UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Evaluación sobre el Uso de Cortes Tratados de Perforación Petrolera en la Construcción de Vías Terciarias

Guillermo Andrés Soto Conde

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Área Curricular de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
Diciembre de 2017

Evaluación sobre el Uso de Cortes Tratados de Perforación Petrolera en la Construcción de Vías Terciarias

Guillermo Andrés Soto Conde

Trabajo Final presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería - Geotecnia

Directora:

Dra. Gloria Inés Beltrán Calvo

Línea de Investigación:

Relaciones constitutivas de suelos, rocas y materiales afines.

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Área Curricular de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

Diciembre de 2017

Dedicado a Dios, a mis padres, a Luisa, Santi y Mathias por ser los pilares de mi vida y por alimentarme siempre con su amor.

Agradecimientos

A la Ingeniera Gloria por su confianza y por haberme dado la oportunidad de ser parte de este proyecto, que espero sea de gran aporte para otros colegas.

A la geóloga Nydia Romero y a la profesora Martha Cristina Bustos por su colaboración y aportes en este trabajo de maestría.

Al Ingeniero Dimas Robles, por su ayuda y consejos a lo largo de la Maestría.

A Equión Energy por haber facilitado el material de cortes tratados de perforación petrolera, usados en el presente trabajo de maestría.

A mis compañeros de la fase de laboratorio por su apoyo incondicional.

A mi alma mater la Universidad Nacional de Colombia por haberme acogido y hacerme sentir orgulloso de pertenecer a esta institución.

Resumen

En los últimos años, se ha incrementado notablemente la búsqueda de nuevos yacimientos de petróleo y gas a nivel mundial, debido a la constante demanda de fuentes de energía para el desarrollo industrial y el aumento de la población. Lo anterior implica la generación de un volumen importante de residuos sólidos de perforación petrolera en el futuro. Si bien la industria ha desarrollado muchos procesos y tecnologías para reducir al mínimo la generación de desechos y disponer de forma más segura y económica los residuos que se puedan generar, los volúmenes tienden a incrementarse. Por tal motivo, este trabajo final de maestría busca evaluar el aprovechamiento potencial de los ripios o cortes de perforación petrolera, aplicado al área de construcción de vías terciarias, planteando una opción económica para el mejoramiento de suelos de bajas características mecánicas en zonas apartadas del país y contribuyendo a la disminución del impacto ambiental de dichos residuos. En la investigación se utiliza material de cortes de perforación petrolera sometidos al tratamiento térmico mecánico (TCC) en forma de ceniza, como un agente de mejoramiento para suelos arcillosos de baja plasticidad, predominantes en la zona de La Primavera y Santa Rosalía en el departamento del Vichada. Adicionalmente, con base en la experiencia exitosa encontrada en otro trabajo final de maestría, se ha considerado la adición de Silicato de Sodio para mejorar las propiedades de la mezcla ceniza - Suelo. En el plan de ensayos, se consideró la caracterización básica de cada uno de los materiales empleados; así como la evaluación de resistencia y durabilidad de probetas compactadas y curadas a 0, 7 y 14 días, teniendo en cuenta las condiciones climáticas de humedad relativa y temperatura propias de la región, para encontrar la mezcla de mejor comportamiento mecánico.

Palabras clave: Carreteras terciarias, cenizas de cortes de perforación petrolera, tratamiento térmico mecánico, mejoramiento de suelos.

Abstract

In recent years, the search for new oil and gas deposits worldwide has increased, due to the high demand for energy sources needed by industrial development and population growth. The foregoing implies considering a significant volume of solid waste from oil and gas drilling in the future. However, in the last decade, the industry has developed many processes and technologies to minimize waste generation and to dispose them safely and economically.

This work, exposes a potential use of drill cuttings applied to tertiary roads construction, proposing an economic option to improve soils of low mechanical characteristics in remote areas of the country, contributing to reduce environmental impacts of wastes. For that purpose, oil drilling cuttings subjected to mechanical heat treatment (TCC) were used as an improvement agent for low plasticity clayey soils found around the towns of La Primavera and Santa Rosalía, at the state of Vichada. Based on successful experiences of pararell investigations of this work, it has also been considered the addition of Sodium Silicate to improve some properties of Drilling Cuttings - Soil mixtures. In the experimental plan, basic characterization tests on each material used were conducted as well as strength and durability evaluation of compacted and cured samples at 0, 7 and 14 days, considering typical climate conditions of temperature and humidity in the region. Finally, an optimum combination of soil-silicate-cuttings is selected, in terms of mechanical behavior.

