



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN EN LA CAPACIDAD
DE CARGA Y RESISTENCIA MECÁNICA DE SUELOS CONTAMINADOS POR
LIXIVIADOS.**

Tesis

Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de Licenciatura en
Ingeniería Civil

Presenta

María Del Mar Mateos López

Dirigida por:

Dra. Yesenia Mendoza Burguete

Dra. Yesenia Mendoza Burguete
Presidente

Dr. José Alberto Rodríguez Morales
Secretaria

Dra. Elda Montes Zarazúa
Vocal

M. en C. Jaime Moroni Mora Muñoz
Suplente 1

M. en C. César Augusto García Ezquivel
Suplente 2

Querétaro, Qro, junio de 2025

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciatario no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatario.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

1. RESUMEN.

Los rellenos sanitarios son de gran utilidad en México, debido a su bajo costo de operación y facilidad de operarlos, es la principal fuente de recolección de desechos en las ciudades, y en el mundo, principalmente en América Latina; pero poco se ha estudiado de su rehabilitación para darle otros usos.

Los suelos de rellenos sanitarios son un caso de estudio, debido a su contaminación por lixiviados, estos contaminantes pueden provocar cambios en las características del suelo donde estos son depositados, así como también presentar un riesgo ambiental para el lugar y el ecosistema que lo rodea.

Así como la creciente falta de disponibilidad de lugares para construir debido a la alta demanda de vivienda en la ciudad, se ha empezado a buscar nuevas opciones para solucionar dicho problema. Una de ellas es la rehabilitación del uso de suelo de estos rellenos sanitarios para darles otro uso, en este caso construcción de viviendas.

Esta investigación se enfoca en estudiar un suelo contaminado con lixiviados y un suelo sin contaminar, con el propósito de comparar y observar sus comportamientos para determinar si el suelo contaminado es viable para la construcción de casas de interés social; esto estudiándolos con parámetros que se obtienen de ensayos comunes de laboratorio.

Palabras clave: Suelos contaminados, suelos no saturados, lixiviados, resistencia a corte y consolidación.

2. SUMMARY.

Landfills are very useful in Mexico due to their low operating costs and ease of operation; they are the main source of waste collection in cities and in the world, especially in Latin America, but little research has been done on their rehabilitation for other purposes.

Landfill soils are a case study as they are contaminated by leachate. These contaminants can alter the properties of the land on which they are deposited and pose an environmental risk to the site and the surrounding ecosystem.

With the increasing shortage of available building sites due to the high demand for housing in the city, new ways of solving this problem are being sought. One of these is the redevelopment of the landfill sites for other uses, in this case housing.

This study focuses on the study of a soil contaminated with leachate and a soil without contamination in order to compare their behavior and observe whether the contaminated soil is suitable for the construction of low-income housing, using parameters derived from standard laboratory tests”

Ket words: Contaminated soil, Unsaturated soils, Leachate, Shear strain, Consolidation.

Somos pedacitos de todas las personas que alguna vez conocimos
Las canciones que gozamos
Los lugares que visitamos
Los momentos que compartimos
Las conversaciones que tuvimos
Todo eso que callamos
Todo eso que aprendimos
Ese pasatiempo que se nos pegó
La forma de pensar que te renovó
Esa nueva perspectiva que te aportó
Todos somos un poquito de lo que algún día con otros fuimos

Ale de la Vega

3. AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo queda concluido después de algunos semestres que parecía inalcanzable e incluso varias veces estuve a punto de renunciar a él. Siempre digo que por algo pasan las cosas, y gracias a este trabajo he aprendido mucho sobre las relaciones interpersonales, sobre mí, y me ha abierto un camino hacia una rama de la ingeniería que antes no era de mi agrado, pero ahora me apasiona.

Principalmente agradezco a mis padres Efraín Mateos y Carmen López, que durante toda mi vida me han brindado su apoyo y amor incondicional, y me han dado todo lo posible para cumplir mis objetivos personales y académicos, en especial en esta etapa de mi vida, que por ellos he llegado hasta este punto.

A Kashmir, que siempre me estuvo acompañando en todo momento en la realización de este trabajo, y es lo más importante en mi vida.

A mi psicólogo Mario Barbosa y mi psiquiatra Cynthia Cruz, que me han guiado y me han dado las mejores herramientas para enfrentar los obstáculos que se me han presentado en la vida, pero también por enseñarme a ser más compasiva conmigo misma y aprender de mis errores.

Supe que para sobrevivir iba a tener que dejar de pensar en el futuro, anclarme a las cosas mundanas y bonitas para atravesar un día a otro y sobre todo que iba a tener que pedir ayuda, dejarme sostener para poder seguir adelante. Y ahí entran las personas más espectaculares e increíbles: mis amigos, mi red de apoyo, Isaac, Jari, Fernanda, César, Rosangela, Vianey y Samuel. Ahí entra lo más importante, el amor en su máxima expresión, sosteniéndome en los momentos más oscuros para que pueda estar. Nada es más sanador que este grupo de personas que me apoyan y me recuerdan que todo va a pasar.

Esta tesis no pudo haber sido concluida sin la ayuda de los estudiantes de maestría en suelos: Jimena y César, que me compartieron su conocimiento y me enseñaron a hacer las pruebas de laboratorio cuando me desesperaba, tengo una gran admiración hacia ellos.

A la Dra. Elda Montes, por ser una excelente guía y ejemplo a seguir, por sus enseñanzas durante este tiempo que estuve haciendo la tesis en el laboratorio de suelos de la universidad, su apoyo incondicional, por su paciencia, por creer en mí y su conocimiento compartido. Pero lo más importante por acompañarme en este camino y los momentos compartidos.

A la Dra. Yesenia Mendoza, por estar al pendiente de mí y ayudarme en cualquier problema que se me presentó en la realización de la tesis, por el papel Whatman. Y en lo personal, por su confianza, por escucharme y darme consejos cuando más lo necesité y no abandonar este proyecto.

A los integrantes de mi sínodo, el M.C. Moroni Mora Muñoz, el Dr. José Alberto Rodríguez Morales, el Dr. Carlos Guzmán Martínez y la Dra. Viviana Palos, cuyos comentarios y sugerencias ayudaron a mejorar la entrega final de este proyecto.

4. ÍNDICE GENERAL

1.	RESUMEN	1
2.	SUMMARY.....	2
3.	AGRADECIMIENTOS.....	4
4.	ÍNDICE GENERAL.....	5
5.	ÍNDICE DE FIGURAS	9
6.	ÍNDICE DE TABLAS.....	11
7.	INTRODUCCIÓN	13
7.1.	ANTECEDENTES	13
8.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	14
9.	JUSTIFICACIÓN.....	15
10.	HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	15
10.1.	Hipótesis	15
10.2.	Objetivo general	15
10.3.	Objetivos específicos	16
11.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	16
11.1.	Globo terrestre	16
11.2.	Suelo.....	16
11.3.	Tipos de suelos.....	17
11.3.1.	Suelos residuales y transportados.....	17
11.3.2.	Suelos Saturados y No Saturados	17
11.4.	Estudio de la Mecánica de Suelos.	18
11.5.	Suelos Contaminados.	19
11.6.	Vertederos.	20
11.7.	Contaminantes: Lixiviados.....	22
11.8.	Efecto de los lixiviados en las propiedades de los suelos.....	23
11.9.	Reutilización de rellenos sanitarios contaminados por lixiviados.	25
11.10.	Succión.	27
11.10.1.	Curva característica de agua del suelo (SWCC).	28
11.11.	Identificación mineralógica en suelos.	29
11.12.	Resistencia al corte en suelos no saturados.....	30
11.13.	Prueba Triaxial.....	30

11.14.	Capacidad de carga en cimentaciones poco profundas.....	32
11.15.	Asentamientos.....	35
11.16.	Consolidación unidimensional.	37
12.	METODOLOGÍA.....	39
12.1.	Localización del sitio de muestreo.	39
12.2.	Pruebas de laboratorio.....	40
12.3.	Caracterización del suelo.....	41
12.3.1.	Peso específico del suelo (γ_m).....	41
12.3.2.	Contenido de humedad (ω).....	42
12.3.3.	Peso específico relativo de sólidos (S _s).	42
12.3.4.	Ánálisis granulométrico.....	43
12.3.5.	Granulometría vía hidrómetro.	45
12.3.6.	Determinación de humedad óptima.	46
12.3.7.	Determinación de los límites de consistencia.	48
12.4.	Clasificación del suelo.	51
12.5.	Pruebas físicas.	52
12.5.1.	Determinación de la permeabilidad en suelos.....	52
12.5.2.	Colapso y expansión en un suelo.	54
12.5.3.	Determinación de la succión mediante papel filtro.	56
12.5.4.	Prueba triaxial no consolidada- no drenada (UU).....	60
12.5.5.	Consolidación unidimensional.	61
12.6.	Microscopía Electrónica de Barrido.....	62
12.7.	Método de prueba estándar para el pH en suelos.....	64
12.8.	Método de obtención de materia orgánica.....	65
13.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	67
13.1.	Propiedades del suelo natural y contaminado.....	67
13.2.	Curva de retención agua-suelo.....	71
13.3.	Prueba de consolidación.	74
13.4.	Pruebas triaxiales.	78
13.5.	Estructura del suelo.....	81
14.	DISEÑO DE CIMENTACIÓN.....	83
14.1.	Estructura de casa habitación.	83
14.2.	Diseño de losa de cimentación.....	83

14.3.	Mejoramientos de suelo	85
15.	CONCLUSIONES	86
16.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
17.	APENDICE PROPIEDADES DEL SUELO CONTROL.....	94
17.1.	Humedad natural.....	94
17.2.	Gravedad específica	94
17.2.1.	Curva de calibración	94
17.3.	Relaciones volumétricas y gravimétricas.....	95
17.4.	Humedad óptima.....	96
17.5.	Límites de consistencia.....	97
17.5.1.	Límite líquido.....	97
17.5.2.	Límite plástico.....	98
17.5.3.	Contracción lineal.....	98
17.6.	Gráfica de plasticidad SUCS.....	99
17.7.	Análisis granulométrico.....	100
17.8.	Materia orgánica	102
17.9.	Potencial de hidrógeno (ph).....	102
17.10.	Permeabilidad.	102
18.	APENDICE PROPIEDADES DEL SUELO CONTAMINADO	103
18.1.	Humedad natural.....	103
18.2.	Gravedad específica.	103
18.3.	Relaciones volumétricas y gravimétricas.....	103
18.4.	Humedad óptima.....	104
18.5.	Límites de consistencia.....	105
18.5.1.	Límite líquido.....	105
18.5.2.	Límite plástico.....	106
18.5.3.	Contracción lineal.....	106
18.6.	Gráfica de plasticidad SUCS.....	107
18.7.	Análisis granulométrico.....	108
18.8.	Materia orgánica	110
18.9.	Potencial de hidrógeno (ph).....	110
18.10.	Permeabilidad.	110

19.	APENDICE DETERMINACIÓN DE CURVA DE RETENCIÓN AGUA-SUELO MEDIANTE SUCCIÓN DEL PAPEL FILTRO	111
19.1.	Calibración de papel filtro whatman no. 50.....	111
19.2.	Suelo control preparación de muestras para medición de succión por el método de papel filtro.....	112
19.3.	Suelo contaminado preparación de muestras para medición de succión por el método de papel filtro.....	113
20.	APENDICE DE PRUEBAS TRIAXIALES NO CONSOLIDADA NO DRENADA	115
20.1.	Pruebas suelo control.....	115
20.2.	Pruebas suelo contaminado.....	116
21.	APENDICE DE PRUEBAS DE CONSOLIDACIÓN	118
21.1.	Suelo control.	118
21.2.	Suelo contaminado.....	119
22.	APENDICE DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	121
22.1.	Suelo control.	121
22.2.	Suelo contaminado.....	122
23.	APENDICE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO	124
23.1.	Suelo control.	124
23.2.	Suelo contaminado.....	125
24.	APENDICE DISEÑO ESTRUCTURAL	127
24.1.	Ánálisis de bajada de cargas de casa-habitación.....	127
24.2.	Apéndice diseño losa de cimentación.....	132

5. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fases de un suelo no saturado de acuerdo a Juárez (2005)	17
Figura 2. Fases de un suelo saturado de acuerdo a Juárez (2005)	18
Figura 3. Impactos ambientales y en la población por la disposición inadecuada de los Residuos Sólidos Urbanos. Elaboración de Sánchez (2024).....	21
Figura 4. Curva Característica de Agua-Suelo para suelos ordinarios (Briaud, 2023).....	29
Figura 5. Tipos comunes de losas de cimentación (Das, 2011).....	33
Figura 6. Tipos de fallas (Das, 2011).....	35
Figura 7. Perfil de asentamiento elástico y presión de contacto sobre arcilla: (a) cimentación flexible; (b) cimentación rígida (Das, 2015).....	36
Figura 8. Forma típica de la curva de consolidación en arcillas (Das, 2015).....	38
Figura 9. Curva de compresibilidad de acuerdo a (Juárez, 2005)	39
Figura 10. a) Muestra alterada Suelo Contaminado. b) Muestra alterada Suelo Control....	40
Figura 11. Determinación de peso específico del suelo.	41
Figura 12. Matraz para determinar el peso específico relativo de sólidos.	43
Figura 13. Mallas para granulometría.	44
Figura 14. Análisis granulométrico vía hidrómetro.....	45
Figura 15. Obtención del peso del cilindro con suelo.	48
Figura 16. Copa de Casagrande.....	49
Figura 17. Determinación de Límite Líquido por el método de la copa de Casagrande....	49
Figura 18. Determinación de Límite de Contracción Lineal.....	50
Figura 19. Determinación de Límite Plástico.....	51
Figura 20. Carta de Plasticidad de acuerdo a SUCS.	52
Figura 21. Prueba de permeabilidad.....	54
Figura 22. Muestras en consolidómetros.....	56
Figura 23. Prueba de succión (Elaboración propia).	58
Figura 24. Calibración de papel filtro.....	58
Figura 25. Muestras después del proceso de secado.	59
Figura 26. Prueba triaxial UU.	60
Figura 27. Muestra alterada en el anillo de consolidación.	61
Figura 28. Equipo de consolidación.	62
Figura 29. Portamuestras de suelos a estudiar.	63
Figura 30. Equipo de análisis de microscopía de barrido.....	64
Figura 31. Medición de pH mediante potenciómetro.....	65
Figura 32. Carta de plasticidad para la Clasificación del suelo contaminado y control.....	69
Figura 33. Curva Granulométrica "Suelo Control y Suelo Contaminado".	70
Figura 34. Curva de Retención Agua-Suelo Control.....	71
Figura 35. Curva de Retención Agua-Suelo Contaminado.	72
Figura 36. Curvas de humedecimiento y secado de suelo control y suelo contaminado. ...	73
Figura 37. Curva de compresibilidad Suelo Control.	75
Figura 38. Curva de Compresibilidad Suelo Contaminado.....	76

Figura 39. Comparativa de curvas de compresibilidad de suelo control y suelo contaminado	78
Figura 40. Comparativa de suelo control y suelo contaminado de prueba proctor estandar.....	79
Figura 41. Curva esfuerzo-deformación de suelo control y suelo contaminado.....	80
Figura 42. Imagen Microscopio Electrónico de Barrido, muestra Contaminada, aumento 5x.....	82
Figura 43. Detalle de losa maciza.....	83
Figura 44. Curva de calibración de matraz para prueba de peso específico relativo de sólidos.....	94
Figura 45. Diagrama de relaciones gravimétricas y volumétricas de suelo control.....	96
Figura 46. Curva humedad óptima Suelo Control.....	97
Figura 47. Límite Líquido, línea de tendencia.....	98
Figura 48. Carta de plasticidad de Suelo Control.....	99
Figura 49. Curva granulométrica Suelo Control	101
Figura 50. Diagrama de relaciones gravimétricas y volumétricas de Suelo Contaminado.....	104
Figura 51. Curva humedad óptima Suelo Contaminado	105
Figura 52. Límite Líquido, línea de tendencia	106
Figura 53. Carta de plasticidad Suelo Contaminado	107
Figura 54. Curva granulométrica Suelo Contaminado	109
Figura 55. Curva de calibración de papel filtro Whatman No. 50	111
Figura 56. Curva retención agua-suelo contaminado	114
Figura 57. Gráfica esfuerzo-deformación Suelo Control	115
Figura 58. Círculos de mohr y envolvente de falla Suelo Control	116
Figura 59. Gráfica esfuerzo-deformación Suelo Contaminado	116
Figura 60. Círculos de mohr y envolvente de falla Suelo Contaminado	117
Figura 61. Curva de compresibilidad Suelo Control	119
Figura 62. Curva de compresibilidad Suelo Contaminado	120
Figura 63. Difracción de rayos X "Suelo Control".....	121
Figura 64. Difracción de rayos X "Suelo Contaminado"	122
Figura 65. Histograma "Suelo Control"	124
Figura 66. Histograma "Suelo Contaminado"	125
Figura 67. Plano arquitectónico "Planta baja" de casa de interés social	129
Figura 68. Plano arquitectónico "Planta alta" casa interés social.....	130
Figura 69. Plano arquitectónico "Azotea" casa interés social	131

6. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características químicas de los contaminantes y efectos en el suelo.....	24
Tabla 2. Clasificación de índice de Colapso, de acuerdo a ASTM D 5333-03.....	55
Tabla 3. Concentraciones de sal para evaluar la succión del suelo, de acuerdo a ASTM D 5298-10.....	57
Tabla 4. Suelo Control y Suelo Contaminado.....	67
Tabla 5. Límites de Consistencia "Suelo Control y Suelo Contaminado".....	68
Tabla 6. Suelo Control y Suelo Contaminado.....	70
Tabla 7. Datos de pruebas de consolidación.....	74
Tabla 8. Resultados de ensayos edométricos "Suelo Control".....	74
Tabla 9. Resultados de ensayos edométricos "Suelo Contaminado".....	75
Tabla 10. Comparativo de relación de vacíos de suelo control y suelo contaminado.	76
Tabla 11. Comparativa de índices y asentamiento de suelo control y suelo contaminado. .	77
Tabla 12. Datos para la realización de probetas de suelo control y suelo contaminado.....	79
Tabla 13. Valores de cohesión y ángulo de fricción en ensayos de corte directo del suelo control y suelo contaminado.....	80
Tabla 14. Imágenes con microscopio electrónico de barrido de suelo control y suelo contaminado.	82
Tabla 15. Especificaciones para diseño de losa maciza.....	83
Tabla 16. Comparativa de capacidad de carga de suelo control y suelo contaminado.	84
Tabla 17. Contenido de humedad natural.	94
Tabla 18. Calibración de matraz para prueba de peso específico de sólidos.	94
Tabla 19. Peso relativo de sólidos.....	95
Tabla 20. Relaciones volumétricas y gravimétricas.....	95
Tabla 21. Dimensiones de molde proctor estándar.	96
Tabla 22. Resultados proctor estándar suelo control.	96
Tabla 23. Límite líquido con Copa de Casagrande.	97
Tabla 24. Determinación de límite plástico.	98
Tabla 25. Determinación de Contracción Lineal.	98
Tabla 26. Resumen de Límites de Consistencia de Suelo Control.	99
Tabla 27. Análisis granulométrico Suelo Control.....	100
Tabla 28. Análisis granulométrico vía hidrómetro Suelo Control.	101
Tabla 29. Determinación de Materia Orgánica en Suelo Control.	102
Tabla 30. K promedio de Suelo Control.	102
Tabla 31. Contenido de humedad natural.	103
Tabla 32. Peso relativo de sólidos.....	103
Tabla 33. Relaciones gravimétricas y volumétricas.....	103
Tabla 34. Dimensiones molde proctor estándar.	104
Tabla 35. Resultados proctor estándar Suelo Contaminado.	104
Tabla 36. Determinación de Límite Líquido.....	105
Tabla 37. Determinación Límite Plástico.	106
Tabla 38. Determinación de Contracción Lineal.	106
Tabla 39. Resumen de Límites de Consistencia Suelo Contaminado.	107

Tabla 40. Análisis granulométrico Suelo Contaminado.....	108
Tabla 41. Análisis granulométrico vía hidrómetro Suelo Contaminado.....	109
Tabla 42. Determinación de Materia Orgánica en Suelo Contaminado.....	110
Tabla 43. k promedio Suelo Contaminado.....	110
Tabla 44. Concentración de la solución salina para calibración del papel filtro.	111
Tabla 45. Trayectoria de humedecimiento de suelo control.	112
Tabla 46. Trayectoria de secado de suelo control.	112
Tabla 47. Curva de retención agua-suelo control.	113
Tabla 48. Trayectoria de humedecimiento de suelo contaminado.....	113
Tabla 49. Trayectoria de humedecimiento de suelo contaminado.....	114
Tabla 50. Prueba triaxial UU Suelo Control.	115
Tabla 51. Prueba triaxial UU Suelo Contaminado.....	116
Tabla 52. Datos Suelo Control.	118
Tabla 53. Consolidación Suelo Control.	118
Tabla 54. Datos Suelo Contaminado.....	119
Tabla 55. Suelo Contaminado Consolidación.....	120

7. INTRODUCCIÓN

7.1. ANTECEDENTES

Los residuos sólidos urbanos tienen su disposición final en lugares determinados en distintas partes de la ciudad, estos lugares reciben nombre de vertederos a cielo abierto y rellenos sanitarios; sus emisiones gaseosas y líquidas tendrían un impacto negativo hacia el medio ambiente. Su falta de tratamiento además pone en riesgo la salud pública de los habitantes que habitan cerca de la zona (Khan et al., 2022; Sánchez-Muñoz et al., 2020).

En América Latina el problema con la gestión de vertederos contaminados es alarmante debido a que por falta de infraestructura depositan los residuos sin controles ambientales. Esto ha provocado que estos países involucren este problema en su agenda política en busca de soluciones, no sólo para reducir la cantidad generada de residuos, sino para mitigar su repercusión en el medio ambiente (Diana Ibarra Rodríguez, 2015; Sánchez-Muñoz et al., 2020).

Las emisiones líquidas y gaseosas altamente contaminantes de los residuos sólidos urbanos se conocen como lixiviados, estos tienen un impacto negativo, ya que, al no ser controladas, se infiltran a las capas del suelo y acuíferos y como consecuencia los terminan contaminando (Gonzales Sullcaray, 2021).

Los lixiviados pueden diferenciarse dependiendo de su tipo de contenido y cantidad, y que dependiendo de la región se puede aplicar la remediación más adecuada. En países en vía de desarrollo como lo es México, se presentan mayores concentraciones de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), amoniaco, metales y sustancias precipitables; para la remediación de los lixiviados existen distintos métodos, los convencionales que son tratamientos biológicos, recirculación, tratamientos fisicoquímicos, membranas y tratamientos biológicos, mejor conocidos como biorremediación (Chávez, 2011).

La situación actual que existe en la zona metropolitana de Querétaro respecto al crecimiento poblacional que incide en la alta densidad, principalmente es el uso del suelo, la alta densidad de personas que habitan y el gran número que se muda diariamente, es un problema que está generando consecuencias como: alta demanda de sitios para vivir, altos costos de vivienda y la búsqueda de sitios para construir viviendas (Solano Martínez, 2021).

En esta investigación, se realiza un estudio geotécnico para evaluar la modificación de las propiedades índices de un suelo contaminado con lixiviados. Así, determinar la capacidad de carga y asentamientos que presentaría una construcción desplantada en este tipo de suelos contaminados y validar si es viable su uso con este fin.

8. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

A pesar del creciente interés en la problemática de la contaminación del suelo por lixiviados, se evidencia una carencia sustancial en la comprensión cuantitativa de cómo estas intervenciones de contaminantes impactan la estructura del suelo. Esta brecha estadística obstaculiza la formulación de estrategias eficaces para la restauración de suelos contaminados por lixiviados de vertederos (Mendoza-Burguete et al., 2023; Zegzouti et al., 2019).

En la investigación de (Salimnezhad et al., 2021). se observaron los efectos de la contaminación por petróleo en un suelo. Los efectos por la contaminación por petróleo en el suelo fueron: disminución de la cohesión, la resistencia a la compresión simple y alteración de los límites de Atterberg; sin embargo, cuando se le aplicó la biorremediación, sus efectos en las características fueron: incremento de cohesión y mayor resistencia al corte.

Desde una perspectiva numérica, la problemática adquiere una relevancia significativa en el ámbito social. Los suelos contaminados, al perder su aptitud para la construcción, generan cifras impactantes en términos de pérdida económica y limitaciones en el desarrollo urbano (J. Liu et al., 2020). De acuerdo con estudios recientes de acuerdo con Orellana et al. (2022) se estima que el costo asociado a la falta de disponibilidad de suelos aptos para construcción debido a la contaminación está entre los 50.7 USD hasta los 310.4 USD por m^3 , debido a que los costos de tratamiento de biorremediación en un suelo se sitúan dentro del 60% de los proyectos más caros, afectando directamente a la planificación y crecimiento de las ciudades.

La presencia de metales como fuentes de contaminación subraya la urgencia de abordar este problema desde una perspectiva estadística. De acuerdo con L. Liu et al. (2018) por ejemplo, indican que las concentraciones de metales pesados, tales como el plomo, el cadmio y el mercurio, en suelos contaminados por lixiviados, superan 20 millones de hectáreas de suelo en todo el mundo. Este aumento en la presencia de metales no solo representa un riesgo medioambiental, sino que también expone a las comunidades locales a graves amenazas para la salud, con impactos directos en los sistemas de atención médica y, por ende, en los recursos financieros de las regiones afectadas (Entwistle et al., 2019; Rehman et al., 2018). Un ejemplo de ello, es el relleno sanitario Bordo Poniente, ubicado en el noreste de la Ciudad de México, que, en épocas de lluvia, algunos metales mostraron incrementos debido a una mayor lixiviación por el agua de lluvia, por lo que en esa época presenta un riesgo ambiental (Robles-Martínez et al., n.d.).

En el marco de este estudio, el enfoque cuantitativo busca proporcionar una base sólida de datos que respalte la toma de decisiones de restauración de suelos. Los resultados de este análisis proporcionarán datos cruciales para respaldar políticas medioambientales y promover una gestión sostenible de los recursos naturales (Arora, 2018; Pande et al., 2020).

9. JUSTIFICACIÓN

Esta investigación se centra en la importancia de evaluar el efecto de la contaminación por lixiviados en un suelo donde existe un problema de manejo de los residuos urbanos. Destacando la necesidad de una comparación desde el punto de vista mecánico en los campos de geotecnia e ingeniería civil (Apunayta & Puellas, 2022).

Desde la perspectiva de la ingeniería civil y la geotecnia, la evaluación mecánica de los suelos desempeña un papel crucial en la planificación y ejecución de proyectos de construcción. La variación en las propiedades mecánicas de los suelos contaminados frente al suelo control, es decir muestra tomada de la misma zona con la seguridad de que no estaba contaminado, presenta una oportunidad para entender los efectos de la contaminación en términos de resistencia, compresibilidad y otras características geotécnicas (Eslami & Joodat, 2018).

El área al ser un vertedero actualmente presenta problemáticas como lo son alteraciones al paisaje, afecta a los centros poblados aledaños y a sus actividades que realizan día con día.

De acuerdo con las investigaciones de Ramírez et al., (2017) en suelos contaminados por lixiviados, estos sufren cambios significativos en las propiedades físicas, estructurales, químicas, hidro-mecánicas y mineralógicas, lo que provoca una degradación en su comportamiento geotécnico, tornando el suelo en inestable y vulnerable.

La comparación mecánica entre el suelo control y el suelo contaminado con lixiviados, no solo proporcionará información valiosa para el diseño de estructuras y cimentaciones, sino que también representa un avance significativo en el ámbito científico. La identificación de cambios en las propiedades mecánicas como resultado de los contaminantes, permitirá una comprensión más profunda de los procesos implicados y contribuirá a la optimización de las estrategias de rehabilitación del suelo.

10. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

10.1. Hipótesis

La contaminación por lixiviados en suelos con vertederos influye en la capacidad de carga del suelo, lo que impedirá su uso en proyectos de cimentaciones en el área de mecánica de suelos.

10.2. Objetivo general

Determinar la influencia de la contaminación por lixiviados en las propiedades físicas y mecánicas de un suelo por medio de un estudio geotécnico y el impacto que tiene en su capacidad de carga y asentamientos.

10.3. Objetivos específicos

- 1.-Determinar las características físicas, mecánicas, mineralógicas y químicas del suelo de acuerdo con las normativas vigentes para México “NMX”,mediante pruebas de laboratorio y evaluar su influencia en la estabilidad del suelo.
- 2.- Determinar el impacto de la contaminación del suelo para identificar las mejoras o deficiencias en sus propiedades físicas y mecánicas.
- 3.-Formular recomendaciones específicas para el diseño de estructuras de ingeniería civil en áreas previamente contaminadas con lixiviados en vertederos abiertos.

11. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

11.1. Globo terrestre

El globo terrestre está compuesto por un núcleo central que es rodeado por un manto fluido conocido como magma, y lo que envuelve al magma es la capa de corteza terrestre, una capa formada principalmente por silicatos, con un espesor promedio entre 30 km y 40 km. Sobre la corteza terrestre se encuentra una delgada capa resultante por la descomposición y disagregación de esta misma, conocida como suelo, que es el objetivo de estudio de la Mecánica de Suelos (Juárez & Rico, 2005).

11.2. Suelo

En términos de geología, suelo es producto de la erosión que se ejercen sobre las rocas preexistentes y depositadas, debido a esto, el suelo está formado por partículas de distintos tamaños (desde micras a centímetros), puede tener presencia de materia orgánica e inorgánica; estas partículas están unidas por fuerzas débiles de contacto que son separables por medios mecánicos (González, 2002).

La corteza terrestre está en constante intemperización, principalmente por la desintegración mecánica y descomposición química. En la desintegración mecánica influyen agentes físicos, como los cambios periódicos de la temperatura, efectos de organismos y plantas, esto ocasiona que las rocas lleguen a transformarse en arenas, limos y arcillas. En la descomposición química, las rocas son atacadas por agentes (principalmente el agua) que cambian su mineralogía y composición química (Juárez & Rico, 2005).

11.3. Tipos de suelos.

11.3.1. Suelos residuales y transportados.

Se denominan suelos residuales a aquellos que se forman en el mismo lugar donde se encuentra la roca madre y son atacados por agentes de intemperismo. Por otro lado, cuando estos suelos son desplazados por agentes geológicos como el agua, viento o glaciares, se convierten en suelos transportados que pueden sobreyacer con estratos con los que no tienen una relación directa en cuanto a origen geológico

11.3.2. Suelos Saturados y No Saturados.

Existen tres fases en un suelo: la fase sólida formada por partículas minerales del suelo, la fase líquida que es el agua y la fase gaseosa que es principalmente el aire, aunque se pueden encontrar otros gases. Las fases líquida y sólida se comprenden como el “Volumen de vacíos” y la fase sólida como el “Volumen de los sólidos”. Referente a esto, los suelos se clasifican en “Suelos Saturados” que es cuando todos sus vacíos están ocupados por agua y sólo tienen dos fases: sólida y líquida; y “Suelos no saturados” que contienen las tres fases: sólido, líquido y gaseoso (Rojas et al., 2020).

Las tres fases de los suelos tienen influencia en las propiedades de los suelos, esto debido a que se pueden obtener por medio de relaciones otras magnitudes, que se conocen como “Relaciones Volumétricas y Gravimétricas”. En la figura 1, se representa las fases del suelo no saturado y en la figura 2 las fases de un suelo saturado (Rojas et al., 2020).

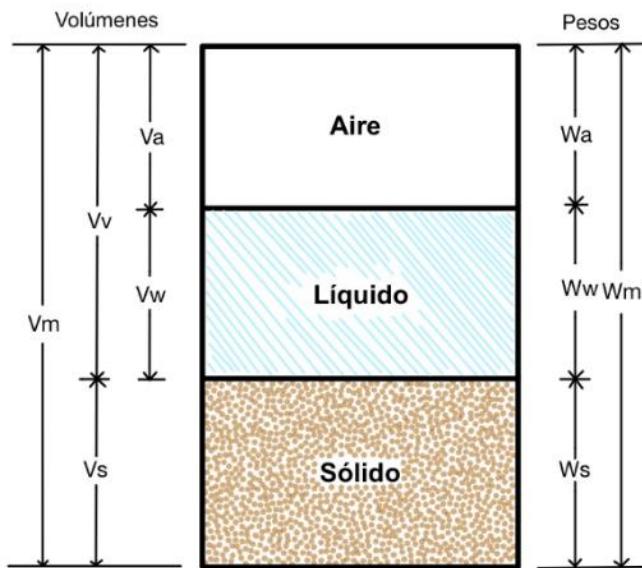


Figura 1. Fases de un suelo no saturado de acuerdo a Juárez (2005)
(Elaboración propia).

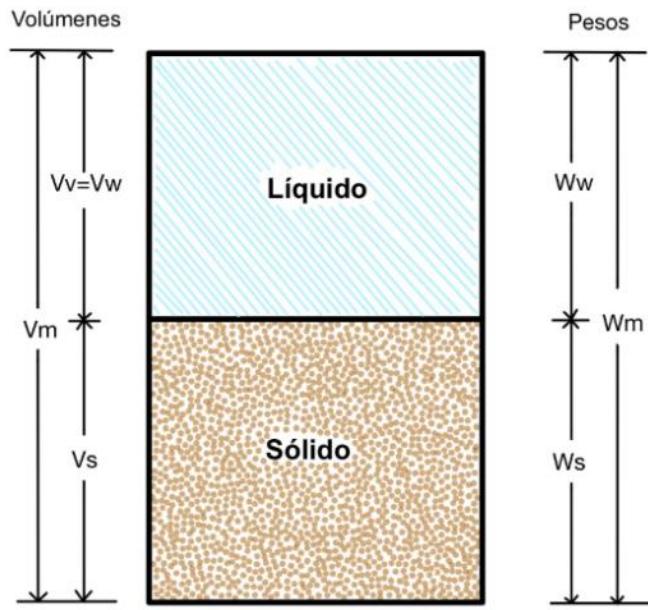


Figura 2. Fases de un suelo saturado de acuerdo a Juárez (2005)
(Elaboración propia).

Donde:

V_m = Volumen total de la muestra de suelo.

V_s = Volumen de la fase sólida de la muestra de suelo.

V_v = Volumen de los vacíos de la muestra de suelo.

V_w = Volumen de la fase líquida contenida en la muestra.

V_a = Volumen de la fase gaseosa de la muestra.

W_m = Peso total de la muestra de suelo.

W_s = Peso de la fase sólida de la muestra de suelo.

W_w = Peso de la fase líquida de la muestra de suelo.

W_a = Peso de la fase gaseosa de la muestra de suelo, considerada como nulo en Mecánica de Suelos.

11.4. Estudio de la Mecánica de Suelos.

La Mecánica de Suelos estudia las propiedades de los distintos tipos de suelo considerando factores como la carga y el tiempo, esto permite analizar su comportamiento y garantizar la estabilidad de las estructuras, esto debido a que el suelo desempeña un papel fundamental, ya sea como soporte de cimentaciones, como material de construcción o como un medio de interacción entre el agua y las estructuras. Cualquier estructura que el ser humano construya

debe apoyarse sobre suelo o roca, o interactuar con ellos de alguna manera. Esto aplica para edificios, carreteras, muros, presas, túneles y muchas otras obras que necesariamente están en contacto directo con suelos o rocas. La evaluación mecánica de los suelos es esencial en la planificación y diseño de proyectos de construcción. Propiedades como la resistencia a la compresión, la permeabilidad, la plasticidad y la consolidación son determinantes para la selección adecuada de cimentaciones, la estabilidad de taludes y otros aspectos geotécnicos (Rojas et al., 2020).

11.5. Suelos Contaminados.

Según la NOM-138-SEMANART/SS-2012, se define un suelo contaminado como aquel que contiene concentraciones de contaminantes que exceden los límites máximos permisibles establecidos en la norma, por lo que, representa un riesgo para la salud humana, el ecosistema y su uso previsto.

El suelo es un componente del ecosistema urbano, que principalmente enfrenta efectos por la creciente urbanización en ciudades, principalmente en países en vías de desarrollo y debido a sus actividades, el suelo sufre cambios, esto por su composición mineralógica que tiende a cambiar con la acumulación de nuevas sustancias, entre ellos los contaminantes (Jaffar et al., 2024).

Los agentes contaminantes se clasifican según su efecto primario:

- Contaminación física: son sustancias que generan cambios en parámetros como la temperatura o la radiactividad.
- Contaminación biológica: se refiere a la introducción de especies externas que alteran el equilibrio natural de los microorganismos presentes en el suelo.
- Contaminación química: implica sustancias que, debido a su presencia o alta concentración, modifican la composición original del suelo.

La contaminación química es la más predominante y el grupo de contaminantes químicos más característicos y peligrosos son los metales, los cuales tienen distintos tipos de remediación como química, física y biorremediación (Xing et al., 2025).

La contaminación del suelo puede alterar propiedades físicas, químicas, mineralógicas, estructurales y principalmente mecánicas, en consecuencia, afectando el comportamiento geotécnico, la capacidad del suelo para soportar cargas estructurales y comprometiendo la seguridad y durabilidad de las infraestructuras (Rojas et al., 2020).

Desde el punto de vista geotécnico, los suelos tienden a cambiar sus características físicas, químicas y mecánicas, cuando han sido expuestos a ciertos tipos de contaminantes; por ejemplo: la contaminación de un suelo con aguas residuales modifica significativamente sus propiedades geotécnicas, haciéndolo más ácido, compresible y friccionante, que al final

compromete integridad de las cimentaciones construidas en los suelos contaminados (Gaxiola Gómez et al., 2019).

Otros contaminantes como el diesel, generan alteraciones sobre el comportamiento mecánico y químico de los suelos, en un estudio de una arcilla, el diesel afectó significativamente en sus propiedades granulométricas, al incrementar los finos disminuyó su uniformidad y disminuyó su cohesión, esto pone en riesgo las infraestructuras sobre los suelos contaminados (García-Ramírez & Hernández-Mendoza, 2019).

