

**ESTUDIO DEL ENCAPSULAMIENTO DE HIDROCARBUROS EN SEDIMENTOS  
PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE CRUDO, PARA SU  
APROVECHAMIENTO EN MANTENIMIENTO VIAL**

**PRESENTADO POR:  
RAMIRO ANDRES ARDILA ARDILA  
ID:279631**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2019**



**ESTUDIO DEL ENCAPSULAMIENTO DE HIDROCARBUROS EN SEDIMENTOS  
PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE CRUDO, PARA SU  
APROVECHAMIENTO EN MANTENIMIENTO VIAL**

**PRESENTADO POR:**

**RAMIRO ANDRES ARDILA ARDILA**

**ID:279631**

**DIRECTOR:**

**ING. SERGIO MANUEL PINEDA VARGAS PhD. INGENIERO CIVIL**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**BUCARAMANGA**

**2019**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma presidente del Jurado

---

Firma Jurado N°1

---

Firma Jurado N°2

Bucaramanga, 16 septiembre del 2019

## DEDICATORIA

Este proyecto de grado va dedicado primeramente a Dios, por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida; a mi padre Reinaldo Ardila Amaya quien con sus consejos ha sabido guiarme y a mi madre Yomaira Ardila Villareal por el apoyo incondicional para culminar mi carrera profesional; a mis tías quienes han velado por mí en este arduo camino.

A mis profesores y amigos presentes y pasados, quienes con su compromiso me brindaron todo su conocimiento y amistad, viviendo juntos situaciones de alegría y momentos difíciles durante mi ciclo académico, ayudándome a que este sueño se haga realidad.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer principalmente a Dios, por permitirme cumplir con éxito este ciclo  
en mi vida.

A mis padres, hermanas, tías y abuelas por el apoyo incondicional, las enseñanzas y  
consejos transmitidos durante mi vida para hacer de este sueño una realidad.

A mis amigos por el apoyo y acompañamiento durante el proceso de aprendizaje de  
esta linda carrera profesional y el compromiso y dedicación por el presente proyecto de  
grado.

Agradezco a mi director ing. Sergio Manuel pineda Vargas phd. ingeniero civil, por  
el interés demostrado durante el proyecto, además del tiempo dedicado en asesorías y  
consultas. De igual manera al Ing. Ludwing Pérez y la Ing. Luz Marina Torrado por sus  
comentarios durante la realización del proyecto de grado y así mismo por sus enseñanzas en  
sus asignaturas.

Al personal de laboratorio por su disposición en la realización de los diferentes  
ensayos del proyecto.

## Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN.....	17
1. OBJETIVOS.....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
2.1 Definición del problema.....	19
2.2 Alcance.....	20
2.3 Justificación.....	21
3 ESTADO DEL ARTE.....	22
4 MARCO TEÓRICO .....	25
4.1 Clasificación de suelos .....	26
4.1.1 Componentes y fracciones del suelo.....	28
4.1.2 Límites de Atterberg.....	29
4.2 Propiedades físicas y químicas de los suelos.....	29
4.2.1 Textura.....	30
4.2.2 Estructura .....	30
4.2.3 Permeabilidad.....	31
4.2.4 Porosidad.....	32
4.2.5 Consistencia.....	32
4.2.6 Capacidad de intercambio de cationes, CIC.....	32
4.3 Pavimento Asfáltico Reciclado.....	33
4.4 Contaminación de suelos en explotaciones petroleras.....	34
5 METODOLOGÍA.....	36
5.1 Nivel de estudio .....	36
5.2 Tipo de estudio .....	36
5.3 Caracterización de suelos .....	36
5.3.1 Análisis granulométrico de los suelos. ....	37
5.3.2 Límites de Atterberg o de consistencia. ....	40

5.3.3	Relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación) .....	44
5.3.4	CBR de los suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada. 46	
5.4	Diseño del modelo experimental.....	48
5.5	Conductividad hidráulica .....	50
5.5.1	Conductividad hidráulica sin contaminante.....	51
5.5.2	Conductividad hidráulica: Aceite limpio.....	52
5.5.3	Conductividad hidráulica: Aceite quemado .....	54
5.5.4	Conductividad hidráulica: Petróleo .....	54
5.6	Lixiviación.....	56
5.6.1	Lixiviación aceite limpio.....	57
5.6.2	Lixiviación aceite quemado .....	57
5.6.3	Lixiviación petróleo.....	57
6	RESULTADOS.....	58
6.1.1	Análisis granulométrico .....	58
6.1.2	Vía parqueaderos UPB Bucaramanga.....	58
6.1.3	Cantera PAVIANDI-Vía Curos.....	59
6.1.4	Talud UPB Bucaramanga .....	60
6.2	Límites de Atterberg .....	61
6.2.1	Vía parqueaderos UPB Bucaramanga.....	61
6.2.2	Cantera PAVIANDI-Vía Curos.....	63
6.2.3	Talud UPB Bucaramanga .....	63
6.3	Relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación) .....	65
6.3.1	Proctor 1 .....	65
6.3.2	Proctor 2 .....	66
6.3.3	Proctor 3 .....	67
6.3.4	Promedio ensayo de Proctor .....	68
6.4	CBR de los suelos compactados.....	69

6.5	Diseño de modelo experimental de permeámetro de carga variable .....	74
6.6	Conductividad hidráulica sin contaminante .....	75
6.7	Conductividad hidráulica aceite limpio .....	75
6.8	Conductividad hidráulica aceite quemado .....	78
6.9	Conductividad hidráulica petróleo .....	81
6.9.1	Modelo matemático .....	84
6.10	LIXIVIACIÓN ACEITE LIMPIO .....	85
6.10.1	Muestras 10 de mayo del 2019 .....	85
6.10.2	Muestras 24 de mayo del 2019 .....	85
6.10.3	Muestras 31 de mayo del 2019 .....	86
6.10.4	Muestras finales 13 de junio del 2019 .....	87
6.10.5	Modelo matemático aceite hidráulico .....	89
6.11	LIXIVIACIÓN ACEITE QUEMADO .....	90
6.11.1	Muestras 10 de mayo del 2019 .....	90
6.11.2	Muestras 24 de mayo del 2019 .....	91
6.11.3	Muestras 31 de mayo del 2019 .....	92
6.11.4	Muestras finales 13 de junio del 2019 .....	93
6.11.5	Modelo matemático aceite quemado .....	95
6.12	LIXIVIACIÓN PETRÓLEO .....	96
6.12.1	Muestras 10 de mayo del 2019 .....	96
6.12.2	Muestras 24 de mayo del 2019 .....	96
6.12.3	Muestras 31 de mayo del 2019 .....	97
6.12.4	Muestras finales 13 de junio del 2019 .....	98
6.12.5	Modelo matemático petróleo .....	100
7	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	101
7.1	Análisis granulométrico talud UPB Bucaramanga .....	102
7.2	Ensayo Proctor modificado .....	102
7.3	Ensayo de CBR .....	102
7.4	Conductividad hidráulica .....	103

7.4.1	Aceite hidráulico .....	103
7.4.2	Aceite quemado .....	103
7.4.3	Petróleo .....	104
7.4.4	Contaminante 2% .....	104
7.4.5	Contaminante 4% .....	105
7.4.6	Contaminante 6% .....	105
7.4.7	Contaminante 8% .....	106
7.5	Lixiviación .....	106
7.5.1	Lixiviación aceite limpio .....	106
7.5.2	Lixiviación aceite quemado .....	107
7.5.3	Lixiviación petróleo .....	107
8	CONCLUSIONES .....	108
9	RECOMENDACIONES .....	110
10	BIBLIOGRAFÍA .....	111
	Bibliografía .....	111

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Suelos utilizados en el análisis granulométrico. Elaboración: Fuente propia. ....	36
Tabla 2. Clasificación del rango de plasticidad .....	43
Tabla 3. Características físicas aceite hidráulico .....	53
Tabla 4. Información campo Dorotea.....	55
Tabla 5. Análisis granulométrico Vía parqueaderos UPB Bucaramanga.....	58
Tabla 6. Análisis granulométrico Cantera PAVIANDI-Vía Curos .....	59
Tabla 7. Curva granulométrica cantera PAVIANDI-Vía Curos.....	60
Tabla 8. Análisis granulométrico Talud UPB Bucaramanga.....	60
Tabla 9. Límite líquido vía parqueadero UPB Bucaramanga .....	61
Tabla 10. Límite plástico vía parqueadero UPB Bucaramanga.....	62
Tabla 11. Límite líquido talud UPB Bucaramanga .....	63
Tabla 12. Límite plástico talud UPB Bucaramanga .....	64
Tabla 13. Datos ensayo Proctor 1.....	65
Tabla 14. Datos ensayo Proctor 2.....	67
Tabla 15. Datos ensayo Proctor 3.....	68
Tabla 16. Promedio ensayo Proctor .....	68
Tabla 17. Datos ensayo CBR .....	69
Tabla 18. Penetración ensayo CBR corregido.....	73
Tabla 19. CBR % .....	73
Tabla 20. Máxima densidad seca.....	74
Tabla 21. Conductividad hidráulica carga variable 0% de contaminante .....	75
Tabla 22. Conductividad hidráulica carga variable 2% de contaminante aceite limpio .....	76
Tabla 23. Conductividad hidráulica carga variable 4% de contaminante aceite limpio .....	77
Tabla 24. Conductividad hidráulica carga variable 6% de contaminante aceite limpio .....	78
Tabla 25. Conductividad hidráulica carga variable 8% de contaminante aceite limpio .....	78
Tabla 26. Conductividad hidráulica carga variable 2% de contaminante aceite quemado ..	79
Tabla 27. Conductividad hidráulica carga variable 4% de contaminante aceite quemado .	80
Tabla 28. Conductividad hidráulica carga variable 6% de contaminante aceite quemado .	80
Tabla 29. Conductividad hidráulica carga variable 8% de contaminante aceite quemado .	81
Tabla 30. Conductividad hidráulica carga variable 2% de contaminante petróleo .....	82

Tabla 31. Conductividad hidráulica carga variable 4% de contaminante petróleo .....	82
Tabla 32. Conductividad hidráulica carga variable 6% de contaminante petróleo .....	83
Tabla 33. Conductividad hidráulica carga variable 8% de contaminante petróleo .....	83
Tabla 34. promedio de coeficientes de permeabilidad.....	84
Tabla 35. porcentaje de CBR respecto a cada molde.....	102

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Tipos de suelo. ....	37
Ilustración 2. Serie de tamices.....	38
Ilustración 3. Clasificación de suelo.....	39
Ilustración 4. Tabla sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S).....	40
Ilustración 5. Ensayo límite líquido Fuente: Propia .....	41
Ilustración 6. Ensayo límite plástico .....	42
Ilustración 7. Carta de plasticidad	Ilustración 8. gráfico de plasticidad de los suelos de grano fino.....
43	43
Ilustración 9. Ensayo Proctor modificado.....	44
Ilustración 10. Muestra compactada - ensayo Proctor modificado.....	45
Ilustración 11. Muestra de suelo + cápsula - ensayo Proctor modificado .....	45
Ilustración 12. Moldes de CBR.....	46
Ilustración 13. Molde en inmersión - ensayo CBR.....	47
Ilustración 14. Molde sometido a una carga mediante mecanismo correspondiente de la prensa. ....	48
Ilustración 15. Materiales del modelo para el ensayo de conductividad hidráulica. ....	49
Ilustración 16. Modelo de permeámetro nivelado en sus extremos. ....	50
Ilustración 17. Cilindro de muestra de suelo saturado .....	50
Ilustración 18. Ensayo permeámetro en ejecución.....	51
Ilustración 19. Aceite hidráulico 10w .....	53
Ilustración 20. Petróleo Dorotea .....	55
Ilustración 21. mezcla suelo-contaminante .....	56
Ilustración 22. Muestra compactada.....	56
Ilustración 23. Extracción del suelo compactado.....	57
Ilustración 24. Tabla de clasificación de suelo granular. fuente: libro web.....	63
Ilustración 25. Muestras para ensayo de lixiviación .....	85
Ilustración 26. Aceite limpio 4%. 24 de mayo .....	85
Ilustración 27. Aceite limpio 6%. 24 de mayo .....	86
Ilustración 28. Aceite limpio 8%. 24 de mayo .....	86
Ilustración 29. Aceite limpio 4%. 31 de mayo .....	86

Ilustración 30. Aceite limpio 6%. 31 de mayo .....	87
Ilustración 31. Aceite limpio 8%. 31 de mayo .....	87
Ilustración 32. Fotografías finales aceite limpio 4%.....	88
Ilustración 33. Fotografías finales aceite limpio 6%.....	88
Ilustración 34. Fotografías finales aceite limpio 8%.....	89
Ilustración 35. Ensayo de lixiviación en ejecución .....	90
Ilustración 36. Aceite quemado 4%. 24 de mayo.....	91
Ilustración 37. Aceite quemado 6%. 24 de mayo.....	91
Ilustración 38. Aceite quemado 8%. 24 de mayo.....	91
Ilustración 39. Aceite quemado 4%. 31 de mayo.....	92
Ilustración 40. Aceite quemado 6%. 31 de mayo.....	92
Ilustración 41. Aceite quemado 8%. 31 de mayo.....	92
Ilustración 42. Fotografías finales aceite quemado 4% .....	93
Ilustración 43. Fotografías finales aceite quemado 6% .....	94
Ilustración 44. Fotografías finales aceite quemado 8% .....	94
Ilustración 45. Muestras con petróleo. 10 de mayo .....	96
Ilustración 46. Petróleo 4%. 24 de mayo.....	96
Ilustración 47. Petróleo 6%. 24 de mayo.....	97
Ilustración 48. Petróleo 8%. 24 de mayo.....	97
Ilustración 49. Petróleo 4%. 31 de mayo.....	97
Ilustración 50. Petróleo 6%. 31 de mayo.....	98
Ilustración 51. Petróleo 8%. 31 de mayo.....	98
Ilustración 52. Fotografías finales petróleo 4%.....	99
Ilustración 53. Fotografías finales petróleo 6%.....	99
Ilustración 54. Fotografías finales petróleo 8%.....	100
Ilustración 55. Talud analizado UPB Bucaramanga .....	101

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Coeficiente de uniformidad .....	38
Ecuación 2. coeficiente de curvatura. ....	38
Ecuación 3. Índice de plasticidad.....	42
Ecuación 4. Índice de liquidez.....	42
Ecuación 5. Índice de contracción .....	43
Ecuación 6. Límite de contracción.....	43
Ecuación 7. Coeficiente de permeabilidad en permeámetro de carga variable.....	51

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva granulométrica Vía parqueaderos UPB Bucaramanga .....	59
Gráfica 2. Curva granulométrica Talud UPB Bucaramanga .....	61
Gráfica 3. Límite líquido vía parqueadero UPB Bucaramanga .....	62
Gráfica 4. gráfico de plasticidad de los suelos (vía parqueaderos) .....	62
Gráfica 5. Límite líquido talud UPB Bucaramanga .....	64
Gráfica 6. gráfico de plasticidad de los suelos (talud upb) .....	64
Gráfica 7. Curva densidad seca Vs humedad. Proctor 1 .....	66
Gráfica 8. Curva densidad seca Vs humedad. Proctor 2 .....	67
Gráfica 9. Curva densidad seca vs humedad. Proctor 3 .....	68
Gráfica 10. Curva esfuerzo vs penetración. Ensayo CBR .....	70
Gráfica 11. Curva esfuerzo vs penetración para 10 golpes. Ensayo CBR .....	71
Gráfica 12. Curva esfuerzo vs penetración para 25 golpes. Ensayo CBR .....	71
Gráfica 13. Curva esfuerzo vs penetración para 56 golpes. Ensayo CBR .....	72
Gráfica 14. Curva densidad- CBR .....	73
Gráfica 15. modelo matemático conductividad hidráulica .....	84
Gráfica 16. modelo matemático aceite hidráulico. Lixiviación .....	90
Gráfica 17. modelo matemático aceite quemado. Lixiviación .....	95
Gráfica 18. modelo matemático petróleo. Lixiviación .....	101
Gráfica 19. Variación contaminante aceite hidráulico .....	103
Gráfica 20. variación contaminante aceite quemado .....	103
Gráfica 21. Variación contaminante petróleo .....	104
Gráfica 22. sustancias contaminantes 2% .....	104
Gráfica 23. Sustancias contaminante 4% .....	105
Gráfica 24. Sustancias contaminantes 6% .....	105
Gráfica 25. Sustancias contaminante 8% .....	106

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** ESTUDIO DEL ENCAPSULAMIENTO DE HIDROCARBUROS EN SEDIMENTOS PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE CRUDO PARA SU APROVECHAMIENTO EN EL MANTENIMIENTO VIAL.

**AUTOR(ES):** Ramiro Andrés Ardila Ardila

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR(A):** Ing. Sergio Manuel Pineda Vargas

### RESUMEN

Este trabajo planteó alternativas físicas para el tratamiento y mejoramiento de las vías veredales del departamento de Santander mediante un proceso de encapsulamiento de un suelo de la Universidad Pontificia Bolivariana que controle la lixiviación, con el fin de ser mezclados con materiales contaminantes a los que no se les da un uso adecuado. Inicialmente se realizó la caracterización de tres tipos de suelos presentes en los predios de la UPB obteniendo características totalmente diferentes a pesar de su cercanía entre ellos. El suelo que se decidió estudiar se asemeja a las características de la mayoría de los suelos del departamento, recibiendo el nombre de limo arenoso de baja plasticidad según los ensayos realizados a la muestra. Con el fin de evitar asentamientos producto del peso de los vehículos que transitan por las vías terciarias y tener una compactación adecuada en la estructura que soporta las cargas, se investigó mediante ensayo de Proctor modificado que el suelo analizado presenta una densidad seca de 1,91 g/cm<sup>3</sup> y un contenido de humedad de 13,3% y posteriormente realizar un ensayo de CBR donde se da una clasificación al suelo de Bueno y un uso variado para realizar una sub base y/o base en el mejoramiento y/o construcción de vías veredales. Se realizó un modelo experimental de conductividad hidráulica con cabeza variable que permita medir la permeabilidad de la mezcla de suelo con diferentes porcentajes de contaminantes (2%,4%,6%,8%) como lo es el aceite hidráulico, aceite quemado y petróleo, ya que si no se les realiza un tratamiento adecuado el suelo puede sufrir grandes problemas de tipo ambiental. Posteriormente se realiza un ensayo de lixiviación que permita observar la separación tanto de las grasas como del suelo para determinar si este puede ser utilizado en el tratamiento de las vías veredales.

### PALABRAS CLAVE:

Conductividad hidráulica, lixiviación, vías veredales, suelos mezclados con hidrocarburos.

## GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

**TITLE:** STUDY OF THE ENCAPSULATION OF HYDROCARBONS IN SEDIMENTS FROM CRUDE TREATMENT FOR THEIR USE IN ROAD MAINTENANCE

**AUTHOR(S):** Ramiro Andrés Ardila Ardila

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR:** Ing. Sergio Manuel Pineda Vargas

### ABSTRACT

This work proposed physical alternatives for the treatment and improvement of the roads in the department of Santander through a process of encapsulation of a land of the Pontifical Bolivarian University that controls leaching, in order to be mixed with contaminant materials that are not It gives them proper use. Initially, the characterization of three types of soils present in the UPB premises was carried out, obtaining totally different characteristics despite their proximity to each other. The soil that was decided to study resembles the characteristics of the majority of the floors of the department, receiving the name of sandy silt of low plasticity according to the tests carried out on the sample. In order to avoid settlements resulting from the weight of vehicles traveling through tertiary roads and have adequate compaction in the structure that supports the loads, it was investigated by means of a modified proctor test that the analyzed soil has a dry density of 1.91 g / cm<sup>3</sup> and a moisture content of 13.3% and subsequently perform a CBR test where a classification is given to the soil of Bueno and a varied use to perform a sub base and / or base in the improvement and / or construction of sidewalks. An experimental model of hydraulic conductivity with variable head was made that allows measuring the permeability of the soil mixture with different percentages of pollutants (2%, 4%, 6%, 8%) such as hydraulic oil, burned oil and oil , since if they are not properly treated, the soil can suffer major environmental problems. Subsequently, a leaching test is carried out that allows observing the separation of both fats and soil to determine if this can be used in the treatment of the veredal pathways.

### KEYWORDS:

Hydraulic conductivity,  
leaching, sidewalks,  
soils mixed with  
hydrocarbons

## INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta que la pavimentación de las vías veredales es una necesidad para los usuarios del departamento de Santander, puesto que las condiciones de estas vías no son adecuadas complicando el tránsito de las mismas y debido a la falta de recursos que ocasionan la reducción de costos al momento de llevar a cabo el mejoramiento vial, nace la idea del presente estudio que plantea como objetivo estudiar la capacidad de encapsulamiento de hidrocarburos en mezclas con suelos y materiales disponibles en el departamento de Santander, para su aprovechamiento en el mejoramiento de vías veredales.

En este sentido, el presente proyecto requiere que se lleve a cabo un proceso de capacidad de encapsulamiento de un material que controle la lixiviación, realizando estudios de algunos materiales presentes en el suelo del mencionado departamento con el fin de ser mezclados con otros materiales contaminantes a los que no se les da un adecuado uso.

Para adentrarse en este proceso, la investigación necesita de una clasificación de los diferentes suelos con el propósito de elegir uno que tenga las mejores características y posteriormente agregar a este, tres tipos de contaminantes con diferentes cargas o porcentajes de concentración, dando lugar a la elaboración de una mezcla, para poder determinar la permeabilidad del suelo y establecer si previene la lixiviación. De esta manera, se efectuará unos modelos matemáticos que caractericen el fenómeno de las mezclas estudiadas bajo diferentes porcentajes de material agregado.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Estudiar la capacidad de encapsulamiento de hidrocarburos en mezclas de sedimentos provenientes del tratamiento de crudo con suelos y materiales disponibles en el departamento de Santander, para su aprovechamiento en el mejoramiento de vías veredales.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar posibles encapsulantes para hidrocarburos, disponibles en Santander, de manera que prevengan su lixiviación en mezclas de suelo y sedimentos con residuos de crudo.
- Diseñar un experimento que permita medir la resistencia a la lixiviación de las mezclas de materiales encapsulantes y los residuos con hidrocarburos mediante experimentos físicos de bajo costo.
- Obtener unos modelos matemáticos que caractericen el fenómeno de lixiviación de las mezclas estudiadas bajo diferentes porcentajes de suelo agregado.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 2.1 Definición del problema

En el departamento de Santander se encuentran diferentes tipos de suelos sobre los cuales se construyen las vías que conectan los diferentes municipios. Estos suelos se caracterizan por ser muy variados, encontrando suelos arcillosos, limosos y arenosos. Muchos de los municipios no cuentan con presupuestos adecuados para realizar la pavimentación de todas sus vías y/o el mantenimiento de estas; por esta razón se busca dar solución a este problema que tienen las personas principalmente en época de lluvia cuando no pueden transportar sus productos o mercancías debido al deterioro de las vías que son de vital importancia para el desarrollo de una sociedad, mejorando la comunicación entre comunidades, además, de que esto puede generar que mejore la calidad de transporte con una mayor oferta de los mismos, a través del aumento de número de automóviles particulares, así mismo esto puede generar un efecto positivo en la educación puesto que en cierta medida esto determina el incremento de asistencia escolar y, por supuesto la generación de empleo.

Debido a la falta de recursos y a la complejidad de la gestión de estos en lo que respecta a la creación y mejoramiento de vías en los municipios y veredas, se pretende dar solución a esta problemática buscando alternativas factibles a los presupuestos de todos o de la mayoría de los municipios del departamento para garantizar el mantenimiento periódico de las vías secundarias utilizando mezclas de suelo con contaminantes de tal manera que funcione como afirmado.

Por otra parte, la conservación de la red vial es en la actualidad un aspecto de gran importancia debido a los recursos que moviliza. El presupuesto necesario para el mantenimiento, así como los problemas ambientales que de él se derivan, justifican la búsqueda de nuevas técnicas que permitan reducir costos y sean tolerables con el medio.

## 2.2 Alcance

Mediante el estudio de materiales encapsulantes presentes en el Departamento de Santander para mezclas de sedimentos de hidrocarburo, se desea estudiar e identificar aquellos que prevengan su lixiviación para el mejoramiento y tratamiento superficial en vías no pavimentadas, analizando su resistencia mediante experimentos físicos.