Keywords: Tertiary roads, drill cuttings, mechanical heat treatment, sodium silicate, soil improvement.

Contenido

Pág.

Resumen ..... **IX**

Abstract ..... **X**

Lista de Fotografías ..... **XIII**

Lista de figuras ..... **XIV**

Lista de Símbolos y abreviaturas ..... **XVI**

Introducción **1**

1. Marco conceptual y antecedentes **5**
1.1 Cortes de Perforación Petrolera 5
1.1.1 Lodos de Perforación 6
1.1.2 Proceso de Perforación 7
1.1.3 Marco legal y normativo 9
1.1.4 Tratamiento Térmico Mecánico (TCC) para cortes de perforación 11
1.2 Antecedentes del uso de ripios de perforación para construcción 14
1.2.1 Bloques de hormigón 14
1.2.2 Construcción de Carreteras 16

2. Caracterización de la zona de estudio **19**
2.1 Localización General 19
2.2 Localización del Área de Estudio 20
2.3 Características Geológicas de la Zona de Estudio 21
2.4 Antecedentes de mejoramiento de los suelos del área estudiada 21

3. Metodología **27**
3.1 Toma de Muestras y Ensayos de Campo 28
3.2 Diseño experimental en laboratorio 29
3.2.1 Proceso de compactación de probetas 32
3.2.2 Proceso de Curado de Probetas 32
3.2.3 Ensayos de Compresión Inconfinada 33
3.2.4 Ensayos de Desleimiento - Durabilidad 34
3.2.5 Ciclos de Humedecimiento - Secado 35

4. Caracterización básica de los materiales **37**
4.1 Suelo Natural de La Primavera 37
4.2 Ceniza de Cortes de Perforación 41

4.2.1 Caracterización Física 42
4.2.2 Caracterización Química 44
4.2.3 Caracterización ambiental 45

5. Caracterización de resistencia y durabilidad 47
5.1 Resultados de Compresión Inconfinada 47
5.2 Medición de Velocidad de Onda 53
5.3 Resultados de Desleimiento - Durabilidad 55
5.4 Parámetros de Resistencia en Ensayo de Corte Directo 58
5.5 Análisis microscópico de las muestras 60

6. Análisis de Resultados 69

7. Conclusiones y Recomendaciones 75
7.1 Conclusiones 75
7.2 Recomendaciones 77

Bibliografía 79

Lista de Fotografías

Pág.
Fotografía 1-1 Vista de Sistema de Desorción Térmica 12
Fotografía 3-1 Vista de la extracción de muestras de suelo y ensayos de campo. 29
Fotografía 3-2 Vista de proceso de compactación de las probetas en laboratorio 32
Fotografía 3-3 Cámara de estabilidad utilizada durante el curado de las probetas. 33
Fotografía 3-4 Vista de muestras ensayadas a compresión inconfinada. 34
Fotografía 3-5 Vista de ensayo de Desleimiento – durabilidad muestra de suelo ceniza. 35
Fotografía 3-6 Desarrollo de la técnica de Humedecimiento – Secado aplicada. 35
Fotografía 4-1 Falla de CBR para probeta de suelo + ceniza (20%) 44
Fotografía 5-1 Aspecto de las probetas de suelo silicato ceniza luego del segundo ciclo de desleimiento durabilidad. 58

Lista de figuras

Pág.

Figura 1-1 Vista microscópica de muestra de cortes de perforación (aumento 10x) 5
Figura 1-2 Diagrama de flujo para manejo ambiental de residuos de perforación 7
Figura 1-3 Ilustración esquemática del proceso de perforación petrolera 8
Figura 1-4 Marco legal de la gestión ambiental en Colombia 10
Figura 1-5 Diagrama del proceso de Desorción Térmica 13
Figura 2-1 Localización de la exploración de campo en La Primavera Vichada. 20
Figura 3-1 Diagrama de flujo para diseño experimental 30
Figura 3-2 Sistema de codificación empleado para listado de probetas 31
Figura 4-1 Variación del CBR a partir del índice de PDC con la profundidad AP-1 a AP-3 38
Figura 4-2 Variación del CBR a partir del índice de PDC con la profundidad AP-4 a AP-6 38
Figura 4-3 Curvas de esfuerzo vs penetración para ensayo CBR muestra apique 1. 40
Figura 4-4 Curvas de esfuerzo vs penetración para ensayo CBR muestra apique 2. 41
Figura 4-5 Curvas de esfuerzo vs penetración para ensayo CBR muestra apique 4. 41
Figura 4-6 Curvas de esfuerzo vs penetración para ensayo CBR muestra de ceniza 43
Figura 4-7 Curvas de esfuerzo vs penetración para ensayo CBR muestra suelo ceniza. 43
Figura 5-1 Curvas esfuerzo deformación para probetas de suelo compactado a diferentes edades y muestra compactada de ceniza. 48
Figura 5-2 Curvas esfuerzo deformación para probetas no curadas de suelo – ceniza... 49
Figura 5-3 Curvas esfuerzo deformación para probetas de suelo mejoradas con silicato en un 3.0 % en peso (Concentración de 50% en el agua de compactación). 50
Figura 5-4 Curvas esfuerzo deformación para probetas de suelo mejoradas con ceniza y silicato. 52
Figura 5-5 Curvas esfuerzo deformación para probetas mejoradas sometidas a ciclos de humedecimiento – secado, curadas a 14 días. 52
Figura 5-6 Velocidades de onda P vs Edad de curado 54
Figura 5-7 Velocidades de onda P vs Humedad (%) 55
Figura 5-8 Velocidades de onda Vs Esfuezo 55
Figura 5-9 Variación del SDI con el curado para suelo silicato y suelo silicato ceniza. 57
Figura 5-10 Resistencia al corte en la muestra de suelo + 20% de ceniza de cortes de perforación. 59
Figura 5-11 Resistencia al corte en la muestra de suelo silicato + 20% de ceniza de cortes de perforación. 60