11.6. Vertederos.

En México la práctica más común para disponer los residuos sólidos urbanos en el suelo es el relleno sanitario debido a ser económica y fácil de operar; esto se ha incrementado en los últimos años debido al aumento de crecimiento urbano en América Latina, principalmente por el fenómeno migratorio (Cárdenes, 2024).

La construcción de vertederos es una técnica que se basa en principios de ingeniería que permiten confinar los desechos en un espacio reducido, compactándolos y cubriendolos diariamente con capas de tierra para reducir su volumen y optimizar la capacidad de almacenamiento del sitio. Asimismo, contempla medidas para gestionar los líquidos y gases derivados de la descomposición de la materia orgánica (Sánchez, 2024).

Sin embargo, en el proceso de operación existen factores que pueden causar problemas en un vertedero como lo son:

- Lixiviados: Las características de los lixiviados en los rellenos sanitarios dependen de factores como el tipo de residuos, condiciones del lugar, capacidad del suelo para filtrar contaminantes y cantidad de agua que entra en contacto con los desechos.
- Gases: El relleno sanitario actúa como un reactor bioquímico. Se produce principalmente el biogás, que se genera por la fermentación de la materia orgánica compuesta principalmente de metano y bióxido de carbono (Sánchez, 2024).
- Temperatura: La temperatura en un relleno está directamente relacionada con la composición de los residuos. Los incendios subterráneos suelen ocurrir debido a la infiltración de oxígeno en los residuos.
- Presión de poros y estabilidad de taludes: Durante la operación de un relleno sanitario, es crucial evaluar las características del suelo, analizar los taludes adyacentes, determinar la resistencia y compresibilidad del relleno, y controlar las deformaciones con el tiempo
- Asentamientos: La magnitud y duración de los asentamientos dependen de factores como la profundidad del relleno, tipo de desechos, compactación y lluvias en la región, lo que puede dificultar su uso.
- Contaminación de aguas subterráneas: Los lixiviados pueden contaminar el agua subterránea al infiltrarse a través del suelo, especialmente si este es permeable o

presenta fracturas. Esto puede afectar manantiales y acuíferos, generando un impacto negativo en la calidad del agua y del suelo.

Un vertedero se comporta como un reactor biológico, en donde los microorganismos hidrolizan los materiales presentes en los desechos, posteriormente pasan por una etapa de degradación de la materia orgánica en donde hay una disminución del oxígeno presente y da como resultado la producción de biogás. Conforme pasa el tiempo el vertedero se va estabilizando, lo que modifica la concentración de contaminantes (medida como Demanda Química de Oxígeno) y la fracción biodegradable va disminuyendo (Tello et al., 2018).

En la siguiente figura, se presenta los impactos ambientales y en la población debido a una inadecuada disposición de los residuos sólidos urbanos, como se observa genera una contaminación hacia el suelo y por ende el ecosistema en el que se encuentra. Otro impacto importante es hacia la salud para la comunidad que se encuentre cercana, ya que, genera la proliferación de enfermedades como el dengue y la malaria, y la exposición prolongada de compuestos volátiles está asociada con enfermedades como el cáncer, daños al sistema nervioso central y complicaciones respiratorias (Sánchez, 2024).



Figura 3. Impactos ambientales y en la población por la disposición inadecuada de los Residuos Sólidos Urbanos. Elaboración de Sánchez (2024).

11.7. Contaminantes: Lixiviados.

Son líquidos generados por la descomposición de residuos y la filtración de agua de lluvia, pero en la mayoría de los casos, los rellenos sanitarios contienen cantidades de agua suficiente para su formación sin necesidad de aguas meteóricas (Sánchez, 2024). De acuerdo con la normativa mexicana (NOM-052-SEMARNAT-2005), los lixiviados son considerados como residuos peligrosos.

Dentro de estos vertederos, los residuos experimentan procesos de descomposición y compactación, lo que genera lixiviados: un residuo líquido complejo compuesto por compuestos orgánicos e inorgánicos, subproductos microbianos y otros componentes derivados de la degradación y percolación de los desechos. La composición de un lixiviado varía significativamente debido a factores como: tipo de residuos, clima, diseño del vertedero, edad del vertedero y sus prácticas operativas (Igwegbe et al., 2024a).

La composición química de los lixiviados incluye 4 tipos de contaminantes que son materia orgánica e inorgánica, compuestos orgánicos xenobióticos y metales pesados. Los compuestos más comunes de materia orgánica e inorgánica son: descomposición orgánica de residuos, ácidos grasos volátiles y compuestos orgánicos biodegradables; en los metales pesados se tiene el hierro, manganeso, aluminio, plomo, cadmio, mercurio y cromo; en los compuestos orgánicos xenobióticos son compuestos como el benceno, fenoles y ftalatos (Lindamulla et al., 2022). Sin embargo, se tiene nutrientes (nitrógeno amoniacal, nitrato y compuestos de fósforo), gases disueltos y diversos iones inorgánicos (Igwegbe et al., 2024a).

Los metales pesados se pueden encontrar fácilmente en los suelos de forma natural, como lo son el arsénico y cromo, que son relativamente abundantes en suelos y pueden liberarse mediante disolución o difusión de la fase sólida. Las actividades microbianas en ambientes anaeróbicos dentro de los vertederos pueden influir en la movilización de los metales en el entorno, por lo que, cuando las capas de suelos se saturan con lixiviados, puede llegar a la disolución de los minerales del suelo (Hussein et al., 2021).

El suelo y las plantas, tiene capacidad para absorber metales, esto ha provocado que la concentración de los metales como lo son el plomo y el cobre (que tienen presencia en desechos electrónicos, baterías usadas, tuberías y pintura) en suelos estudiados sea de aproximadamente de 1 mg/kg. Los metales pesados pueden permanecer en los vertederos durante un tiempo aproximado de 150 años, esto en caso de filtrarse a una tasa de 400 mm/año (Hussein et al., 2021).

La materia orgánica tiene influencia en la toxicidad de los metales pesados, esta interacción está relacionada con el “Potencial de Hidrógeno” (pH), de manera que los metales pesados se separan de los sólidos cuando el pH decrece y cuando este se incrementa se absorben, de acuerdo con (Campillo-Cora et al., 2025). El lento movimiento de los metales pesados se debe a su fuerte sorción en las partículas del suelo. La concentración de metales pesados tiene

influencia sobre el tipo de tratamiento que se va a utilizar en los lixiviados, esto debido a que la concentración de metales es distinta de acuerdo a la edad del vertedero porque suelen presentar cambios en su pH (Seyyed, 2023).

De acuerdo con (Podlasek et al., 2023) los lixiviados se clasifican de acuerdo a su pH:

- Lixiviado inmaduro: pH menor a 6.5.
- Lixiviado maduro: pH mayor a 7.5.

Para el tratamiento de lixiviados en los suelos, se practican variedad de técnicas combinadas que pueden manejar la variabilidad de la contaminación de un lixiviado a través del tiempo; se ha demostrado que los procesos biológicos son los más efectivos para tratar lixiviados inmaduros, mientras que los tratamientos físico-químicos son más efectivos para lixiviados maduros (Chaturvedi et al., 2018).

Dependiendo de la edad del lixiviado, se aplica un tratamiento que tenga más efectividad dependiendo a sus características, como pH, edad, “Demanda Química de Oxígeno” (COD), “Demanda Bioquímica de Oxígeno” (DBO) y la relación BOD/COD (Clemente et al., 2024). Los principales tratamientos que se aplican de acuerdo a la edad del lixiviado son:

Lixiviados con menos de 5 años de edad: reciclaje, co-tratamiento con aguas residuales domésticas, procesos aeróbicos y anaeróbicos.

Lixiviados de más de 5 años: floculación, adsorción de carbono, intercambio iónico, nanofiltración y ósmosis inversa.

11.8. Efecto de los lixiviados en las propiedades de los suelos.

El líquido que se desprende cuando los residuos se van descomponiendo, entra en contacto con los residuos sólidos, se forma el lixiviado, estos se desplazan verticalmente hasta llegar al subsuelo y su caracterización química suele llegar a ser muy compleja, por lo que, (Cortinas et al., 1999) clasifica las características químicas de estos contaminantes junto con los efectos que produce en el suelo, esto se observa más a detalle en la tabla 2.

Tabla 1. Características químicas de los contaminantes y efectos en el suelo.

Contaminante	Enlace	Efectos muy probables	Efectos posibles
Ácidos	Covalentes polares	Alteran pH	Disuelven minerales y materia orgánica
Bases	Iónicos	Alteran pH	Disuelven minerales anfóteros
Carbonato de sodio	Iónico soluble el carbonato se hidroliza	Aumenta el pH y la conductividad ocupa posiciones en el complejo de intercambio	El suelo pierde textura, se expande (sodicidad). La materia orgánica se solubiliza
Nitrato de sodio	Iónico soluble no se hidroliza	Aumenta conductividad y viaja a cuerpos de agua	Contamina acuíferos
Nitrato de amonio	Iónico soluble, hidrólisis ácida	Aumenta conductividad y viaja a cuerpos de agua	Eutroficación de cuerpos de agua
Plaguicidas Organoclorados	Covalente, Molecular dipolos inducidos	Ocupa poros, se adsorbe, permanente	Se bioacumulan concentrándose en grasa
Gasolina	Covalente no polar Líquido	Ocupa poros	Quita oxígeno, mata la vida del suelo y lentamente contamina acuíferos
Lubricantes	Covalente no polar Líquido	Ocupa poros	Quita oxígeno, mata la vida del suelo y lentamente contamina acuíferos
Cloruro de plomo	Iónico	En suelos ácidos queda soluble o forma quelatos insolubles En suelos básicos forma minerales insolubles	Se precipita en la raíz puede contaminar cuerpos de agua ácidos Se acumula como mineral
Arseniato de sodio	Iónico	Puede cambiar de estado de oxidación, y formar compuestos volátiles	Afecta la microbiota, Contamina acuíferos y en extremo la atmósfera

Fuente: Gutierrez Margaarita, 1997. *Curso Latinoamericano de Residuos Sólidos y Peligrosos (Módulo II Control de Residuos Peligrosos)* Tema: Nuevas tecnologías para el tratamiento de Residuos Peligrosos.

Los lixiviados de vertederos afectan las propiedades de los suelos, en sus propiedades químicas que pueden llegar a ser tóxicos para el medio ambiente y el ser humano, en las propiedades físicas se llega a tener una reducción en porosidad, altera la estructura del suelo provocando su compactación, en las propiedades mecánicas hay una disminución de la resistencia al corte que provoca una desestabilidad en el suelo haciéndolo susceptible a deslizamientos y asentamientos, aparte de que se pierde su capacidad de soportar cargas estructurales afectando las estructuras (Igwegbe et al., 2024). De acuerdo con (Song et al., 2024) las altas concentraciones de Zn^{2+} disminuye la resistencia mecánica debido a que cambia la estructura interna del suelo.

Un estudio que se hizo en un vertedero en India, para evaluar las propiedades del suelo contaminado, se llevaron a cabo pruebas de laboratorio de geotecnia que son: análisis granulométrico, prueba de compactación y prueba de corte directo. Las pruebas determinaron que el suelo contaminado tenía un mayor porcentaje de partículas finas, el contenido de humedad óptima y cohesión disminuyeron (Karthika et al., 2022).

De acuerdo con una investigación del efecto de la contaminación de los lixiviados en un suelo tropical, se comprobó que éste suelo contaminado por 15 años sufrió cambios significativos en sus características geotécnicas, químicas y mineralógicas. Principalmente en las características geotécnicas se observó una degradación. En la caracterización física disminuyó su comportamiento de plasticidad debido a la desagregación de las partículas que conlleva una alta absorción de agua. En la contracción hubo un aumento significativo lo que esto ocasiona grietas en los horizontes superficiales y desencadenen problemas de estabilidad. El lixiviado genera un efecto desagregador en las partículas de suelo, que granulométricamente existe mayor presencia de finos, provocando que el suelo pierda estabilidad en presencia del agua. El efecto del lixiviado provoca una disminución en el pH, generando mayor porosidad en el material (Ramírez et al., 2017).

En un estudio sobre el comportamiento de un suelo contaminado con uno no contaminado, llevado a cabo en la ciudad de Iraq, se analizaron sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, los cuales se presentó un cambio significativo en las propiedades del suelo contaminado (dependiendo el porcentaje de contaminante). Los contaminantes causaron un incremento en los valores de los límites de Atterberg, la relación inicial de vacíos, índice de compresión, cohesión y su potencial de colapso; los contaminantes causaron la disminución de los valores en la gravedad específica, la cohesión entre las partículas, el contenido óptimo de humedad y una disminución de resistencia al corte (Karkush et al., 2013).

(Gyabaah et al., 2024) llevaron a cabo un estudio en un vertedero de Ghana, Bono. Clasificado como un suelo arcilloso, se demostró la capacidad de este tipo de suelos en absorber contaminantes, observando que la trayectoria de los contaminantes disminuía, evitando que llegaran a fuentes de agua subterráneas cercanas.

11.9. Reutilización de rellenos sanitarios contaminados por lixiviados.

A medida que el valor del suelo incrementa, reutilizar vertederos antiguos o abandonados se ha vuelto una práctica más frecuente. Aunque construir sobre vertederos presenta importantes retos de ingeniería, existen aplicaciones ligeras e intensivas en la reutilización de los rellenos sanitarios (Oztoprak & Pisirici, 2011).

- Usos ligeros: Incluyen áreas de espacio abierto pasivo, como campos de golf, instalaciones deportivas, parques de oficinas y carreteras.
- Usos intensivos: Comprenden estructuras comerciales, industriales e infraestructuras, tales como centros comerciales, estadios y edificios académicos.

Según la literatura, los métodos de remediación implementados hasta ahora se enfocan mayormente en tratar suelos pequeños con altos niveles de contaminación. Sin embargo, estas técnicas, además de costosas, no son prácticas ni efectivas para grandes extensiones con bajas concentraciones de contaminantes. Por ello, la recuperación de antiguos vertederos a cielo abierto requiere el diseño de un plan específico, desarrollado a partir de una exhaustiva investigación previa (Masi et al., 2014).

En las últimas décadas, los vertederos han sido ampliamente estudiados. Aunque gran parte de los residuos específicos depositados en ellos son relativamente recientes, aún se desconoce cuánto tiempo requiere su descomposición completa. Investigaciones en vertederos antiguos han mostrado que, tras 15 años, cerca del 80% de los materiales orgánicos, como vegetales y alimentos, permanecen sin descomponerse. Además, los sistemas modernos de contención complican la predicción del proceso de degradación de los residuos, lo que hace que los vertederos sean percibidos como potenciales "bombas de tiempo" (Ospanbayeva & Wang, 2020).

El avance en la tecnología para el tratamiento de lixiviados presenta desafíos, esto debido a los costos operativos, los requerimientos energéticos y el mantenimiento necesario. Es fundamental realizar evaluaciones económicas que consideren los beneficios a largo plazo, como la mejora en la protección ambiental y los resultados en salud pública (Iwegbe et al., 2024a).

En Polonia, en Lomianki, un vertedero contenía grandes cantidades de arsénico, por lo que representaba una gran amenaza hacia los habitantes que vivían a los alrededores. El estudio se centró en la recuperación del terreno para ser utilizada en la construcción de un centro comercial, esto fue debido a la implementación de métodos de gestión de residuos y protección ambiental bajo los estándares ambientales de la Unión Europea (Sobieraj & Metelski, 2025).

En India, Swachh Bharat ha trabajado para la recuperación de vertederos y la minimización de su impacto ambiental, esto con la implementación de la técnica "Bio-minado" y la "Biorremediación" de residuos sólidos, esto con el fin de recuperar más de 10,000 hectáreas de suelo que son de uso de vertederos; la técnica de bio-minado implica la excavación, clasificación, estabilización y separación de los residuos con el suelo. Esta técnica implementada tiene el enfoque de remediar la contaminación del suelo y prolongar la vida del vertedero (Banerjee et al., 2022).

En otra investigación del vertedero Ariyamangalam ubicado en India, se evaluó el potencial de la reutilización del suelo contaminado para uso fuera del sitio, en donde se examinaron sus características geotécnicas y químicas; finalmente se recomendó el suelo para reutilización en profundidades menores, como aplicaciones en trabajos en tierra y material compostable, sin embargo, para reducir su concentración de metales pesados se recomienda un tratamiento de remediación (Devahi et al., 2024).

11.10. Succión.

La succión en suelos es una medida clave para describir el estado energético del agua en el suelo y se divide en succión matricial (física) y osmótica (química). Estos conceptos son fundamentales en la mecánica de suelos no saturados y tienen aplicaciones en estabilidad de taludes, diseño de cimentaciones y manejo del agua en suelos agrícolas. De acuerdo con (Rojas et al., 2020), la succión en los suelos tiene varias aplicaciones en la mecánica de suelos como lo son:

- Evaluación del comportamiento de suelos no saturados:
La succión en suelos es fundamental para describir el estado energético del agua en suelos no saturados, lo que afecta directamente a la resistencia al corte y la capacidad portante.
- Predicción en cambios volumétricos:
-Expansión y Contracción: En suelos arcillosos, los cambios en el contenido de agua y la succión pueden generar fenómenos de hinchamiento o contracción, importantes para prevenir daños en estructuras.
-Asentamientos Diferenciales: La succión permite prever y mitigar asentamientos diferenciales causados por cambios de humedad en el suelo.
- Hidrología y drenaje:
-Movimiento del Agua en el Suelo: La succión controla el flujo de agua dentro del suelo, desde zonas húmedas hacia zonas secas, lo cual es crucial para el diseño de sistemas de drenaje y obras hidráulicas.
-Curva Característica de Agua del Suelo (SWCC): Relaciona el contenido de agua con la succión, proporcionando información clave para modelar el comportamiento hidráulico del suelo.
- Agricultura:
Disponibilidad de Agua para las Plantas: La succión osmótica y matricial determinan la cantidad de agua disponible para las plantas en el suelo. Un control adecuado de la succión ayuda a optimizar sistemas de riego y evitar estrés hídrico en cultivos.
- Diseño de cimentaciones y taludes.
-Estabilidad de Taludes: La succión contribuye a la cohesión aparente del suelo, incrementando la estabilidad en pendientes. Sin embargo, su pérdida durante lluvias intensas puede conducir a deslizamientos.
-Cimentaciones Someras: La succión ayuda a mantener el suelo firme bajo cargas estructurales.
- Control de erosión
La succión desempeña un papel importante en la resistencia superficial del suelo frente a fuerzas externas, como el viento y el agua. Una reducción en la succión puede aumentar la susceptibilidad del suelo a la erosión.

11.10.1. Curva característica de agua del suelo (SWCC).

La Curva Característica de Agua del Suelo (SWCC) es una representación fundamental en el análisis de suelos no saturados. Describe la relación entre el contenido de agua en el suelo y la succión aplicada. Esta curva es esencial para comprender las propiedades hidráulicas y mecánicas del suelo, como la permeabilidad, la retención de agua y la resistencia al corte (Rojas et al., 2020).

Características de la curva característica de agua del suelo son:

- Rango de Saturación Total:
En valores bajos de succión, el suelo permanece saturado, con agua llenando todos los poros. En este rango, no se observa un cambio significativo en el contenido de agua.
- Presión de Entrada de Aire:
Corresponde al valor de succión a partir del cual el aire comienza a entrar en los poros del suelo, desplazando al agua. Este punto marca el inicio de la desaturación.
- Zona de Transición:
A medida que la succión aumenta más allá de la presión de entrada de aire, el contenido de agua disminuye rápidamente. En esta región, la mayoría del agua retenida en los poros más grandes es expulsada.
- Contenido de Agua Residual:
En suelos con poros muy pequeños, la retención de agua es alta incluso con succión significativa. Este punto, llamado contenido de agua residual, marca el nivel en el que un aumento adicional en la succión produce cambios mínimos en el contenido de agua.
- Estado Seco:
Al alcanzar niveles extremadamente altos de succión, el contenido de agua es prácticamente nulo, y el suelo se considera seco.

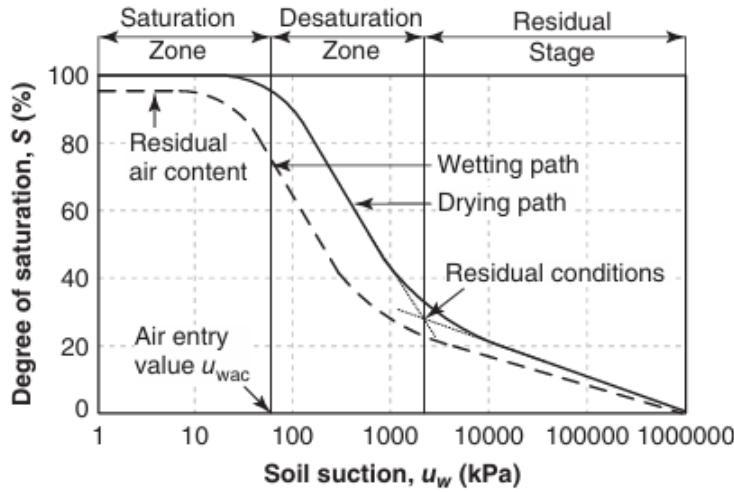


Figura 4. Curva Característica de Agua-Suelo para suelos ordinarios (Briaud, 2023)

11.11. Identificación mineralógica en suelos.

Como se mencionó antes, el suelo está conformado por diversos componentes, entre ellos están los minerales, que son los que determinan la mayor parte de los procesos fisicoquímicos que ocurren en un suelo y determinan las transformaciones biológicas, esto ha llevado a que la caracterización mineralógica sea esencial en un estudio de suelo, debido a que ayuda a interpretar sus propiedades como su actividad e interacción iónica, pH, disponibilidad de nutrientes, etc (Rojas et al., 2020).

Para poder identificar los minerales que constituyen un suelo, existen varios métodos, los más utilizados son: Microscopio Electrónico de Barrido y Difracción de Rayos X.

El microscopio electrónico de barrido (SEM) es una herramienta ampliamente empleada en la investigación de suelos gracias a su capacidad para ofrecer imágenes de alta resolución y analizar las propiedades morfológicas, estructurales y químicas de las muestras examinadas, esto registrando su respuesta al impacto de un haz de electrones primarios, cuando el haz de electrones de alta energía incide sobre la muestra, genera diversas señales que son captadas por los detectores del equipo. Estas señales proporcionan información valiosa y específica sobre aspectos como la topografía, composición química, y hasta la conductividad eléctrica de la muestra. Para generar la imagen, el haz de electrones se desplaza en el plano “xy” mediante sistemas ópticos, permitiendo recorrer el área seleccionada. Este método puede alcanzar una resolución muy alta, capaz de distinguir detalles tan pequeños como 2 nanómetros en la superficie del material (Gil et al., 2024).

La técnica de difracción de rayos x (XRD) es utilizada para identificar y analizar la mineralogía de la fracción de arcilla en suelos. Esta técnica se basa en la interacción de los

rayos X con los cristales presentes en la muestra, permitiendo determinar la geometría de la unidad estructural de los minerales. Es considerada una de las mejores técnicas para el estudio de arcillas cristalinas, debido a que proporciona información completa sobre todos los componentes presentes. La técnica es esencial para entender propiedades del suelo como la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la acidez, y su clasificación taxonómica y la disponibilidad de nutrientes (Ignacio et al., 2024).

11.12. Resistencia al corte en suelos no saturados.

De acuerdo con (Das, 2015), define la resistencia cortante de un suelo como la resistencia interna por unidad de área que la masa de suelo puede ofrecer a la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano en su interior que se pudiera generar; lo que (Briaud, 2023) define que ocurre por los contactos entre partículas, que se presionan entre sí, generando una fuerza de fricción que contribuye a la resistencia del suelo. La resistencia al corte está en función de la cohesión y resistencia a la fricción entre las partículas sólidas. La resistencia al corte es el factor que controla las cargas últimas en los proyectos geotécnicos.

En el laboratorio, los parámetros de resistencia cortante de un suelo se determinan mediante la prueba de corte directo y la prueba triaxial. Los principios de la resistencia al corte del suelo, permite analizar problemas como la capacidad de carga de cimentaciones superficiales, pilotes y pozos perforados (Briaud, 2023).

11.13. Prueba Triaxial.

La prueba triaxial de corte determina los parámetros de resistencia cortante, es de los métodos más confiables y utilizado en la investigación debido a que proporciona información sobre el comportamiento esfuerzo-deformación de un suelo, proporciona más flexibilidad en la trayectoria de carga y proporciona condiciones de esfuerzo más uniformes. En esta muestra se toma una muestra de suelo en forma de probeta, que estará cubierta por una membrana y se coloca dentro de una cámara cilíndrica saturada con agua, esta muestra es sometida a presión de confinamiento y a través de un esfuerzo axial a través de un pisón se provoca la falla cortante (Das, 2015).

Existen tres tipos de pruebas triaxiales:

- Prueba consolidada-drenada (prueba CD):

La muestra se somete a una presión de confinamiento envolvente por la compresión del fluido de la cámara, por lo que, conforme se va aplicando la presión de confinamiento.

El propósito de la prueba, es determinar los parámetros de resistencia a la corte drenada y analizar las cargas a largo plazo en una masa de suelo. De acuerdo con (Mitchel, 1976) la prueba consta de dos etapas:

-Primera etapa: Consiste en consolidar el suelo a un nivel deseado de esfuerzo efectivo mediante la presurización del agua en la celda, permitiendo que la muestra de suelo drene hasta que la presión de poros en exceso se disipe completamente.

-Segunda etapa: Se mantiene constante la presión de confinamiento y se aplican cargas axiales adicionales o desplazamientos de forma muy lenta hasta que la muestra de suelo falle. La velocidad de desplazamiento debe ser lo suficientemente baja para permitir la disipación de la presión de poros en exceso.

Debido a que la conductividad hidráulica de los suelos de grano fino es mucho menor que la de los suelos de grano grueso, la velocidad de desplazamiento para probar suelos de grano fino es significativamente menor que para suelos de grano grueso. Se permite el drenaje del agua de poros en exceso y se mide la cantidad de agua expulsada.

- Prueba consolidada-no drenada (prueba CU)

En esta prueba la muestra de suelo es consolidada por una presión envolvente de fluido dentro de la cámara, que resulta en drenaje. La presión de poro se disipa completamente por lo que el esfuerzo desviador incrementa para provocar una falla de corte (Das, 2011).

El propósito de la prueba, es determinar los parámetros de resistencia al corte en condiciones no drenadas y drenadas. La prueba CU se realiza de manera similar a la prueba CD, excepto que, después de la consolidación isotrópica, se incrementa la carga axial en condiciones no drenadas y se mide la presión de poros en exceso (Briaud, 2023).

Los esfuerzos aplicados durante la prueba son los siguientes:

-Esfuerzo de consolidación isotrópica: Se mantiene constante durante esta etapa hasta alcanzar el equilibrio.

-Esfuerzo axial: Se aplica bajo condiciones no drenadas para inducir el fallo en la muestra.

-Presión de poros en exceso: Se mide a lo largo del proceso para determinar cómo influye en el comportamiento del suelo.

De acuerdo con (Mitchel, 1976) la prueba es particularmente útil para evaluar el comportamiento del suelo en condiciones de carga rápida, donde no se permite el drenaje del agua de poros, como sucede en ciertos eventos sísmicos o de carga repentina.

- Prueba no consolidada-no drenada (prueba UU):

En esta prueba mientras se aplica la presión de la cámara no está permitido el drenaje de la muestra de suelo, esta prueba falla por la aplicación del esfuerzo desviador sin que se permita el drenaje. La prueba es más rápida que la consolidada-drenada debido a que no está permitido el drenaje; esta prueba es común en arcillas (Das, 2015).

El propósito de la prueba es determinar la resistencia al corte en condiciones no drenadas de un suelo saturado. La prueba UU consiste en aplicar una presión en la celda a la muestra de suelo sin permitir el drenaje del agua en los poros, seguida de incrementos en el esfuerzo axial. Durante la prueba, la presión en la celda se mantiene constante, y esta se completa de manera rápida porque, en ninguna de las dos etapas “consolidación y corte”, se permite el drenaje de la presión de poros en exceso.

Los esfuerzos aplicados durante esta prueba son los siguientes:

-Presión de celda: Se aplica de manera uniforme alrededor de la muestra.

-Esfuerzo axial: Se incrementa gradualmente para provocar el fallo.

La ventaja de la prueba UU en comparación con la prueba CU, es que la muestra de suelo se somete a esfuerzos laterales, simulando las condiciones reales de campo, lo que representa situaciones en las que los suelos se encuentran confinados, como en las cimentaciones o los taludes (Mitchel, 1976).

11.14. Capacidad de carga en cimentaciones poco profundas.

Se denomina cimentación a la parte más baja de la estructura, que su función, es transferir la carga de la estructura al suelo sobre se montara la estructura. Una cimentación está diseñada adecuadamente, cuando esta transfiere la carga a lo largo del suelo sin sobrecargarlo, ya que, si el suelo es sobrecargado, se produce un asentamiento o falla de corte que causa daño a la estructura. Terzaghi define que una cimentación es poco profunda, si su profundidad es menor o igual que el ancho de la cimentación (Briaud, 2023).

Existen varios tipos de cimentación, pero se determina de acuerdo al tipo de estructura que se vaya a construir y las características del suelo (Das, 2015).

- Zapata corrida: ampliación de una pared o columna de soporte de carga, transmite la carga de la estructura sobre un área mayor del suelo.
- Losa de cimentación: es una plataforma de concreto que se emplea en suelos con baja capacidad de carga. Estas se dividen en placa plana (a), placa plana con mayor espesor bajo las columnas (c), placa plana con pedestales (d) y losa con muros de sótano (como parte de la placa) (e), y se representan en la siguiente figura.

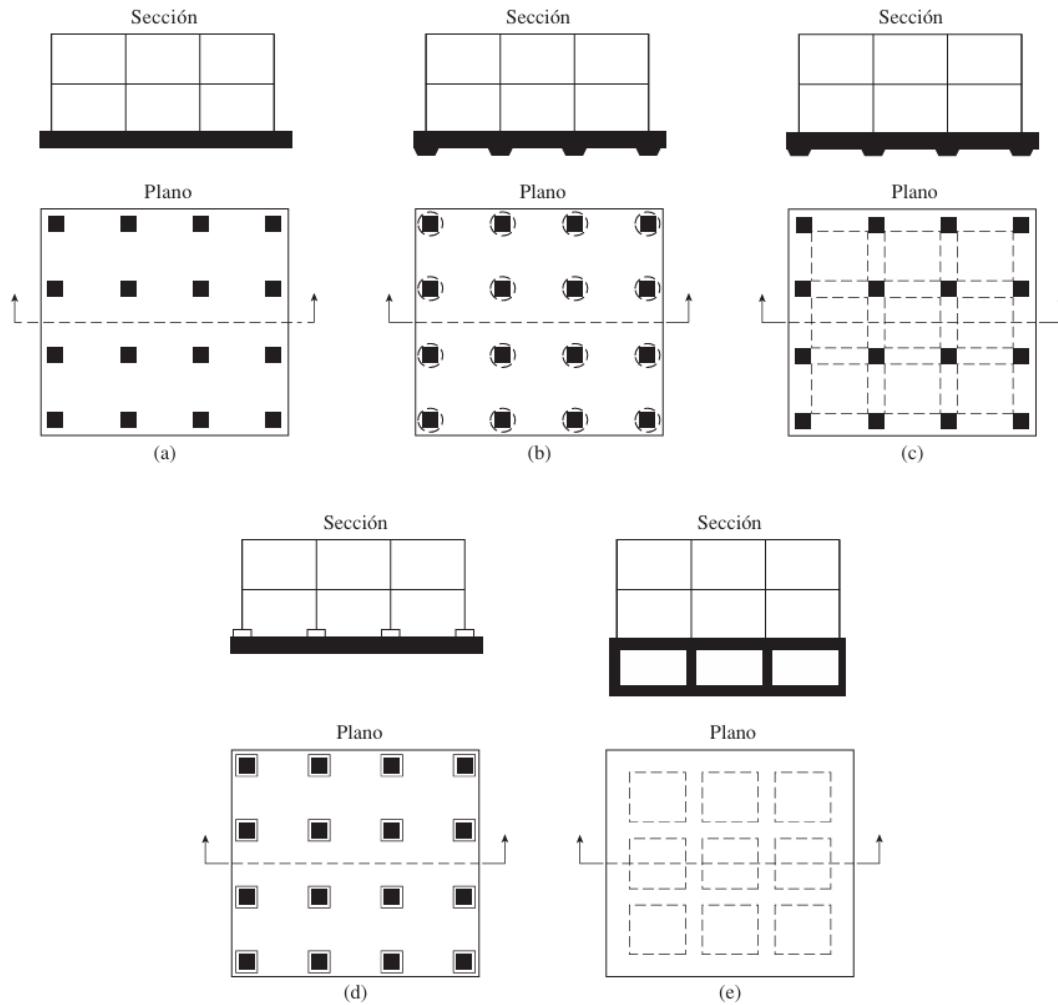


Figura 5. Tipos comunes de losas de cimentación (Das, 2011).

- Pilotes: son miembros estructurales de madera, concreto o acero, utilizados en super estructuras que requieren gran profundidad para soportar la carga.
 - Pilote de fricción: la carga de la super estructura es resistida por los esfuerzos cortantes generados a lo largo de la superficie del pilote.
 - Pilote de cara: la carga se transmite de su punta a un estrato firme.

Se le conoce como capacidad última de carga (q_n), a la carga máxima por unidad de superficie de una cimentación que provocará una falla por corte en el suelo (Das, 2015).

El cálculo de la capacidad de carga admisible en cimentaciones poco profundas, se le aplica un factor de seguridad (FS) a la capacidad última de carga (q_{adm}), mostrado en la siguiente fórmula:

$$q_{adm} = \frac{q_u}{FS}$$

De acuerdo con (Briaud, 2023), los factores de seguridad para cimentaciones poco profundas están en un rango de 2.5 a 3.0.

Dependiendo la compactación del suelo que soporta una cimentación poco profunda con una carga última, la cimentación puede fallar por:

- Falla de corte general: se presenta en suelos de arena densa o cohesivo rígido, y ocurre cuando la carga por unidad del área es igual a la capacidad última de carga, por lo que ocurre una falla repentina del suelo, la superficie de falla en el suelo se extiende hasta la superficie del terreno. Como se puede ver en la figura 6 en el inciso (a), conforme se va aplicando la carga gradualmente, el asentamiento aumentará.
- Falla de corte local: se presenta en suelos de arena o tierra arcillosa de compactación media, la superficie de falla en el suelo se extiende poco a poco hacia el exterior de la cimentación. En el inciso (b) de la figura 6, se muestra que cuando la carga por unidad de área sobre la cimentación es igual a la capacidad de carga última, se producen movimientos de sacudidas bruscas y posteriormente un aumento de carga tendrá un aumento considerable de asentamiento de la cimentación.
- Falla de corte de perforación: ocurre en suelos bastante sueltos, en este caso la falla en el suelo no se extiende hacia la superficie del terreno. En el inciso (c) de la figura 6 la gráfica de carga-asentamiento será lineal.

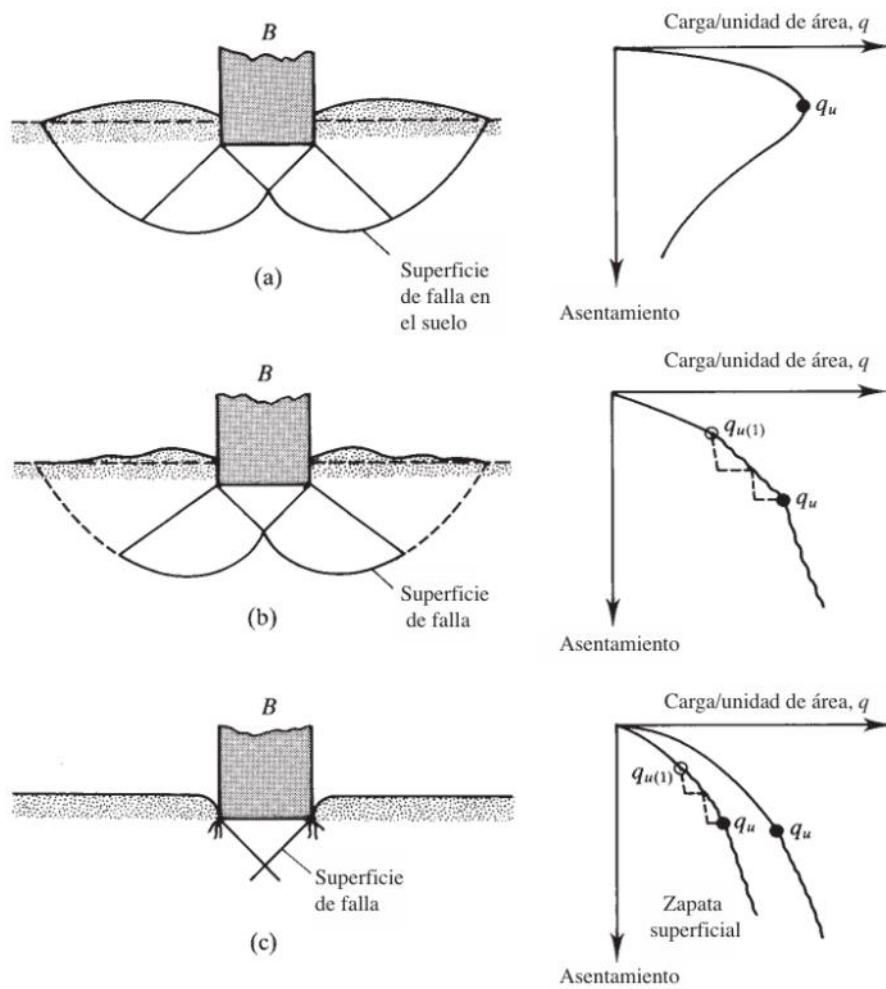


Figura 6. Tipos de fallas (Das, 2011)

11.15. Asentamientos.

Una cimentación puede fallar por falla de corte del suelo, pero antes de la falla, la cimentación se puede someter a un asentamiento crítico que pueda ocasionar daños en la estructura. Cuando una capa de suelo saturado se somete a un aumento de esfuerzo, la presión del agua intersticial sufre un incremento lo que provoca una reducción en el volumen de la masa de suelo, esto se le conoce como asentamiento (Das, 2015). El asentamiento bajo la presión de la cimentación se calcula después de obtener la capacidad última de carga y que sus dimensiones cumplan el estado límite ultimo (Briaud, 2023).

