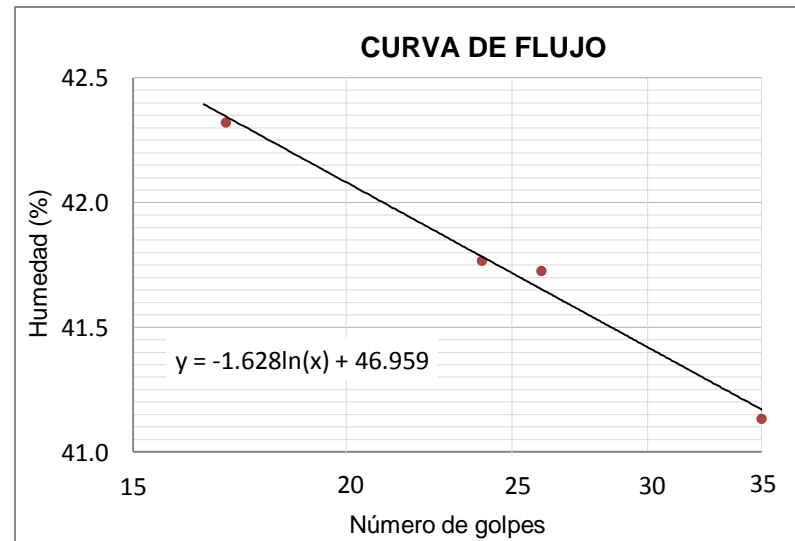
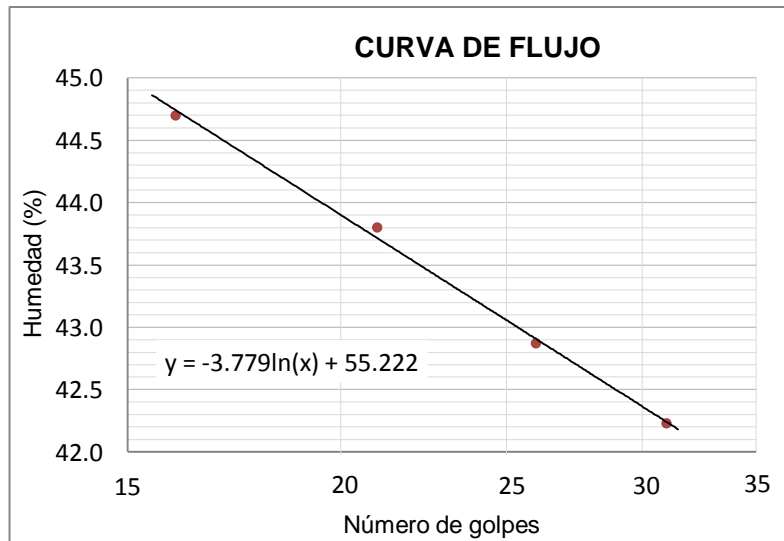
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 5				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	24	29	33
Peso del recipiente (g)	11.58	13.77	14.19	14.05
Recipiente + suelo húmedo (g)	28.66	28.71	30.09	30.53
Recipiente + suelo seco (g)	21.24	22.49	23.56	23.85
Peso del agua (g)	7.42	6.22	6.53	6.68
Peso suelo seco (g)	9.66	8.72	9.37	9.80
Humedad (%)	76.8	71.3	69.7	68.2
Límite líquido (%)	71.2			



Con Salmuera:

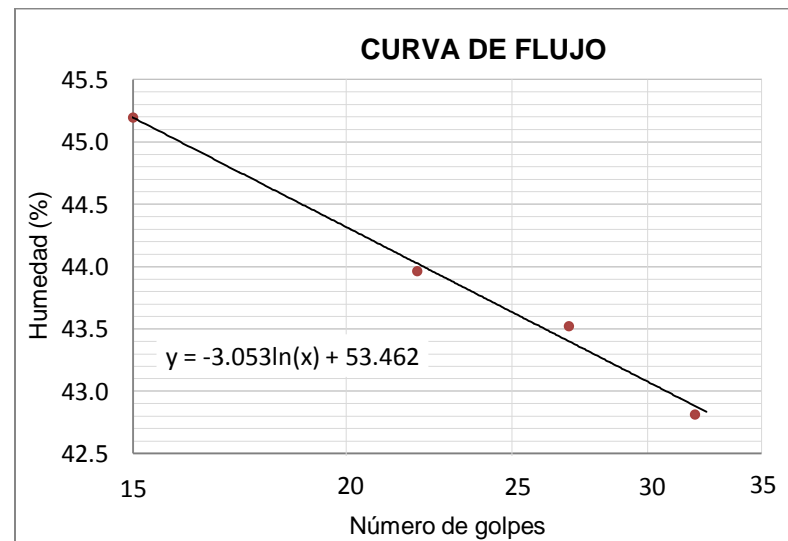
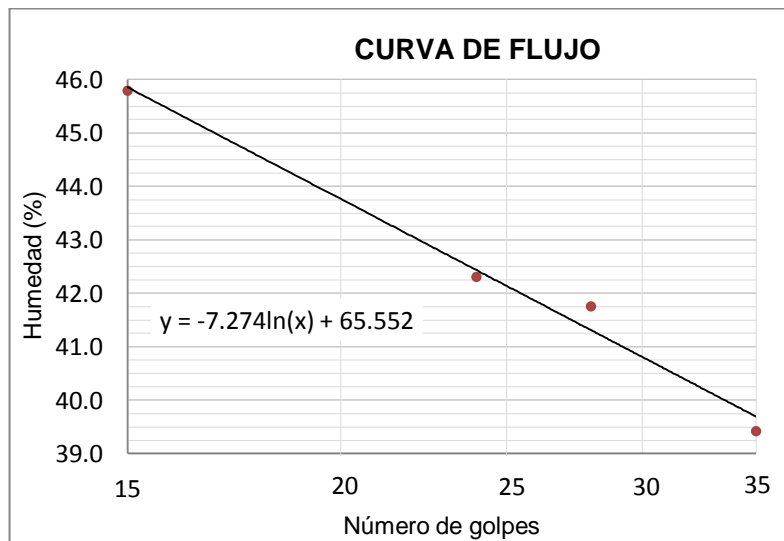
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	21	26	31
Peso del recipiente (g)	12.78	16.11	11.69	12.34
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.80	31.54	25.02	28.64
Recipiente + suelo seco (g)	23.16	26.84	21.02	23.80
Peso del agua (g)	4.64	4.70	4.00	4.84
Peso suelo seco (g)	10.38	10.73	9.33	11.46
Humedad (%)	44.7	43.8	42.9	42.2
Límite líquido (%)	43.1			

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	24	26	35
Peso del recipiente (g)	12.09	13.93	11.74	13.03
Recipiente + suelo húmedo (g)	29.61	26.59	25.53	26.72
Recipiente + suelo seco (g)	24.40	22.86	21.47	22.73
Peso del agua (g)	5.21	3.73	4.06	3.99
Peso suelo seco (g)	12.31	8.93	9.73	9.70
Humedad (%)	42.3	41.8	41.7	41.1
Límite líquido (%)	41.7			

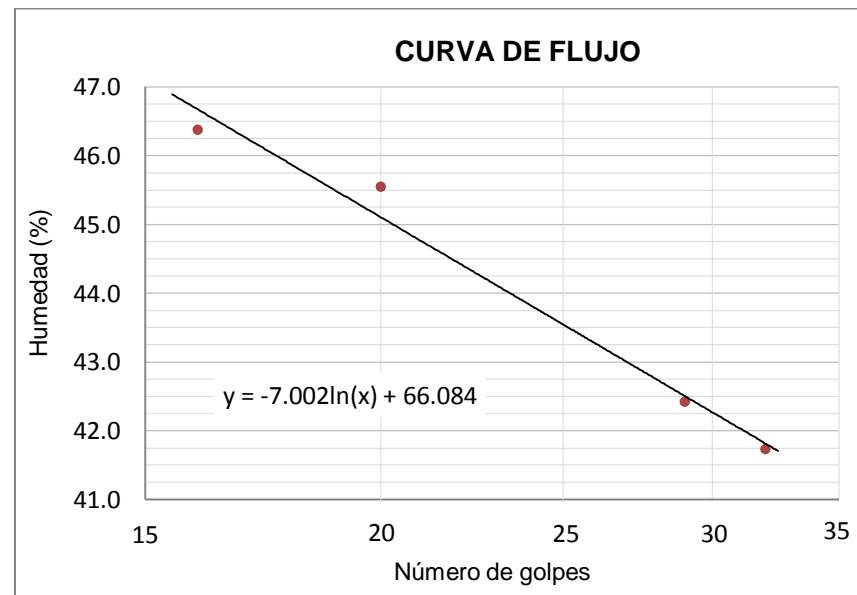


LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 3				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	24	28	35
Peso del recipiente (g)	12.04	11.95	11.43	12.99
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.45	27.32	25.45	28.62
Recipiente + suelo seco (g)	22.61	22.75	21.32	24.20
Peso del agua (g)	4.84	4.57	4.13	4.42
Peso suelo seco (g)	10.57	10.80	9.89	11.21
Humedad (%)	45.8	42.3	41.8	39.4
Límite líquido (%)	42.1			

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 4				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	22	27	32
Peso del recipiente (g)	15.11	14.70	11.15	12.01
Recipiente + suelo húmedo (g)	29.47	30.32	27.44	26.92
Recipiente + suelo seco (g)	25.00	25.55	22.50	22.45
Peso del agua (g)	4.47	4.77	4.94	4.47
Peso suelo seco (g)	9.89	10.85	11.35	10.44
Humedad (%)	45.2	44.0	43.5	42.8
Límite líquido (%)	43.6			



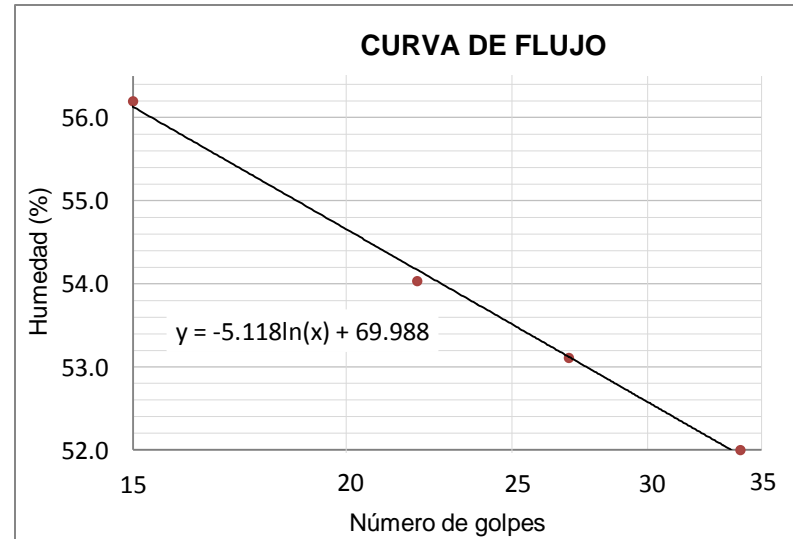
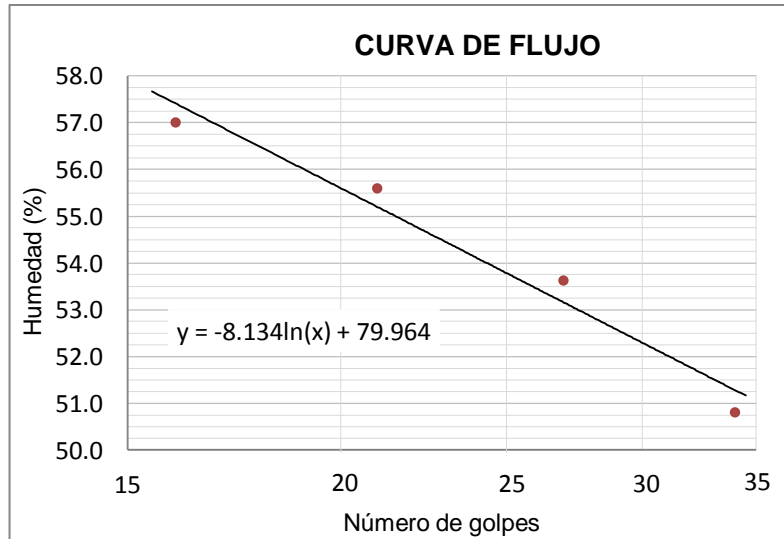
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 5				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	20	29	32
Peso del recipiente (g)	11.74	14.98	14.82	12.34
Recipiente + suelo húmedo (g)	26.10	29.20	28.55	26.84
Recipiente + suelo seco (g)	21.55	24.75	24.46	22.57
Peso del agua (g)	4.55	4.45	4.09	4.27
Peso suelo seco (g)	9.81	9.77	9.64	10.23
Humedad (%)	46.4	45.5	42.4	41.7
Límite líquido (%)	43.5			



Con Kerosene:

LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	21	27	34
Peso del recipiente (g)	14.65	11.25	15.04	14.91
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.87	24.57	25.84	26.13
Recipiente + suelo seco (g)	23.07	19.81	22.07	22.35
Peso del agua (g)	4.80	4.76	3.77	3.78
Peso suelo seco (g)	8.42	8.56	7.03	7.44
Humedad (%)	57.0	55.6	53.6	50.8
Límite líquido (%)	53.8			

LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	22	27	34
Peso del recipiente (g)	13.82	13.21	11.81	12.10
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.16	23.70	24.61	23.09
Recipiente + suelo seco (g)	21.08	20.02	20.17	19.33
Peso del agua (g)	4.08	3.68	4.44	3.76
Peso suelo seco (g)	7.26	6.81	8.36	7.23
Humedad (%)	56.2	54.0	53.1	52.0
Límite líquido (%)	53.5			

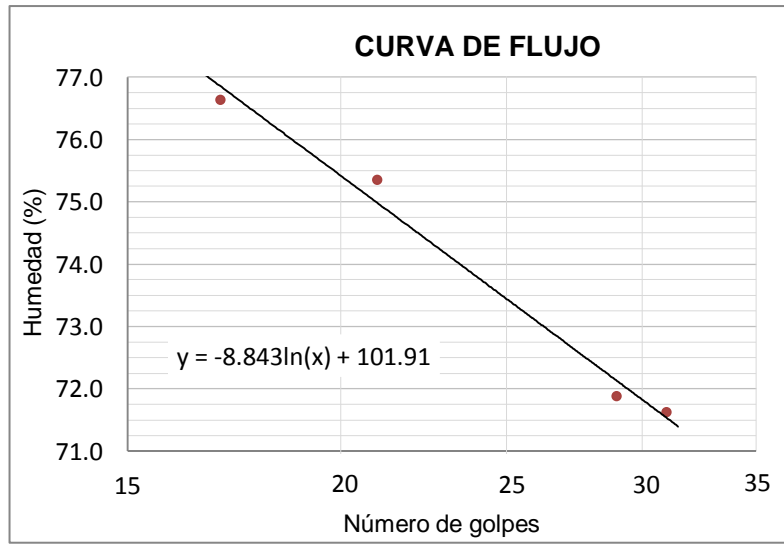




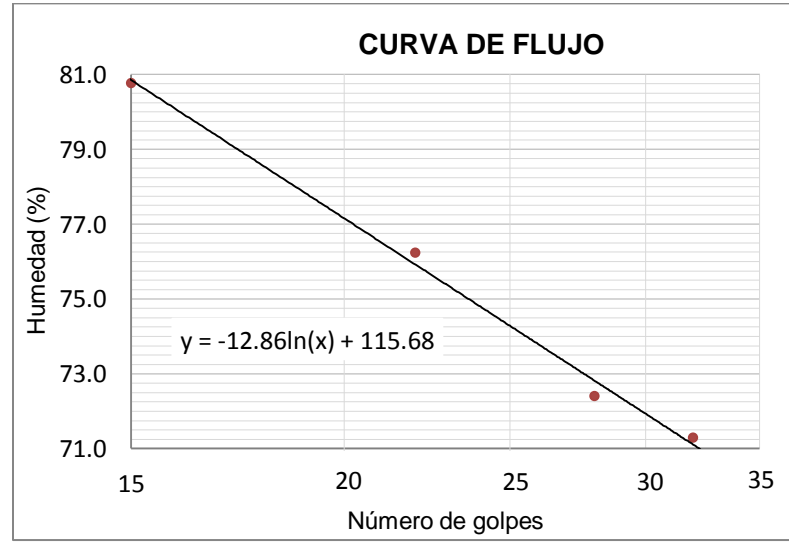
### B.4 Ranurador curvo - Suelo 4

Con Agua desionizada:

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	21	29	31
Peso del recipiente (g)	12.12	11.99	14.75	14.95
Recipiente + suelo húmedo (g)	22.63	21.81	24.96	23.60
Recipiente + suelo seco (g)	18.07	17.59	20.69	19.99
Peso del agua (g)	4.56	4.22	4.27	3.61
Peso suelo seco (g)	5.95	5.60	5.94	5.04
Humedad (%)	76.6	75.4	71.9	71.6
Limite líquido (%)	73.4			

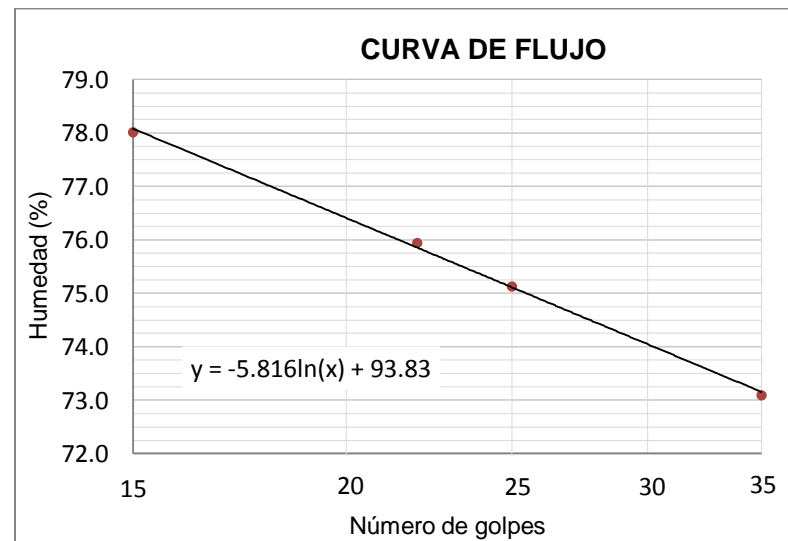
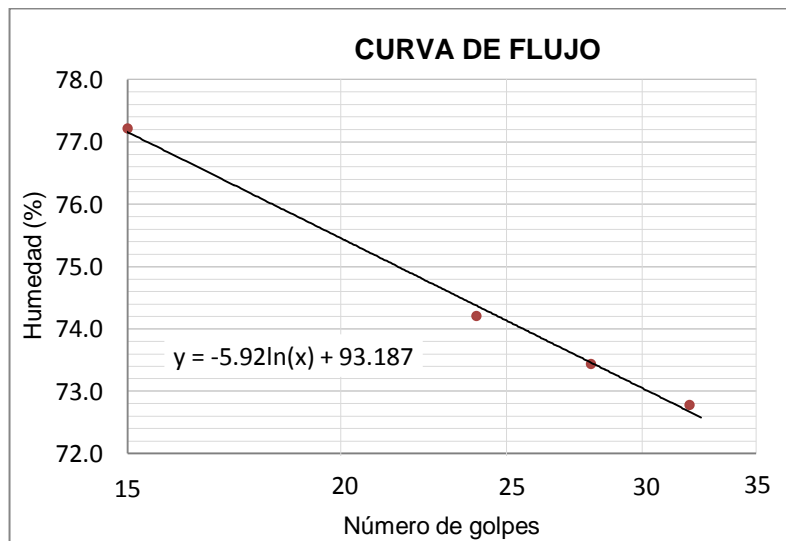


LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	22	28	32
Peso del recipiente (g)	11.09	13.99	11.87	11.49
Recipiente + suelo húmedo (g)	20.96	23.19	22.49	22.35
Recipiente + suelo seco (g)	16.55	19.21	18.03	17.83
Peso del agua (g)	4.41	3.98	4.46	4.52
Peso suelo seco (g)	5.46	5.22	6.16	6.34
Humedad (%)	80.8	76.2	72.4	71.3
Limite líquido (%)	74.3			

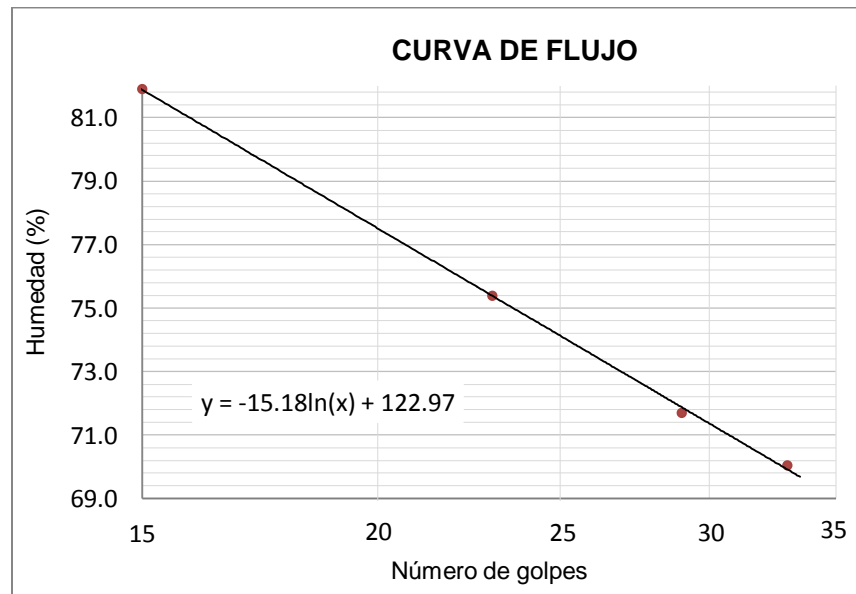


LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 3				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	24	28	32
Peso del recipiente (g)	11.92	12.30	15.28	14.15
Recipiente + suelo húmedo (g)	24.68	23.31	26.71	24.50
Recipiente + suelo seco (g)	19.12	18.62	21.87	20.14
Peso del agua (g)	5.56	4.69	4.84	4.36
Peso suelo seco (g)	7.20	6.32	6.59	5.99
Humedad (%)	77.2	74.2	73.4	72.8
Limite líquido (%)	74.1			

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 4				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	22	25	35
Peso del recipiente (g)	11.26	13.24	12.18	15.09
Recipiente + suelo húmedo (g)	24.38	22.97	21.97	25.77
Recipiente + suelo seco (g)	18.63	18.77	17.77	21.26
Peso del agua (g)	5.75	4.20	4.20	4.51
Peso suelo seco (g)	7.37	5.53	5.59	6.17
Humedad (%)	78.0	75.9	75.1	73.1
Limite líquido (%)	75.1			



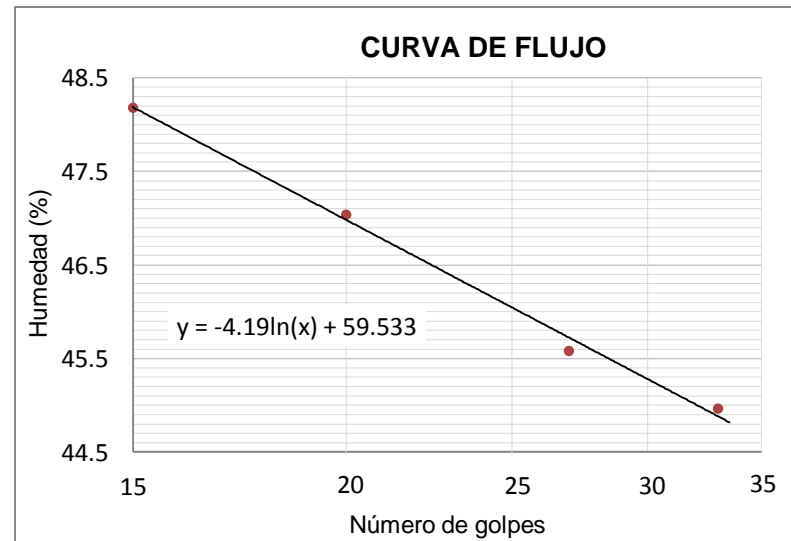
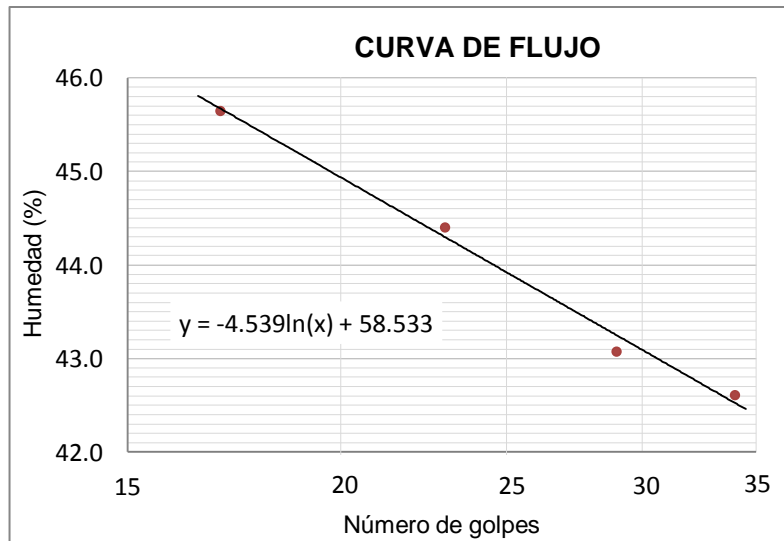
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 5				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	23	29	33
Peso del recipiente (g)	11.98	12.28	14.94	11.37
Recipiente + suelo húmedo (g)	24.75	23.61	26.29	23.58
Recipiente + suelo seco (g)	19.00	18.74	21.55	18.55
Peso del agua (g)	5.75	4.87	4.74	5.03
Peso suelo seco (g)	7.02	6.46	6.61	7.18
Humedad (%)	81.9	75.4	71.7	70.1
Limite líquido (%)	74.1			



Con Salmuera:

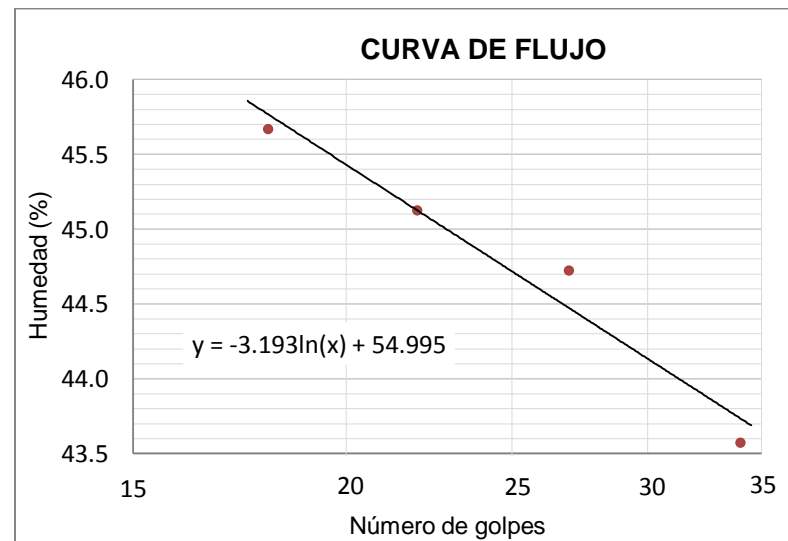
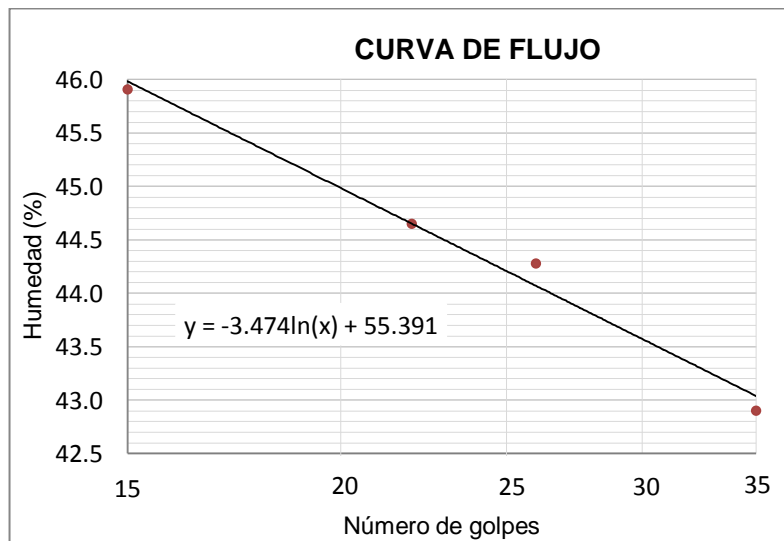
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	23	29	34
Peso del recipiente (g)	13.98	12.10	11.53	13.86
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.37	24.36	25.38	25.44
Recipiente + suelo seco (g)	21.80	20.59	21.21	21.98
Peso del agua (g)	3.57	3.77	4.17	3.46
Peso suelo seco (g)	7.82	8.49	9.68	8.12
Humedad (%)	45.7	44.4	43.1	42.6
Límite líquido (%)	43.9			

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	20	27	33
Peso del recipiente (g)	11.91	15.13	12.14	11.04
Recipiente + suelo húmedo (g)	22.52	27.79	24.50	23.42
Recipiente + suelo seco (g)	19.07	23.74	20.63	19.58
Peso del agua (g)	3.45	4.05	3.87	3.84
Peso suelo seco (g)	7.16	8.61	8.49	8.54
Humedad (%)	48.2	47.0	45.6	45.0
Límite líquido (%)	46.0			

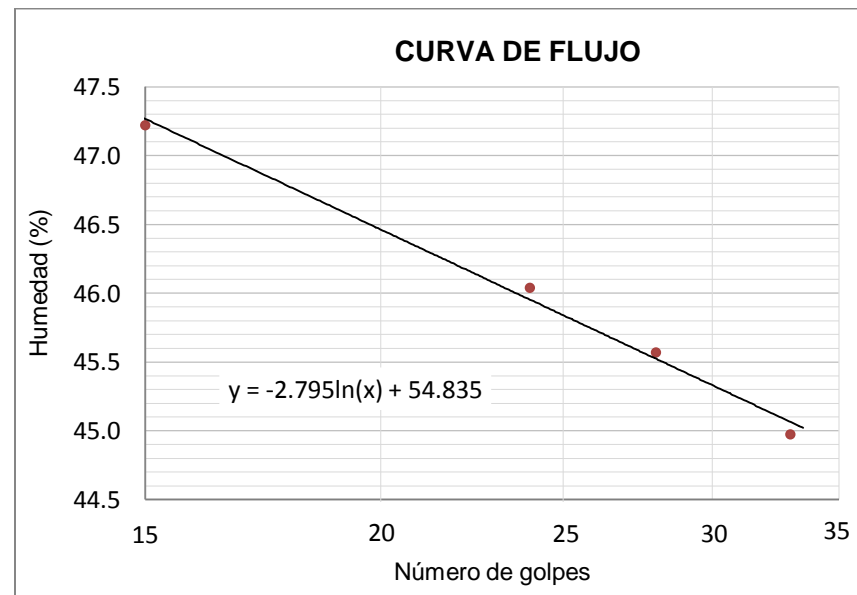


LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 3				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	22	26	35
Peso del recipiente (g)	11.96	15.12	11.94	12.10
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.34	26.88	23.54	24.99
Recipiente + suelo seco (g)	21.13	23.25	19.98	21.12
Peso del agua (g)	4.21	3.63	3.56	3.87
Peso suelo seco (g)	9.17	8.13	8.04	9.02
Humedad (%)	45.9	44.6	44.3	42.9
Límite líquido (%)	44.2			

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 4				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	18	22	27	34
Peso del recipiente (g)	12.20	13.28	12.30	14.91
Recipiente + suelo húmedo (g)	24.99	26.24	23.69	25.52
Recipiente + suelo seco (g)	20.98	22.21	20.17	22.30
Peso del agua (g)	4.01	4.03	3.52	3.22
Peso suelo seco (g)	8.78	8.93	7.87	7.39
Humedad con sal (%)	45.7	45.1	44.7	43.6
Límite líquido (%)	44.7			