Figura 5-12 Imagen SEM y microfotografía con análisis EDS para una muestra de suelo arcilloso sin proceso de curado (A-A1) y con proceso de curado (B-B1)..... 61
Figura 5-13 Imagen SEM y microfotografía con análisis EDS para una muestra de suelo arcilloso + Ceniza sin proceso de curado (A-A1) y con proceso de curado (B-B1)..... 61
Figura 5-14 Imagen SEM y microfotografía con análisis EDS para muestra de suelo arcilloso + ceniza + silicato sin curado (A-A1) y con proceso de curado (B-B1)..... 62
Figura 5-15 Identificación de elementos químicos en las mezclas ensayadas..... 63
Figura 5-16 Microfotografías a través del estéreo microscopio de las muestras. No Curadas. Suelo (A y B), Suelo + Ceniza (C y D), Suelo + Silicato + Ceniza (E y F). 65
Figura 5-17 Microfotografías a través del estéreo microscopio de las muestras Curadas. Suelo (A y B), Suelo + Ceniza (C y D), Suelo + Silicato + Ceniza (E y F). 65
Figura 5-18 Microfotografías capturadas con nicoles paralelos de la muestra de Suelo sin proceso de curado (A, C, E) y con proceso de curado (B, D, F) 66
Figura 5-19 Microfotografías capturadas con nicoles paralelos de la muestra de Suelo + Ceniza sin proceso de curado (A, C, E) y con proceso de curado (B, D, F)..... 67
Figura 6-1 Resumen gráfico de los resultados del ensayo de compresión inconfinada ... 69
Figura 6-2 Comparación de la resistencia de probetas no curadas de suelo con diferentes porcentajes de ceniza. 70
Figura 6-3 Resultados de resistencia a la compresión Inconfinada (IC) en muestras con ciclos de humedecimiento – secado. 71
Figura 6-4 Variación del SDI del primer y segundo ciclo para las probetas ensayadas... 72
Figura 6-5 Variación de los parámetros de C´ y Φ para las probetas ensayadas 72
Figura 6-6 Variación del CBR para las muestras ensayadas 73

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
SSC	Suelo mejorado con Silicato+Ceniza
SS	Suelo mejorado con Silicato
SSR	Suelo mejorado con Silicato+ Resina impermeabilizante
SR	Suelo mejorado con Resina impermeabilizante
SC	Suelo mejorado con Ceniza

Introducción

El progreso de un país está directamente asociado con su infraestructura vial disponible, la cual permite articular y conectar las distintas actividades productivas de las regiones ofreciendo garantías para el desarrollo y mejorando la calidad de vida de sus habitantes. Debido a los rasgos topográficos, geomorfológicos y geológicos de nuestro país, y en especial a las condiciones climáticas particulares de cada región colombiana, sumadas al atraso en el desarrollo de infraestructura vial, se presenta un número importante de regiones apartadas, que condicionan los niveles de crecimiento y ordenamiento territorial. Uno de los problemas típicos dentro de un proyecto vial es afrontar la ausencia de materiales de préstamo cercanos al lugar de su construcción o la baja calidad de éstos. Cuando los materiales provenientes de explotación de canteras no cumplen con las especificaciones técnicas mínimas, y los aptos se encuentran localizados en zonas alejadas, se hace necesario el uso de métodos de estabilización o mejoramiento de los materiales *in-situ*. Sin embargo, otro problema es la ausencia de la normatividad técnica para vías terciarias (métodos, ensayos, especificaciones, etc) que permitan tener en cuenta los comportamientos de estos materiales antes agentes climáticos cambiantes.