Es importante mencionar que este proyecto trasciende al entorno social, es decir que adicional a ser un proyecto de tipo cuantitativo y experimental, es un estudio encaminado al mejoramiento de la calidad de vida de los usuarios que transitan a diario las vías veredales que incluso se conectan con las vías municipales, por ende, se considera como un proyecto de impacto social, ya que el proyecto puede generar efectos positivos tanto en la facilidad de acceder a transporte público, como al incremento de vehículos en la zona, puede generar empleo y a su vez mejoras en la inserción escolar, así pues, se considera que la ejecución adecuada del estudio puede generar que se aumente la eficiencia en el paso de las vías que se conectan entre sí, impactando positivamente el comercio e incluso la recurrencia de visitantes hacia estas zonas.

Por otra parte, es indispensable hacer referencia al impacto que este proyecto puede generar en las empresas y consorcios que estén interesados en llevar a cabo proyectos de pavimentación asfálticos, puesto que hacer uso de elementos de derivados de hidrocarburos contaminantes para el aprovechamiento de la mejora en las vías del departamento genera un mecanismo menos costoso que el tradicional y de esta manera no solo puede ser catalogado como un estudio de impacto social, sino también de carácter económico.

### 2.3 Justificación

El presente estudio tiene el propósito de mejorar la accesibilidad y la conectividad vial, puesto que se presenta una complejidad en la transitabilidad en las vías veredales de Santander, ya que los vehículos circulan a muy baja velocidad y existen obstáculos en la vía como apozamientos de agua, huecos, baches y deterioro de la carpeta asfáltica, de modo que el mejoramiento de las condiciones geométricas y estructurales de la vía requiere la construcción de obras necesarias para garantizar la transitabilidad y confort requerido por los usuarios, para lo cual es importante la ejecución del estudio de suelos, con el fin de establecer la magnitud, estratigrafía y parámetros de los suelos involucrados en el proceso de inestabilidad, diseñando las obras necesarias para la mitigación y/o control del proceso.

Es evidente la necesidad de realizar una rehabilitación y mejoramiento en la vía del departamento, puesto que esto contribuye a un desarrollo de los municipios involucrados con el proyecto, ya que una buena vía les permite transportar sus productos provenientes del campo, de unas veredas a otras e incluso entre municipios.

En este sentido se requiere que mediante la capacidad de encapsulamiento de un material que controle la lixiviación, se logre estudiar algunos materiales presentes en el suelo del Departamento de Santander para ser mezclados con aceites que no tienen un uso adecuado en el sector de los hidrocarburos. Con el uso de las mezclas será posible disminuir la contaminación que sustancias como el aceite hidráulico, aceite quemado, y petróleo generan al medio ambiente y así mismo dar solución a los problemas que se generan en las vías no pavimentadas del Departamento, disminuyendo costos y tiempos en su mantenimiento.

Esta problemática requiere la intervención de profesionales y especialistas en el campo de vías con altos conocimientos en los procesos constructivos, de tal manera que contribuyan al desarrollo de soluciones de mejoramiento o rehabilitación de las vías en mal estado. Por ende, el presente proyecto representa un total enriquecimiento para los investigadores involucrados, además puede servir de referente para estudios posteriores en el tema. La

importancia de participar activamente en estos procesos constructivos, rehabilitación y mejoramiento vial, permite ampliar los conocimientos adquiridos en la universidad y la práctica en el campo de la ingeniería civil.

### 3 ESTADO DEL ARTE

Loria (2016) en su estudio “Reciclaje en pavimentos: Influencia de los métodos de extracción en las propiedades del agregado” tienen como objetivo describir los resultados obtenidos del trabajo conjunto de las Universidades de Nevada, Texas, Wisconsin y el Western Research Institute, con respecto a la influencia de los métodos de extracción del material a-RAP, sobre sus propiedades características para diseño de mezcla Superpave. El proceso de mezclado se llevó a cabo según los procedimientos del Manual de Diseño de Mezcla Superpave, en esta investigación, se dan a conocer los resultados del ensayo de cuatro fuentes de agregado en Estados Unidos, Alabama, California, Nevada y Florida, que fueron sometidas a tres métodos de extracción: horno de ignición, centrifugado y reflujo. Los resultados obtenidos demuestran que muchas de estas técnicas pueden afectar las propiedades de diseño y, que por tanto es importante conocer las cantidades apropiadas a utilizar para de esta manera evitar deficiencias en el diseño que repercutirán en la durabilidad final de la estructura de pavimento.

Por otro lado, se encuentra el estudio elaborado por Mendez (2015) denominado evaluación técnica y económica del uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en vías Colombianas, el mencionado proyecto tiene como finalidad establecer una perspectiva acerca del uso de pavimentos asfálticos reciclados a partir de estudios realizados. De esta manera, el proyecto muestra el método cuantitativo y experimental donde se muestran las técnicas de reciclado tanto por el método de reciclado caliente como por el método de reciclado frío. Finalmente, los resultados mostraron que el reciclado en los casos donde ha sido utilizado ha traído un buen comportamiento y una reducción de costos considerable.

Arevalo, Jimenez, & Salazar (2018) llevan a cabo un proyecto denominado “Efecto del aceite quemado de motor en las características de mezclas asfálticas que contienen pavimento reciclado” En este estudio se planteó como objetivo general, analizar el efecto del aceite quemado de motor en diferentes porcentajes, aplicados a mezclas asfálticas que contienen pavimento reciclado. Cabe resaltar que la investigación se llevó a cabo a través de la metodología experimental y metodología científica, la cual se basó en la recopilación de datos para analizar y comparar entre otras su comportamiento dentro de un ambiente experimental, haciendo uso de los materiales, tanto los agregados vírgenes como el pavimento reciclado. Los resultados obtenidos en la mencionada investigación demuestran que ninguna de las mezclas con porcentajes de inclusión de WEO entre 4% y 4,5% cumple con las especificaciones generales de construcción de carreteras, en el artículo 450-13 de INVIAS 2013 para el tipo de mezcla MDC-19. Así pues, en el transcurso del estudio se recomendó hacer uso de una mayor inclusión de WEO en la mezcla para así llegar a un punto que cumpla con las especificaciones de la norma INVIAS.

Como estudio nacional se encuentra el artículo elaborado por Martínez (2017) el cual resume la experiencia del Programa Colombia Responde, financiado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), y desarrollado en los Departamentos de Caquetá, Meta, Tolima y Cauca entre 2011 y 2017. Este proyecto presentó como objetivo mejorar la gestión de la red vial veredal y convertirla en referencia para aplicar en municipios de características similares, adaptando en cada caso el esquema a las particularidades locales. Para implementar el esquema de manera organizada se efectuó un plan zonal para el área geográfica seleccionada, partiendo de inventarios de 100 kms de vías, por municipio, en promedio, llevados a cabo por ingenieros con experiencia en vías, consultores sociales, y asistencia comunitaria. Los formatos se diseñaron con las pautas señaladas por el Ministerio de Transporte y condujeron al establecimiento de la cantidad y estado de las obras existentes y la identificación de sitios con obras faltantes; se presupuestaron los trabajos separados por las fases señaladas antes, y se concluyó con la evaluación económica para priorización de los tramos de la red objetivo. Como resultados se obtuvo que la necesidad de atender la creciente demanda de mejores vías veredales fue el aliciente para el desarrollo de este programa, pues

por medio de esta infraestructura vial se pueden desarrollar actividades económicas lícitas, mejorar la calidad de vida de los pobladores en todos los aspectos, y consolidar zonas de convivencia en paz.

Por otra parte, Gallego (2016) lleva a cabo el estudio denominado “Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP”, en el cual presenta como objetivo evaluar el efecto del aceite quemado de motor en las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas en caliente que contienen material recuperado de pavimento asfáltico (RAP). En cuanto a los materiales y métodos empleados para el desarrollo de esta investigación fueron agregados vírgenes, RAP, cemento asfáltico, WEO y algunos insumos propios de cada uno de los ensayos realizados (por ejemplo, solventes). A continuación, son detallados el origen de los materiales usados. Finalmente, como resultados del estudio la adición de asfalto envejecido al asfalto nuevo produjo alteraciones en las propiedades analizadas, contribuyendo al aumento o la disminución de las magnitudes de estas. Además, la adición de WEO en las mezclas de ligante (asfalto nuevo y asfalto envejecido) modificó las magnitudes de todas las propiedades, de forma inversa al efecto producido por la presencia del asfalto envejecido, permitiendo alcanzar valores compatibles con un ligante compuesto únicamente con asfalto virgen.

Chavarro & Molina (2015) llevan a cabo el estudio “Evaluación de alternativas de pavimentación para vías de bajos volúmenes de tránsito” en el cual establecen como objetivo describir y evaluar alternativas de rehabilitación y mantenimiento para la capa de rodadura de vías terciarias; diferentes a la pavimentación con material de afirmado. Esta investigación tuvo en cuenta dos métodos para el cálculo del porcentaje óptimo de Hidróxido de calcio, por un lado, el método Eades y por el otro lado el método Mc Dowell. Finalmente el estudio demostró que las soluciones de pavimentación de vías de bajos volúmenes de tránsito están clasificadas, de acuerdo con sus características y con el grado de conocimiento en su aplicación y nivel de uso a nivel mundial, en tres grandes grupos así: Tecnologías universales, innovadoras y experimentales, siendo las primeras las de mayor aplicación y conocimiento desarrollado en cuanto a su aplicación y métodos de construcción; las innovadoras las que se

encuentran en estudio, pero su aplicación aún es limitada, y las últimas o experimentales, las alternativas que no se han explorado ni aplicado sino en forma limitada.

## **4 MARCO TEÓRICO**

### **ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE ENCAPSULAMIENTO DE DERIVADOS DE HIDROCARBUROS EN SUELOS, PARA SU APROVECHAMIENTO EN EL MANTENIMIENTO VIAL**

Jaramillo (2002) afirma que para finales del siglo XIX Dokuchaev (1886) había propuesto la definición de suelo desde una perspectiva pedológica como “aquellos horizontes de la roca que diaria o casi diariamente cambian sus relaciones bajo la influencia conjunta del agua, el aire y varias formas de organismos vivos y muertos”.

Haciendo alusión a la definición de suelos se encuentra Duque (2002) quien afirma que son los sedimentos no consolidados de partículas sólidas, fruto de la alteración de las rocas, o suelos transportados por agentes como el agua, hielo o viento con contribución de la gravedad como fuerza direccional selectiva, y que pueden tener materia orgánica. El suelo es un cuerpo natural heterogéneo.

Debido a la gran variedad de suelos que pueden encontrarse en la corteza terrestre es que se han desarrollado varios sistemas de clasificación para poder identificarlos, elaborados de acuerdo a la aplicación que se les da a los mismos. El clasificar un suelo consiste en agrupar al mismo en grupos y/o subgrupos de suelos que presentan un comportamiento semejante con propiedades ingenieriles similares.

Los suelos se dividen en clases según sus características generales. La clasificación se suele basar en la morfología y la composición del suelo, con énfasis en las propiedades que se pueden ver, sentir o medir, por ejemplo, la profundidad, el color, la textura, la estructura y la

composición química. La mayoría de los suelos tienen capas características, llamadas horizontes; la naturaleza, el número, el grosor y la disposición de éstas también es importante en la identificación y clasificación de los suelos. Los suelos que comparten muchas características comunes se agrupan en series y éstas en familias. Del mismo modo, las familias se combinan en grupos, y éstos en subórdenes que se agrupan a su vez en órdenes.

#### **4.1 Clasificación de suelos**

La clasificación de suelos consiste, en incluir un suelo en un grupo que presenta un comportamiento semejante, de modo que la correlación de ciertas propiedades con un grupo de un sistema de clasificación que es generalmente un proceso empírico, donde las características más utilizadas son la granulometría y la plasticidad. Desde esta lógica, se afirma que el procedimiento analítico mediante el que se separan las partículas de una muestra de suelo se le llama análisis mecánico o granulométrico y consiste en determinar la distribución de los tamaños de las partículas. Este análisis proporciona datos de la clasificación, morfología y génesis del suelo, así como, de las propiedades físicas del suelo como la permeabilidad, retención del agua, plasticidad, aireación, capacidad de cambio de bases, etc.

De acuerdo con Leal (2011) el suelo se puede clasificar como cohesivo o no cohesivo, grueso o de grano muy fino, no obstante, esta manera sería muy general, por lo que de manera más específica se menciona que una de las técnicas más usadas para clasificar el suelo es teniendo en cuenta el tamaño de sus partículas, así pues el suelo es intrínsecamente un sistema de partículas, en donde se muestran las proporciones entre arena, limo y arcilla, puesto que cada tipo de partícula puede influir en las propiedades físicas químicas y biológicas del suelo.

En este sentido, Lambe & Withman (2004) afirman que la distribución de las partículas por tamaño en una muestra de suelo se expresa mediante un gráfico que relaciona el porcentaje de partículas de tamaño inferior, en peso, con cada diámetro en mm. (ver imagen). Estableciendo la composición de la muestra de suelo de la siguiente manera:

- Grava 2%,
- Arena 85%,

- Limo 12%,
- Arcilla 1%

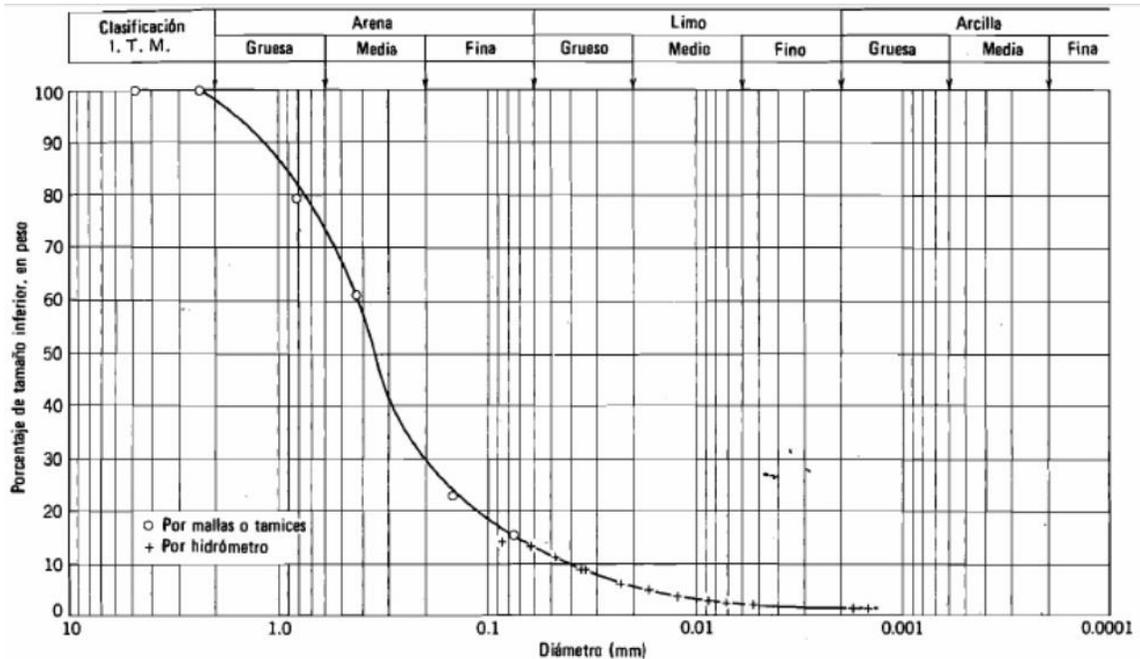


Ilustración 1. curva granulométrica de un suelo. Lambe & Witman (2004)

Es importante mencionar que según Lambe & Withman (2004) la precisión de las curvas granulométricas de suelos finos es más discutible que la de las curvas correspondientes a suelos gruesos. Los tratamientos químicos y mecánicos que reciben los suelos naturales antes de realizar un análisis granulométrico (en especial en el método del hidrómetro o areómetro) suelen dar lugar a unos tamaños efectivos que son muy diferentes de los existentes en el suelo natural. Incluso aunque pudiera obtenerse una curva granulométrica exacta, su valor solamente sería limitado. Si bien el comportamiento de un suelo granular puede relacionarse frecuentemente con la distribución granulométrica, el comportamiento de un suelo cohesivo suele depender mucho más de la historia geológica y de su estructura que del tamaño de las partículas.

Según Duque (2002) como componentes del suelo se encuentran el aire y el agua como elementos constitutivos, además de los sólidos y gases. Los guijarros son fragmentos de roca

con diámetros  $\phi > 2$  cm. Las gravas tienen dimensiones de 2 cm a 2 mm. La arena gruesa desde  $0,2\text{cm} < \phi < 0,2$  mm; la arena fina, entre  $0,2$  mm  $< \phi < 0,005$  mm. Por otra parte, se hace referencia al limo, el cual se define como el suelo ligeramente plástico o no plástico y que presenta poca o ninguna resistencia cuando se seca al aire, este se conoce según Cruz (2011) como un suelo de grano fino, o la proporción fina de un suelo, cabe aclarar que se llama limo a las partículas con diámetro aparente entre 0,05 mm y 0,005 mm.

#### **4.1.1 Componentes y fracciones del suelo**

##### **4.1.1.1 Granulometría en fracciones gruesas**

En lo que respecta a la granulometría con fracción de suelo gruesa se puede mencionar a tres elementos principales que la componen: en primer lugar, se hace referencia a los bloques y los boleos, que corresponden a elementos muy estables utilizados en terraplenes, balastos y para estabilizar taludes, donde, teniendo en cuenta el tamaño y peso se encuentra que su presencia en los depósitos naturales de suelo les permite mejorar la estabilidad de las cimentaciones; en segundo lugar, se menciona los elementos Grava (G) y arena (S), los que según Lambe & Withman (2004) tienen en esencia las mismas propiedades aunque en grados diferentes, por otro lado, son fáciles de compactar, resultan poco afectadas por la humedad y no están sujetas a la acción de la helada, además, las primeras generalmente son más estables frente al flujo de agua y tienen más resistencia a la erosión y a la tubificación que las arenas, cabe resaltar que las arenas y las gravas bien guardadas son menos permeables y por supuesto más estables que aquellas que no se han guardado correctamente.

##### **4.1.1.2 Granulometría en fracciones finas**

Por otra parte, se hace referencia a las fracciones finas en granulometría, donde se menciona a la arcilla como un elemento inestable, particularmente cuando aumenta la humedad, con tendencia a fluir cuando está saturado, Lambe & Withman (2004) mencionan que este elemento es relativamente impermeable, difícil de compactar, susceptible ante las heladas, fácilmente erosionable y sujeto a la tubificación y ebullición. Además, se menciona como otro elemento de fracciones finas a la arcilla quien se caracteriza por la cohesión o resistencia cohesiva, que aumenta la humedad, con tendencia a fluir cuando está saturado, este mismo autor menciona que esta propiedad tiene permeabilidad baja, es difícil de compactar en estado húmedo e imposible de drenar por métodos tradicionales. Las propiedades de este

componente dependen no solo del tamaño y forma, sino también por su componente mineral. Y finalmente, este autor menciona la materia orgánica

#### **4.1.2 Límites de Atterberg**

Los límites de Atterberg permiten conocer o identificar de forma sencilla, algunas de las propiedades de los suelos. De acuerdo con lo planteado por Sembenelli (1996) los límites de consistencia se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo de su propia naturaleza y la cantidad de agua que contengan. Así, un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico y líquido o viscoso. Lambe & Withman (2004) mencionan que los índices y los límites de Atterberg han constituido unos valores muy útiles para realizar la caracterización de los conjuntos de partículas de suelos. En este sentido, los límites se fundamentan en el concepto de que un suelo de grano fino tan solo puede existir en cuatro estados de consistencia de acuerdo a su humedad.

En la actualidad, Santín (2005) los límites de Atterberg son las determinaciones que con más asiduidad se practican en los laboratorios de Mecánica del Suelo. Su utilidad deriva de que, gracias a la experiencia acumulada en miles de determinaciones, es suficiente conocer sus valores para poderse dar una idea bastante clara del tipo de suelo y sus propiedades. Como, por otra parte, se trata de determinaciones sencillas y rápidas, permiten una pronta identificación de los suelos y la selección adecuada de muestras típicas para ser sometidas a ensayos más complicados. Estos límites conjuntamente con el análisis granulométrico pertenecen al tipo de ensayos de identificación, debido a que el análisis granulométrico permite conocer la magnitud cuantitativa de la fracción fina, mientras que los límites de Atterberg permiten conocer su calidad, completando así el conocimiento del suelo.

#### **4.2 Propiedades físicas y químicas de los suelos**

Acorde con la afirmación de que el suelo comprende una mezcla de materiales sólidos, líquidos (agua) y gaseosos (aire). Se encuentra que la proporción de los componentes del mismo determina una serie de propiedades que se conocen como propiedades físicas o mecánicas del suelo: textura, estructura, color, permeabilidad, porosidad, drenaje, consistencia, profundidad efectiva

#### **4.2.1 Textura**

De acuerdo con Grisales (2014 ) afirma que la textura de un suelo es la proporción de los tamaños de los grupos de partículas que lo constituyen y está relacionada con el tamaño de las partículas de los minerales que lo forman y se refiere a la proporción relativa de los tamaños de varios grupos de partículas de un suelo. Esta propiedad ayuda a determinar la facilidad de abastecimiento de los nutrientes, agua y aire que son fundamentales para la vida de las plantas.

La textura del suelo según Grisales (2014) se encuentra formada por tres fases, tanto la fase sólida, como líquida y gaseosa, cabe mencionar que la fase sólida, la cual constituye cerca del 50% de volumen de la mayor parte de los suelos superficiales y se compone de una mezcla de partículas inorgánicas y orgánicas cuyo tamaño y forma varían considerablemente. La textura del suelo se considera una propiedad básica porque los tamaños de las partículas minerales y la proporción relativa de los grupos por tamaños varían considerablemente entre los suelos, pero no se alteran fácilmente en un determinado suelo.

#### **4.2.2 Estructura**

Por otra parte, Grisales (2014) afirma que la estructura es la forma en que las partículas del suelo se reúnen para formar agregados. De acuerdo a esta característica se distinguen suelos de estructura esferoidal (agregados redondeados), laminar (agregados en láminas), prismática (en forma de prisma), blocosa (en bloques), y granular (en granos). La estructura del suelo se define por la forma en que se agrupan las partículas individuales de arena, limo y arcilla. Cuando las partículas individuales se agrupan, toman el aspecto de partículas mayores y se denominan agregados.

El tipo de estructura describe la forma o configuración de los agregados individuales de la siguiente manera:

- En primer lugar, el autor menciona que se encuentran las estructuras granulares y migajosas que corresponden a las partículas individuales de arena, limo y arcilla agrupadas en granos pequeños casi esféricos. El agua circula muy fácilmente a través de esos suelos. Por lo general, se encuentran en el horizonte A de los perfiles de suelos

- En segundo lugar, se hace referencia a las estructuras en bloques o bloques subangulares, que son partículas de suelo que se agrupan en bloques casi cuadrados o angulares con los bordes más o menos pronunciados. Los bloques relativamente grandes indican que el suelo resiste la penetración y el movimiento del agua. Suelen encontrarse en el horizonte B cuando hay acumulación de arcilla;
- En tercer lugar, se hace alusión a las estructuras prismáticas y columnares que son las partículas de suelo que han formado columnas o pilares verticales separados por fisuras verticales diminutas, pero definidas. El agua circula con mayor dificultad y el drenaje es deficiente. Normalmente se encuentran en el horizonte B cuando hay acumulación de arcilla;
- Y finalmente, se menciona la estructura laminar que se constituye de partículas de suelo agregadas en láminas o capas finas que se acumulan horizontalmente una sobre otra. A menudo las láminas se traslapan, lo que dificulta notablemente la circulación del agua. Esta estructura se encuentra casi siempre en los suelos boscosos, en parte del horizonte A y en los suelos formados por capas de arcilla

#### **4.2.3 Permeabilidad**

Por otra parte, se reconoce la permeabilidad como una propiedad física del suelo que según Duque (2002) es la facultad que tiene el suelo de transmitir el agua y el aire y es una de las cualidades más importantes que han de considerarse para la piscicultura. De modo que, se acoge la afirmación de que mientras más permeable sea el suelo, mayor será la filtración. Algunos suelos son tan permeables y la filtración tan intensa que para construir en ellos cualquier tipo de estanque es preciso aplicar técnicas de construcción especiales. En un volumen de esta colección que aparecerá próximamente se ofrecerá información sobre dichas técnicas.