Los asentamientos se dividen en dos tipos:

Asentamiento de consolidación: resultado del cambio de volumen en un suelo cohesivo saturado debido a la expulsión de agua intersticial, esto depende del tiempo de las capas de arcilla ubicadas debajo de la cimentación (Das, 2015).

Asentamiento elástico: se produce en corto tiempo después de que la cimentación se somete a la carga estructural, es causado por la deformación elástica del suelo seco, suelos húmedos y suelos saturados sin ningún cambio en su contenido de humedad (Briaud, 2023).

El asentamiento elástico tiene distinto efecto en una cimentación rígida y una cimentación flexible. Una cimentación flexible con carga uniforme descansando en un material elástico como una arcilla saturada, su perfil de hundimiento se representa en el inciso (a) de la figura 7 debido al asentamiento elástico. En una cimentación rígida, que descansa en material elástico como la arcilla, se somete a un asentamiento uniforma y la presión de contacto se redistribuirá, esto se representa en el inciso (b) de la figura 7 (Das, 2015).

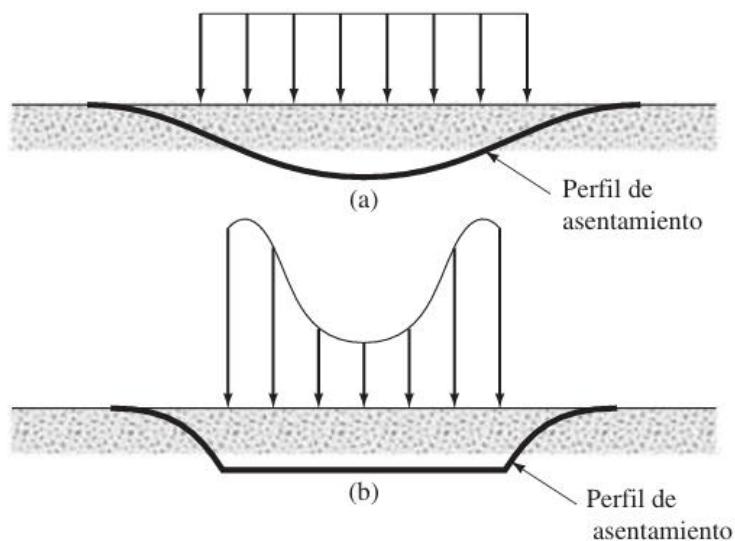


Figura 7. Perfil de asentamiento elástico y presión de contacto sobre arcilla: (a) cimentación flexible; (b) cimentación rígida (Das, 2015).

En los suelos arenosos el drenaje del agua intersticial se completa inmediatamente, esto debido a que este tipo de suelos son altamente permeables y el asentamiento elástico y de consolidación ocurren simultáneamente. En cambio, cuando se trata de una arcilla saturada, la carga se disipa durante un tiempo prolongado, y el cambio de volumen puede extenderse por un tiempo indefinido, en cambio el asentamiento elástico se produce de forma inmediata; esto se debe a que la conductividad hidráulica de la arcilla es menor que la de arena (Das, 2015).

11.16. Consolidación unidimensional.

El ensayo de consolidación se usa para predecir el asentamiento de las estructuras, debido a que la mayor parte de la deformación se debe a la compresión vertical (Briaud, 2023). La consolidación unidimensional se refiere cuando la posición relativa de las partículas sólidas en un plano horizontal es nula, y el desplazamiento de las partículas sólo ocurre en dirección vertical; en este proceso se observa que el volumen de la masa del suelo disminuye (Juárez & Rico, 2005).

La prueba de consolidación unidimensional estándar, se realiza con una muestra labrada del suelo, que se le aplica un confinamiento lateral con un anillo de metal, este anillo se coloca entre dos piedras porosas para después colocar el conjunto en una cazuela de un consolidómetro y se satura con agua (Das, 2015).

Finalmente instalado, las cargas se aplican en incrementos con un correspondiente lapso de tiempo hasta que la velocidad de deformación sea nula, es importante que se tomen lecturas en cada incremento de carga para conocer la deformación con su respectivo tiempo; para obtener la curva de consolidación, las lecturas se colocan en las ordenadas en escala natural, mientras los tiempos se colocan en las abscisas en escala logarítmica (Juárez & Rico, 2005). Se obtiene una curva por cada incremento de carga, en la siguiente figura se puede observar la forma típica de la curva de consolidación.

De acuerdo a (Das, 2015), se observa que hay tres etapas que se pueden observar en la figura 8, que las define como:

- Etapa 1: Compresión inicial, causada por la precarga.
- Etapa 2: Consolidación primaria, el exceso de presión del agua intersticial se transfiere progresivamente en esfuerzo efectivo.
- Etapa 3: Consolidación secundaria, que se produce después de la disipación total del esfuerzo de presión del agua intersticial cuando se lleva a cabo alguna deformación de la muestra por el reajuste plástico del suelo.

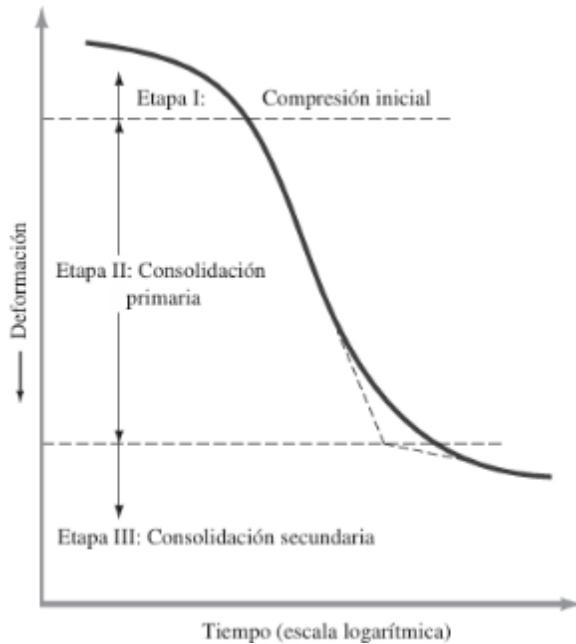


Figura 8. Forma típica de la curva de consolidación en arcillas (Das, 2015).

En esta prueba, se observa la disminución de volumen de la muestra por acortamiento de la altura, pero sin que ocurra cambio en la sección transversal, por lo que tanto la deformación volumétrica y desviadora se hacen presentes.

Cuando el suelo llega a su máxima deformación bajo un incremento de carga aplicado, su relación de vacíos es menor comparado al su valor inicial, por lo que, se obtiene un valor de la relación de vacíos en cada incremento de carga; al aplicar todos los incrementos de carga, se construye una gráfica en donde las abscisas tienen los valores de la presión actuando y en las ordenadas se tienen los valores de vacíos en escala natural, esta curva se le conoce como de compresibilidad (Juárez & Rico, 2005).

La curva de compresibilidad tiene tres etapas: el tramo A “tramo de compresión” es un tramo que comienza en forma horizontal y va obteniendo una curvatura progresiva, el tramo B “tramo virgen” es un tramo recto que llega al final de la etapa de la prueba, posteriormente para el tramo C “tramo de descarga”, se somete al espécimen a una descarga que consiste en cargas decrecientes cada una con un lapso de tiempo hasta que la velocidad de deformación sea nula. En la etapa C, el espécimen tiene una recuperación, pero su relación de vacíos nunca llega al que tuvo en un inicio (Juárez & Rico, 2005). En la figura 9, se puede apreciar la curva de compresibilidad en una gráfica.

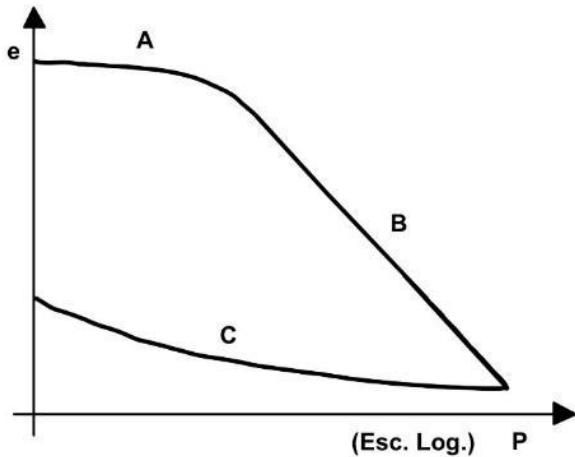


Figura 9. Curva de compresibilidad de acuerdo a (Juárez, 2005)
(Elaboración propia).

12. METODOLOGÍA

Determinación de las propiedades físicas del suelo contaminado con lixiviados de vertederos, incluyendo su porosidad y distribución de partículas, mediante pruebas de laboratorio.

Las pruebas se realizaron en la Universidad Autónoma de Querétaro en el Laboratorio de Geotecnia, Materiales y Geomática, el cual pertenece a la facultad de Ingeniería.

La metodología se divide en: revisión del estado del arte, recolección y caracterización del material mediante las pruebas experimentales, obtención de sus propiedades físicas, mecánicas, químicas, que se describen en las siguientes secciones; y finalmente la comparación de los resultados experimentales de ambos suelos.

12.1. Localización del sitio de muestreo.

La extracción del material se llevó a cabo en el año 2023 y se trasladaron al Campus Aeropuerto de la Universidad Autónoma de Querétaro, esto fue realizado conforme a las normas PROY-NMX-C-430-ONNCCE-2002, PROY-NMxC-431-ONNCCE-2021 y M·MMP·1·01/03. La norma PROY-NMX-C-430-ONNCCE-2002 establece los procedimientos para la ejecución de sondeos de pozo a cielo abierto (excavaciones verticales); la norma PROY-NMxC-431-ONNCCE-2021 establece los métodos para la toma de muestras alteradas e inalteradas; la norma M·MMP·1·01/03, establece los procedimientos

para la obtención de muestras alteradas e inalteradas y garantiza que las muestras sean representativas y fiables. Todas estas normas son fundamentales para obtener una adecuada caracterización geotécnica del terreno.

Las muestras de suelo se obtuvieron de un vertedero de la zona de Querétaro, que por cuestiones de seguridad no se revela la ubicación específica. Para la realización del proyecto se realizó la extracción de muestras alteradas, así como también inalteradas para determinar el peso específico, como se puede observar en la figura 10.



Figura 10. a) Muestra alterada Suelo Contaminado. b) Muestra alterada Suelo Control.

Estas muestras alteradas fueron almacenadas en el laboratorio de Geotecnia, Materiales y Geomática de la facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

12.2. Pruebas de laboratorio.

Las pruebas que se llevaron a cabo son recopiladas del Manual de Laboratorio de Geotecnia I y II, de la Facultad de Ingeniería en la Universidad Autónoma de Querétaro, y éstas se enlistan a continuación.

1. Granulometría simple.
2. Granulometría vía hidrómetro.
3. Determinación del peso específico de la masa del suelo y contenido de agua.
4. Determinación de humedad óptima.
5. Límites de consistencia.
6. Determinación de permeabilidad.
7. Colapso y expansión de un suelo.
8. Determinación de succión mediante papel filtro.
9. Prueba triaxial no consolidada no drenada (medición de capacidad de carga).
10. Consolidación.

11. Microscopía electrónica de barrido.
12. Determinación de pH.

12.3. Caracterización del suelo.

Se obtuvo la caracterización del suelo utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (ASTM D2487-11, 2007), con la obtención de las propiedades índice del suelo.

12.3.1. Peso específico del suelo (γ_m).

Se utilizó el método B de la norma (ASTM D4531-86, 1996) para obtener el peso específico del suelo (Figura 11). De la muestra inalterada se labró un terrón de suelo sin importar sus dimensiones, para después pesarlo y conocer el peso de su masa. Se colocó parafina en un recipiente de aluminio y se puso a fuego de estufa a una temperatura de 60°C hasta fluidificarla; el terrón se amarró a un hilo y se sumergió en la parafina y se pesó al aire libre para determinar su peso en una báscula con un gancho especial. Posteriormente se sumergió en agua para determinar su peso sumergido.



Figura 11. Determinación de peso específico del suelo.

Con los datos obtenidos, se utilizó la siguiente fórmula para calcular el peso específico:

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m}$$

Donde:

γ_m = Peso específico de la muestra de suelo.

W_m =Peso total de la muestra.

V_m =Volumen total de la muestra.

12.3.2. Contenido de humedad (ω).

Para obtener el contenido de humedad natural del sitio, se tomó un testigo de la muestra y se introdujo al horno a una temperatura de 110°C durante un periodo de 12 a 16 horas para obtener la humedad real del espécimen. Esta prueba está realizada con base en las normas ASTM D 2216 (2010).

Para la obtención del contenido de humedad se utilizó la siguiente fórmula:

$$\omega = \frac{W_\omega}{W_s} \times 100$$

Donde:

ω = Contenido de humedad.

W_ω = Peso del agua contenido en el suelo.

W_s =Peso del suelo en su fase sólida.

12.3.3. Peso específico relativo de sólidos (Ss).

Esta prueba se realizó con base en la norma (ASTM D854, n.d.) (Figura 12). Este parámetro es indispensable para el cálculo de las propiedades gravimétricas y volumétricas de los suelos saturados y no saturados, que se ocuparon para el procedimiento de las pruebas experimentales.



Figura 12. Matraz para determinar el peso específico relativo de sólidos.

12.3.4. Análisis granulométrico.

Para determinar el tamaño de las partículas del suelo, se tomó una muestra representativa de 300 gramos, se saturaron por ebullición en la estufa durante 15 minutos. Posteriormente se lavaron y cribaron por las mallas no. 4 y no. 200; los retenidos en las mallas se colocaron por separado en charolas y se ingresaron al horno por un periodo de 12 a 16 horas a 110°C, después se pesaron en la báscula para obtener sus pesos secos y finalmente los porcentajes de gravas, arenas y finos. Esta prueba está con base en las normas ASTM D 1140-00 (2006) y SCT M.MMP-1-06/03 (2003), ASTM D 2216 (2010), SCT M.MMP-1-06/03 (2003), y de acuerdo con Juárez B.E. y Rico R.A. (2008).



Figura 13. Mallas para granulometría.

Para corregir los 300 gramos del material por humedad, se utilizó la siguiente fórmula:

$$W_s = \frac{W_m}{1 + \frac{w\%}{100}}$$

Donde:

Wm= peso total de la muestra.

Ws= Peso seco y corresponde al peso total de la muestra seca.

Para la obtención de la cantidad de finos se utilizará la siguiente expresión:

$$W_{finos} = W_s - W_s(gravas) - W_s(arenas)$$

Posteriormente se determinaron los porcentajes de gravas, arenas y finos con las fórmulas que se muestran a continuación:

$$\%finos = \frac{finos \times 100}{W_s}$$

$$\%arenas = \frac{W_s(arenas) \times 100}{W_s}$$

$$\%gravas = \frac{W_s(gravas) \times 100}{W_s}$$

12.3.5. Granulometría vía hidrómetro.

Para la granulometría de suelos cuyas partículas pasaron desde el tamiz no. 200, se utilizó el análisis granulométrico vía hidrómetro. Se siguió el procedimiento de la norma (ASTM D422, 2002).

Se calibró el hidrómetro antes de comenzar la prueba con base en la norma ASTM D422.

1) Preparación de la muestra:

Se tomó un material de 150 gramos el cual pasó por la malla no. 200, se secó al horno por 72 horas, y se obtuvo una muestra de 75-100 gramos, la cual se saturó dentro de una tara durante 16 horas con agua destilada.

2) Preparación de solución:

Para la realización de la prueba se preparó el defloculante que se disolvió 5 gramos de hexametafosfato de sodio con 125 mililitros de agua en un vaso de precipitado y se mezcló con el suelo, la mezcla se vertió en una probeta de 1000 mililitros y se procedió a aforar la probeta.

3) Inicio de la prueba:

Se agitó la probeta y después se colocó en la mesa y se sumergió el hidrómetro hasta que comenzó a flotar y se mantuvo dentro de la solución los tres primeros minutos, se comenzaron a tomar las lecturas en los tiempos de 20, 40, 60, 120 y 180 segundos, se repitió este procedimiento 3 veces para seguir tomando las lecturas del hidrómetro y la temperatura en los tiempos de 4 minutos, 8 minutos, 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 4 horas, 8 horas, 24 horas y 48 horas.



Figura 14. Análisis granulométrico vía hidrómetro.

Con los datos obtenidos se determinó el diámetro de las partículas en milímetros y el porcentaje más fino del material con las siguientes fórmulas:

$$D = K \sqrt{\frac{L}{t}}$$

Donde:

L=Profundidad efectiva de caída (centímetros).

t= Tiempo transcurrido (minutos).

K= Constante para varias combinaciones de pesos unitarios y temperaturas.

D=Diámetro de la partícula (milímetros).

12.3.6. Determinación de humedad óptima.

Para determinar su contenido de agua óptimo de los suelos, se hizo la prueba en base a la norma ASTM D698 que determina la curva de compactación que a partir de esta infiere su masa volumétrica seca máxima y contenido de agua óptimo. Esta prueba se realizó para el suelo contaminado, como para el suelo control.

1) Preparación de la muestra

Se tomó una muestra representativa del suelo de aproximadamente 4 kg y se cribó a través de la malla N° 4, tomando sólo la fracción que pasa por la malla.

Fue indispensable tomar las medidas del molde cilíndrico para obtener su volumen.

2) Procedimiento

La muestra de suelo se lleva a un contenido de humedad inferior al 12%, y la muestra se dividió en 3 porciones, posteriormente, cada porción se colocó en el molde aplicando 25 goles con un pisón.

Al terminar la compactación de las capas, se retiró la extensión del molde y se enrasó con una regla metálica, y se procedió a pesarlo.

Se sacó el espécimen del molde y se cortó longitudinalmente a la mitad para extraer una porción de suelo y determinar su contenido de agua.

Se repite la prueba 4 veces, pero en cada una, se incrementó sucesivamente su contenido de humedad, con objetivo de que se obtuviera un contenido de agua distinto.

3) Cálculos y resultados

Obtenidos los datos, se calcula la masa volumétrica del material húmedo, utilizando la siguiente fórmula:

$$\gamma_m = \frac{W_i - W_t}{V} * 100$$

Donde:

$$\gamma_m = \text{Masa volumétrica del material húmedo } (\frac{kg}{cm^3})$$

W_i = Masa del cilindro con el material húmedo compactado (gr)

W_t = Masa del cilindro (gr)

V = Volumen del cilindro (cm^3)

Para cada prueba, se calculó la masa volumétrica del espécimen con la siguiente fórmula:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{100 + \omega} * 100$$

Donde:

$$\gamma_d = \text{Masa volumétrica seca del espécimen } (\frac{kg}{cm^3})$$

$$\gamma_m = \text{Masa volumétrica del material húmedo } (\frac{kg}{cm^3})$$

ω = Contenido de agua del espécimen (%)

Obteniendo los resultados de la masa volumétrica máxima seca del material γ_d (kg/cm^3) y su contenido de agua óptimo ω (%), se construye la curva de compactación en forma gráfica, en las ordenadas los valores de la masa volumétrica seca máxima y las abscisas el contenido de agua.



Figura 15. Obtención del peso del cilindro con suelo.

12.3.7. Determinación de los límites de consistencia.

Para conocer las características de plasticidad de un suelo formado principalmente por partículas finas, se utilizó la determinación de los límites de consistencia, los cuales son los procedimientos de la determinación del límite líquido, límite plástico, límite de contracción y contracción lineal.

Se tomó una muestra seca de 500 gramos y se cribó por la malla no. 40, 24 horas antes de la realización de la práctica. Una vez preparada la muestra se le agregó agua hasta que se obtuvo una consistencia plástica y se homogenizó el suelo en un vaso de aluminio de 1 litro por 24 horas.

Fue indispensable la calibración de la copa de Casagrande, se verificó la altura de caída de la copa que debe ser 1 centímetro; esto de acuerdo a la norma (ASTM D4318, 2005).



Figura 16. Copa de Casagrande.

- Determinación del límite líquido.

Se tomó una muestra de 150 gramos del material preparado del vaso de aluminio con consistencia de pasta, se colocó sobre la copa de tal forma que se pudo labrar con el ranurador un corte de aproximadamente 4 cm y luego ser extendido. Posteriormente se obtuvo la humedad para 35, 30, 25 y 15 golpes, y se trazó la curva de fluidez y se determinó el límite líquido y humedad a los 25 golpes (Figura 17).



Figura 17. Determinación de Límite Líquido por el método de la copa de Casagrande.

El límite líquido se obtuvo con la fórmula:

$$w = F_w \log N + C$$

Donde:

w= Límite líquido, humedad para 25 golpes (%).

F_w =Índice de fluidez definido como la pendiente de la curva (negativo).

C= Constante que representa el contenido de agua correspondiente a 1 golpe (%).

N= Número de golpes.

Al tener la determinación del límite líquido, se calculó el índice de plasticidad con la siguiente fórmula:

$$I_P = 0.7333(LL - 20)$$

Donde:

I_P =Índice de plasticidad.

LL=Límite líquido.

Al tener estos dos valores se ingresarán a la carta de plasticidad para clasificar el suelo según el Sistema Unificado de Suelos SUCS).

- Determinación del límite de contracción lineal.

Para obtener el límite de contracción lineal se obtuvo el suelo en su límite líquido y con el molde de contracción lineal, se midió su longitud inicial, el molde se llenó con la muestra en 3 capas golpeando cada una, una vez lleno se pesó y se obtuvo su volumen. Se inició el proceso de secado dejando el molde al aire libre por dos días cubierto por una franela, para después colocarlo en el horno a 110°C durante un periodo de 12 a 16 horas. Al sacarlo, se midió su longitud final con un vernier, se pesó y se obtuvo su volumen (Figura 18). Esta prueba con base en la norma ASTM D427.



Figura 18. Determinación de Límite de Contracción Lineal.

El límite de contracción lineal se calculó con la siguiente fórmula:

$$LC = \left[\frac{W_m - W_s - \gamma_0(V_1 - V_2)}{W_s} \right] \times 100$$

Donde:

LC= Límite de contracción (%).

W_m =Peso de la muestra en límite líquido (gramos).

W_s =Peso de la muestra seca (gramos).

V_1 =Volumen inicial de la muestra es igual al volumen interior de la caja Petri (cm^3).

V_2 = Volumen final de la muestra secada al horno (cm^3).

γ_0 = Peso específico del agua.

- Determinación del límite plástico.

Para la determinación del límite plástico se tomaron 20 gramos del material, que se extendió en la mesa con el fin de ser manipulable con las manos, después se tomó una porción de 2 gramos y se formó una esfera con él para después hacerlo rodar con la mano en una superficie plana formando un cordón (rollitos) de 3.2 mm de diámetro, estos rollitos quedaron agrietados y se colocaron sobre un vidrio de reloj y se ingresaron al horno para determinar su contenido de agua (Figura 19).



Figura 19. Determinación de Límite Plástico.

12.4. Clasificación del suelo.

Con los parámetros obtenidos en las pruebas experimentales anteriores (LL e Ip), y con los criterios para la clasificación de suelos del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), se procedió a clasificar ambos suelos dentro de la carta de plasticidad (Figura 20). Esto de acuerdo a la norma (ASTM D2487-11, 2007).

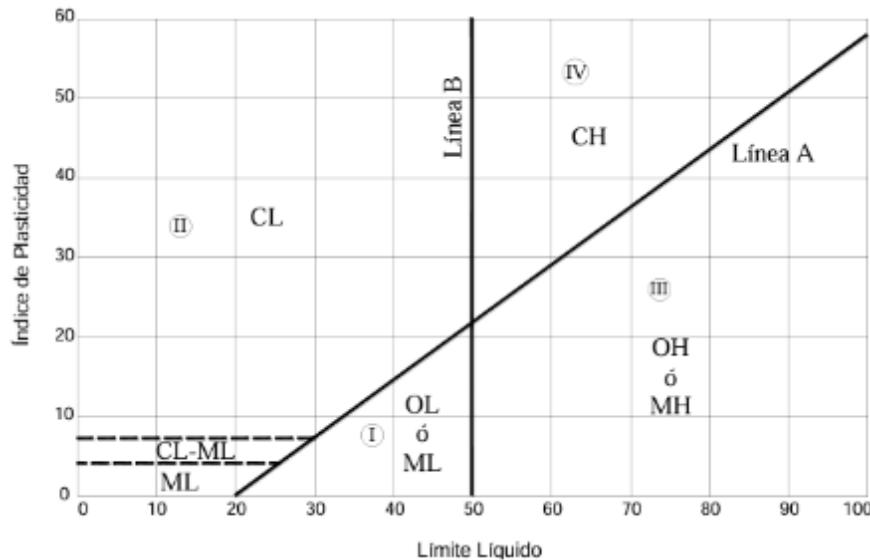


Figura 20. Carta de Plasticidad de acuerdo a SUCS.

12.5. Pruebas físicas.

12.5.1. Determinación de la permeabilidad en suelos.

El procedimiento para determinar la permeabilidad del suelo se realizó con el permeámetro de carga variable. Esta prueba está realizada con base en la norma ASTM D2434-68 (2006).

1) Preparación de la muestra:

La muestra se cribó por las mallas no. 40 y 60, después se llevó a la condición superficialmente seco y saturado, y se pesó la muestra de suelo.

2) Preparación del permeámetro:

Para la preparación del equipo, se midió el diámetro del permeámetro y a la vez se prepararon dos discos de papel filtro. Las piedras porosas y el papel filtro se saturaron y después se colocó el material en condición superficialmente seco y saturado, este se colocó en tres capas de 3.5 cm de espesor compactado con el pisón a razón de 25 golpes por capa.

3) Saturación de la muestra:

Al terminar de armar el aparato se mantuvo la muestra sumergida por un lapso mínimo de 24 horas antes de la prueba.

4) Realización de la prueba:

Se midió la altura de la muestra y se determinó el área transversal de la bureta al menos 3 veces, luego se llenó la bureta alimentadora y se midió la altura del nivel aparente de agua “ h_1 ” como referencia de nivel de salida y se echó a andar el cronómetro. Cuando el nivel de agua bajó al nivel aparente “ h_2 ” se cerró la válvula al mismo tiempo que se detuvo el cronómetro, se midió la altura del nuevo nivel de agua respecto al nivel de salida. Este paso se repitió 5 veces y se registraron los 5 tiempos obtenidos.

Obtenidos los datos, se procedió a calcular el área transversal de la bureta, la altura capilar h_c con la siguiente fórmula:

$$h_c = \frac{0.30}{D_1}$$

Donde:

D_1 =Diámetro del tubo capilar (centímetros).

Finalmente se calculó el coeficiente de permeabilidad “k” el cual fue corregido mediante un coeficiente de corrección por temperatura “Ct” que se obtiene de la norma la siguiente fórmula:

$$k = 2.3 \frac{La}{tA} \log \frac{h_1}{h_2} \left(\frac{cm}{s} \right)$$

Donde:

L= Longitud de la trayectoria que sigue el agua dentro de la muestra (centímetros).

t= Tiempo transcurrido, en el cual el agua contenida en la bureta pasa de un nivel 1 a un nivel 2 (segundos).

h_1 =Altura aparente inicial medida desde la válvula de salida al nivel inicial de la bureta (centímetros).

h_2 =Altura aparente final medida desde la válvula de salida al nivel final en la bureta alimentadora (centímetros).

A= Área transversal de la muestra (cm^2).

a= Área transversal de la bureta de alimentación de agua (cm^2).



Figura 21. Prueba de permeabilidad.

12.5.2. Colapso y expansión en un suelo.

Los suelos pueden experimentar variaciones volumétricas de compresión (colapso) o de hinchamiento (expansión) cuando son sometidos a cambios en el grado de saturación.

Esta prueba se realizó con base en las normas (ASTM D4546, 2008), ASTM D5333 (2003) y de acuerdo con Zeevaert (1983).

1) Preparación de la muestra:

Se trabajó con un anillo el cual se puso la muestra y se tomaron las dimensiones (diámetro, altura y peso), la muestra se labró dentro del anillo, se enrasaron las dos caras para dejarlas prácticamente planas. De la muestra labrada se tomó un testigo de humedad y después se pesó el anillo con la muestra en su interior.

2) Montaje de la muestra:

Se cortó papel filtro del diámetro de la muestra y se pusieron en la cara superior e inferior, luego se colocaron dos piedras porosas una en cada cara, por último, se envolvió todo en su conjunto con una película plástica autoadherible para evitar pérdidas de humedad.

3) Montaje en oedómetro:

El espécimen se montó en el oedómetro nivelando el brazo de palanca y colocando los ceros en el micrómetro de deformación.

4) Aplicación de cargas:

Se determinó el índice de colapso, por lo que se aplicó un esfuerzo de reacomodo de (5 kPa) y se dejó actuar por 5 minutos, posteriormente se ajustó el micrómetro a una lectura mayor a cero y luego se aplicaron incrementos de carga cada hora para la obtención de un esfuerzo acumulado de (12, 25, 50, 100 y 200 kPa). Se registró al

final de cada carga cada hora) la deformación en el micrómetro, para el último incremento se dejó actuar la sobrecarga por 1 hora.

5) Saturación de la muestra:

Se saturó la pastilla de suelo y se registró la deformación contra el tiempo, los tiempos que se registrarán la deformación bajo saturación serán a (5, 15, 30 segundos), (1, 2, 4, 8, 15, 30 minutos) y (1, 2, 4, 8 y 24 horas).

Con los datos obtenidos de la experimentación, se realizó una gráfica de acuerdo a la expresión de la (ASTM D 5333-03, 2003):

$$I_e = \left[\frac{d_f - d_i}{h_0} \right] \times 100$$

Donde:

I_e = Potencia de colapso (%).

d_f = Lectura en el nivel de esfuerzo apropiado después de la saturación (milímetros).

d_i = Lectura en el nivel de esfuerzo apropiado antes de la saturación (milímetros).

El resultado obtenido se comparó con la tabla para obtener el grado de colapsabilidad del suelo.

Tabla 2. Clasificación de índice de Colapso, de acuerdo a ASTM D 5333-03.

Grado de colapso	Índice de colapso, $I_e(%)$
Ninguno	0
Leve	0.1 a 2.0
Moderado	2.1 a 6.0
Moderadamente severo	6.1 a 10.0
Severo	>10



Figura 22. Muestras en consolidómetros.

12.5.3. Determinación de la succión mediante papel filtro.

Para la obtención de la succión (s) se utilizó la técnica de papel filtro, de acuerdo con la norma (ASTM D5298, 2010), esto porque es una técnica usada comúnmente y presenta un rango amplio de medición 0.01 a 100 Mpa; permite medir la succión total (s_t), la succión matriza (s_m), y la succión osmótica (s_{osm}), esto para determinar la curva de retención agua-suelo de acuerdo a los pasos de (García, 2024).

Se utilizó papel filtro de la marca “Whatman #50”, esto debido a que no se pudo conseguir el “Whatman #42”, pero fue el que más se acerca en su abertura en poros. Fue necesario calibrar el papel filtro antes de iniciar con la prueba.

Calibración del papel filtro

1) Preparación del papel filtro:

Antes de manipular el papel filtro, se colocaron guantes para evitar su contaminación. Se utilizó papel filtro Whatman #50, el cual fue cortado en círculos de 5.5 cm de diámetro. En todo momento, los papeles filtro se manipularon únicamente con pinzas.

2) Secado del papel filtro:

Los papeles filtro se colocaron en un horno a una temperatura de 110 °C durante un mínimo de 16 horas para garantizar su completa desecación.

3) Preparación de soluciones:

Se prepararon soluciones salinas compuestas de agua destilada y cloruro de sodio (NaCl) para determinar la humedad relativa del agua en equilibrio con cada solución. Esto permitió evaluar el comportamiento del papel filtro en diferentes concentraciones de sal y determinar el rango de medición correspondiente a distintas humedades. La preparación de las soluciones se realizó siguiendo las concentraciones especificadas en la siguiente tabla.

Tabla 3. Concentraciones de sal para evaluar la succión del suelo, de acuerdo a ASTM D 5298-10.

Succión kPa	Log kPa	pF	atm	R_h	20 °C	
					g NaCl En 1000 ml de agua	g KCl En 1000 ml de agua
-98	1.99	3.0	-0.97	0.99927	1.3	1.7
-310	2.49	3.5	-3.02	0.99774	3.8	5.3
-980	2.99	4.0	-9.68	0.99278	13.1	17.0
-3099	3.49	4.5	-30.19	0.97764	39.0	52.7
-9800	3.99	5.0	-96.77	0.93008	122.5	165.0

4) Preparación de las soluciones y el contenedor:

Una vez preparadas las soluciones con diferentes concentraciones de cloruro de sodio, se vertieron 50 cm³ de cada solución en contenedores de vidrio (figura 23).

5) Pesado inicial de los papeles filtro:

Usando guantes y pinzas para evitar la contaminación, se retiraron dos papeles filtro del desecador. Los papeles fueron pesados en una balanza analítica con una precisión de 0.0001 gramos. Posteriormente, se introdujeron cuidadosamente en el contenedor con la solución preparada. Los frascos se sellaron herméticamente con cinta aislante para evitar la entrada de aire externo.

6) Condicionamiento en ambiente controlado:

Los frascos sellados se colocaron en una caja térmicamente aislada (figura 24), la cual fue ubicada en un cuarto con temperatura controlada de aproximadamente 20 °C. Este sistema permaneció en reposo durante un periodo de 7 días para permitir que los papeles filtro alcanzaran el equilibrio de humedad.

7) Pesado final de los papeles filtro:

Al término del periodo de reposo, se extrajeron los papeles filtro de los frascos utilizando nuevamente guantes y pinzas. En un intervalo de tiempo de 3 a 5 segundos tras su extracción, los papeles fueron pesados inmediatamente en la balanza analítica para obtener sus masas finales.

8) Desecho de los papeles filtro:

Una vez obtenidas las masas finales, los papeles filtro fueron descartados para evitar su reutilización.

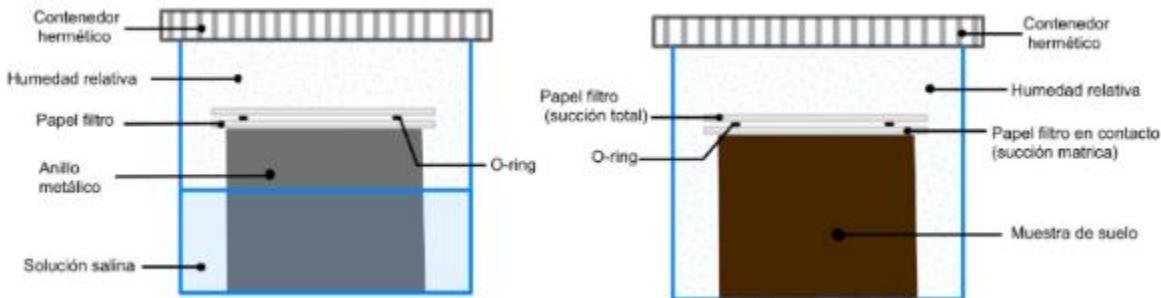


Figura 23. Prueba de succión (Elaboración propia).

Para la obtención de la curva de retención agua-suelo de los suelos, se obtuvieron las trayectorias de humedecimiento y secado, esto para obtener los valores de succión para observar el fenómeno de histéresis. Se debe tener en cuenta que en cada prueba se tuvo que secar el papel filtro y medir su masa.



Figura 24. Calibración de papel filtro.

Línea de humedecimiento

Al tener la muestra de suelo alterada, se remoldearon las muestras dentro de los anillos metálicos de volumen (V_m), el peso del anillo ya es conocido. Posteriormente se pesaron las muestras junto con el anillo y se colocaron en una charola de metal.

- 1) Las muestras de suelo se introdujeron al horno de secado a una temperatura de 105°C por lo menos durante 24 horas, esto fue para llevar todas las muestras a una humedad del 0%.
- 2) Se colocaron recuadros de papel aluminio previamente pesados a cada muestra en la parte inferior con la finalidad de evitar pérdidas del material.
- 3) Para la determinación de las relaciones gravimétricas y volumétricas de cada muestra, se utilizaron los parámetros γ_m , γ_d , ω y S_s , que fueron obtenidos en las pasadas pruebas de laboratorio.
- 4) Con las relaciones gravimétricas y volumétricas, se agregó la cantidad de agua para obtener el grado de saturación que fueron 0%, 20%, 40%, 60%, 80% y 100% y se dejaron reposar 24 horas en una charola cubierta con una bolsa de plástico.

- 5) Al finalizar las 24 horas, se pesaron las muestras para después comenzar la prueba de succión, puntos 5 al 8 de la metodología de calibración del papel filtro.

Línea de secado

- 1) Con las mismas muestras de suelo trabajadas en la línea de humedecimiento, se perforó el papel aluminio que las tenía con una aguja.
- 2) Las muestras se colocaron en una charola de metal que se le agregó agua a una altura de 1/10 de la altura del anillo, esto para que se saturaran por capilaridad durante 24 horas.
- 3) Con los parámetros de relaciones volumétricas y gravimétricas, se determinó el peso de cada muestra para obtener su grado de saturación deseado.
- 4) Al tener las muestras saturadas, se metieron en horno a una temperatura de 110°C y constantemente se pesaron hasta llegar al peso de su grado de saturación.
- 5) Una vez obtenido el peso deseado de cada muestra, se dejó enfriar y se pesó para finalmente iniciar la prueba de succión, puntos 5 al 8 de la metodología de calibración del papel filtro.