El Departamento del Vichada es una de las regiones con mayor ausencia de infraestructura vial, como consecuencia directa de:

- Su localización geográfica: en zonas planas inundables del oriente colombiano
- Las condiciones climáticas imperantes: ciclos de sequía e inundación con una temporada de lluvias que se prolonga por ocho meses
- Los materiales presentes en el subsuelo, donde predominan suelos arcillosos cuyo comportamiento es susceptible a cambios en el contenido de agua.
- No existe un inventario de fuentes de materiales o canteras identificadas o reportadas de materiales de mejor competencia, que cumplan con las especificaciones INVIAS para la construcción de nuevas vías en el departamento.

- Por lo anterior, los materiales para vías deben traerse de otras regiones, encareciendo los costos de construcción.

Este Trabajo Final de Maestría forma parte del proyecto de investigación denominado DROMOS CEIBA, financiado con recursos de regalías de la Gobernación del Vichada en el año 2015 y ejecutado a través del Centro de Estudios Interdisciplinarios Básicos y Aplicados, con participación de investigadores y estudiantes de las Universidades Nacional de Colombia y de Los Andes. Con este proyecto se buscó estudiar suelos y materiales propios del Departamento, e investigar alternativas de mejoramiento convencionales y no convencionales para su aprovechamiento en la construcción vial.

Para este trabajo, se evaluó el uso de residuos sólidos generados como producto de los cortes de perforación petrolera (ripio), provenientes de campos de exploración y producción en la zona de pidemonte llanero, como alternativa potencial para el mejoramiento y construcción de vías terciarias en el departamento de Vichada. Estos residuos se han convertido en un problema ambiental para la industria petrolera, debido a los altos volúmenes que se generan y a los costos derivados de su tratamiento y disposición final. Aunque estos ripios se han utilizado con buenos resultados en varias partes del mundo para distintas aplicaciones constructivas, tales como bloques de hormigón, sub-bases granulares, y mezclas asfálticas en caliente, en nuestro país han sido poco estudiados como insumo en la práctica de construcción de vías y especialmente para la estabilización de suelos.

En particular, se busca evaluar el efecto de adicionar los ripios reducidos a ceniza como un agente químico poco convencional, de bajo costo y fácil utilización en los suelos de préstamo en los alrededores de la vía La Primavera – Bonanza – La Venturosa, ubicada hacia el noroccidente del Departamento. En una investigación previa, en el marco del proyecto Dromos-Ceiba, estos suelos mostraron buenas respuestas de resistencia y rigidez a estabilizantes salinos, pero no son del todo satisfactorios en términos de durabilidad. Se espera que la ceniza aporte características de taponamiento e hidrofobicidad para que contribuya a la durabilidad de suelos ya estabilizados con silicato de sodio, ante los ciclos de humedecimiento – secado, propios del clima que prevalece en la región.

En función de lo anterior a continuación se presentan el objetivo general y los objetivos específicos del presente trabajo.

Objetivo General:

- Estudiar el aprovechamiento y/o uso potencial de los residuos sólidos de perforación petrolera (suelo contaminado con hidrocarburo – PCS) generados en la zona del piedemonte llanero Colombiano, como material alternativo para la construcción de vías terciarías en el Departamento del Vichada.

Objetivos Específicos:

- Identificar las alternativas del uso potencial de los ripios de perforación petrolera como material de construcción para vías terciarias, dadas las condiciones geológicas y climáticas de la zona de estudio.

- Analizar las distintas variables de diseño que influyen en el comportamiento mecánico de materiales para carreteras que incluyan el uso de los suelos contaminados con hidrocarburos (PCS).

- Comparar los resultados de resistencia y durabilidad de los materiales obtenidos mediante el uso de PCS, con los reportados de las experiencias con el uso de estos materiales en el área de los materiales para carreteras y/o pavimentos en otras zonas del país o del mundo.

Para lograr estos objetivos, se recuperaron muestras de suelo de la zona estudiada y se elaboraron muestras compactadas en el laboratorio sin y con mejoramiento en diferentes dosificaciones. La intensa campaña experimental para caracterización de los materiales incluyó ensayos de Penetración Dinámica con Cono – PDC en campo, compresión inconfinada, desleimiento-durabilidad, corte directo, humedecimiento secado, mediciones de velocidades de propagación de onda y análisis microscópicos y de rayos X. Para la fase experimental resultó fundamental, simular en laboratorio las condiciones climáticas del área de estudio para garantizar un proceso de curado representativo de las condiciones en campo.