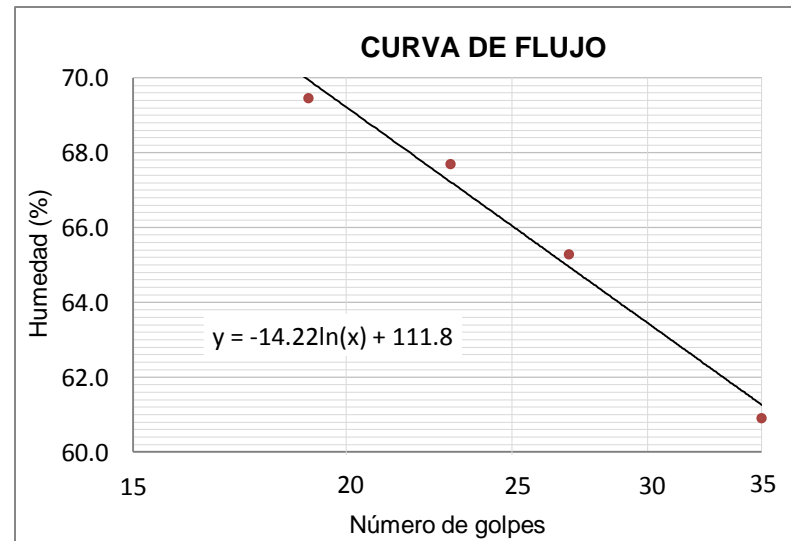
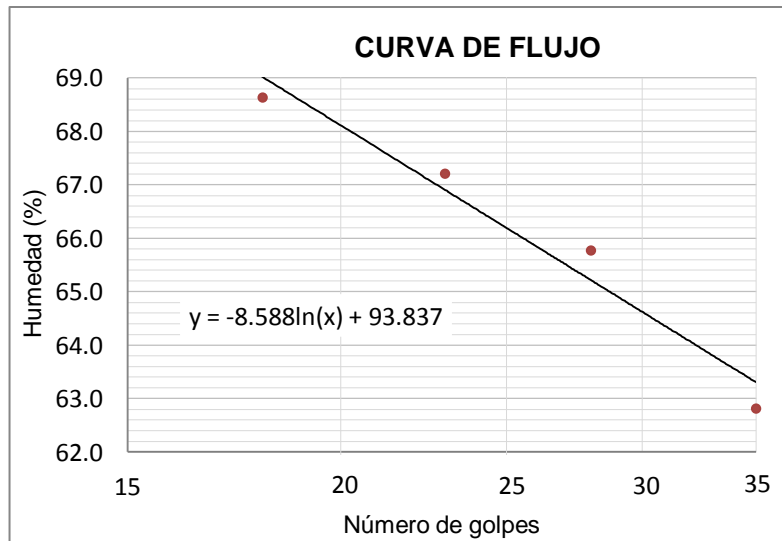
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 5				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	24	28	33
Peso del recipiente (g)	12.13	11.12	14.31	15.06
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.91	24.95	27.79	28.76
Recipiente + suelo seco (g)	21.49	20.59	23.57	24.51
Peso del agua (g)	4.42	4.36	4.22	4.25
Peso suelo seco (g)	9.36	9.47	9.26	9.45
Humedad (%)	47.2	46.0	45.6	45.0
Límite líquido (%)	45.8			



Con Kerosene:

LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	18	23	28	35
Peso del recipiente (g)	11.73	12.53	12.22	11.58
Recipiente + suelo húmedo (g)	23.45	23.70	22.73	21.74
Recipiente + suelo seco (g)	18.68	19.21	18.56	17.82
Peso del agua (g)	4.77	4.49	4.17	3.92
Peso suelo seco (g)	6.95	6.68	6.34	6.24
Humedad (%)	68.6	67.2	65.8	62.8
Límite líquido (%)	66.2			

LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	19	23	27	35
Peso del recipiente (g)	13.68	13.85	12.42	11.83
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.95	25.74	22.85	22.37
Recipiente + suelo seco (g)	20.92	20.94	18.73	18.38
Peso del agua (g)	5.03	4.80	4.12	3.99
Peso suelo seco (g)	7.24	7.09	6.31	6.55
Humedad (%)	69.5	67.7	65.3	60.9
Límite líquido (%)	66.0			

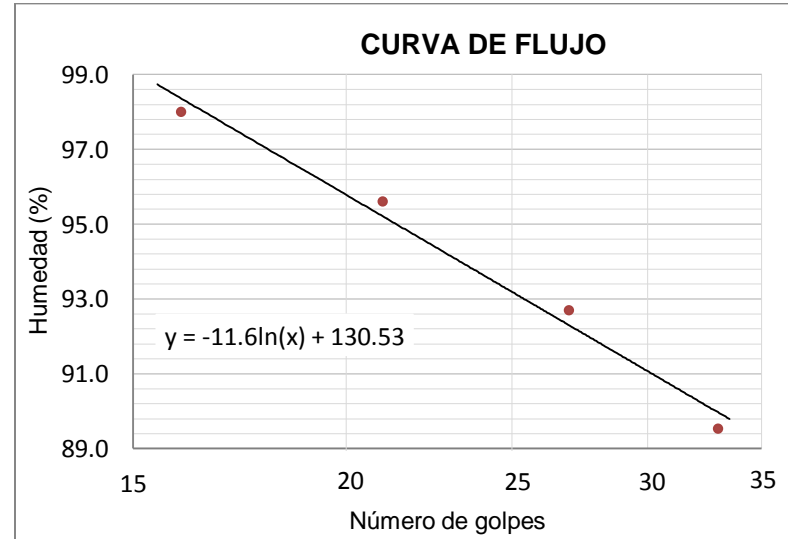
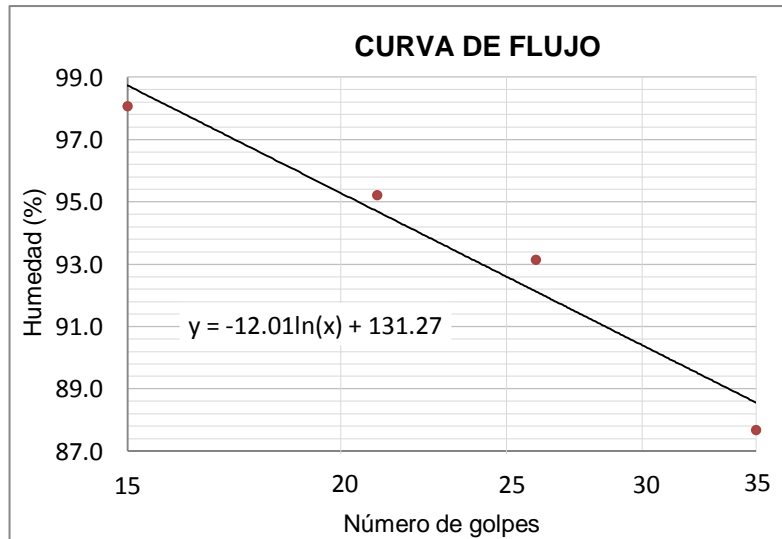


### B.5 Ranurador curvo - Suelo 5

Con Agua desionizada:

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	21	26	35
Peso del recipiente (g)	11.74	12.27	14.37	15.61
Recipiente + suelo húmedo (g)	30.16	29.80	27.60	29.18
Recipiente + suelo seco (g)	21.04	21.25	21.22	22.84
Peso del agua (g)	9.12	8.55	6.38	6.34
Peso suelo seco (g)	9.30	8.98	6.85	7.23
Humedad (%)	98.1	95.2	93.1	87.7
Límite líquido (%)	92.6			

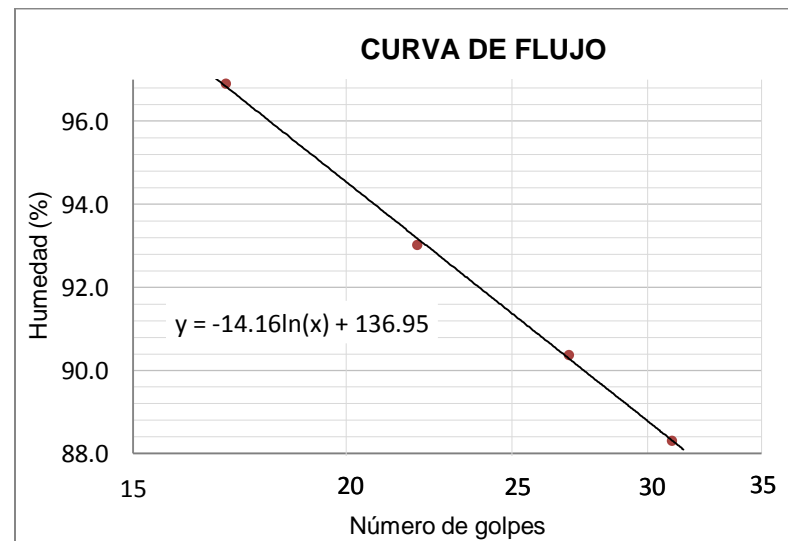
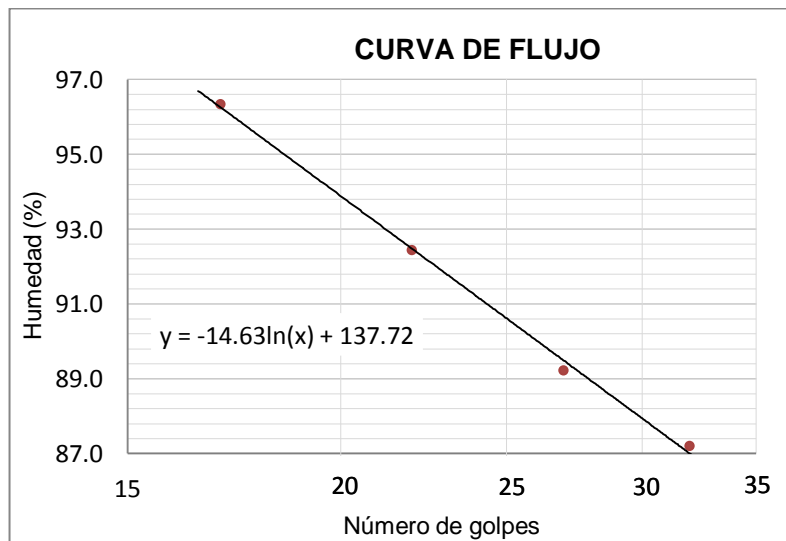
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	21	27	33
Peso del recipiente (g)	13.89	12.20	13.29	11.07
Recipiente + suelo húmedo (g)	29.77	26.48	26.74	25.19
Recipiente + suelo seco (g)	21.91	19.50	20.27	18.52
Peso del agua (g)	7.86	6.98	6.47	6.67
Peso suelo seco (g)	8.02	7.30	6.98	7.45
Humedad (%)	98.0	95.6	92.7	89.5
Límite líquido (%)	93.2			



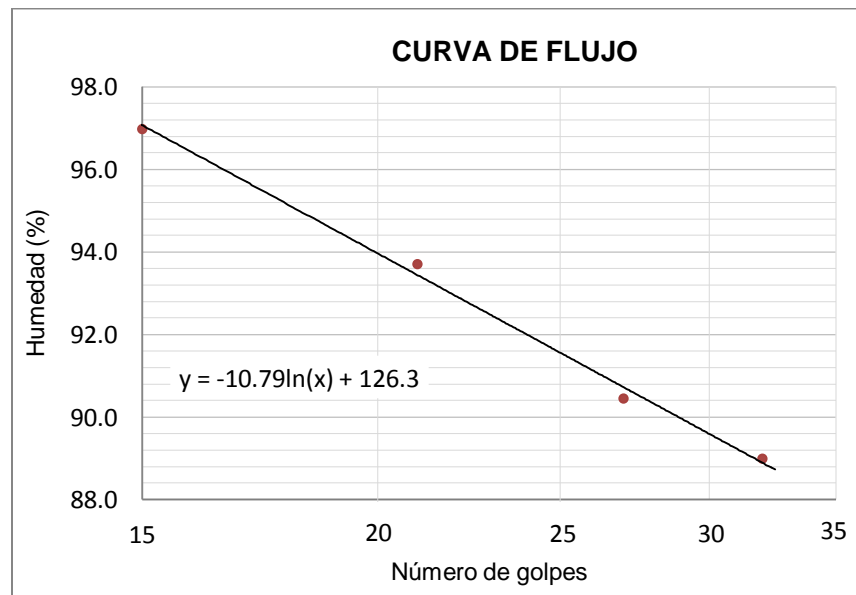


LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 3				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	22	27	32
Peso del recipiente (g)	15.04	16.32	11.89	12.24
Recipiente + suelo húmedo (g)	29.55	31.62	26.82	25.70
Recipiente + suelo seco (g)	22.43	24.27	19.78	19.43
Peso del agua (g)	7.12	7.35	7.04	6.27
Peso suelo seco (g)	7.39	7.95	7.89	7.19
Humedad (%)	96.3	92.5	89.2	87.2
Límite líquido (%)	90.6			

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 4				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	22	27	31
Peso del recipiente (g)	12.31	15.46	11.62	13.21
Recipiente + suelo húmedo (g)	30.09	30.96	26.26	25.30
Recipiente + suelo seco (g)	21.34	23.49	19.31	19.63
Peso del agua (g)	8.75	7.47	6.95	5.67
Peso suelo seco (g)	9.03	8.03	7.69	6.42
Humedad (%)	96.9	93.0	90.4	88.3
Límite líquido (%)	91.4			



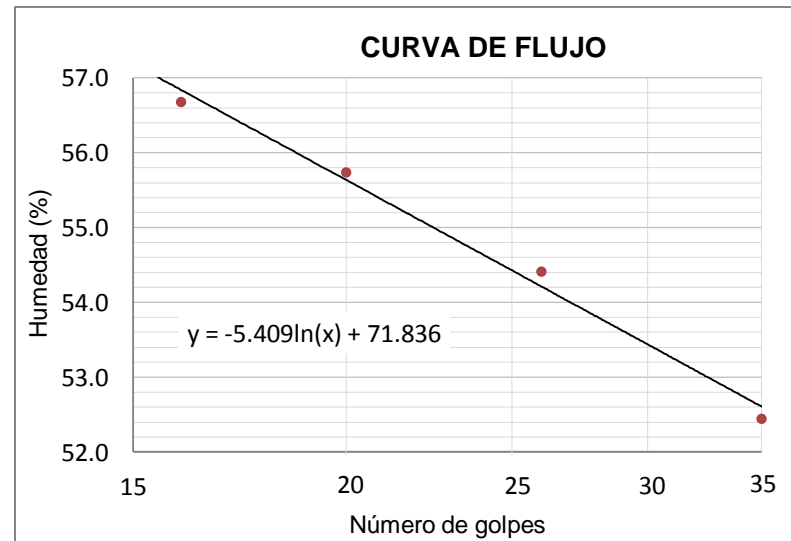
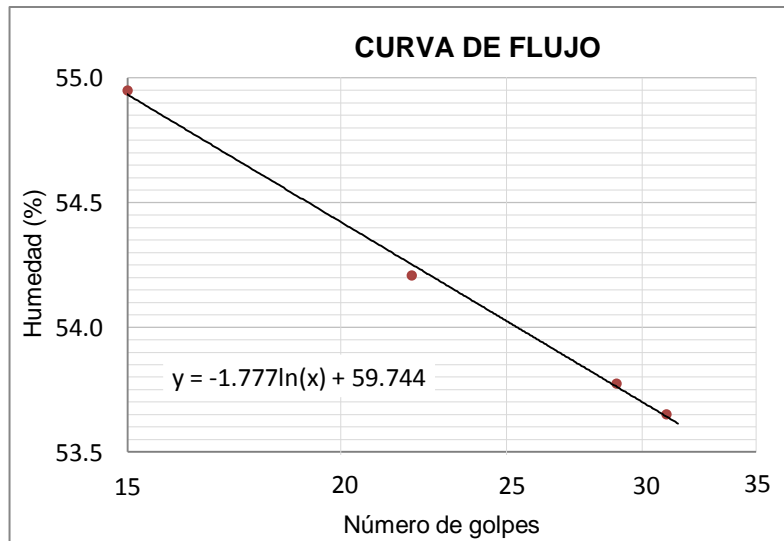
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 5				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	21	27	32
Peso del recipiente (g)	13.16	12.28	13.38	15.17
Recipiente + suelo húmedo (g)	30.16	27.97	27.93	29.25
Recipiente + suelo seco (g)	21.79	20.38	21.02	22.62
Peso del agua (g)	8.37	7.59	6.91	6.63
Peso suelo seco (g)	8.63	8.10	7.64	7.45
Humedad (%)	97.0	93.7	90.4	89.0
Límite líquido (%)	91.6			



Con Salmuera:

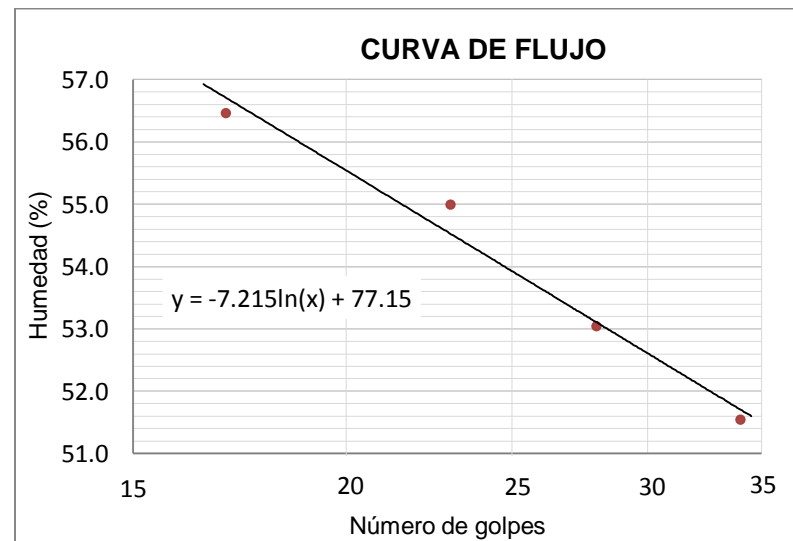
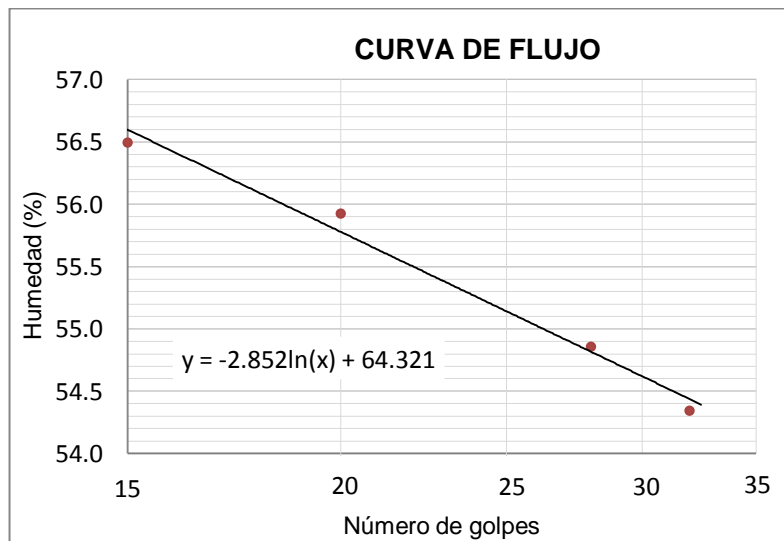
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	22	29	31
Peso del recipiente (g)	13.99	14.88	14.02	14.15
Recipiente + suelo húmedo (g)	23.69	30.27	29.29	33.08
Recipiente + suelo seco (g)	20.25	24.86	23.95	26.47
Peso del agua (g)	3.44	5.41	5.34	6.61
Peso suelo seco (g)	6.26	9.98	9.93	12.32
Humedad (%)	55.0	54.2	53.8	53.7
Límite líquido (%)	54.0			

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	20	26	35
Peso del recipiente (g)	11.79	13.85	13.84	12.00
Recipiente + suelo húmedo (g)	23.04	31.34	23.46	27.55
Recipiente + suelo seco (g)	18.97	25.08	20.07	22.20
Peso del agua (g)	4.07	6.26	3.39	5.35
Peso suelo seco (g)	7.18	11.23	6.23	10.20
Humedad (%)	56.7	55.7	54.4	52.5
Límite líquido (%)	54.4			

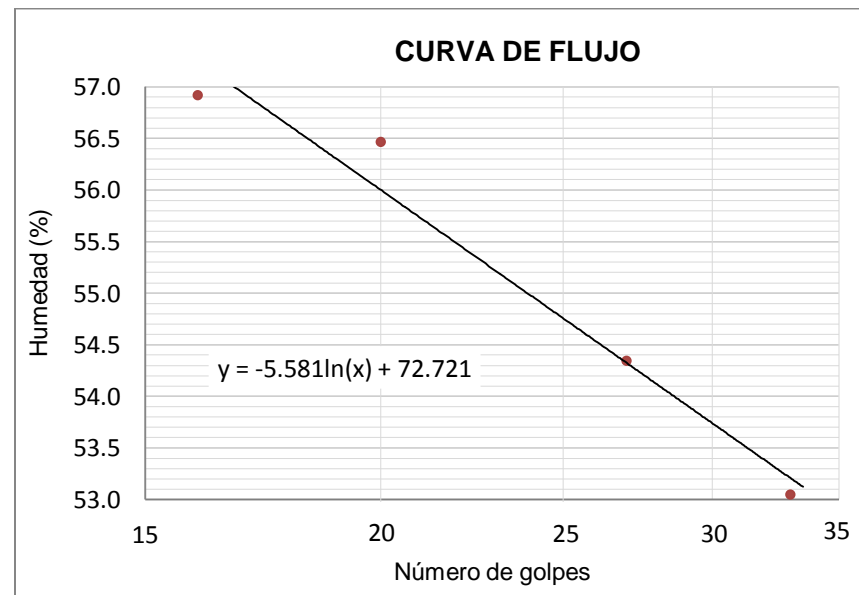


LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 3				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	15	20	28	32
Peso del recipiente (g)	12.16	15.11	15.5	11.97
Recipiente + suelo húmedo (g)	28.42	31.81	25.38	27.42
Recipiente + suelo seco (g)	22.55	25.82	21.88	21.98
Peso del agua (g)	5.87	5.99	3.50	5.44
Peso suelo seco (g)	10.39	10.71	6.38	10.01
Humedad (%)	56.5	55.9	54.9	54.3
Límite líquido (%)	55.1			

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 4				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	23	28	34
Peso del recipiente (g)	11.87	12.07	13.22	12.17
Recipiente + suelo húmedo (g)	28.69	25.57	25.54	26.81
Recipiente + suelo seco (g)	22.62	20.78	21.27	21.83
Peso del agua (g)	6.07	4.79	4.27	4.98
Peso suelo seco (g)	10.75	8.71	8.05	9.66
Humedad (%)	56.5	55.0	53.0	51.6
Límite líquido (%)	53.9			



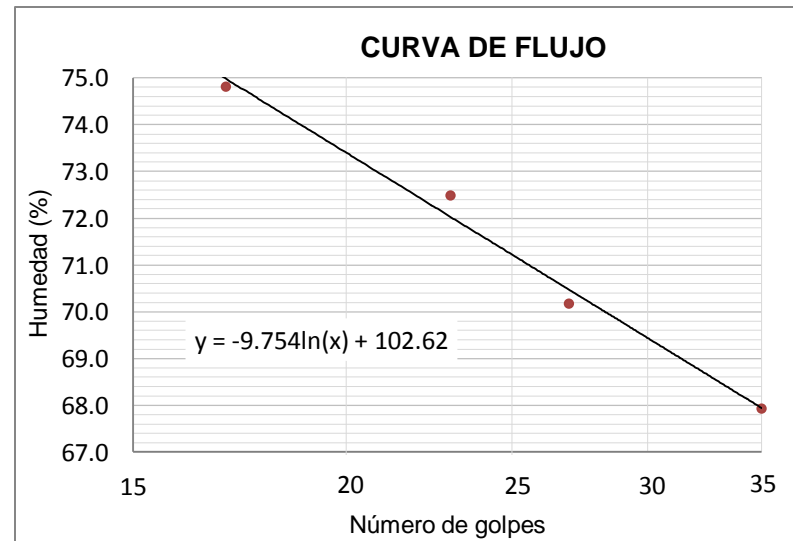
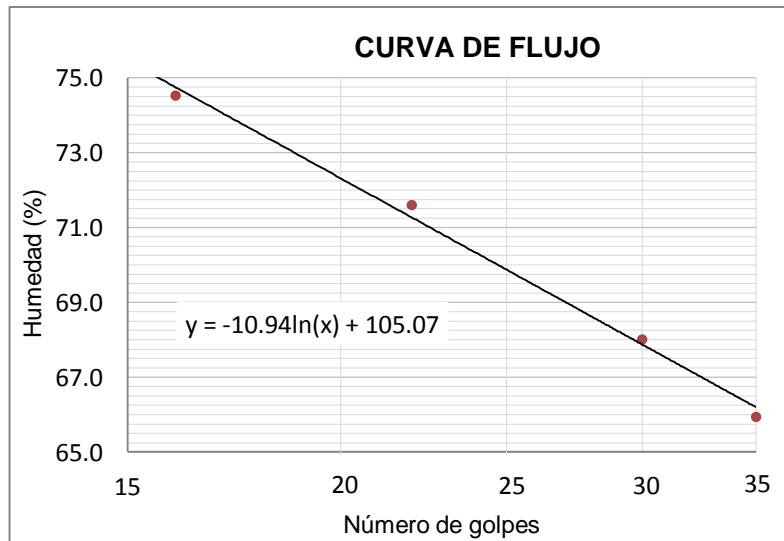
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 5				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	20	27	33
Peso del recipiente (g)	11.76	11.71	14.74	15.03
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.82	26.59	25.93	25.82
Recipiente + suelo seco (g)	20.72	21.22	21.99	22.08
Peso del agua (g)	5.10	5.37	3.94	3.74
Peso suelo seco (g)	8.96	9.51	7.25	7.05
Humedad (%)	56.9	56.5	54.3	53.0
Límite líquido (%)	54.8			



Con Kerosene:

LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 1				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	16	22	30	35
Peso del recipiente (g)	13.05	11.77	11.72	11.26
Recipiente + suelo húmedo (g)	31.62	31.59	30.05	28.27
Recipiente + suelo seco (g)	23.69	23.32	22.63	21.51
Peso del agua (g)	7.93	8.27	7.42	6.76
Peso suelo seco (g)	10.64	11.55	10.91	10.25
Humedad (%)	74.5	71.6	68.0	66.0
Límite líquido (%)	69.9			

LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 2				
Prueba	1	2	3	4
No de Golpes	17	23	27	35
Peso del recipiente (g)	15.02	13.12	11.56	12.09
Recipiente + suelo húmedo (g)	29.39	32.94	30.62	31.57
Recipiente + suelo seco (g)	23.24	24.61	22.76	23.69
Peso del agua (g)	6.15	8.33	7.86	7.88
Peso suelo seco (g)	8.22	11.49	11.2	11.6
Humedad (%)	74.8	72.5	70.2	67.9
Límite líquido (%)	71.2			

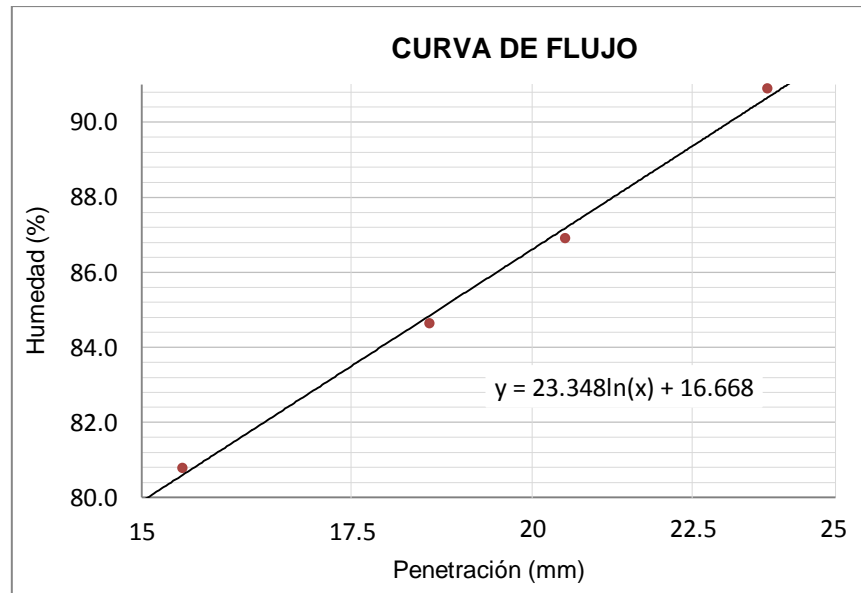


## Anexo C. Resultados límite líquido, Penetrómetro de cono

### C.1 Penetrómetro de cono - Suelo 1

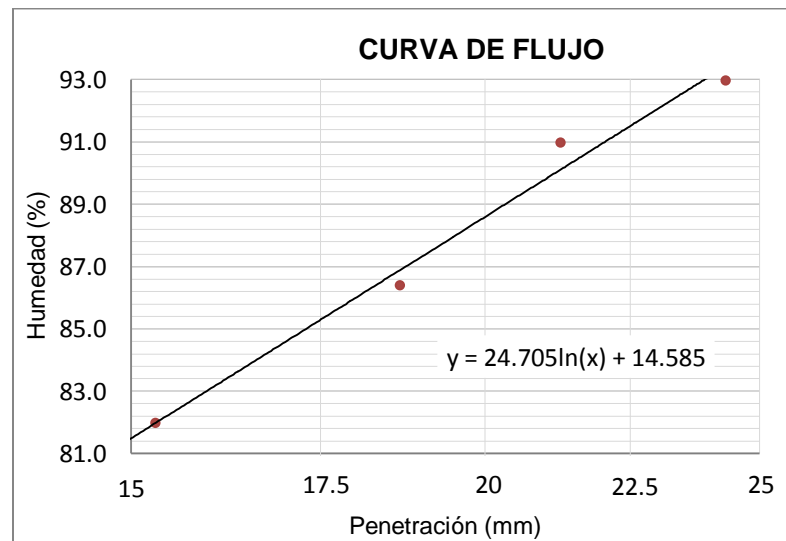
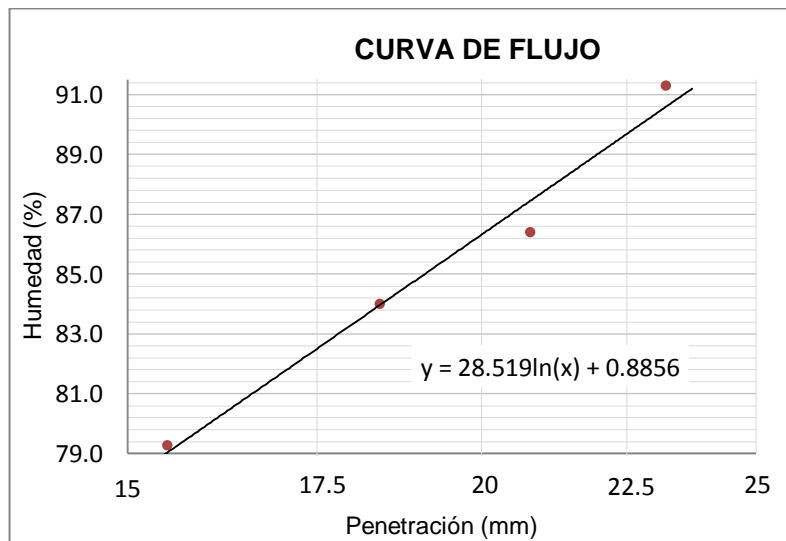
Con Agua desionizada:

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 1				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.45	18.54	20.48	23.77
Peso del recipiente (g)	14.98	11.53	12.27	11.57
Recipiente + suelo húmedo (g)	30.98	27.52	31.11	29.40
Recipiente + suelo seco (g)	23.83	20.19	22.35	20.91
Peso del agua (g)	7.15	7.33	8.76	8.49
Peso suelo seco (g)	8.85	8.66	10.08	9.34
Humedad (%)	80.8	84.6	86.9	90.9
Límite líquido (%)	86.6			



LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 2				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.49	18.41	20.8	23.23
Peso del recipiente (g)	12.14	12.39	12.08	13.99
Recipiente + suelo húmedo (g)	33.51	26.78	26.90	29.62
Recipiente + suelo seco (g)	24.06	20.21	20.03	22.16
Peso del agua (g)	9.45	6.57	6.87	7.46
Peso suelo seco (g)	11.92	7.82	7.95	8.17
Humedad (%)	79.3	84.0	86.4	91.3
Límite líquido (%)	86.3			