Consideraciones utilizadas para la realización de la prueba no mencionadas en la norma ASTM D5298

- 1) Debido a que se contaba con muestras alteradas, las muestras se remoldearon en anillos de metal igualando el peso volumétrico del suelo y la humedad natural del mismo (figura 25).
- 2) Se colocó un recuadro de papel aluminio en el fondo de la muestra para evitar pérdidas de material (previamente pesado).



Figura 25. Muestras después del proceso de secado.

En la prueba, para cada suelo, se realizó 6 especímenes para la curva de secado y 6 especímenes para la curva de humedecimiento.

12.5.4. Prueba triaxial no consolidada- no drenada (UU).

En esta prueba determina las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante bajo condiciones de carga rápida. Determina los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante del suelo: cohesión (c) y el esfuerzo cortante máximo (τ), bajo condiciones no drenadas.

La prueba se basa en la norma (ASTM D2850, 2003) y se siguió su respectivo procedimiento, que se muestra a continuación.

1) Preparación de la muestra:

Con la muestra alterada se remoldearon tres especímenes cilíndricos de las mismas dimensiones con el objetivo de aplicar un esfuerzo principal menor distinto. Las probetas se pensaban ensayar a la humedad de sitio que era de 22%, pero se cambió a un grado de saturación del 25% debido a que fue la humedad óptima las cuales las probetas no se deshacían, pero se conservó el peso volumétrico natural para su elaboración.

2) Colocación en la celda triaxial:

La probeta se cubrió con una membrana impermeable y se introdujo en una cámara triaxial para después aplicar la presión de confinamiento al espécimen mediante agua.

3) Aplicación de carga axial:

Se aplicó una carga axial controlada hasta que la muestra falle. Se tomaron las lecturas de carga-deformación hasta llegar a la carga máxima. Con los puntos obtenidos se realizó la curva de esfuerzo-deformación y su punto máximo.



Figura 26. Prueba triaxial UU.

Los datos obtenidos se utilizaron para calcular el esfuerzo cortante máximo del suelo, cohesión y la resistencia al esfuerzo cortante bajo condiciones no drenadas, esto se analizó bajo el criterio de Mohr-Coulomb y con ello realizar la determinación de la capacidad de carga del terreno.

12.5.5. Consolidación unidimensional.

Esta prueba mide la relación entre el asentamiento del suelo y el tiempo, esto bajo condiciones de carga unidimensional para observar cómo el suelo responde a las cargas externas en la naturaleza; la prueba se realiza con base en el procedimiento de la norma (ASTM D2435, 2002).

1) Preparación de la muestra:

Se utilizó una muestra de suelo alterada por lo que se remoldeó para representar condiciones específicas de su peso volumétrico del suelo y humedad natural, después, determinaron las dimensiones con ayuda de un vernier y se obtuvo la masa del anillo de consolidación; teniendo la muestra en el anillo de consolidación, se enrasó el suelo en la parte inferior y superior hasta que ambas caras quedaron planas, para posteriormente pesar el anillo con la muestra adentro. La humedad de ambas muestras de suelo fue de 22%, esto para poder hacer la comparación entre ambas muestras.



Figura 27. Muestra alterada en el anillo de consolidación.

2) Colocación de la muestra:

Se cortaron dos papeles filtro del diámetro del anillo, los cuales se colocaron en la parte superior e inferior de la muestra y a la vez se saturaron dos piedras porosas que se colocaron en la parte superior e inferior de la muestra; se colocó la placa superior que transfiere la carga arriba de la muestra dentro de la cazuela, que posteriormente fue envuelto con plástico adherible y cinta adhesiva para controlar la humedad durante el proceso (figura 28).



Figura 28. Equipo de consolidación.

3) Colocación en el odómetro:

Se calibró el oedómetro, nivelando el brazo de palanca y se ajustó el micrómetro de medición de deformación, y luego se colocó la cazuela en el equipo.

4) Aplicación de cargas:

Se ajustó el micrómetro para empezar a aplicar la carga de sitio y se esperó que las lecturas sean constantes y se comenzó a agregar agua, luego se registraron las lecturas en los tiempos de (0, 5, 10, 15, 30 segundos); (1, 2, 5, 10, 15, 30 minutos); (1, 2, 4, 8 y 24 horas). La carga se aplicó después de las 3 lecturas sucesivas y estas fueron de (0.5, 1, 2, 4, 8, y 16 kilogramos).

5) Medición de asentamiento:

Durante el incremento de carga, se registraron las deformaciones verticales del suelo a lo largo del tiempo para evaluar la consolidación primaria (dissipación de presión de poros) y la consolidación secundaria (reacomodo interno de partículas).

Para cada carga se trazó su correspondiente curva de consolidación y se registró la última lectura al llegar a la carga de sitio.

6) Descarga y recuperación:

Cuando se alcanzó la carga máxima, se procedió a descargar el suelo en etapas, y se midió el potencial de recuperación elástica del suelo.

Finalmente, con los resultados obtenidos, se hizo la curva de consolidación que es la relación entre el esfuerzo vertical aplicado y la deformación.

12.6. Microscopía Electrónica de Barrido.

La microscopía electrónica de barrido se utiliza para la caracterización de los suelos, esto porque permite observar y analizar su estructura y composición a nivel microscópico. Esta prueba proporcionó imágenes detalladas de alta resolución que permitió la observación de las partículas de suelo, forma, tamaño y orientación, así como su composición química. Se analizaron dos muestras de suelo: muestra de suelo contaminada y la muestra de suelo control (no contaminada).

La preparación de las muestras para el análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) sigue un protocolo estándar que asegura una adecuada representación del suelo en el análisis microscópico.

1) Tamizado de la muestra:

Se pasó la muestra de suelo por una malla No. 200 (con abertura de 75 micrones) para eliminar partículas más grandes y obtener un material homogéneo.

2) Preparación del portamuestras:

Se utilizó un portamuestras de aluminio de 10 mm de altura y 10 mm de diámetro y se aplicó cinta doble cara sobre el portamuestras para fijar las partículas de suelo y evitar su desplazamiento durante el análisis.

3) Colocación de la muestra:

Una porción representativa de suelo fue depositada sobre el portamuestras previamente preparado e identificado, garantizando que las partículas estuvieran bien adheridas.

4) Preparación para el vacío:

El portamuestras (figura 29) se introdujo en la cámara de vacío del equipo para eliminar cualquier presencia de aire o humedad que pudiera interferir con el análisis.

Aumentos: Se utilizaron rangos desde 1 nm hasta 500 nm para observar diferentes escalas de las partículas del suelo, desde su morfología general hasta detalles más específicos.

La prueba se realizó en condiciones naturales. La prueba se realizó en el Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, Campus UNAM-Juriquilla., Querétaro, México (figura 30).



Figura 29. Portamuestras de suelos a estudiar.



Figura 30. Equipo de análisis de microscopía de barrido.

12.7. Método de prueba estándar para el pH en suelos.

La medición de pH se realizó con base en la Norma Oficial Mexicana (2002) NOM-021-RECNAT-2000, el método proporciona una medida precisa para evaluar su acidez o alcalinidad, y se siguió su respectivo procedimiento:

- 1) Preparación de la muestra:
Las muestras se secaron para después tamizarlas por la malla no. 10 y se pesaron 20 gramos de suelo para cada prueba.
- 2) Preparación de la suspensión suelo-agua:
En un vaso de precipitado se agregó 50 mililitros de agua destilada y se procedió a mezclar la suspensión durante 5 minutos y después se dejó reposar por 5 minutos.
- 3) Medición del pH:
Se calibró el potenciómetro y se introdujo el electrodo en la suspensión suelo-agua, se registró el valor de pH una vez que se estabilizó la lectura (figura 31).

Esta metodología se realizó para cada muestra de suelo.



Figura 31. Medición de pH mediante potenciómetro.

12.8. Método de obtención de materia orgánica

Esta prueba se basó en la norma (ASTM D2974, 2000), para la determinación de materia orgánica en suelo mediante la calcinación. Por lo que se siguieron los siguientes pasos:

1) Preparación de la muestra:

Para la preparación de la muestra, se secó una muestra de suelo al aire y se tamizó a través de una malla de 2 mm (malla #10) para la eliminación de piedras y materiales gruesos. Después se pesaron aproximadamente 10 gramos de suelo seco y se colocó en un crisol limpio y seco.

2) Secado de la muestra:

Se colocó el crisol con la muestra de suelo en un horno de secado a 105°C durante 24 horas para eliminar la humedad residual o agua libre. Posteriormente, pasando las 24 horas se dejó que el crisol y la muestra se enfriaran en un desecador para evitar que el suelo absorbiera humedad del ambiente, para después, pesar el crisol con la muestra seca y anotar el peso, esta fue la masa inicial del suelo seco.

3) Calcinación en mufla:

Se transfirió el crisol con la muestra de suelo al horno mufla y se puso a calentar la mufla a una temperatura de 450-550°C durante un periodo de 4 horas, debido a que es la temperatura suficiente para oxidar la materia orgánica sin descomponer los minerales del suelo. Al terminar las 4 horas, se retiró cuidadosamente el crisol de la mufla y se dejó que se enfriara en el desecador.

4) Obtención de resultados:

Una vez que el crisol y la muestra se enfriaron completamente, se pesó el conjunto nuevamente (peso final del suelo calcinado). La pérdida de masa entre el peso inicial

(suelo seco) y el peso final (suelo calcinado) correspondió a la materia orgánica volatilizada durante la calcinación.

Finalmente se calculó el porcentaje de materia orgánica con la siguiente formula:

$$\text{Materia orgánica de suelo} = \frac{PI - PF}{PI} * 100$$

Donde:

PI= Peso inicial del suelo seco.

PF= Peso final del suelo calcinado.

13. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

13.1. Propiedades del suelo natural y contaminado.

Previamente en el capítulo METODOLOGÍA se describen detalladamente los procedimientos empleados para identificar las propiedades geotécnicas del suelo. Con base en esta información, se realizaron los cálculos de las relaciones volumétricas y gravimétricas del suelo en su estado natural. Los resultados y cálculos asociados se encuentran en el apartado APÉNDICE A. PROPIEDADES SUELO NATURAL y en el apartado APÉNDICE B. PROPIEDADES DEL SUELO CONTAMINADO, mientras que los valores obtenidos se presentan en la tabla a continuación.

La tabla 4 presenta los valores correspondientes a las propiedades geotécnicas del suelo, junto con otras características como la actividad de las arcillas. Todas estas propiedades fueron determinadas a partir de muestras de suelo alteradas mediante los procedimientos descritos en el apartado METODOLOGÍA.

Tabla 4. Suelo Control y Suelo Contaminado.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Suelo Control	Suelo Contaminado
Masa volumétrica de la muestra	γ_m	gr/cm^3	1.056	1.16
Masa Volumétrica Sólida	γ_d	gr/cm^3	0.90	0.9508
Gravedad específica	S_s	Adimensional	2.4368	2.3788
Relación de vacíos	e	Adimensional	1.7019	1.49
Porosidad	n	%	62.99	59.93
Grado de Saturación	G_w	%	24.36	35.62
Potencial de hidrógeno	pH	Adimensional	6.9	6.8
Materia orgánica	MO	%	5.5	6.4
Permeabilidad	k	(cm/s)	4.10349×10^{-7}	2.47309×10^{-7}

Analizando los valores de la masa volumétrica de ambos suelos, en la cual, el suelo control cuenta con un valor de $1.056\text{ gr}/\text{cm}^3$, y el contaminado de $1.16\text{ gr}/\text{cm}^3$; ambos valores presentan valores muy bajos, de acuerdo con (Martínez, 1990) define los suelos con peso unitario bajo, cuando su valor se encuentra menor a $1.4\text{ gr}/\text{cm}^3$.

Se observan los valores del suelo control una porosidad de 62.99%, y de acuerdo con (Mitchel, 1976), estaríamos contando con suelo suelto, mientras que en el suelo contaminado se tiene una porosidad de 59.93%, lo que se interpreta que mientras mayor sea el grado de porosidad el tamaño de partícula es más fino, lo que nos dice que el suelo control tiene mayor

porcentaje de partículas finas, y de acuerdo a los parámetros típicos de (Márquez, 1987), se consideran en el rango de suelos finos con presencia de materia orgánica.

Por otro lado, su gravedad específica para el suelo control es de 2.4368, mientras que el suelo contaminado tiene un valor de 2.3788, ambos valores caen en el rango de valores del mineral Halloysita que tiene un rango de 2.00 a 2.55, de acuerdo a (Das, 2015), mientras que (Juárez & Rico, 2005) lo clasifica como valores promedios de arcillas volcánicas del valle de México (rango entre 2.2 y 2.6); como también menciona este autor, la relación de vacíos que presenta el suelo se acerca al rango de valores de una arcilla blanda.

El pH de la solución del suelo se encuentra en el rango de 4.0 a 8.0, se considera que los suelos con valores $pH < 7$ son ácidos y si $pH > 7$ son alcalinos (Osorio, 2012); los resultados que presentan los suelos estudiados, el suelo control con un valor de 6.9 y el suelo contaminado con 6.8, se consideran neutros. De acuerdo al pH que se tiene del suelo contaminado, nos indica la fase en la que se encuentra el vertedero, de acuerdo con (Tchobanoglous, 2002) al tener un pH entre el rango de 6.5 a 7.5, su edad aproximada es de 5-10 años.

Respecto a la permeabilidad del suelo control, se obtuvo un valor de 2.4730×10^{-7} (cm/s), mientras que en el suelo contaminado se observa un valor de 4.10349×10^{-7} (cm/s) de acuerdo con (Das, 2015), ambos suelos tienen una permeabilidad hidráulica típica de las arcillas. La relación de vacíos influye en la permeabilidad, debido a que, si la relación de vacíos es baja, la permeabilidad será menos, como se observa en los resultados, el suelo contaminado al tener una relación de vacíos más baja que el suelo control, influye que su permeabilidad sea también más baja. Al igual que (Juárez & Rico, 2005), cataloga ambos valores como prácticamente impermeables para las arcillas, y como mención existen factores que influyen en la permeabilidad del suelo; uno de ellos, la relación de vacíos.

En la tabla 6, se muestran los Límites de Atterberg, que nos sirven para la clasificación del suelo con ayuda de la carta de plasticidad. De acuerdo con (Budhu, 2011) son valores típicos encontrados en arcillas y en el caso de minerales, en ambos suelos, de acuerdo con sus valores, es un valor representativo en el mineral de Caolinita.

Tabla 5. Límites de Consistencia "Suelo Control y Suelo Contaminado".

Parámetro	Símbolo	Unidad	Suelo Control	Suelo Contaminado
Límite líquido	LL	%	45.53	45.52
Límite plástico	LP	%	37.04	38.09
Índice Plástico	IP	%	18.72	18.71
Contracción Lineal	CL	%	16.42	35.34

Para el suelo control, se tiene un valor de límite líquido de 45.534 %, límite plástico de 37.037% y un índice de plasticidad de 18.424%; utilizando la carta de plasticidad del SUCS se obtiene una clasificación de Limo de baja plasticidad. Y de acuerdo con (Mitchel, 1976) que

clasificó los valores de Atterberg típicos en suelos, los valores del suelo control se estarían encontrando en los rangos de una arcilla y en mineral, en el rango de una Caolinita.

En cambio, los valores del suelo contaminado, se observa un valor de límite líquido de 45.500 %, límite plástico de 38.090% y un índice plástico de 21.040% y utilizando la carta de plasticidad del sistema unificado de suelos (figura 32), graficando los valores del índice de plasticidad y límite líquido, se obtiene una clasificación de Limo Orgánico de baja plasticidad (OL). Y de acuerdo con (Mitchel, 1976), se estaría encontrando en los rangos de una arcilla y en mineral, en el rango de una Caolinita.

En el parámetro de contracción lineal, se observa que en el suelo control se tiene un valor de 16.42%, mientras que en el contaminado se tiene un valor de 35.34%, de acuerdo con (Briaud, 2023) los valores típicos de contracción lineal de las arcillas, el valor del suelo control es medio, mientras que el valor del suelo contaminado es alto.

En la siguiente figura 32, muestra la clasificación de cada suelo de acuerdo a la carta de plasticidad, en el que el suelo control se clasifica como OL y el suelo contaminado como OL (Limo y arcillas orgánicas con baja compresibilidad).

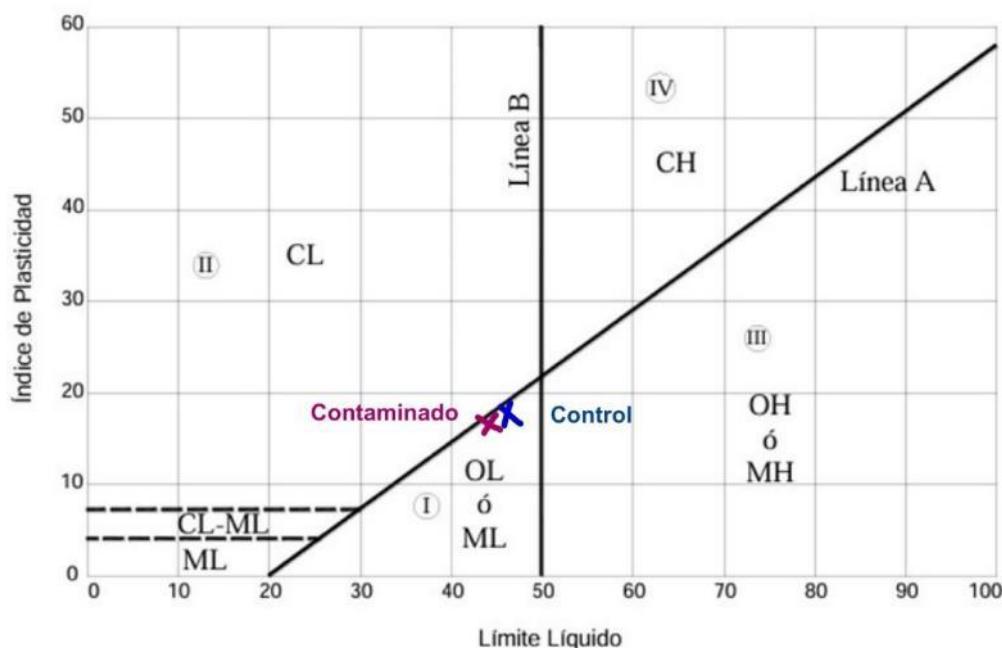


Figura 32. Carta de plasticidad para la Clasificación del suelo contaminado y control.

La tabla 6 presenta los valores de los porcentajes de cada fracción de suelo de acuerdo a su tamaño con ayuda de la prueba de granulometría por medio de mallas e hidrómetro, que se le aplicó a cada suelo. Los procedimientos se encuentran en el apéndice A para el suelo control y el apéndice B para el suelo contaminado.

Tabla 6. Suelo Control y Suelo Contaminado.

Parámetro	Unidad	Suelo Control	Suelo Contaminado
Gravas	%	0	0
Arenas	%	31.94	41.93
Limos	%	62.45	52.21
Arcillas	%	5.60	5.86
Clasificación SUCS	---	OL	OL

En la figura 33, se muestran las curvas granulométricas de ambos suelos mediante el análisis granulométrico con mallas y vía hidrómetro con base en la norma ASTM D422, en donde se puede observar que los dos suelos no presentan grava, consisten de arena, limo y arcillas. Sin embargo, la diferencia que se aprecia es que en el suelo control, se presentan mayor porcentaje de limos con 62.45%, respecto al suelo contaminado que tiene 52.21%, como también la presencia de arenas es mayor en el suelo contaminado. Adicional a esto, los resultados de la prueba de materia orgánica con la mufla, se obtuvieron los valores de 5.5% de materia orgánica en el suelo control y de 6.4% de materia orgánica en el suelo contaminado, estos valores clasifican ambos suelos como ricos en materia orgánica, esto de acuerdo a (Julca-Otiniano et al., 2006.), la presencia de materia orgánica en suelos suele ser escasa, y en suelos arcillosos su nivel deseable es del 2%, por lo que ya rebasando el 5% se considera con un alto contenido para clasificar al suelo como “orgánico”.

Con estos datos obtenidos con base en la norma ASTM D2487 “Clasificación de Suelos” se tiene un suelo limo orgánico de con baja plasticidad (OL) para el suelo control y para el suelo contaminado se tiene un limo orgánico de baja plasticidad (OL).

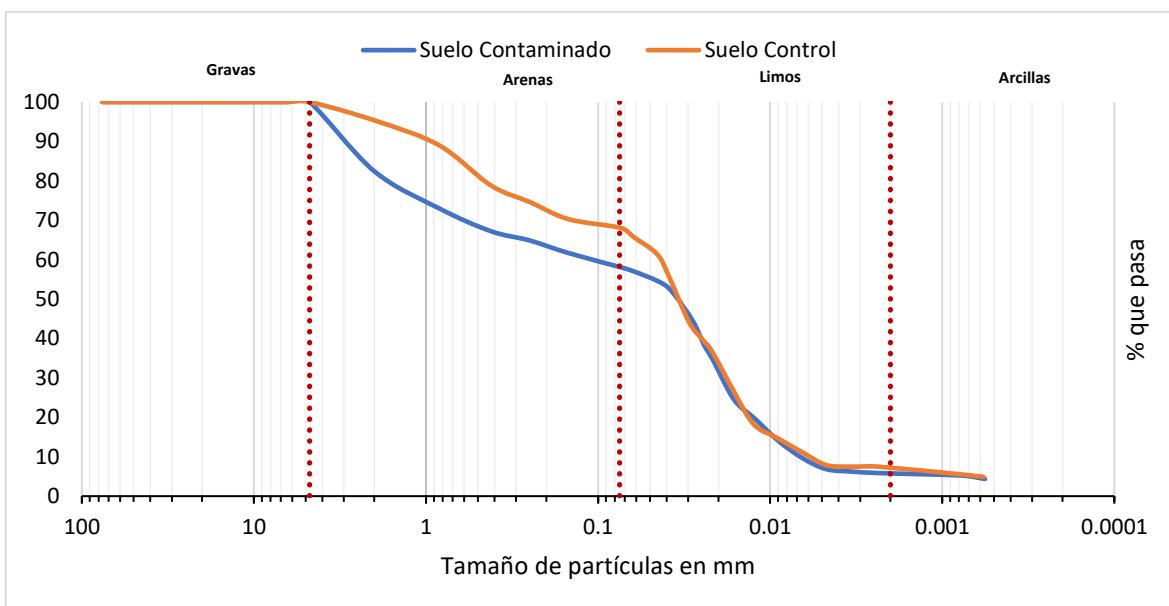


Figura 33. Curva Granulométrica "Suelo Control y Suelo Contaminado".

13.2. Curva de retención agua-suelo.

Conocer la succión en suelos permite conocer el comportamiento de los suelos no saturados, la succión está en función del grado de saturación. Es fundamental obtener los valores que tendrá la succión en el fenómeno de histéresis, esto durante la trayectoria de humedecimiento y secado. De acuerdo con (Briaud, 2023), el fenómeno de succión varía dependiendo los factores que tenga el suelo, uno de ellos es la granulometría.

Aunado a lo anterior, se realizaron dos determinaciones de la curva de retención por el método de papel filtro, la figura 34 muestra el comportamiento de la succión del suelo control y la figura 35 muestra el comportamiento de la succión del suelo contaminado.

En la figura 34, muestra la curva de humedecimiento y secado obtenidas del suelo control, donde se puede observar el fenómeno de histéresis formado por las trayectorias de dichas curvas. Se observa que los valores de succión medida, van aumentando significativamente al disminuir de un grado de saturación del 60% presentando valores entre 1 kPa y la máxima succión medida en el suelo a grados de saturación cercanos al 0% donde alcanzan valores de hasta 53 Mpa.

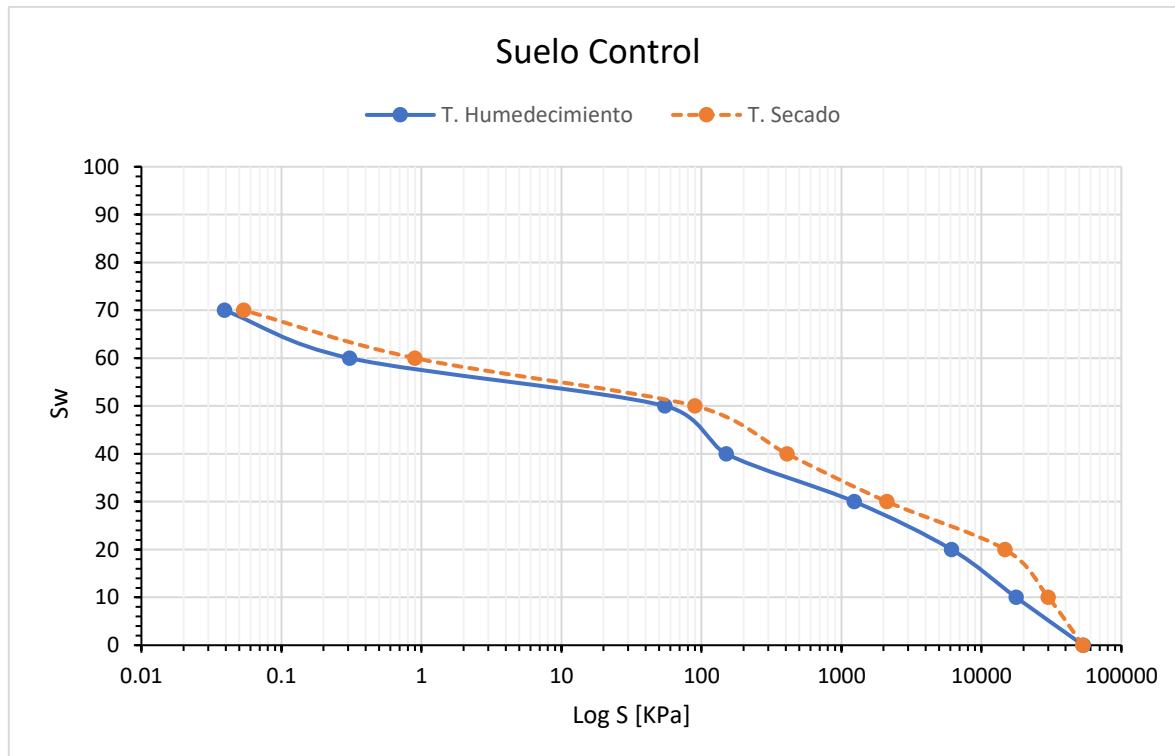


Figura 34. Curva de Retención Agua-Suelo Control.

En el caso del suelo contaminado, se observa que los valores de succión van aumentando con un cambio significativo al disminuir de un grado de saturación del 60%, presentando valores de hasta 1 Mpa en la trayectoria de humedecimiento; la máxima succión medida en el suelo a grados de saturación cercanos al 0% alcanzan valores de hasta 64 Mpa.

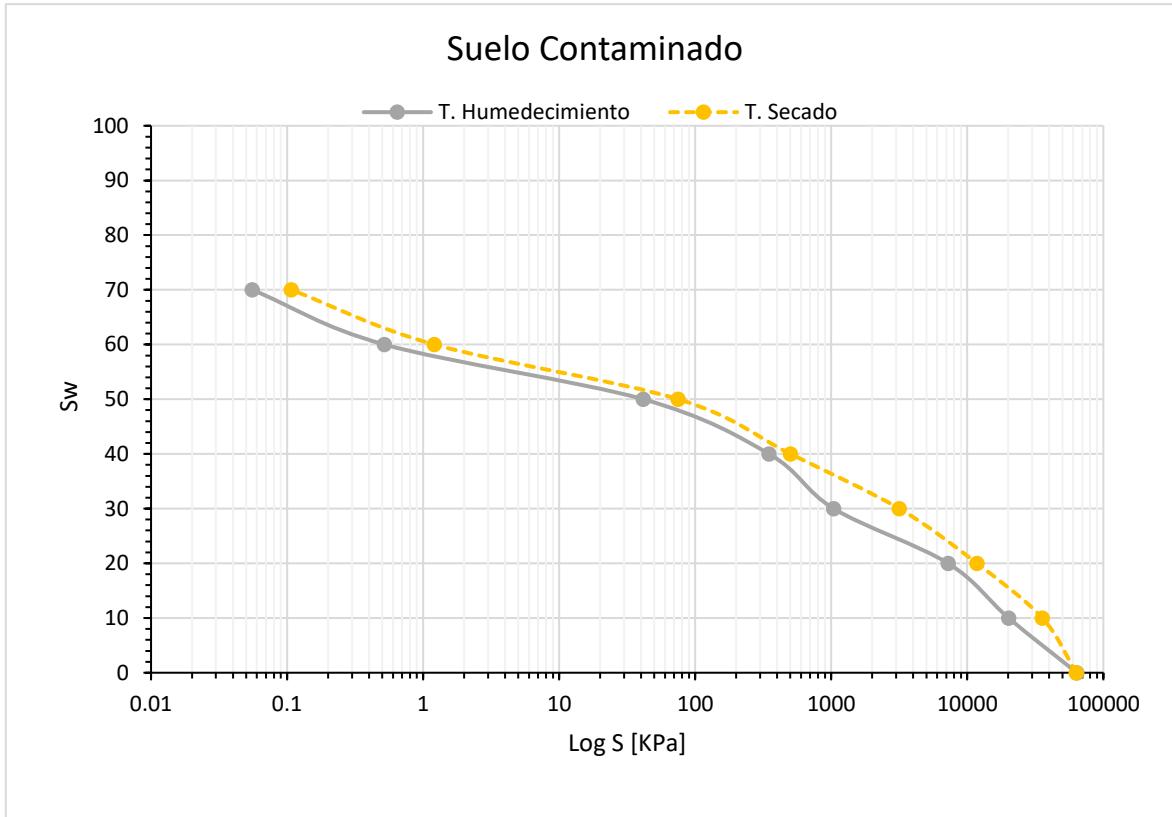


Figura 35. Curva de Retención Agua-Suelo Contaminado.

En la figura 36, se muestra la comparación entre la Curva de Retención del agua- Suelo Control y la Curva de Retención del Agua-Suelo Contaminado; ambos suelos se muestra el fenómeno de histéresis, y se observa que la succión es nula en el rango de grado de saturación del 80% al 100%, mientras que del rango del 0% al 40% los valores de succión se mantienen altos de una manera constante hasta que empiezan a alcanzar un punto mínimo en el grado de saturación de 60%, esto se debe al llenado de los espacios entre láminas del suelo hasta que las fuerzas de tracción están satisfechas y la succión se hace nula. De acuerdo con (Briaud, 2023) las curvas de retención de ambos suelos se asemejan a las características para un limo, y se justifica con las pruebas de granulometría que se hicieron, ya que ambos suelos son clasificados como limos orgánicos (OL).

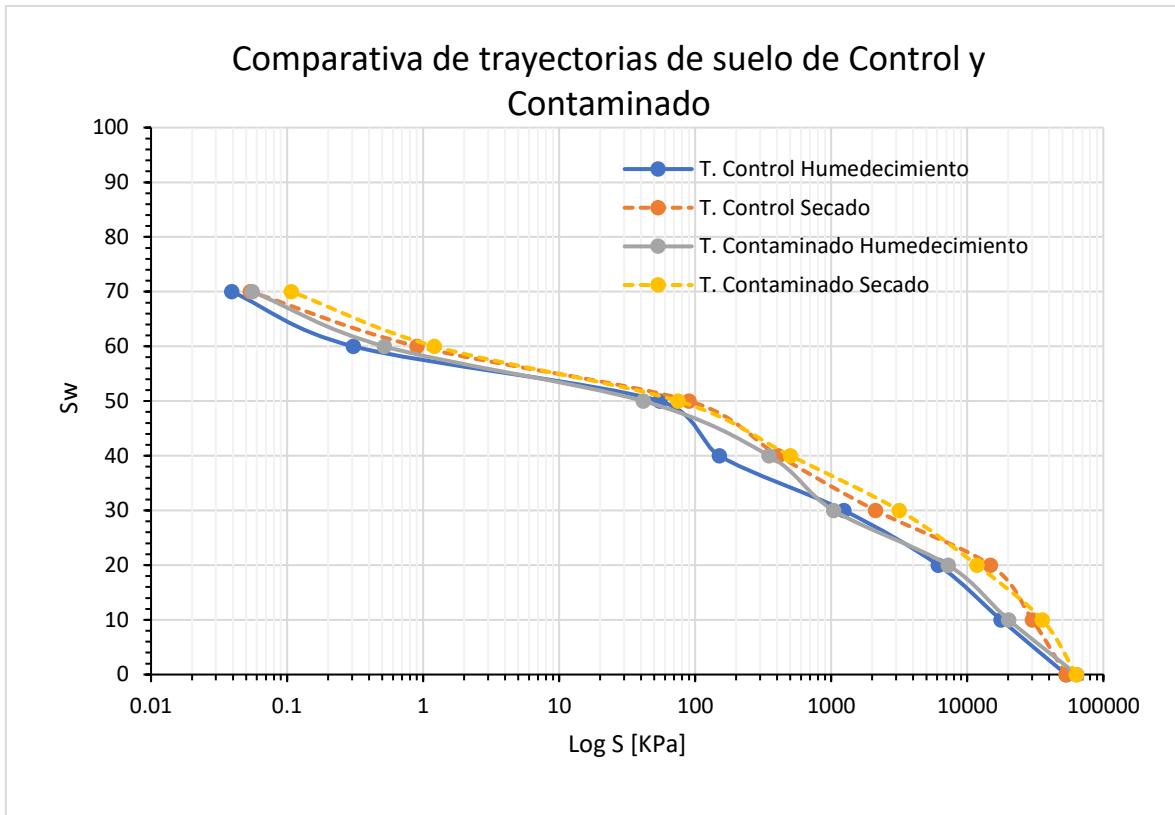


Figura 36. Curvas de humedecimiento y secado de suelo control y suelo contaminado.

Los valores máximos de succión que presentaron ambos suelos, el suelo contaminado presentó un mayor porcentaje al suelo control, esto se debe a que de acuerdo a los valores de permeabilidad obtenidos, el suelo contaminado presenta menor permeabilidad, ya que de acuerdo con (Smith et al., 2002) que demostraron que la permeabilidad del fluido contaminante disminuye conforme se incrementa el contenido de agua en el suelo, debido a que el agua está desplazando al contaminante la velocidad del flujo disminuye a comparación de la permeabilidad del agua, esto se demostró en las Curvas de Retención de Suelo-Contaminante de la investigación de (Yessenia Cabello Suárez, n.d.).

13.3. Prueba de consolidación.

La prueba de consolidación se realizó con muestras remoldeadas, esto tanto para el suelo control, como para el suelo contaminado; los dos suelos se remoldearon tomando en consideración el volumen del anillo y las condiciones de sitio del suelo, en la tabla 8, se observa los datos de cada muestra.

Tabla 7. Datos de pruebas de consolidación.

Parámetro	Suelo Control	Suelo Contaminado
γ_m ($\frac{gr}{cm^3}$)	1.35	1.35
ω (%)	25	25
γ_d ($\frac{gr}{cm^3}$)	1.08	1.08
D (cm)	7.68	7.65
H (cm)	1.96	1.94
Volumen (cm^3)	90.80	89.17
$A_{superficial}$ (cm^2)	46.32	45.96

El ensaye de consolidación, se inició aplicando la carga de sitio, que es de 0.125 kg/cm², para después saturar la muestra y se aplicaron las cargas de 1 kg, 2 kg, 4 kg, 8 kg y finalmente 16 kg. Los resultados obtenidos se pueden observar en la tabla 8 y figura 37 para el suelo control y en la tabla 9 y figura 38 para el suelo contaminado.

Tabla 8. Resultados de ensayes edométricos "Suelo Control".

Presión (Ton/m ²)	e_f	ϵ (%)
0.20	1.3737	0.0000
0.20	1.4343	-2.5530
0.53	1.4275	-2.2679
2.13	1.4208	-1.9828
4.25	1.4122	-1.6199
8.50	1.3873	-0.5702
17.00	1.3596	0.5961
34.00	1.3457	1.1793
17.00	1.3545	0.8099

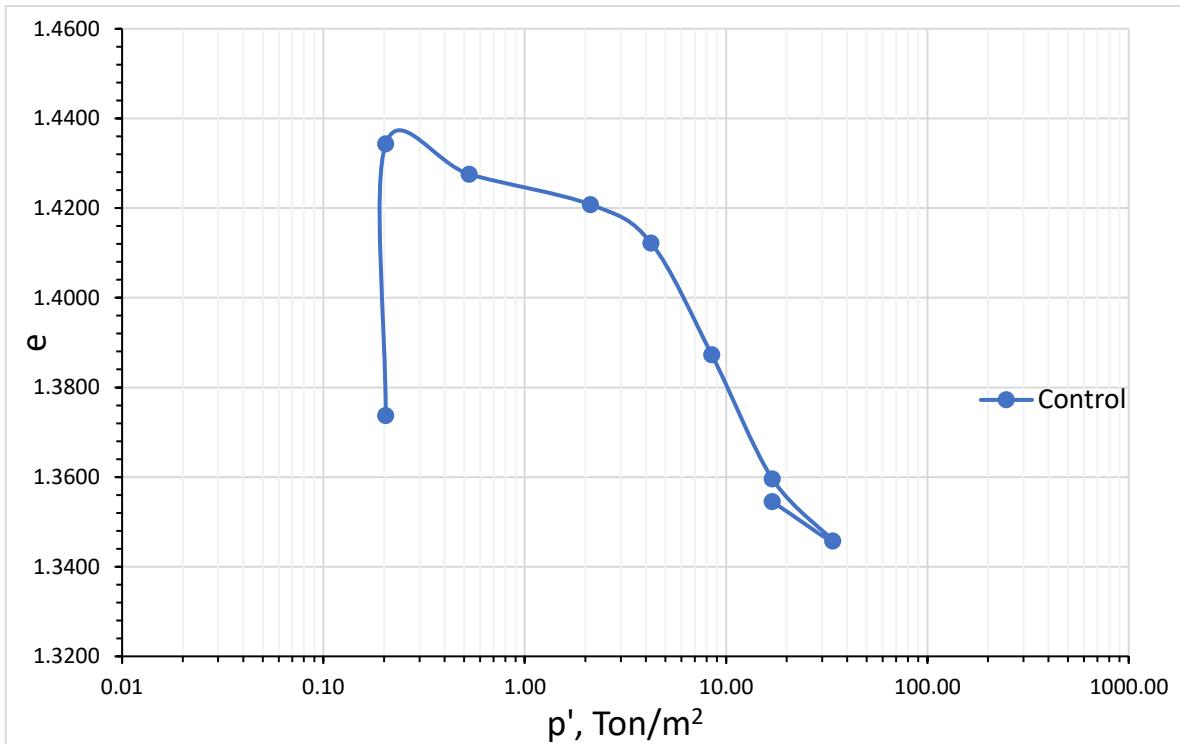


Figura 37. Curva de compresibilidad Suelo Control.