Para determinar la permeabilidad del suelo en su totalidad, se debe estudiar cada horizonte por separado. La permeabilidad del suelo se relaciona con su textura y estructura. El tamaño de los poros del suelo reviste gran importancia con respecto a la tasa de filtración (movimiento del agua hacia dentro del suelo) y a la tasa de percolación (movimiento del agua

a través del suelo). El tamaño y el número de los poros guardan estrecha relación con la textura y la estructura del suelo y también influyen en su permeabilidad.

#### **4.2.4 Porosidad**

Por otra parte, Grisales (2014) concibe que como efecto de la textura y estructura del suelo se tiene porosidad del mismo, es decir su sistema de espacios vacíos o poros. Los poros en el suelo se distinguen en: macroscópicos y microscópicos. Los primeros son de notables dimensiones, y están generalmente llenos de aire, en efecto, el agua los atraviesa rápidamente, impulsada por la fuerza de la gravedad. Los segundos en cambio están ocupados en gran parte por agua retenida por las fuerzas capilares. Los terrenos arenosos son ricos en macro poros, permitiendo un rápido pasaje del agua, pero tienen una muy baja capacidad de retener el agua, mientras que los suelos arcillosos son ricos en micro poros, y pueden manifestar una escasa aeración, pero tienen una elevada capacidad de retención del agua.

#### **4.2.5 Consistencia**

Es la característica física que gobierna las fuerzas de cohesión-adhesión, responsables de la resistencia del suelo a ser moldeado o roto. Dichas fuerzas dependen del contenido de humedades por esta razón que la consistencia se debe expresar en términos de seco, húmedo y mojado. Se refiere a las fuerzas que permiten que las partículas se mantengan unidas; se puede definir como la resistencia que ofrece la masa de suelo a ser deformada o amasada. Las fuerzas que causan la consistencia son: cohesión y adhesión.

#### **4.2.6 Capacidad de intercambio de cationes, CIC**

Dentro del cambio iónico el más importante y mejor conocido es la capacidad de intercambio catiónico. Según Lambe & Withman (2004) en el suelo son varios los materiales que pueden cambiar cationes, los principales son las arcillas y la materia orgánica (los dos materiales presentan propiedades coloidales). Una suspensión o dispersión coloidal es un sistema físico que está compuesto de un material en forma líquida o gaseosa, en el cual hay inmersas partículas, por lo general sólidas, de pequeño tamaño, en principio, del orden de las micras. Así pues, Perez (2008) menciona que las causas de la capacidad de cambio de cationes de las arcillas son las sustituciones atómicas dentro de la red, la existencia de bordes (superficies descompensadas), la disociación de los OH de las capas basales y los enlaces de Van der

Waals, que es un tipo de forma electrostática y se establece entre dos grupos no cargados. Son muy débiles individualmente, pero son importantes cuando su número es elevado.

### **4.3 Pavimento Asfáltico Reciclado**

Dadas las características de la red vial de la mayoría de países latinos incluida Colombia, el crecimiento del transporte y la necesidad de encontrar nuevos métodos y tecnologías que permitan una evolución y mejoramiento del estado de las vías de bajos volúmenes de tránsito; diferentes entidades se han dedicado a la investigación de tecnologías y elaboración de productos que buscan soluciones efectivas y a bajo costo, para la protección de las capas de rodadura de las vías de tercer nivel, incorporando en dichas soluciones factores de economía, aprovechamiento de recursos renovables y amigables con el medio ambiente y el aumento de la calidad y la resistencia de la superficie vial.

De acuerdo con Alarcon (2007) el pavimento de una carretera está sujeto a la acción continua del tráfico y de la meteorología. Estos dos factores, junto con el envejecimiento natural de los materiales, hacen que el firme sufra un proceso de progresivo deterioro. Este envejecimiento y deterioro del firme conlleva una disminución paulatina en los niveles de seguridad y confort del tráfico, que al sobrepasar ciertos valores hacen necesaria una operación de conservación. Las técnicas de conservación de firmes pueden dividirse en técnicas clásicas y técnicas de reciclado. Ambas técnicas pueden resultar eficaces ante un mismo problema.

El reciclaje en la construcción de pavimentos ha sido una temática de gran importancia en el tema de los caminos sostenibles. La posibilidad de reducir la cantidad de materia prima y al mismo tiempo, el espacio requerido para el desecho de materiales de desecho, han sido las principales razones por las cuales este tema ha estado dentro del estado del arte de las investigaciones en materiales para pavimentos.

Entrando en materia de los métodos de pavimentación a través de los métodos de reciclado, se menciona la técnica de pavimento asfáltico reciclado (RAP) la universidad de costa rica el consiste en el término que se les da a los materiales removidos para la reutilización de la capa de pavimento existente en la vía que contienen asfalto y agregados. Estos agregados se

generan cuando los pavimentos son removidos para la rehabilitación al nuevo asfalto ya que cuando se tritura y tamiza el RAP se convierte en un agregado de alta calidad.

Según estudios de la Universidad de Costa Rica (2017) las propiedades del RAP dependen en gran parte de las propiedades de los materiales constituyentes y el tipo de mezcla asfáltica (capa de rodadura, capa de base, etc.). Puede haber diferencias sustanciales entre mezclas asfálticas con respecto a la calidad del agregado, tamaño y consistencia.

Loria (2016) por su parte, afirma que el material reciclado RAP está compuesto por dos tipos de materiales, el agregado mineral (a-RAP) y el cemento asfáltico residual, que, por el efecto del tiempo de exposición al oxígeno y demás condiciones medioambientales, se encuentra muy oxidado. Algunos investigadores han decidido no considerar el efecto que el cemento asfáltico posee en el agregado, llamando a este material “roca negra”, otros, sin embargo, se han dedicado a evaluar el efecto del a-RAP en la granulometría de la mezcla asfáltica y el nivel de mezclado del asfalto RAP oxidado que aún tiene el agregado y el asfalto virgen que es necesario agregar, tema que aún es de discusión entre los expertos.

Durante su procesamiento, virtualmente todo el RAP es triturado a un tamaño de 38 mm o menos, con un tamaño máximo permitido de 51 mm o 63 mm. La mayoría de fuentes de RAP son agregados gruesos bien distribuidos, comparables a, o ligeramente más finos y variables que los agregados triturados naturales

#### **4.4 Contaminación de suelos en explotaciones petroleras**

El manejo inadecuado de los materiales y residuos peligrosos ha generado a nivel mundial, un problema de contaminación de los suelos y cuerpos de agua. Entre las más severas contaminaciones destacan las que se produjeron y todavía se producen a causa de la extracción y el manejo del petróleo en todos los países productores de hidrocarburos en América Latina; principalmente en Venezuela, Brasil, México, Argentina, y Ecuador. Dichas contaminaciones del suelo han provocado un deterioro creciente de las fuentes de abastecimiento de agua potable, ya sea superficiales o subterráneas. Lo más complejo de esta problemática es que los lugares contaminados por hidrocarburos no era una preocupación

hasta hace pocos años, por lo que se desconocía el grado de dificultad y el gran costo que esto tendría en la remediación de los suelos y cuerpos de agua contaminados.

Es importante mencionar que los hidrocarburos son compuestos de gran abundancia en la naturaleza integrados por átomos de carbono e hidrógeno. Éstos según Riesco (2012) se clasifican según la estructura de los enlaces existentes entre los átomos de carbono que componen la molécula (Web Griem W. & Griem-Klee S). Los hidrocarburos estipulan una actividad económica de primera importancia a nivel mundial ya que son los principales combustibles fósiles, además sirven de materia prima para todo tipo de plásticos, ceras y lubricantes. Pero son estas formas de elevado valor económico (petróleo y derivados) las responsables de graves problemas de contaminación en el medio natural.

Según (Velasquez, 2017) los hidrocarburos son conocidos como sustancias naturales provenientes de algas acuáticas establecidas durante millones de años, gracias a la materia orgánica originada y formada en la superficie de la tierra, proceso iniciado por fotosíntesis, la cual como parte del ciclo del carbono; y a través del tiempo geológico ha producido grandes cantidades de materia fósil. Tales sustancias se encuentran conformadas principalmente de compuestos con diferente solubilidad, volatilidad, y debido a que son formadas únicamente por átomos de carbono e hidrógeno son compuestos orgánicos susceptibles para ser biodegradados, ya sea eliminados o transformados en sustancias menos tóxicas tanto en suelos como en cuerpos de agua contaminados, permitiendo de este modo el análisis de estudios con el fin de diseñar estrategias fitorremediadoras para contribuir con su degradación y por ende con la descontaminación de los suelos y agua.

Durante las operaciones de explotación, extracción y transporte los materiales pueden contaminar el medio ambiente circundante a través de filtraciones accidentales o deliberadas. De esta manera, durante las últimas décadas los hidrocarburos han dado lugar a una amplia liberación de contaminantes en el medio ambiente. En este sentido Pellini (2005) los hidrocarburos tienden a esparcirse desde la superficie del suelo hacia el interior, alcanzando niveles freáticos de aguas subterráneas, de modo que al infiltrarse en el suelo se adhieren a partículas del mismo modificando la movilidad de este, cabe aclarar que, los compuestos de alto peso molecular tienen una menor movilidad.

## 5 METODOLOGÍA

### 5.1 Nivel de estudio

El presente proyecto se enmarcó en el paradigma de investigación cuantitativo en el que se llevaron a cabo procedimientos matemáticos para la caracterización de los suelos y los porcentajes de mezclas con los componentes provenientes de los hidrocarburos

### 5.2 Tipo de estudio

La investigación se llevó a cabo mediante el tipo de estudio exploratorio y experimental entre las variables y los componentes mencionados

### 5.3 Caracterización de suelos

La caracterización del suelo incluye el análisis granulométrico, límites de Atterberg, proctor modificado, y ensayo de CBR.

Con el fin de encontrar un suelo adecuado para la realización de los experimentos físicos mencionados en los objetivos de este trabajo, se determinó realizar el análisis granulométrico respectivo a tres tipos de suelo para elegir el material que tuviese similares proporciones entre finos y arenas. Los suelos utilizados para el análisis granulométrico son:

suelo	Ubicación	Peso (g)
1	Cantera PAVIANDI- Vía Curos	2186
2	Vía parqueaderos UPB Bucaramanga	1500
3	Talud UPB Bucaramanga	1500

Tabla 1. Suelos utilizados en el análisis granulométrico. Elaboración: Fuente propia.

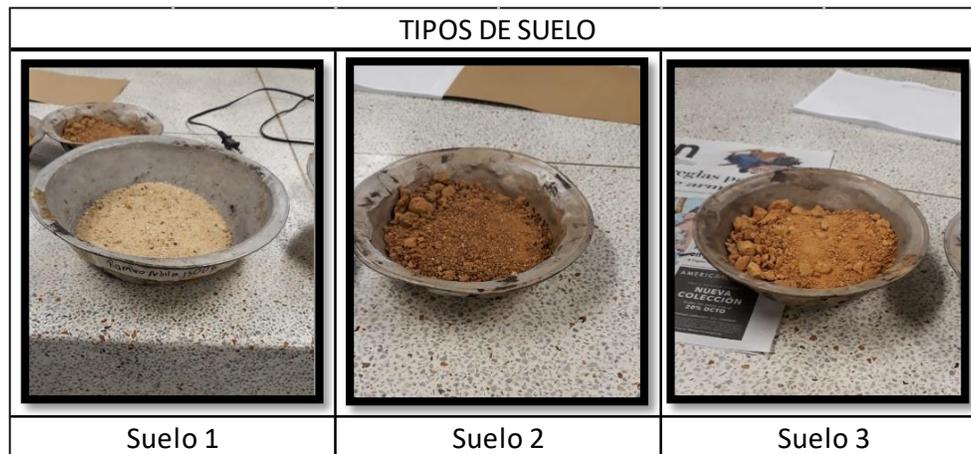


Ilustración 1. Tipos de suelo.

Fuente: Propia.

### 5.3.1 Análisis granulométrico de los suelos.

Se realizó el análisis granulométrico específico de cada muestra de suelo para determinar la cantidad de los diferentes tamaños de las partículas del material por medio de tamizado. Estos valores son indispensables para controlar los porcentajes de contaminantes que puede ser incorporado para su respectivo mezclado.

La muestra utilizada en cada análisis granulométrico es regida bajo la norma INV E-123-13, y la porción de suelo depende del tamaño máximo de partícula para que sea representativa.

La muestra fue secada al horno a temperatura  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$  y se registró el peso en el respectivo formato. Una vez se retiró del horno, se lavó la muestra sobre el tamiz No 200 y se llevó nuevamente al horno, registrando un nuevo peso seco 2. Posteriormente, el material se pasó por una serie de tamices ubicados en orden descendente por tamaño de abertura mientras que se sacuden el tamiz o tamices con movimientos verticales y laterales en forma circular para asegurar que la muestra se mantenga en movimiento continuo sobre las mallas, y de esta manera determinar la masa retenida en cada tamiz en una balanza de sensibilidad de 0,1%.



*Ilustración 2. Serie de tamices.*

Fuente: Propia

Una vez se obtuvo los pesos retenidos en cada uno de los tamices se realizó los respectivos cálculos para conocer el porcentaje de material que pasa en cada uno de ellos y así, se realizó una gráfica o curva granulométrica en donde el eje vertical será el porcentaje que pasa en cada tamiz en escala natural y en el eje horizontal el tamaño de las partículas o de los tamices en escala logarítmica. Con la gráfica se determinó el porcentaje de gravas, arenas y finos presentes en la muestra y además se calcularon los coeficientes propuestos por Allen Hazen: Coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) y Coeficiente de curvatura ( $C_c$ ).

*Ecuación 1 Coeficiente de uniformidad*

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

*Ecuación 2. coeficiente de curvatura.*

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

En donde,  $D_{10}$  es el tamaño de partículas para el cual el 10% del material es más fino que ese tamaño,  $D_{30}$  y  $D_{60}$  son los tamaños para los cuales el 30% y 60% del material, respectivamente son más finos que ese tamaño.

Por medio de las siguientes ilustraciones obtenidas en diferentes libros de mecánica de suelos, se determinó la clasificación de cada suelo, siguiendo los criterios de gradación:

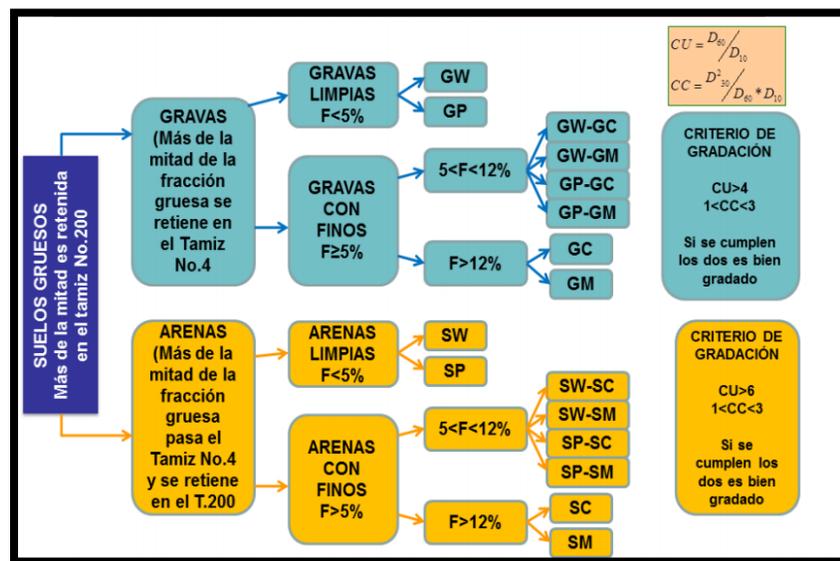


Ilustración 3. Clasificación de suelo

Fuente: INGEAS S.A.S

DIVISIÓN MAYOR		SÍMBOLO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO		
<b>SUELO DE PARTICULAS GRUESAS</b> Más de la mitad del material es retenido en la malla N° 200  La partícula de 0,075mm de diámetro (la malla N° 200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.	<b>GRAVAS</b> Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla N° 4	GW	Gravas bien gradadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	Coeficiente de uniformidad Cu: mayor de 4. Coeficiente de curvatura Cc: entre 1 y 3  $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$		
			GP		Grava mal gradadas, mezclas de gravas y arena con poco o nada de finos	
		GM	p d		Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo	NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW  Límites de atterberg debajo de la "línea A" o I.P. Menor que 4  Límites de atterberg arriba de la "línea A" con I.P. Mayor que 7  $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \text{ mayor de } 6$ $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \text{ entre } 1 \text{ y } 3$
			u			
		GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava arena y arcilla			
		ARENA LIMPIA (Poco o nada de partículas finas)	SW		Arenas bien graduadas, arenas con gravas, con poco o nada de finos	
	SP			Arenas mal graduadas, arenas con gravas, con poco o nada de finos		
	ARENA CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas)	SM	s d	Arenas limosas, mezclas de arenas y limo		
			u	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla		
	SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla				

PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE %CM COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA N° 4.  
 DETERMINESE LOS PORCENTAJES DE GRAYA Y ARENA DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA, DEPENDIENDO DEL PORCENTAJE DE FINOS (fracción que pasa por la malla N° 200) LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE:  
 Menos del 5%: GW, GP, SW, SP; Más del 12%: GW, GP, SW, SP; Más del 12%: GW, GP, SW, SP; Más del 12%: GW, GP, SW, SP.

Ilustración 4. Tabla sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S)

Fuente: Bowles, Joseph. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil.

### 5.3.2 Límites de Atterberg o de consistencia.

Este ensayo se realizó con base a la norma INV-125-13 y INV-126-13; el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad se usan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos debido a que se pueden encontrar en diferentes estados dependiendo del contenido de agua.

El procedimiento empleado es el siguiente, se tomó aproximadamente 120 gramos del suelo que pase por el tamiz No. 40 y se mezcló con agua hasta obtener una pasta suave y uniforme. Luego se colocó la muestra en la cazuela de Casagrande de forma que esta ocupe 1 cm de espesor en la copa como se muestra en la siguiente figura.



*Ilustración 5. Ensayo límite líquido*

Fuente: Propia

Una vez sea puesta la muestra sobre la cazuela, se hizo un corte con la ayuda de un rasador especial en la parte central de la muestra. Se encendió el equipo y se contaron el número de golpes hasta que la ranura se cerró completamente en una de sus partes. Se tomó una porción de la muestra que se cerró y se lleva al horno para conocer su correspondiente humedad. Este procedimiento se realizó mínimo tres veces para conocer tres humedades y poder graficar el No de golpes en escala logarítmica Vs el % de humedad en el eje vertical. El límite líquido se halló cortando la gráfica con 25 golpes.

El límite plástico e índice de plasticidad según INV-126-13, se tomó material que pase por el tamiz No. 40 agregando agua hasta obtener una consistencia similar a la del límite líquido y se hizo una bolita de aproximadamente 20gr. Esta se dividió en dos y se hicieron rollos con un diámetro aproximado de 3mm hasta que estos se desmoronaron o agrietaron.



Ilustración 6. Ensayo límite plástico

Fuente: Propia

Se introdujo en una capsula y se llevó al horno para posteriormente tomar la humedad. Este procedimiento se hizo con las dos partes de la bolita de suelo y se promedió las humedades para de esta manera hallar el límite plástico. El índice de plasticidad es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico y determina los valores de plasticidad del suelo (Alta, media o baja plasticidad).

Los parámetros de correlación más útiles, obtenidos a partir de la determinación de los límites de Atterberg son: el índice de plasticidad IP, el índice de liquidez IL, el índice de contracción IC.

*Ecuación 3. Índice de plasticidad*

$$IP = LL - LP$$

Donde LL es el límite líquido y LP el límite plástico.

*Ecuación 4. Índice de liquidez*

$$IL = \frac{W_n - LP}{IP}$$

Donde  $W_n$  es el contenido de humedad natural, LP es el límite plástico y IP es el índice de plasticidad.

Ecuación 5. Índice de contracción

$$IC = LP - LC$$

Donde LP es el límite plástico y LC es el límite de contracción.

Ecuación 6. Límite de contracción

$$LC = w - ((Vh - Vs) * Yw) / ms * 100$$

Donde LC está en %, w es la humedad del suelo %, Vh es el volumen del suelo húmedo cm<sup>3</sup>, Vs es el volumen del suelo seco cm<sup>3</sup>, Yw es la densidad del agua g/cm<sup>3</sup>, y ms es la masa de suelo seco g.

En la siguiente tabla se presenta la calificación del rango de plasticidad del suelo de acuerdo con el valor de IP.

PLASTICIDAD	DESCRIPCION DEL SUELO	RANGO IP
NULA	Limo	0 - 3
BAJA	Limo con trazas de arcilla	4 - 15
MEDIA	Limo arcilloso Arcilla limosa Arcillas y limos orgánicos	16 - 30
ALTA	Arcilla limosa Arcilla	> 31

Tabla 2. Clasificación del rango de plasticidad

Fuente: Holtz & Kovacs. Introducción a la ingeniería de geotecnia.

Así mismo, por medio de las siguientes ilustraciones encontradas en los diferentes libros de geotecnia y/o mecánica de suelo, se determinó el tipo de suelo una vez realizado el ensayo de límites de Atterberg.

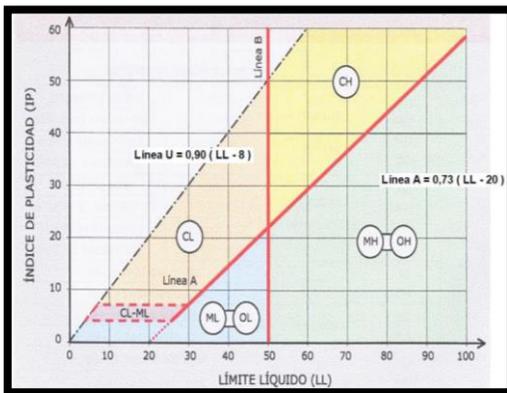


Ilustración 7. Carta de plasticidad

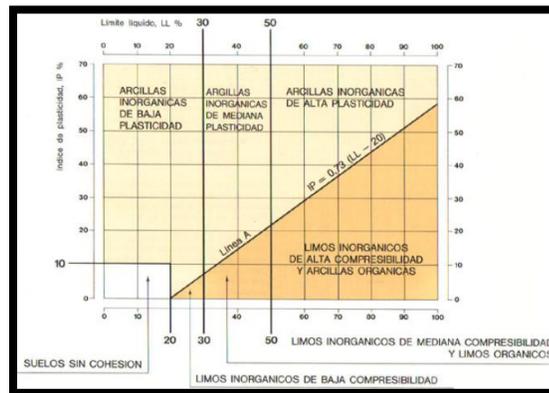


Ilustración 8. gráfico de plasticidad de los suelos de grano fino.

### 5.3.3 Relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación)

Este ensayo se realizó con base a la norma INV-142-13; se toma 6000 gr que pasa por el tamiz  $\frac{3}{4}$  del material ya seleccionado de acuerdo con su granulometría y se va agregando agua dependiendo de la humedad. Se colocó 5 capas dentro de un molde previamente pesado y con sus dimensiones conocidas como se observa en la siguiente fotografía:



*Ilustración 9. Ensayo Proctor modificado*

Fuente: propia.

Cada capa fue sometida a 56 golpes de un martillo de 10lbf que cae de una altura de 18". Una vez compactado, se retiró el collarín y se resanó la muestra compactada como se observa para posteriormente pesarla.



*Ilustración 10. Muestra compactada - ensayo Proctor modificado*

Fuente: propia

Se soltó la muestra compactada y se sacó una porción dentro de una capsula previamente pesada, se registró el peso y se llevó al horno para determinar el peso unitario seco resultante.



*Ilustración 11. Muestra de suelo + capsula - ensayo Proctor modificado*

Fuente: propia

El procedimiento se repitió cada vez aumentando con un porcentaje de agua hasta que el peso del molde más suelo sea menor que el anterior. Se realizó una curva que relacione las humedades con los respectivos pesos unitarios secos obtenidos. Esta curva, en su vértice determina la humedad óptima y el peso unitario seco máximo.

#### **5.3.4 CBR de los suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada.**

Este ensayo se realizó con base a la norma INV-148-13; se tomó 6000 g de suelo que pase por el tamiz  $\frac{3}{4}$ ". Si existían partículas retenidas en dicho tamiz, se debía reemplazar por una cantidad igual en masa para completar los 6000 gr de suelo.