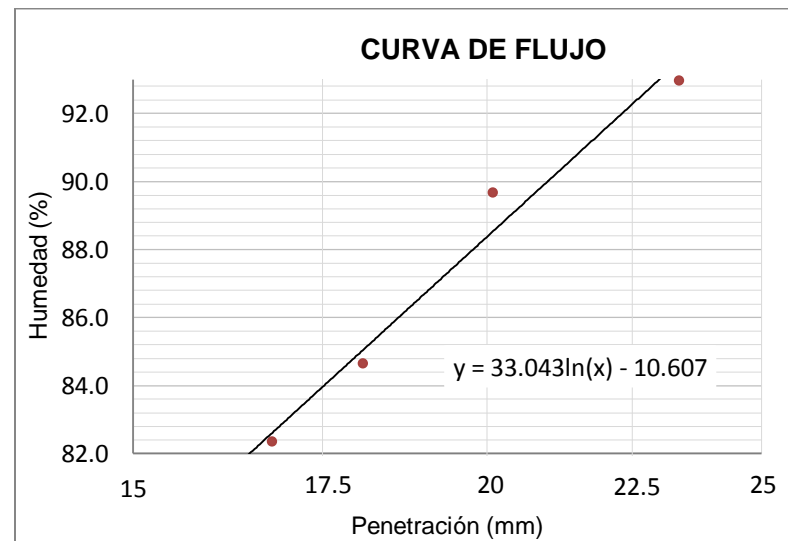
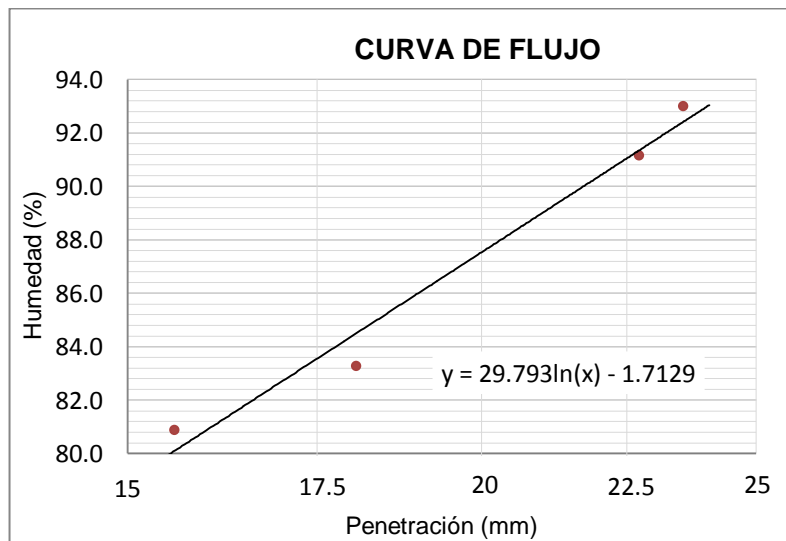
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 3				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.30	18.66	21.26	24.31
Peso del recipiente (g)	11.88	12.54	12.23	12.13
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.62	28.46	28.77	30.29
Recipiente + suelo seco (g)	19.43	21.08	20.89	21.54
Peso del agua (g)	6.19	7.38	7.88	8.75
Peso suelo seco (g)	7.55	8.54	8.66	9.41
Humedad (%)	82.0	86.4	91.0	93.0
Límite líquido (%)	88.6			





LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 4				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.58	18.06	22.73	23.56
Peso del recipiente (g)	14.00	14.38	14.20	12.49
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.91	32.05	28.92	29.34
Recipiente + suelo seco (g)	21.69	24.02	21.90	21.22
Peso del agua (g)	6.22	8.03	7.02	8.12
Peso suelo seco (g)	7.69	9.64	7.70	8.73
Humedad (%)	80.9	83.3	91.2	93.0
Límite líquido (%)	87.5			

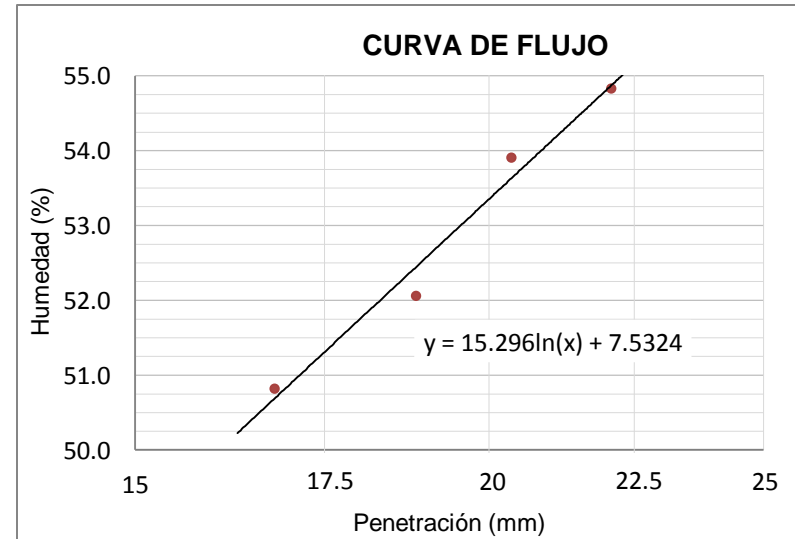
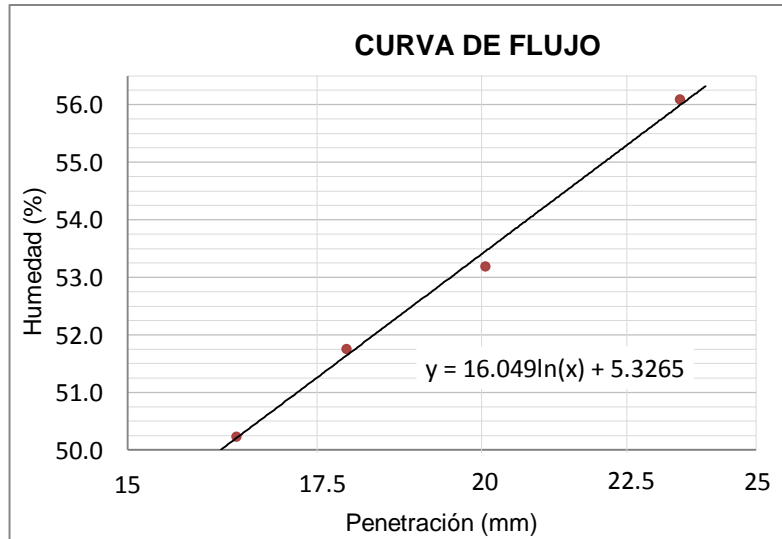
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 5				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.79	18.08	20.09	23.37
Peso del recipiente (g)	12.22	14.00	12.95	16.26
Recipiente + suelo húmedo (g)	29.29	28.20	28.03	35.79
Recipiente + suelo seco (g)	21.58	21.69	20.90	26.38
Peso del agua (g)	7.71	6.51	7.13	9.41
Peso suelo seco (g)	9.36	7.69	7.95	10.12
Humedad (%)	82.4	84.7	89.7	93.0
Límite líquido (%)	88.4			



Con Salmuera:

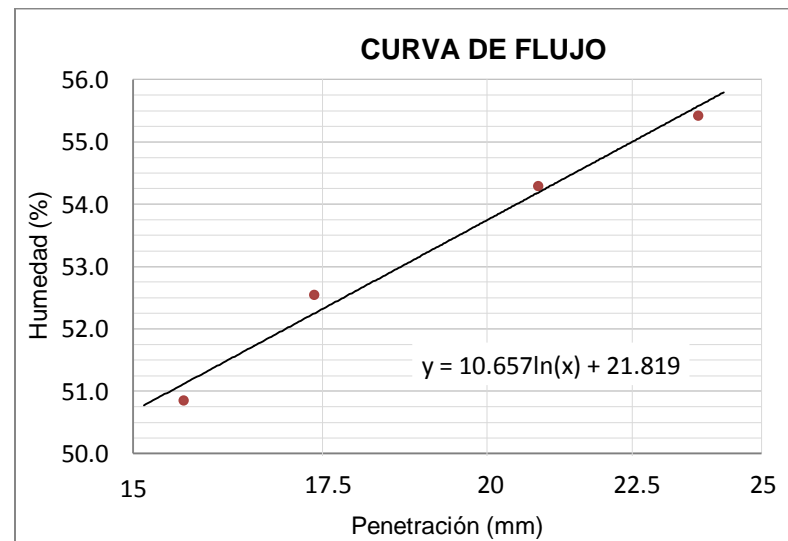
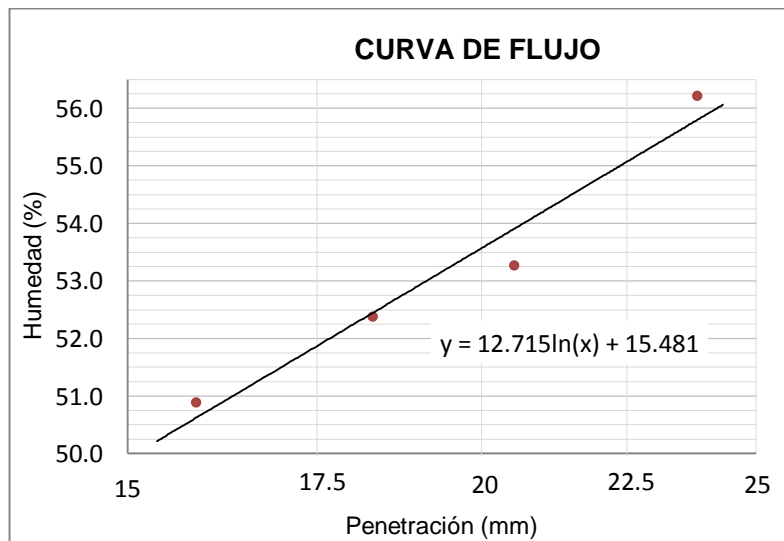
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 1				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.39	17.92	20.06	23.49
Peso del recipiente (g)	15.09	11.63	10.86	15.03
Recipiente + suelo húmedo (g)	30.97	25.44	24.05	29.61
Recipiente + suelo seco (g)	25.66	20.73	19.47	24.37
Peso del agua (g)	5.31	4.71	4.58	5.24
Peso suelo seco (g)	10.57	9.10	8.61	9.34
Humedad (%)	50.2	51.8	53.2	56.1
Límite líquido (%)	53.4			

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 2				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.80	18.85	20.36	22.09
Peso del recipiente (g)	12.28	12.25	15.26	12.24
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.96	23.67	30.02	26.64
Recipiente + suelo seco (g)	21.35	19.76	24.85	21.54
Peso del agua (g)	4.61	3.91	5.17	5.10
Peso suelo seco (g)	9.07	7.51	9.59	9.30
Humedad (%)	50.8	52.1	53.9	54.8
Límite líquido (%)	53.4			

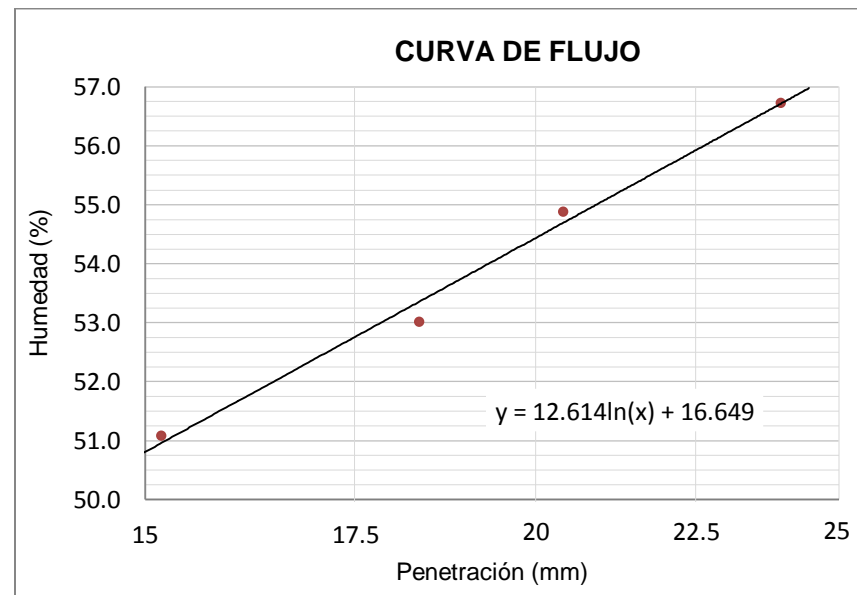


LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 3				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.86	18.31	20.53	23.83
Peso del recipiente (g)	12.30	15.01	15.64	11.78
Recipiente + suelo húmedo (g)	26.62	26.53	29.68	28.48
Recipiente + suelo seco (g)	21.79	22.57	24.80	22.47
Peso del agua (g)	4.83	3.96	4.88	6.01
Peso suelo seco (g)	9.49	7.56	9.16	10.69
Humedad (%)	50.9	52.4	53.3	56.2
Límite líquido (%)	53.6			

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 4				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.63	17.38	20.85	23.74
Peso del recipiente (g)	12.08	13.32	12.39	15.03
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.89	28.56	29.64	29.36
Recipiente + suelo seco (g)	22.56	23.31	23.57	24.25
Peso del agua (g)	5.33	5.25	6.07	5.11
Peso suelo seco (g)	10.48	9.99	11.18	9.22
Humedad (%)	50.9	52.6	54.3	55.4
Límite líquido (%)	53.7			



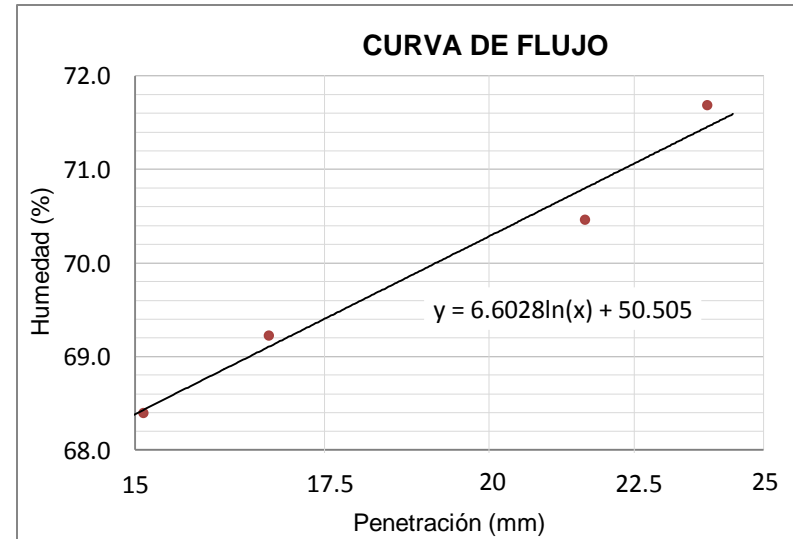
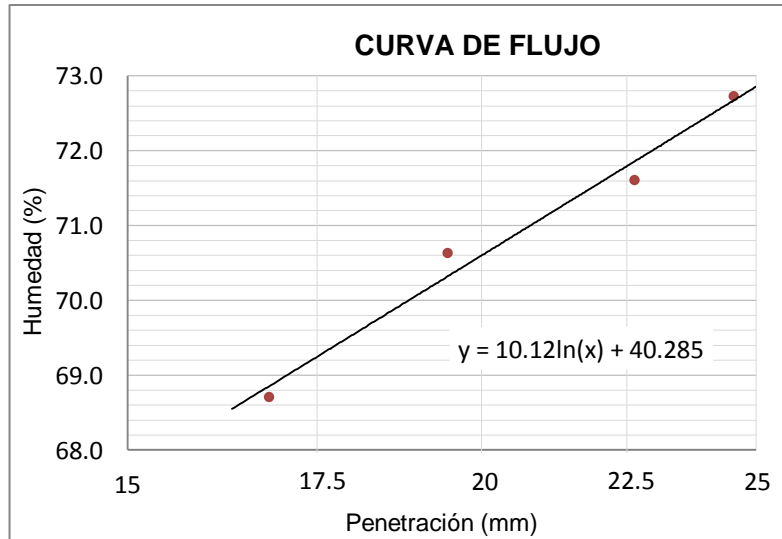
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 5				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.18	18.35	20.41	23.96
Peso del recipiente (g)	15.17	11.57	12.00	12.49
Recipiente + suelo húmedo (g)	29.72	28.05	28.34	28.43
Recipiente + suelo seco (g)	24.80	22.34	22.55	22.66
Peso del agua (g)	4.92	5.71	5.79	5.77
Peso suelo seco (g)	9.63	10.77	10.55	10.17
Humedad (%)	51.1	53.0	54.9	56.7
Límite líquido (%)	54.4			



Con Kerosene:

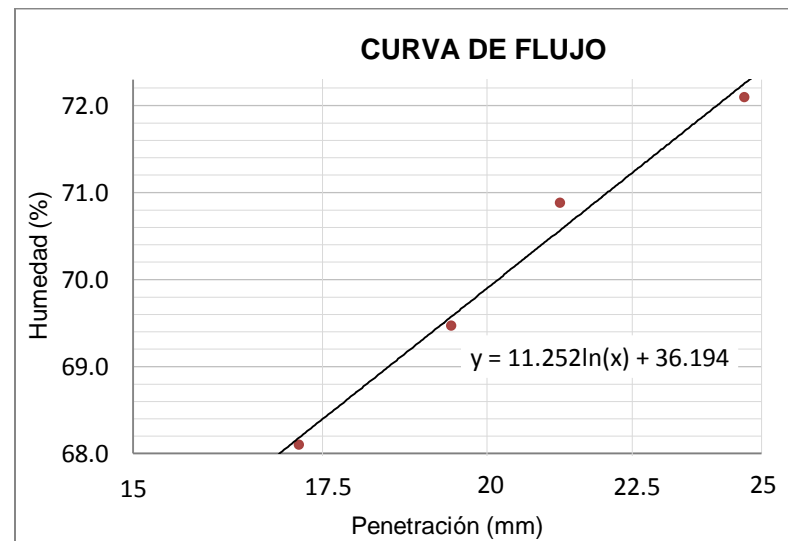
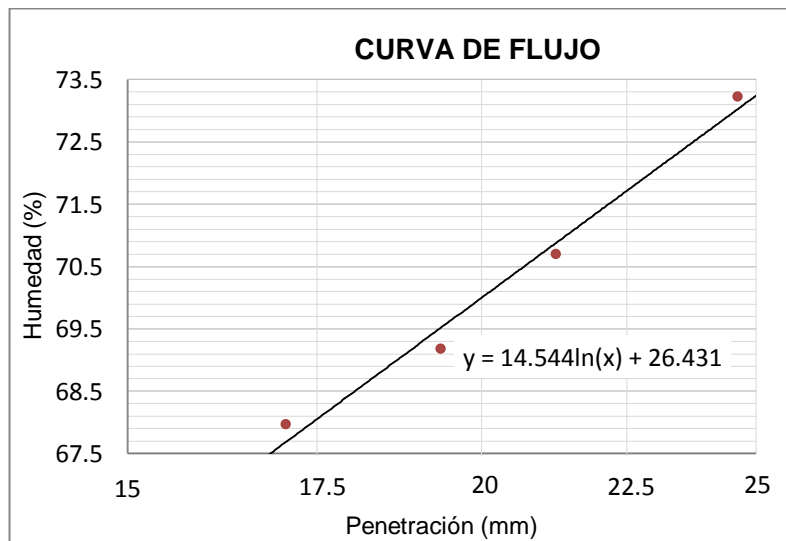
LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 1				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.83	19.45	22.64	24.54
Peso del recipiente (g)	15.11	14.02	11.74	12.12
Recipiente + suelo húmedo (g)	33.55	28.78	27.46	27.39
Recipiente + suelo seco (g)	26.04	22.67	20.90	20.96
Peso del agua (g)	7.51	6.11	6.56	6.43
Peso suelo seco (g)	10.93	8.65	9.16	8.84
Humedad (%)	68.7	70.6	71.6	72.7
Límite líquido (%)	70.6			

LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 2				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.10	16.72	21.62	23.88
Peso del recipiente (g)	14.95	12.47	13.72	12.37
Recipiente + suelo húmedo (g)	28.86	27.43	29.42	31.29
Recipiente + suelo seco (g)	23.21	21.31	22.93	23.39
Peso del agua (g)	5.65	6.12	6.49	7.90
Peso suelo seco (g)	8.26	8.84	9.21	11.02
Humedad (%)	68.4	69.2	70.5	71.7
Límite líquido (%)	70.3			

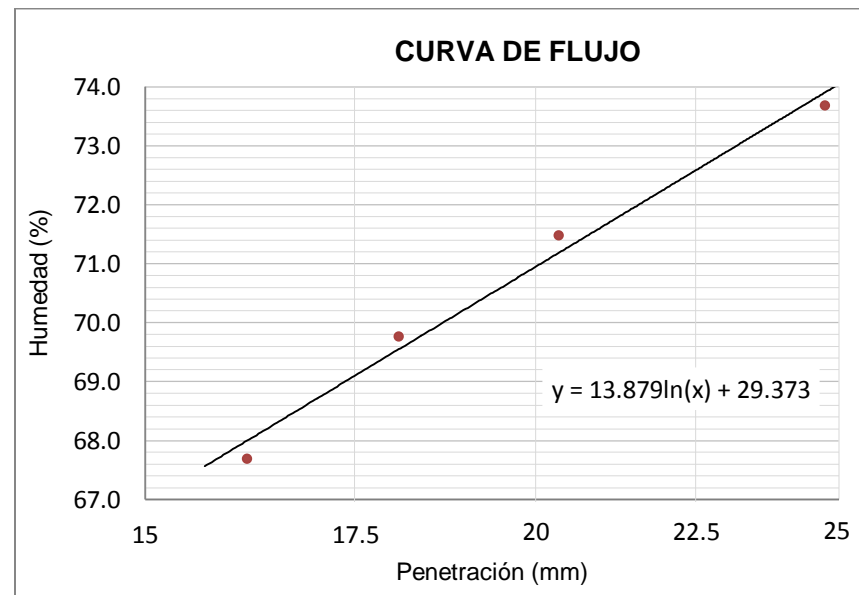


LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 3				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	17.06	19.34	21.24	24.62
Peso del recipiente (g)	11.76	14.30	11.90	15.08
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.92	28.41	32.47	29.32
Recipiente + suelo seco (g)	20.19	22.64	23.95	23.30
Peso del agua (g)	5.73	5.77	8.52	6.02
Peso suelo seco (g)	8.43	8.34	12.05	8.22
Humedad (%)	68.0	69.2	70.7	73.2
Límite líquido (%)	70.0			

LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 4				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	17.16	19.42	21.22	24.65
Peso del recipiente (g)	12.27	11.99	12.49	11.43
Recipiente + suelo húmedo (g)	26.66	27.48	30.57	30.55
Recipiente + suelo seco (g)	20.83	21.13	23.07	22.54
Peso del agua (g)	5.83	6.35	7.50	8.01
Peso suelo seco (g)	8.56	9.14	10.58	11.11
Humedad (%)	68.1	69.5	70.9	72.1
Límite líquido (%)	69.9			



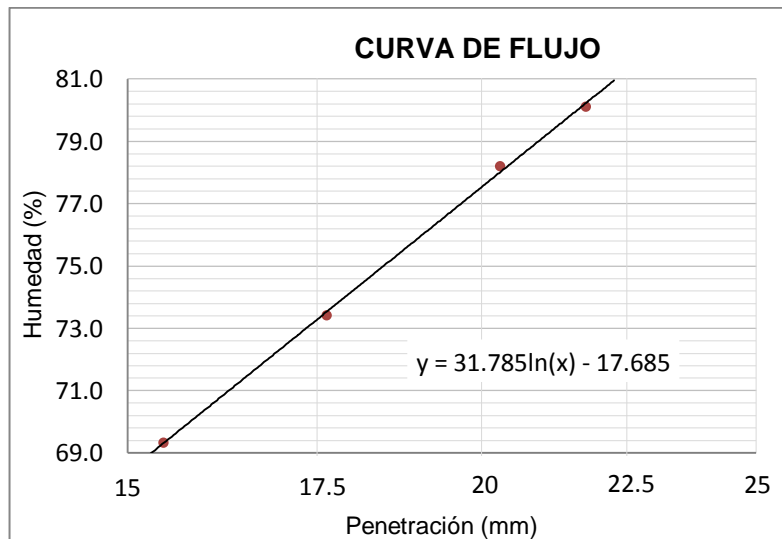
LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 5				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.17	18.08	20.34	24.75
Peso del recipiente (g)	15.28	15.69	14.35	15.69
Recipiente + suelo húmedo (g)	29.92	31.58	30.23	31.86
Recipiente + suelo seco (g)	24.01	25.05	23.61	25.00
Peso del agua (g)	5.91	6.53	6.62	6.86
Peso suelo seco (g)	8.73	9.36	9.26	9.31
Humedad (%)	67.7	69.8	71.5	73.7
Límite líquido (%)	71.0			



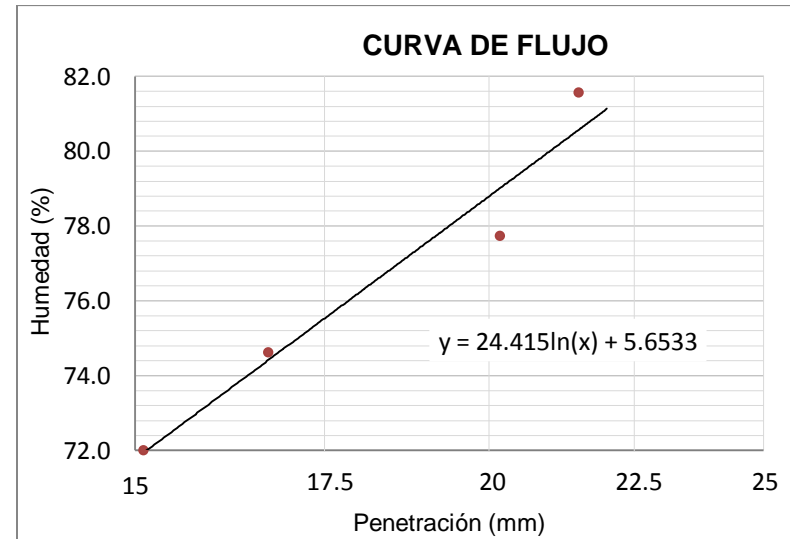
## C.2 Penetrómetro de cono - Suelo 2

Con Agua desionizada:

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 1				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.44	17.63	20.30	21.77
Peso del recipiente (g)	12.42	12.20	15.27	13.12
Recipiente + suelo húmedo (g)	26.00	26.30	30.72	29.33
Recipiente + suelo seco (g)	20.44	20.33	23.94	22.12
Peso del agua (g)	5.56	5.97	6.78	7.21
Peso suelo seco (g)	8.02	8.13	8.67	9.00
Humedad (%)	69.3	73.4	78.2	80.1
Límite líquido (%)	77.5			



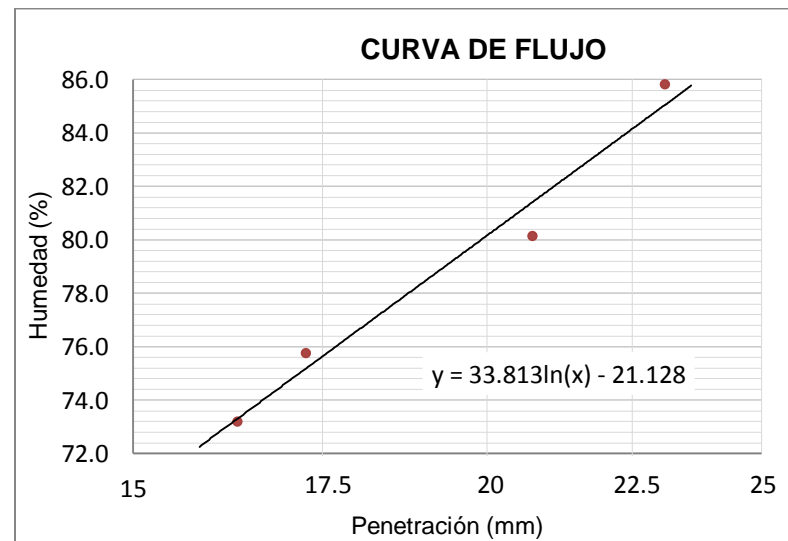
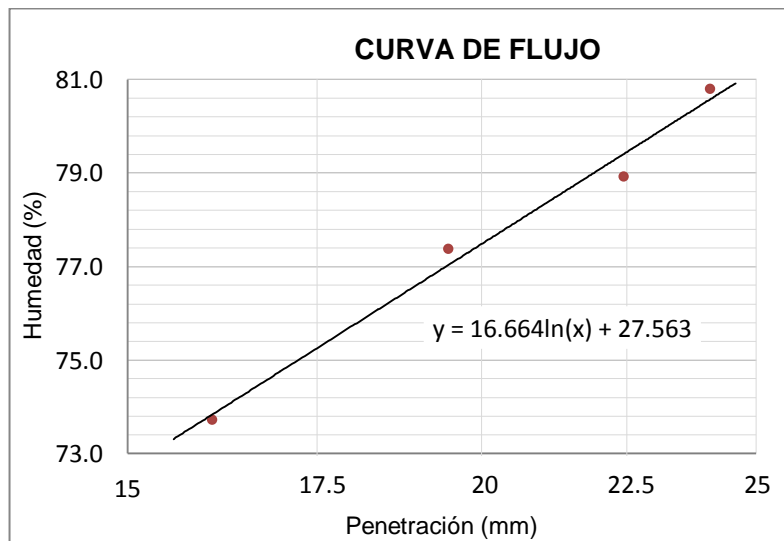
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 2				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.10	16.71	20.18	21.51
Peso del recipiente (g)	12.61	11.42	13.15	12.42
Recipiente + suelo húmedo (g)	24.41	25.32	25.52	27.98
Recipiente + suelo seco (g)	19.47	19.38	20.11	20.99
Peso del agua (g)	4.94	5.94	5.41	6.99
Peso suelo seco (g)	6.86	7.96	6.96	8.57
Humedad (%)	72.0	74.6	77.7	81.6
Límite líquido (%)	78.8			



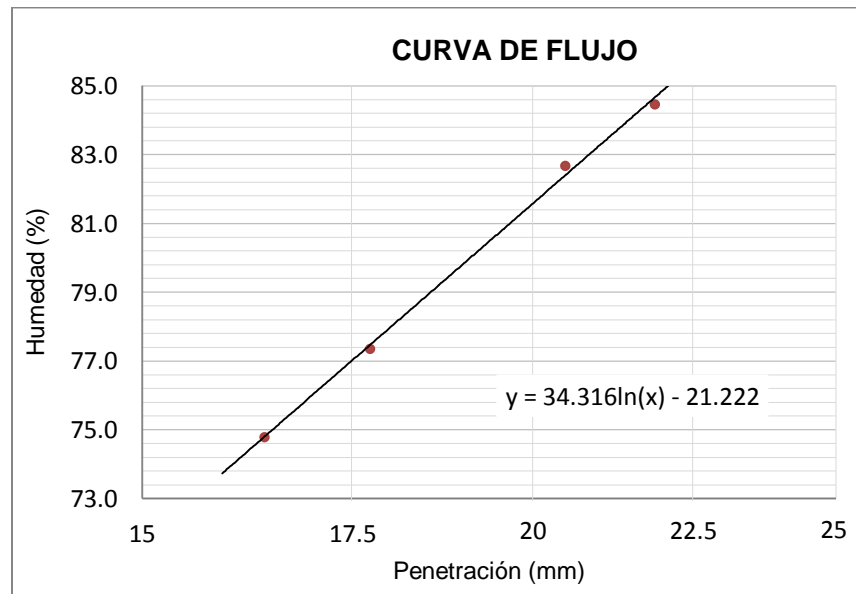


LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 3				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.07	19.46	22.45	24.08
Peso del recipiente (g)	12.07	13.88	12.26	11.71
Recipiente + suelo húmedo (g)	22.72	28.23	27.04	31.49
Recipiente + suelo seco (g)	18.20	21.97	20.52	22.65
Peso del agua (g)	4.52	6.26	6.52	8.84
Peso suelo seco (g)	6.13	8.09	8.26	10.94
Humedad (%)	73.7	77.4	78.9	80.8
Límite líquido (%)	77.5			

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 4				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.33	17.26	20.75	23.11
Peso del recipiente (g)	14.39	11.16	12.26	11.71
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.00	27.26	27.14	32.04
Recipiente + suelo seco (g)	21.67	20.32	20.52	22.65
Peso del agua (g)	5.33	6.94	6.62	9.39
Peso suelo seco (g)	7.28	9.16	8.26	10.94
Humedad (%)	73.2	75.8	80.1	85.8
Límite líquido (%)	80.1			



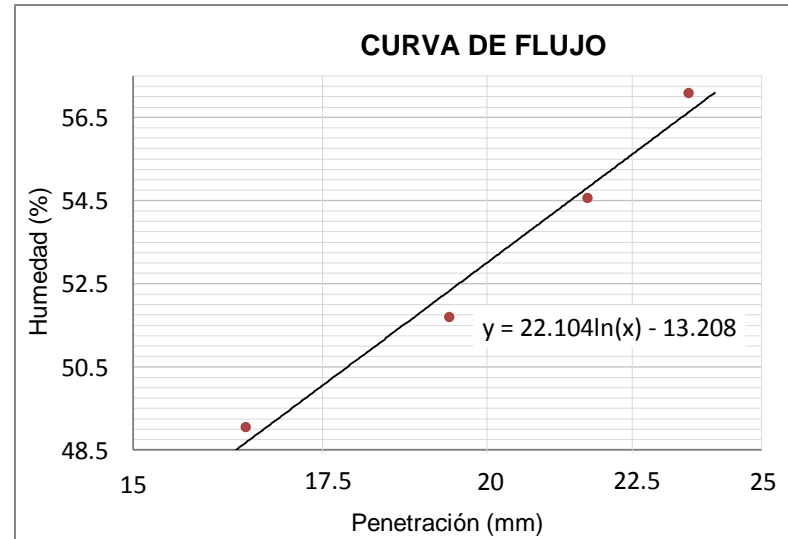
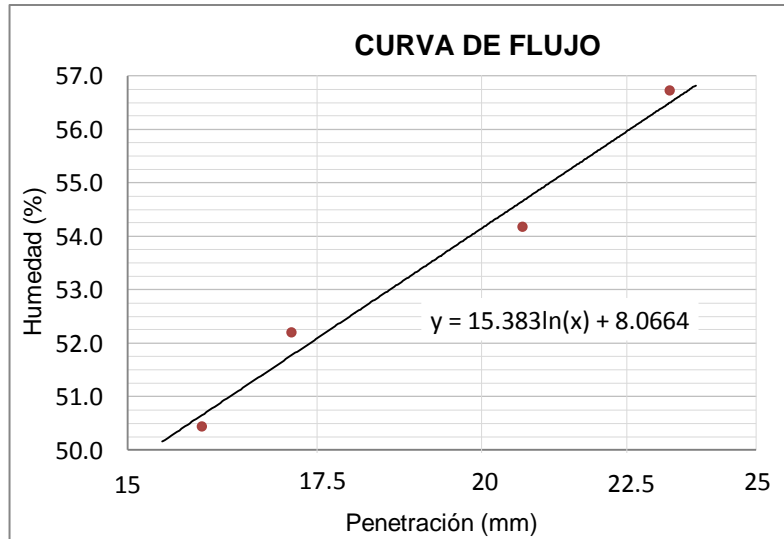
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 5				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.41	17.74	20.48	21.88
Peso del recipiente (g)	14.17	13.66	11.48	12.07
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.14	26.04	25.51	33.21
Recipiente + suelo seco (g)	21.59	20.64	19.16	23.53
Peso del agua (g)	5.55	5.40	6.35	9.68
Peso suelo seco (g)	7.42	6.98	7.68	11.46
Humedad (%)	74.8	77.4	82.7	84.5
Límite líquido (%)	81.6			