Tabla 9. Resultados de ensayos edométricos "Suelo Contaminado".

Presión (Ton/m ²)	e_f	ε (%)
0.20	1.3980	0.0000
0.20	1.4583	-2.5141
0.53	1.4281	-1.2570
2.13	1.3237	3.0972
4.25	1.2320	6.9202
8.50	1.1180	11.6762
17.00	1.0041	16.4245
34.00	0.9499	18.6871
17.00	0.9682	17.9226

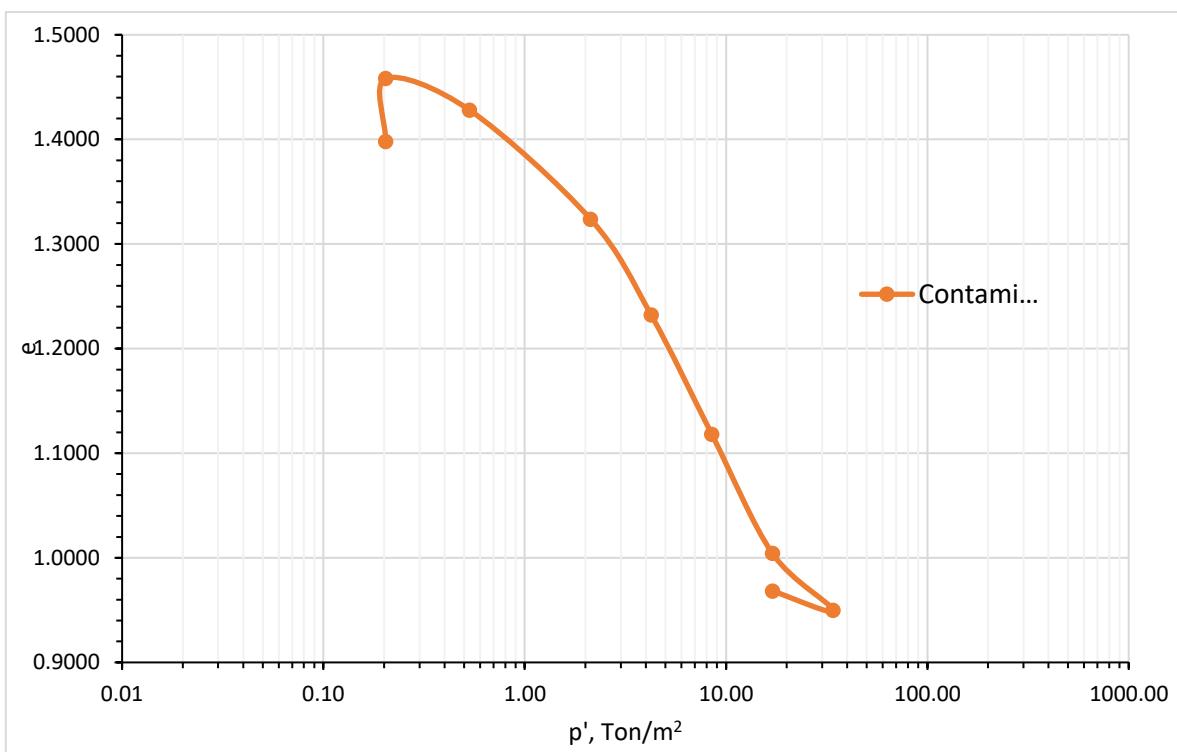


Figura 38. Curva de Compresibilidad Suelo Contaminado.

En la tabla 10 se muestra una comparación de las relaciones de vacíos de los suelos control y contaminado en donde se puede observar que el suelo contaminado presenta un menor valor en la relación de vacíos que el suelo control al final del incremento de las cargas.

Tabla 10. Comparativo de relación de vacíos de suelo control y suelo contaminado.

Presión (Ton/m ²)	Suelo Control e_f	Suelo Contaminado e_f
0.20	1.3737	1.3980
0.20	1.4343	1.4583
0.53	1.4275	1.4281
2.13	1.4208	1.3237
4.25	1.4122	1.2320
8.50	1.3873	1.1180
17.00	1.3596	1.0041
34.00	1.3457	0.9499
17.00	1.3545	0.9682

Al obtener la curva de compresibilidad se obtuvo el índice de compresión y el índice de carga-descarga, que se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Comparativa de índices y asentamiento de suelo control y suelo contaminado.

Parámetro	Suelo Control	Suelo Contaminado
Índice de sobre consolidación	1.0626	1.0309
Índice de compresión	0.24874	0.24864
Asentamiento (m)	0.01429	0.07659

De acuerdo con (Das, 2015), ambos suelos, respecto con su índice de consolidación, se clasifican como arcillas sobre consolidadas, que dice que; la actual presión de sobrecarga efectiva es menor que la que el suelo ha experimentado a lo largo de su vida geológica.

El suelo contaminado presenta mayor asentamiento que el suelo control, por lo que es más susceptible en provocar deformaciones y con ello tener más dificultades al realizar una construcción sobre este tipo de suelo.

Para el índice de compresión se utilizó la ecuación de Skempton (1944), para arcillas remoldeadas.

En la figura 39, se puede observar la comparativa de las curvas de compresibilidad del suelo control y el suelo contaminado, se observa que el suelo control tiene una consolidación instantánea a comparación del contaminado, por lo que el suelo contaminado tiene una mayor deformación y por ello se deben tener más precauciones para realizar una construcción sobre él.

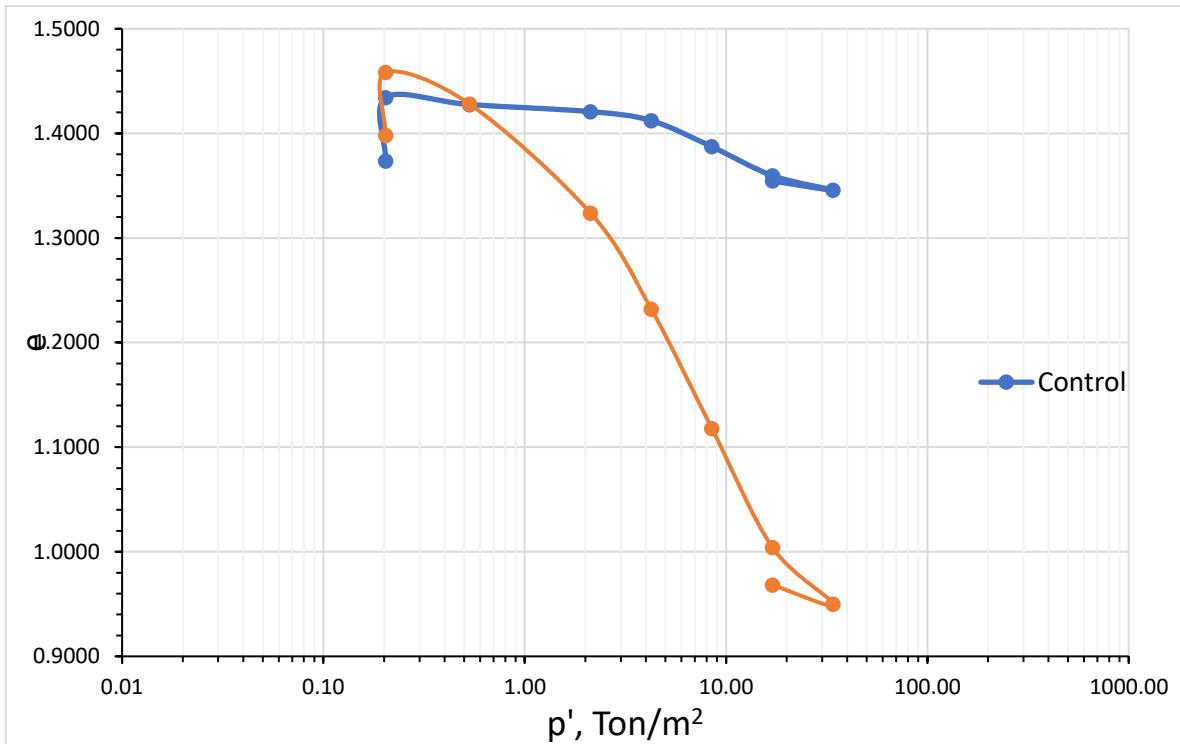


Figura 39. Comparativa de curvas de compresibilidad de suelo control y suelo contaminado.

13.4. Pruebas triaxiales.

Para la evaluación de resistencia al corte, las probetas que se ensayaron en la prueba fueron remoldeadas debido a que no se tenían muestras inalteradas de los dos tipos de suelos, estas probetas se fabricaron en un molde cilíndrico con medidas de 3.71 cm de diámetro y 7.42 cm de altura, y con ayuda de una prensa manual, se compactó en 3 capas hasta lograr el peso volumétrico deseado. Para poder ensayar las probetas se propuso un γ_m nuevo y una humedad del 25%, esto para que fuera posible moldearlas y ensayarlas debido a que las propiedades iniciales hacían que las probetas al reproducirlas, ocasionaban que las probetas se deshicieran con facilidad debido a su γ_m inicial, por lo que se consideró aumentarlo, esto para tener más estabilidad en la probeta al momento de moldearla y después ensayarla. La humedad se manejó del 25% en ambos suelos para que tuvieran las mismas condiciones y poder ser comparadas, dicha humedad se determinó con base en la práctica Proctor Estándar que permitió obtener la humedad óptima de cada suelo, en la figura 40 se muestran los resultados de la prueba.

En dicha figura 40, se observa las curvas de compactación que se realizaron, el suelo control tiene una humedad óptima del 29%, mientras que el suelo contaminado fue de 28%, con estos cálculos la diferencia del valor de humedad óptima que se trabajó en las probetas fue del 3-4%, por lo que no representa una gran diferencia. En esta misma figura, se obtienen los valores óptimos de humedad de compactación para los valores máximos de peso volumétrico

seco, por lo que se observa que el suelo control se encuentra más compactado que el suelo contaminado, que se muestra más suelto como se puso observar en la relación de vacíos y la porosidad.

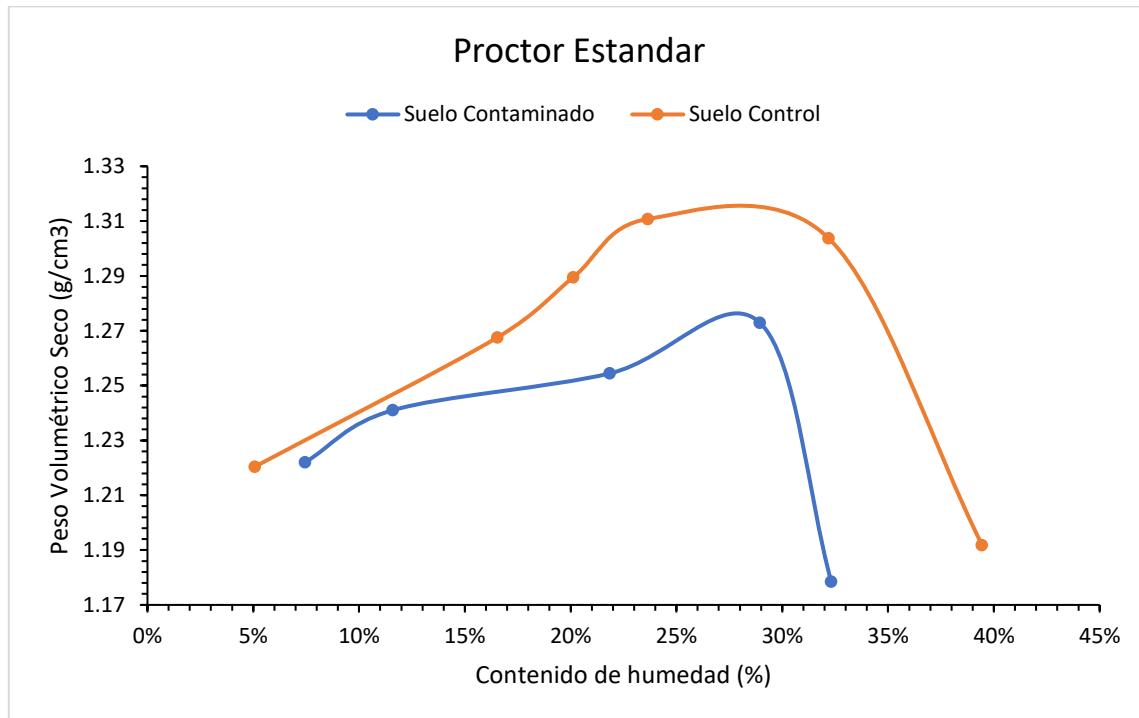


Figura 40. Comparativa de suelo control y suelo contaminado de prueba proctor estandar.

En la tabla 13 se muestra los valores que se tomaron en cuenta para el remoldeo de cada una de las probetas de ambos suelos.

Tabla 12. Datos para la realización de probetas de suelo control y suelo contaminado.

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad
Masa volumétrica de la muestra	γ_m	1.35	gr/cm^3
Humedad	ω	25	%
Masa volumétrica sólida	γ_d	1.08	gr/cm^3
Peso del suelo por probeta	W_s	89.694	gr
Peso del agua por probeta	W_w	22.4235	gr

Las probetas se ensayaron aplicando esfuerzos de confinamiento de 49 kPa, 98 kPa y 196 KPa en ambos suelos. Los diagramas de los círculos de Mohr se presentan en el anexo D.

En la tabla 13, se observan los valores de cohesión y ángulo de fricción para ambos suelos. El suelo control tiene una cohesión de 1 unidad con un ángulo de fricción de 25° , esto se debe a las partículas que tiene presente, de acuerdo a su granulometría, este presenta mayor porcentaje de partículas finas, y estas tienen características de tener una mayor cohesión y su

ángulo de fricción es mejor, debido a que los finos tienen menor resistencia al corte. En el suelo contaminado, se tiene una cohesión de 0.5 y un ángulo de fricción de 30°, debido a su granulometría, tiene mayor presencia de arenas y menor de finos, las arenas producen un mayor ángulo de fricción de acuerdo a su interacción entre sus partículas.

Tabla 13. Valores de cohesión y ángulo de fricción en ensayos de corte directo del suelo control y suelo contaminado.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Suelo Control	Suelo Contaminado
Cohesión	C	kPa	1	0.5
Ángulo de fricción	ϕ	°	25	30

En la figura 41 se muestra los comportamientos de esfuerzo-deformación de los ensayos del suelo control y del suelo contaminado, aplicando esfuerzos confinantes de 49 kPa, 98 kPa y 196 kPa. Por lo que se puede apreciar un mayor valor en la capacidad de carga con el suelo contaminado con 248.76 T/m² a comparación del suelo control con un valor de 201.51 T/m².

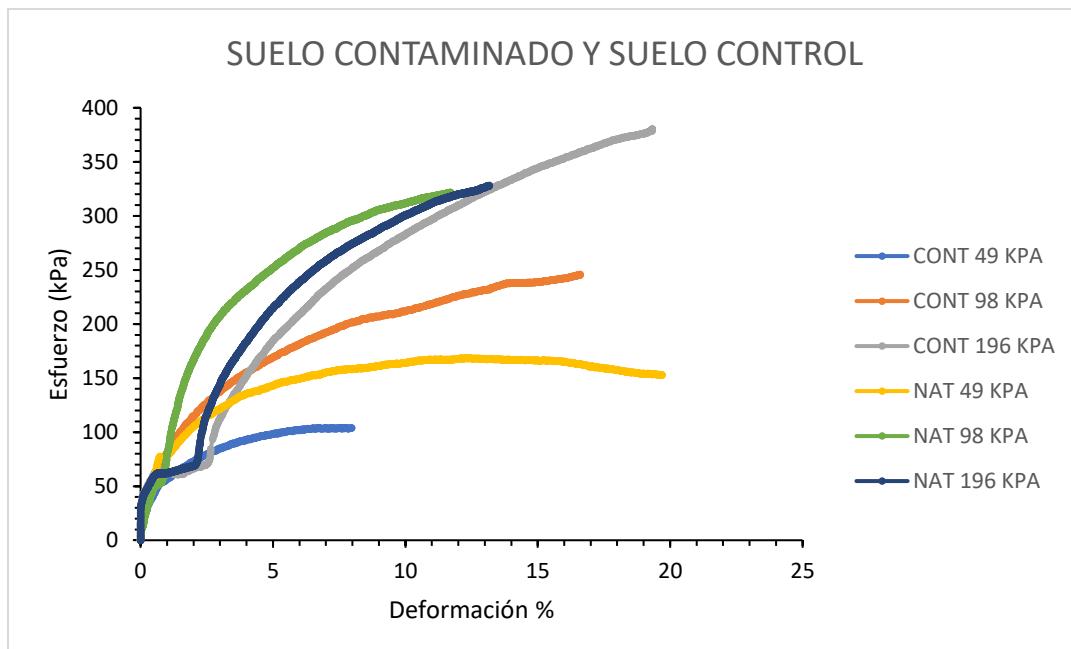


Figura 41. Curva esfuerzo-deformación de suelo control y suelo contaminado.

13.5. Estructura del suelo.

Más conocido como “microfabric structure”, se refiere a la disposición de partículas junto con su estructura, composición y fuerzas entre estas mismas. Para entender las propiedades de un suelo es necesario analizar varios factores, un factor son las características de sus partículas (su disposición y fuerzas entre ellas). La disposición de las partículas del suelo influye en sus propiedades físicas y mecánicas, como lo es resistencia, permeabilidad y compresibilidad (Mitchel, 1976).

A continuación, tabla 14 se muestra imágenes tomadas en el microscopio electrónico de barrido, en muestras de suelo control y suelo contaminado con aumentos de 100x y 50x.

De acuerdo con (Gonzalez, 2002), los suelos finos forman estructuras laminares, de comportamiento muy variable, por lo que se consideran geotécnicamente inestables; esto se puede observar en las imágenes, que tienen una estructura laminar, pero varían, y con mayor detalle en la figura 42, se observa una partícula con caras completamente laminares.

En las imágenes se observa que se produce el fenómeno de dispersión, que (Gonzalez, 2002) lo describe cuando predominan las fuerzas eléctricas de repulsión entre las partículas adyacentes, por lo que describe las estructuras densas y alargadas.

Los suelos arcillosos presentan múltiples tipologías de micro fábrica, la que se asemeja más a las imágenes del suelo control es “Panal de abeja”, que son estructuras abiertas formadas por flóculos de partículas unidas por fuerzas de adherencia y presenta poros intercomunicados y de acuerdo a (Gonzalez, 2002), este tipo de fábrica presenta porosidad alta, posible colapsabilidad y muy alta susceptibilidad.

De acuerdo con (Mitchel, 1976) la categoría que tiene la estructura del suelo control clasificada por Collins y McGown (1974), es la categoría de espacio poroso, debido a que se observa espacios vacíos entre las partículas, coincidiendo que su grado de porosidad es alto.

En las imágenes se observan caras laminares correspondientes a la estructura de un suelo arcilloso, se pueden observar que hay una mayor atracción entre las partículas, apareciendo aglomeraciones, esto, de acuerdo con (Ramírez et al., 2017) puede estar vinculado a una mayor concentración de la muestra contaminada.

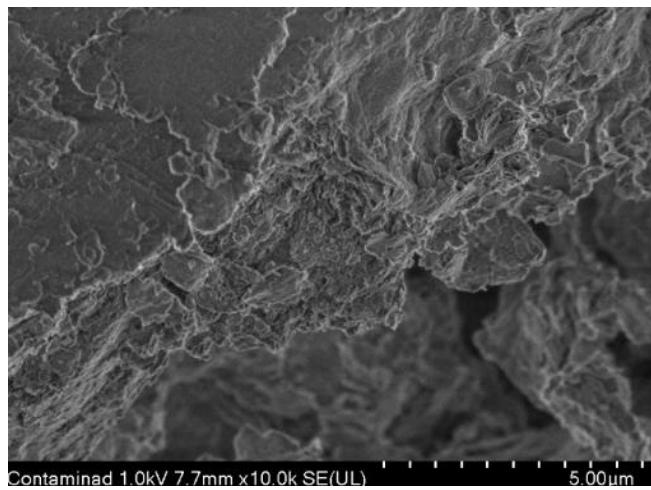


Figura 42. Imagen Microscopio Electrónico de Barrido, muestra Contaminada, aumento 5x.

Tabla 14. Imágenes con microscopio electrónico de barrido de suelo control y suelo contaminado.

Muestra Control	Muestra Contaminada
Control 1.0kV 8.2mm x500 SE(UL) 100μm	Contaminad 1.0kV 7.7mm x500 SE(UL) 100μm
Control 1.0kV 8.2mm x1.00k SE(UL) 50.0μm	Contaminad 1.0kV 7.7mm x1.10k SE(UL) 50.0μm

14. DISEÑO DE CIMENTACIÓN

En esta investigación se tiene como objetivo el saber cómo se afectan las construcciones de casas habitación en zonas que han sido expuestas a lixiviados, por lo que se realiza a continuación un análisis para definir los cambios y/o recomendaciones que se deben de tener en cuenta para la construcción en zonas con este tipo de problemas.

14.1. Estructura de casa habitación.

Se propone una casa habitación de interés social a base de mampostería, para esto fue diseñada una casa con base a las Normas Técnicas Complementarias de 2023 (NTC-2023), se realizó su baja de cargas. Estos cálculos se presentan en el apéndice G.

14.2. Diseño de losa de cimentación.

Conforme al tipo de suelo que se tiene, se decidió en hacer uso de una losa de cimentación, esta de igual manera se calculó de acuerdo a las NTC (2023), se calculó de acuerdo a una losa maciza con las siguientes especificaciones:

Tabla 15. Especificaciones para diseño de losa maciza.

Consideración	Valor	Unidad
f'c	250	Kg/cm ²
Fy	4200	Kg/cm ²
peralte	12	cm
Lado corto	600	cm
Lado largo	900	cm

De acuerdo a la demanda de la bajada de cargas, el armado de la losa, se constituye de varilla del número 3 cada 20 centímetros en un solo lecho, ambos sentidos. En la siguiente figura 43, se presenta un detalle de la losa maciza.

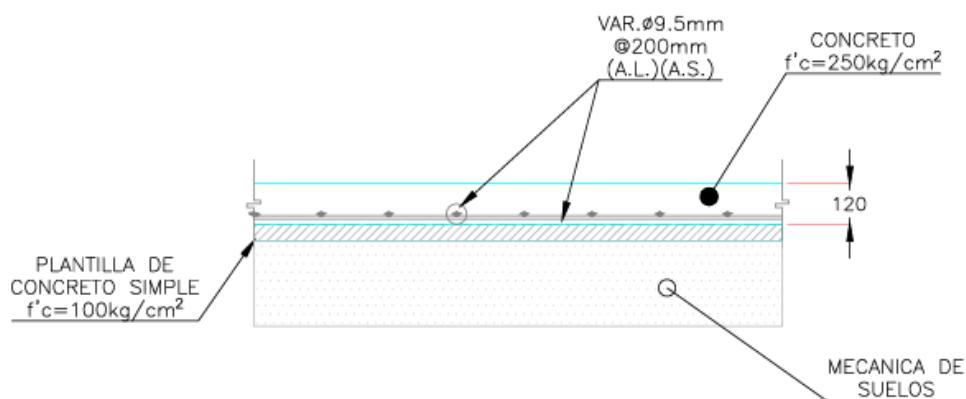


Figura 43. Detalle de losa maciza.

Posteriormente se obtuvo la capacidad de carga admisible (Q_{adm}) de ambos tipos de suelos, de acuerdo a las dimensiones de la losa propuesta, y se calculó la presión permisible (q) sobre la cimentación, en el que en todos los casos “q” debe ser menor que la capacidad de carga admisible.

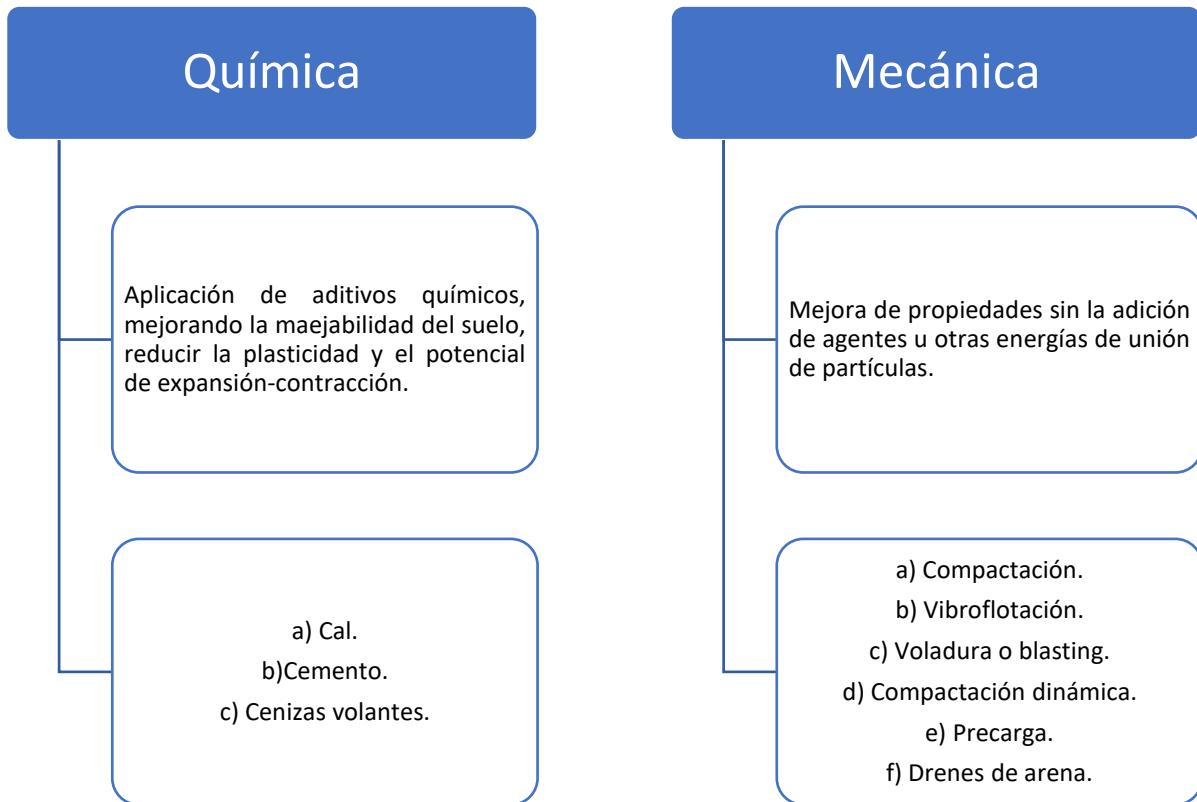
Tabla 16. Comparativa de capacidad de carga de suelo control y suelo contaminado.

Parámetro	Suelo Control	Suelo Contaminado
Qadm (T/m²)	4.3615	4.5695
q (T/m²)	0.5779	0.3699

En ambos suelos la presión es menor que la capacidad de carga admisible, por lo que el suelo y la cimentación resisten el peso de la casa; sin embargo, la capacidad de carga admisible es mayor en el suelo contaminado.

14.3. Mejoramientos de suelo.

Al mejoramiento de suelo, se le conoce como comúnmente estabilización del suelo en el área de mecánica de suelos. Es un proceso de alteración de las propiedades del suelo, estas técnicas se dividen en dos categorías: estabilización química y estabilización mecánica (Das, 2015).



15. CONCLUSIONES

Los resultados de caracterización de ambos suelos fueron el mismo resultado, un limo con contenido de materia orgánica de baja plasticidad (OL), lo cual coincide con las pruebas de caracterización que se realizaron en el laboratorio, llegan a tener diferencias mínimas despreciables. Sin embargo, en la granulometría el suelo contaminado presentó un aumento de 31.28% en arenas respecto al suelo control, esto se debe a que la presencia del contaminante provoca una aglomeración en las partículas del suelo, y ocasiona que el suelo contaminado sea un 40% menos permeable que el suelo control, como se pudo observar en las micrografías la posibilidad de aglomeración de las láminas del suelo.

En el caso de los minerales que constituyen al suelo, en ambos, de acuerdo a los valores de Das (2015), se presentan minerales típicos de una arcilla, que son Halloysita y Caolinita. En el anexo 22 se habla más a detalle los minerales que constituyen al suelo control que pertenecen al grupo de las arcillas.

El suelo contaminado presentó mayor reducción en la relación de vacíos siendo un 12.45% menor respecto con el suelo control durante la aplicación de esfuerzos, esto ocasionaría que se presenten procesos de inestabilidad en las estructuras desplantadas sobre este material, tal es el caso de los asentamientos diferenciales que generan daños en las construcciones.

La contaminación con lixiviado del suelo, causa modificaciones en las propiedades físicas y comportamiento mecánico, siendo el más importante la disminución de la resistencia al corte y aumento de los asentamientos. En el anexo 22 se explica más a detalle los principales contaminantes que contiene el suelo contaminado y su efecto en dichas propiedades.

En el caso de la resistencia del material el suelo contaminado presenta mayor capacidad de carga que el suelo control, esto se debe a su variación en la granulometría, ya que al tener mayor porcentaje de arena lo hizo mayor resistente que el control que tiene mayor cantidad de finos.

La capacidad de carga de la losa propuesta en ambos suelos es admisible, siendo mayor en el suelo contaminado con 4.77% mayor respecto con el suelo control. Por lo que en ambos suelos resistirían una casa de interés social de las dimensiones propuestas.

Con el contaminante su estructura se hace más inestable y aumenta su plasticidad con un 2.83% lo que ocasiona que incrementen las deformaciones al presentar aplicación de esfuerzos y modificación en su humedad.

Sin embargo, el suelo contaminado no es apto para la construcción por los siguientes puntos:

1.- Aunque implica mayor resistencia, tiene a tener mayor asentamiento y deformación, lo que es un problema en las cimentaciones y afecta con el tiempo a la estructura.

2.- Su contaminación no es segura para la salud humana, al tener la posibilidad de contener metales pesados, lo que provoca daños en la salud, y más por los años que tiene el vertedero.

3.- Se recomienda tratar el suelo contaminado por procesos de biorremediación que más convengan antes de hacer uso habitacional en él y hacer los estudios geotécnicos y diseños estructurales correspondientes.

16. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Apunayta, M., & Puellas, L. (2022). *Remoción de plomo y cobre con microorganismos eficaces en suelo contaminado por lixiviados de una fuente minera en Huancavelica, 2022* [Investigación]. Universidad César Vallejo.
- Arora, N. K. (2018). Bioremediation: a green approach for restoration of polluted ecosystems. *Environmental Sustainability*, 1(4), 305–307. <https://doi.org/10.1007/s42398-018-00036-y>
- ASTM D422. (2002). *ASTM D422 Método prueba estándar para granulometría de los suelos finos método hidrómetro*.
- ASTM D854. (n.d.). *ASTM D854 Método de prueba estándar para Peso específico relativo de los sólidos*.
- ASTM D2435. (2002). *ASTM D2435 Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*.
- ASTM D2487-11. (2007). ASTM D2487-11 Práctica Estándar para la Clasificación de Suelos para Propósitos de Ingeniería (Sistema de Clasificación Unificada de Suelos). In 2011. <https://doi.org/10.1520/D2487-11>
- ASTM D2850. (2003). *ASTM D2850 Método de prueba estándar para prueba de compresión triaxial no consolidado no drenada en suelos cohesivos*.
- ASTM D2974. (2000). *Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils* 1. www.astm.org
- ASTM D4318. (2005). *ASTM D4318-05 Límites de Consistencia*. www.civilgeeks.com
- ASTM D4531-86. (1996). *ASTM D4531-86 - Método de prueba estándar para Peso Volumétrico de Masa Suelo*.
- ASTM D4546. (2008). *ASTM D4546-08 StandardTest Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D4546-08>
- ASTM D5298. (2010). *ASTM D5298-10 StandardTest Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D5298-10>
- Banerjee, S., Bir, T., Dutta, A., & Engg, M. (2022). Probabilistic Resource Recovery of Legacy Waste in Dhapa Landfill: An Approach of Bio-mining in Kolkata. In *Journal of Indian Association for Environmental Management* (Vol. 42, Issue 1). <https://www.researchgate.net/publication/361614627>
- Briaud, J.-L. (2023). *Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils* (Vol. 2).
- Budhu, M. (2011). *Soil Mechanics and Foundations* (3rd Edition).
- Campillo-Cora, C., Rodríguez-Seijo, A., Pérez-Rodríguez, P., Fernández-Calviño, D., & Santás-Miguel, V. (2025). Effect of heavy metal pollution on soil microorganisms: Influence of soil

- physicochemical properties. A systematic review. In *European Journal of Soil Biology* (Vol. 124). Elsevier Masson s.r.l. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103706>
- Cárdenas, E. (2024, January 20). *Gestión municipal e intermunicipal de los servicios públicos en Zapopan (Méjico)*.
- Chaturvedi, H., Das, P., & Kaushal, P. (2018). Comparative study of different Biological Processes for non-segregated Municipal Solid Waste (MSW) leachate treatment. *Environmental Technology and Innovation*, 9, 134–139. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.11.008>
- Chávez, W. (2011). *Tratamiento de lixiviados generados en el relleno sanitario de la Cd. de Chihuahua, Méjico*. [Investigación]. Centro de Investigación en Materiales Avanzados.
- Chen, M., Ma, L. Q., & Harris, W. G. (2002). *Arsenic Concentrations in Florida Surface Soils: Influence of Soil Type and Properties*.
- Chu, Y., Liu, S., Wang, F., Bian, H., & Cai, G. (2018). Electric conductance response on engineering properties of heavy metal polluted soils. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 5552–5560. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.08.046>
- Chu, Y., Liu, S., Wang, F., Cai, G., & Bian, H. (2017). Estimation of heavy metal-contaminated soils' mechanical characteristics using electrical resistivity. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(15), 13561–13575. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8718-x>
- Clemente, E., Domingues, E., Quinta-Ferreira, R. M., Leitão, A., & Martins, R. C. (2024). European and African landfilling practices: an overview on MSW management, leachate characterization and treatment technologies. *Journal of Water Process Engineering*, 66. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105931>
- Cortinas, C., Ordaz, Y., Jiménez, I., Medina, A., Aguirre, I., & Cebrián, A. (1999). *Minimización y Manejo Ambiental de los Residuos Sólidos*.
- Das, B. M. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones Séptima edición* (Séptima Edición). Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.
- Das, B. M. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica Cuarta edición* (Cuarta Edición). Cengage Learning Editores S.A.de C.V.
- Devahi, P., Rathod, D., & Muthukkumaran, K. (2024). Correction to: Sustainable reuse potential of landfill mining waste retrieved from urban mining sites in South India (*Journal of Material Cycles and Waste Management*, (2022), 24, 6, (2582-2597), 10.1007/s10163-022-01506-6). In *Journal of Material Cycles and Waste Management* (Vol. 26, Issue 4, p. 2599). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10163-024-01979-7>
- Diana Ibarra Rodríguez, I. P. H. R. J. B. V. F. (2015). *TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS PROVENIENTES DE RESIDUOS DE MANEJO ESPECIAL APlicando LA BIOrREMEDIACIÓN* [INVESTIGACIÓN]. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT.
- Entwistle, J. A., Hursthouse, A. S., Marinho Reis, P. A., & Stewart, A. G. (2019). Metalliferous Mine Dust: Human Health Impacts and the Potential Determinants of Disease in Mining

Communities. *Current Pollution Reports*, 5(3), 67–83. <https://doi.org/10.1007/s40726-019-00108-5>

Eslami, E., & Joodat, S. H. S. (2018). *Bioremediation of oil and heavy metal contaminated soil in construction sites: a case study of using bioventing-biosparging and phytoextraction techniques*. <http://arxiv.org/abs/1806.03717>

García, C. (2024). *Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde*.

García-Ramírez, P., & Hernández-Mendoza, C.-E. (2019). *the Creative Commons Attribution Non-Commercial License 4.0 (CC BY-NC 4.0)*. <https://doi.org/10.3233/STAL190312>

Gaxiola Gómez, S. A., Hernández-Mendoza, C. E., Rojas González, E., Alegría, O. C., De La Luz, M., & Rea, P. (2019). *Modificación de las propiedades geotécnicas de un suelo fino debido a su contaminación con dos aguas residuales*. <https://doi.org/10.3233/STAL190313>

Gil, S. A. V., Marulanda, J. J. P., & Aranzales, J. R. M. (2024). Electron microscopy and X-ray diffraction analysis of equine enteroliths from the Aburrá Valley in Antioquia, Colombia. *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias*, 15(2), 302–309. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v15i2.6584>

Gonzales Sullcaray, E. S. S. D. E. (2021). *Tipos de Biosorbente de Metales Pesados de lixiviados en un vertedero: Revisión Sistemática [Investigación]*. Universidad César Vallejo.