Una vez se obtuvo la humedad óptima tomada del ensayo de Proctor modificado se tomaron los datos de CBR realizando 3 especímenes para desarrollar la curva de compactación ya que cada uno deberá ser penetrado. Todas las compactaciones se realizaron en moldes de CBR con las relaciones entre el contenido de agua y el peso unitario seco para 10 golpes, 25 golpes y 56 golpes por capa de compactación (5 capas).



*Ilustración 12. Moldes de CBR.*

Fuente: propia

Se coloca a cada molde unas pesas y se lleva a inmersión en donde se realiza una toma inicial de expansión.



*Ilustración 13. Molde en inmersión - ensayo CBR*

Fuente: propia

Este procedimiento se realizó durante los siguientes 3 (tres) días hasta que las muestras se sacan del agua con las mismas pesas de sobrecarga. Es conveniente colocar una pesa anular sobre la muestra, para ellos se llevó el molde a la prensa en donde se colocó la pesa anular y luego el pistón de penetración a través del orificio de la pesa. Enseguida se colocó el resto de las pesas alrededor del pistón.

Se aplicó una carga de 44 N (10lbf) para que el pistón se asiente. Se montó el dial medidor de manera que se pueda medir la penetración del pistón y seguidamente, se sitúan en ceros los diales medidores.

Se aplicó la carga sobre el pistón de penetración mediante el gato o mecanismo correspondiente de la prensa, buscando producir una velocidad de penetración uniforme de 1,27 mm/min. Se anotaron las lecturas de la carga para las siguientes penetraciones del pistón dentro del suelo: 0,64mm (0,025”), 1,27mm (0,050”), 1,91mm (0,075”), 2,54mm (0,100”), 3,18mm (0,125”), 3,81mm (0,150”), 5,08mm (0,200”), 6,35mm (0,250”), 7,62mm (0,300”), 10,16mm (0,400”), 12,70mm (0,500”).



*Ilustración 14. Molde sometido a una carga mediante mecanismo correspondiente de la prensa.*

Fuente: propia

Se desmontó el molde de la prensa y si el espécimen fue sometido previamente a inmersión, se procedió a tomar una muestra para determinar su humedad, de los 25mm (1”) superiores, en la zona próxima donde se hizo la penetración. Su masa debe ser aproximadamente de 100g para grano fino y 500g si es granular.

#### **5.4 Diseño del modelo experimental**

Con el fin de desarrollar un modelo de bajo costo para conocer la conductividad hidráulica de diferentes suelos mediante carga variable de agua, surgió la idea de implementar un sistema con tubería PVC para diseñar un experimento que permita medir la permeabilidad de cada suelo el cual estará mezclado con residuos de hidrocarburos.

A continuación, se ilustra cada una de las partes utilizadas para el ensamble del modelo experimental:

LISTADO DE MATERIALES		
		
Tubo pvc 2" presión	Tubo pvc 1" presión	Codo pvc 2" presión
		
Codo pvc 1" presión	Unión pvc 2" presión	Reducción pvc de 2" a 1" con buje 1" presión
		
Válvula de bola 1" pvc lisa presión	Buje pvc 1" presión	Llave terminal plástico 1/2"
		
Collarín de derivación 2" con inserto metálico 1/2"	Rejilla sifón plástico 2"	Manguera transparente de 2"

Ilustración 15. Materiales del modelo para el ensayo de conductividad hidráulica.

Fuente: propia

## 5.5 Conductividad hidráulica

Conocer las propiedades hidráulicas del suelo, permite evaluar los procesos erosivos de determinado suelo, así como la contaminación. Por esta razón se realizó un modelo de permeámetro de carga variable con materiales de bajo costo, con objetivo de hallar un valor ( $k$ ), la cual describe la facilidad con la cual los poros del suelo permiten el flujo del agua. Este ensayo se realizó en la condición más crítica que es cuando el suelo está completamente saturado.

El ensayo consistió en tomar los cilindros de suelo tomados en campo con sus características previamente conocidas, se colocó sobre la rejilla de nuestro modelo de permeámetro una tela la cual permitía que el agua fluyera libremente y el suelo permanezca en el cilindro. Posteriormente se procedió a saturar el suelo y nivelar el agua en todo el modelo como se observa en la siguiente imagen:



Ilustración 17. Cilindro de muestra de suelo saturado

Fuente: propia.



Ilustración 16. Modelo de permeámetro nivelado en sus extremos.

Fuente: propia

Como se observa en la ilustración número 15 y 16, la muestra de suelo está completamente saturada y así mismo, en el otro extremo del modelo el agua está totalmente nivelada con la muestra del suelo saturado para iniciar con el ensayo.

Se instaló la manguera transparente de 2'' y de aproximadamente 2m de longitud sobre la muestra de suelo y se comenzó a llenar con agua en cantidades de 500ml, 1000ml y 1500ml.

Se abrió la válvula de bola e inmediatamente se encendió el cronómetro para medir los tiempos en que el agua fluye por todo el modelo hasta salir por una llave de 1/2'' que se encuentra en uno de sus extremos. Cada vez que disminuya la lámina de agua 500ml se anotaba el tiempo transcurrido.



*Ilustración 18. Ensayo permeámetro en ejecución*

Fuente: propia

Una vez evacuado los 1500ml, se guardó esta agua en botellas plásticas conociendo su volumen, a la espera de que las partículas que allí se encuentren tomen su lugar en aproximadamente 15 o 22 días después en donde se analiza si el agua filtrada se observa con partículas de suelo o grasas producto de las mezclas del suelo con los 3 contaminantes estudiados provenientes de los hidrocarburos.

### 5.5.1 Conductividad hidráulica sin contaminante

Este ensayo se realizó en base al ensayo de permeabilidad de carga variable, en donde una muestra de suelo de área transversal  $A$  y longitud  $L$ , con un peso de aproximadamente 260g confinada en un tubo, es sometida a una carga hidráulica  $\Delta h$  en la cual se encuentra en un alimentador de sección transversal  $a$ , con medidas de 500ml, 1000ml y 1500ml. El agua fluye a través del suelo que previamente se encuentra en condición saturada con la intención de observar su descenso a medida que el agua atraviesa la muestra y de esta manera poder medir la cantidad de agua (en  $\text{cm}^3$ ) que pasa en un tiempo  $t$ , aplicando la ley de Henri Darcy de 1856.

*Ecuación 7. Coeficiente de permeabilidad en permeámetro de carga variable*

$$k = \frac{a * L}{A * (t_2 - t_1)} * \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right)$$

En donde:

A: Área de la muestra

a: Área del tubo vertical de carga

L: Longitud de la muestra

$h_1$ : Carga hidráulica al comienzo de la prueba

$h_2$ : Carga hidráulica al final de la prueba

$t_1$ : Tiempo inicial de la prueba

$t_2$ : Tiempo final de la prueba

Esta prueba se realizará en tres (3) repeticiones con el objetivo de tener mayor acierto en el valor de permeabilidad ( $k$ ) en el suelo número tres (talud UPB).

### 5.5.2 Conductividad hidráulica: Aceite limpio

Este ensayo se realizó en base al ensayo de permeabilidad de carga variable, en donde tres (3) muestras de suelo de área transversal  $A$  y longitud  $L$ , con un peso de aproximadamente 260g cada una confinada en un tubo, es sometida a una carga hidráulica  $\Delta h$  en la cual se encuentra en tubo alimentador de sección transversal  $a$ , con medidas de 500ml, 1000ml y 1500ml. El agua fluye a través del suelo que previamente se encuentra en condición saturada con la intención de observar su descenso a medida que el agua atraviesa la muestra y de esta manera poder medir la cantidad de agua (en  $\text{cm}^3$ ) que pasa en un tiempo  $t$ , aplicando la ley de Henri Darcy de 1856. **(ECUACIÓN 7)**

El ensayo se realizó con diferentes porcentajes de aceite hidráulico limpio en cantidades de 2%, 4%, 6% y 8% con el fin de observar los cambios que se presentan en el valor de  $k$  con respecto de las concentraciones de este contaminante. Cada uno de estos porcentajes de contaminante se realizó en tres (3) pruebas para conocer su respectivo valor  $k$ .

### 5.5.2.1 Características del aceite hidráulico

#### Shell helix Hx7 SN 10w-40



Ilustración 19. Aceite hidráulico 10w

Fuente: Tomada de la web

Shell Helix HX7 SN ayuda a mantener la limpieza y operación eficiente de los motores a gasolina. Entrega una excelente protección contra la acumulación de sedimentos y ayuda a prevenir el desgaste en el motor. Adecuado para ser utilizado en una amplia gama de vehículos sometidos a condiciones de conducción demandantes.

#### Características físicas

Propiedades	Método	Helix HX7 SN 10W-40
Viscosidad Grado SAE		10W-40
Viscosidad Cinemática	@ 40°C cSt	ASTM D445 101,50
Viscosidad Cinemática	@ 100°C cSt	ASTM D445 15,44
Índice de Viscosidad		ASTM D2270 161
MRV	@ -30°C cP	ASTM D4684 18.100
Densidad	@ 15°C kg/m <sup>3</sup>	ASTM D4052 843,5
Punto de Inflamación	PMCC °C	ASTM D93 240
Punto de Fluidéz	°C	ASTM D97 -45

Estas características son típicas de la producción actual y pueden variar con futuras producciones de acuerdo a especificaciones Shell.

Tabla 3. Características físicas aceite hidráulico

Fuente: Tomada de la ficha técnica de Shell Helix HX7 10W-40

### **5.5.3 Conductividad hidráulica: Aceite quemado**

Este ensayo se realizó en base al ensayo de permeabilidad de carga variable, en donde tres (3) muestras de suelo de área transversal  $A$  y longitud  $L$ , con un peso de aproximadamente 260g cada una confinada en un tubo, es sometida a una carga hidráulica  $\Delta h$  en la cual se encuentra en tuvo alimentador de sección transversal  $a$ , con medidas de 500ml, 1000ml y 1500ml. El agua fluyó a través del suelo que previamente se encuentra en condición saturada con la intención de observar su descenso a medida que el agua atraviesa la muestra y de esta manera poder medir la cantidad de agua (en  $\text{cm}^3$ ) que pasa en un tiempo  $t$ , aplicando la ley de Henri Darcy de 1856. **(ECUACIÓN 7)**

El ensayo se realizó con diferentes porcentajes de aceite quemado de motor en cantidades de 2%, 4%, 6% y 8% con el fin de observar los cambios que se presentaron en el valor de  $k$  con respecto de las concentraciones de este contaminante. Cada uno de estos porcentajes de contaminante se realizó en tres (3) pruebas para conocer su respectivo valor  $k$ .

### **5.5.4 Conductividad hidráulica: Petróleo**

Este ensayo se realizó en base al ensayo de permeabilidad de carga variable, en donde tres (3) muestras de suelo de área transversal  $A$  y longitud  $L$ , con un peso de aproximadamente 260g cada una confinada en un tubo, es sometida a una carga hidráulica  $\Delta h$  en la cual se encuentra en tuvo alimentador de sección transversal  $a$ , con medidas de 500ml, 1000ml y 1500ml. El agua fluyó a través del suelo que previamente se encontraba en condición saturada con la intención de observar su descenso a medida que el agua atraviesa la muestra y de esta manera poder medir la cantidad de agua (en  $\text{cm}^3$ ) que pasa en un tiempo  $t$ , aplicando la ley de Henri Darcy de 1856. **(ECUACIÓN 7)**

El ensayo se realizó con diferentes porcentajes de petróleo en cantidades de 2%, 4%, 6% y 8% con el fin de observar los cambios que se presentaron en el valor de  $k$  con respecto de las concentraciones de este contaminante. Cada uno de estos porcentajes de contaminante se realizó en tres (3) pruebas para conocer su respectivo valor  $k$ .

#### 5.5.4.1 Características del petróleo

#### 5.5.4.2 Campo Dorotea



Ilustración 20. Petróleo Dorotea

Fuente: Propia

#### Información campo Dorotea

NEW GRANADA ENERGY CORPORATION SUCURSAL COLOMBIA			
CAMPO DOROTEA			
NIT propietario		9001299677	
Dirección		VEREDA CENTRO GAITÁN	
Ciudad		PAZ DE ARIPORO	
Departamento		CASANARE	
Mayorista que le abastece		ORGANIZACIÓN TERPEL SA	
Organismo certificador		SAYBOLT	
A(1)/i(2)		1	
Sicom		635237	
No. Dh		2124	
Crudo	Escala API	Densidad	Descripción
Ligero	30° - 40°	0.87 - 0.83 g/cm <sup>3</sup>	Fácil transporte y extracción, ideal para refinar en combustibles y derivados.

Tabla 4. Información campo Dorotea

Fuente: Propia

## 5.6 Lixiviación

El ensayo consistió en compactar dos (2) cilindros de suelo por cada uno de los contaminantes estudiados con el fin de analizar visualmente el comportamiento que estos adquieren. Estas mezclas de suelo-contaminantes se realizaron en proporciones de 4%, 6% y 8% con respecto al peso del suelo (2000g). Se procedió a mezclar el suelo con su respectivo porcentaje de contaminante de manera que quede completamente adherido a la totalidad del suelo para de esta manera compactar 5 capas cada una con 25 golpes en el molde del ensayo de Proctor.



*Ilustración 21. mezcla suelo-contaminante*

Fuente: propia

Una vez compactado, se retiró el collarín y se resanó la muestra compactada para posteriormente con ayuda de un extractor universal retirar la muestra compactada del molde como se muestra en las figuras 21 y 22:



*Ilustración 22. Muestra compactada*

Fuente: propia

### **5.6.1 Lixiviación aceite limpio**

Para este ensayo se realizaron dos (2) muestras de suelo compactadas mezcladas con porcentajes de aceite limpio de 4%,6% y 8% como se especifica en el numeral 5.6.

En un recipiente plástico con tapa se agregó 3 litros de agua dejando una marca en la lámina de agua, se agregaron las dos muestras compactadas y se cubrió la caja para evitar formaciones de hongos o bacterias en el agua.

Se hizo un seguimiento periódico del recipiente para observar el comportamiento de las partículas dentro del agua.

### **5.6.2 Lixiviación aceite quemado**

Se realizaron dos (2) muestras de suelo compactadas mezcladas con porcentajes de aceite quemado de 4%,6% y 8% como se especifica en el numeral 5.6.

En un recipiente plástico con tapa se agregaron 3 litros de agua dejando una marca en la lámina de agua, se agregaron las dos muestras compactadas y se cubrieron la caja para evitar formaciones de hongos o bacterias en el agua.

Se hizo un seguimiento periódico del recipiente para observar el comportamiento de las partículas dentro del agua.

### **5.6.3 Lixiviación petróleo**

Se realizaron realizar dos (2) muestras de suelo compactadas mezcladas con porcentajes de petróleo de 4%,6% y 8% como se especifica en el numeral 5.6.

En un recipiente plástico con tapa se agregaron 3 litros de agua dejando una marca en la lámina de agua, se agregaron las dos muestras compactadas y se cubrió la caja para evitar formaciones de hongos o bacterias en el agua.

Se hizo un seguimiento periódico del recipiente para observar el comportamiento de las partículas dentro del agua.

## 6 RESULTADOS

### 6.1.1 Análisis granulométrico

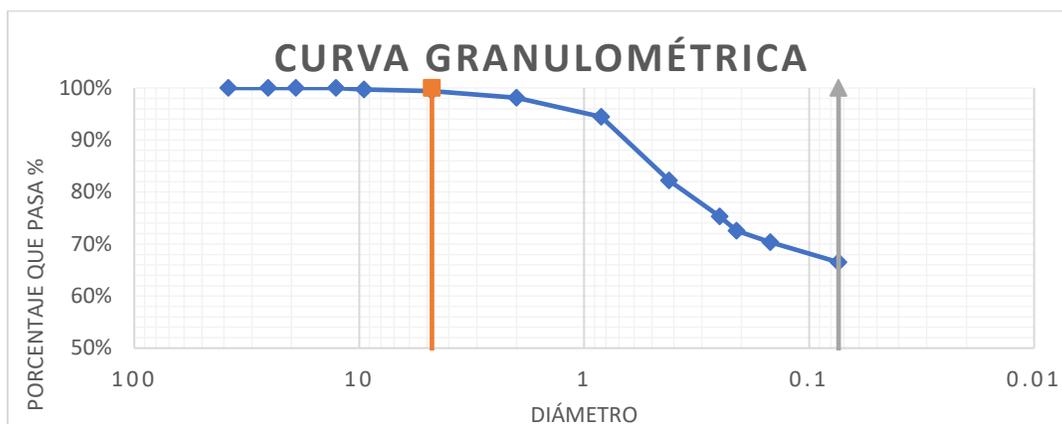
A continuación, se muestra cada uno de los tipos de suelo estudiados con sus respectivas características, así como el detalle de cada ensayo ejecutado.

### 6.1.2 Vía parqueaderos UPB Bucaramanga

PESO DE LA MUESTRA (g)		1500			
PESO DE LA MUESTRA SECA AL HORNO(g)		1379			
PESO DE LA MUESTRA LAVADA POR TAMIZ N200 (g)		510,00			
PESO DE LA MUESTRA RETENIDA EN TAMIZ N200 (g)		1			
<b>GRANULOMETRIA DE LA MUESTRA</b>					
	<b>Tamiz</b>	<b>Peso</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
	<b>m.m.</b>	<b>Retenido</b>	<b>Retenido</b>	<b>Acumulado</b>	<b>Pasa</b>
	1 1/2"	38,1	0,00	0,0%	100%
	1"	25,4	0,00	0,0%	100%
	3/4"	19,1	0,00	0,0%	100%
	1/2"	12,7	0,00	0,0%	100%
	3/8"	9,52	3,90	0,3%	100%
	#4	4,75	4,60	0,3%	99%
	#10	2	19,60	1,3%	98%
	#20	0,84	54,20	3,6%	94%
	#40	0,42	182,80	12,3%	82%
	#60	0,25	102,50	6,9%	75%
	#80	0,21	41,20	2,8%	73%
	#100	0,149	32,60	2,2%	70%
	#200	0,074	57,90	3,9%	66%
	Fondo		991,00	66,5%	0%
	<b>TOTAL</b>		1490,30	100,0%	
	<b>Gravas</b>	1%	<b>Arenas</b>	33%	<b>Finos</b>
					66%

Tabla 5. Análisis granulométrico Vía parqueaderos UPB Bucaramanga

Fuente: propia



Gráfica 1. Curva granulométrica Vía parqueaderos UPB Bucaramanga

Fuente: propia

### 6.1.3 Cantera PAVIANDI-Vía Curos

PESO DE LA MUESTRA (g)		2286			
PESO DE LA MUESTRA SECA AL HORNO(g)		1736			
PESO DE LA MUESTRA LAVADA Y SECA POR TAMIZ N200 (g)		1294,10			
PESO DE LA MUESTRA RETENIDA EN TAMIZ N200 (g)		6,8			
<b>GRANULOMETRIA DE LA MUESTRA</b>					
	<b>Tamiz</b>	<b>Peso</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
	<b>m.m.</b>	<b>Retenido</b>	<b>Retenido</b>	<b>Acumulado</b>	<b>Pasa</b>
	1 1/2"	38,1	0,00	0,00%	100%
	1"	25,4	0,00	0,00%	100%
	3/4"	19,1	0,00	0,00%	100%
	1/2"	12,7	18,10	0,79%	99%
	3/8"	9,52	33,85	1,48%	98%
	#4	4,75	110,65	4,84%	93%
	#10	2	203,10	8,89%	84%
	#40	0,42	573,85	25,11%	59%
	#200	0,074	347,20	15,19%	44%
	Fondo		998,70	43,70%	0%
	<b>TOTAL</b>		2285,45	100,0%	
	<b>Gravas</b>	7%	<b>Arenas</b>	49%	<b>Finos</b>
					44%

Tabla 6. Análisis granulométrico Cantera PAVIANDI-Vía Curos

Fuente: propia

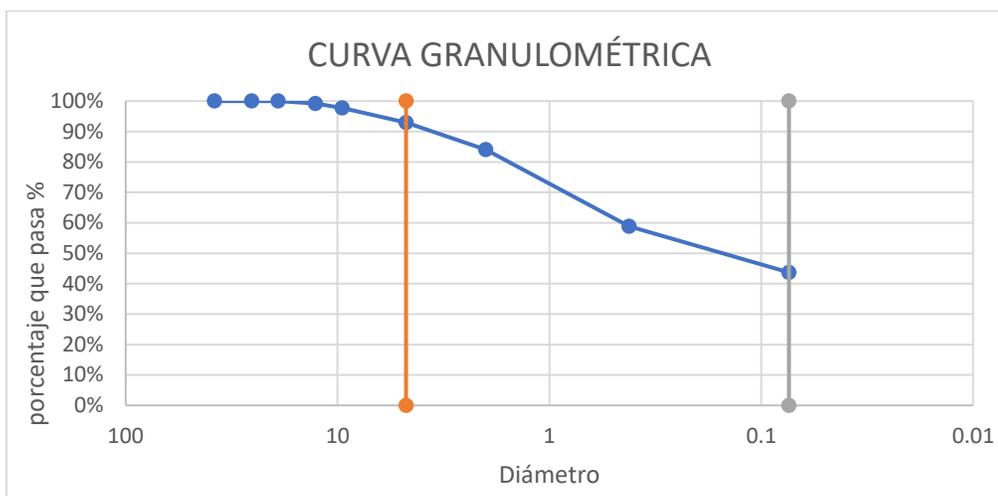


Tabla 7. Curva granulométrica cantera PAVIANDI-Vía Curos

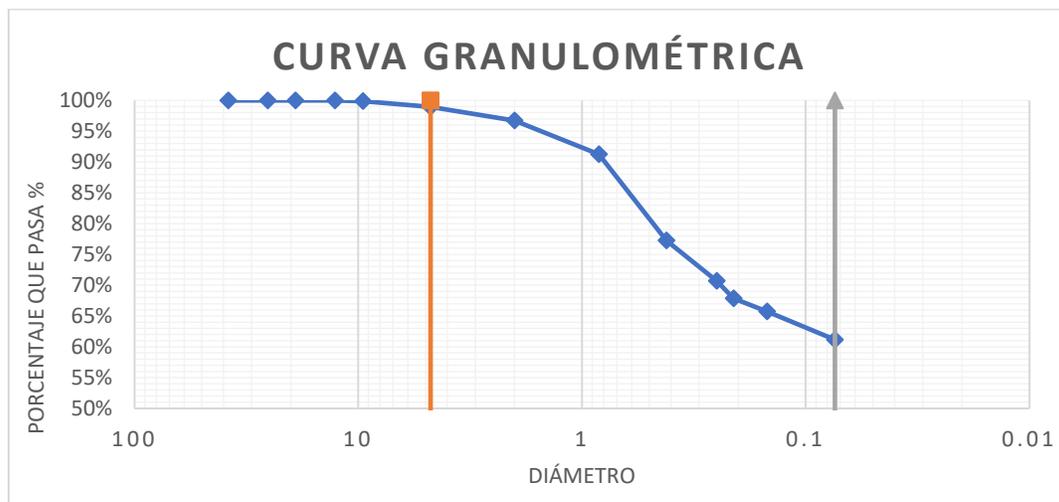
Fuente: propia

#### 6.1.4 Talud UPB Bucaramanga

PESO DE LA MUESTRA (g)		1500			
PESO DE LA MUESTRA SECA AL HORNO(g)		1420			
PESO DE LA MUESTRA LAVADA POR TAMIZ N200 (g)		585,00			
PESO DE LA MUESTRA RETENIDA EN TAMIZ N200 (g)		2			
<b>GRANULOMETRIA DE LA MUESTRA</b>					
	<b>Tamiz</b>	<b>Peso</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
	<b>m.m.</b>	<b>Retenido</b>	<b>Retenido</b>	<b>Acumulado</b>	<b>Pasa</b>
	1 1/2"	38,1	0,00	0,0%	100%
	1"	25,4	0,00	0,0%	100%
	3/4"	19,1	0,00	0,0%	100%
	1/2"	12,7	0,00	0,0%	100%
	3/8"	9,52	2,00	0,1%	100%
	#4	4,75	13,60	0,9%	99%
	#10	2	33,80	2,3%	97%
	#20	0,84	81,80	5,5%	91%
	#40	0,42	209,60	14,0%	77%
	#60	0,25	98,50	6,6%	71%
	#80	0,21	43,00	2,9%	68%
	#100	0,149	31,10	2,1%	66%
	#200	0,074	69,00	4,6%	61%
	Fondo		917,00	61,2%	100,0%
	<b>TOTAL</b>		1499,40	100,0%	
	<b>Gravas</b>	1%	<b>Arenas</b>	38%	<b>Finos</b>
					61%