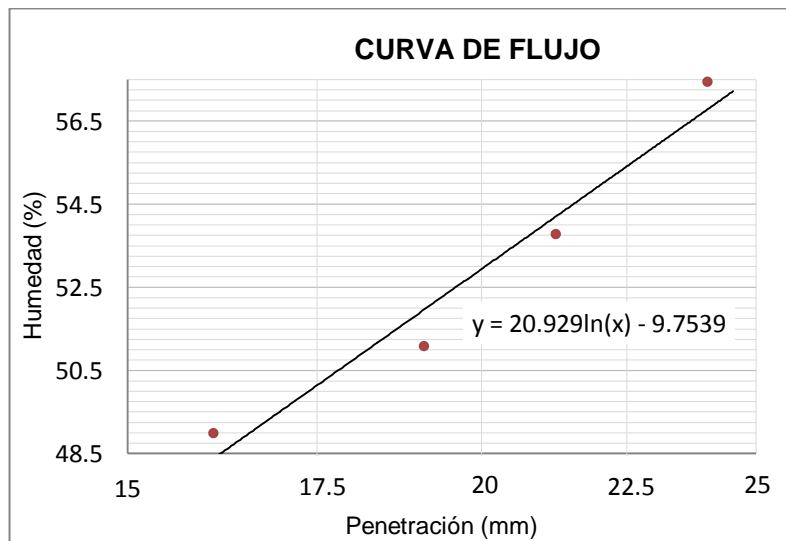
Con Salmuera:

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 1				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.93	17.14	20.67	23.30
Peso del recipiente (g)	11.67	14.45	12.27	14.45
Recipiente + suelo húmedo (g)	30.28	33.72	32.73	29.92
Recipiente + suelo seco (g)	24.04	27.11	25.54	24.32
Peso del agua (g)	6.24	6.61	7.19	5.60
Peso suelo seco (g)	12.37	12.66	13.27	9.87
Humedad (%)	50.4	52.2	54.2	56.7
Límite líquido (%)	54.1			

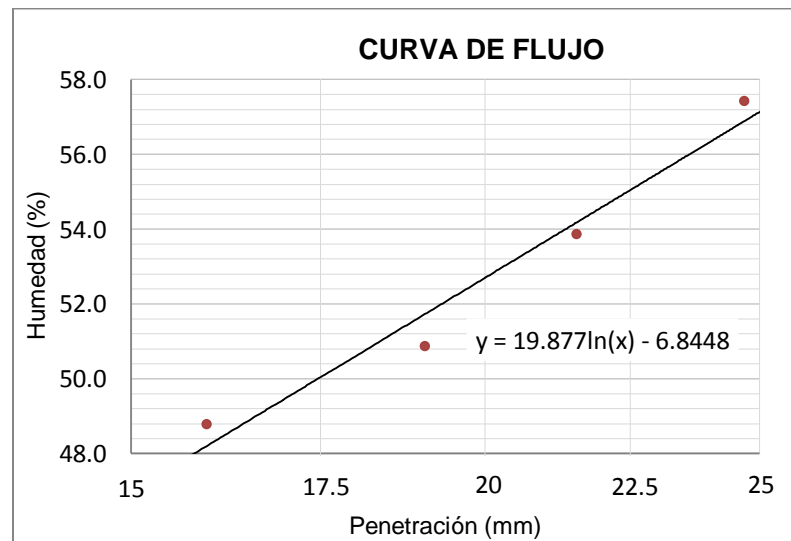
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 2				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.44	19.39	21.70	23.56
Peso del recipiente (g)	11.09	14.75	12.93	13.19
Recipiente + suelo húmedo (g)	31.08	30.80	32.87	28.68
Recipiente + suelo seco (g)	24.50	25.33	25.83	23.05
Peso del agua (g)	6.58	5.47	7.04	5.63
Peso suelo seco (g)	13.41	10.58	12.9	9.86
Humedad (%)	49.1	51.7	54.6	57.1
Límite líquido (%)	53.0			



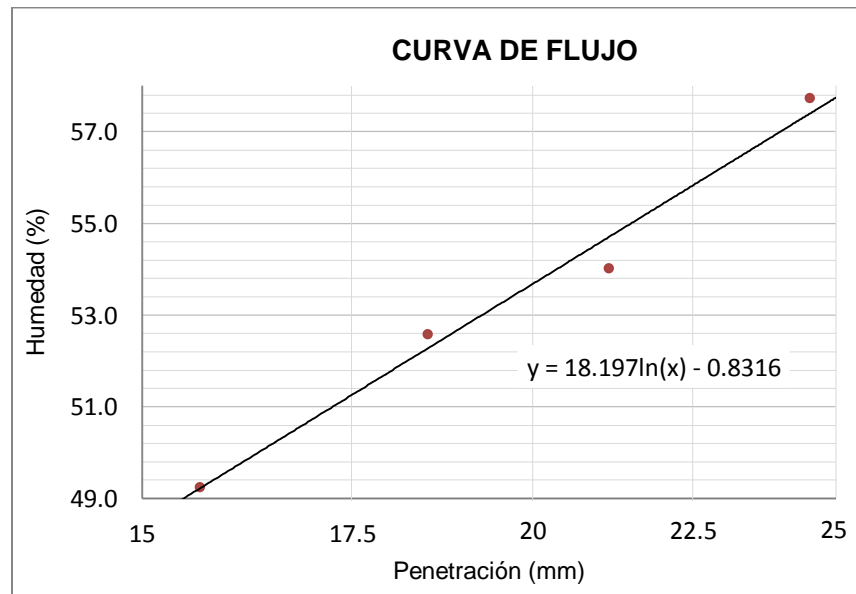
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 3				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.08	19.08	21.24	24.03
Peso del recipiente (g)	11.57	12.09	12.14	14.51
Recipiente + suelo húmedo (g)	31.03	42.67	36.93	26.46
Recipiente + suelo seco (g)	24.63	32.33	28.26	22.10
Peso del agua (g)	6.40	10.34	8.67	4.36
Peso suelo seco (g)	13.06	20.24	16.12	7.59
Humedad (%)	49.0	51.1	53.8	57.4
Límite líquido (%)	52.9			



LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 4				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.95	19.04	21.54	24.68
Peso del recipiente (g)	12.57	13.04	11.64	13.52
Recipiente + suelo húmedo (g)	34.89	32.70	32.32	34.38
Recipiente + suelo seco (g)	27.57	26.07	25.08	26.77
Peso del agua (g)	7.32	6.63	7.24	7.61
Peso suelo seco (g)	15.00	13.03	13.44	13.25
Humedad (%)	48.8	50.9	53.9	57.4
Límite líquido (%)	52.7			



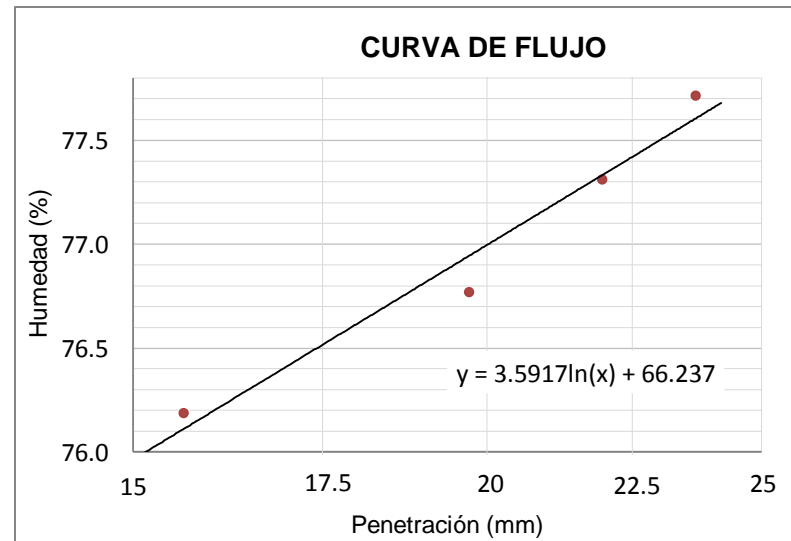
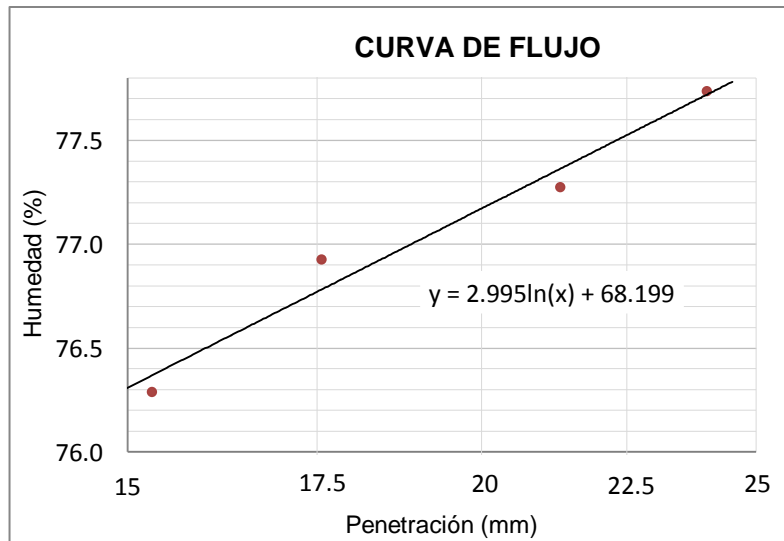
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 5				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.65	18.51	21.15	24.53
Peso del recipiente (g)	11.28	15.31	11.75	12.42
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.16	30.05	30.14	27.20
Recipiente + suelo seco (g)	21.92	24.97	23.69	21.79
Peso del agua (g)	5.24	5.08	6.45	5.41
Peso suelo seco (g)	10.64	9.66	11.94	9.37
Humedad (%)	49.2	52.6	54.0	57.7
Límite líquido (%)	53.9			



Con Kerosene:

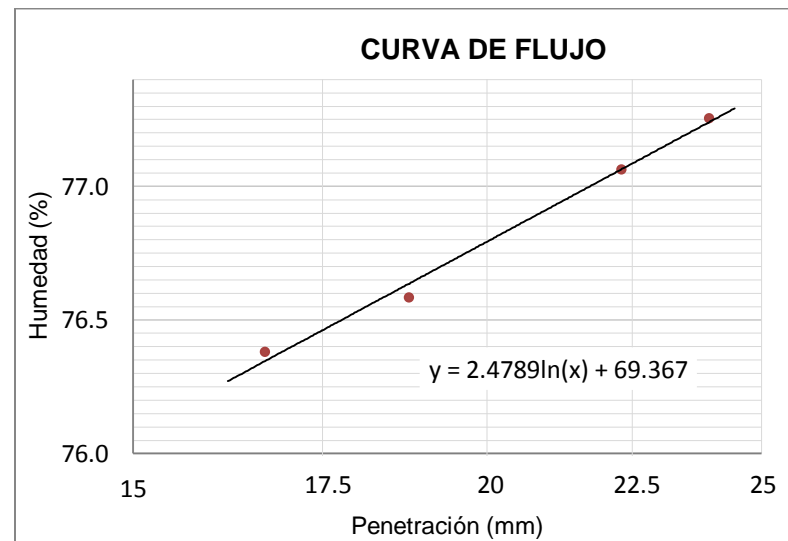
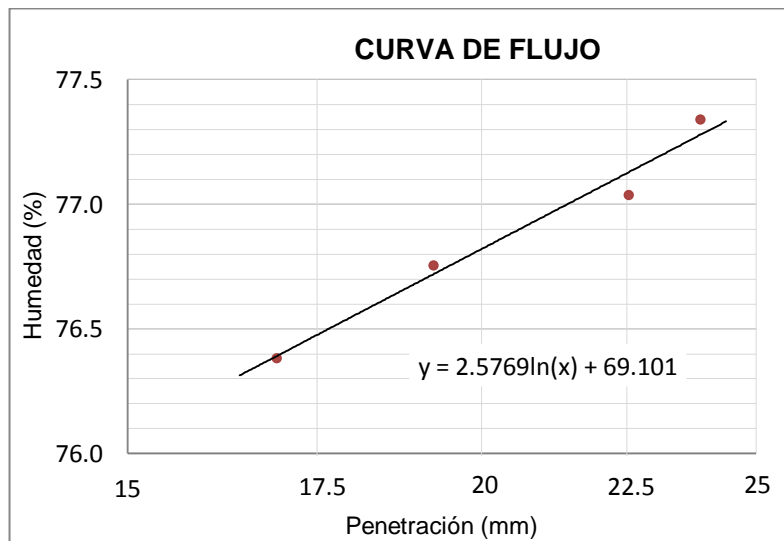
LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 1				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.30	17.56	21.32	24.02
Peso del recipiente (g)	11.11	12.19	15.78	14.33
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.17	35.35	33.10	34.29
Recipiente + suelo seco (g)	20.22	25.28	25.55	25.56
Peso del agua (g)	6.95	10.07	7.55	8.73
Peso suelo seco (g)	9.11	13.09	9.77	11.23
Humedad (%)	76.3	76.9	77.3	77.7
Límite líquido (%)	77.2			

LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 2				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.63	19.71	21.96	23.69
Peso del recipiente (g)	14.05	11.92	15.17	15.06
Recipiente + suelo húmedo (g)	35.51	35.36	34.71	37.31
Recipiente + suelo seco (g)	26.23	25.18	26.19	27.58
Peso del agua (g)	9.28	10.18	8.52	9.73
Peso suelo seco (g)	12.18	13.26	11.02	12.52
Humedad (%)	76.2	76.8	77.3	77.7
Límite líquido (%)	77.0			

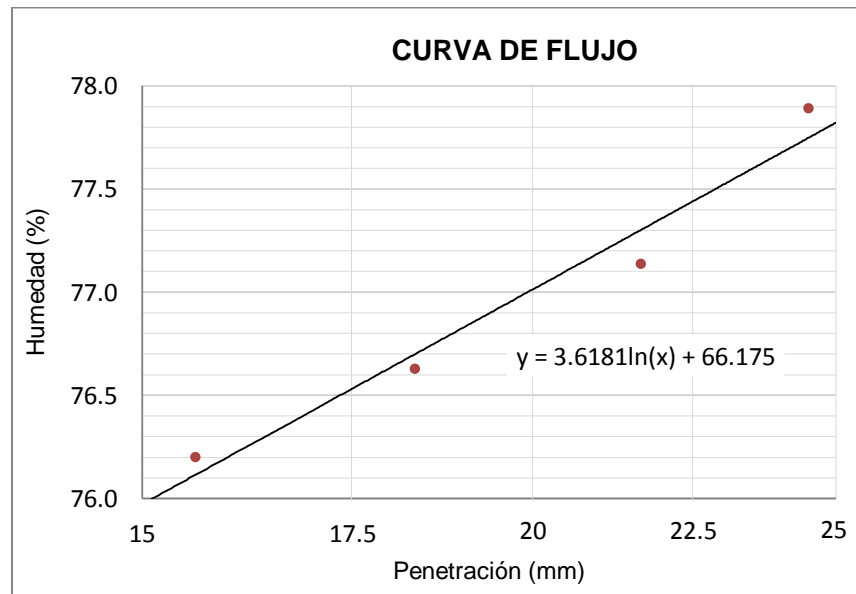


LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 3				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.93	19.23	22.54	23.89
Peso del recipiente (g)	14.15	12.31	15.49	12.03
Recipiente + suelo húmedo (g)	35.81	35.73	39.39	31.91
Recipiente + suelo seco (g)	26.43	25.56	28.99	23.24
Peso del agua (g)	9.38	10.17	10.40	8.67
Peso suelo seco (g)	12.28	13.25	13.50	11.21
Humedad (%)	76.4	76.8	77.0	77.3
Límite líquido (%)	76.8			

LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 4				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.70	18.77	22.30	23.95
Peso del recipiente (g)	15.09	13.18	14.57	11.63
Recipiente + suelo húmedo (g)	37.12	36.86	40.74	36.57
Recipiente + suelo seco (g)	27.58	26.59	29.35	25.70
Peso del agua (g)	9.54	10.27	11.39	10.87
Peso suelo seco (g)	12.49	13.41	14.78	14.07
Humedad (%)	76.4	76.6	77.1	77.3
Límite líquido (%)	76.8			



LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 5				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.60	18.34	21.66	24.50
Peso del recipiente (g)	13.07	14.43	11.17	15.46
Recipiente + suelo húmedo (g)	32.47	31.21	32.09	34.53
Recipiente + suelo seco (g)	24.08	23.93	22.98	26.18
Peso del agua (g)	8.39	7.28	9.11	8.35
Peso suelo seco (g)	11.01	9.50	11.81	10.72
Humedad (%)	76.2	76.6	77.1	77.9
Límite líquido (%)	77.0			



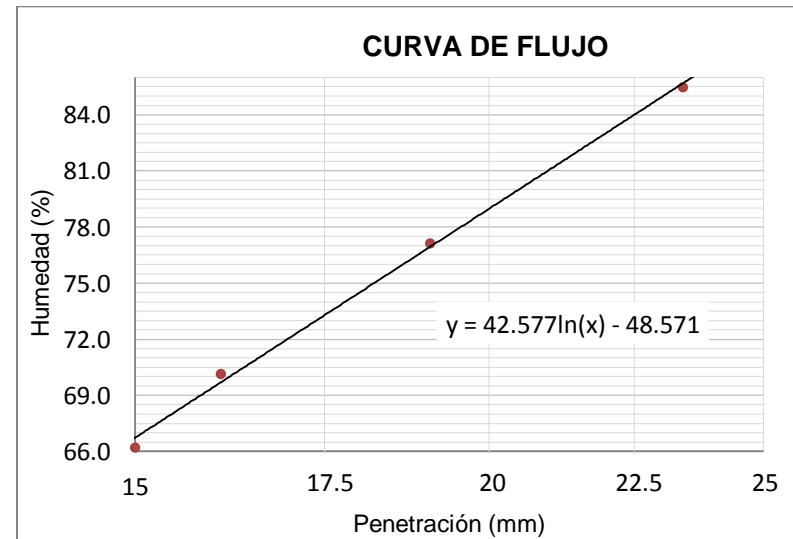
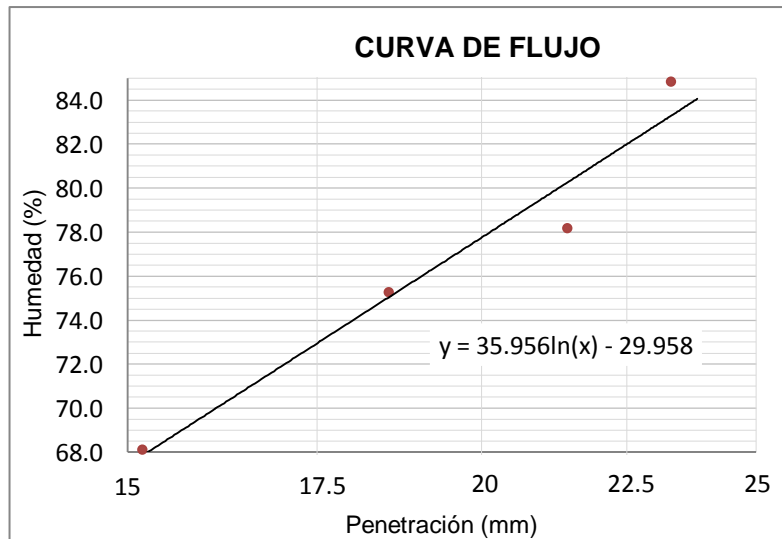


### C.3 Penetrómetro de cono - Suelo 3

Con Agua desionizada:

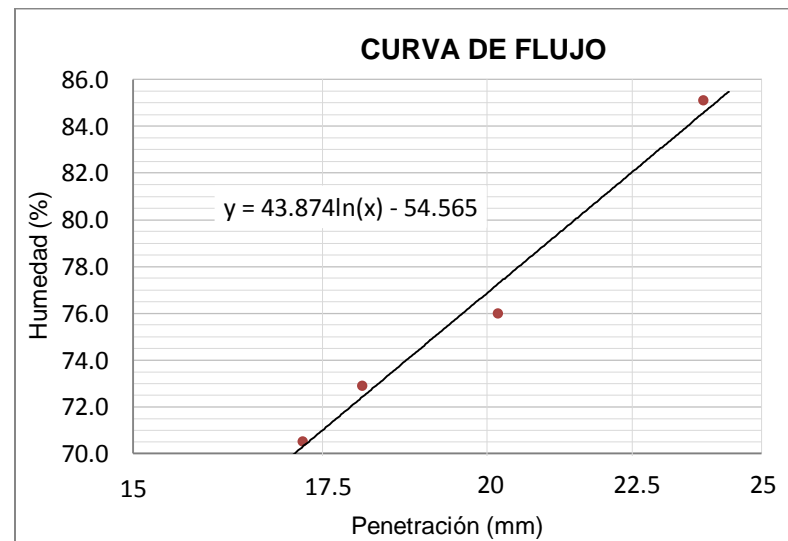
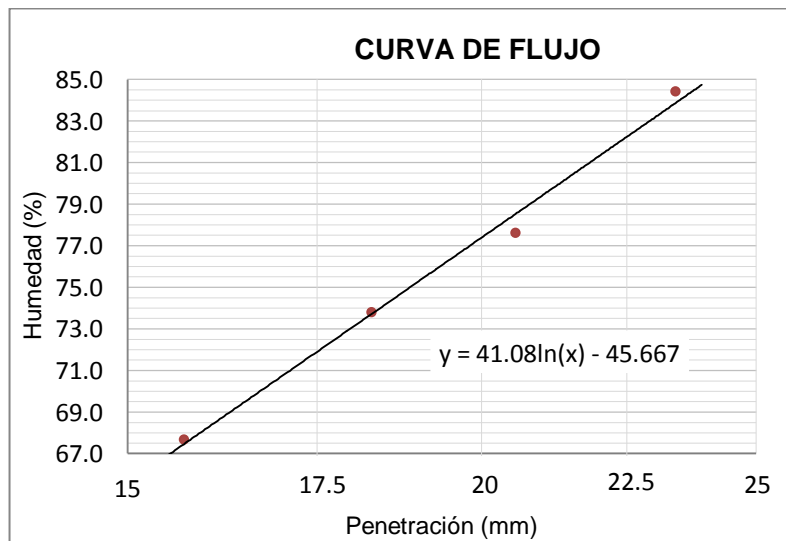
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 1				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.18	18.55	21.44	23.33
Peso del recipiente (g)	11.38	12.38	12.18	13.44
Recipiente + suelo húmedo (g)	24.46	29.54	34.17	36.97
Recipiente + suelo seco (g)	19.16	22.17	24.52	26.17
Peso del agua (g)	5.30	7.37	9.65	10.80
Peso suelo seco (g)	7.78	9.79	12.34	12.73
Humedad (%)	68.1	75.3	78.2	84.8
Límite líquido (%)	77.8			

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 2				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.00	16.08	19.06	23.41
Peso del recipiente (g)	11.58	12.30	15.18	15.42
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.87	25.42	26.11	28.33
Recipiente + suelo seco (g)	21.38	20.01	21.35	22.38
Peso del agua (g)	6.49	5.41	4.76	5.95
Peso suelo seco (g)	9.80	7.71	6.17	6.96
Humedad (%)	66.2	70.2	77.1	85.5
Límite líquido (%)	79.0			

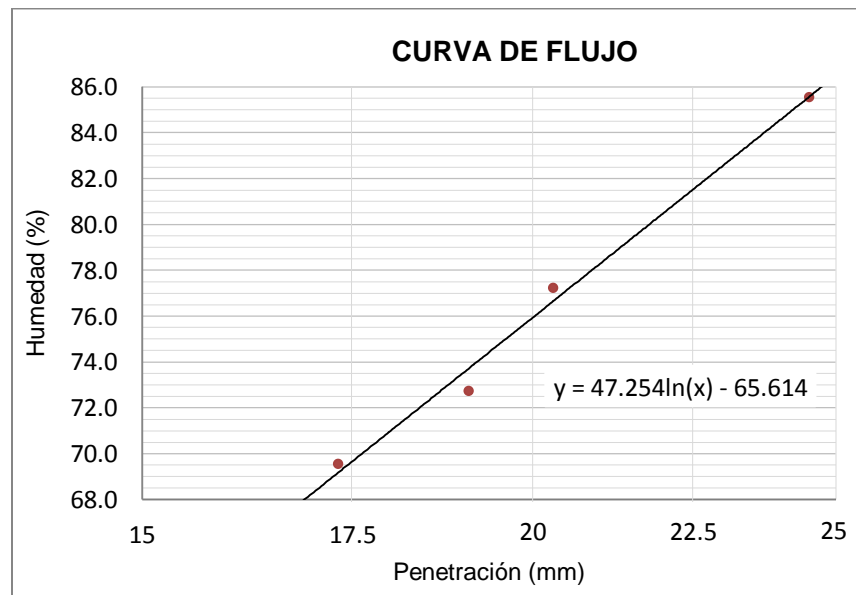


LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 3				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.70	18.29	20.56	23.41
Peso del recipiente (g)	11.86	14.74	14.11	13.03
Recipiente + suelo húmedo (g)	23.90	30.54	31.43	27.84
Recipiente + suelo seco (g)	19.04	23.83	23.86	21.06
Peso del agua (g)	4.86	6.71	7.57	6.78
Peso suelo seco (g)	7.18	9.09	9.75	8.03
Humedad (%)	67.7	73.8	77.6	84.4
Límite líquido (%)	77.4			

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 4				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	17.22	18.07	20.18	23.84
Peso del recipiente (g)	15.23	11.94	12.35	12.23
Recipiente + suelo húmedo (g)	30.68	29.87	33.63	32.00
Recipiente + suelo seco (g)	24.29	22.31	24.44	22.91
Peso del agua (g)	6.39	7.56	9.19	9.09
Peso suelo seco (g)	9.06	10.37	12.09	10.68
Humedad (%)	70.5	72.9	76.0	85.1
Límite líquido (%)	76.9			



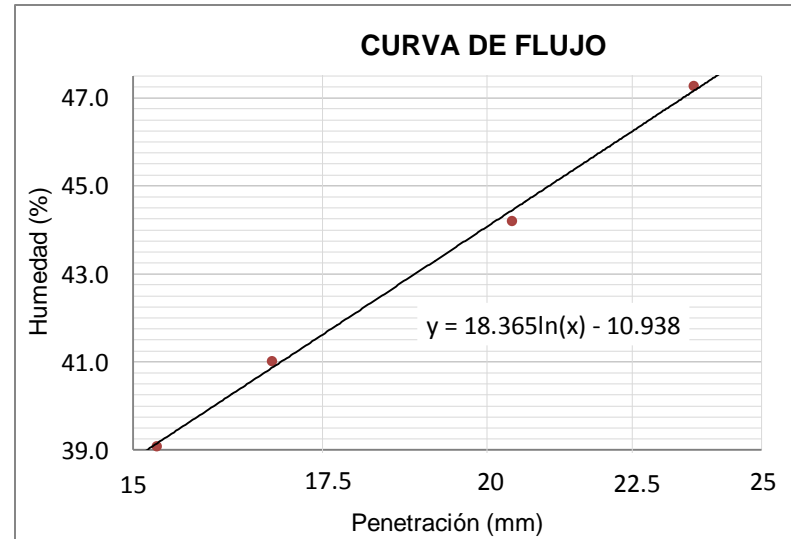
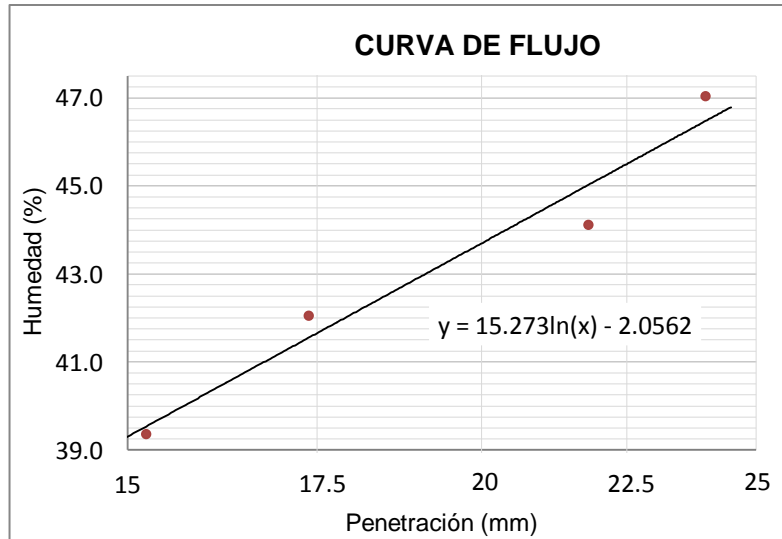
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 5				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	17.33	19.08	20.30	24.51
Peso del recipiente (g)	16.39	15.00	11.58	14.90
Recipiente + suelo húmedo (g)	35.38	36.11	31.91	34.68
Recipiente + suelo seco (g)	27.59	27.22	23.05	25.56
Peso del agua (g)	7.79	8.89	8.86	9.12
Peso suelo seco (g)	11.20	12.22	11.47	10.66
Humedad (%)	69.6	72.7	77.2	85.6
Límite líquido (%)	75.9			



Con Salmuera:

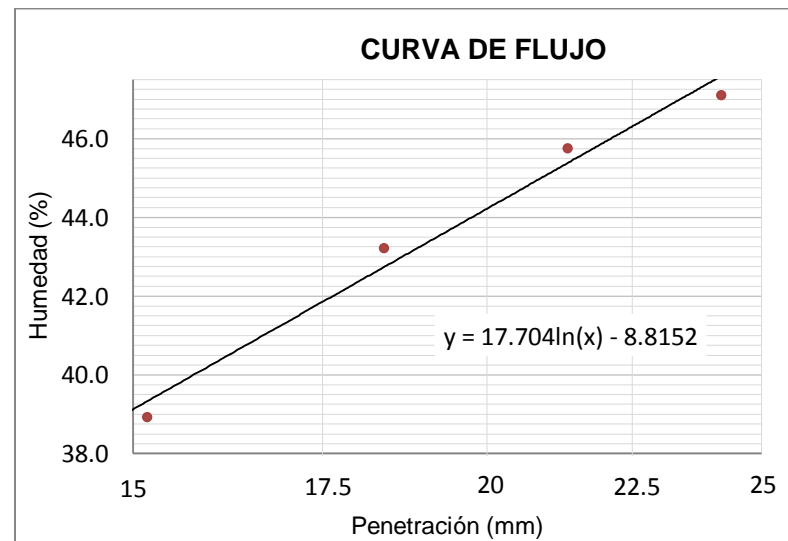
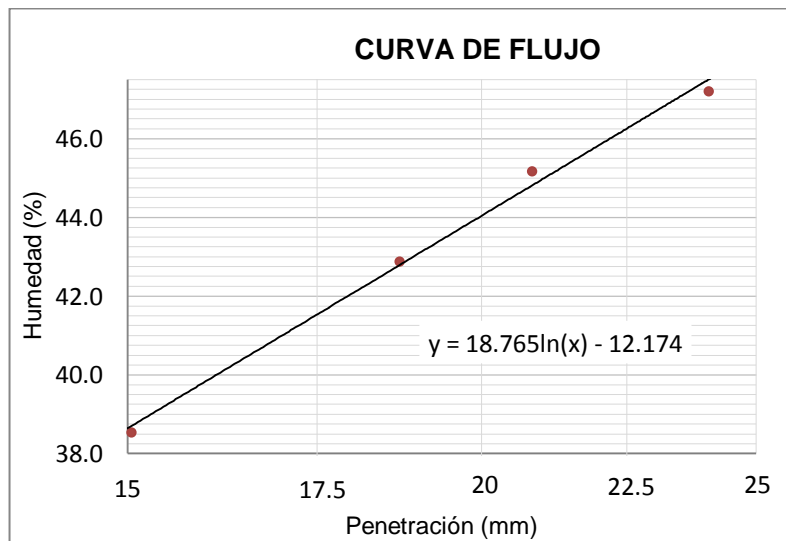
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 1				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.23	17.38	21.81	23.99
Peso del recipiente (g)	12.80	14.35	14.30	12.54
Recipiente + suelo húmedo (g)	28.80	28.74	30.47	33.95
Recipiente + suelo seco (g)	24.28	24.48	25.52	27.10
Peso del agua (g)	4.52	4.26	4.95	6.85
Peso suelo seco (g)	11.48	10.13	11.22	14.56
Humedad (%)	39.4	42.1	44.1	47.0
Límite líquido (%)	43.7			