Gónzalez, Luis. (2002). *Ingeniería Geológica* (Vol. 1).

Gyabaah, D., Awuah, E., Kuffour, R. A., Antwi-Agyei, P., Wiafe, S., & Asiedu, S. B. (2024). Assessment of dumpsites leachate, geotechnical properties of the soil, and their impacts on surface and groundwater quality of Sunyani, Ghana. *Environmental Advances*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100548>

Hussein, M., Yoneda, K., Mohd-Zaki, Z., Amir, A., & Othman, N. (2021). Heavy metals in leachate, impacted soils and natural soils of different landfills in Malaysia: An alarming threat. *Chemosphere*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128874>

Ignacio, J., Castaño, T., Luis, J., Moret, J., Pratim, P., & València, D. (2024). *ADVANCED ELECTRON DIFFRACTION TECHNIQUES FOR STRUCTURAL ELUCIDATION OF MICROPOROUS MATERIALS PhD DEGREE ON SUSTAINABLE CHEMISTRY*.

Igwegbe, C. A., López-Maldonado, E. A., Landázuri, A. C., Ovuoraye, P. E., Ogbu, A. I., Vela-García, N., & Białowiec, A. (2024a). Sustainable municipal landfill leachate management: Current practices, challenges, and future directions. In *Desalination and Water Treatment* (Vol. 320). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100709>

Igwegbe, C. A., López-Maldonado, E. A., Landázuri, A. C., Ovuoraye, P. E., Ogbu, A. I., Vela-García, N., & Białowiec, A. (2024b). Sustainable municipal landfill leachate management: Current practices, challenges, and future directions. In *Desalination and Water Treatment* (Vol. 320). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100709>

- Jaffar, S. T. A., Chen, X., Bao, X., Raja, M. N. A., Abdoun, T., & El-Sekelly, W. (2024). Data-driven intelligent modeling of unconfined compressive strength of heavy metal-contaminated soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.05.025>
- Juárez, E., & Rico, A. (2005). *Mecánica de Suelos* (Vol. 1).
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Raúl Blas-Sevillano, ;, & Bello-Amez, S. (n.d.). *LA MATERIA ORGÁNICA, IMPORTANCIA Y EXPERIENCIAS DE SU USO EN LA AGRICULTURA*.
- Karkush, M. O., Zaboon, A. T., & Hussien, H. M. (2013). Studying the effects of contamination on the geotechnical properties of clayey soil. *Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics: From Theoretical and Experimental Research to Practical Applications - Proceedings of the International Symposium, ISSMGE TC 215*, 599–607. <https://doi.org/10.1201/b15004-80>
- Karthika, T., Arumugam, K., Sangeetha, R. K., & Rajesh Kumar, A. (2022). Effects on geotechnical properties of soil by leachate in landfill vicinity: Cauvery River, Pallipalayam, India. *Materials Today: Proceedings*, 59, 764–768. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.577>
- Khan, S., Anjum, R., Raza, S. T., Ahmed Bazai, N., & Ihtisham, M. (2022). Technologies for municipal solid waste management: Current status, challenges, and future perspectives. *Chemosphere*, 288, 132403. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132403>
- Li, J. shan, Xue, Q., Wang, P., & Li, Z. ze. (2015). Effect of lead (II) on the mechanical behavior and microstructure development of a Chinese clay. *Applied Clay Science*, 105–106, 192–199. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.12.030>
- Lindamulla, L., Nanayakkara, N., Othman, M., Jinadasa, S., Herath, G., & Jegatheesan, V. (2022). Municipal Solid Waste Landfill Leachate Characteristics and Their Treatment Options in Tropical Countries. In *Current Pollution Reports* (Vol. 8, Issue 3, pp. 273–287). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s40726-022-00222-x>
- Liu, J., Liu, Y., & Wang, X. (2020). An environmental assessment model of construction and demolition waste based on system dynamics: a case study in Guangzhou. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(30), 37237–37259. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07107-5>
- Liu, L., Li, W., Song, W., & Guo, M. (2018). Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of The Total Environment*, 633, 206–219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161>
- Masi, S., Caniani, D., Grieco, E., Lioi, D. S., & Mancini, I. M. (2014). Assessment of the possible reuse of MSW coming from landfill mining of old open dumpsites. *Waste Management*, 34(3), 702–710. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.12.013>
- Mendoza-Burguete, Y., de la Luz Pérez-Rea, M., Ledesma-García, J., Campos-Guillén, J., Ramos-López, M. A., Guzmán, C., & Rodríguez-Morales, J. A. (2023). Global Situation of Bioremediation of Leachate-Contaminated Soils by Treatment with Microorganisms: A

Systematic Review. *Microorganisms*, 11(4), 857.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms11040857>

Mitchel, J. (1976). *Fundamentals Of Soil Behavior* (W. Lambe & R. Whitman, Eds.). John Wiley & Sons, Inc.

Moghal, A. A. B., Ashfaq, M., Al-Shamrani, M. A., & Al-Mahbashi, A. (2020). Effect of Heavy Metal Contamination on the Compressibility and Strength Characteristics of Chemically Modified Semiarid Soils. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 24(4).
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)hz.2153-5515.0000527](https://doi.org/10.1061/(asce)hz.2153-5515.0000527)

Norma Oficial Mexicana. (2002). *NOM-021-RECNAT-2000*.

Orellana, R., Cumsille, A., Piña-Gangas, P., Rojas, C., Arancibia, A., Donghi, S., Stuardo, C., Cabrera, P., Arancibia, G., Cárdenas, F., Salazar, F., González, M., Santis, P., Abarca-Hurtado, J., Mejías, M., & Seeger, M. (2022). Economic Evaluation of Bioremediation of Hydrocarbon-Contaminated Urban Soils in Chile. *Sustainability (Switzerland)*, 14(19).
<https://doi.org/10.3390/su141911854>

Osorio, N. W. (2012). pH DEL SUELO Y DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES. *Manejo Integral Del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4).

Ospanbayeva, A., & Wang, S. (2020). Cost-benefit analysis of rehabilitating old landfills: A case of Beiyangqiao landfill, Wuhan, China. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 70(5), 522–531. <https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1744488>

Oztoprak, S., & Pisirici, B. (2011). Effects of micro structure changes on the macro behaviour of Istanbul (Turkey) clays exposed to landfill leachate. *Engineering Geology*, 121(3–4), 110–122.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.05.005>

Pande, V., Pandey, S. C., Sati, D., Pande, V., & Samant, M. (2020). Bioremediation: an emerging effective approach towards environment restoration. *Environmental Sustainability*, 3(1), 91–103. <https://doi.org/10.1007/s42398-020-00099-w>

Podlasek, A., Vaverková, M. D., Koda, E., Jakimiuk, A., & Martínez Barroso, P. (2023). Characteristics and pollution potential of leachate from municipal solid waste landfills: Practical examples from Poland and the Czech Republic and a comprehensive evaluation in a global context. *Journal of Environmental Management*, 332. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117328>

Ramírez, A. Q., González, Y. V., & Valencia, L. A. L. (2017). Effect of solid wastes leachates on a tropical soil. *DYNA (Colombia)*, 84(203), 283–290.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v84n203.63875>

Rehman, K., Fatima, F., Waheed, I., & Akash, M. S. H. (2018). Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences. *Journal of Cellular Biochemistry*, 119(1), 157–184. <https://doi.org/10.1002/jcb.26234>

Robles-Martínez, F., Morales-López, Y., Piña-Guzmán, A., Espíndola-Serafín, O., Tovar-Gálvez, L., Valencia-del Toro, G., Acueducto de Guadalupe, A. S., La Laguna Ticomán, B., Gustavo Madero, D. A., & froblesm, M. D. (n.d.). *Measurement of pH and heavy metals quantification*

in leachates from the biggest landfill of the metropolitan area of Mexico City.
www.ujat.mx/publicaciones/uciencia

- Rojas, E., Chávez, O., & Pérez, L. (2020). *GEOTECHNICAL ENGINEERING I: AN INTRODUCTION TO GEOTECHNICS* (Diseño Editorial, Ed.; 1st ed.). Universidad Autónoma de Querétaro.
- Salimnezhad, A., Soltani-Jigheh, H., & Soorki, A. A. (2021). Effects of oil contamination and bioremediation on geotechnical properties of highly plastic clayey soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(3), 653–670.
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.011>
- Sánchez, T. (2024). El destino de la basura: una mirada a sus impactos. *Revista Espacio I+D Innovación Más Desarrollo*, 14(39), 49–63. <https://doi.org/10.31644/IMASD.39.2025.a03>
- Sánchez-Muñoz, M. del P., Cruz-Cerón, J. G., & Maldonado-Espinel, P. C. (2020). Gestión de residuos sólidos urbanos en América Latina: un análisis desde la perspectiva de la generación. *Revista Finanzas y Política Económica*, 11(2), 321–336.
<https://doi.org/10.14718/revfinanzpolitecon.2019.11.2.6>
- Smith, J. A., Bartelt-Hunt, S. L., & Burns, S. E. (2002). *Sorption and permeability of gasoline hydrocarbons in organobentonite porous media*.
- Sobieraj, J., & Metelski, D. (2025). Analysis of Technologies for the Reclamation of Illegal Landfills: A Case Study of the Relocation and Management of Chromium and Arsenic Contamination in Łomianki (Poland). *Sustainability*, 17(7), 2796. <https://doi.org/10.3390/su17072796>
- Solano Martínez, M. F. V. (2021). Creciente sobreoferta de vivienda en la Zona Metropolitana de Querétaro. *UVserva*, 11, 124–145. <https://doi.org/10.25009/uvs.v0i11.2773>
- Song, Y., Liu, W., Li, J., Chen, Y., Cheng, J., Zhang, J., & Zheng, J. (2024). Mechanical properties and stability of zinc-contaminated red clay cured by MICP synergistically activated MgO. *Biogeotechnics*, 100132. <https://doi.org/10.1016/j.bgttech.2024.100132>
- Tchobanoglous, G. (2002). *Handbook of Solid Waste Management*.
- Tello, P., Campani, D., & Sarafian, D. (2018). *Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos*. Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Xing, Y., Zheng, Y., & Wang, X. (2025). Integrated strategies for effective remediation of chromium-contaminated soils: Advancements, challenges, and sustainability implications. In *Environmental Advances* (Vol. 19). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.envadv.2025.100614>
- Yessenia Cabello Suárez, L. (n.d.). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE CURVAS DE RETENCIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON GASOLINA Y DIÉSEL*.
- Zegzouti, Y., Boutafda, A., Fels, L. El, Hadek, M. El, Ndoye, F., Mbaye, N., Kouisni, L., & Hafidi, M. (2019). Screening and selection of autochthonous fungi from leachate contaminated-soil for bioremediation of different types of leachate. *Environmental Engineering Research*, 25(5), 722–734. <https://doi.org/10.4491/eer.2019.317>

17. APENDICE PROPIEDADES DEL SUELO CONTROL

17.1. Humedad natural.

Tabla 17. Contenido de humedad natural.

$W_f(g)$	$W_f + W_{sh}(g)$	$W_{sh}(g)$	$W_f + W_{ss}(g)$	$W_{ss}(g)$	$W_a(g)$	$w\%$
126.7	181.6	54.9	178.2	46.92	7.98	17

17.2. Gravedad específica

17.2.1. Curva de calibración

Tabla 18. Calibración de matraz para prueba de peso específico de sólidos.

Peso (g)	651.9	652.4	652.5	652.7	652.8	652.9
Temp (°C)	47	34	31	27	24	20

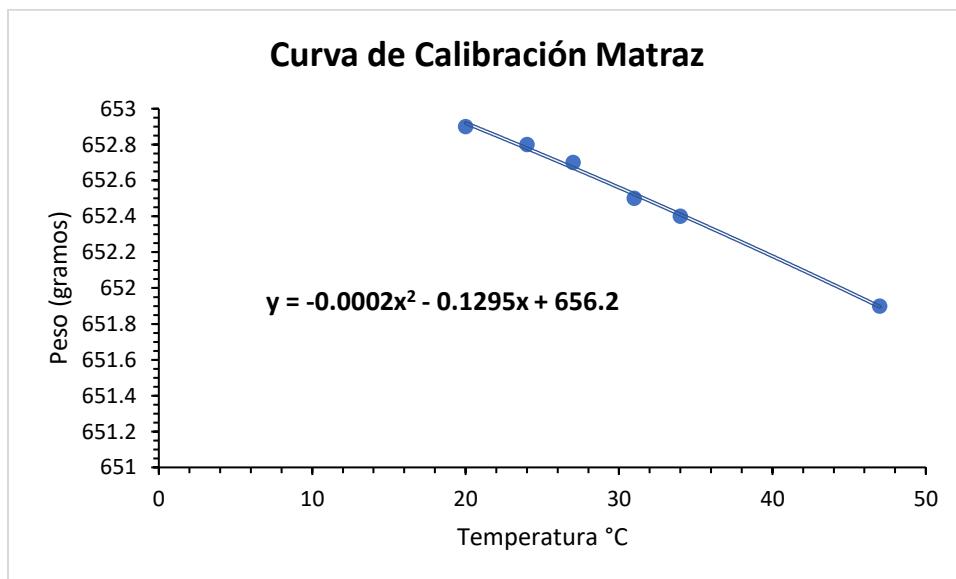


Figura 44. Curva de calibración de matraz para prueba de peso específico relativo de sólidos.

Tabla 19. Peso relativo de sólidos.

Temperatura de ensayo	°C	T_t	34
Masa (matraz+agua+suelo)	g	$M_{pws,t}$	680.9
Masa (suelo seco)	g	M_s	50
Masa (agua en el matraz a t °C)	g	$M_{pw,t}$	651.4
Gravedad específica a t °C	--	G_t	2.4390
Coeficiente de temperatura a t°C	--	k	0.9991
GS a 34°C	--	$G_{1@34°C}$ = (K * G _t)	2.4368
	-		

17.3. Relaciones volumétricas y gravimétricas.

Tabla 20. Relaciones volumétricas y gravimétricas.

γ_m	gr/cm^3	1.056
γ_d	gr/cm^3	0.090
e	---	1.7019
w	%	17.00
n	%	62.99
G_w	%	24.36
γ_0	gr/cm^3	1.00
G_s	gr/cm^3	2.44

	Volúmenes cm ³		Pesos gr	
	V _a 50.93	V _w 16.41	W _a 0	W _m 112.90
V _m 106.90	V _v 67.33		V _w 16.41	W _w 16.41
		V _s 39.56		W _s 96.49

Figura 45. Diagrama de relaciones gravimétricas y volumétricas de suelo control.

17.4. Humedad óptima.

Tabla 21. Dimensiones de molde proctor estándar.

Diámetro (cm)	10.17
Altura (cm)	12
Volumen (cm ³)	974.79
Peso de cilindro (gr)	3750

Tabla 22. Resultados proctor estándar suelo control.

Muestra	W _m +Molde (gr)	W _m (gr)	$\gamma_m (\frac{gr}{cm^3})$	W _f (gr)	W _h +W _f (gr)	W _h (gr)	W _s +W _f (gr)	W _s (gr)	$\omega (%)$	γ_d
1	5000	1250	1.28	120.8	164.3	43.5	162.2	41.4	5	1.22
2	5190	1440	1.48	125.9	171.7	45.8	165.2	39.3	17	1.26
3	5260	1510	1.55	126.3	165.1	38.8	158.6	32.3	20	1.29
4	5330	1580	1.62	126.1	172.1	46	163.3	37.2	24	1.31
5	5430	1580	1.72	125.7	202.9	77.2	184.1	58.4	32	1.30
6	5370	1620	1.66	119.6	200.2	80.6	177.4	57.8	39	1.19

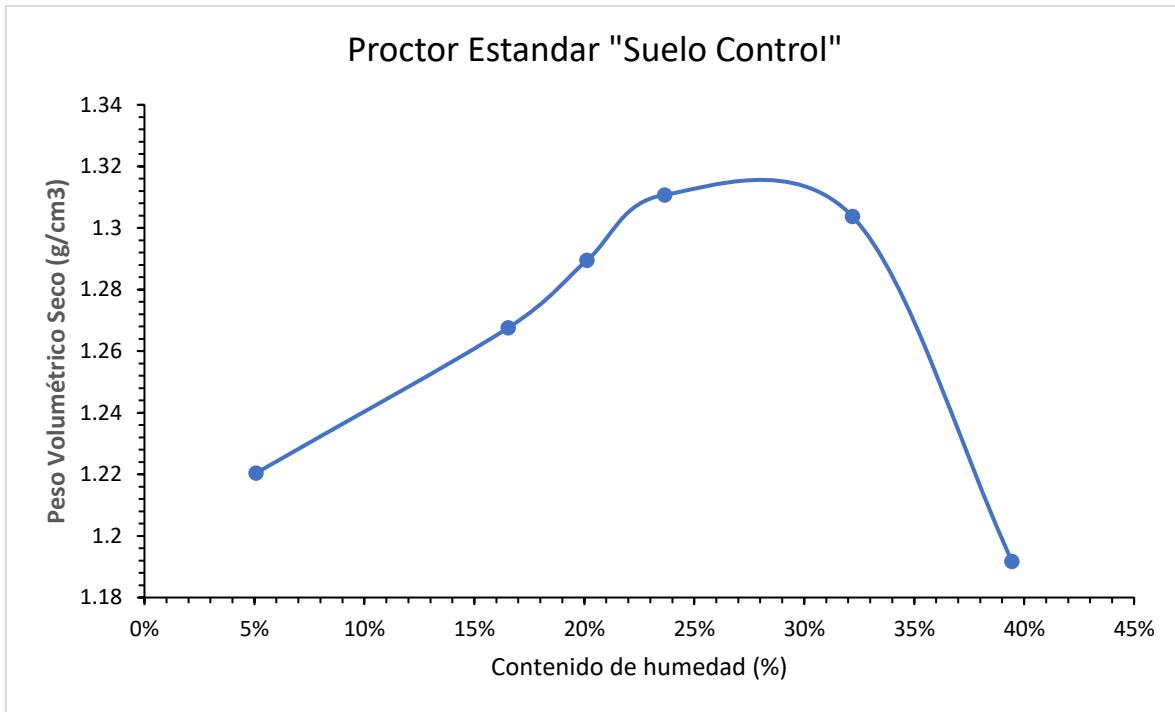


Figura 46. Curva humedad óptima Suelo Control.

17.5. Límites de consistencia.

17.5.1. Límite líquido.

Tabla 23. Límite líquido con Copa de Casagrande.

NºGolpes	Peso Flanera Wf (gr)	Wf+Wm (gr)	Wf+Ws (gr)	Wm (gr)	Ws (gr)	W%
35	53.7	74.2	68	20.5	14.3	43.36%
30	53.7	85.2	75.4	31.5	21.7	45.16%
25	44.5	81.2	69.7	36.7	25.2	45.63%
20	58.6	86.4	77.5	27.8	18.9	47.09%
15	53.6	91.6	79.3	38	25.7	47.86%

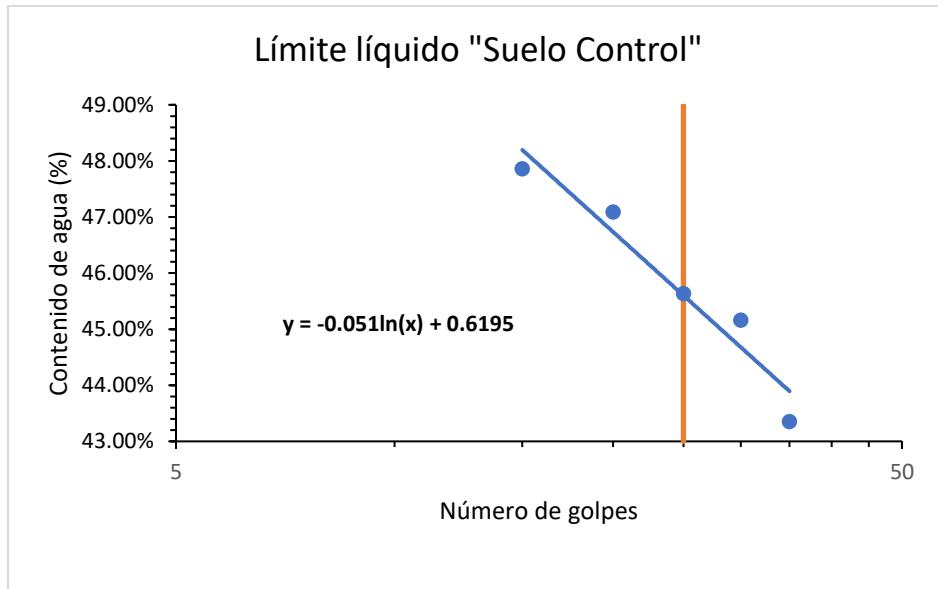


Figura 47. Límite Líquido, línea de tendencia.

17.5.2. Límite plástico.

Tabla 24. Determinación de límite plástico.

$W_{cápsula} (g)$	135.2
$W_{cápsula+suelo húmedo} (g)$	146.3
$W_{agua} (g)$	3
$W_{cápsula+suelo seco} (g)$	143.3
$W_{suelo seco} (g)$	8.1
w%	37.04

17.5.3. Contracción lineal.

Tabla 25. Determinación de Contracción Lineal.

Volumen inicial (cm^3)	66.66
Volumen final (cm^3)	51.06
Peso inicial húmedo (gramos)	77.3
Peso final seco (gramos)	53
CL (%)	16.42

17.6. Gráfica de plasticidad SUCS.

Tabla 26. Resumen de Límites de Consistencia de Suelo Control.

LL (%)	45.53
LP (%)	38.09
Ip (%)	18.72
CL (%)	16.42

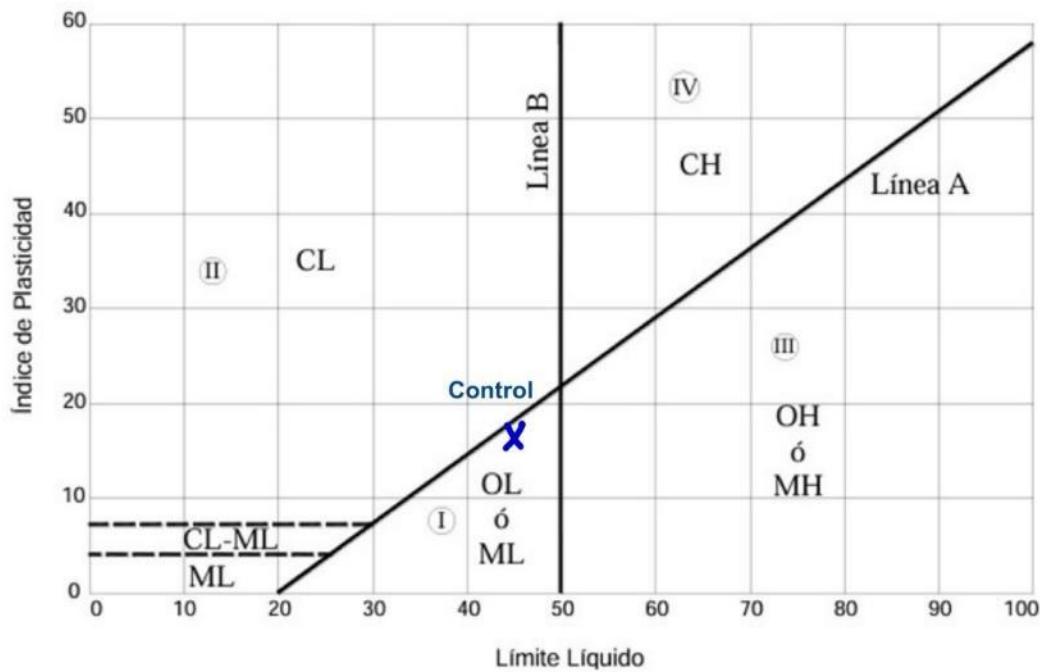


Figura 48. Carta de plasticidad de Suelo Control.

17.7. Análisis granulométrico.

Tabla 27. Análisis granulométrico Suelo Control.

Malla No.	Abertura (mm)	Retenido (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que pasa
3"	76.2	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.8	0.00	0.00	0.00	100.00
1 ½"	36.1	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
¾ "	19.1	0.00	0.00	0.00	100.00
½ "	12.7	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8 "	9.52	0.00	0.00	0.00	100.00
¼ "	6.35	0.00	0.00	0.00	100.00
No. 4	4.76	0.00	0.00	0.00	100.00
10	2	13.97	4.66	4.66	95.34
20	0.84	18.97	6.32	10.98	89.02
40	0.42	30.57	10.19	21.17	78.83
60	0.25	12.57	4.19	25.36	74.64
100	0.149	13.07	4.35	29.72	70.28
200	0.074	6.67	2.22	31.94	68.06
Pasa No. 200		204.17	68.06	100.00	65.69

Hidrómetro: 152H

Corrección por defloculante (C_d): 4.00

Volumen del hidrómetro (V_b, cm^3): 68.00

Agente dispersante: $(NaPO_3)_6$

Corrección por menisco (C_m): 1.00

Ws (gr): 50

Ss: 2.4368

a: 1.05

Tabla 28. Análisis granulométrico vía hidrómetro Suelo Control.

Tiempo (min)	T°C	R' _H	R _m	L (cm)	Ct	R _H	W _D %	L/t (cm/min)	K	D (mm)	% que pasa
0.333	19	50	45.7	6.0834	-0.3	46.7	96.52	18.2509	0.0145	0.06194	63.69
0.666	19	47	42.7	6.5156	-0.3	43.7	90.18	9.7735	0.0145	0.04533	61.38
1	19	43	38.7	7.1006	-0.3	39.7	81.73	7.1006	0.0145	0.03864	55.63
2	19	35	30.7	8.3468	-0.3	31.7	64.84	4.1734	0.0145	0.02962	44.13
3	19	32	27.7	8.7932	-0.3	28.7	58.50	2.9311	0.0145	0.02482	39.82
4	19	30	25.7	9.1226	-0.3	26.7	54.28	2.2806	0.0145	0.02189	36.94
8	19	23	18.7	10.2300	-0.3	19.7	39.49	1.2787	0.0145	0.01639	26.88
15	19	17	12.7	11.1022	-0.3	13.7	26.82	0.7401	0.0145	0.01247	18.25
30	19	14.5	10.2	11.5500	-0.3	11.2	21.54	0.3850	0.0145	0.00899	14.66
60	19	12	7.7	11.9314	-0.3	8.7	16.26	0.1988	0.0145	0.00646	11.07
120	18	10	5.5	12.2528	-0.5	6.5	11.61	0.1021	0.0148	0.00473	7.90
240	18	9.7	5.2	12.329	-0.5	6.2	10.98	0.0514	0.0148	0.00335	7.47
480	19	9.5	5.2	12.635	-0.3	6.2	10.98	0.02632	0.0145	0.00235	7.47
4320	14.5	9	3.9	12.482	-1.1	4.9	8.24	0.002889	0.0151	0.00081	5.60
8640	15	8.5	3.4	12.5584	-1.1	4.4	7.18	0.001453	0.0151	0.00057	4.89

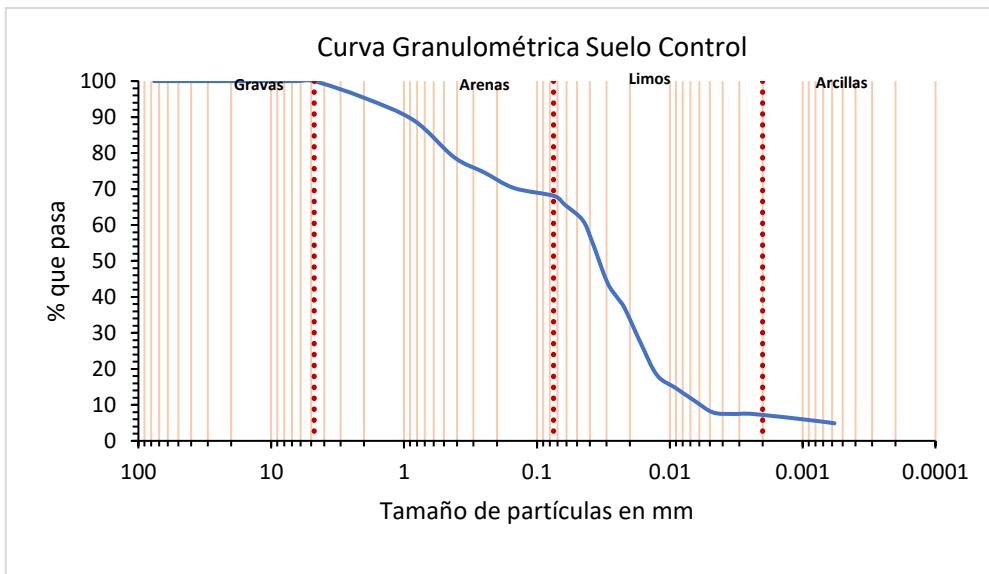


Figura 49. Curva granulométrica Suelo Control.

17.8. Materia orgánica.

Tabla 29. Determinación de Materia Orgánica en Suelo Control.

$W_{cáp} (gr)$	29.08
$W_{cáp} + W_{suelo} (gr)$	39.08
$W_{suelo} (gr)$	10
$W_{cáp} + W_{suelo seco} (gr)$	38.53
$W_{suelo seco} (gr)$	9.45
$W_{MO}(gr)$	0.55
MO %	5.5

17.9. Potencial de hidrógeno (ph).

pH= 6.9

17.10. Permeabilidad.

Tabla 30. K promedio de Suelo Control.

Experimento #	V (cm^3)	Tiempo acumulado (s)	K ($\frac{cm}{s}$)	k promedio
1	2.00	3600	1.35429E-06	4.10349E-07
2	5.00	82500	1.47741E-07	
3	7.00	183420	9.30326E-08	
4	8.00	420900	4.63335E-08	

18. APENDICE PROPIEDADES DEL SUELO CONTAMINADO

18.1. Humedad natural.

Tabla 31. Contenido de humedad natural.

$W_f (gr)$	$W_f + W_{sh} (gr)$	$W_{sh} (gr)$	$W_f + W_{ss}(gr)$	$W_{ss}(gr)$	$W_a(gr)$	$w\%$
398.9	498.9	100	480.6	81.7	18.3	22

18.2. Gravedad específica.

Tabla 32. Peso relativo de sólidos.

Temperatura de ensayo	°C	T_t	34
Masa (matraz+agua+suelo)	g	$M_{pws,t}$	680.4
Masa (suelo seco)	g	M_s	50
Masa (agua en el matraz a t °C)	g	$M_{pw,t}$	651.4
Gravedad específica a t°C	--	G_t	2.3809
	-		
Coeficiente de temperatura a t°C	--	k	0.9991
	-		
GS a 20°C	--	$G_{1@20^{\circ}C}$	2.3787
	-	= ($K * G_t$)	

18.3. Relaciones volumétricas y gravimétricas.

Tabla 33. Relaciones gravimétricas y volumétricas.

γ_m	gr/cm^3	1.16
γ_d	gr/cm^3	0.9508
e	---	1.49
w	%	22.4
n	%	59.93
G_w	%	35.62
γ_0	gr/cm^3	1.00
G_s	gr/cm^3	2.38

	Volúmenes cm ³	Pesos gr	
V_m 222.34	V_a 85.78	W_a 0	W_m 259.40
	V_v 133.25	V_w 47.47	
	V_s 89.09	W_s 211.93	

Figura 50. Diagrama de relaciones gravimétricas y volumétricas de Suelo Contaminado.

18.4. Humedad óptima.

Tabla 34. Dimensiones molde proctor estándar.

Diámetro (cm)	10.17
Altura (cm)	12
Volumen (cm ³)	974.79
Peso de cilindro (gr)	3750

Tabla 35. Resultados proctor estándar Suelo Contaminado.

Muestra	W _m +Molde (gr)	W _m (gr)	$\gamma_m \frac{gr}{cm^3}$	W _f (gr)	W _h +W _f (gr)	W _h (gr)	W _s +W _f (gr)	W _s (gr)	ω (%)	γ_d
1	5030	1280	1.31	125.3	224.8	99.5	217.9	92.6	7	1.22
2	5100	1350	1.38	126	149.1	23.1	146.7	20.7	12	1.24
3	5240	1490	1.53	126.2	184.2	58	173.8	47.6	22	1.25
4	5350	1600	1.64	121	165.1	44.1	155.2	34.2	29	1.27
5	5270	1520	1.56	119.6	171.6	52	158.9	39.3	32	1.18

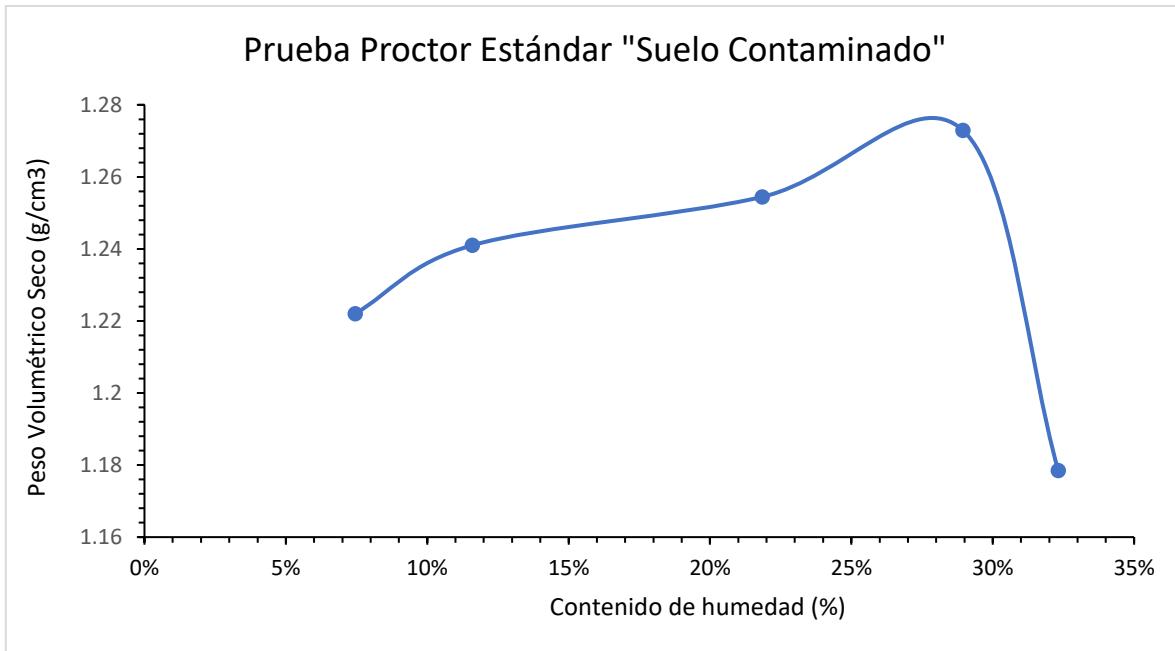


Figura 51. Curva humedad óptima Suelo Contaminado.

18.5. Límites de consistencia.

18.5.1. Límite líquido.

Tabla 36. Determinación de Límite Líquido.

Nº Golpes	Peso Flanera Wf (gr)	Wf+Wm (gr)	Wf+Ws (gr)	Wm (gr)	Ws (gr)	W%
35	53.73	78.41	70.84	24.68	17.11	44.24%
30	44.58	70.36	62.31	25.78	17.73	45.40%
25	53.8	77.42	69.97	23.62	16.17	46.07%
20	44.46	73.87	64.58	29.41	20.12	46.17%
15	53.31	86.67	76.08	33.36	22.77	46.51%

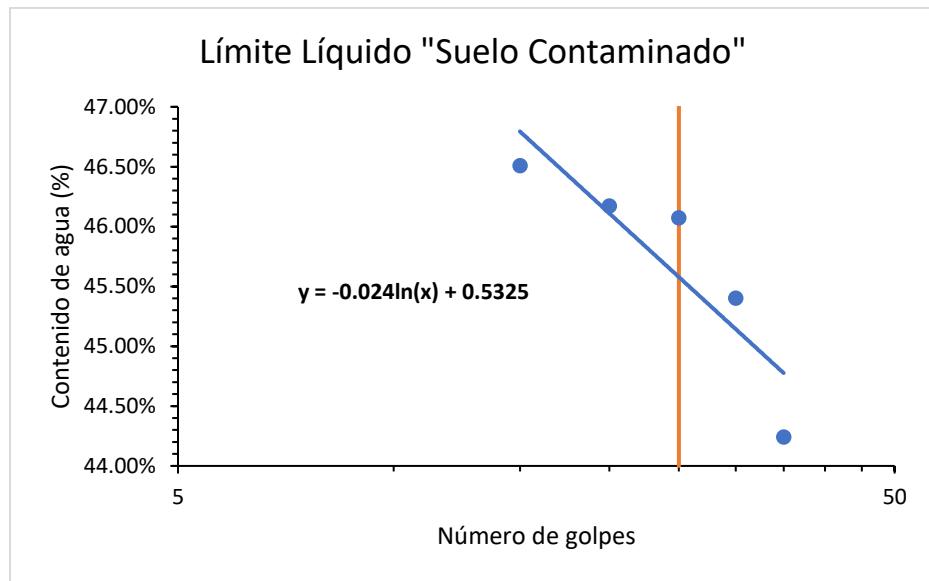


Figura 52. Límite Líquido, línea de tendencia.

18.5.2. Límite plástico.

Tabla 37. Determinación Límite Plástico.

$W_{cápsula} (g)$	135.2
$W_{cápsula+suelo húmedo} (g)$	146.8
$W_{agua} (g)$	3.2
$W_{cápsula+suelo seco} (g)$	143.6
$W_{suelo seco} (g)$	8.4
w%	38.09 %

18.5.3. Contracción lineal.

Tabla 38. Determinación de Contracción Lineal.