Tabla 8. Análisis granulométrico Talud UPB Bucaramanga

Fuente: propia



Gráfica 2. Curva granulométrica Talud UPB Bucaramanga

Fuente: propia

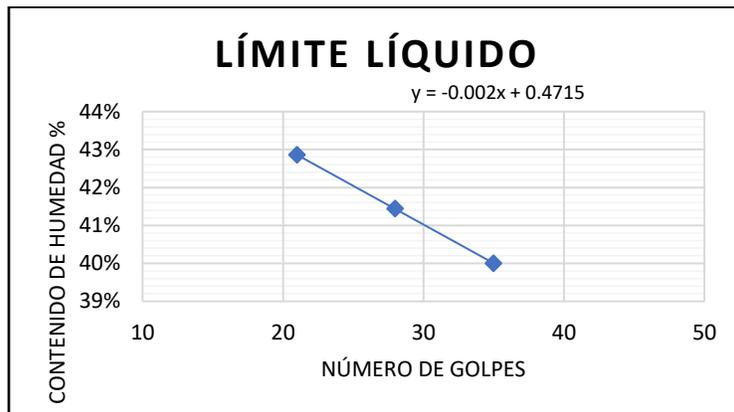
## 6.2 Límites de Atterberg

### 6.2.1 Vía parqueaderos UPB Bucaramanga

LIMITE LIQUIDO								
Peso del suelo que pasa tamiz No 40 (g)		500						
# Cápsula	# Golpes	Peso cápsula + suelo húmedo (g)	Peso cápsula + suelo seco (g)	Peso agua (g)	Peso cápsula (g)	Peso suelo húmedo(g)	Peso suelo seco (g)	Humedad natural %
36	35	28,01	26,03	1,98	21,08	6,93	4,95	40%
358	28	48,1	45,97	2,13	40,83	7,27	5,14	41%
4	21	26,73	25,02	1,71	21,03	5,7	3,99	43%

Tabla 9. Límite líquido vía parqueadero UPB Bucaramanga

Fuente: propia

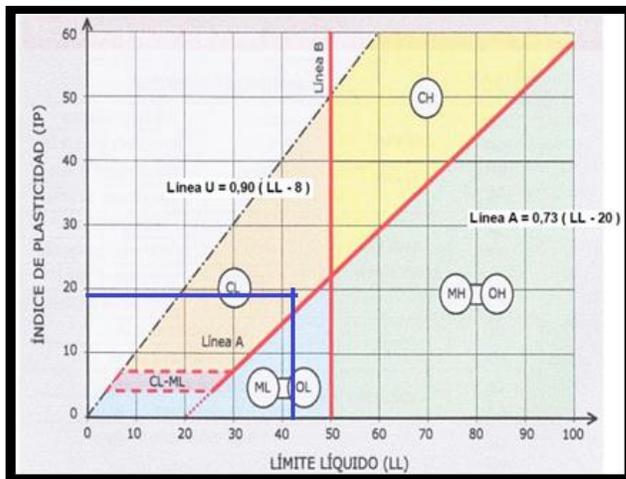


Gráfica 3. Límite líquido vía parqueadero UPB Bucaramanga

LÍMITE PLÁSTICO								
# Cápsula	Peso cápsula (g)	Peso cápsula + suelo húmedo (g)	Peso cápsula + suelo seco (g)	peso agua (g)	Peso suelo húmedo (g)	peso suelo seco(g)	Humedad %	
19	21,04	27,13	26,02	1,11	6,09	4,98	22,3%	
1	21,01	26,01	25,09	0,92	5	4,08	22,5%	
							promedio	22,4%

Tabla 10. Límite plástico vía parqueadero UPB Bucaramanga

Fuente: propia



Gráfica 4. gráfico de plasticidad de los suelos (vía parqueaderos)

Límite líquido %	42,2
Límite plástico %	22,4
Índice de plasticidad %	19,8

El material estudiado fue clasificado como CL, una arcilla inorgánica de plasticidad baja.

## 6.2.2 Cantera PAVIANDI-Vía Curos

Suelos granulares gruesos más del 50% retenido en el tamiz n°200 (0.075 mm)	<b>Grava</b> > 50% de la fracción gruesa retenida en el tamiz n°4 (4.75 mm)	grava limpia menos del 5% pasa el tamiz n°200	<b>GW</b>	grava bien graduada, grava fina a gruesa
		grava con más de 12% de finos pasantes del tamiz n° 200	<b>GP</b>	grava pobremente graduada
			<b>GM</b>	grava limosa
	<b>Arena</b> ≥ 50% de fracción gruesa que pasa el tamiz n°4	Arena limpia	<b>GC</b>	grava arcillosa
		Arena con más de 12% de finos pasantes del tamiz n° 200	<b>SW</b>	Arena bien graduada, arena fina a gruesa.
			<b>SP</b>	Arena pobremente graduada
Suelos de grano fino más del 50% pasa el tamiz No.200	<b>Limos y arcillas</b> límite líquido < 50	inorgánico	<b>SM</b>	Arena limosa
		orgánico	<b>SC</b>	Arena arcillosa
	<b>Limos y arcillas</b> límite líquido ≥ 50	inorgánico	<b>ML</b>	limo
		orgánico	<b>CL</b>	arcilla
			<b>OL</b>	Limo orgánico, arcilla orgánica
			<b>MH</b>	limo de alta plasticidad, limo elástico
	<b>CH</b>	Arcilla de alta plasticidad		
	<b>OH</b>	Arcilla orgánica, Limo orgánico		
Suelos altamente orgánicos		<b>Pt</b>	turba	

Ilustración 24. Tabla de clasificación de suelo granular. fuente: libro web

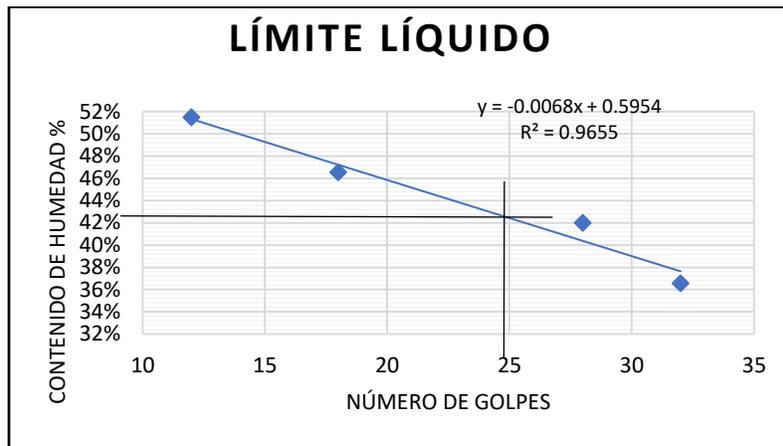
El material estudiado fue clasificado como SM, arena limosa, con plasticidad nula.

## 6.2.3 Talud UPB Bucaramanga

LÍMITE LIQUIDO								
Peso del suelo que pasa tamiz No 40 (g)		500						
# Cápsula	# Golpes	Peso cápsula + suelo húmedo (g)	Peso cápsula + suelo seco (g)	Peso agua (g)	Peso cápsula (g)	Peso suelo húmedo(g)	Peso suelo seco (g)	Humedad natural %
240	32	43,27	40,29	2,98	32,14	11,13	8,15	37%
19	28	39,52	37,27	2,25	31,91	7,61	5,36	42%
5	18	49,27	46,51	2,76	40,58	8,69	5,93	47%
7	12	28,96	26,35	2,61	21,28	14,35	5,07	51%

Tabla 11. Límite líquido talud UPB Bucaramanga

Fuente: propia

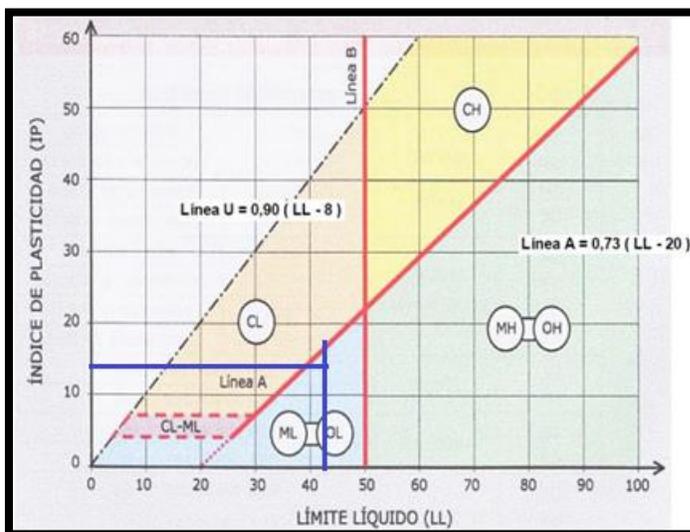


Gráfica 5. Límite líquido talud UPB Bucaramanga

LÍMITE PLÁSTICO							
# Cápsula	Peso cápsula (g)	Peso cápsula + suelo húmedo (g)	Peso cápsula + suelo seco (g)	peso agua (g)	Peso suelo húmedo (g)	peso suelo seco(g)	Humedad %
111	21,28	27,95	26,37	1,58	6,67	5,09	31,0%
132	21,14	29,48	27,8	1,68	8,34	6,66	25,2%
						promedio	28,1%

Tabla 12. Límite plástico talud UPB Bucaramanga

Fuente: propia



Gráfica 6. gráfico de plasticidad de los suelos (talud upb)

Límite líquido	42,5
Límite plástico	28,1
Índice de plasticidad	14,4

El material estudiado fue clasificado como ML, un limo inorgánico de mediana compresibilidad.

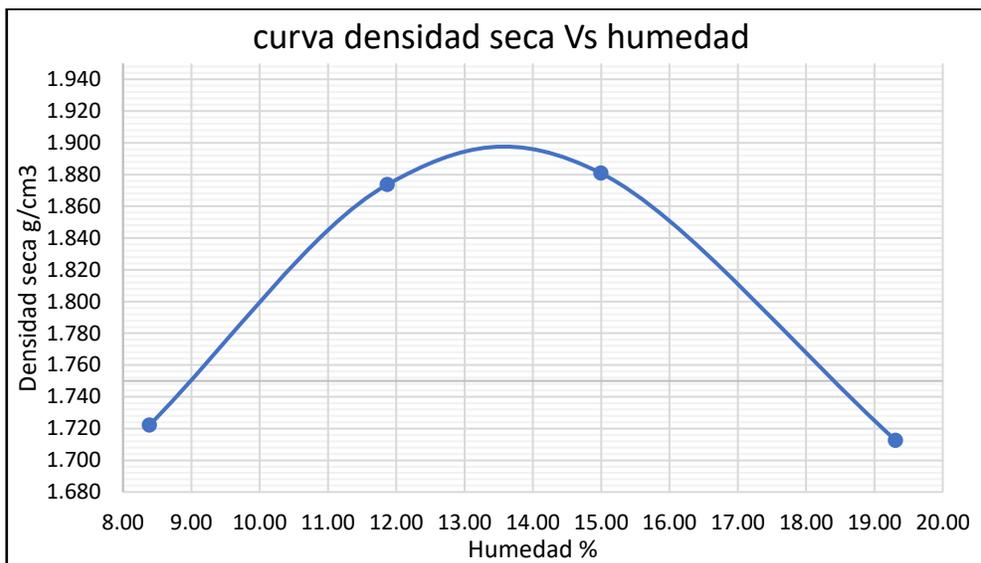
### 6.3 Relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación)

#### 6.3.1 Proctor 1

	8%	4%	4%	4%	
Ensayo No	1	2	3	4	5
PESO ESPECIFICO					
Peso de la muestra húmeda + molde g	9915	10402	10544	10290	
Peso del molde g	5952	5952	5952	5952	
Peso de muestra húmeda g	3963	4450	4592	4338	
Volumen del molde cm <sup>3</sup>	2123,06	2123,06	2123,06	2123,06	
Densidad húmeda g/cm <sup>3</sup>	1,87	2,10	2,16	2,04	
CONTENIDO DE HUMEDAD					
Tara	111	240	19	12	
Peso de la muestra húmeda + tara g	59,22	62,97	75,4	82,32	
Peso muestra seca + tara g	56,28	59,7	68,31	75,6	
Peso del agua g	2,94	3,27	7,09	6,72	
Peso de la tara g	21,23	32,15	21,03	40,8	
Peso de la muestra seca g	35,05	27,55	47,28	34,8	
Contenido de Humedad %	8,39	11,87	15,00	19,31	
PESO ESPECÍFICO SECO					
Densidad seca g/cm <sup>3</sup>	1,722	1,874	1,881	1,713	

Tabla 13. Datos ensayo Proctor 1

Fuente: propia



Gráfica 7. Curva densidad seca Vs humedad. Proctor 1

Máxima densidad seca	1,90
Contenido de humedad optimo	13,5

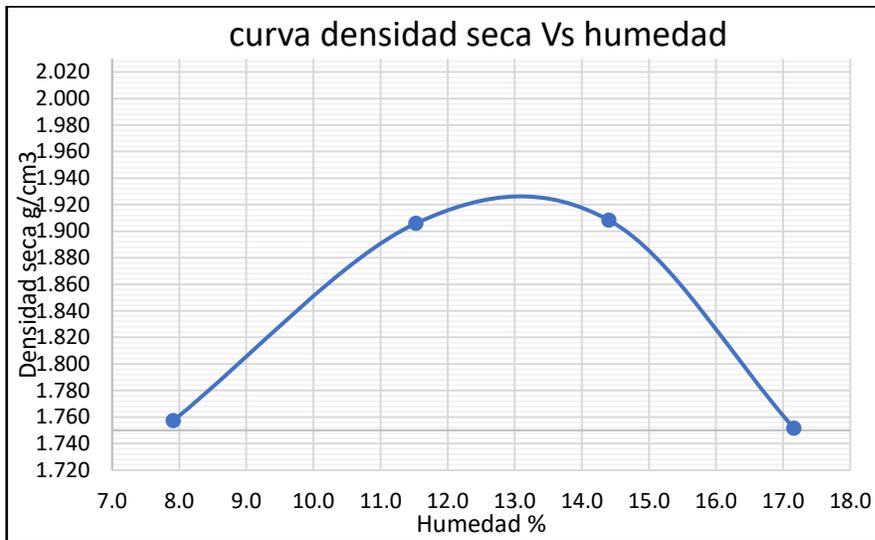
### 6.3.2 Proctor 2

	8%	4%	4%	4%	
Ensayo No	1	2	3	4	5
PESO ESPECIFICO					
Peso de la muestra húmeda + molde g	10018	10505	10587	10309	
Peso del molde g	5992	5992	5952	5952	
Peso de muestra húmeda g	4026	4513	4635	4357	
Volumen del molde cm3	2123,06	2123,06	2123,06	2123,06	
Densidad húmeda g/cm3	1,90	2,13	2,18	2,05	
CONTENIDO DE HUMEDAD					
Tara	111	240	19	12	
Peso de la muestra húmeda + tara g	60,24	63,3	90,29	114,26	
Peso muestra seca + tara g	57,38	60,08	81,57	103,5	
Peso del agua g	2,86	3,22	8,72	10,76	
Peso de la tara g	21,23	32,15	21,03	40,8	

Peso de la muestra seca g	36,15	27,93	60,54	62,7
Contenido de Humedad %	7,9	11,5	14,4	17,2
PESO ESPECÍFICO SECO				
Densidad seca g/cm <sup>3</sup>	1,757	1,906	1,908	1,752

Tabla 14. Datos ensayo Proctor 2

Fuente: propia



Gráfica 8. Curva densidad seca Vs humedad. Proctor 2

Máxima densidad seca	1,92
Contenido de humedad optimo	13,3

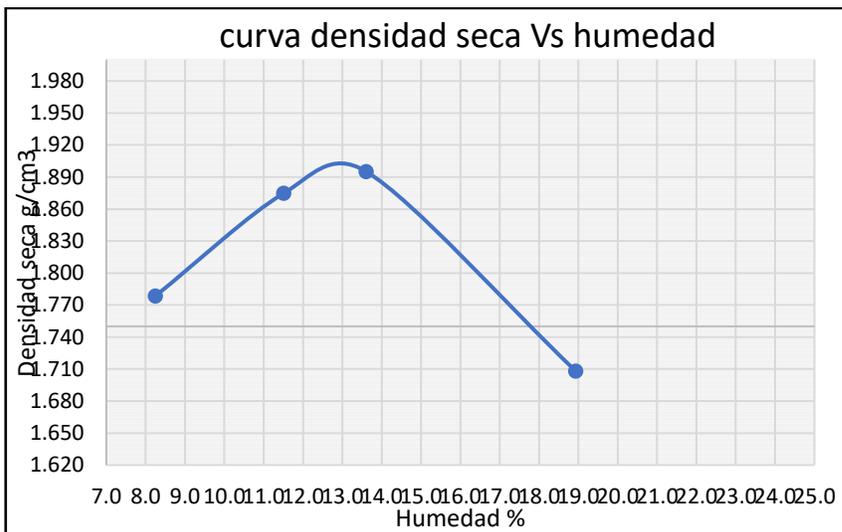
### 6.3.3 Proctor 3

	6%	3%	3%	3%	
Ensayo No	1	2	3	4	5
PESO ESPECIFICO					
Peso de la muestra húmeda + molde g	10039	10390	10523	10265	
Peso del molde g	5952	5952	5952	5952	
Peso de muestra húmeda g	4087	4438	4571	4313	
Volumen del molde cm <sup>3</sup>	2123,06	2123,06	2123,06	2123,06	
Densidad húmeda g/cm <sup>3</sup>	1,93	2,09	2,15	2,03	
CONTENIDO DE HUMEDAD					
Tara	111	240	19	12	
Peso de la muestra húmeda + tara g	72,83	76,92	65,62	83,08	

Peso muestra seca + tara g	68,9	72,3	60,28	76,35	
Peso del agua g	3,93	4,62	5,34	6,73	
Peso de la tara g	21,23	32,15	21,03	40,8	
Peso de la muestra seca g	47,67	40,15	39,25	35,55	
Contenido de Humedad %	8,2	11,5	13,6	18,9	
<b>PESO ESPECÍFICO SECO</b>					
Densidad seca g/cm <sup>3</sup>	1,778	1,875	1,895	1,708	

Tabla 15. Datos ensayo Proctor 3

Fuente: propia



Gráfica 9. Curva densidad seca vs humedad. Proctor 3

Máxima densidad seca	1,9
Contenido de humedad optimo	13,2

### 6.3.4 Promedio ensayo de Proctor

Máxima densidad seca	Contenido de humedad
1,90	13,5
1,92	13,3
1,90	13,2
<b>1,91</b>	<b>13,3</b>

Tabla 16. Promedio ensayo Proctor

Fuente: propia

#### 6.4 CBR de los suelos compactados

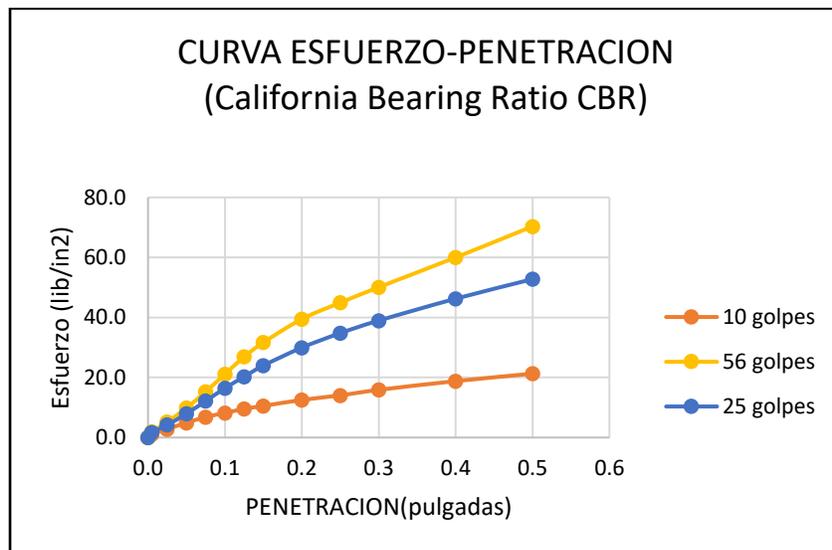
ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)			
COMPACTACION CBR MOLDE	1	2	3
N° de Golpes x Capa	56	25	10
Altura del Molde (cm)	11,7	11,7	11,7
Diámetro (cm)	15,2	15,2	15,3
Área del Molde (cm <sup>2</sup> )	181,46	181,46	183,85
Cond. Muestra			
P.Húm.+Molde(g)	13112	11976	12346
Peso Molde (g)	8719	7812	8488
Peso Húmedo(g)	4393	4164	3858
Vol. Molde (cm <sup>3</sup> )	2123,06	2123,06	2151,09
Densidad H(g/cm <sup>3</sup> )	2,07	1,96	1,79
Recipiente	R-3	R-6	R-8
P. Húmedo+Tara(g)	141,87	136,57	151,42
Peso Seco+Tara(g)	139,89	134,15	149,36
Peso Agua(g)	1,98	2,42	2,06
Peso Tara(g)	31,7	20,95	40,35
P. Muestra Seca(g)	108,19	113,2	109,01
Cont. Humedad(%)	1,83	2,14	1,89
DENSIDAD SECA(g/cm <sup>3</sup> )	2,03	1,92	1,76

Tabla 17. Datos ensayo CBR

Fuente: Propia

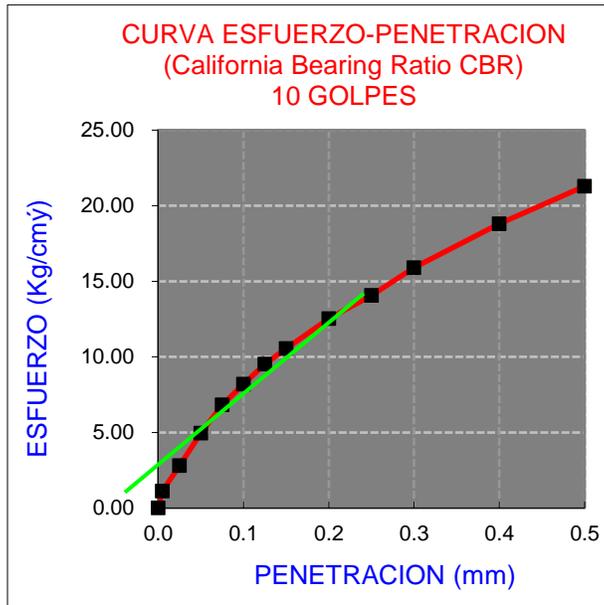
PENETRACION		MOLDE N° 08 (10 golpes)		MOLDE N° 06 (25 golpes)		MOLDE N° 03 (56 golpes)	
(mm)	(pulgadas)	CARGA	ESFUERZO	CARGA	ESFUERZO	CARGA	ESFUERZO
0,00	0,000000	0	0,0	0	0,0	0	0,0
0,13	0,005000	22	1,1	33	1,7	38	1,9
0,64	0,025000	55	2,8	83	4,2	102	5,2
1,27	0,050000	97	4,9	156	7,9	194	9,9
1,91	0,075000	134	6,8	239	12,2	300	15,3
2,54	0,100000	161	8,2	323	16,5	415	21,1
3,17	0,125000	187	9,5	398	20,3	528	26,9
3,81	0,150000	207	10,5	471	24,0	622	31,7

5,08	0,200000	246	12,5	588	29,9	775	39,5
5,08	0,250000	276	14,1	683	34,8	882	44,9
7,62	0,300000	312	15,9	765	39,0	983	50,1
10,16	0,400000	369	18,8	908	46,2	1178	60,0
12,70	0,500000	418	21,3	1036	52,8	1381	70,3



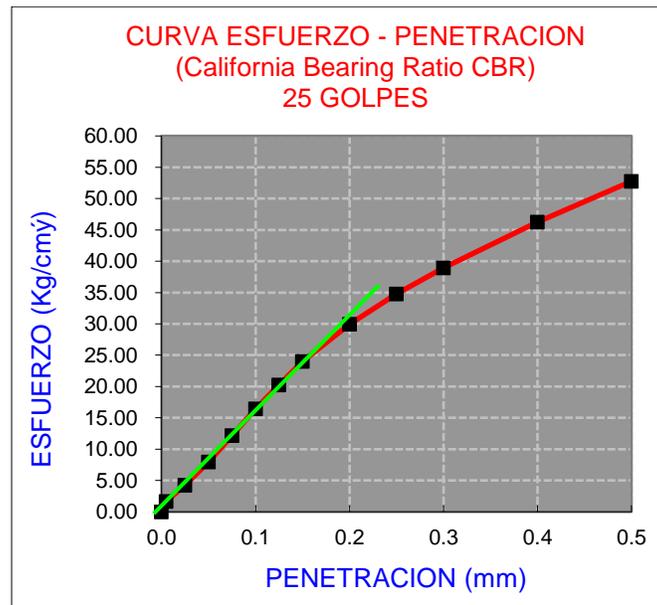
Gráfica 10. Curva esfuerzo vs penetración. Ensayo CBR