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 2				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.29	16.79	20.41	23.65
Peso del recipiente (g)	12.18	13.98	14.91	11.97
Recipiente + suelo húmedo (g)	26.34	31.27	29.75	25.21
Recipiente + suelo seco (g)	22.36	26.24	25.20	20.96
Peso del agua (g)	3.98	5.03	4.55	4.25
Peso suelo seco (g)	10.18	12.26	10.29	8.99
Humedad (%)	39.1	41.0	44.2	47.3
Límite líquido (%)	44.1			

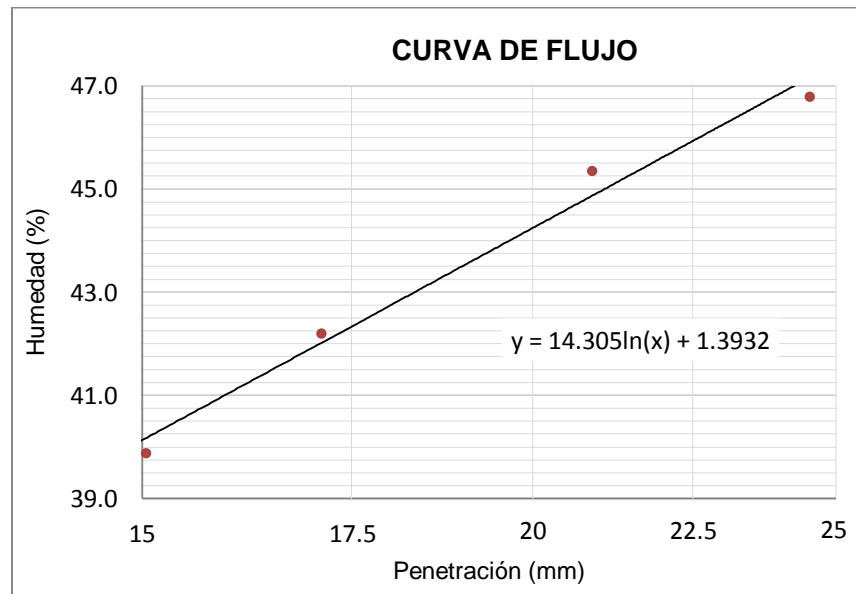


LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 3				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.05	18.71	20.84	24.05
Peso del recipiente (g)	11.21	12.93	13.46	12.00
Recipiente + suelo húmedo (g)	24.58	35.09	27.47	27.56
Recipiente + suelo seco (g)	20.86	28.44	23.11	22.57
Peso del agua (g)	3.72	6.65	4.36	4.99
Peso suelo seco (g)	9.65	15.51	9.65	10.57
Humedad (%)	38.5	42.9	45.2	47.2
Límite líquido (%)	44.0			

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 4				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.17	18.39	21.35	24.19
Peso del recipiente (g)	11.59	13.75	12.33	15.06
Recipiente + suelo húmedo (g)	34.07	28.76	31.41	29.80
Recipiente + suelo seco (g)	27.77	24.23	25.42	25.08
Peso del agua (g)	6.30	4.53	5.99	4.72
Peso suelo seco (g)	16.18	10.48	13.09	10.02
Humedad (%)	38.9	43.2	45.8	47.1
Límite líquido (%)	44.2			



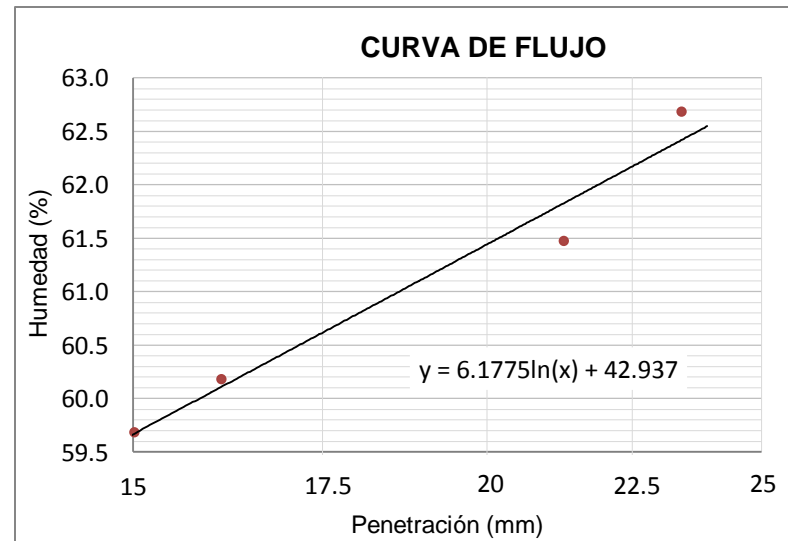
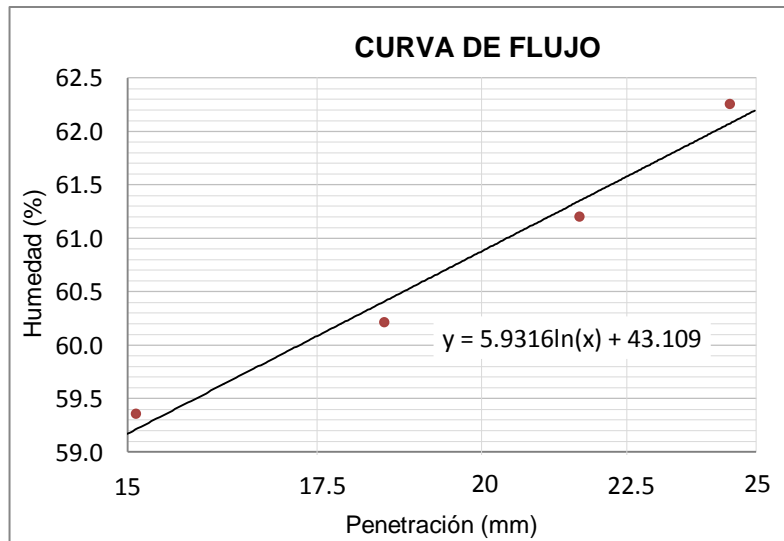
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 5				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.04	17.12	20.89	24.53
Peso del recipiente (g)	11.59	12.06	12.31	13.35
Recipiente + suelo húmedo (g)	31.97	32.48	31.73	31.64
Recipiente + suelo seco (g)	26.16	26.42	25.67	25.81
Peso del agua (g)	5.81	6.06	6.06	5.83
Peso suelo seco (g)	14.57	14.36	13.36	12.46
Humedad (%)	39.9	42.2	45.4	46.8
Límite líquido (%)	44.2			



Con Kerosene:

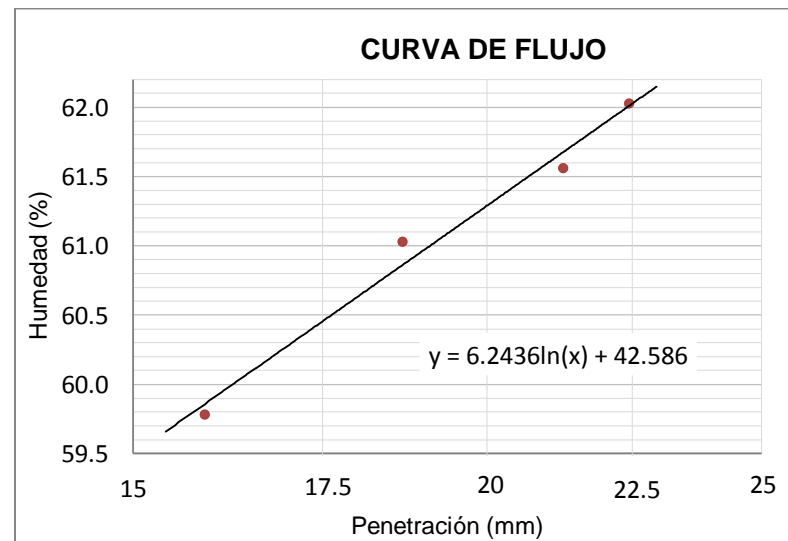
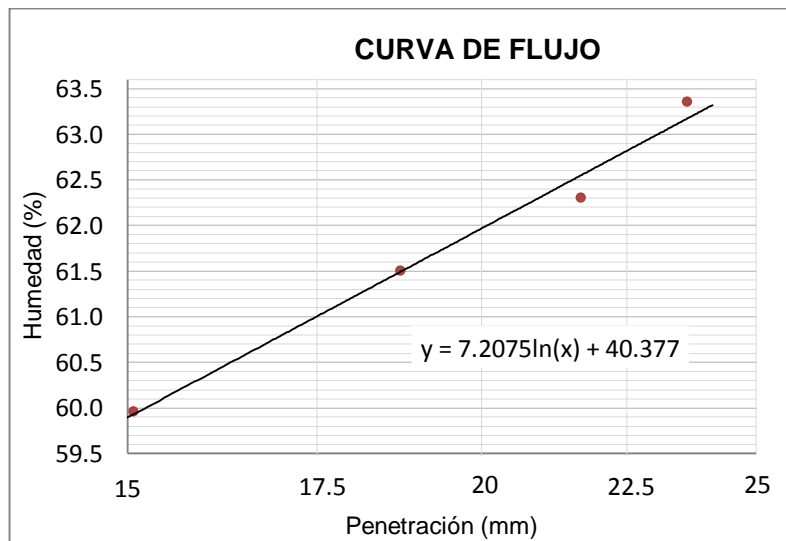
LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 1				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.10	18.48	21.65	24.47
Peso del recipiente (g)	11.29	12.71	12.57	12.49
Recipiente + suelo húmedo (g)	23.72	30.35	27.82	26.12
Recipiente + suelo seco (g)	19.09	23.72	22.03	20.89
Peso del agua (g)	4.63	6.63	5.79	5.23
Peso suelo seco (g)	7.80	11.01	9.46	8.40
Humedad (%)	59.4	60.2	61.2	62.3
Límite líquido (%)	60.9			

LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 2				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.02	16.12	21.29	23.42
Peso del recipiente (g)	12.21	11.74	13.84	13.49
Recipiente + suelo húmedo (g)	32.73	30.85	31.57	27.79
Recipiente + suelo seco (g)	25.06	23.67	24.82	22.28
Peso del agua (g)	7.67	7.18	6.75	5.51
Peso suelo seco (g)	12.85	11.93	10.98	8.79
Humedad (%)	59.7	60.2	61.5	62.7
Límite líquido (%)	61.4			



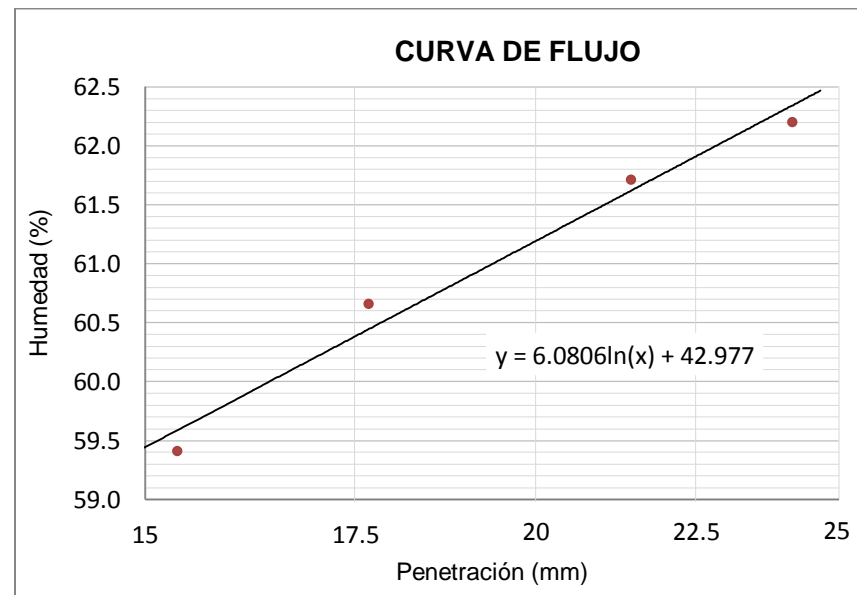
LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 3				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.07	18.72	21.68	23.63
Peso del recipiente (g)	13.03	11.53	14.43	14.48
Recipiente + suelo húmedo (g)	31.73	32.93	26.10	30.44
Recipiente + suelo seco (g)	24.72	24.78	21.62	24.25
Peso del agua (g)	7.01	8.15	4.48	6.19
Peso suelo seco (g)	11.69	13.25	7.19	9.77
Humedad (%)	60.0	61.5	62.3	63.4
Límite líquido (%)	62.0			

LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 4				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.90	18.67	21.27	22.45
Peso del recipiente (g)	12.17	15.30	12.93	11.27
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.03	33.77	28.44	21.98
Recipiente + suelo seco (g)	21.47	26.77	22.53	17.88
Peso del agua (g)	5.56	7.00	5.91	4.10
Peso suelo seco (g)	9.30	11.47	9.60	6.61
Humedad (%)	59.8	61.0	61.6	62.0
Límite líquido (%)	61.3			





LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 5				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.36	17.68	21.45	24.16
Peso del recipiente (g)	12.27	11.80	13.02	12.43
Recipiente + suelo húmedo (g)	30.14	31.16	31.52	30.24
Recipiente + suelo seco (g)	23.48	23.85	24.46	23.41
Peso del agua (g)	6.66	7.31	7.06	6.83
Peso suelo seco (g)	11.21	12.05	11.44	10.98
Humedad (%)	59.4	60.7	61.7	62.2
Límite líquido (%)	61.2			

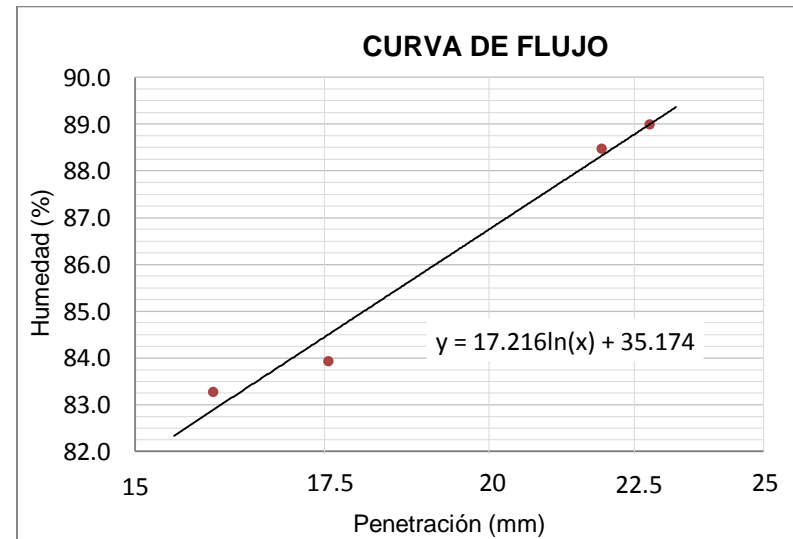
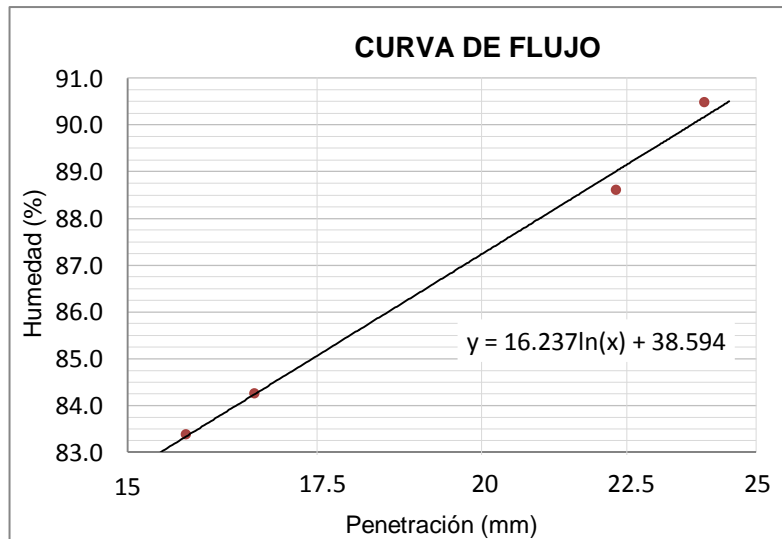


### C.4 Penetrómetro de cono - Suelo 4

Con Agua desionizada:

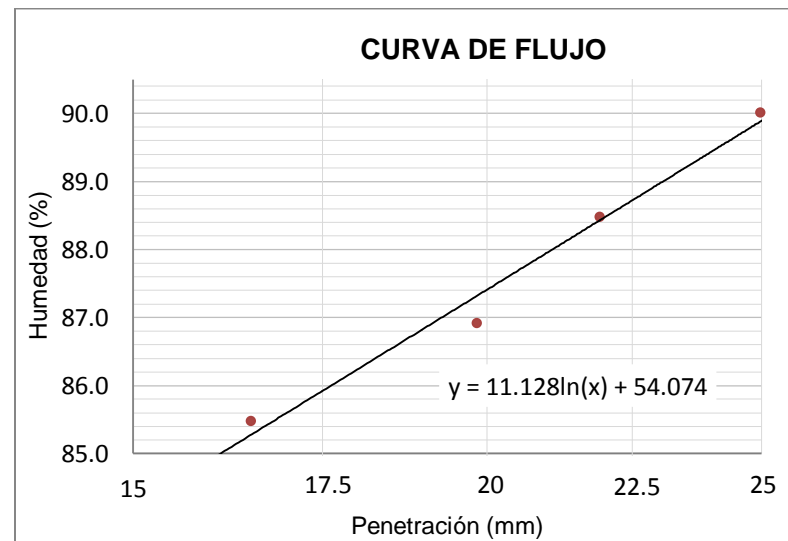
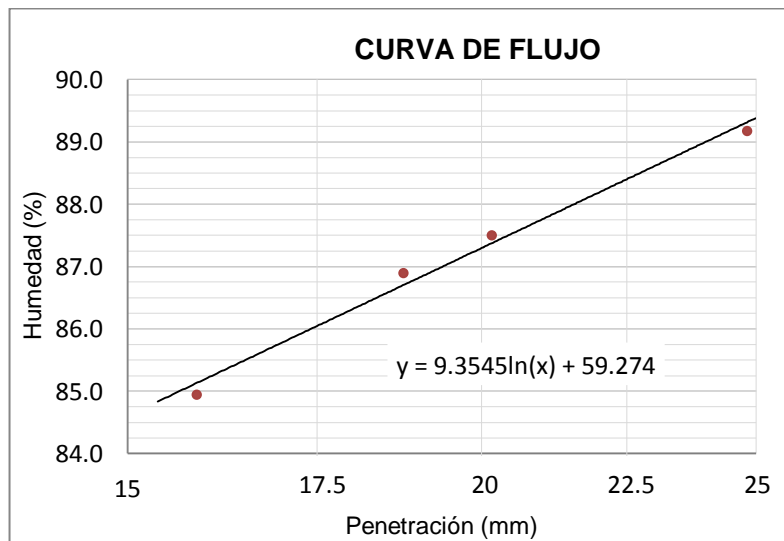
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 1				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.73	16.63	22.3	23.96
Peso del recipiente (g)	12.93	15.01	13.11	13.11
Recipiente + suelo húmedo (g)	24.41	25.31	24.54	27.13
Recipiente + suelo seco (g)	19.19	20.6	19.17	20.47
Peso del agua (g)	5.22	4.71	5.37	6.66
Peso suelo seco (g)	6.26	5.59	6.06	7.36
Humedad (%)	83.4	84.3	88.6	90.5
Límite líquido (%)	87.2			

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 2				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.98	17.55	21.91	22.78
Peso del recipiente (g)	15.63	11.22	11.8	11.34
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.80	23.93	23.09	25.08
Recipiente + suelo seco (g)	22.27	18.13	17.79	18.61
Peso del agua (g)	5.53	5.80	5.30	6.47
Peso suelo seco (g)	6.64	6.91	5.99	7.27
Humedad (%)	83.3	83.9	88.5	89.0
Límite líquido (%)	86.7			

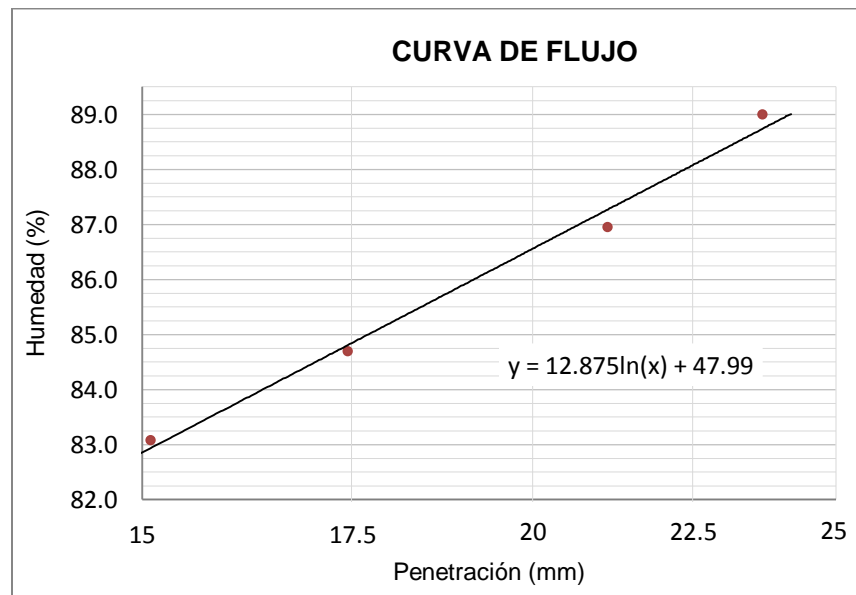


LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 3				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.87	18.77	20.16	24.82
Peso del recipiente (g)	12.79	12.05	12.91	11.21
Recipiente + suelo húmedo (g)	22.50	22.18	26.86	26.59
Recipiente + suelo seco (g)	18.04	17.47	20.35	19.34
Peso del agua (g)	4.46	4.71	6.51	7.25
Peso suelo seco (g)	5.25	5.42	7.44	8.13
Humedad (%)	85.0	86.9	87.5	89.2
Límite líquido (%)	87.3			

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 4				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.51	19.83	21.91	24.97
Peso del recipiente (g)	15.42	12.45	11.80	12.58
Recipiente + suelo húmedo (g)	24.49	23.74	23.09	22.48
Recipiente + suelo seco (g)	20.31	18.49	17.79	17.79
Peso del agua (g)	4.18	5.25	5.30	4.69
Peso suelo seco (g)	4.89	6.04	5.99	5.21
Humedad (%)	85.5	86.9	88.5	90.0
Límite líquido (%)	87.4			



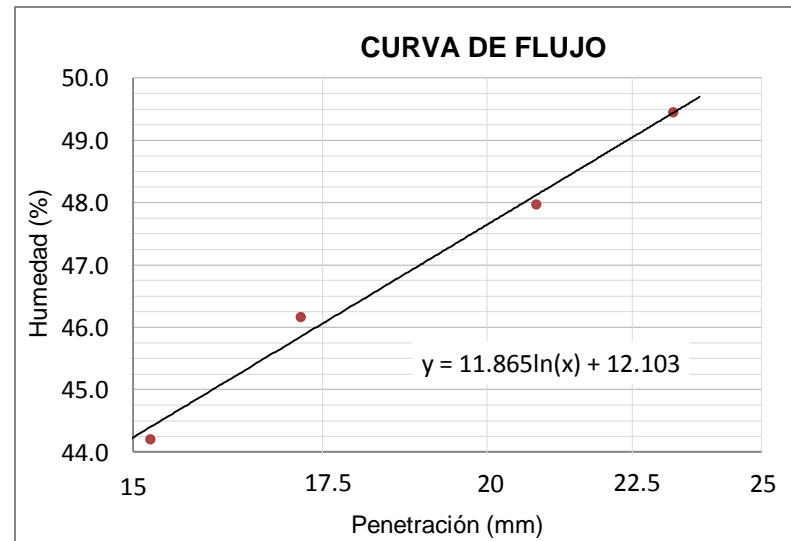
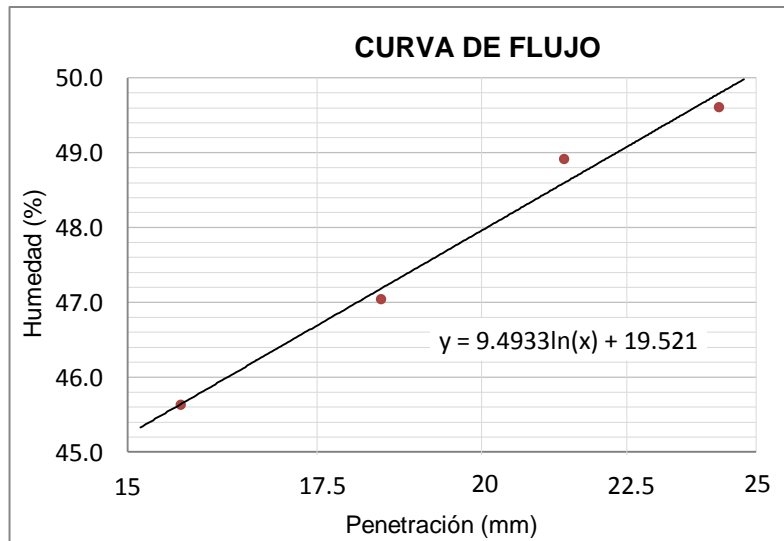
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 5				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.09	17.45	21.13	23.69
Peso del recipiente (g)	12.28	12.02	11.76	13.05
Recipiente + suelo húmedo (g)	31.65	28.92	29.54	31.61
Recipiente + suelo seco (g)	22.86	21.17	21.27	22.87
Peso del agua (g)	8.79	7.75	8.27	8.74
Peso suelo seco (g)	10.58	9.15	9.51	9.82
Humedad (%)	83.1	84.7	87.0	89.0
Límite líquido (%)	86.6			



Con Salmuera:

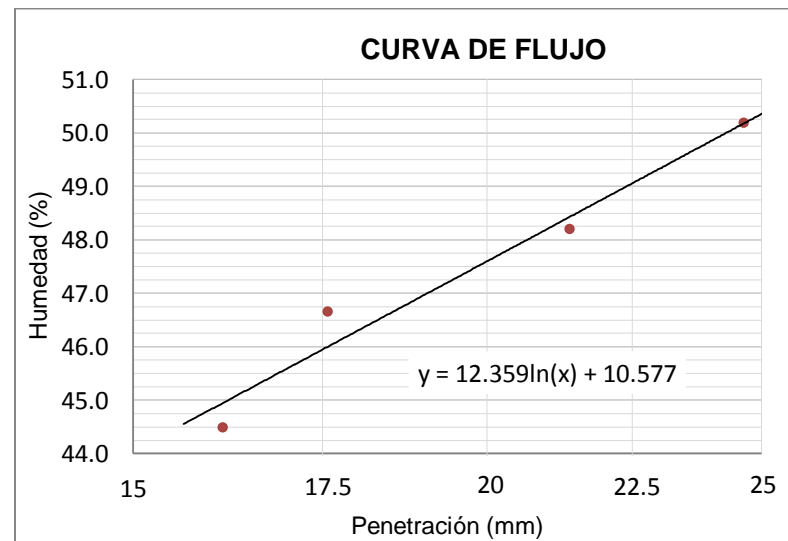
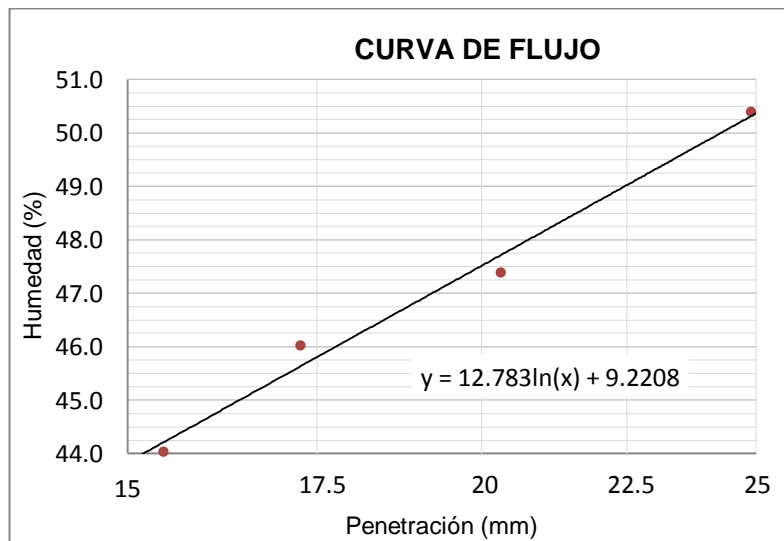
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 1				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.66	18.43	21.39	24.25
Peso del recipiente (g)	12.01	11.33	12.62	13.03
Recipiente + suelo húmedo (g)	33.52	29.49	24.37	26.48
Recipiente + suelo seco (g)	26.78	23.68	20.51	22.02
Peso del agua (g)	6.74	5.81	3.86	4.46
Peso suelo seco (g)	14.77	12.35	7.89	8.99
Humedad (%)	45.6	47.0	48.9	49.6
Límite líquido (%)	48.0			

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 2				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.21	17.19	20.81	23.27
Peso del recipiente (g)	11.33	13.05	12.53	12.64
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.65	26.98	29.68	27.84
Recipiente + suelo seco (g)	21.26	22.58	24.12	22.81
Peso del agua (g)	4.39	4.40	5.56	5.03
Peso suelo seco (g)	9.93	9.53	11.59	10.17
Humedad (%)	44.2	46.2	48.0	49.5
Límite líquido (%)	47.6			

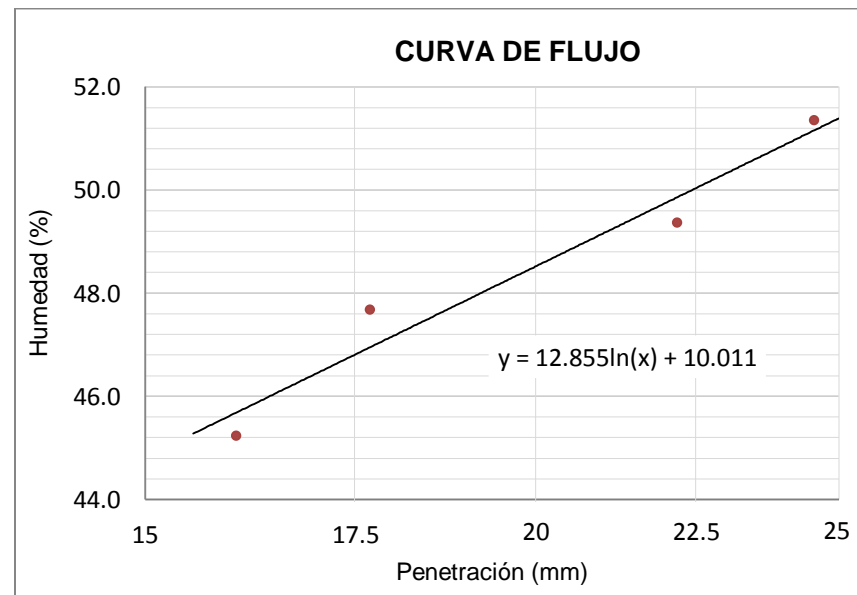


LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 3				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.44	17.26	20.31	24.89
Peso del recipiente (g)	14.99	12.14	11.55	11.57
Recipiente + suelo húmedo (g)	32.88	29.24	36.68	30.13
Recipiente + suelo seco (g)	27.41	23.85	28.60	23.91
Peso del agua (g)	5.47	5.39	8.08	6.22
Peso suelo seco (g)	12.42	11.71	17.05	12.34
Humedad (%)	44.0	46.0	47.4	50.4
Límite líquido (%)	47.5			

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 4				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.13	17.57	21.38	24.63
Peso del recipiente (g)	11.07	11.25	12.17	12.48
Recipiente + suelo húmedo (g)	24.45	22.00	27.42	28.31
Recipiente + suelo seco (g)	20.33	18.58	22.46	23.02
Peso del agua (g)	4.12	3.42	4.96	5.29
Peso suelo seco (g)	9.26	7.33	10.29	10.54
Humedad (%)	44.5	46.7	48.2	50.2
Límite líquido (%)	47.6			