Volumen inicial (cm^3)	37.26
Volumen final (cm^3)	31.33
Peso inicial húmedo (gramos)	69.28
Peso final seco (gramos)	46.8
CL (%)	35.35

18.6. Gráfica de plasticidad SUCS.

Tabla 39. Resumen de Límites de Consistencia Suelo Contaminado.

LL (%)	45.5
LP (%)	38.09
Ip (%)	21.04
CL (%)	35.35

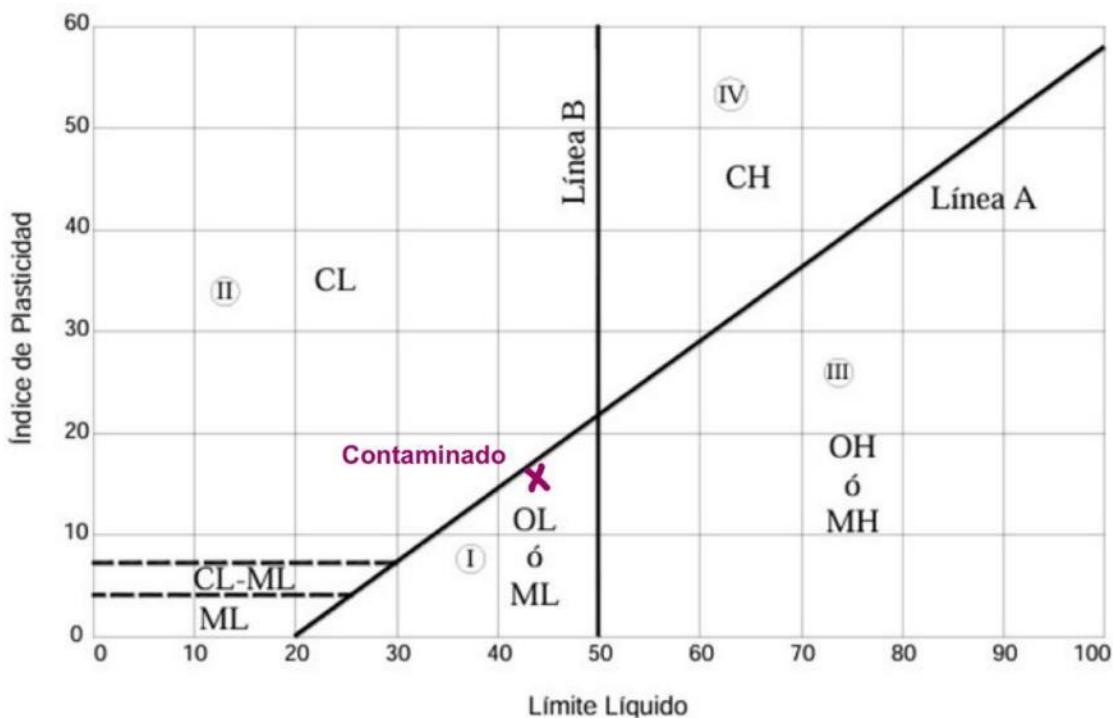


Figura 53. Carta de plasticidad Suelo Contaminado.

18.7. Análisis granulométrico.

Tabla 40. Análisis granulométrico Suelo Contaminado.

Malla No.	Abertura (mm)	Retenido (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que pasa
3"	76.2	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.8	0.00	0.00	0.00	100.00
1 ½"	36.1	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
¾ "	19.1	0.00	0.00	0.00	100.00
½ "	12.7	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8 "	9.52	0.00	0.00	0.00	100.00
¼ "	6.35	0.00	0.00	0.00	100.00
No. 4	4.76	0.00	0.00	0.00	100.00
10	2	52.67	17.56	17.56	82.44
20	0.84	28.28	9.43	26.98	73.02
40	0.42	17.38	5.79	32.78	67.22
60	0.25	7.04	2.35	35.13	64.87
100	0.149	9.55	3.18	38.31	61.69
200	0.074	10.85	3.62	41.93	58.07
Pasa No. 200		174.22	58.07	100.00	57.02

Hidrómetro: 152H

Corrección por defloculante (C_d): 4.00

Volumen del hidrómetro (V_b, cm^3): 68.00

Agente dispersante: $(NaPO_3)_6$

Corrección por menisco (C_m): 1.00

Ws (gr): 50

Ss: 2.3787

a: 1.07

Tabla 41. Análisis granulométrico vía hidrómetro Suelo Contaminado.

Tiempo (min)	T°C	R'_H	R_m	L (cm)	Ct	R_H	W_D %	L/t (cm/min)	K	D (mm)	% que pasa
0.333	19	50	45.7	6.0834	-0.3	46.7	98.18	18.2509	0.0145	0.06194	57.02
0.666	19	48	43.7	6.3716	-0.3	44.7	93.89	9.5575	0.0145	0.04482	54.52
1	19	46	41.7	6.6633	-0.3	42.7	89.59	6.6633	0.0145	0.03743	52.03
2	19	40	35.7	7.5814	-0.3	36.7	76.70	3.7907	0.0145	0.02823	44.54
3	19	35	30.7	8.3468	-0.3	31.7	65.96	2.7823	0.0145	0.02418	38.30
4	19	32	27.7	8.7932	-0.3	28.7	59.51	2.1983	0.0145	0.02149	34.56
8	19	24	19.7	10.0783	-0.3	20.7	42.32	1.2598	0.0145	0.01627	24.58
15	19	20	15.7	10.6500	-0.3	16.7	33.73	0.7100	0.0145	0.01222	19.59
30	19	15.5	11.2	11.3980	-0.3	12.2	24.06	0.3799	0.0145	0.00893	13.97
60	19	12	7.7	11.9314	-0.3	8.7	16.54	0.1988	0.0145	0.00647	9.61
120	18	10	5.5	12.2528	-0.5	6.5	11.82	0.1021	0.0148	0.00473	6.86
240	18	9.5	5.0	12.3290	-0.5	6.0	10.74	0.0514	0.0148	0.00335	6.24
480	19	9.0	4.7	12.4056	-0.3	5.7	10.09	0.02584	0.0145	0.00231	5.86
4320	19	8.5	4.2	12.4820	-0.3	5.2	9.02	0.002889	0.0145	0.00078	5.24
8640	18	8.0	3.5	12.5584	-0.5	4.5	7.52	0.001453	0.0148	0.00056	4.37

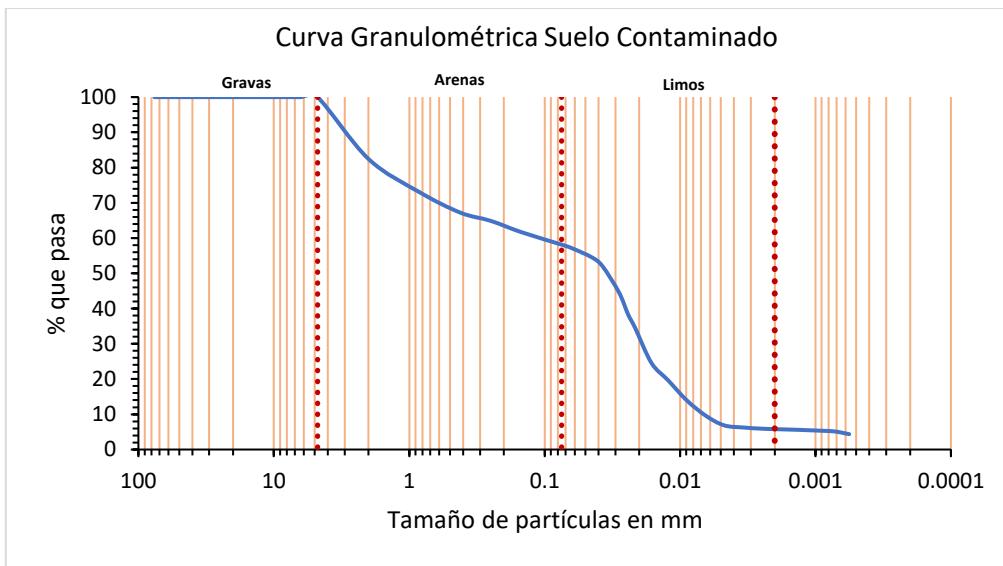


Figura 54. Curva granulométrica Suelo Contaminado.

18.8. Materia orgánica.

Tabla 42. Determinación de Materia Orgánica en Suelo Contaminado.

$W_{cáp} (gr)$	45.07
$W_{cáp} + W_{suelo} (gr)$	55.07
$W_{suelo} (gr)$	10
$W_{cáp} + W_{suelo seco} (gr)$	54.43
$W_{suelo seco} (gr)$	9.36
$W_{MO}(gr)$	0.64
MO %	6.4

18.9. Potencial de hidrógeno (ph).

pH= 6.8

18.10. Permeabilidad.

Tabla 43. k promedio Suelo Contaminado.

Experimento #	V (cm^3)	Tiempo acumulado (s)	K ($\frac{cm}{s}$)	k promedio
1	2.00	6840	7.12784 E-07	2.47309E-07
2	5.00	93240	1.30723E-07	
3	6.00	179460	8.15018E-08	
4	7.00	265680	6.42278E-08	

19. APENDICE DETERMINACIÓN DE CURVA DE RETENCIÓN AGUA-SUELO MEDIANTE SUCCIÓN DEL PAPEL FILTRO

19.1. Calibración de papel filtro whatman no. 50.

Tabla 44. Concentración de la solución salina para calibración del papel filtro.

Succión kPa	Log kPa	pF	atm	R_h	20 °C	
					gNaCl	Gkci
					En 1000 ml de agua	En 1000 ml de agua
-98	1.99	3.0	-0.97	0.99927	1.3	1.7
-310	2.49	3.5	-3.02	0.99774	3.8	5.3
-980	2.99	4.0	-9.68	0.99278	13.1	17.0
-3099	3.49	4.5	-30.19	0.97764	39.0	52.7
-9800	3.99	5.0	-96.77	0.93008	122.5	165.0

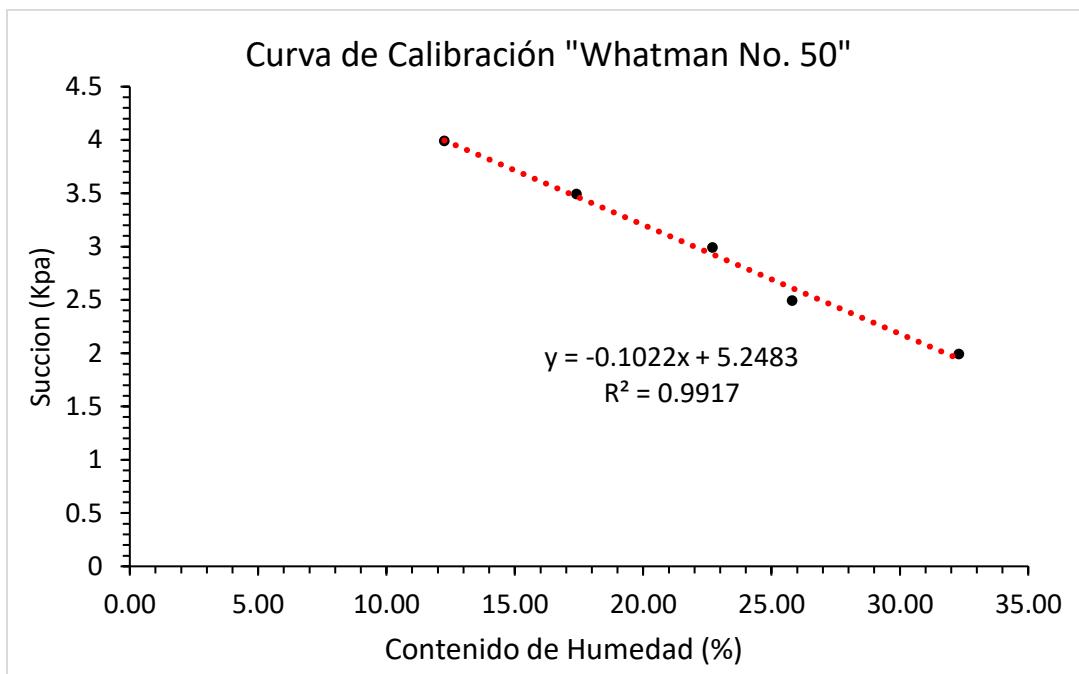


Figura 55. Curva de calibración de papel filtro Whatman No. 50.

19.2. Suelo control preparación de muestras para medición de succión por el método de papel filtro.

Tabla 45. Trayectoria de humedecimiento de suelo control.

Muestra	Sw %	Wpfs (gr)	Wpfh (gr)	ω pf %	Succión Log kpa	Matricial Kpa
Gw0	0	0.2161	0.2271	5.090236	4.72807788	53466.023
Gw10	10	0.2238	0.2457	9.78552279	4.24821957	17710.0412
Gw20	20	0.2224	0.2542	14.2985612	3.78698705	6123.32133
Gw30	30	0.2257	0.2733	21.0899424	3.09290789	1238.53387
Gw40	40	0.2210	0.2874	30.0452489	2.17767557	150.548199
Gw50	50	0.2211	0.2970	34.3283582	1.73994179	54.9467223
Gw60	60	0.2232	0.3490	56.3620072	-0.5118971	0.30768255
Gw70	70	0.2224	0.3672	65.1079137	-1.4057287	0.03928902
Gw80	80	0.2235	0.3982	78.1665481	-2.7402190	0.01
Gw90	90	0.2239	0.4290	91.6033944	-4.1135669	0.01
Gw100	100	0.2216	0.4620	108.483755	-5.8387397	0.01

Tabla 46. Trayectoria de secado de suelo control.

Muestra	Sw %	Wpfs (gr)	Wpfh (gr)	ω pf %	Succión Log kpa	Matricial Kpa
Gw0	0	0.2147	0.2257	5.12342804	4.72468565	53050.0325
Gw10	10	0.2215	0.2382	7.53950339	4.47776275	30044.3459
Gw20	20	0.2274	0.2514	10.5540897	4.16967203	14779.9182
Gw30	30	0.2233	0.2653	18.8087774	3.326404295	2118.57063
Gw40	40	0.2190	0.2755	25.7990868	2.61163333	408.915274
Gw50	50	0.2197	0.2905	32.2257624	1.95482708	90.1212242
Gw60	60	0.2228	0.3382	51.7953321	-0.04518294	0.90119144
Gw70	70	0.2170	0.3554	63.7788018	-1.26989355	0.05371634
Gw80	80	0.2244	0.4119	83.5561497	-3.2911385	0.01
Gw90	90	0.2208	0.4402	99.365942	-4.90689928	0.01
Gw100	100	0.2219	0.4815	116.989635	-6.70804069	0.01

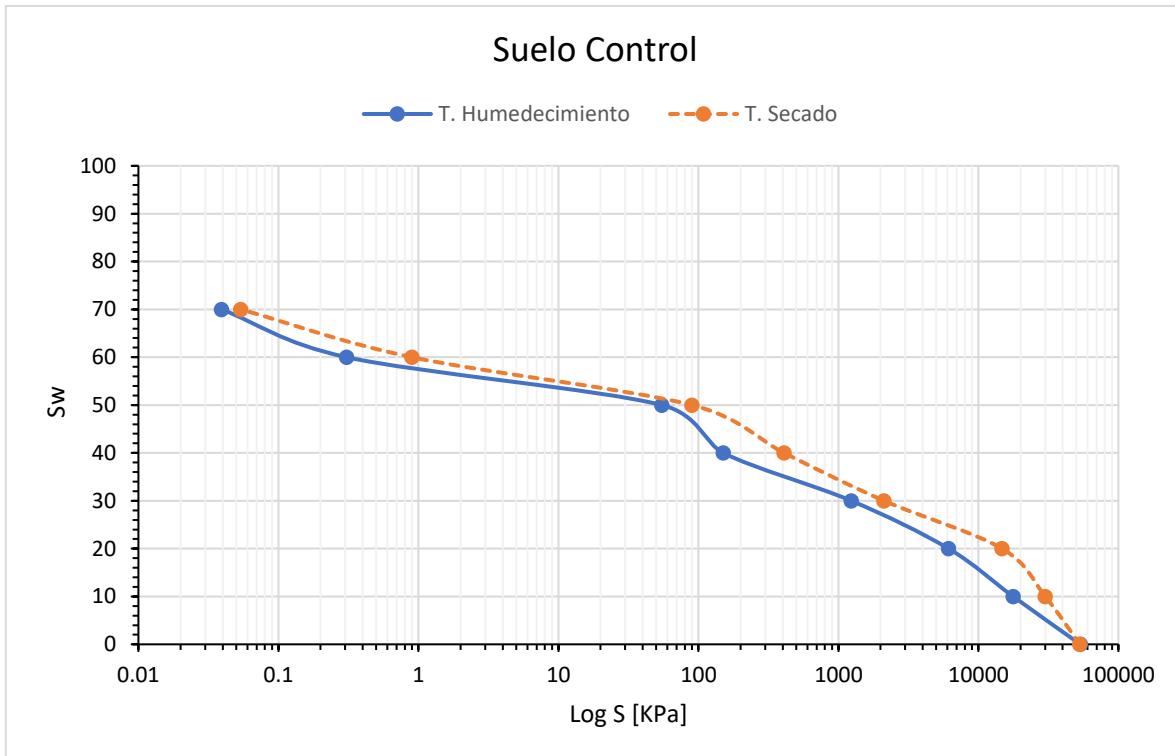


Tabla 47. Curva de retención agua-suelo control.

19.3. Suelo contaminado preparación de muestras para medición de succión por el método de papel filtro.

Tabla 48. Trayectoria de humedecimiento de suelo contaminado.

Muestra	Sw %	Wpfs (gr)	Wpfh (gr)	ω pf %	Succión Log kpa	Matricial Kpa
Gw0	0	0.2214	0.2310	4.3360434	4.8051564	63849.334
Gw10	10	0.2197	0.2400	9.2398726	4.303985	20136.548
Gw20	20	0.2185	0.2482	13.592677	3.8591284	7229.8348
Gw30	30	0.2204	0.2685	21.823956	3.0178917	1042.0574
Gw40	40	0.2225	0.2814	26.47191	2.5428708	349.03645
Gw50	50	0.2230	0.3022	35.515695	1.618596	41.552386
Gw60	60	0.2217	0.3417	54.127199	-0.2834997	0.5205953
Gw70	70	0.2189	0.3582	63.636364	-1.2553364	0.0555474
Gw80	80	0.2208	0.3982	80.344203	-2.9628775	0.01
Gw90	90	0.2242	0.4293	91.480821	-4.1010399	0.01
Gw100	100	0.2209	0.4682	111.95111	-6.1931033	0.01

Tabla 49. Trayectoria de secado de suelo contaminado.

Muestra	Sw %	Wpfs (gr)	Wpfh (gr)	$\omega_{pf} \%$	Succión Log kpa	Matricial Kpa
Gw0	0	0.2147	0.2241	4.3782021	4.8008477	63219.017
Gw10	10	0.2215	0.2366	6.8171558	4.5515867	35611.206
Gw20	20	0.2274	0.2536	11.521548	4.0707978	11770.578
Gw30	30	0.2233	0.2615	17.107031	3.4999614	3161.9969
Gw40	40	0.2190	0.2736	24.931507	2.7003	501.53356
Gw50	50	0.2197	0.2922	32.999545	1.8757465	75.118433
Gw60	60	0.2228	0.3354	50.5386	0.0832551	1.2113095
Gw70	70	0.2170	0.3490	60.829493	-0.9684742	0.107529
Gw80	80	0.2244	0.4012	78.787879	-2.8038212	0.01
Gw90	90	0.2208	0.4393	98.958333	-4.8652417	0.01
Gw100	100	0.2219	0.4913	121.40604	-7.1593972	0.01

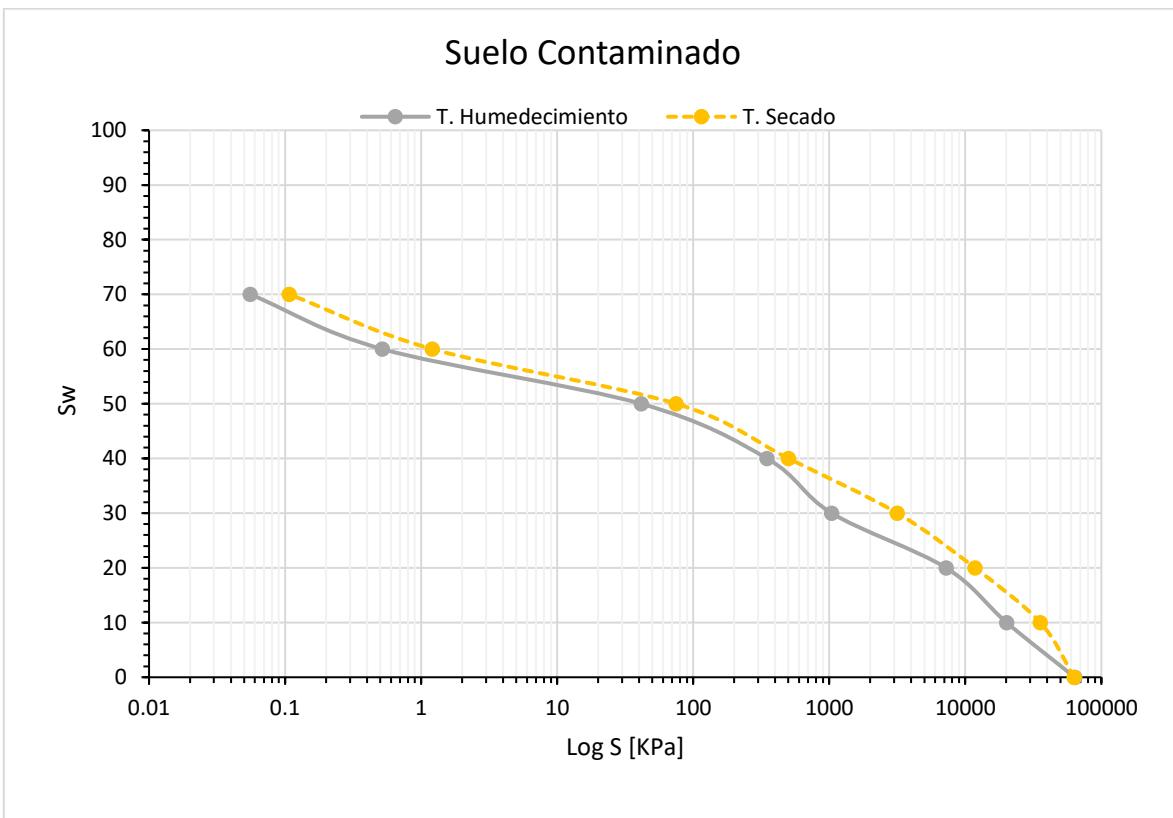


Figura 56. Curva retención agua-suelo contaminado.

20. APENDICE DE PRUEBAS TRIAXIALES NO CONSOLIDADA NO DRENADA

20.1. Pruebas suelo control.

Tabla 50. Prueba triaxial UU Suelo Control.

Parámetro	Unidad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
σ_1	Ton/m ²	21.86	42.14	52.62
σ_3	Ton/m ²	5	10	20

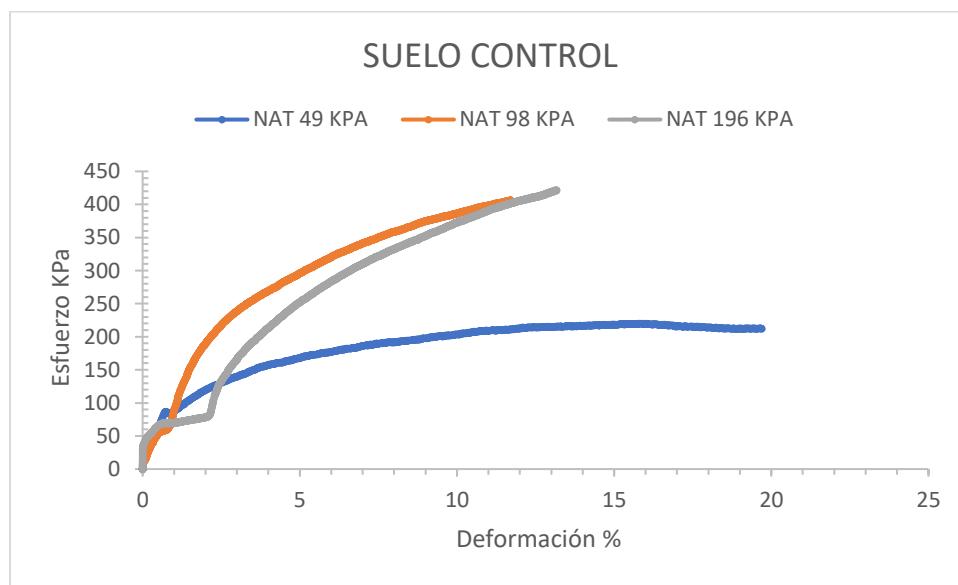


Figura 57. Gráfica esfuerzo-deformación Suelo Control.

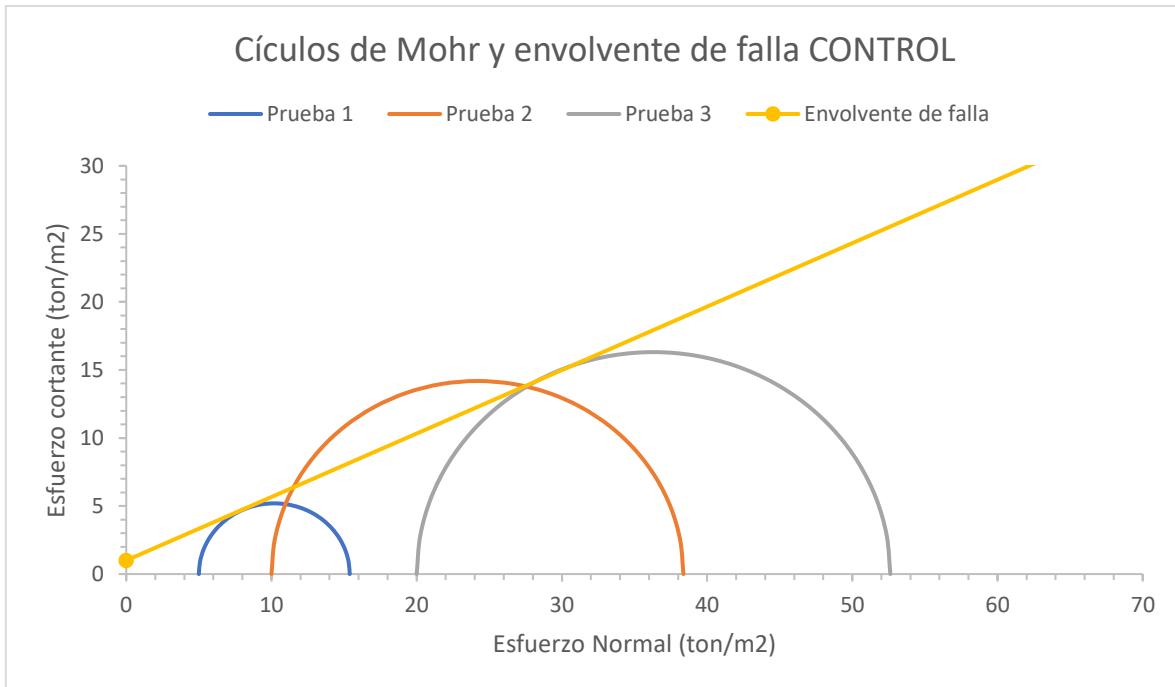


Figura 58. Círculos de mohr y envolvente de falla Suelo Control.

20.2. Pruebas suelo contaminado.

Tabla 51. Prueba triaxial UU Suelo Contaminado.

Parámetro	Unidad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
σ_1	Ton/m ²	15.39	38.37	62.3
σ_3	Ton/m ²	5	10	20

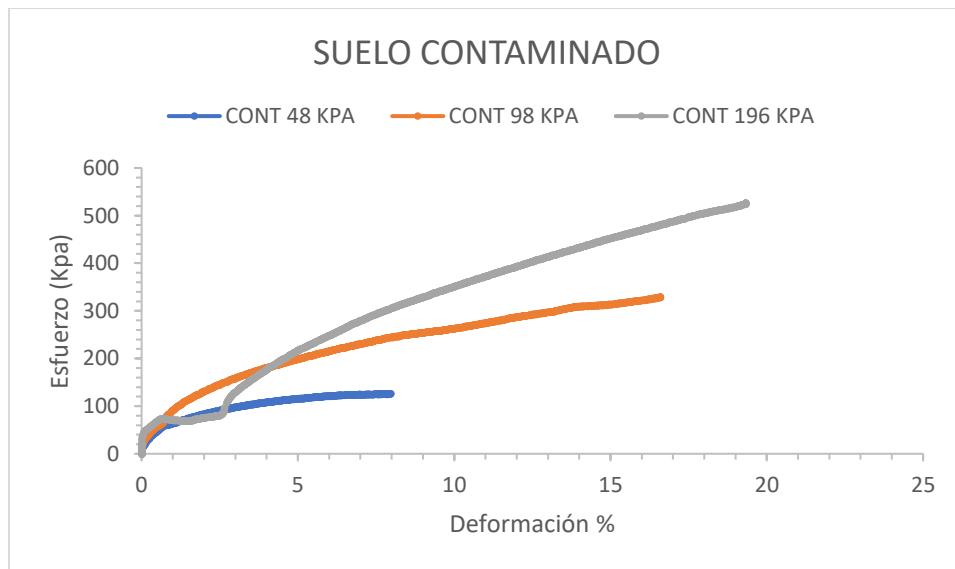


Figura 59. Gráfica esfuerzo-deformación Suelo Contaminado.

Círculos de Mohr y envolvente de falla CONTAMINADO

Prueba 1 Prueba 2 Prueba 3 Envolvente de falla

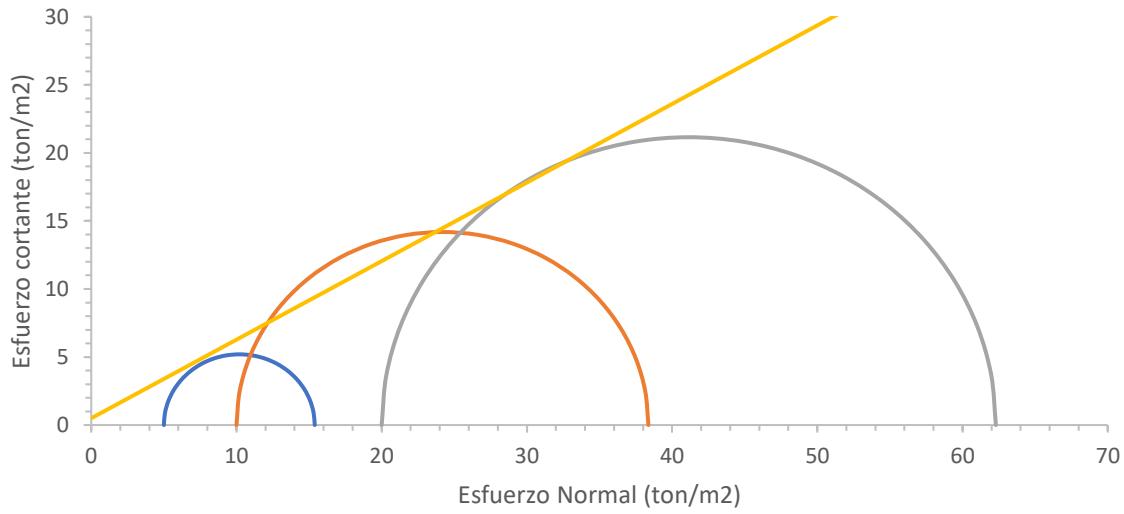


Figura 60. Círculos de mohr y envolvente de falla Suelo Contaminado.

21. APENDICE DE PRUEBAS DE CONSOLIDACIÓN

21.1. Suelo control.

Tabla 52. Datos Suelo Control.

W_m (gr)	116.5	V_a (cm ³)	29.25
W_s (gr)	93.2	H_0 (cm)	1.9600
W_w (gr)	23.30	H_s (cm)	0.8256
V_m (cm ³)	90.7964	A_{sup} (cm ²)	46.3247
V_s (cm ³)	38.25	e_0	1.3739
V_w (cm ³)	23.30	Sw_0 (%)	44.34

Tabla 53. Consolidación Suelo Control.

Etapa	Presión aplicada KPa	e_f
Inicio	0.20	1.3739
Saturación	0.20	1.4343
Carga 1	0.53	1.4275
Carga 2	2.13	1.4208
Carga 3	4.25	1.4122
Carga 4	8.50	1.3873
Carga 5	17.00	1.3596
Carga 6	34.00	1.3457
Carga 7	17.00	1.3545

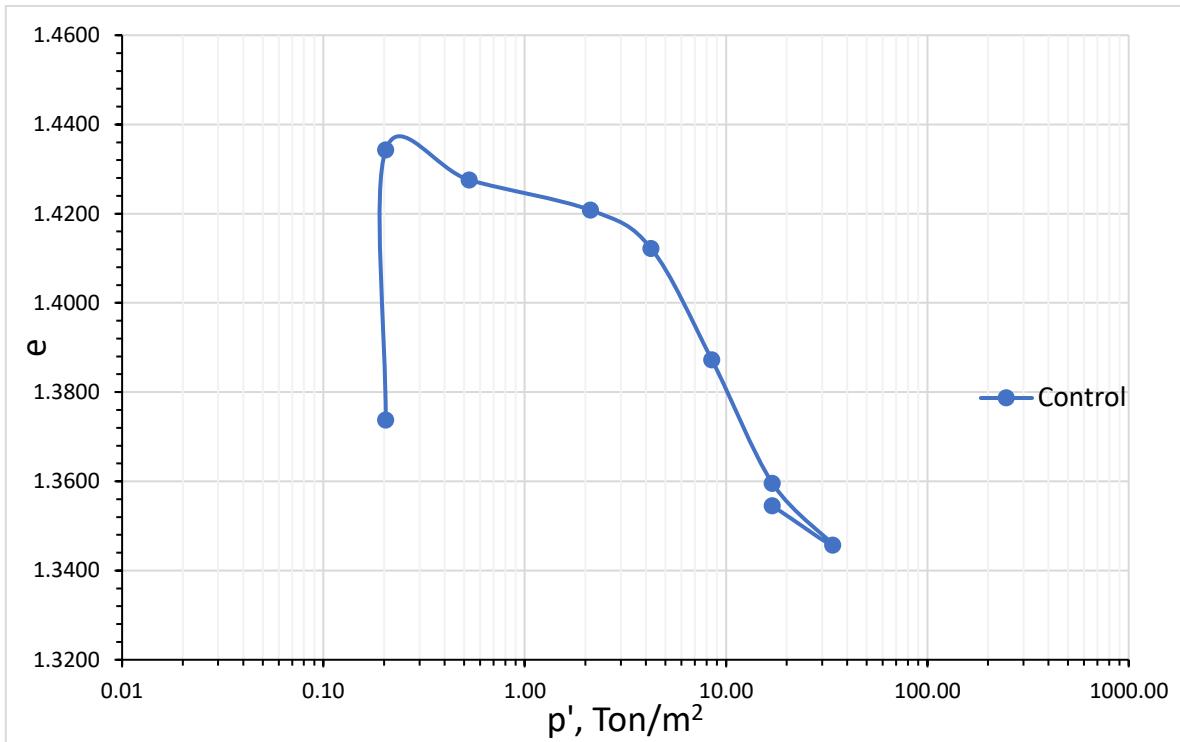


Figura 61. Curva de compresibilidad Suelo Control.

21.2. Suelo contaminado.

Tabla 54. Datos Suelo Contaminado.

W_m (gr)	111.71	V_a (cm ³)	29.46
W_s (gr)	89.37	H_0 (cm)	1.9600
W_w (gr)	22.34	H_s (cm)	0.8200
V_m (cm ³)	89.37	A_{sup} (cm ²)	45.9600
V_s (cm ³)	37.57	e_0	1.3980
V_w (cm ³)	22.34	Sw_0 (%)	43.13

Tabla 55. Suelo Contaminado Consolidación

Etapa	Presión aplicada KPa	e_f
Inicio	0.20	1.3980
Saturación	0.20	1.4583
Carga 1	0.53	1.4281
Carga 2	2.13	1.3237
Carga 3	4.25	1.2320
Carga 4	8.50	1.1180
Carga 5	17.00	1.0041
Carga 6	34.00	0.9499
Carga 7	17.00	0.9682

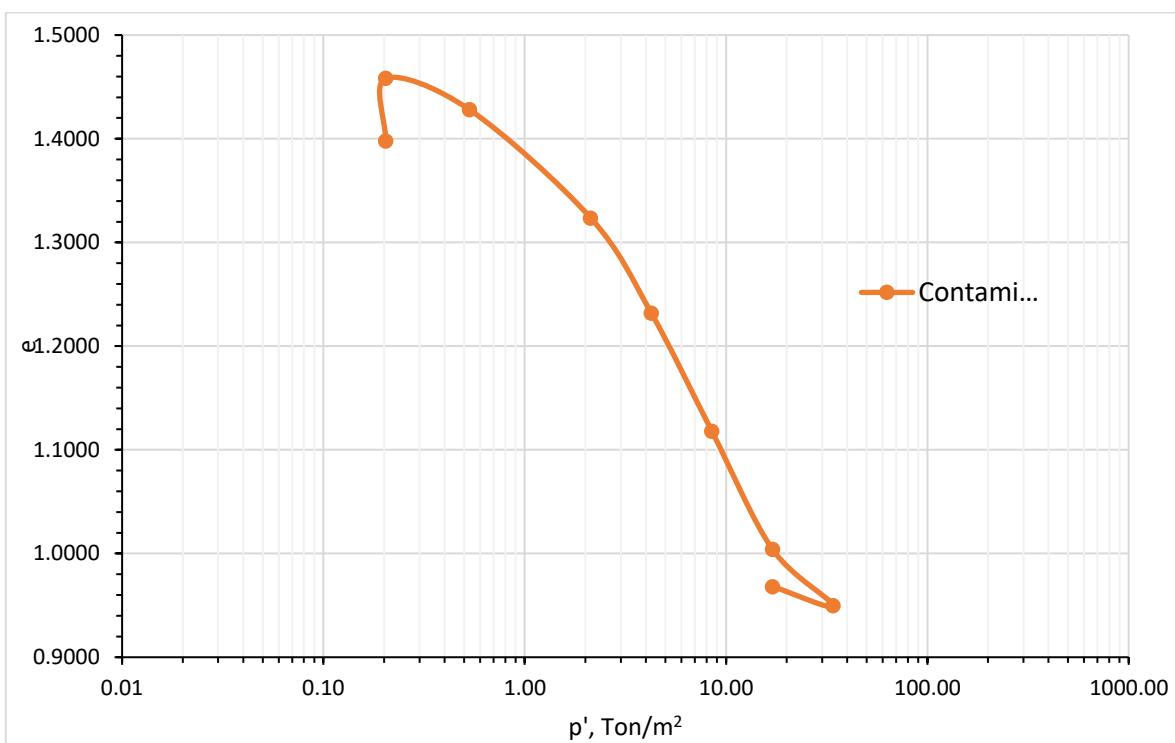


Figura 62. Curva de compresibilidad Suelo Contaminado.