Fuente: Propia



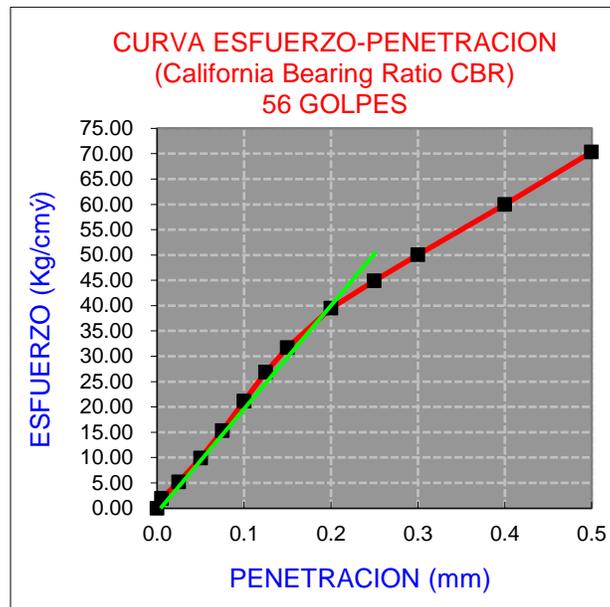
Gráfica 11. Curva esfuerzo vs penetración para 10 golpes. Ensayo CBR

Fuente: Propia



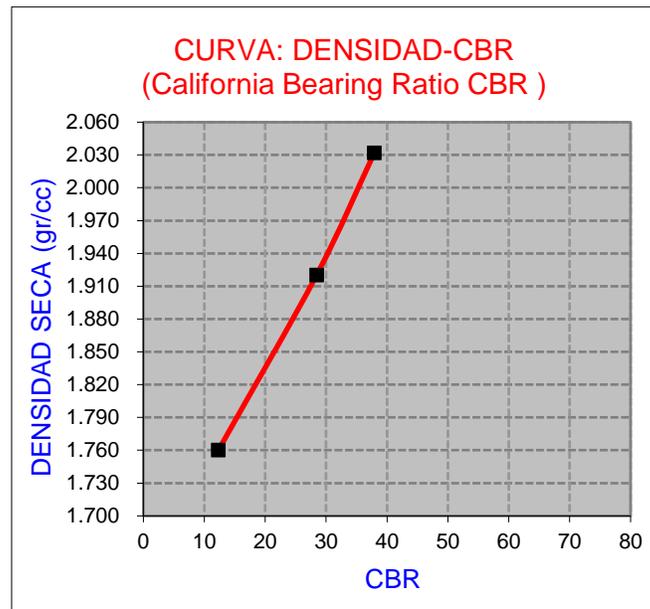
Gráfica 12. Curva esfuerzo vs penetración para 25 golpes. Ensayo CBR

Fuente: Propia



Gráfica 13. Curva esfuerzo vs penetración para 56 golpes. Ensayo CBR

Fuente: Propia



Gráfica 14. Curva densidad- CBR

Fuente:Propia

PENTRC.	0.1"	0.2"
10 golpes	8	13
25 golpes	16	30
56 golpes	21	40

Tabla 18. Penetración ensayo CBR corregido

	DENS.(g/cm <sup>3</sup> )	0.1"	0.2"	CBR(%)
10 golpes	1,76	11,4	12,3	12,3
25 golpes	1,92	22,8	28,4	28,4
56 golpes	2,03	29,9	37,9	37,9

Tabla 19. CBR %

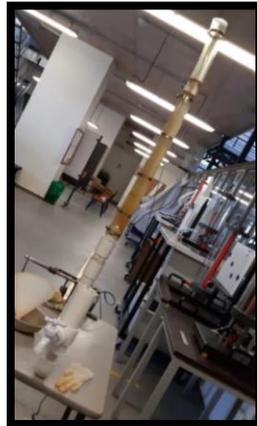
PROCTOR MAXIMA DENSIDAD SECA(g/cm3)	1,91
95% PROCTOR M.D.S(g/cm3)	1,81

C.B.R. Para el 100% de la M.D.S.(%)	28,1
C.B.R. Para el 95% de la M.D.S.(%)	18,1

*Tabla 20. Máxima densidad seca*

## 6.5 Diseño de modelo experimental de permeámetro de carga variable

Con la idea de crear un modelo que permita medir la permeabilidad del suelo previamente mezclado con cada uno de los contaminantes, surgió la idea de crear un sistema con tubería pvc de fácil acceso y de bajo costo.



Cada una de las partes de pvc fueron pegadas cuidadosamente con el fin de que el modelo funcione de la mejor manera, sin fisuras ni fugas de agua y/o material. Además, contaba con un tubo alimentador de manguera transparente totalmente vertical, con las medidas exactas para ingresar la misma cantidad de agua en cada ensayo.

## 6.6 Conductividad hidráulica sin contaminante

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE												
Suelo												
Porcentaje de concentración:			0%	Contaminante:		Sin contaminante						
Longitud de la muestra:		10	cm									
Porcentaje	Prueba	Q(ml)	a (tubo cm2)	A(muestra cm2)	cabeza h1(cm)	cabeza h2(cm)	t1(h:m:s)	t2(h:m:s)	Delta t (h:m:s)	Delta s	h/L	K (cm/s)
0%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	03:34:10	07:37:55	04:03:45	14625	2,55	0,00148
	prueba 2	1000			61,8	35	01:11:49	03:34:10	02:22:21	8541	2,68	0,00107
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	01:11:49	01:11:49	4309	2,5	0,00291
0%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	03:11:10	07:02:36	03:51:26	13886	2,55	0,00156
	prueba 2	1000			61,8	35	00:57:20	03:11:10	02:13:50	8030	2,68	0,00114
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:57:20	00:57:20	3440	2,5	0,00364
0%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	03:40:12	07:25:16	03:45:04	13504	2,55	0,00160
	prueba 2	1000			61,8	35	01:24:22	03:40:12	02:15:50	8150	2,68	0,00112
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	01:24:22	01:24:22	5062	2,5	0,00247
Promedio	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	03:28:31	07:21:56	03:53:25	14005	2,55	<b>0,00155</b>	
	1000			61,8	35	01:11:10	03:28:31	02:17:20	8240	2,68	<b>0,00111</b>	
	500			35	10	00:00:00	01:11:10	01:11:10	4270	2,5	<b>0,00293</b>	

Tabla 21. Conductividad hidráulica carga variable 0% de contaminante

Fuente: Propia

## 6.7 Conductividad hidráulica aceite limpio

La siguiente tabla presenta el coeficiente de permeabilidad de cada uno de los porcentajes aplicados de aceite hidráulico al suelo del Talud UPB.

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE												
Suelo												
Porcentaje de concentración:		2%			Contaminante:			Aceite hidráulico				
Longitud de la muestra:		10	cm									
Porcentaje	Prueba	Q(ml)	a (tubo cm2)	A(muestra cm2)	cabeza h1(cm)	cabeza h2(cm)	t1(h:m:s)	t2(h:m:s)	Delta t (h:m:s)	Delta s	h/L	K (cm/s)
2%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:48:15	04:52:05	03:03:50	11030	2,55	0,00196
	prueba 2	1000			61,8	35	00:39:43	01:48:15	01:08:32	4112	2,68	0,00222
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:39:43	00:39:43	2383	2,5	0,00526
2%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:36:24	04:47:39	03:11:15	11475	2,55	0,00189
	prueba 2	1000			61,8	35	00:35:13	01:36:24	01:01:11	3671	2,68	0,00249
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:35:13	00:35:13	2113	2,5	0,00593
2%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:52:12	05:12:10	03:19:58	11998	2,55	0,00181
	prueba 2	1000			61,8	35	00:40:39	01:52:12	01:11:33	4293	2,68	0,00213
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:40:39	00:40:39	2439	2,5	0,00514
Promedio		1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:45:37	04:57:18	03:11:41	11501	2,55	<b>0,00188</b>
		1000			61,8	35	00:38:32	01:45:37	01:07:05	4025	2,68	<b>0,00227</b>
		500			35	10	00:00:00	00:38:32	00:38:32	2312	2,5	<b>0,00542</b>

Tabla 22. Conductividad hidráulica carga variable 2% de contaminante aceite limpio

Fuente: Propia

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE												
Suelo												
Porcentaje de concentración:		4%			Contaminante:		Aceite hidráulico					
Longitud de la muestra:		10	cm									
Porcentaje	Prueba	Q(ml)	a (tubo cm2)	A(muestra cm2)	cabeza h1(cm)	cabeza h2(cm)	t1(h:m:s)	t2(h:m:s)	Delta t (h:m:s)	Delta s	h/L	K (cm/s)
4%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	00:50:32	01:50:25	00:59:53	3593	2,55	0,00603
	prueba 2	1000			61,8	35	00:17:11	00:50:32	00:33:21	2001	2,68	0,00457
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:17:11	00:17:11	1031	2,5	0,01215
4%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	00:55:24	01:54:39	00:59:15	3555	2,55	0,00609
	prueba 2	1000			61,8	35	00:18:47	00:55:24	00:36:37	2197	2,68	0,00416
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:18:47	00:18:47	1127	2,5	0,01112
4%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:20:31	02:23:25	01:02:54	3774	2,55	0,00574
	prueba 2	1000			61,8	35	00:32:14	01:20:31	00:48:17	2897	2,68	0,00315
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:32:14	00:32:14	1934	2,5	0,00648
Promedio		1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:02:09	02:02:50	01:00:41	3641	2,55	<b>0,00595</b>
		1000			61,8	35	00:22:44	01:02:09	00:39:25	2365	2,68	<b>0,00386</b>
		500			35	10	00:00:00	00:22:44	00:22:44	1364	2,5	<b>0,00918</b>

Tabla 23. Conductividad hidráulica carga variable 4% de contaminante aceite limpio

Fuente: Propia

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE												
Suelo												
Porcentaje de concentración:		6%			Contaminante:		Aceite hidráulico					
Longitud de la muestra:		10	cm									
Porcentaje	Prueba	Q(ml)	a (tubo cm2)	A(muestra cm2)	cabeza h1(cm)	cabeza h2(cm)	t1(h:m:s)	t2(h:m:s)	Delta t (h:m:s)	Delta s	h/L	K (cm/s)
6%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	00:35:33	01:28:12	00:52:39	3159	2,55	0,00686
	prueba 2	1000			61,8	35	00:11:46	00:35:33	00:23:47	1427	2,68	0,00641
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:11:46	00:11:46	706	2,5	0,01774
6%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	00:30:57	01:24:03	00:53:06	3186	2,55	0,00680
	prueba 2	1000			61,8	35	00:10:02	00:30:57	00:20:55	1255	2,68	0,00728
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:10:02	00:10:02	602	2,5	0,02081
6%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	00:33:11	01:25:20	00:52:09	3129	2,55	0,00692

	prueba 2	1000			61,8	35	00:10:37	00:33:11	00:22:34	1354	2,68	0,00675
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:10:37	00:10:37	637	2,5	0,01967
Promedio	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	00:33:14	01:25:52	00:52:38	3158	2,55	<b>0,00686</b>	
	1000			61,8	35	00:10:48	00:33:14	00:22:25	1345	2,68	<b>0,00679</b>	
	500			35	10	00:00:00	00:10:48	00:10:48	648	2,5	<b>0,01932</b>	

Tabla 24. Conductividad hidráulica carga variable 6% de contaminante aceite limpio

Fuente: Propia

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE												
Suelo												
Porcentaje de concentración:		8%				Contaminante:		Aceite hidráulico				
Longitud de la muestra:		10 cm										
Porcentaje	Prueba	Q(ml)	a (tubo cm2)	A(muestra cm2)	cabeza h1(cm)	cabeza h2(cm)	t1(h:m:s)	t2(h:m:s)	Delta t (h:m:s)	Delta s	h/L	K (cm/s)
8%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	00:31:20	01:21:35	00:50:15	3015	2,55	0,00719
	prueba 2	1000			61,8	35	00:09:36	00:31:20	00:21:44	1304	2,68	0,00701
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:09:36	00:09:36	576	2,5	0,02175
8%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	00:31:27	01:18:14	00:46:47	2987	2,55	0,00725
	prueba 2	1000			61,8	35	00:09:30	00:31:27	00:21:57	1137	2,68	0,00804
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:09:30	00:09:30	570	2,5	0,02198
8%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	00:33:11	01:25:20	00:52:09	3129	2,55	0,00692
	prueba 2	1000			61,8	35	00:10:37	00:33:11	00:22:34	1354	2,68	0,00675
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:10:37	00:10:37	637	2,5	0,01967
Promedio	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	00:31:59	01:21:43	00:49:44	3044	2,55	<b>0,00712</b>	
	1000			61,8	35	00:09:54	00:31:59	00:22:05	1265	2,68	<b>0,00723</b>	
	500			35	10	00:00:00	00:09:54	00:09:54	594	2,5	<b>0,02108</b>	

Tabla 25. Conductividad hidráulica carga variable 8% de contaminante aceite limpio

Fuente: Propia

## 6.8 Conductividad hidráulica aceite quemado

La siguiente tabla presenta el coeficiente de permeabilidad de cada uno de los porcentajes aplicados de aceite quemado al suelo del Talud UPB.

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE												
Suelo												
Porcentaje de concentración:		2%			Contaminante:		Aceite quemado					
Longitud de la muestra:		10	cm									
Porcentaje	Prueba	Q(ml)	a (tubo cm2)	A(muestra cm2)	cabeza h1(cm)	cabeza h2(cm)	t1(h:m:s)	t2(h:m:s)	Delta t (h:m:s)	Delta s	h/L	K (cm/s)
2%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:28:06	04:05:03	02:36:57	8415	2,55	0,00257
	prueba 2	1000			61,8	35	00:29:33	01:28:06	00:58:33	3513	2,68	0,00260
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:29:33	00:29:33	1773	2,5	0,00707
2%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:30:29	04:12:02	02:41:33	8493	2,55	0,00255
	prueba 2	1000			61,8	35	00:35:33	01:30:29	00:54:56	3896	2,68	0,00235
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:35:33	00:35:33	2133	2,5	0,00587
2%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:52:38	04:15:01	02:22:23	8423	2,55	0,00257
	prueba 2	1000			61,8	35	00:35:41	01:52:38	01:16:57	3897	2,68	0,00235
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:35:41	00:35:41	2021	2,5	0,00620
Promedio		1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:37:04	04:10:42	02:33:38	8444	2,55	<b>0,00257</b>
		1000			61,8	35	00:33:36	01:37:04	01:03:29	3769	2,68	<b>0,00243</b>
		500			35	10	00:00:00	00:33:36	00:33:36	1976	2,5	<b>0,00634</b>

Tabla 26. Conductividad hidráulica carga variable 2% de contaminante aceite quemado

Fuente: Propia

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE												
Suelo												
Porcentaje de concentración:		4%			Contaminante:		Aceite quemado					
Longitud de la muestra:		10	cm									
Porcentaje	Prueba	Q(ml)	a (tubo cm2)	A(muestra cm2)	cabeza h1(cm)	cabeza h2(cm)	t1(h:m:s)	t2(h:m:s)	Delta t (h:m:s)	Delta s	h/L	K (cm/s)
4%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:19:53	03:12:14	01:52:21	6741	2,55	0,00321
	prueba 2	1000			61,8	35	00:29:56	01:19:53	00:49:57	2997	2,68	0,00305
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:29:56	00:29:56	1796	2,5	0,00698
4%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:11:55	02:55:22	01:43:27	6207	2,55	0,00349
	prueba 2	1000			61,8	35	00:27:55	01:11:55	00:44:00	2640	2,68	0,00346
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:27:55	00:27:55	1675	2,5	0,00748
4%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:20:33	03:05:30	01:44:57	6297	2,55	0,00344
	prueba 2	1000			61,8	35	00:30:13	01:20:33	00:50:20	3020	2,68	0,00303
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:30:13	00:30:13	1813	2,5	0,00691

Promedio	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:17:27	03:04:22	01:46:55	6415	2,55	<b>0,00338</b>
	1000			61,8	35	00:29:21	01:17:27	00:48:06	2886	2,68	<b>0,00317</b>
	500			35	10	00:00:00	00:29:21	00:29:21	1761	2,5	<b>0,00711</b>

Tabla 27..Conductividad hidráulica carga variable 4% de contaminante aceite quemado

Fuente: Propia

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE												
Suelo												
Porcentaje de concentración:		6%			Contaminante: Aceite quemado							
Longitud de la muestra:		10	cm									
Porcentaje	Prueba	Q(ml)	a (tubo cm2)	A(muestra cm2)	cabeza h1(cm)	cabeza h2(cm)	t1(h:m:s)	t2(h:m:s)	Delta t (h:m:s)	Delta s	h/L	K (cm/s)
6%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:07:12	02:51:47	01:44:35	6275	2,55	0,00345
	prueba 2	1000			61,8	35	00:21:33	01:07:12	00:45:39	2739	2,68	0,00334
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:21:33	00:21:33	1293	2,5	0,00969
6%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:05:00	02:49:53	01:44:53	6293	2,55	0,00344
	prueba 2	1000			61,8	35	00:20:39	01:05:00	00:44:21	2661	2,68	0,00343
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:20:39	00:20:39	1239	2,5	0,01011
6%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:08:08	02:49:07	01:40:59	6059	2,55	0,00358
	prueba 2	1000			61,8	35	00:22:31	01:08:08	00:45:37	2737	2,68	0,00343
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:22:31	00:22:31	637	2,5	0,01967
Promedio	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:06:47	02:50:16	01:43:29	6209	2,55	<b>0,00349</b>	
	1000			61,8	35	00:21:34	01:06:47	00:45:12	2712	2,68	<b>0,00337</b>	
	500			35	10	00:00:00	00:21:34	00:21:34	1056	2,5	<b>0,01186</b>	

Tabla 28..Conductividad hidráulica carga variable 6% de contaminante aceite quemado

Fuente: Propia

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE												
Suelo												
Porcentaje de concentración:		8%			Contaminante: Aceite quemado							
Longitud de la muestra:		10	cm									
Porcentaje	Prueba	Q(ml)	a (tubo cm2)	A(muestra cm2)	cabeza h1(cm)	cabeza h2(cm)	t1(h:m:s)	t2(h:m:s)	Delta t (h:m:s)	Delta s	h/L	K (cm/s)

8%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	00:43:18	01:56:25	01:13:07	4387	2,55	0,00494
	prueba 2	1000			61,8	35	00:13:33	00:43:18	00:29:45	1785	2,68	0,00512
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:13:33	00:13:33	813	2,5	0,01541
8%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	00:42:10	01:52:45	01:10:35	4235	2,55	0,00512
	prueba 2	1000			61,8	35	00:13:38	00:42:10	00:28:32	1729	2,68	0,00529
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:13:38	00:13:38	818	2,5	0,01531
8%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	00:42:15	01:55:25	01:13:10	4390	2,55	0,00494
	prueba 2	1000			61,8	35	00:13:30	00:42:15	00:28:45	1655	2,68	0,00552
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:13:30	00:13:30	810	2,5	0,01547
Promedio		1500	5,08	5,08	87,3	61,8	00:42:34	01:54:52	01:12:17	4337	2,55	<b>0,00500</b>
		1000			61,8	35	00:13:34	00:42:34	00:29:01	1723	2,68	<b>0,00530</b>
		500			35	10	00:00:00	00:13:34	00:13:34	814	2,5	<b>0,01540</b>

Tabla 29..Conductividad hidráulica carga variable 8% de contaminante aceite quemado

Fuente: Propia

## 6.9 Conductividad hidráulica petróleo

La siguiente tabla presenta el coeficiente de permeabilidad de cada uno de los porcentajes aplicados de petróleo al suelo del Talud UPB.

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE													
Suelo													
Porcentaje de concentración:		2%				Contaminante:		Petróleo					
Longitud de la muestra:		10	cm										
Porcentaje	Prueba	Q(ml)	a (tubo cm2)	A(muestra cm2)	cabeza h1(cm)	cabeza h2(cm)	t1(h:m:s)	t2(h:m:s)	Delta t (h:m:s)	Delta s	h/L	K (cm/s)	
2%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	02:13:36	05:51:13	03:37:37	13057	2,55	0,00166	
	prueba 2	1000			61,8	35	00:44:35	02:13:36	01:29:01	5341	2,68	0,00171	
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:44:35	00:44:35	2675	2,5	0,00468	
2%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	02:10:11	05:30:10	03:19:59	11999	2,55	0,00181	
	prueba 2	1000			61,8	35	00:40:12	02:10:11	01:29:59	5399	2,68	0,00169	
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:40:12	00:40:12	2412	2,5	0,00519	
2%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	02:14:23	06:05:39	03:51:16	13876	2,55	0,00156	

	prueba 2	1000			61,8	35	00:44:46	02:14:23	01:29:37	5377	2,68	0,00170
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:44:46	00:44:46	2686	2,5	0,00466
Promedio	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	02:12:43	05:49:01	03:36:17	12977	2,55	<b>0,00167</b>	
	1000			61,8	35	00:43:11	02:12:43	01:29:32	5372	2,68	<b>0,00170</b>	
	500			35	10	00:00:00	00:43:11	00:43:11	2591	2,5	<b>0,00484</b>	

Tabla 30..Conductividad hidráulica carga variable 2% de contaminante petróleo

Fuente : Propia

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE												
Suelo												
Porcentaje de concentración:		4%			Contaminante:		Petróleo					
Longitud de la muestra:		10	cm									
Porcentaje	Prueba	Q(ml)	a (tubo cm2)	A(muestra cm2)	cabeza h1(cm)	cabeza h2(cm)	t1(h:m:s)	t2(h:m:s)	Delta t (h:m:s)	Delta s	h/L	K (cm/s)
4%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:45:52	04:38:12	02:52:20	10340	2,55	0,00210
	prueba 2	1000			61,8	35	00:31:21	01:45:52	01:14:31	4471	2,68	0,00204
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:31:21	00:31:21	1881	2,5	0,00666
4%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:51:10	04:58:40	03:07:30	11250	2,55	0,00193
	prueba 2	1000			61,8	35	00:35:14	01:51:10	01:15:56	4556	2,68	0,00201
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:35:14	00:35:14	2114	2,5	0,00593
4%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:42:50	04:40:39	02:57:49	10669	2,55	0,00203
	prueba 2	1000			61,8	35	00:29:45	01:42:50	01:13:05	4385	2,68	0,00208
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:29:45	00:29:45	1785	2,5	0,00702
Promedio	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:46:37	04:45:50	02:59:13	10753	2,55	<b>0,00202</b>	
	1000			61,8	35	00:32:07	01:46:37	01:14:31	4471	2,68	<b>0,00204</b>	
	500			35	10	00:00:00	00:32:07	00:32:07	1927	2,5	<b>0,00650</b>	

Tabla 31..Conductividad hidráulica carga variable 4% de contaminante petróleo

Fuente: Propia

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE												
Suelo												
Porcentaje de concentración:		6%			Contaminante:		Petróleo					
Longitud de la muestra:		10	cm									
Porcentaje	Prueba	Q(ml)	a (tubo cm2)	A(muestra cm2)	cabeza h1(cm)	cabeza h2(cm)	t1(h:m:s)	t2(h:m:s)	Delta t (h:m:s)	Delta s	h/L	K (cm/s)

6%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:07:12	02:41:57	01:34:45	5685	2,55	0,00381
	prueba 2	1000			61,8	35	00:21:33	01:07:12	00:45:39	2739	2,68	0,00334
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:21:33	00:21:33	1293	2,5	0,00969
6%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:10:42	02:36:16	01:25:34	5134	2,55	0,00422
	prueba 2	1000			61,8	35	00:25:38	01:10:42	00:45:04	2704	2,68	0,00338
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:25:38	00:25:38	1538	2,5	0,00815
6%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:21:38	02:48:20	01:26:42	5202	2,55	0,00417
	prueba 2	1000			61,8	35	00:35:10	01:21:38	00:46:28	2788	2,68	0,00328
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:35:10	00:35:10	2110	2,5	0,00594
Promedio	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:13:11	02:42:11	01:29:00	5340	2,55	<b>0,00406</b>	
	1000			61,8	35	00:27:27	01:13:11	00:45:44	2744	2,68	<b>0,00333</b>	
	500			35	10	00:00:00	00:27:27	00:27:27	1647	2,5	<b>0,00761</b>	