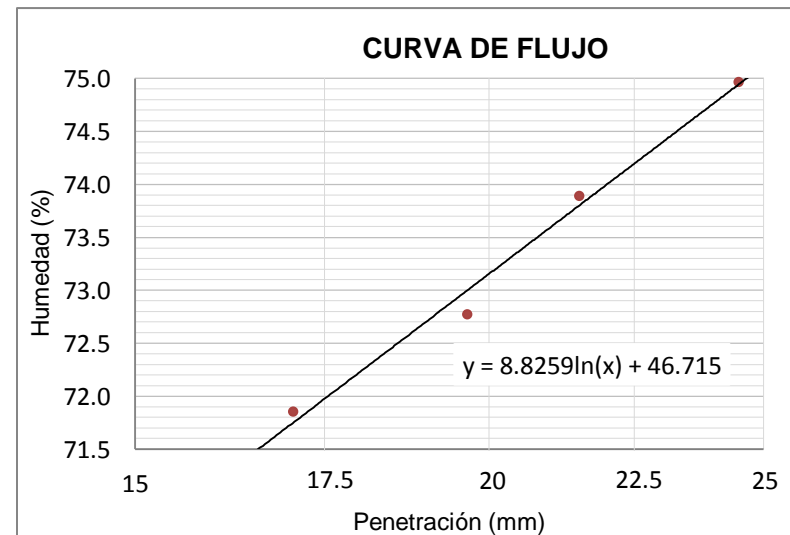
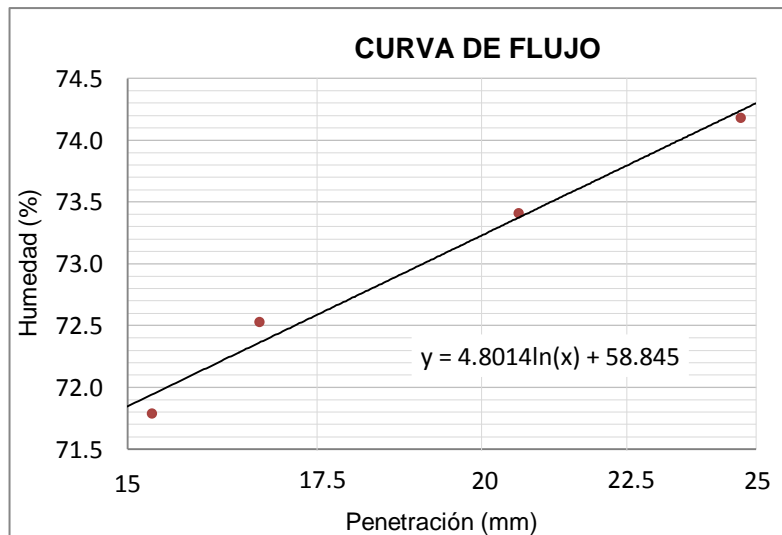
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 5				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.04	17.70	22.19	24.55
Peso del recipiente (g)	12.16	14.98	14.85	12.32
Recipiente + suelo húmedo (g)	33.51	28.36	31.40	28.47
Recipiente + suelo seco (g)	26.86	24.04	25.93	22.99
Peso del agua (g)	6.65	4.32	5.47	5.48
Peso suelo seco (g)	14.70	9.06	11.08	10.67
Humedad (%)	45.2	47.7	49.4	51.4
Límite líquido (%)	48.5			



Con Kerosene:

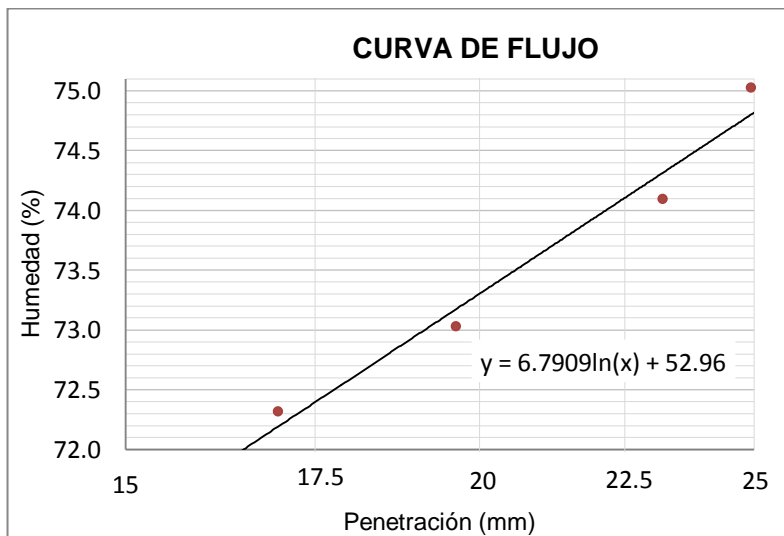
LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 1				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.30	16.70	20.61	24.68
Peso del recipiente (g)	15.20	13.87	13.04	12.24
Recipiente + suelo húmedo (g)	31.40	30.64	29.41	31.47
Recipiente + suelo seco (g)	24.63	23.59	22.48	23.28
Peso del agua (g)	6.77	7.05	6.93	8.19
Peso suelo seco (g)	9.43	9.72	9.44	11.04
Humedad (%)	71.8	72.5	73.4	74.2
Límite líquido (%)	73.2			

LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 2				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	17.06	19.65	21.52	24.49
Peso del recipiente (g)	14.78	12.29	13.18	15.09
Recipiente + suelo húmedo (g)	35.54	31.14	31.23	30.12
Recipiente + suelo seco (g)	26.86	23.20	23.56	23.68
Peso del agua (g)	8.68	7.94	7.67	6.44
Peso suelo seco (g)	12.08	10.91	10.38	8.59
Humedad (%)	71.9	72.8	73.9	75.0
Límite líquido (%)	73.2			

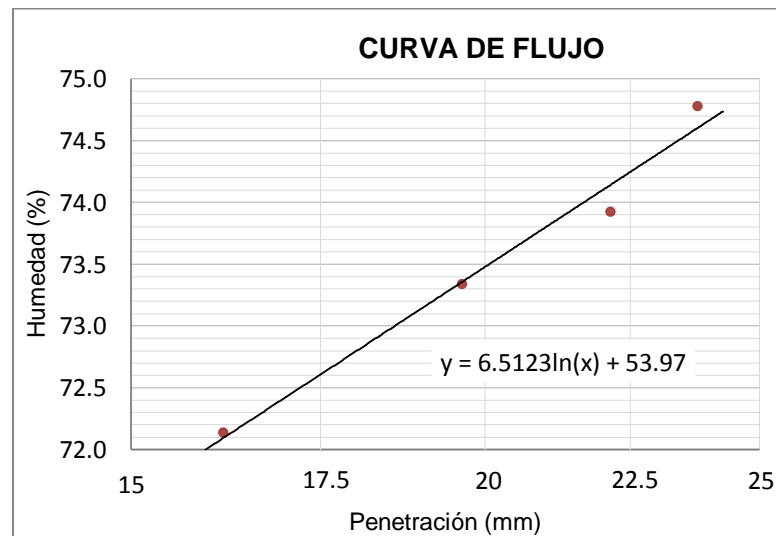




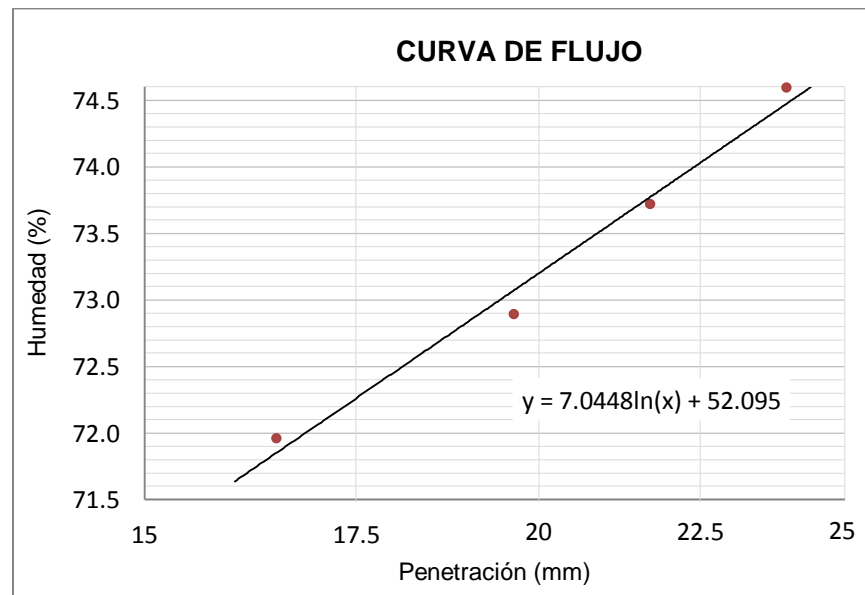
LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 3				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.98	19.62	23.20	24.93
Peso del recipiente (g)	13.22	12.48	12.35	11.72
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.85	30.51	31.17	27.84
Recipiente + suelo seco (g)	21.71	22.90	23.16	20.93
Peso del agua (g)	6.14	7.61	8.01	6.91
Peso suelo seco (g)	8.49	10.42	10.81	9.21
Humedad (%)	72.3	73.0	74.1	75.0
Límite líquido (%)	73.3			



LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 4				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.17	19.63	22.14	23.76
Peso del recipiente (g)	15.20	11.95	15.50	15.07
Recipiente + suelo húmedo (g)	32.81	26.06	34.18	33.02
Recipiente + suelo seco (g)	25.43	20.09	26.24	25.34
Peso del agua (g)	7.38	5.97	7.94	7.68
Peso suelo seco (g)	10.23	8.14	10.74	10.27
Humedad (%)	72.1	73.3	73.9	74.8
Límite líquido (%)	73.5			



LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 5				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.52	19.64	21.70	23.97
Peso del recipiente (g)	14.07	12.13	11.78	15.14
Recipiente + suelo húmedo (g)	30.63	29.16	31.81	29.23
Recipiente + suelo seco (g)	23.70	21.98	23.31	23.21
Peso del agua (g)	6.93	7.18	8.50	6.02
Peso suelo seco (g)	9.63	9.85	11.53	8.07
Humedad (%)	72.0	72.9	73.7	74.6
Límite líquido (%)	73.2			

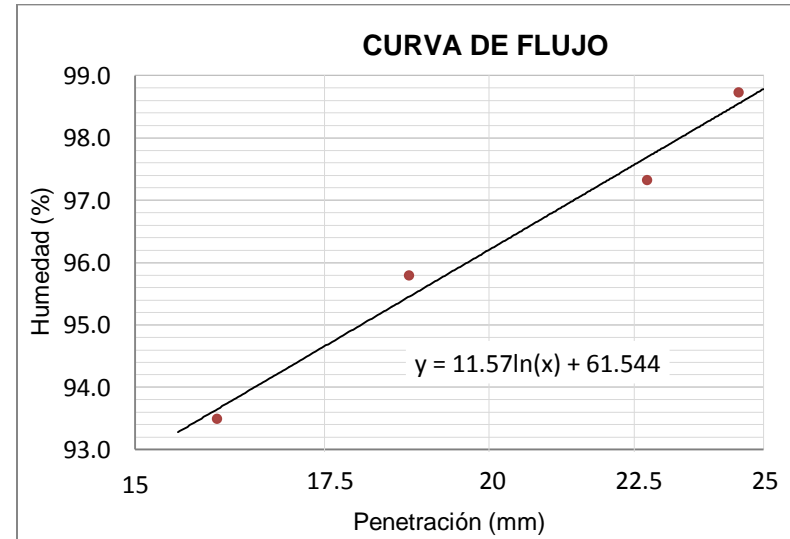
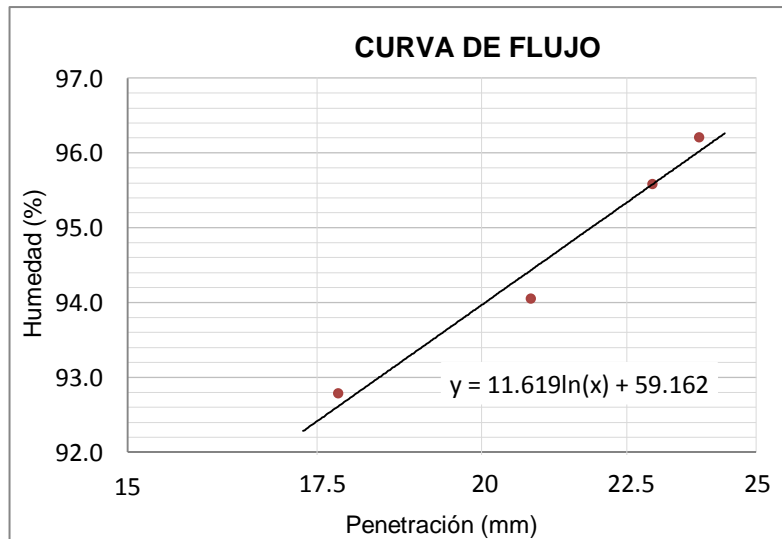


### C.5 Penetrómetro de cono - Suelo 5

Con Agua desionizada:

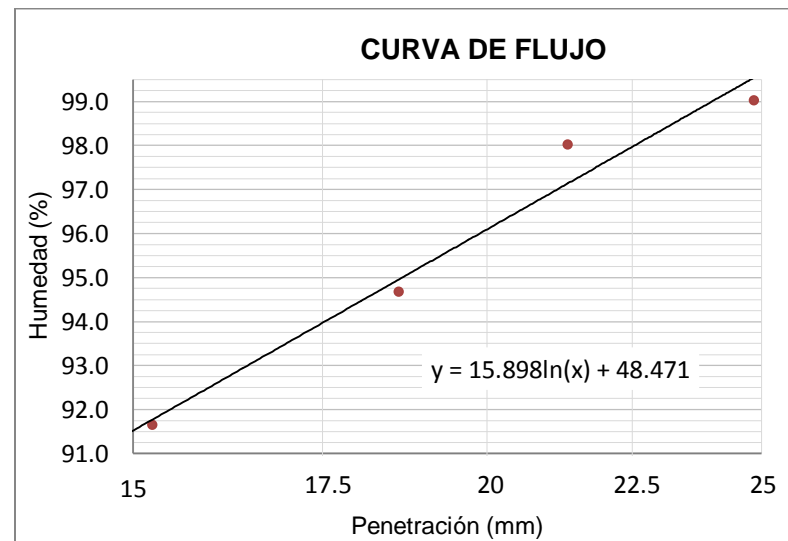
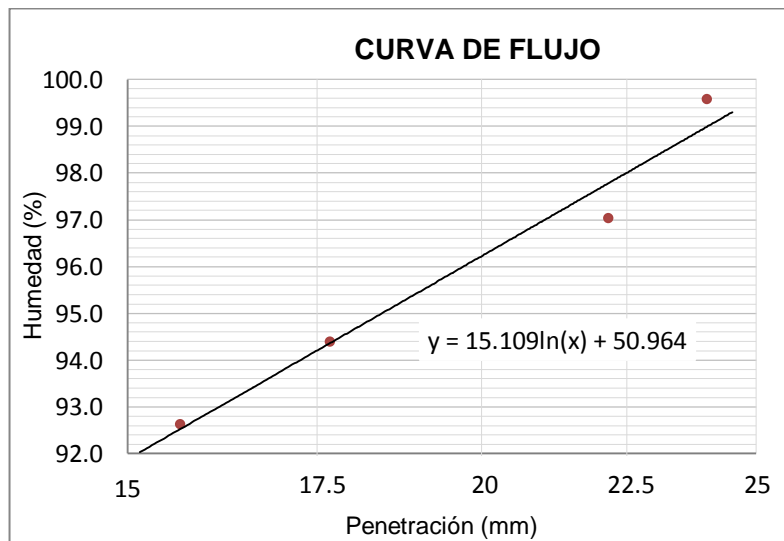
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 1				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	17.80	20.82	22.97	23.87
Peso del recipiente (g)	12.82	14.18	12.12	11.49
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.26	31.8	27.2	32.23
Recipiente + suelo seco (g)	20.31	23.26	19.83	22.06
Peso del agua (g)	6.95	8.54	7.37	10.17
Peso suelo seco (g)	7.49	9.08	7.71	10.57
Humedad (%)	92.8	94.1	95.6	96.2
Límite líquido (%)	94.0			

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 2				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.03	18.74	22.74	24.49
Peso del recipiente (g)	11.32	12.07	11.32	12.07
Recipiente + suelo húmedo (g)	26.49	32.08	26.79	32.38
Recipiente + suelo seco (g)	19.16	22.29	19.16	22.29
Peso del agua (g)	7.33	9.79	7.63	10.09
Peso suelo seco (g)	7.84	10.22	7.84	10.22
Humedad (%)	93.5	95.8	97.3	98.7
Límite líquido (%)	96.2			

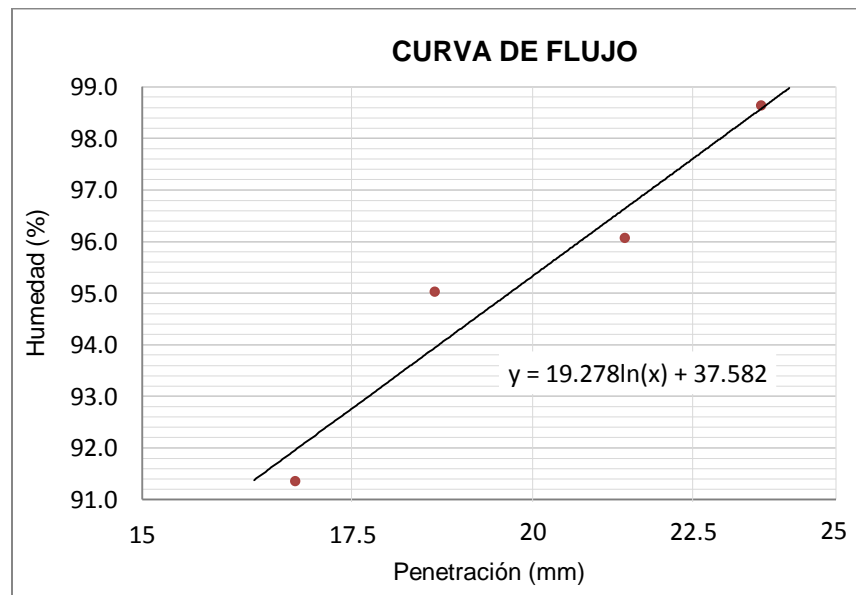


LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 3				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.65	17.68	22.17	24.02
Peso del recipiente (g)	11.57	13.83	14.67	15.22
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.42	32.94	35.95	29.67
Recipiente + suelo seco (g)	18.76	23.66	25.47	22.46
Peso del agua (g)	6.66	9.28	10.48	7.21
Peso suelo seco (g)	7.19	9.83	10.80	7.24
Humedad (%)	92.6	94.4	97.0	99.6
Límite líquido (%)	96.2			

LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 4				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.24	18.61	21.35	24.84
Peso del recipiente (g)	12.53	13.83	14.02	12.00
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.85	28.12	27.11	34.61
Recipiente + suelo seco (g)	19.48	21.17	20.63	23.36
Peso del agua (g)	6.37	6.95	6.48	11.25
Peso suelo seco (g)	6.95	7.34	6.61	11.36
Humedad (%)	91.7	94.7	98.0	99.0
Límite líquido (%)	96.1			



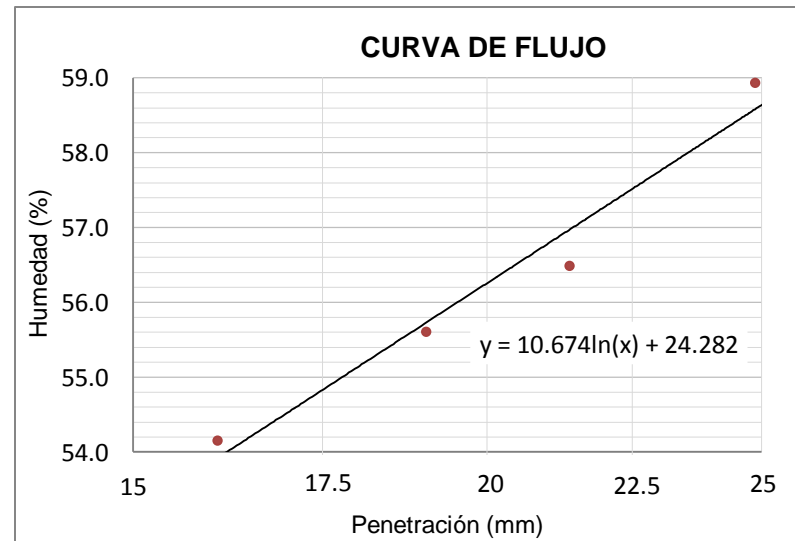
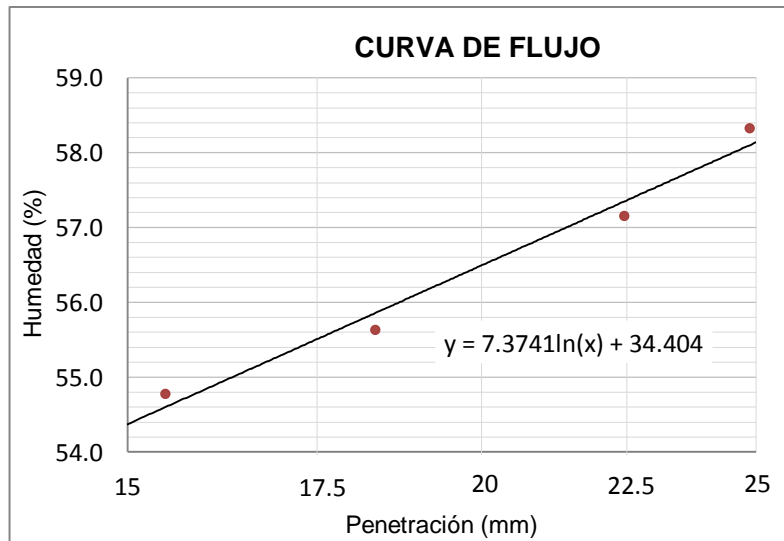
LÍMITE LÍQUIDO: AGUA DESIONIZADA No 5				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.79	18.61	21.40	23.66
Peso del recipiente (g)	13.99	11.55	12.22	14.32
Recipiente + suelo húmedo (g)	29.72	24.13	29.69	31.94
Recipiente + suelo seco (g)	22.21	18.00	21.13	23.19
Peso del agua (g)	7.51	6.13	8.56	8.75
Peso suelo seco (g)	8.22	6.45	8.91	8.87
Humedad (%)	91.4	95.0	96.1	98.6
Límite líquido (%)	95.3			



Con Salmuera:

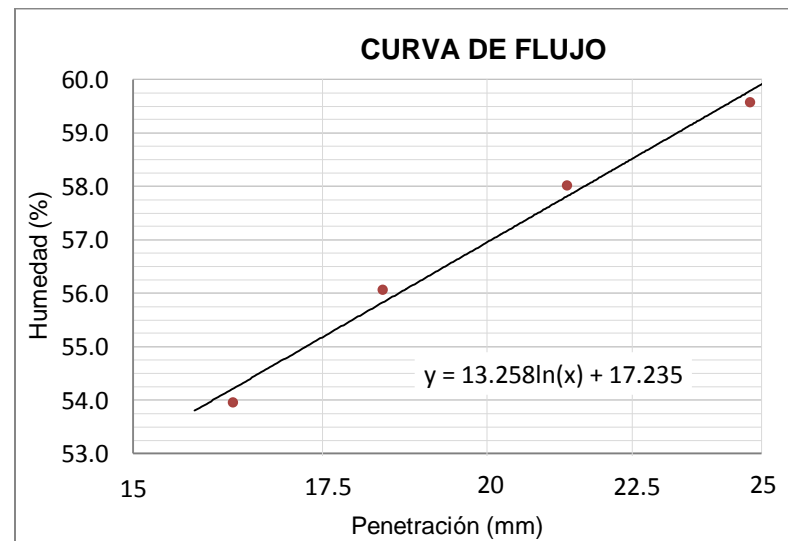
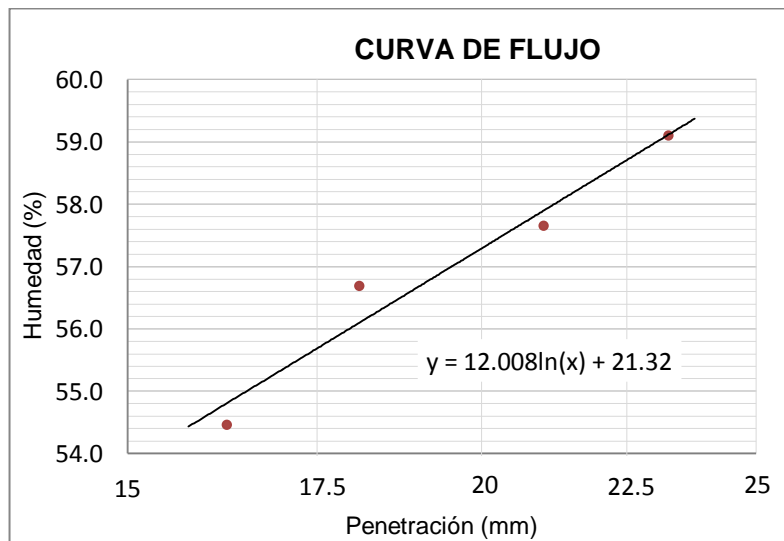
LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 1				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.47	18.34	22.46	24.87
Peso del recipiente (g)	11.52	11.43	12.36	12.31
Recipiente + suelo húmedo (g)	26.89	28.41	29.38	24.85
Recipiente + suelo seco (g)	21.45	22.34	23.19	20.23
Peso del agua (g)	5.44	6.07	6.19	4.62
Peso suelo seco (g)	9.93	10.91	10.83	7.92
Humedad (%)	54.8	55.6	57.2	58.3
Límite líquido (%)	56.5			

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 2				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.07	19.03	21.38	24.86
Peso del recipiente (g)	15.07	13.00	11.54	12.03
Recipiente + suelo húmedo (g)	30.64	28.53	30.82	22.79
Recipiente + suelo seco (g)	25.17	22.98	23.86	18.80
Peso del agua (g)	5.47	5.55	6.96	3.99
Peso suelo seco (g)	10.10	9.98	12.32	6.77
Humedad (%)	54.2	55.6	56.5	58.9
Límite líquido (%)	56.3			

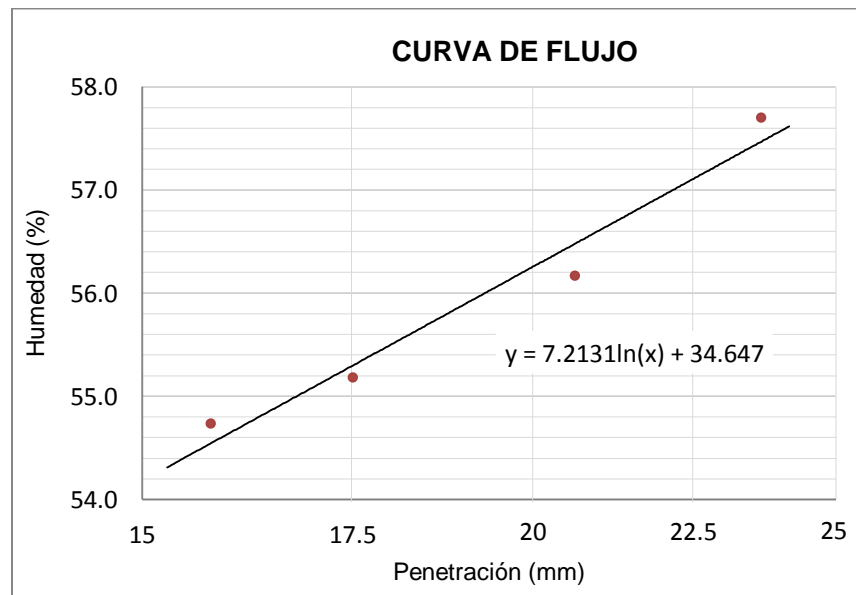


LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 3				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.26	18.11	21.03	23.28
Peso del recipiente (g)	12.96	14.38	12.49	12.08
Recipiente + suelo húmedo (g)	28.02	29.25	26.38	28.50
Recipiente + suelo seco (g)	22.71	23.87	21.30	22.40
Peso del agua (g)	5.31	5.38	5.08	6.10
Peso suelo seco (g)	9.75	9.49	8.81	10.32
Humedad (%)	54.5	56.7	57.7	59.1
Límite líquido (%)	57.3			

LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 4				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.27	18.37	21.34	24.76
Peso del recipiente (g)	15.65	13.72	12.41	12.68
Recipiente + suelo húmedo (g)	29.23	27.47	23.44	21.76
Recipiente + suelo seco (g)	24.47	22.53	19.39	18.37
Peso del agua (g)	4.76	4.94	4.05	3.39
Peso suelo seco (g)	8.82	8.81	6.98	5.69
Humedad (%)	54.0	56.1	58.0	59.6
Límite líquido (%)	57.0			



LÍMITE LÍQUIDO: SALMUERA No 5				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.78	17.52	20.63	23.66
Peso del recipiente (g)	15.25	12.47	11.26	12.31
Recipiente + suelo húmedo (g)	31.42	31.03	25.94	24.80
Recipiente + suelo seco (g)	25.70	24.43	20.66	20.23
Peso del agua (g)	5.72	6.60	5.28	4.57
Peso suelo seco (g)	10.45	11.96	9.40	7.92
Humedad (%)	54.7	55.2	56.2	57.7
Límite líquido (%)	56.3			

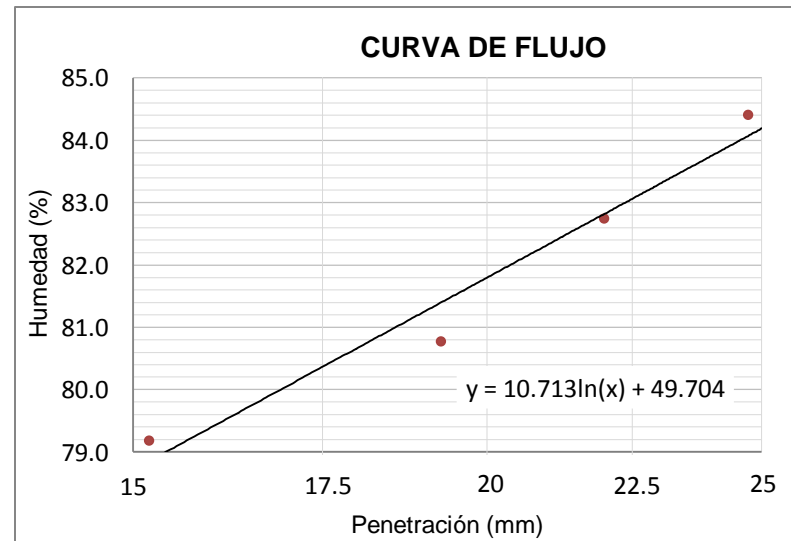
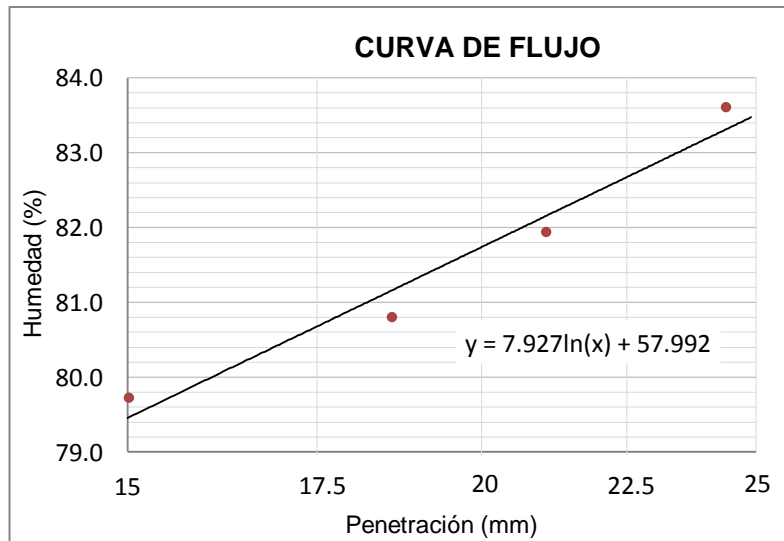




Con Kerosene:

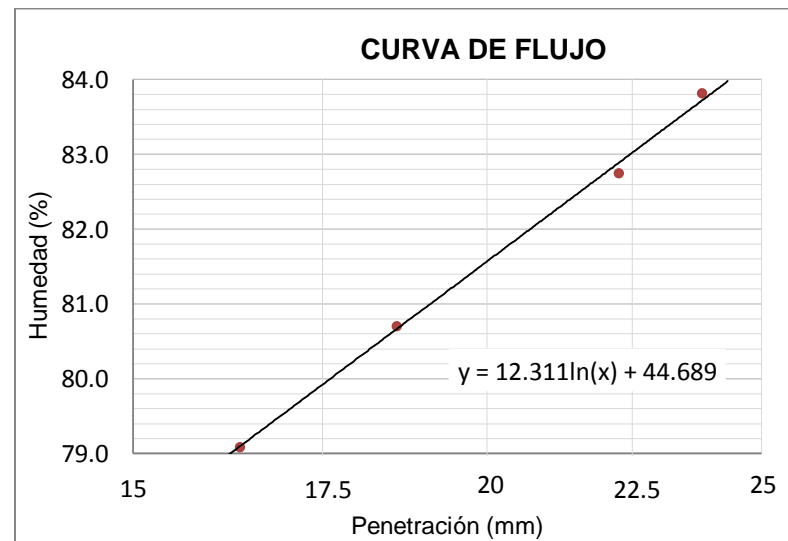
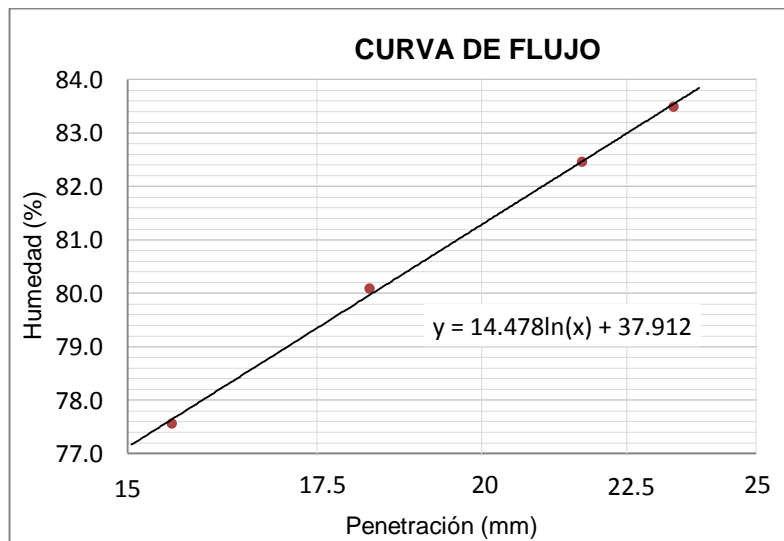
LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 1				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.02	18.59	21.08	24.39
Peso del recipiente (g)	11.51	12.25	15.40	13.04
Recipiente + suelo húmedo (g)	24.72	25.63	28.10	30.63
Recipiente + suelo seco (g)	18.86	19.65	22.38	22.62
Peso del agua (g)	5.86	5.98	5.72	8.01
Peso suelo seco (g)	7.35	7.40	6.98	9.58
Humedad (%)	79.7	80.8	81.9	83.6
Límite líquido (%)	81.7			

LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 2				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.20	19.26	21.99	24.72
Peso del recipiente (g)	14.36	16.36	13.44	12.59
Recipiente + suelo húmedo (g)	31.15	27.93	24.88	24.78
Recipiente + suelo seco (g)	23.73	22.76	19.70	19.20
Peso del agua (g)	7.42	5.17	5.18	5.58
Peso suelo seco (g)	9.37	6.40	6.26	6.61
Humedad (%)	79.2	80.8	82.7	84.4
Límite líquido (%)	81.8			

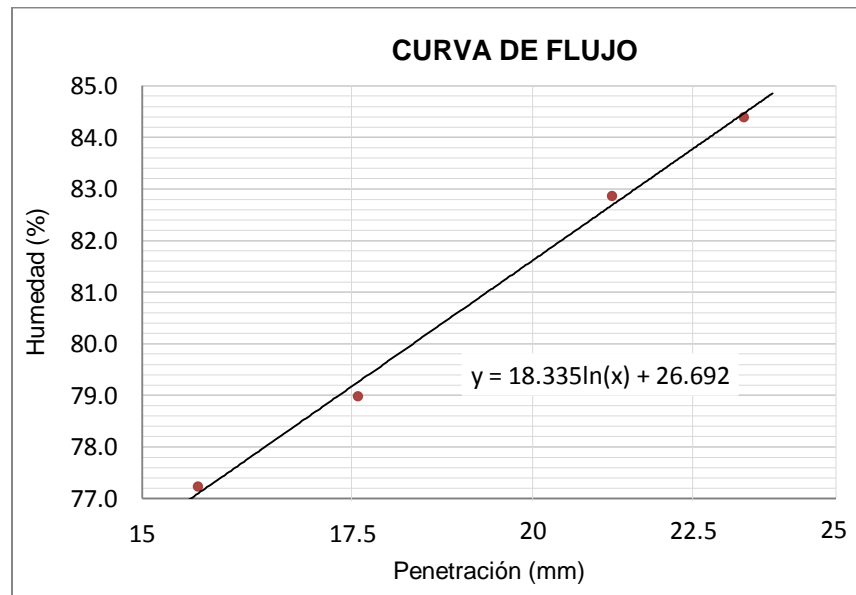


LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 3				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.55	18.26	21.70	23.37
Peso del recipiente (g)	15.72	11.29	11.93	15.17
Recipiente + suelo húmedo (g)	35.27	26.76	27.33	32.51
Recipiente + suelo seco (g)	26.73	19.88	20.37	24.62
Peso del agua (g)	8.54	6.88	6.96	7.89
Peso suelo seco (g)	11.01	8.59	8.44	9.45
Humedad (%)	77.6	80.1	82.5	83.5
Límite líquido (%)	81.3			

LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 4				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	16.36	18.58	22.26	23.82
Peso del recipiente (g)	12.95	12.33	13.57	12.38
Recipiente + suelo húmedo (g)	38.99	26.10	32.43	30.67
Recipiente + suelo seco (g)	27.49	19.95	23.89	22.33
Peso del agua (g)	11.50	6.15	8.54	8.34
Peso suelo seco (g)	14.54	7.62	10.32	9.95
Humedad (%)	79.1	80.7	82.8	83.8
Límite líquido (%)	81.6			



LÍMITE LÍQUIDO: KEROSENE No 5				
Prueba	1	2	3	4
Penetración (mm)	15.63	17.58	21.20	23.36
Peso del recipiente (g)	14.14	12.22	13.78	11.94
Recipiente + suelo húmedo (g)	34.54	34.54	27.77	22.34
Recipiente + suelo seco (g)	25.65	24.69	21.43	17.58
Peso del agua (g)	8.89	9.85	6.34	4.76
Peso suelo seco (g)	11.51	12.47	7.65	5.64
Humedad (%)	77.2	79.0	82.9	84.4
Límite líquido (%)	81.6			



## Anexo D. Resultados límite plástico, método del rollo

### D.1 Método Rollo - Suelo 1

LÍMITE PLÁSTICO: SUELO 1		
Prueba	1	2
Peso del recipiente (g)	11.10	12.14
Recipiente + suelo húmedo (g)	29.33	30.22
Recipiente + suelo seco (g)	24.75	25.64
Peso del agua (g)	4.58	4.58
Peso suelo seco (g)	13.65	13.50
Humedad (%)	33.6	33.9
Límite plástico (%)	33.7	

### D.2 Método Rollo - Suelo 2

LÍMITE PLÁSTICO: SUELO 2		
Prueba	1	2
Peso del recipiente (g)	13.33	11.74
Recipiente + suelo húmedo (g)	35.78	31.76
Recipiente + suelo seco (g)	28.82	25.59
Peso del agua (g)	6.96	6.17
Peso suelo seco (g)	15.49	13.85
Humedad (%)	44.9	44.5
Límite plástico (%)	44.7	

### D.3 Método Rollo - Suelo 3

LÍMITE PLÁSTICO: SUELO 3		
Prueba	1	2
Peso del recipiente (g)	14.20	13.29
Recipiente + suelo húmedo (g)	31.02	30.39
Recipiente + suelo seco (g)	27.31	26.63
Peso del agua (g)	3.71	3.76
Peso suelo seco (g)	13.11	13.34
Humedad (%)	28.3	28.2
Límite plástico (%)	28.2	

#### D.4 Método Rollo - Suelo 4

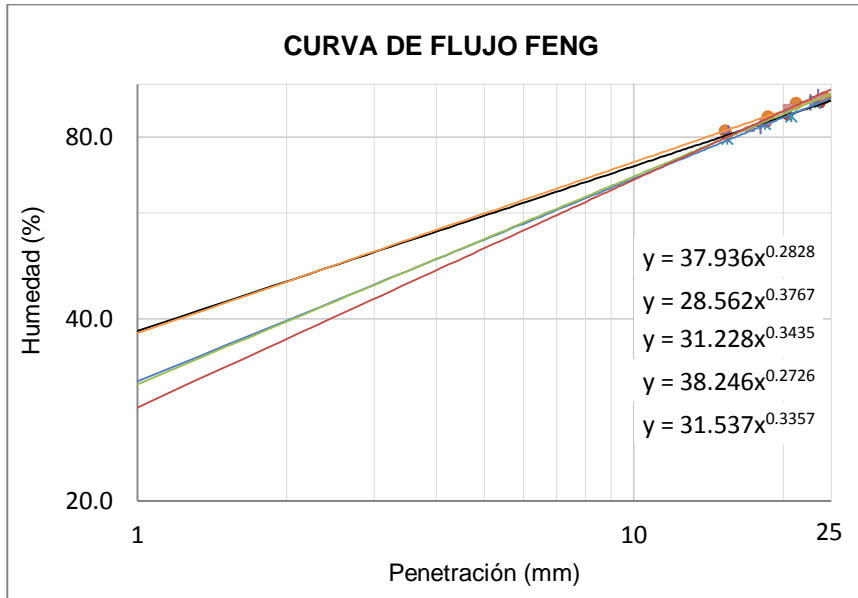
LÍMITE PLÁSTICO: SUELO 4		
Prueba	1	2
Peso del recipiente (g)	12.37	12.06
Recipiente + suelo húmedo (g)	27.19	26.36
Recipiente + suelo seco (g)	22.33	21.45
Peso del agua (g)	4.86	4.91
Peso suelo seco (g)	9.96	9.39
Humedad (%)	48.8	52.3
Límite plástico (%)	50.5	

#### D.5 Método Rollo - Suelo 5

LÍMITE PLÁSTICO: SUELO 5		
Prueba	1	2
Peso del recipiente (g)	13.53	17.04
Recipiente + suelo húmedo (g)	25.89	29.97
Recipiente + suelo seco (g)	21.33	24.94
Peso del agua (g)	4.56	5.03
Peso suelo seco (g)	7.80	7.90
Humedad (%)	58.5	63.7
Límite plástico (%)	61.1	

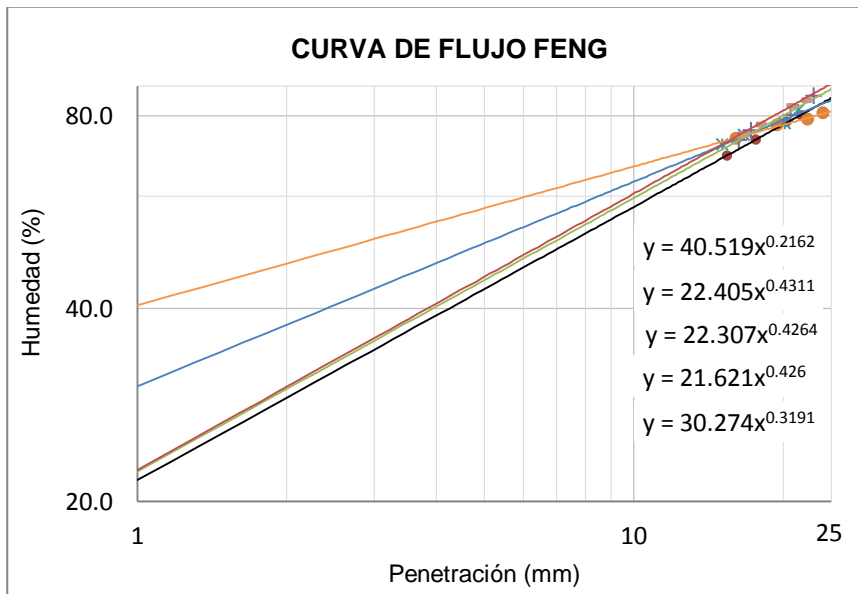
## Anexo E. Resultados límite plástico, método Feng (2000)

### E.1 Método Feng - Suelo 1



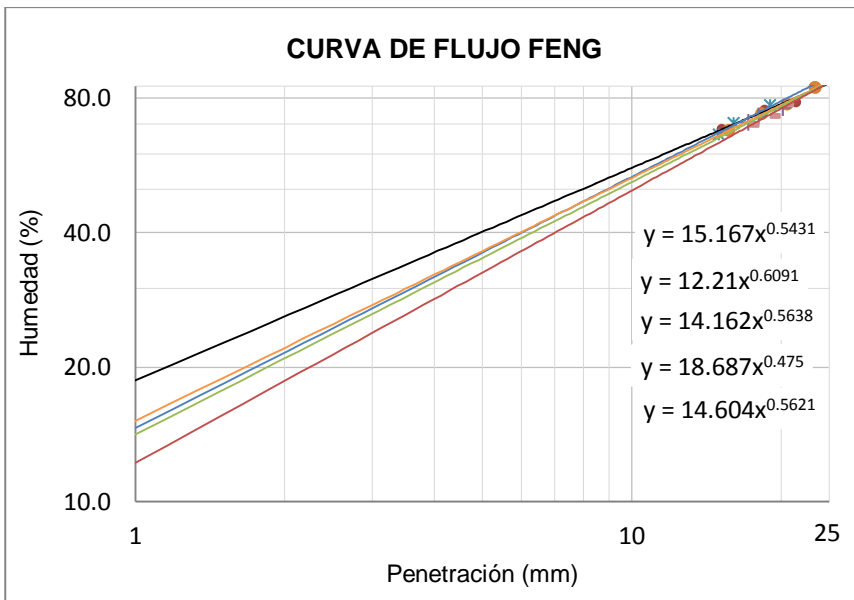
FENG (LP)	
46.2	
37.1	
39.6	41.8
46.2	
39.8	

### E.2 Método Feng - Suelo 2



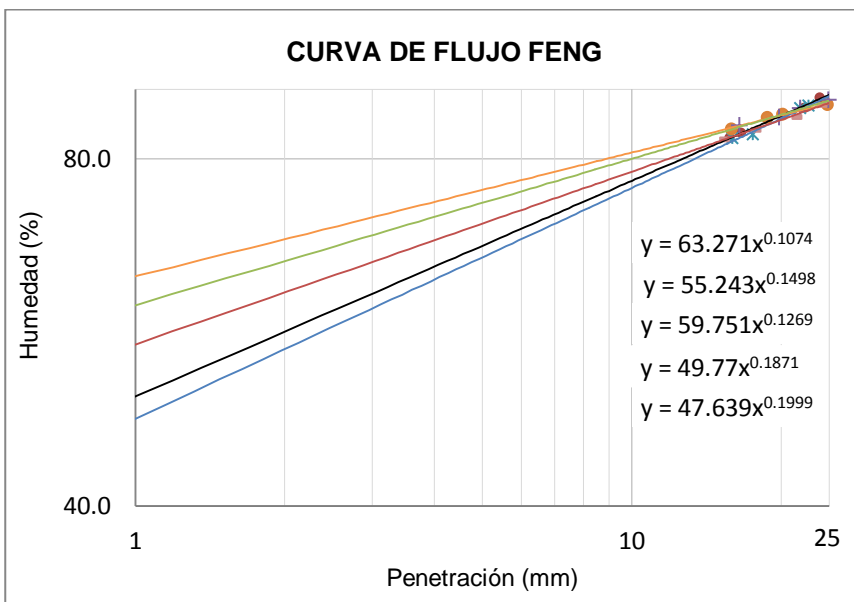
FENG (LP)	
47.1	
30.2	
30.0	34.8
29.0	
37.8	

### E.3 Método Feng - Suelo 3



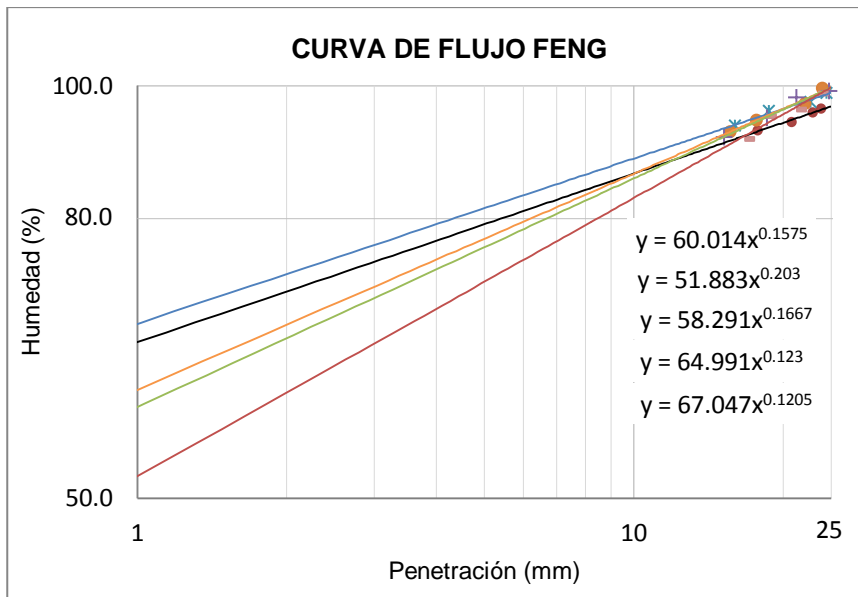
FENG (LP)	
22.1	
18.6	
20.9	21.8
26.0	
21.6	

### E.4 Método Feng - Suelo 4



FENG (LP)	
68.2	
61.3	
65.2	61.4
56.7	
55.9	

### E.5 Método Feng - Suelo 5



FENG (LP)	
66.9	
59.7	
65.4	67.2
70.8	
72.9	



## Anexo F. Resultados gravedad específica

La corrección de las gravedades específicas por temperatura, se realizó con base en los siguientes datos tomados de INV-E 128 (2013).

Temperatura (°C)	K
18	1.0004
19	1.0002
20	1.0000
21	0.9998
22	0.9996
23	0.9993
24	0.9991
25	0.9989
26	0.9986
27	0.9983
28	0.9980
29	0.9977
30	0.9974

### F.1 Gravedad específica - Suelo 1

GRAVEDAD ESPECÍFICA SUELO 1		
Prueba	1	2
Temperatura (°C)	24	24
(1) Peso matraz + agua a temperatura °C hasta nivel de enrase (g)	659.28	663.07
(2) Peso matraz + agua + suelo (g)	690.09	693.72
(3) Peso suelo seco (g)	50.00	50.00
K	0.9991	0.9991
Volumen desalojado (3) + (1) - (2)	19.19	19.35
Gravedad específica	2.606	2.584
Gravedad específica a 20 °C	2.603	2.582
Gravedad específica promedio a 20°C	2.592	

## F.2 Gravedad específica - Suelo 2

GRAVEDAD ESPECÍFICA SUELO 2		
Prueba	1	2
Temperatura (°C)	24	24
(1) Peso matraz + agua a temperatura °C hasta nivel de enrase (g)	664.77	666.48
(2) Peso matraz + agua + suelo (g)	695.78	697.66
(3) Peso suelo seco (g)	50.00	50.00
K	0.9991	0.9991
Volumen desalojado (3) + (1) - (2)	18.99	18.82
Gravedad específica	2.633	2.657
Gravedad específica a 20 °C	2.631	2.654
Gravedad específica promedio a 20°C	2.642	

## F.3 Gravedad específica - Suelo 3

GRAVEDAD ESPECÍFICA SUELO 3		
Prueba	1	2
Temperatura (°C)	24	24
(1) Peso matraz + agua a temperatura °C hasta nivel de enrase (g)	659.28	664.77
(2) Peso matraz + agua + suelo (g)	689.48	695.09
(3) Peso suelo seco (g)	50.00	50.00
K	0.9991	0.9991
Volumen desalojado (3) + (1) - (2)	19.8	19.68
Gravedad específica	2.525	2.541
Gravedad específica a 20 °C	2.523	2.538
Gravedad específica promedio a 20°C	2.531	

#### F.4 Gravedad específica - Suelo 4

GRAVEDAD ESPECÍFICA SUELO 4		
Prueba	1	2
Temperatura (°C)	24	24
(1) Peso matraz + agua a temperatura °C hasta nivel de enrase (g)	659.28	664.77
(2) Peso matraz + agua + suelo (g)	683.63	695.26
(3) Peso suelo seco (g)	40.00	50.00
K	0.9991	0.9991
Volumen desalojado (3) + (1) - (2)	15.65	19.51
Gravedad específica	2.556	2.563
Gravedad específica a 20 °C	2.554	2.560
Gravedad específica promedio a 20°C	2.557	

#### F.5 Gravedad específica - Suelo 5

GRAVEDAD ESPECÍFICA SUELO 5		
Prueba	1	2
Temperatura (°C)	24	24
(1) Peso matraz + agua a temperatura °C hasta nivel de enrase (g)	663.07	666.48
(2) Peso matraz + agua + suelo (g)	693.42	697.52
(3) Peso suelo seco (g)	50.00	51.00
K	0.9991	0.9991
Volumen desalojado (3) + (1) - (2)	19.65	19.96
Gravedad específica	2.545	2.555
Gravedad específica a 20 °C	2.542	2.553
Gravedad específica promedio a 20°C	2.548	

## F.6 Gravedad específica Kerosene

GRAVEDAD ESPECÍFICA KEROSENE		
Prueba	1	2
Temperatura (°C)	23	23
(Vi) Volumen inicial (cm <sup>3</sup> )	0.6	0.4
(Mi) Masa frasco + muestra inicial (g)	347.7	349.0
(Vf) Volumen final (cm <sup>3</sup> )	20.7	21.7
(Mf) Masa frasco + muestra final (g)	364.2	366.4
Densidad (Mf-Mi)/(Vf-Vi)	0.821	0.817
Densidad promedio (g/cm <sup>3</sup> )	0.819	
Densidad del agua a 23°C (g/cm <sup>3</sup> )	0.998	
Gravedad específica kerosene	0.821	

## Anexo G. Resultados ensayo de Hidrómetro

Para la obtención de los resultados provenientes de cada una de las pruebas de hidrómetro realizadas, se tomaron como base proporcionados en la norma INV-E 123 (2013) presentados a continuación:

VALORES DE K PARA EL CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE LAS PARTÍCULAS				
Temperatura (°C)	Gravedad específica de las partículas de suelo			
	2.50	2.55	2.60	2.65
16	0.01505	0.01481	0.01457	0.01435
17	0.01486	0.01462	0.01439	0.01417
18	0.01467	0.01443	0.01421	0.01399
19	0.01449	0.01425	0.01403	0.01382
20	0.01431	0.01408	0.01386	0.01365
21	0.01414	0.01391	0.01369	0.01348
22	0.01397	0.01374	0.01353	0.01332
23	0.01381	0.01358	0.01337	0.01317
24	0.01365	0.01342	0.01321	0.01301
25	0.01349	0.01327	0.01306	0.01286
26	0.01334	0.01312	0.01291	0.01272
27	0.01319	0.01297	0.01277	0.01258
28	0.01304	0.01283	0.01264	0.01244
29	0.01290	0.01269	0.01249	0.01230
30	0.01276	0.01256	0.01236	0.01217

FACTOR DE CORRECCIÓN ( $\alpha$ )	
Gravedad específica	Factor de corrección
2.75	0.98
2.70	0.99
2.65	1.00
2.60	1.01
2.55	1.02
2.50	1.03
2.45	1.05

Los factores para realizar la corrección por temperatura de las lecturas se tomaron de la norma INV-E 124 (2007).

VALORES DE Ct PARA CORRECCIÓN POR TEMPERATURA	
Temperatura (°C)	Hidrómetro 152-H
15	-1.2
16	-1.0
17	-0.8
18	-0.5
19	-0.3
20	0.0
21	0.3
22	0.6
23	0.9
24	1.3
25	1.7
26	2.0
27	2.4
28	2.9
29	3.3
30	3.7

Nota: La norma INV E-123 de 2013 en el numeral 6.1.4 especifica que las correcciones de las lecturas por temperatura se pueden determinar de manera experimental; por conveniencia para esta investigación se asumieron los factores de corrección planteados en la norma INV E-124 de 2007.

- Calibración volumen del bulbo del hidrómetro

Método utilizado: por desplazamiento

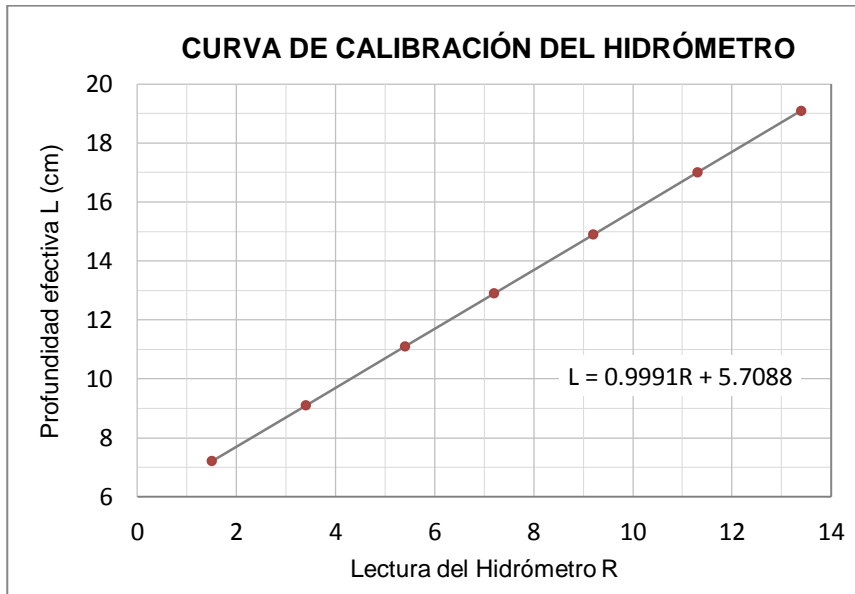
Ensayo	Lectura inicial	Lectura final	Volumen Bulbo (VB)
No	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>
1	350	430	80
2	400	485	85
Promedio			83

- Determinación de la profundidad efectiva en el centro del bulbo

---

Distancia desde cuello a la punta del bulbo (h) (cm)	14.3
Volumen del bulbo (VB) (cm <sup>3</sup> )	84.72
Área del cilindro (A) (cm <sup>2</sup> )	29.6

---




---

HR medida	Profundidad efectiva (L)
1.5	7.22
3.4	9.10
5.4	11.1
7.2	12.9
9.2	14.9
11.3	17.0
13.4	19.1

---

## G.1 Hidrómetro - Suelo 1

Masa del suelo seco (g)	50	Agente Floculante	Hexametafosfato de sodio
Masa unitaria de los sólidos (g)	2.592	Cantidad de Agente floculante (g)	5
Hidrómetro N°	152 H	Corrección por menisco (c'm)	1
		Corrección por floculante y punto cero	5

### PRUEBA DE HIDRÓMETRO No 1 DEL SUELO 1

Tiempo transcurrido (min)	Temperatura (°C)	Lectura del Hidrómetro sin corregir (R)	Lectura corregida por menisco R' (R±c'm)	Profundidad efectiva (cm)	Diámetro de partículas (mm)	Corrección por temperatura (°C)	Lectura corregida R'-cd±ct	% más fino parcial
2	19.8	30	31	36.68	0.060	-0.06	25.94	52.50
5	19.8	27	28	33.68	0.036	-0.06	22.94	46.43
15	19.8	22	23	28.69	0.019	-0.06	17.94	36.31
30	19.8	20	21	26.69	0.013	-0.06	15.94	32.26
60	20.1	17	18	23.69	0.009	0.03	13.03	26.37
250	23.0	12	13	18.70	0.0037	0.90	8.90	18.01
1440	19.5	10	11	16.70	0.0015	-0.15	5.85	11.84

Diámetro partículas (mm)	% Pasa parcial Prueba 1
0.075	100
0.050	50.0
0.025	39.7
0.010	28.2
0.005	20.2
0.002	13.2



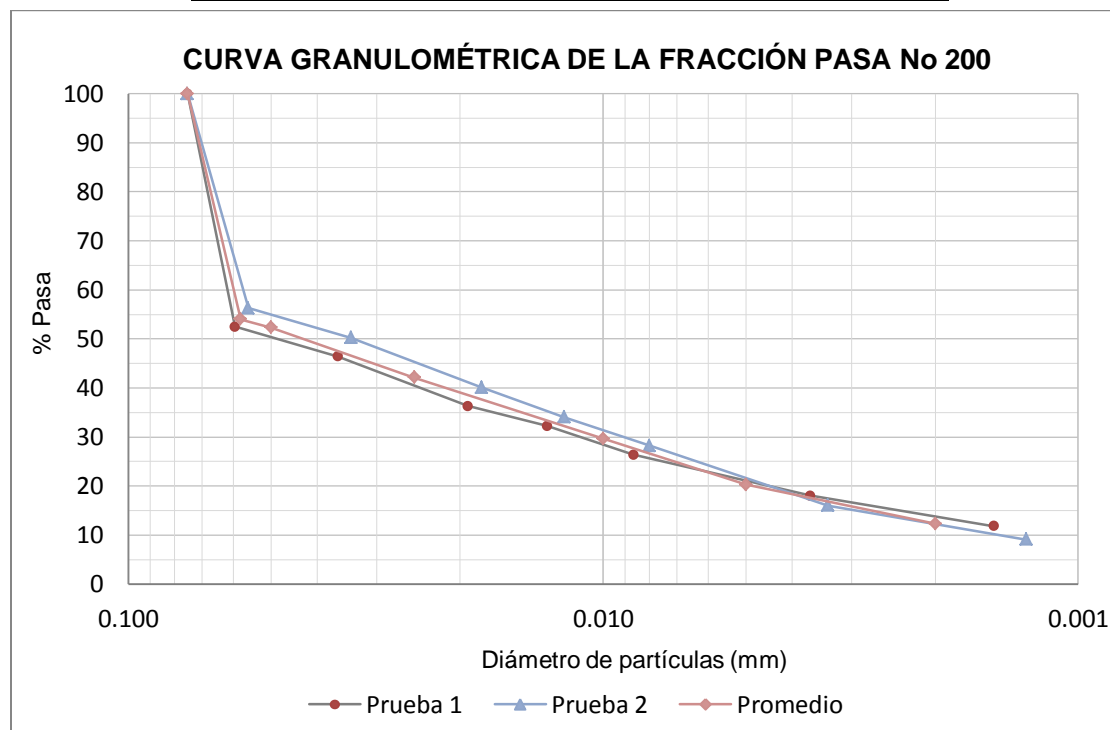
Masa del suelo seco (g)	50	Agente Floculante	Hexametafosfato de sodio
Masa unitaria de los sólidos (g)	2.592	Cantidad de Agente floculante (g)	5
Hidrómetro N°	152 H	Corrección por menisco (c'm)	1
		Corrección por floculante y punto cero	5

PRUEBA DE HIDRÓMETRO No 2 DEL SUELO 1

Tiempo transcurrido (min)	Temperatura (°C)	Lectura del Hidrómetro sin corregir (R)	Lectura corregida por menisco R' (R±c'm)	Profundidad efectiva (cm)	Diámetro de partículas (mm)	Corrección por temperatura (°C)	Lectura corregida R'-cd±ct	% más fino parcial
2	25.3	30	31	36.68	0.056	1.79	27.79	56.25
5	25.3	27	28	33.68	0.034	1.79	24.79	50.17
15	25.4	22	23	28.69	0.018	1.82	19.82	40.12
30	25.4	19	20	25.69	0.012	1.82	16.82	34.04
60	25.8	16	17	22.69	0.008	1.94	13.94	28.21
250	25.7	10	11	16.70	0.0034	1.91	7.91	16.01
1440	24.5	7	8	13.70	0.0013	1.50	4.50	9.11

Diámetro partículas (mm)	% Pasa parcial Prueba 2
0.075	100
0.050	54.6
0.025	44.5
0.010	31.1
0.005	20.3
0.002	11.4

Diámetro partículas (mm)	% Pasa parcial Prueba 1	% Pasa parcial Prueba 2	% Pasa parcial promedio
0.075	100	100	100
0.050	50.0	54.6	52.3
0.025	39.7	44.5	42.1
0.010	28.2	31.1	29.6
0.005	20.23	20.3	20.2
0.002	13.24	11.4	12.3



## G.2 Hidrómetro - Suelo 2

Masa del suelo seco (g)	50	Agente Floculante	Hexametáfosfato de sodio
Masa unitaria de los sólidos (g)	2.642	Cantidad de Agente floculante (g)	5
Hidrómetro N°	152 H	Corrección por menisco (c'm)	1
		Corrección por floculante y punto cero	5

### PRUEBA DE HIDRÓMETRO No 1 DEL SUELO 2

Tiempo transcurrido (min)	Temperatura (°C)	Lectura del Hidrómetro sin corregir (R)	Lectura corregida por menisco R' (R±c'm)	Profundidad efectiva (cm)	Diámetro de partículas (mm)	Corrección por temperatura (°C)	Lectura corregida R'-cd±ct	% más fino parcial
2	19.8	35	36	41.68	0.063	-0.06	30.94	62.00
5	19.8	31	32	37.68	0.038	-0.06	26.94	53.99
15	19.8	26	27	32.68	0.020	-0.06	21.94	43.97
30	19.8	23	24	29.69	0.014	-0.06	18.94	37.96
60	20.0	21	22	27.69	0.009	0.00	17.00	34.07
250	22.9	16	17	22.69	0.0040	0.87	12.87	25.79
1440	19.5	14	15	20.70	0.0017	-0.15	9.85	19.74

Diámetro partículas (mm)	% Pasa parcial Prueba 1
0.075	100
0.050	57.9
0.025	46.7
0.010	34.7
0.005	27.4
0.002	20.5