22. APENDICE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

22.1. Suelo control.

En el suelo control, se encontraron principalmente minerales pertenecientes al grupo de las arcillas, como se puede observar en la figura 63, verificando así que se trata de un suelo fino, esto se puede observar en la siguiente figura, las señales de difracción de minerales que coinciden con este suelo, son los minerales: Caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), Cuarzo (SiO_2), Anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) y Montmorillonita ($(\text{Na},\text{Ca})_0,3(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$); que de los cuales la montmorillonita y caolinita son los minerales más importantes de la arcilla.

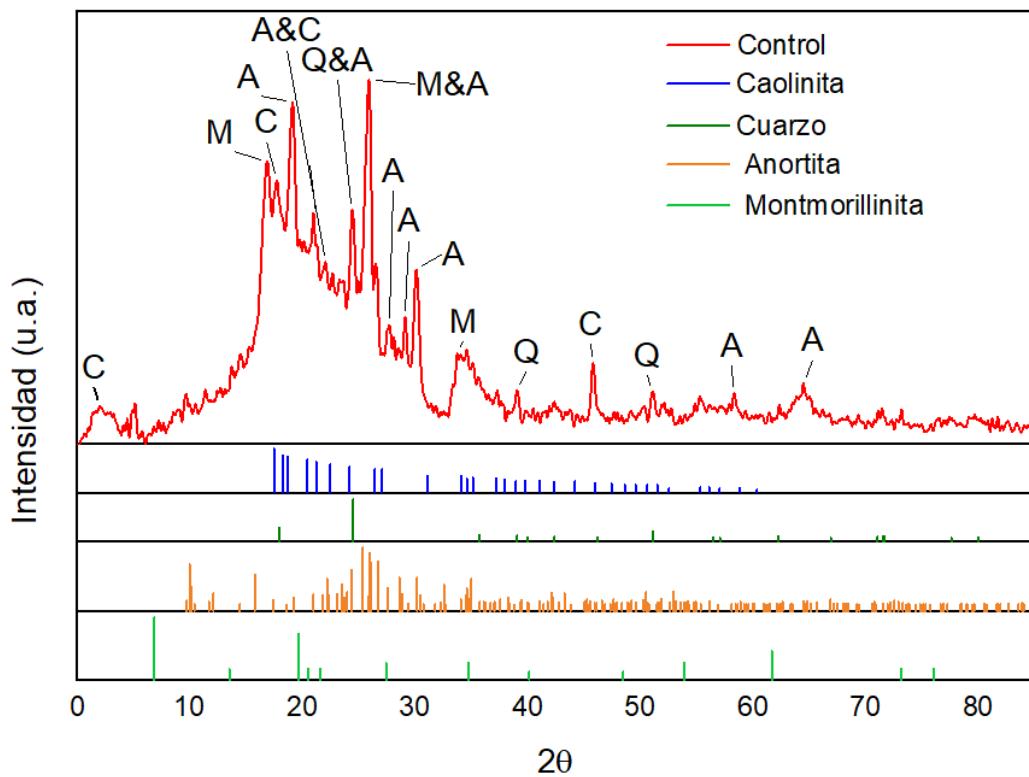


Figura 63. Difracción de rayos X "Suelo Control".

A continuación, se explica las características de cada mineral encontrado en el suelo control, de acuerdo con la investigación de López (2022).

Caolinita: los suelos presentan un comportamiento normal, con plasticidad de baja a media y permeabilidad baja, que estas características se pudieron corroborar con las pruebas de laboratorio de límites de Atterberg y permeabilidad.

Montmorillonita: otorga alta plasticidad y baja permeabilidad y puede determinar una reducción de la resistencia al cortante y es el mineral que más se presenta en los suelos expansivos.

Cuarzo: este mineral es muy resistente a los procesos de meteorización química y proviene de la alteración fisico-mecánico de las rocas, por lo que se puede observar la persistencia en la fracción arcillosa del suelo.

Anortita: es un feldespato, mineral comúnmente encontrado en rocas ígneas y en calizas metamórficas, puede llegar a ser una fuente de nutrientes a medida que se meteoriza y es el feldespato menos estable a la meteorización, tiene presencia en suelos arcillosos.

22.2. Suelo contaminado.

En el suelo contaminado, se encontraron 2 contaminantes principales, que son la Arsenopirita (FeAsS) y Cinabrio (HgS). En la siguiente figura 64, se puede observar sus respectivas señales de difracción de cada compuesto, y se presentan una cantidad mayor de señales de difracción por parte de la Arsenopirita.

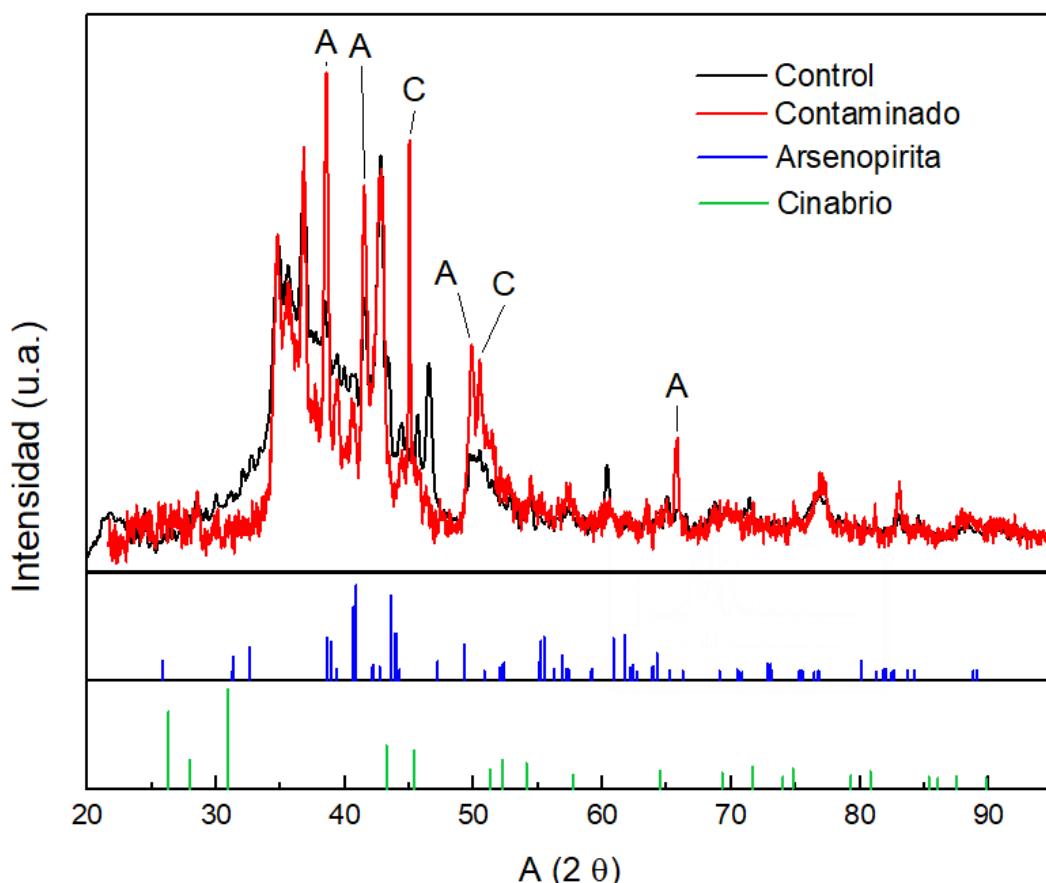


Figura 64. Difracción de rayos X "Suelo Contaminado".

Los suelos arcillosos tienen mayor potencial de retención de arsénico, a diferencia de los suelos con mayor granulometría, por lo que se puede observar en el ensayo, que el arsénico es uno de los principales contaminantes debido a que se trata de un suelo arcilloso. La retención del arsénico en la arcilla, está relacionada a la cantidad y el tipo de minerales existentes en el suelo, la caolinita absorbe más arsénico que la vermiculita y esta absorbe más que la montmorillonita (Chen et al., 2002); aquí se puede observar que, al tener los minerales de caolinita y montmorillonita, se obtuvo una absorción del arsénico significante. En cuanto al cinabrio, es un elemento que también es fácilmente absorbido por las arcillas y es uno de los contaminantes más frecuentes en los suelos contaminados por lixiviados.

En la investigación de (Chu et al., 2017), se encontró que los suelos contaminados con metales pesados, la resistencia al corte, la cohesión y el ángulo de fricción fueron mayores a compararlos con suelos no contaminados, a lo que, a mayor concentración de iones metálicos en el suelo, mayores se incrementaron estas características. La cohesión y el ángulo de fricción aumenta en relación con el incremento de metales pesados, debido al cambio de partículas. El aumento del ángulo de fricción se puede observar en esta investigación, que el valor del suelo contaminado incrementa un 20% respecto al suelo control.

23. APENDICE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO

Como un dato extra, con las imágenes obtenidas con el Microscopio Electrónico de Barrido, y ayuda del software, se pudo obtener el rango de tamaño que tienen las partículas de cada suelo, esto en unidades de nanómetros. Para poder evaluar los datos, se utilizó el histograma.

23.1. Suelo control.

En la figura 65, se observa el histograma del Suelo Control, en donde se observa que tiene una distribución sesgada a la derecha, por lo que la mayor concentración de partículas está entre los tamaños 5 y 15 μm , la frecuencia disminuye conforme aumenta el tamaño de partícula, en este caso valores mayores a 15 μm .

El tamaño de distribución más común está entre 10 y 15 μm , con más de 50 cuentas, esto se interpreta que la mayoría de las partículas son finas, que es común en suelos con textura mixta como limos. Esto se complementa con las pruebas de clasificación de suelo que se le hizo dando como un suelo limoso.

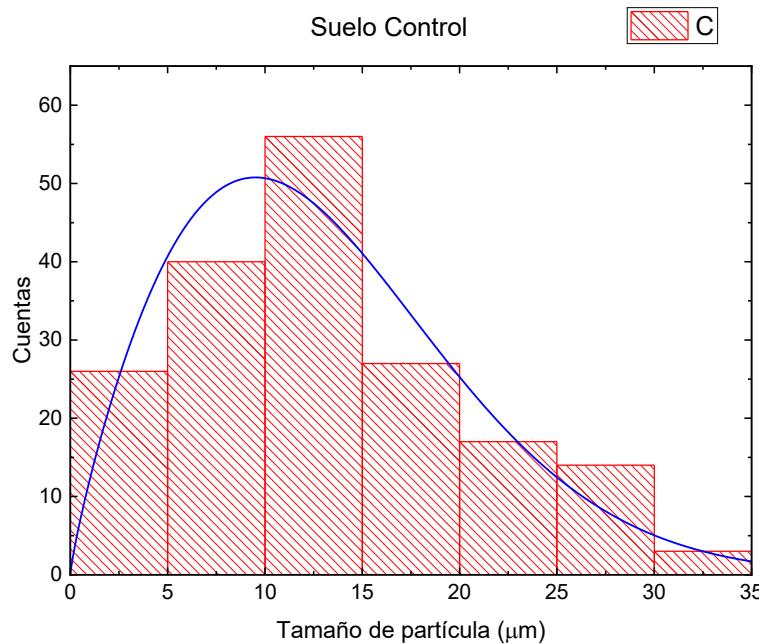


Figura 65. Histograma "Suelo Control".

23.2. Suelo contaminado.

En la figura 66, se puede observar el histograma del suelo contaminado, en el que se observa que existe una alta concentración de partículas pequeñas en el rango de 0 a 5 μm , que es la frecuencia más alta, a medida que el tamaño de las partículas aumenta, la frecuencia va disminuyendo, por lo que no predominan las partículas grandes.

Una alta capacidad de partículas finas tiene implicaciones en las características del suelo, en este caso en su permeabilidad que se comprueba con la prueba de laboratorio de permeabilidad.

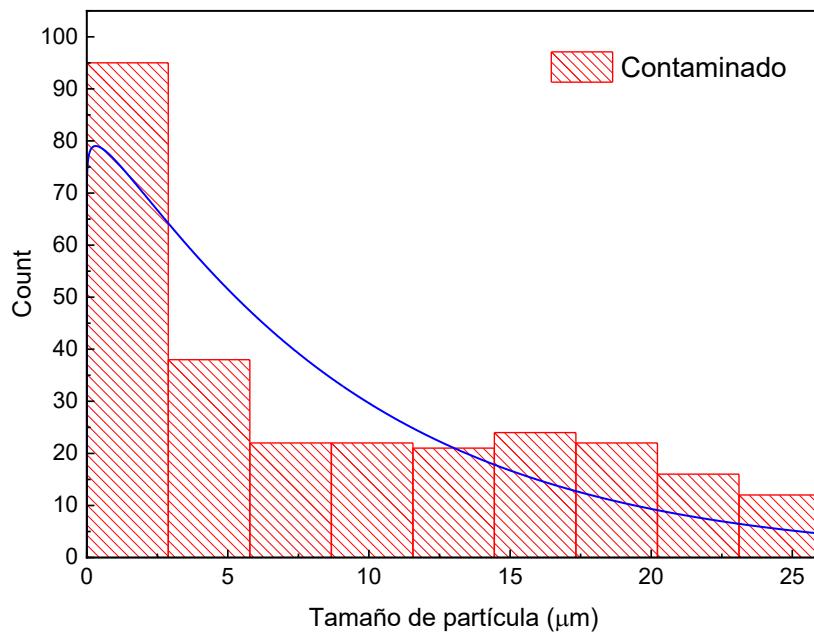


Figura 66. Histograma "Suelo Contaminado".

En el histograma se puede observar que predominan las partículas finas, pero en las imágenes del microscopio electrónico de barrido se puede observar la floculación de estas, presentándose como partículas más grandes en la prueba de granulometría. Con la información de la figura 66, se tiene que las partículas del suelo contaminado se componen por partículas más pequeñas que sólo son observables por el microscopio electrónico de

barrido y a su vez se puede apreciar la floculación que hay entre ellas, lo que finalmente influye en sus características de resistencia.

En la investigación de (Li et al., 2015), se puede observar en la distribución de partículas mediante el microscopio electrónico de barrido que entre más concentración de lixiviados tenga el suelo contaminado, se presenta una formación de agregados mayor lo que eleva la resistencia al corte del suelo con el aumento de vacíos, esto se explica con la teoría de “Gouy-Chapman”, que dice que al aumentar la concentración de metales pesados, el espesor de la “capa doble difusa” disminuya, lo que genera una floculación en las partículas de arcilla. Esto se puede observar que ocurre con el suelo contaminado de esta investigación, debido a que su principal contaminante son los metales pesados, principalmente el arsénico.

En la investigación de (Chu et al., 2018), se encontró que un suelo tipo arenoso contaminado por metales pesados tienden a tener efectos en sus propiedades, como por ejemplo el límite líquido e índice de plasticidad del suelo disminuyeron, que esto llevó a un incremento del contenido de limo y disminución del contenido de arcilla. Esto se explica con la teoría de la “doble capa difusa”, explica que cuando las soluciones con metales pesados tienden a flocular las partículas de arcilla, lo que provoca cambios en el comportamiento mecánico y microestructura del suelo. En esta investigación se observa que, en el suelo contaminado mediante la prueba de granulometría, tiende a tener mayor porcentaje de partículas gruesas que el caso del suelo control.

De acuerdo con (Li et al., 2015), el límite líquido y el índice de plasticidad están fuertemente relacionados por la sensibilidad de los minerales arcillosos a los líquidos, la reducción del límite líquido puede atribuirse a la reducción del grosor de la DDL (doble capa difusa), al igual se atribuye la disminución en los valores de límites de consistencia cuando la estructura es floculada. También demuestran que hubo una variación en el tamaño de partículas en el suelo contaminado con metales pesados, que conforme aumentaba las concentraciones de los metales pesados, el tamaño de las partículas del suelo aumentaba igual, esto se atribuye a la reducción del grosor de la DDL, lo que provoca una unión entre las partículas. El aumento de las partículas de un suelo contaminado respecto a uno no contaminado, se ve reflejado en la investigación de (Moghal et al., 2020) ,que los suelos contaminados incrementaron su tamaño de partícula respecto a sus suelos control (no contaminado), tendiendo a ser limosos y presentando floculación.

24. APENDICE DISEÑO ESTRUCTURAL

24.1. Análisis de bajada de cargas de casa-habitación.

LOSA DE AZOTEA			
Descripción	Espesor (m)	$\gamma_m (\frac{t}{m^3})$	Carga ($\frac{t}{m^2}$)
Losa	0.15	2.4	0.36
Entornado	0.03	1.9	0.057
Impermeabilizante			0.006
Aplanado			0.2
Carga muerta (total) Cm			0.62
Carga Viva (normal) Cv			0.19
Combinación (1.3Cm+1.5Cv)			1.095

LOSA DE ENTREPISO			
Descripción	Espesor (m)	$\gamma_m (\frac{t}{m^3})$	Carga ($\frac{t}{m^2}$)
Losa	0.20	2.4	0.48
Mortero	0.02	1.9	0.03
Pegazulejo	0.01	2.0	0.01
Piso cerámico	0.01	1.8	0.01
Impermeabilizante			0.01
Aplanado			0.20
Carga muerta (total) Cm			0.74
Carga Viva (normal) Cv			0.19
Combinación (1.3Cm+1.5Cv)			1.246

MUROS				
Descripción	Espesor (m)	$\gamma_m (\frac{t}{m^3})$	Carga ($\frac{t}{m^2}$)	Altura muro (m)
Losa	0.20	1.5	0.30	2.60
Mortero	0.02	1.9	0.04	
Aplanado	0.04	1.9	0.08	
Carga muerta (total) Cm			0.41	
Combinación (1.3Cm)			0.538	
Carga (t/m)			1.399	

MURETE DE LOSA DE AZOTEA				
Descripción	Espesor (m)	$\gamma_m (\frac{t}{m^3})$	Carga ($\frac{t}{m^2}$)	Altura muro (m)
Losa	0.20	1.5	0.30	0.50
Mortero	0.02	1.9	0.04	

Aplanado	0.04	1.9	0.08	
Carga muerta (total) Cm		0.41		
Combinación (1.3Cm)		0.538		
Carga (t/m)		0.269		

CERRAMIENTO			
Descripción	Espesor (m)	$\gamma_m (\frac{t}{m^3})$	Carga ($\frac{t}{m^2}$)
Ancho	0.20	2.4	0.12
Peralte	0.25		
Carga muerta (total) Cm		0.12	
Combinación (1.3Cm)		0.156	

DISTRIBUCIÓN DE CARGA DE LOSA DE AZOTEA						
Tablero	Peso de losa ($\frac{t}{m^2}$)	A-B	1-2	(A-B)/1-2)	Wcorto (t/m)	Wlargo (t/m)
1	1.095	6	9	0.67	1.64	2.19

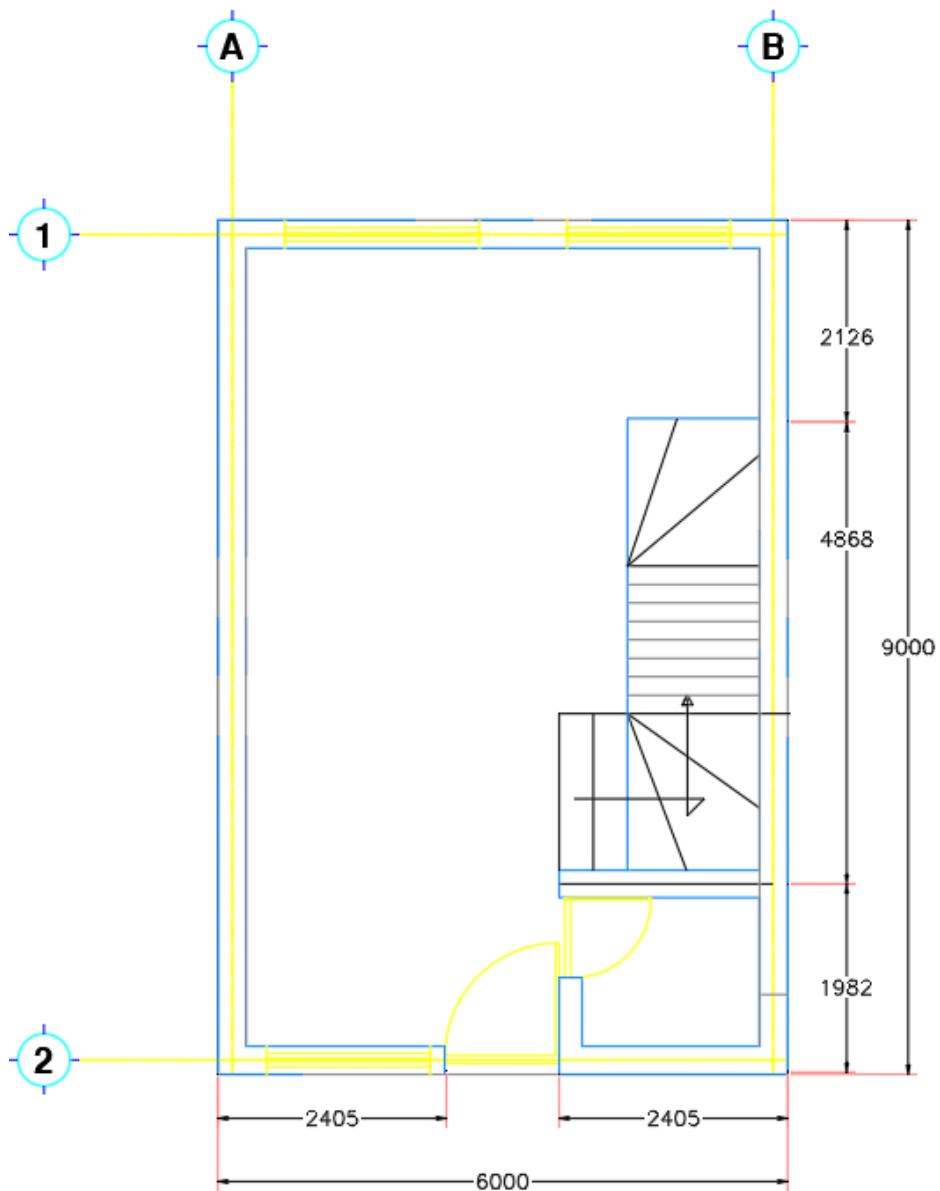
DISTRIBUCIÓN DE CARGA DE LOSA DE AZOTEA						
Tablero	Peso de losa ($\frac{t}{m^2}$)	A-B	1-2	(A-B)/1-2)	Wcorto (t/m)	Wlargo (t/m)
1	1.246	6	9	0.67	1.87	2.49

CARGA TOTAL QUE LLEGA A MURO EN PLANTA ALTA (Wt) t/m						
Muro	W losa	W viga	Wpp muro	Wt (t/m)	L(m)	Wt (t)
1 (A-B)	1.64	0.16	1.67	3.47	6.00	20.80
2 (A-B)	1.64	0.16	1.67	3.47	6.00	20.80
A (1-2)	2.19	0.16	1.67	4.01	9.00	36.13
B (1-2)	2.19	0.16	1.67	4.01	9.00	36.13

CARGA TOTAL QUE LLEGA A MURO EN PLANTA BAJA (Wt) t/m						
Muro	W losa	W viga	Wpp muro	Wt (t/m)	L(m)	Wt (t)
1 (A-B)	1.87	0.16	1.40	3.42	6.00	20.54
2 (A-B)	1.87	0.16	1.40	3.42	6.00	20.54
A (1-2)	2.49	0.16	1.40	4.05	9.00	36.42
B (1-2)	2.49	0.16	1.40	4.05	9.00	36.42

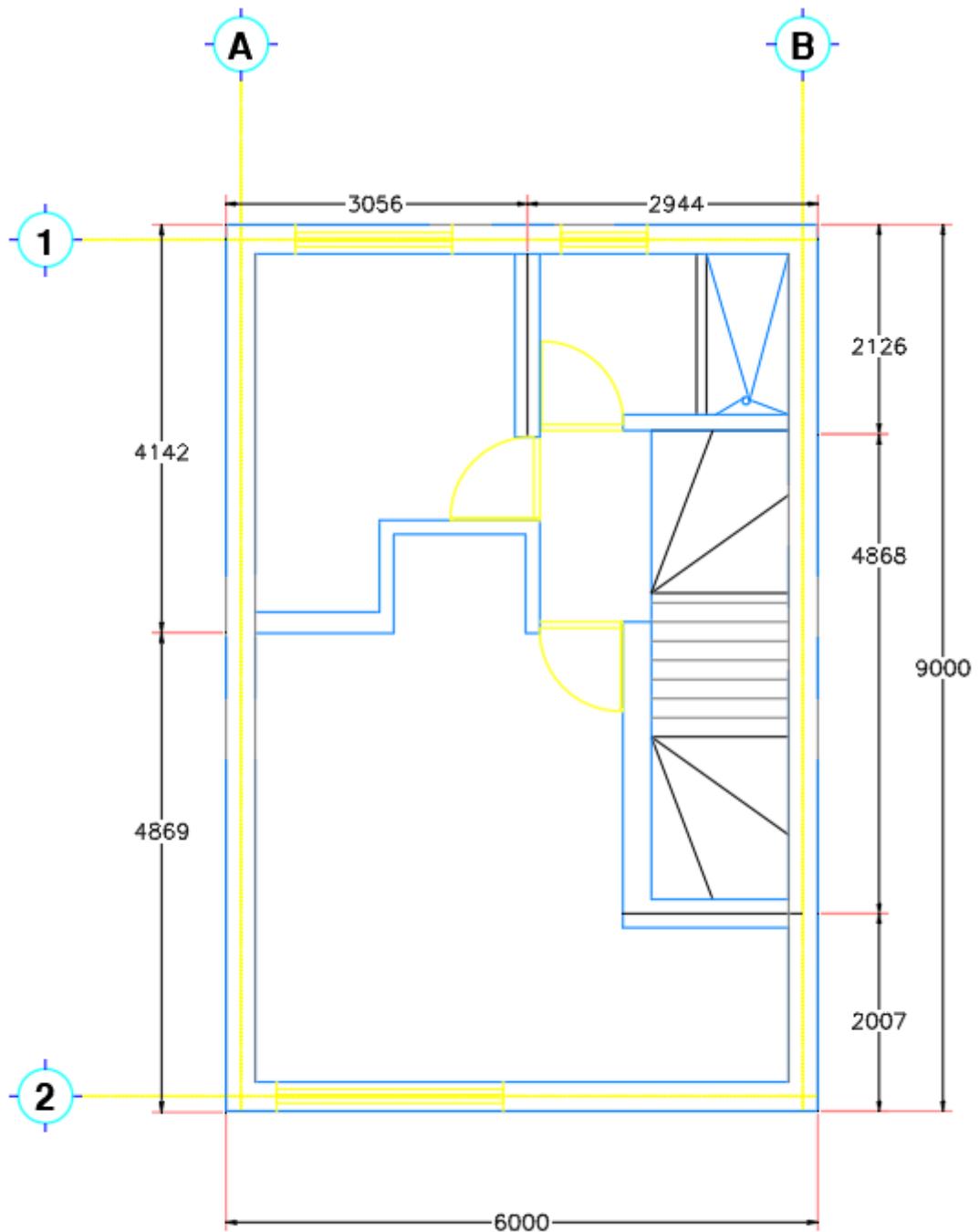
CARGA TOTAL A NIVEL CIMENTACIÓN	
MURO	Wt (t)

MURO 1 (A-B)	44.84097
MURO 2 (A-B)	42.32219
MURO A (1-2)	77.58367
MURO B (1-2)	84.23044



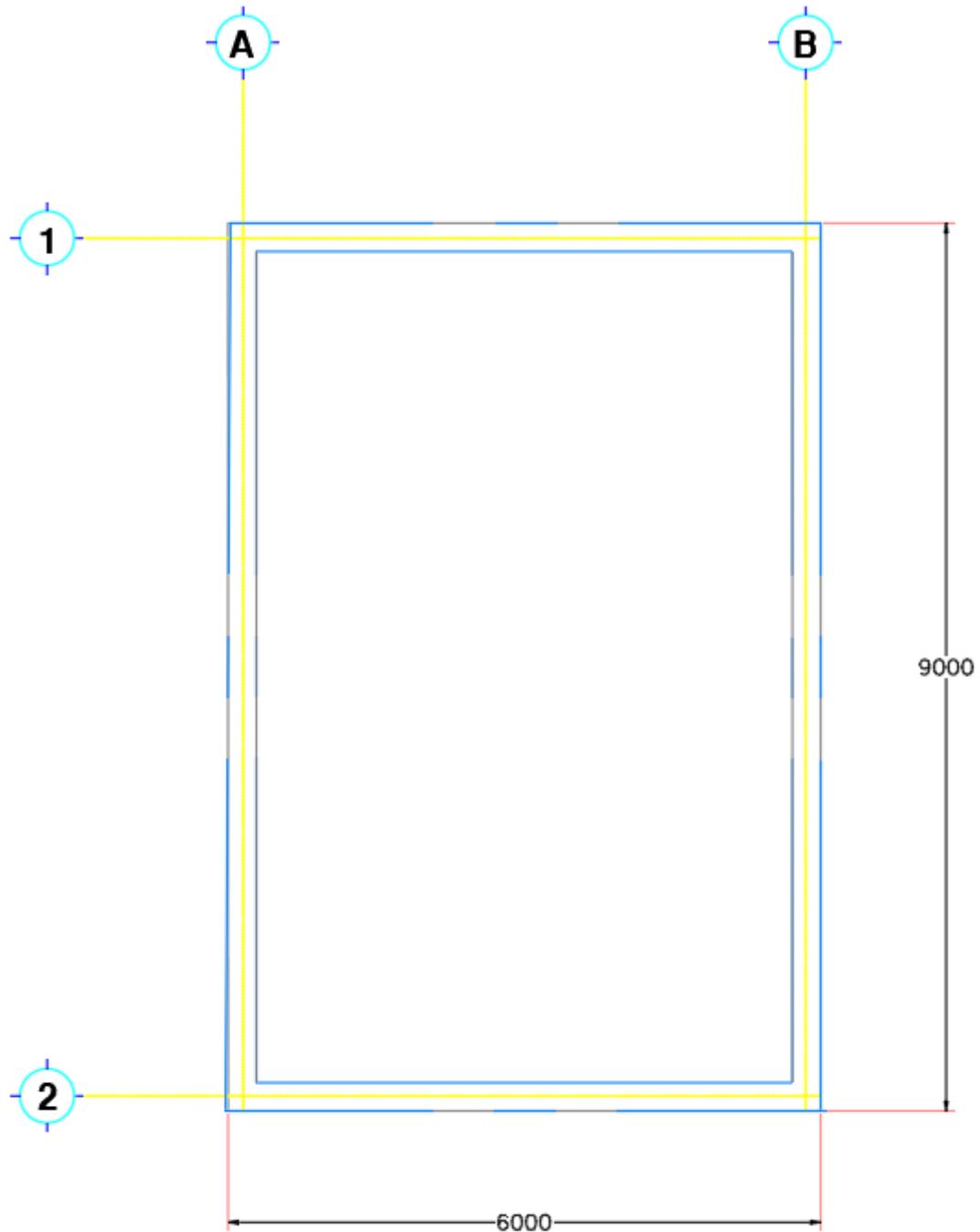
PLANTA BAJA

Figura 67. Plano arquitectónico “Planta baja” de casa de interés social.



PLANTA ALTA

Figura 68. Plano arquitectónico "Planta alta" casa interés social.



AZOTEA

Figura 69. Plano arquitectónico "Azotea" casa interés social.

24.2. Apéndice diseño losa de cimentación.

$f'c=$	250	Kg/cm ²
$f_y=$	4200	Kg/cm ²
$F''c=$	212.5	kg/cm ²
$d=$	12	cm
$L=$	900	cm
$B=$	600	cm

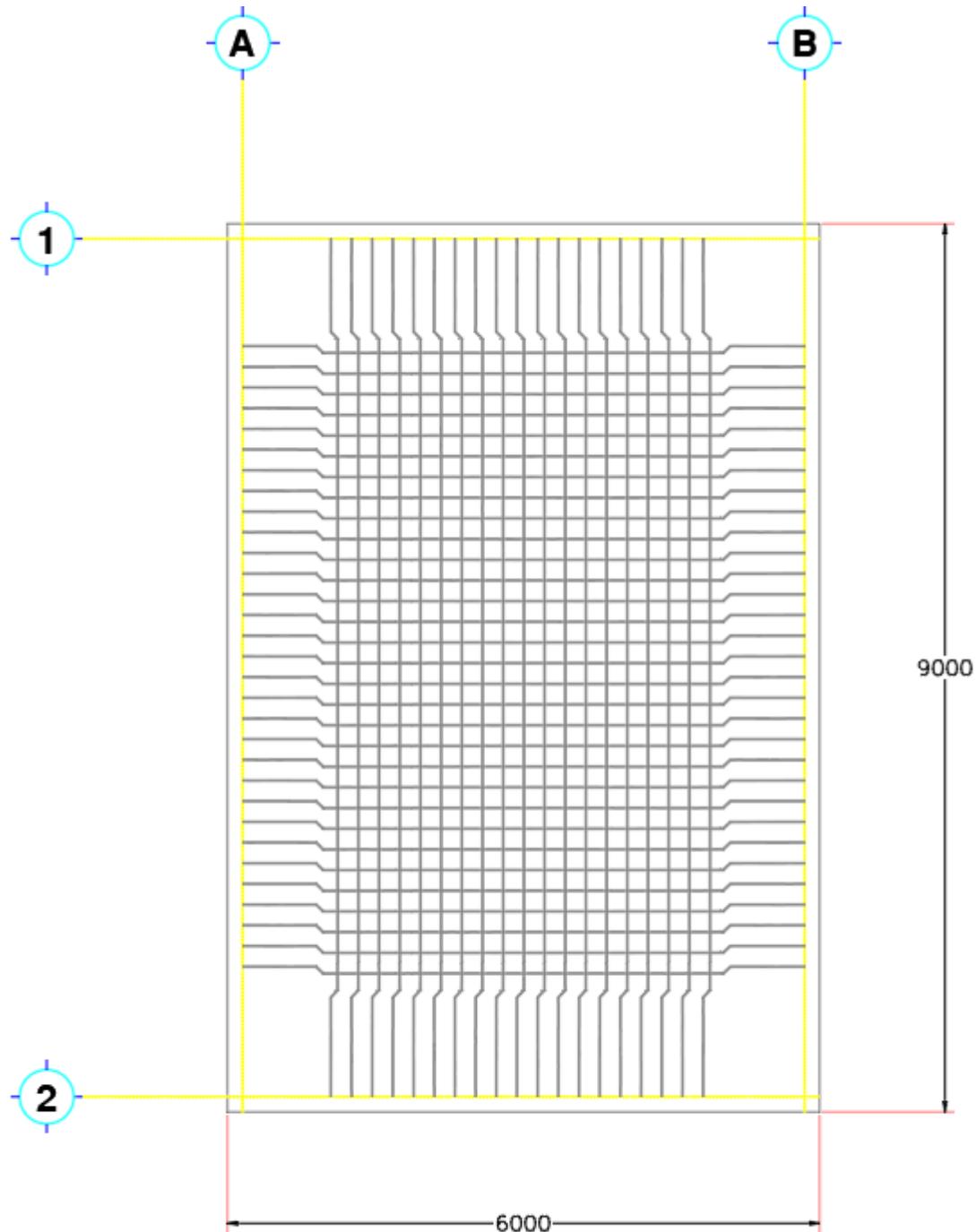
	Claro	Coeficiente	Momento (kg-m)/m	q	ρ	As	#Vs	@
Negativo en bordes discontinuos	Corto	429.8	5528.4314	0.0634	0.0032	3.8470	5	20
	Largo	330	4244.724	0.0555	0.0028	3.3709	5	20
Positivo	Corto	666.4	8571.7699	0.0789	0.0039	4.7903	7	14
	Largo	500	6431.4	0.0683	0.0034	4.1493	6	16

Varilla #3/8

Capacidad de carga de una losa de cimentación

Parámetro	Control	Contaminado	Unidad
γ_m	1.056	1.16	t/m ³
C_u	1	0.5	t/m ³
Ángulo	30	25	°
$D_f=$	2	2	m
B	6	6	m
L	9	9	m
B'	6.01878	6.01878	m
L'	9.001252	9.001252	m
N_c	6.427125	6.427125	
Q_{adm}	4.361494	3.444747	t/m ²

Parámetro	Control	Contaminado
A (m ²)	54	54
γ_m	1.056	1.16
Df (m)	2	2
Q (T/m ²)	145.2546	145.2543
q (T/m ²)	0.5779	0.3699



CIMENTACION