Tabla 32. Conductividad hidráulica carga variable 6% de contaminante petróleo

Fuente: Propia

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE													
Suelo													
Porcentaje de concentración:		8%				Contaminante:				Petróleo			
Longitud de la muestra:		10 cm											
Porcentaje	Prueba	Q(ml)	a (tubo cm <sup>2</sup> )	A(muestra cm <sup>2</sup> )	cabeza h1(cm)	cabeza h2(cm)	t1(h:m:s)	t2(h:m:s)	Delta t (h:m:s)	Delta s	h/L	K (cm/s)	
8%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:10:08	02:40:12	01:30:04	5404	2,55	0,00401	
	prueba 2	1000			61,8	35	00:18:32	01:10:08	00:34:41	2081	2,68	0,00439	
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:18:32	00:18:32	1112	2,5	0,01127	
8%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:15:02	02:35:58	01:20:56	4856	2,55	0,00446	
	prueba 2	1000			61,8	35	00:20:47	01:15:02	00:39:15	2335	2,68	0,00391	
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:20:47	00:20:47	1247	2,5	0,01005	
8%	prueba 1	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:18:16	02:34:07	01:15:51	4551	2,55	0,00476	
	prueba 2	1000			61,8	35	00:17:27	01:18:16	00:44:09	2649	2,68	0,00345	
	prueba 3	500			35	10	00:00:00	00:17:27	00:17:27	1047	2,5	0,01197	
Promedio	1500	5,08	5,08	87,3	61,8	01:14:29	02:36:46	01:22:17	4937	2,55	<b>0,00439</b>		
	1000			61,8	35	00:18:55	01:14:29	00:39:22	2355	2,68	<b>0,00388</b>		
	500			35	10	00:00:00	00:18:55	00:18:55	1135	2,5	<b>0,01103</b>		

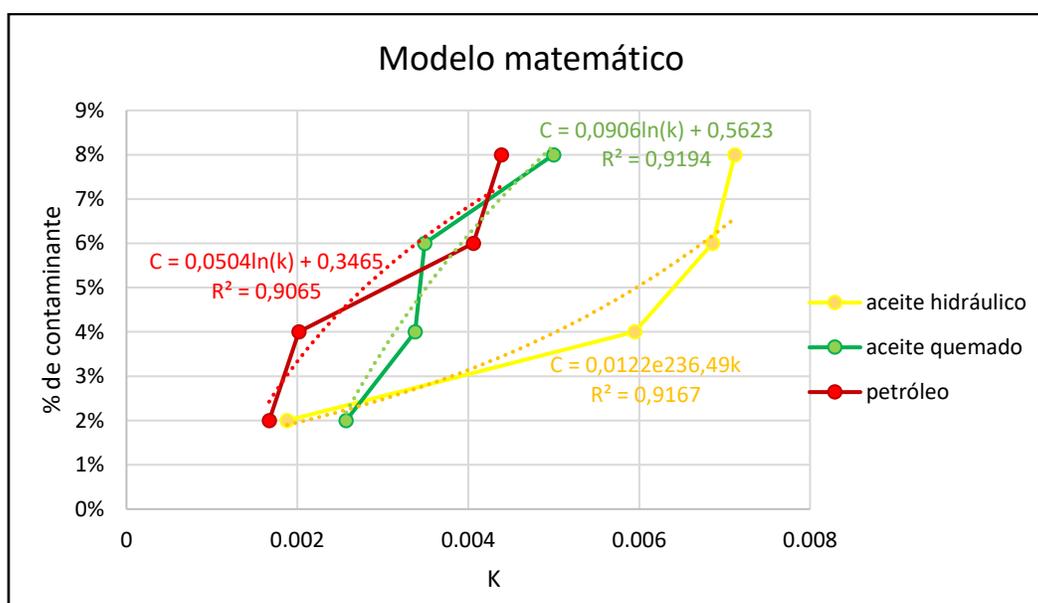
Tabla 33. Conductividad hidráulica carga variable 8% de contaminante petróleo

Fuente: Propia

### 6.9.1 Modelos matemáticos

	Aceite hidráulico	Aceite quemado	Petróleo
%	k (cm/s)	k (cm/s)	k (cm/s)
2%	0,00188	0,00257	0,00167
4%	0,00595	0,00338	0,00202
6%	0,00686	0,00349	0,00406
8%	0,00712	0,005	0,00439

Tabla 34. promedio de coeficientes de permeabilidad



Gráfica 15. modelo matemático conductividad hidráulica

Las ecuaciones que mejor representaron el comportamiento de las mezclas suelo-contaminante bajo diferentes porcentajes fueron las mencionadas en la gráfica número 15. Es interesante observar el comportamiento que toma el aceite hidráulico siguiendo una línea de tendencia exponencial mientras el comportamiento tanto del aceite quemado y el petróleo es totalmente opuesto siguiendo una línea de tendencia logarítmica. Esto se debe principalmente a las características de los tres contaminantes ya que el aceite hidráulico es mucho más limpio que el crudo y así mismo con el aceite quemado que contiene una serie de sustancias que lo afectan y le dan un comportamiento diferente.

## 6.10 LIXIVIACIÓN ACEITE LIMPIO

### 6.10.1 Muestras 10 de mayo del 2019

El viernes 10 de mayo se da por terminado la compactación de todos los cilindros con sus diferentes porcentajes de contaminante y se inicia el ensayo de lixiviación agregando a recipientes plásticos dos muestras por cada contaminante.



*Ilustración 25. Muestras para ensayo de lixiviación*

### 6.10.2 Muestras 24 de mayo del 2019

#### ➤ Aceite limpio 4%



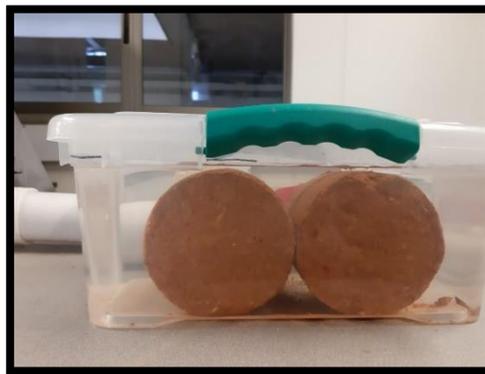
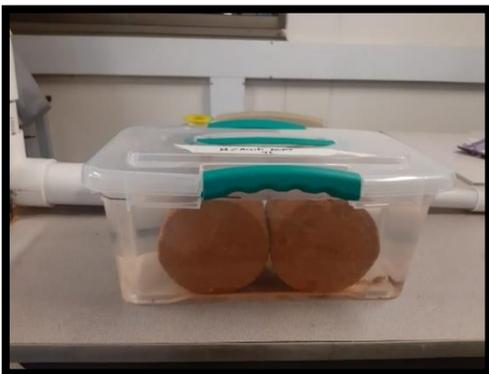
*Ilustración 26. Aceite limpio 4%. 24 de mayo*

➤ **Aceite limpio 6%**



*Ilustración 27. Aceite limpio 6%. 24 de mayo*

➤ **Aceite limpio 8%**



*Ilustración 28. Aceite limpio 8%. 24 de mayo*

### 6.10.3 Muestras 31 de mayo del 2019

➤ **Aceite limpio 4%**



*Ilustración 29. Aceite limpio 4%. 31 de mayo*

➤ **Aceite limpio 6%**



*Ilustración 30. Aceite limpio 6%. 31 de mayo*

➤ **Aceite limpio 8%**



*Ilustración 31. Aceite limpio 8%. 31 de mayo*

#### 6.10.4 Muestras finales 13 de junio del 2019

➤ **Aceite limpio 4%**





Ilustración 32. Fotografías finales aceite limpio 4%

➤ **Aceite limpio 6%**



Ilustración 33. Fotografías finales aceite limpio 6%

➤ **Aceite limpio 8%**

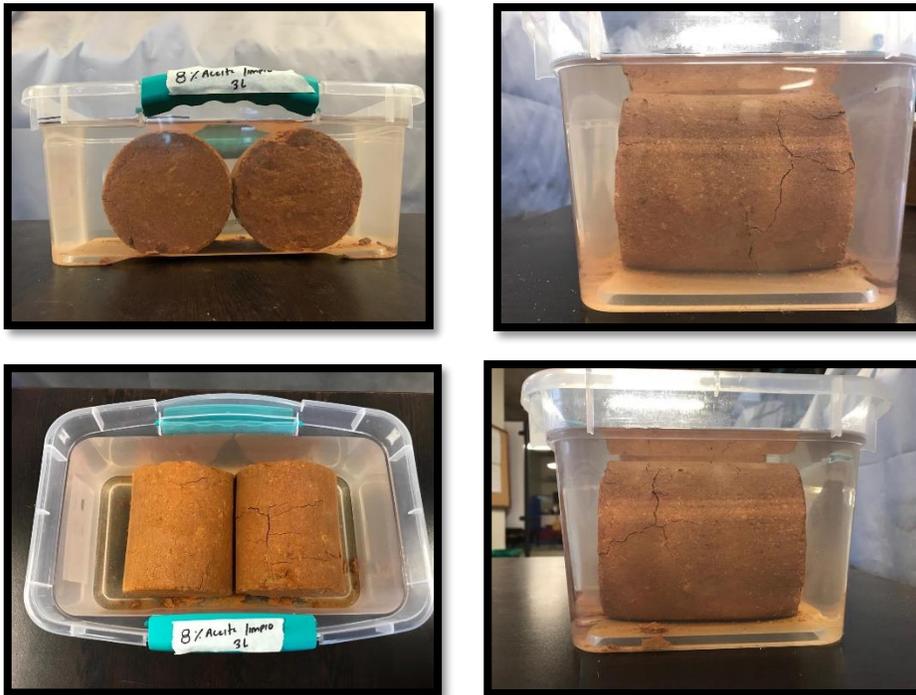
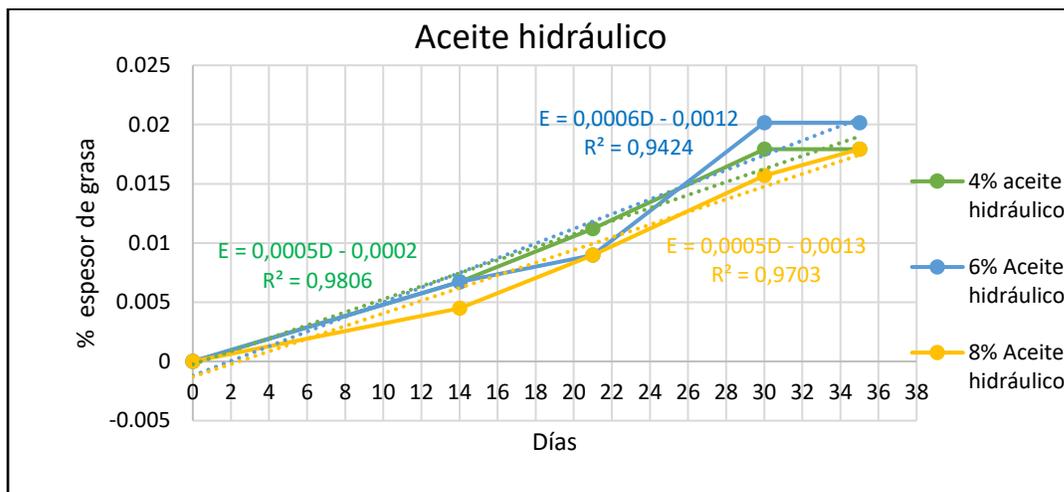


Ilustración 34. Fotografías finales aceite limpio 8%

### 6.10.5 Modelos matemáticos aceite hidráulico

Aceite hidráulico			
Día	4%	6%	8%
0	0	0	0
14	0,00672	0,00672	0,00448
21	0,0112	0,00896	0,00896
30	0,01792	0,02016	0,01568
35	0,01792	0,02016	0,01792



Gráfica 16. modelo matemático aceite hidráulico. Lixiviación

En la gráfica número 16 se observó el comportamiento en el proceso de lixiviación mediante la mezcla suelo-aceite hidráulico en porcentajes de 4%, 6% y 8% respecto al peso de 2000g de suelo proveniente del talud de la UPB Bucaramanga. Es curioso que el menor porcentaje de aceite hidráulico en el suelo en algunas mediciones tenga mayor porcentaje de espesor de grasa en la superficie del agua en algunas mediciones mientras los porcentajes de 6% y 8% tratan de estabilizarse al transcurrir el tiempo. De lo anterior se dedujo que es producto de la destrucción de los cilindros que podía salir mayor cantidad de aceite mientras que en los cilindros con mayor porcentaje de contaminante, estos se conservaron en buen estado, con una buena cohesión entre el suelo y el aceite.

## 6.11 LIXIVIACIÓN ACEITE QUEMADO

### 6.11.1 Muestras 10 de mayo del 2019



Ilustración 35. Ensayo de lixiviación en ejecución

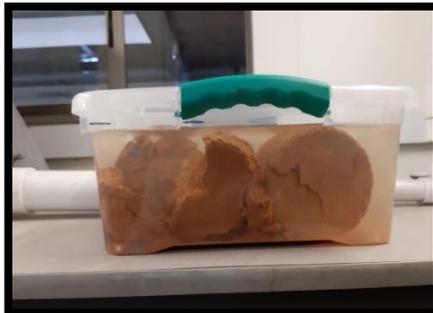
### 6.11.2 Muestras 24 de mayo del 2019

➤ **Aceite quemado 4%**



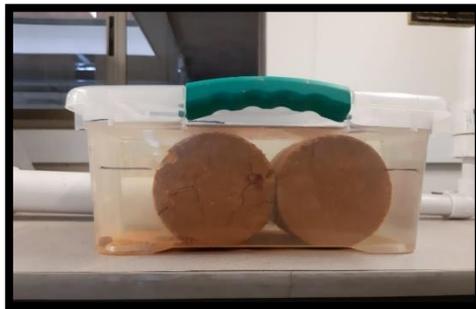
*Ilustración 36. Aceite quemado 4%. 24 de mayo.*

➤ **Aceite quemado 6%**



*Ilustración 37. Aceite quemado 6%. 24 de mayo*

➤ **Aceite quemado 8%**



*Ilustración 38. Aceite quemado 8%. 24 de mayo*

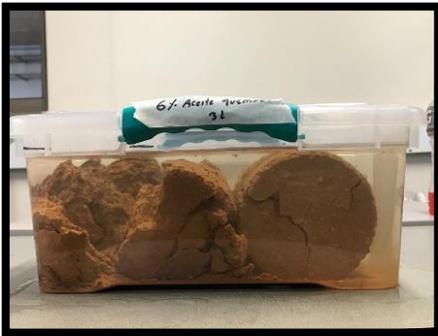
### 6.11.3 Muestras 31 de mayo del 2019

➤ **Aceite quemado 4%**



*Ilustración 39. Aceite quemado 4%. 31 de mayo*

➤ **Aceite quemado 6%**



*Ilustración 40. Aceite quemado 6%. 31 de mayo*

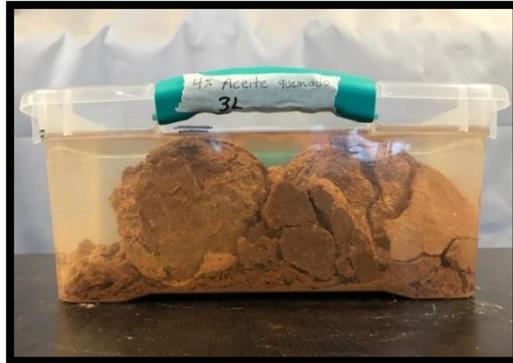
➤ **Aceite quemado 8%**



*Ilustración 41. Aceite quemado 8%. 31 de mayo*

#### 6.11.4 Muestras finales 13 de junio del 2019

➤ **Aceite quemado 4%**



*Ilustración 42. Fotografías finales aceite quemado 4%*

➤ **Aceite quemado 6%**





Ilustración 43..Fotografías finales aceite quemado 6%

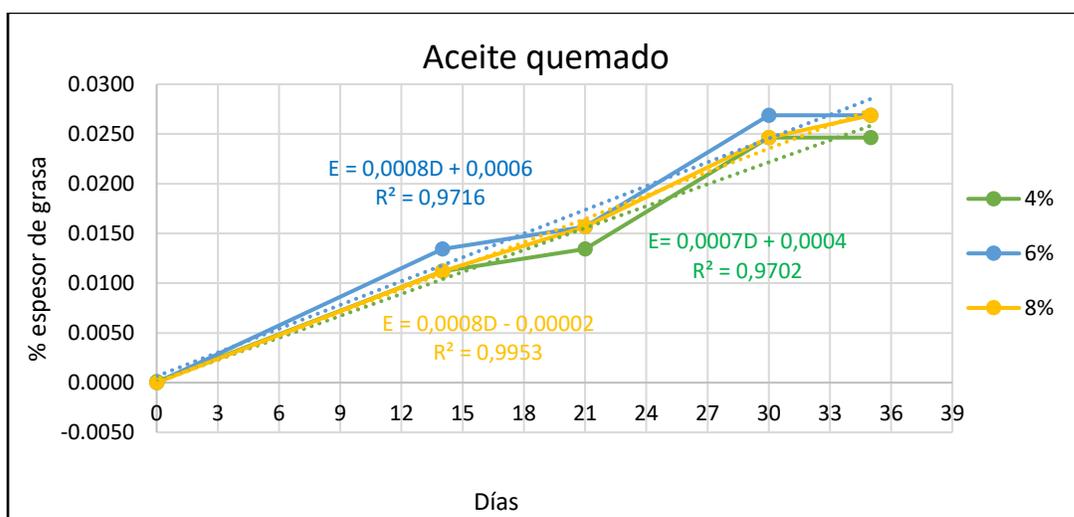
➤ **Acete quemado 8%**



Ilustración 44..Fotografías finales aceite quemado 8%

### 6.11.5 Modelos matemáticos aceite quemado

Aceite quemado			
Día	4%	6%	8%
0	0	0	0
14	0,0112	0,0134	0,0112
21	0,0134	0,0157	0,0157
30	0,0246	0,0269	0,0246
35	0,0246	0,0269	0,0269



Gráfica 17. modelo matemático aceite quemado. Lixiviación

En la gráfica número 17 se observó el comportamiento en el proceso de lixiviación mediante la mezcla suelo-aceite quemado en porcentajes de 4%, 6% y 8% respecto al peso de 2000g de suelo proveniente del talud de la UPB Bucaramanga. Las mezclas de suelo al finalizar el día 35 de haber iniciado la prueba, se encuentran totalmente estabilizadas; el porcentaje de espesor de grasa no ha sufrido cambios bruscos. Se observó un leve aumento en la capa de grasa en las mezclas de 6% y 8% debido que se generaron grandes grietas en el cilindro compactado lo cual genera que las sustancias del contaminante que no están adheridas al suelo salgan a la superficie.

## 6.12 LIXIVIACIÓN PETRÓLEO

### 6.12.1 Muestras 10 de mayo del 2019



*Ilustración 45. Muestras con petróleo. 10 de mayo*

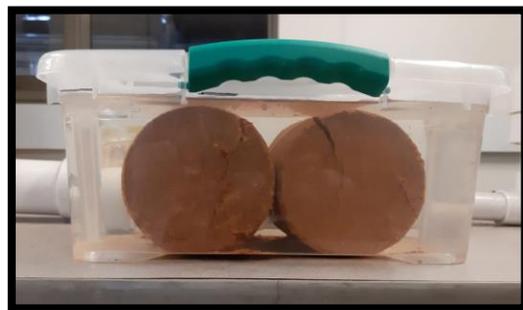
### 6.12.2 Muestras 24 de mayo del 2019

➤ **Petróleo 4%**



*Ilustración 46. Petróleo 4%. 24 de mayo*

➤ **Petróleo 6%**



*Ilustración 47. Petróleo 6%. 24 de mayo*

➤ **Petróleo 8%**



*Ilustración 48. Petróleo 8%. 24 de mayo*

**6.12.3 Muestras 31 de mayo del 2019**

➤ **Petróleo 4%**



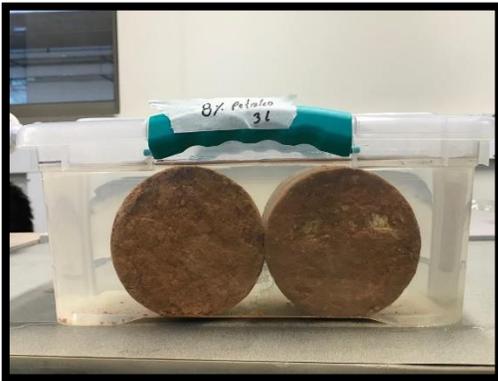
*Ilustración 49. Petróleo 4%. 31 de mayo*

➤ **Petróleo 6%**



*Ilustración 50..Petróleo 6%. 31 de mayo*

➤ **Petróleo 8%**



*Ilustración 51.Petróleo 8%. 31 de mayo*

### 6.12.4 Muestras finales 13 de junio del 2019

➤ **Petróleo 4%**





*Ilustración 52. Fotografías finales petróleo 4%*

➤ **Petróleo 6%**



*Ilustración 53. Fotografías finales petróleo 6%*

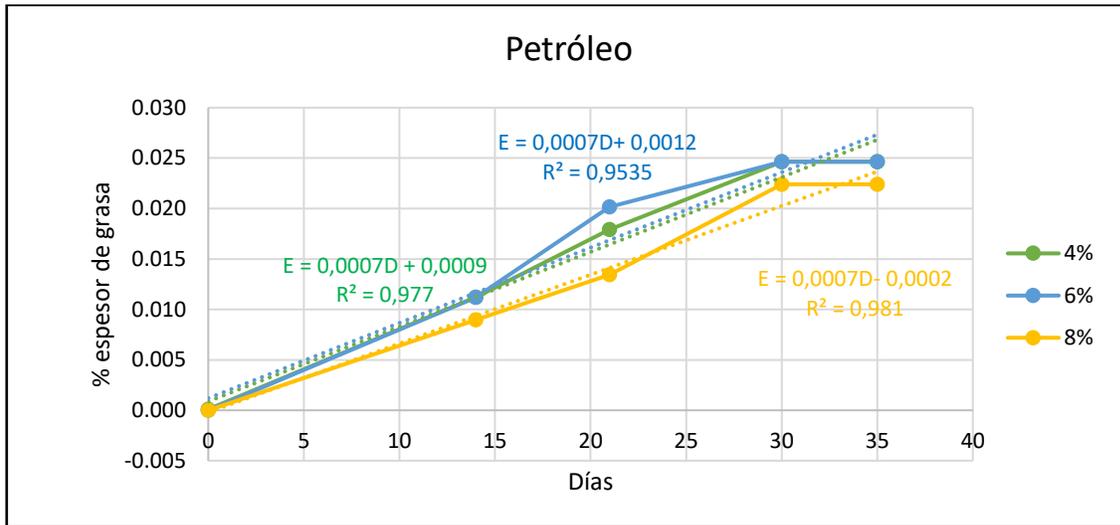
➤ **Petróleo 8%**



Ilustración 54. Fotografías finales petróleo 8%

### 6.12.5 Modelos matemáticos petróleo

Petróleo			
Día	4%	6%	8%
0	0	0	0
14	0,0112	0,0112	0,0090
21	0,0179	0,0202	0,0134
30	0,0246	0,0246	0,0224
35	0,0246	0,0246	0,0224



Gráfica 18. modelo matemático petróleo. Lixiviación

En la gráfica número 18 se observó el comportamiento en el proceso de lixiviación mediante la mezcla suelo-petróleo en porcentajes de 4%, 6% y 8% respecto al peso de 2000g de suelo proveniente del talud de la UPB Bucaramanga. Al finalizar la prueba, se observó porcentajes de espesor de grasa similares, pero con cilindros de 4% y 6% mucho más deteriorados.