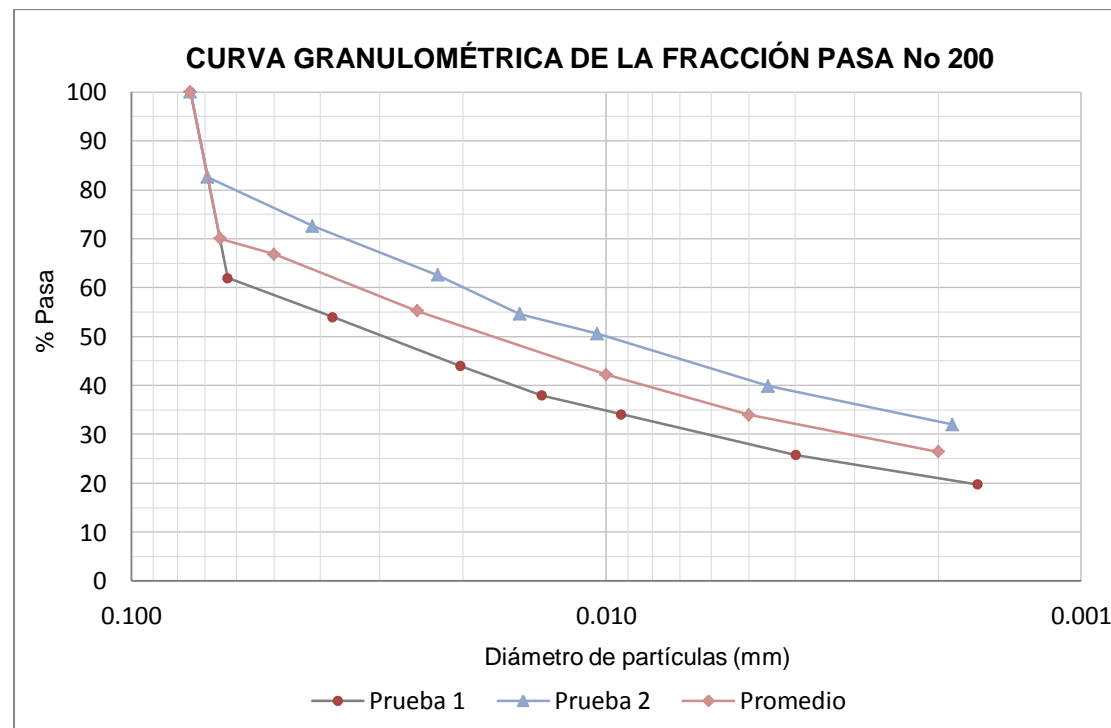
Masa del suelo seco (g)	50	Agente Floculante	Hexametáfosfato de sodio
Masa unitaria de los sólidos (g)	2.642	Cantidad de Agente floculante (g)	5
Hidrómetro N°	152 H	Corrección por menisco (c'm)	1
		Corrección por floculante y punto cero	5

PRUEBA DE HIDRÓMETRO No 2 DEL SUELO 2

Tiempo transcurrido (min)	Temperatura (°C)	Lectura del Hidrómetro sin corregir (R)	Lectura corregida por menisco R' (R±c'm)	Profundidad efectiva (cm)	Diámetro de partículas (mm)	Corrección por temperatura (°C)	Lectura corregida R'-cd±ct	% más fino parcial
2	20.7	45	46	51.67	0.069	0.21	41.21	82.58
5	20.7	40	41	46.67	0.041	0.21	36.21	72.56
15	20.7	35	36	41.68	0.023	0.21	31.21	62.54
30	20.8	31	32	37.68	0.015	0.24	27.24	54.59
60	20.8	29	30	35.68	0.010	0.24	25.24	50.58
250	23.0	23	24	29.69	0.0046	0.90	19.90	39.88
1440	19.9	20	21	26.69	0.0019	-0.03	15.97	32.00

Diámetro partículas (mm)	% Pasa parcial Prueba 2
0.075	100
0.050	75.7
0.025	63.8
0.010	49.7
0.005	40.6
0.002	32.3

Diámetro partículas (mm)	% Pasa parcial Prueba 1	% Pasa parcial Prueba 2	% Pasa parcial promedio
0.075	100	100	100
0.050	57.9	75.7	66.8
0.025	46.7	63.8	55.2
0.010	34.7	49.7	42.2
0.005	27.4	40.6	34.0
0.002	20.5	32.3	26.4



### G.3 Hidrómetro - Suelo 3

Masa del suelo seco (g)	50	Agente Floculante	Hexametáfosfato de sodio
Masa unitaria de los sólidos (g)	2.531	Cantidad de Agente floculante (g)	5
Hidrómetro N°	152 H	Corrección por menisco (c'm)	1
		Corrección por floculante y punto cero	5

#### PRUEBA DE HIDRÓMETRO No 1 DEL SUELO 3

Tiempo transcurrido (min)	Temperatura (°C)	Lectura del Hidrómetro sin corregir (R)	Lectura corregida por menisco R' (R±c'm)	Profundidad efectiva (cm)	Diámetro de partículas (mm)	Corrección por temperatura (°C)	Lectura corregida R'-cd±ct	% más fino parcial
2	21.4	39	40	45.67	0.067	0.42	35.42	72.54
5	21.4	34	35	40.68	0.040	0.42	30.42	62.30
15	21.5	27	28	33.68	0.021	0.45	23.45	48.03
30	21.4	23	24	29.69	0.014	0.42	19.42	39.77
60	22.5	20	21	26.69	0.009	0.75	16.75	34.30
250	25.3	14	15	20.70	0.0038	1.79	11.79	24.15
1440	22.8	12	13	18.70	0.0016	0.84	8.84	18.10

Diámetro partículas (mm)	% Pasa parcial Prueba 1
0.075	100
0.050	66.2
0.025	51.1
0.010	35.2
0.005	26.4
0.002	19.2

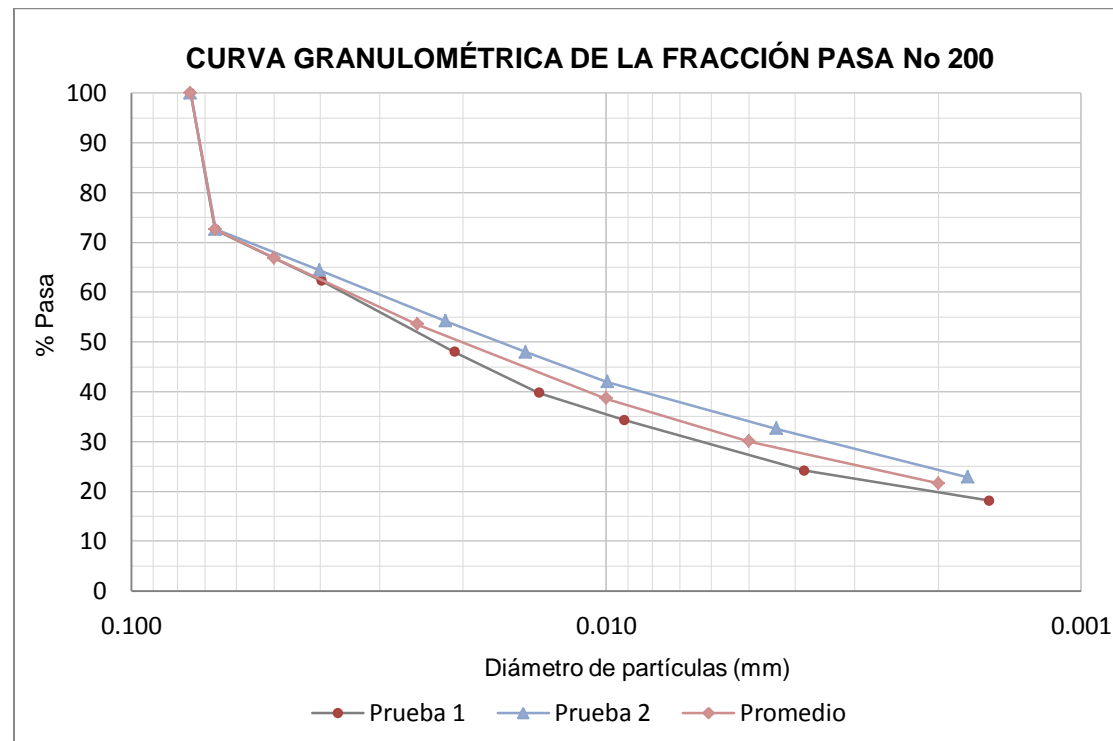
Masa del suelo seco (g)	50	Agente Floculante	Hexametáfosfato de sodio
Masa unitaria de los sólidos (g)	2.531	Cantidad de Agente floculante (g)	5
Hidrómetro N°	152 H	Corrección por menisco (c'm)	1
		Corrección por floculante y punto cero	5

PRUEBA DE HIDRÓMETRO No 2 DEL SUELO 3

Tiempo transcurrido (min)	Temperatura (°C)	Lectura del Hidrómetro sin corregir (R)	Lectura corregida por menisco R' (R±c'm)	Profundidad efectiva (cm)	Diámetro de partículas (mm)	Corrección por temperatura (°c)	Lectura corregida R'-cd±ct	% más fino parcial
2	21.5	39	40	45.67	0.067	0.45	35.45	72.60
5	21.5	35	36	41.68	0.040	0.45	31.45	64.41
15	21.5	30	31	36.68	0.022	0.45	26.45	54.17
30	21.4	27	28	33.68	0.015	0.42	23.42	47.96
60	21.6	24	25	30.69	0.010	0.48	20.48	41.94
250	23.0	19	20	25.69	0.0044	0.90	15.90	32.56
1440	20.5	15	16	21.69	0.0017	0.15	11.15	22.84

Diámetro partículas (mm)	% Pasa parcial Prueba 2
0.075	100
0.050	67.5
0.025	56.0
0.010	42.1
0.005	33.6
0.002	23.9

Diámetro partículas (mm)	% Pasa parcial Prueba 1	% Pasa parcial Prueba 2	% Pasa parcial promedio
0.075	100	100	100
0.050	66.2	67.5	66.8
0.025	51.1	56.0	53.5
0.010	35.2	42.1	38.6
0.005	26.4	33.6	30.0
0.002	19.2	23.9	21.6





#### G.4 Hidrómetro - Suelo 4

Masa del suelo seco (g)	50	Agente Floculante	Hexametafosfato de sodio
Masa unitaria de los sólidos (g)	2.557	Cantidad de Agente floculante (g)	5
Hidrómetro N°	152 H	Corrección por menisco (c'm)	1
		Corrección por floculante y punto cero	5

#### PRUEBA DE HIDRÓMETRO No 1 DEL SUELO 4

Tiempo transcurrido (min)	Temperatura (°C)	Lectura del Hidrómetro sin corregir (R)	Lectura corregida por menisco R' (R±c'm)	Profundidad efectiva (cm)	Diámetro de partículas (mm)	Corrección por temperatura (°c)	Lectura corregida R'-cd±ct	% más fino parcial
2	23.9	46	47	52.67	0.069	1.26	43.26	88.08
5	23.9	44	45	50.67	0.043	1.26	41.26	84.01
15	23.8	42	43	48.67	0.024	1.22	39.22	79.85
30	23.4	40	41	46.67	0.017	1.06	37.06	75.45
60	23.0	38	39	44.67	0.012	0.90	34.90	71.06
250	21.6	34	35	40.68	0.0056	0.48	30.48	62.06
1440	21.0	28	29	34.68	0.0022	0.30	24.3	49.47

Diámetro partículas (mm)	% Pasa parcial Prueba 1
0.075	100
0.050	85.2
0.025	80.0
0.010	68.6
0.005	58.8
0.002	49.5

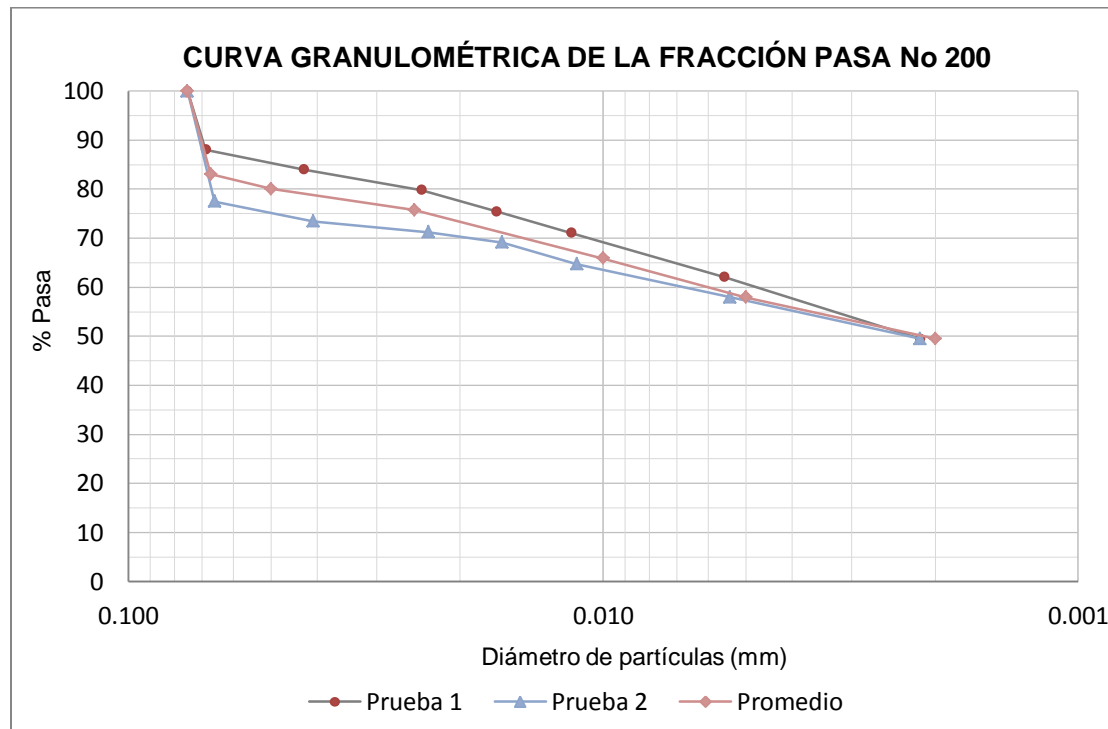
Masa del suelo seco (g)	50	Agente Floculante	Hexametáfosfato de sodio
Masa unitaria de los sólidos (g)	2.557	Cantidad de Agente floculante (g)	5
		Corrección por menisco (c'm)	1
Hidrómetro N°	152 H	Corrección por floculante y punto cero	5

PRUEBA DE HIDRÓMETRO No 2 DEL SUELO 4

Tiempo transcurrido (min)	Temperatura (°C)	Lectura del Hidrómetro sin corregir (R)	Lectura corregida por menisco R' (R±c'm)	Profundidad efectiva (cm)	Diámetro de partículas (mm)	Corrección por temperatura (°C)	Lectura corregida R'-cd±ct	% más fino parcial
2	23.4	41	42	47.67	0.066	1.06	38.06	77.49
5	23.4	39	40	45.67	0.041	1.06	36.06	73.42
15	23.2	38	39	44.67	0.023	0.98	34.98	71.22
30	23.1	37	38	43.67	0.016	0.94	33.94	69.10
60	22.6	35	36	41.68	0.011	0.78	31.78	64.70
250	21.6	32	33	38.68	0.0054	0.48	28.48	57.99
1440	21.0	28	29	34.68	0.0022	0.30	24.3	49.47

Diámetro partículas (mm)	% Pasa parcial Prueba 2
0.075	100
0.050	74.9
0.025	71.4
0.010	63.2
0.005	56.9
0.002	49.5

Diámetro partículas (mm)	% Pasa parcial Prueba 1	% Pasa parcial Prueba 2	% Pasa parcial promedio
0.075	100	100	100
0.050	85.2	74.9	80.0
0.025	80.0	71.4	75.7
0.010	68.6	63.2	65.9
0.005	58.8	56.9	57.9
0.002	49.5	49.5	49.5



## G.5 Hidrómetro - Suelo 5

Masa del suelo seco (g)	50	Agente Floculante	Hexametafosfato de sodio
Masa unitaria de los sólidos (g)	2.548	Cantidad de Agente floculante (g)	5
Hidrómetro N°	152 H	Corrección por menisco (c'm)	1
		Corrección por floculante y punto cero	5

### PRUEBA DE HIDRÓMETRO No 1 DEL SUELO 5

Tiempo transcurrido (min)	Temperatura (°C)	Lectura del Hidrómetro sin corregir (R)	Lectura corregida por menisco R' (R±c'm)	Profundidad efectiva (cm)	Diámetro de partículas (mm)	Corrección por temperatura (°C)	Lectura corregida R'-cd±ct	% más fino parcial
2	23.2	43	44	49.67	0.068	0.98	39.98	81.56
5	23.2	39	40	45.67	0.041	0.98	35.98	73.40
15	23.1	36	37	42.68	0.023	0.94	32.94	67.20
30	22.6	32	33	38.68	0.015	0.78	28.78	58.71
60	21.1	28	29	34.68	0.011	0.33	24.33	49.63
250	20.7	25	26	31.69	0.0050	0.21	21.21	43.27
1440	19.8	23	24	29.69	0.0020	-0.06	18.94	38.64

Diámetro partículas (mm)	% Pasa parcial Prueba 1
0.075	100
0.050	76.2
0.025	67.9
0.010	49.0
0.005	43.3
0.002	38.6

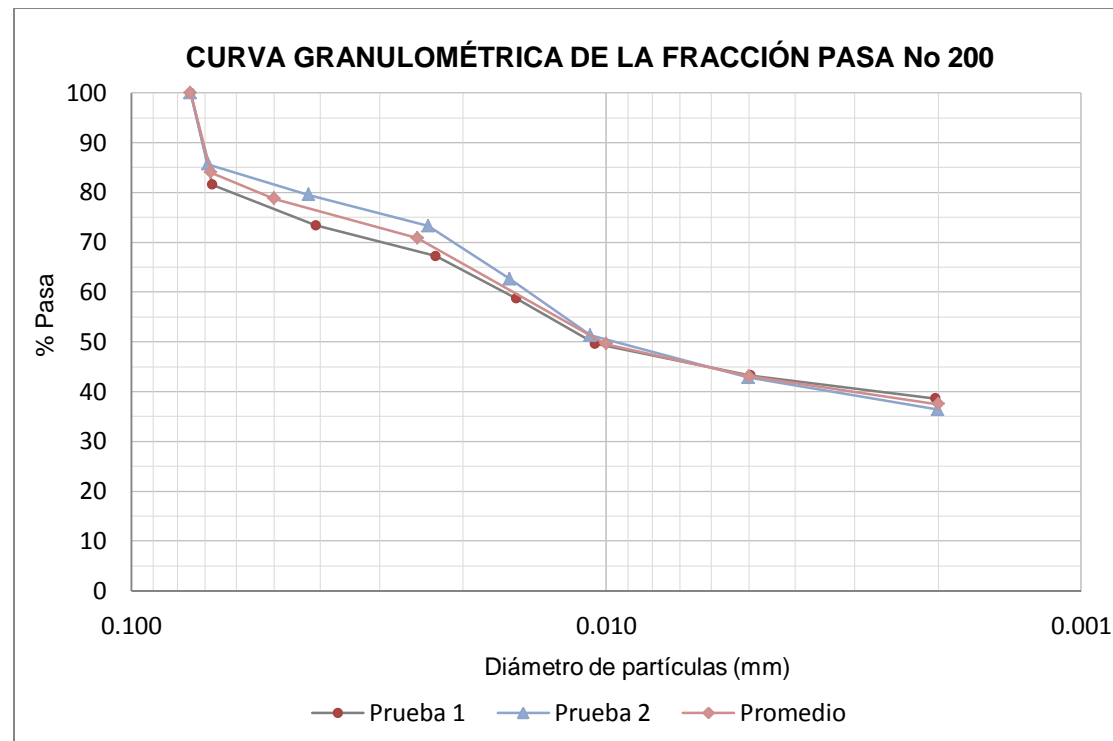
Masa del suelo seco (g)	50	Agente Floculante	Hexametáfosfato de sodio
Masa unitaria de los sólidos (g)	2.548	Cantidad de Agente floculante (g)	5
Hidrómetro N°	152 H	Corrección por menisco (c'm)	1
		Corrección por floculante y punto cero	5

PRUEBA DE HIDRÓMETRO No 2 DEL SUELO 5

Tiempo transcurrido (min)	Temperatura (°C)	Lectura del Hidrómetro sin corregir (R)	Lectura corregida por menisco R' (R±c'm)	Profundidad efectiva (cm)	Diámetro de partículas (mm)	Corrección por temperatura (°c)	Lectura corregida R'-cd±ct	% más fino parcial
2	23.2	45	46	51.67	0.069	0.98	41.98	85.64
5	23.2	42	43	48.67	0.042	0.98	38.98	79.52
15	23.0	39	40	45.67	0.024	0.90	35.90	73.24
30	22.3	34	35	40.68	0.016	0.69	30.69	62.61
60	20.5	29	30	35.68	0.011	0.15	25.15	51.31
250	19.9	25	26	31.69	0.0050	-0.03	20.97	42.78
1440	19.4	22	23	28.69	0.0020	-0.18	17.82	36.35

Diámetro partículas (mm)	% Pasa parcial Prueba 2
0.075	100
0.050	81.3
0.025	73.7
0.010	50.1
0.005	42.8
0.002	36.4

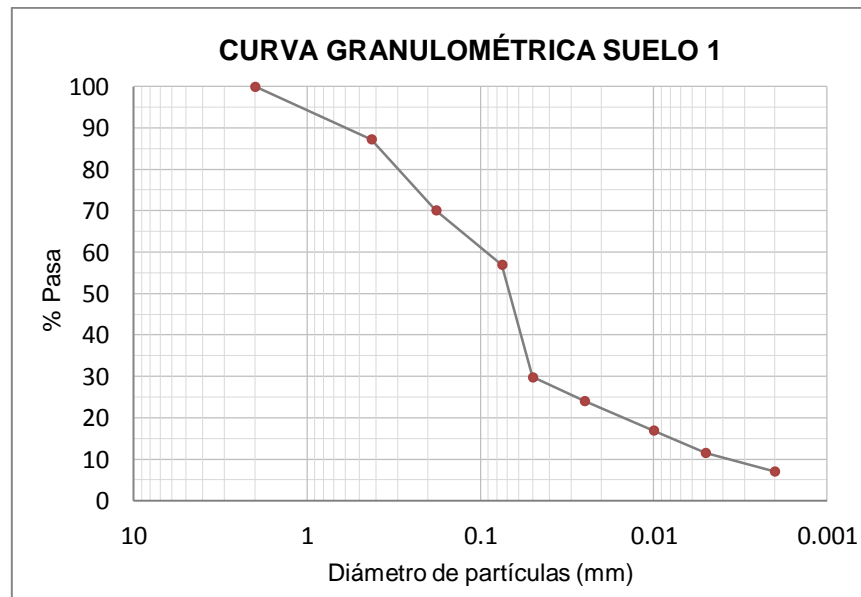
Diámetro partículas (mm)	% Pasa parcial Prueba 1	% Pasa parcial Prueba 2	% Pasa parcial promedio
0.075	100	100	100
0.050	76.2	81.3	78.7
0.025	67.9	73.7	70.8
0.010	49.0	50.1	49.5
0.005	43.3	42.8	43.0
0.002	38.6	36.4	37.5



## Anexo H. Resultados granulometría

### H.1 Granulometría - Suelo 1

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO SUELO 1					
TAMIZ		PORCENTAJE RETENIDO			PORCENTAJE PASA
Alternativo (No)	Normal (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	
10	2.0	0.0	0.0	0.0	100.0
40	0.425	40.28	12.7	12.7	87.3
80	0.18	54.31	17.2	29.9	70.1
200	0.075	41.65	13.2	43.0	57.0
	0.05				29.8
	0.025				24.0
	0.01				16.9
	0.005				11.5
	0.002				7.0



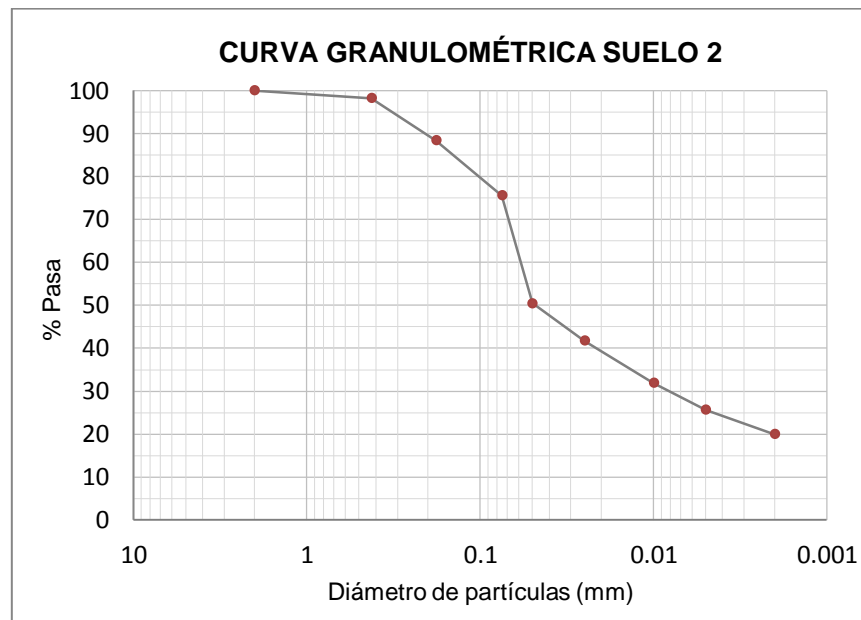
% Arena: 43.0

% Limo: 50.0

% Arcilla: 7.0

## H.2 Granulometría - Suelo 2

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO SUELO 2					
TAMIZ		PORCENTAJE RETENIDO			PORCENTAJE PASA
Alternativo (No)	Normal (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	
10	2.0	0.0	0.0	0.0	100.0
40	0.425	5.72	1.8	1.8	98.2
80	0.18	30.94	9.8	11.6	88.4
200	0.075	40.67	12.8	24.4	75.6
	0.05				50.5
	0.025				41.8
	0.01				31.9
	0.005				25.7
	0.002				20.0



% Arena: 24.4

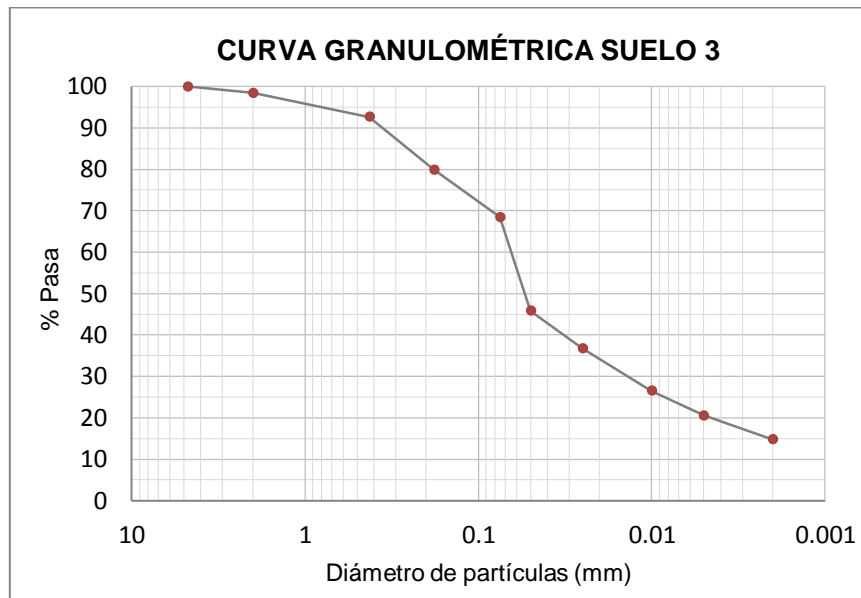
% Limo: 55.6

% Arcilla: 20.0



### H.3 Granulometría - Suelo 3

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO SUELO 3					
TAMIZ		PORCENTAJE RETENIDO			PORCENTAJE PASA
Alternativo (No)	Normal (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	
4	4.75	0.0	0.0	0.0	100.0
10	2.0	5.50	1.6	1.6	98.4
40	0.425	20.20	5.8	7.4	92.6
80	0.18	44.56	12.8	20.1	79.9
200	0.075	39.91	11.4	31.5	68.5
	0.05				45.8
	0.025				36.7
	0.01				26.5
	0.005				20.5
	0.002				14.8



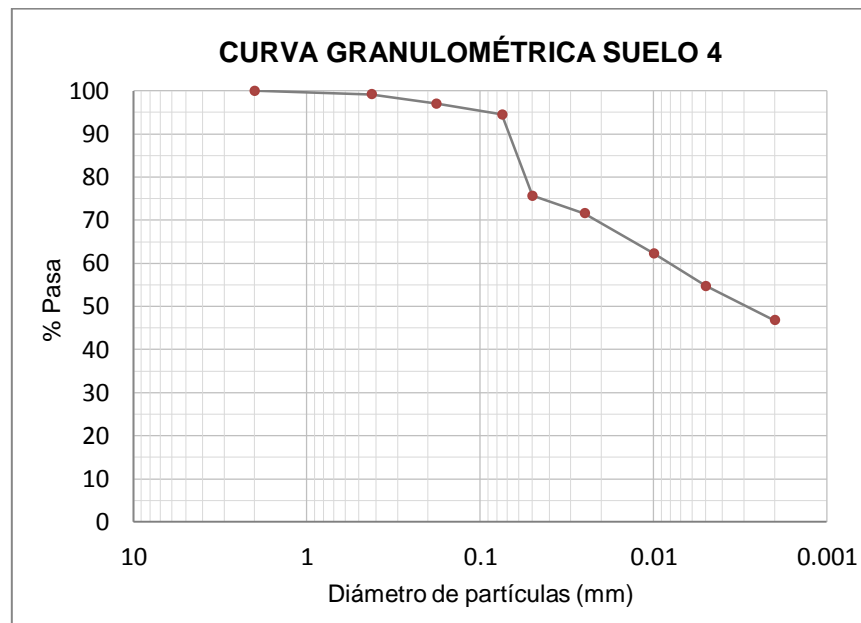
% Arena: 31.5

% Limo: 53.7

% Arcilla: 14.8

#### H.4 Granulometría - Suelo 4

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO SUELO 4					
TAMIZ		PORCENTAJE RETENIDO			PORCENTAJE PASA
Alternativo (No)	Normal (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	
10	2.0	0.0	0.0	0.0	100.0
40	0.425	2.78	0.8	0.8	99.2
80	0.18	7.56	2.2	3.0	97.0
200	0.075	8.88	2.5	5.5	94.5
	0.05				75.6
	0.025				71.6
	0.01				62.3
	0.005				54.7
	0.002				46.7



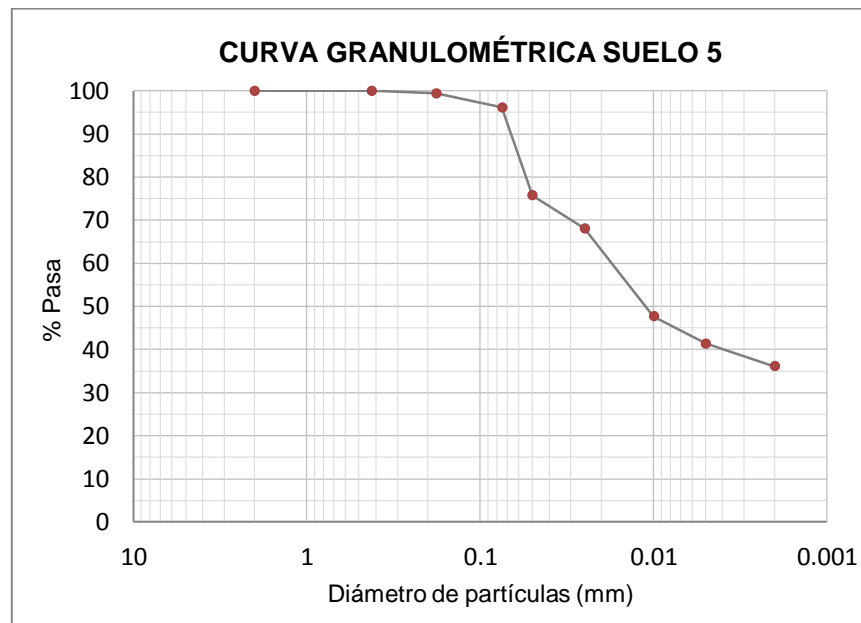
% Arena: 5.5

% Limo: 47.8

% Arcilla: 46.7

## H.5 Granulometría - Suelo 5

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO SUELO 5					
TAMIZ		PORCENTAJE RETENIDO			PORCENTAJE PASA
Alternativo (No)	Normal (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	
10	2.0	0.0	0.0	0.0	100.0
40	0.425	0.0	0.0	0.0	100.0
80	0.18	1.98	0.6	0.6	99.4
200	0.075	11.42	3.3	3.8	96.2
	0.05				75.7
	0.025				68.1
	0.01				47.7
	0.005				41.4
	0.002				36.1



% Arena: 3.8

% Limo: 60.1

% Arcilla: 36.1