## 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS



Ilustración 55. Talud analizado UPB Bucaramanga

### 7.1 Análisis granulométrico talud UPB Bucaramanga

- Una vez realizado el análisis granulométrico del suelo, arroja que este contiene 1% de grava, 38% arenas y 61% de material fino. Esta conformación bastante equivalente entre arenas y finos permite que el suelo sea el correcto para ser mezclado con los contaminantes (aceite hidráulico, aceite quemado, petróleo).
- Al realizarse el ensayo de límites de Atterberg da como resultado un límite líquido de 42.5%, límite plástico de 28.1% y el respectivo índice de plasticidad de 14.4%. Con estos resultados se observa en la carta de plasticidad que este suelo recibe el nombre de ML (Limo arenoso de mediana compresibilidad).

### 7.2 Ensayo Proctor modificado

- El promedio obtenido en los tres ensayos realizados de Proctor muestra en el punto mas alto de la curva la densidad seca máxima que fue de 1,91 g/cm<sup>3</sup> y un contenido de humedad de 13,3%. Estos datos obtenidos sirven para trabajar con las propiedades optimas del suelo cuando se quiere realizar una compactación ya que la adición de agua mejora la cohesión y lubricación del suelo, pero de igual manera el exceso puede ocasionar la saturación haciendo que las partículas se desplacen con facilidad, debilitando la capacidad de resistencia a la carga de la estructura. Se realizó el ensayo de Proctor modificado ya que el suelo será utilizado en vías terciarias por donde transitan vehículos de gran peso y requiere que la estructura soporte una mayor carga para limitar los asentamientos.

### 7.3 Ensayo de CBR

Con el fin de medir la resistencia al esfuerzo cortante del suelo del Talud de la UPB Bucaramanga se realizó el ensayo de CBR en el cual se obtuvo para 100% de la máxima densidad seca un CBR de 28,1% y para un 95% de la máxima densidad seca un 18,1%. Así mismo el CBR de cada uno de los moldes se muestra en la siguiente tabla:

	DENS.(g/cm <sup>3</sup> )	0.1"	0.2"	CBR(%)
10 golpes	1,76	11,4	12,3	12,3
25 golpes	1,92	22,8	28,4	28,4
56 golpes	2,03	29,9	37,9	37,9

Tabla 35. porcentaje de CBR respecto a cada molde

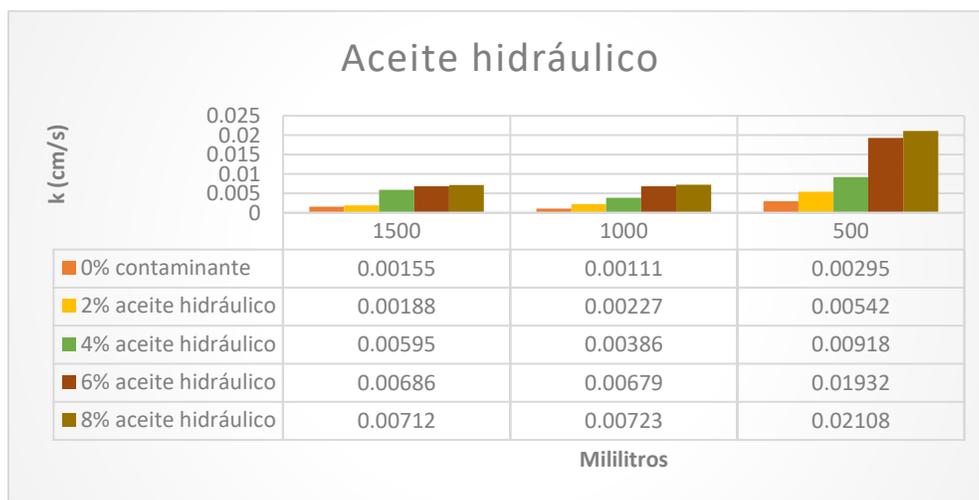
Con estos valores podemos determinar según la clasificación general el suelo se encuentra clasificado como BUENO y su uso puede ser en SUB BASE y BASE para el mejoramiento y/o construcción de una vía.

## 7.4 Conductividad hidráulica

A continuación, se realiza un análisis detallado a cada uno de los contaminantes con sus respectivos porcentajes dentro del suelo.

### 7.4.1 Aceite hidráulico

El aceite hidráulico como se muestra en la figura varía la permeabilidad dependiendo de la cantidad de agua y el porcentaje de contaminante.



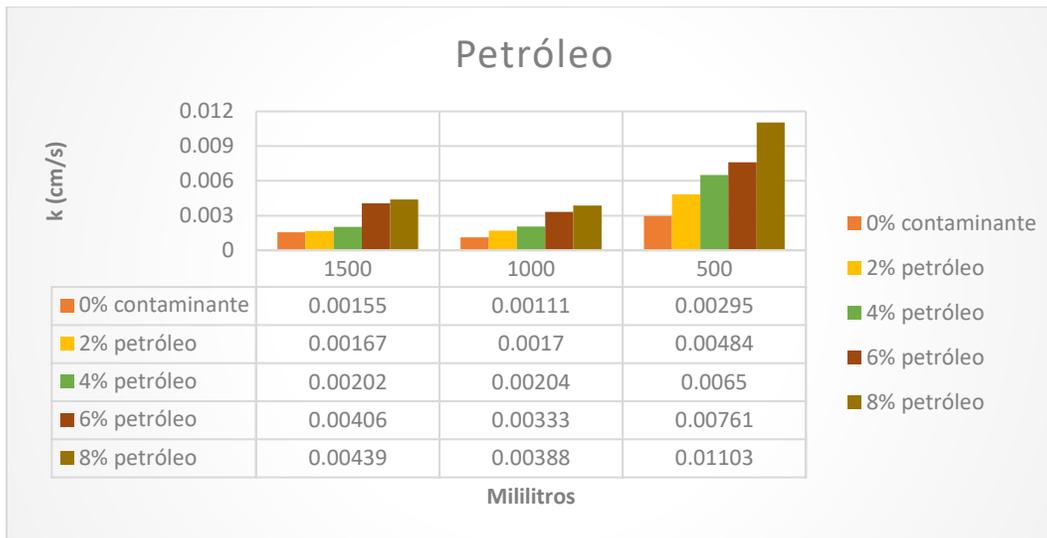
Gráfica 19. Variación contaminante aceite hidráulico

### 7.4.2 Aceite quemado



Gráfica 20. variación contaminante aceite quemado

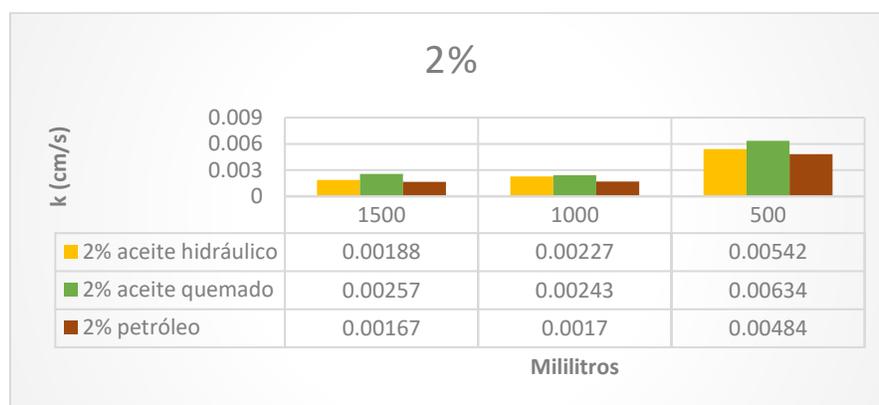
### 7.4.3 Petróleo



Gráfica 21. Variación contaminante petróleo

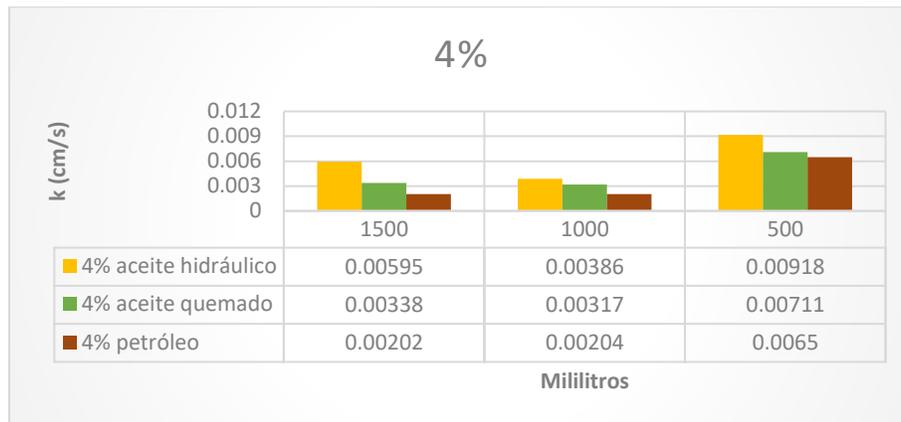
### 7.4.4 Contaminante 2%

Cada uno de los contaminantes tiene una permeabilidad diferente debido a las sustancias que los componen. Por esta razón se realiza un análisis a cada uno de los porcentajes mezclados con el suelo del talud de la Universidad Pontificia Bolivariana.



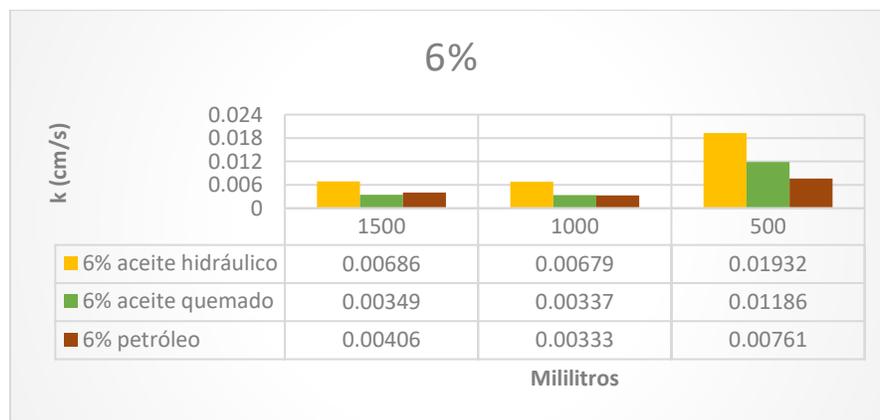
Gráfica 22. sustancias contaminantes 2%

### 7.4.5 Contaminante 4%



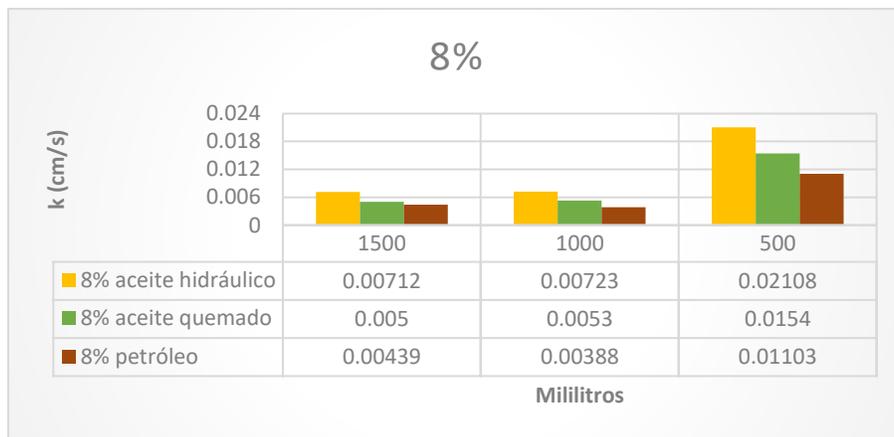
Gráfica 23. Sustancias contaminante 4%

### 7.4.6 Contaminante 6%



Gráfica 24. Sustancias contaminantes 6%

#### 7.4.7 Contaminante 8%



Gráfica 25. Sustancias contaminante 8%

#### 7.5 Lixiviación

A continuación, se analiza cada una de las mezclas de contaminantes con el suelo del talud de la Universidad Pontificia Bolivariana en los diferentes registros observados durante la ejecución del ensayo de lixiviación.

##### 7.5.1 Lixiviación aceite limpio

A los catorce (14) días después de haber iniciado el ensayo, se observa en las muestras un deterioro significativo en uno de los cilindros con 4% de contenido de aceite limpio, pequeñas fisuras en los dos cilindros de 6% y totalmente normal los cilindros con 8%. El agua se observa totalmente clara y con un mínimo de grasa.

Siete (7) días después de haber tomado registro se observa las muestras con 4% de aceite limpio con mayor deterioro, así mismo, los cilindros de 6% con mayores fisuras y los de 8% totalmente compactos, pero al igual que todas las muestras, el agua se encuentra con mayor cantidad de suelo en el fondo y una mínima capa de grasa en la superficie.

Trece días (13) después de haber tomado registro y 35 días de haber iniciado el ensayo, los cilindros de 4% se encuentran bastante destruidos y el agua con gran cantidad de partículas de suelo en su parte inferior y en la superficie con una delgada línea de grasas que no supera 0,8mm. Los cilindros de 6% tienen sus grietas más marcadas y definidas, pero sin estar totalmente destruidos. En la superficie se observa una línea de grasas que fue de 1,0mm. Y

finalmente, los cilindros de 8% de contaminante de aceite limpio se encuentran totalmente compactos con el agua sin muestras de sedimento de suelo, con una delgada línea de grasas de aproximadamente 0,8mm.

### **7.5.2 Lixiviación aceite quemado**

A los catorce (14) días después de haber iniciado el ensayo, se observa en las muestras un deterioro significativo mayor que en las muestras de aceite limpio en los dos cilindros con 4% de contenido de aceite quemado, una destrucción en uno de los cilindros y bastante deterioro en el otro de 6% y con algunas fisuras se encuentran los cilindros de 8%. El agua adquirió un color amarillo debido a las partículas de suelo que se encuentran presentes en todo el recipiente, por esta razón no se logra tomar una medida exacta de la capa en la superficie.

Siete (7) días después de haber tomado registro se observa las muestras con 4%,6% y 8% se encuentran muy similar a lo registrado anteriormente, pero con el agua un poco más transparente ya que las partículas de suelo comienzan a sedimentarse.

Trece días (13) después de haber tomado registro y 35 días de haber iniciado el ensayo, los cilindros de 4% y 6% se encuentran totalmente destruidos y todo suelo ubicado en la parte inferior del recipiente; en la parte superior se observa una lámina de grasa de aproximadamente de 1,1 mm y 1,2mm respectivamente. Los cilindros de 8% se encuentran con grietas marcadas y sufrieron algunos daños mayores que los registrados en las muestras de 8% de aceite limpio; sin embargo, la lámina de grasas no superó 1,1mm.

### **7.5.3 Lixiviación petróleo**

A los catorce (14) días después de haber iniciado el ensayo, se observa una ruptura en los cilindros con 4% de contenido de petróleo, pequeñas fisuras en los dos cilindros de 6% y totalmente normal los cilindros con 8%.

Siete (7) días después de haber tomado registro se observa las muestras con 4% de petróleo con mayor deterioro, así mismo, los cilindros de 6% y 8% conservan sus condiciones con el agua bastante transparente y una capa de grasas que no supera 1,0mm.

Trece días (13) después de haber tomado registro y 35 días de haber iniciado el ensayo, los cilindros de 4% se encuentran totalmente destruidos y el agua con gran cantidad de partículas de suelo en su parte inferior y en la superficie una capa de grasas de 1,2 mm. Los cilindros de 6% tienen sus grietas más acentuadas, pero sin estar totalmente destruidos con una superficie de grasas de aproximadamente 1,2mm. Finalmente, uno de los cilindros de 8% con petróleo se encuentra con leves grietas mientras el otro se encuentra en perfectas condiciones y con muy poca cantidad de sedimentos y una capa de grasas que oscila entre 0,9 y 1,0mm.

## 8 CONCLUSIONES

- Dentro del análisis granulométrico se determinó que el suelo empleado del Talud de la Universidad Pontificia Bolivariana contiene una relación de 60%:40% entre finos y arenas con un índice de plasticidad de 14.4% recibiendo como nombre limo arenoso de baja plasticidad (ML) y se describe como un limo con trazas de arcilla, resultados que están dentro de lo normal para los suelos de la zona.
- En el ensayo de Proctor modificado el punto más alto en la curva la densidad seca máxima que fue de 1,91 g/cm<sup>3</sup> y un contenido de humedad de 13,3% lo cual sirve para realizar una compactación óptima al suelo ya que este será utilizado en vías terciarias por donde transitan vehículos de gran peso y requiere una estructura que soporte estas cargas para evitar posibles daños en la vía. Cuando se realizó el ensayo de CBR se observó claramente que la muestra que fue compactada con 56 golpes es el que mejor resultado arroja ya que se disminuye la relación de vacíos, aumentó la densidad, comportándose de una manera más homogénea y resistente. Un CBR de 28,1% para el 100% de la máxima densidad seca y para un 95% de la máxima densidad seca un 18,1% se obtuvo de los ensayos realizados anteriormente mencionados en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga.
- En el ensayo de conductividad hidráulica, mientras más fina sea la textura del suelo, más lenta será la permeabilidad. Así mismo se puede concluir que el suelo mezclado a mayor porcentaje de contaminante la permeabilidad va aumentando, siendo cada vez más rápida. En los ensayos realizados a las muestras con 2% de contaminante de cada una de las sustancias, se concluye que el suelo mezclado con aceite quemado tuvo una permeabilidad más rápida que el mezclado con aceite hidráulico y posteriormente con petróleo. Las muestras con 4%, 6% y 8% se tuvo una permeabilidad más rápida en las muestras con aceite hidráulico seguidas del aceite quemado y una permeabilidad mucho más lenta con el crudo debido a que este contiene sustancias impuras que impiden o intervienen en el libre flujo del agua.
- En el ensayo de conductividad hidráulica, la ecuación que mejor representó el comportamiento de las mezclas de suelo-aceite hidráulico en porcentajes de 2%, 4%, 6% y 8% es  $C = 0.0122e^{236.49k}$  donde k representa la permeabilidad del suelo en cm/s siguiendo una tendencia exponencial y C es el porcentaje de contaminante. Las ecuaciones que representan el modelo en mezclas de suelo con aceite quemado siguiendo una tendencia logarítmica fue  $C = 0.0906\ln(k) + 0.5623$  y en petróleo fue  $C = 0.0504\ln(k) + 0.3465$ , donde k representa la permeabilidad en el suelo en cm/s.

- Cada uno de los cilindros empleados en el ensayo de lixiviación tuvo la misma cantidad de suelo con diferentes porcentajes de contaminante y el mismo volumen de agua. Se determinó que el suelo como encapsulante funciona mejor cuando se adiciona un mayor porcentaje de contaminante ya que las partículas se adhieren y permiten una mayor cohesión entre las mismas. Dentro de las sustancias contaminantes mezcladas y analizadas se observó un mejor comportamiento de los cilindros cuando se emplea un 8% de contaminante al suelo. El que menor impacto tiene es cuando se usa aceite hidráulico, seguido por petróleo y finalmente aceite quemado.
- Se evidenció una tendencia lineal en las ecuaciones obtenidas del ensayo de lixiviación, en las mezclas de suelo-contaminante en porcentajes de 4%, 6% y 8%. La ecuación para simular el comportamiento de la mezcla con 4% de aceite hidráulico fue  $E = 0.0005D - 0.0002$ , para un 6% de contaminante fue  $E = 0.0006D - 0.0012$ , y para un 8% de contaminante fue  $E = 0.0005D - 0.0013$ . En las mezclas de 4% con aceite quemado la ecuación fue  $E = 0.0007D + 0.0004$ , para un 6% la ecuación fue  $E = 0.0008D + 0.0006$ , y para un 8% fue  $y = 0.0008D - 0.00002$ . Finalmente, las ecuaciones que representaron las mezclas de suelo-petróleo en porcentajes de 4%, 6% y 8% fueron  $E = 0.0007D + 0.0009$ ,  $y = 0.0007D + 0.0012$ ,  $E = 0.0007D - 0.0002$  respectivamente, donde E es el porcentaje de espesor de grasa respecto al volumen total de grasa y D es el tiempo en días de la duración del ensayo.
- La inclusión de contaminantes como el aceite hidráulico, petróleo e incluso aceite quemado con porcentajes de 8% en mezclas de suelo con una relación proporcional entre finos y arenas, son aquellos que presentan el mejor comportamiento como un material nuevo de compactación en el mantenimiento de las vías terciarias del municipio de Santander una vez se realicen pruebas adicionales como Ph al agua para continuar analizando su comportamiento y así mismo evitar cualquier tipo de contaminación ambiental.

## 9 RECOMENDACIONES

- Realizar una mejor clasificación de cada uno de los materiales analizados para tener mayor certeza de las características y propiedades de cada material. Así mismo, estudiar otros materiales con porcentajes de finos y arenas diferentes para observar y analizar los resultados.
- Se recomienda realizar el ensayo de Proctor modificado y CBR con un material de mayor cantidad de finos para identificar si puede o no ser utilizado para las diferentes mezclas con contaminantes.
- Realizar ensayos adicionales para conocer de fondo el comportamiento de las diferentes mezclas.
- Se recomienda realizar dos o más modelos de permeámetro de carga constante para tener mayor certeza y rapidez con los datos obtenidos de conductividad hidráulica.
- Para los ensayos de lixiviación y conductividad hidráulica, se recomienda continuar con analizando las muestras de agua que filtran las muestras de suelo mediante el análisis de pruebas de grasas, ph y demás pruebas relacionadas con la calidad del agua obtenida, y así mismo continuar los ensayos con mayor porcentaje de contaminante con el fin de observar la tendencia de las ecuaciones que modelan el comportamiento de estas mezclas bajo diferentes porcentajes de contaminante.

## 10 BIBLIOGRAFÍA

### Bibliografía

- Alarcon, J. (2007). *Reciclado de pavimentos asfálticos en caliente en planta* .
- Arevalo, C., Jimenez, N., & Salazar, D. (2018). *efecto del aceite quemado de motor en las características físico mecánicas de mezclas asfálticas que contienen pavimento reciclado* . Ibaguè : Universidad Cooperativa de Colombia .
- Chavarro, W., & Molina, C. (2015). *Evaluación de alternativas de pavimentación para vías de bajos volúmenes de tránsito* . Bogotá D. C: Universidad Católica de Colombia .
- cruz, L. G. (2011). *Mecánica de suelos* . universidad del cauca .
- Duque, G. (2002). *Mecánica de suelos* . Universidad Nacional .
- Gallego, P. J. (2016). *Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP*. Bogotá D. C.
- Grisales, J. (2014) . *Mecánica de Suelos* . Villavicencio : Corporación Universitaria del Meta .
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Medellín : Universidad Nacional de Colombia .
- Lambe, W., & Withman, R. (2004). *Mecánica de suelos*. Universidad de Massachusetts. México : Editorial Limusa.
- Leal, M. C. (2011). *Planteamiento de alternativas físico-químicas para remediación de agua subterránea y suelos contaminados con hidrocarburos apoyados en la aplicación de software visual modflow para una área de interés de Ecopetrol S.A.* Universidad Pontificia Bolivariana .
- Loria, L. G. (2016). *Reciclaje en pavimentos: Influencia de los métodos de extracción en las propiedades del agregado*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Martínez, E. O. (2017). *esquema de mantenimiento y mejoramiento en vías terciarias Colombia responde*. *Revista de ingeniería*(45), 52-57.
- Mendez, A. (2015). *Evaluación técnica y económica del uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en vías colombianas* . Bogotá D. C.: Universidad Militar Nueva Granada.
- Pellini, L. (2005). *Biorremediación estimulada por efluentes cloacales tratados de suelos contaminados con hidrocarburos*.

- Perez, C. (2008). *Modificación de la capacidad de Intercambio Catiónico a través de la aplicación de coloides en el suelo* . Universidad Autonoma Agraria .
- Riesco, R. (2012). *Proyecto de recuperacion de suelos contaminados por hidrocarburos* . Cerdanyola de Valles : Universidad Autno de Barcelona .
- Santin, P. (2005). *Caracterización de suelos inestables frente a deslizamiento en dos laderas situadas en los alrededores de la ciudad de Cuenca* . Cuenca- Ecuador : Universidad de Cuenca .
- Sembenelli, P. (1996). los limites de Atterberg y su significado en la industria cerámica y ladrilleria. *Materiales de Construcción* , 16(121).
- Universidad de Costa rica. (2017). *Pavimento Asfáltico Reciclado*. Obtenido de <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/campanas/pavimentos-verdes/ficha-3.pdf>
- Velasquez, J. (2017). *Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación*. Colombia: National Open University and Distance .