Se espera que con la adición de las cenizas, se modifiquen las propiedades de los suelos de interés para este estudio, de modo que puedan utilizarse como terraplenes para obras viales e incluso como capas granulares de estructuras de pavimentos.

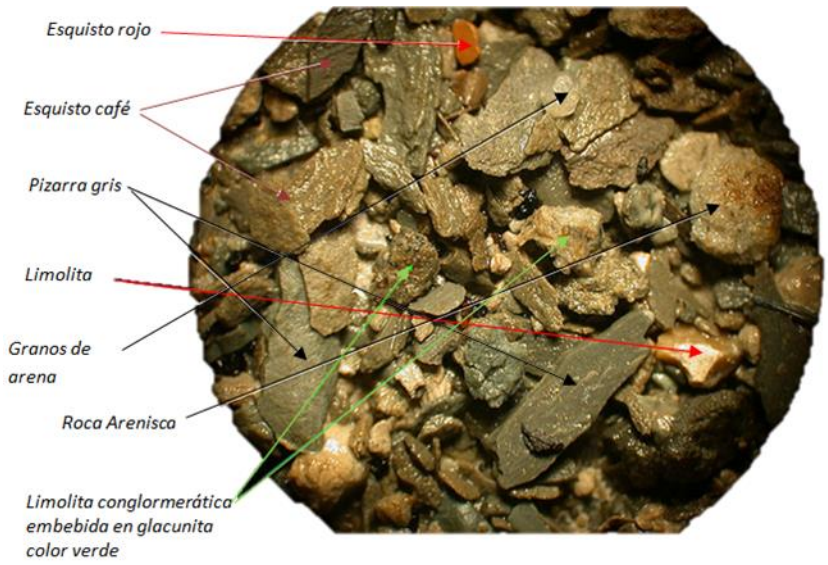
El documento del Trabajo Final de Maestría se estructuró de la siguiente forma: en el Capítulo 1 se presenta una contextualización sobre los cortes de perforación petrolera y sus antecedentes de uso como material de construcción. En el Capítulo 2, se incluye la caracterización de la zona de estudio y en el Capítulo 3, la estrategia metodológica para el logro de los objetivos planteados. En el Capítulo 4 se presenta la caracterización básica tanto del suelo natural como de los residuos de perforación petrolera; mientras que la caracterización desde el punto de vista de resistencia y durabilidad de los suelos con y sin mejoramiento como resultado de la campaña experimental realizada, se presenta en el Capítulo 5; allí se incluyen los análisis descriptivos y comparativos correspondientes. Finalmente, en el Capítulo 6 se relacionan los hallazgos más relevantes de este estudio a modo de conclusiones, junto con las recomendaciones para la aplicación de los mejoramientos propuestos.

1. Marco conceptual y antecedentes

1.1 Cortes de Perforación Petrolera

Los cortes o ripios de perforación de la industria petrolera hacen parte del grupo de residuos sólidos que genera la industria petrolera, generados específicamente durante las fases de exploración y operación de pozos para extracción de hidrocarburos. Estos ripios son materiales heterogéneos tipo detritos, resultantes de la trituración de rocas de depósitos sedimentarios, los cuales generalmente albergan los hidrocarburos; y que son mezclados con compuestos químicos tales como lodos de perforación. En la Figura 1-1 se observa una imagen de una sección en un material tipo ripio de perforación:

Figura 1-1 Vista microscópica de muestra de cortes de perforación (aumento 10x)



Fuente: Mud Engineer / Wikipedia (2004).

1.1.1 Lodos de Perforación

Las operaciones de perforación usan lodos o fluidos para lubricar las paredes del pozo, controlar la presión en el pozo, y para levantar los cortes de roca fuera de la perforación. Ellos plantean un problema de gestión de residuos en la industria de petróleo, debido al volumen generado y su contenido de ambos contaminantes orgánico e inorgánico que incluyen hidrocarburos de petróleo, tales como hidrocarburos alifáticos, PAH y PCB, metales pesados, como el plomo, bario, zinc, mercurio, y compuestos inorgánicos, cromo, arsénico y níquel incluyendo cloruros (Ball 2011).

El nivel de toxicidad de cualquier corte de perforación depende de la composición de la roca de formación y del tipo de fluido de perforación en cuestión. Los fluidos de perforación o lodos de circulación son generalmente clasificados en tres grupos:

1. Fluidos a de perforación a base de agua (WBF): El lodo convencional de perforación con agua es un fluido base.

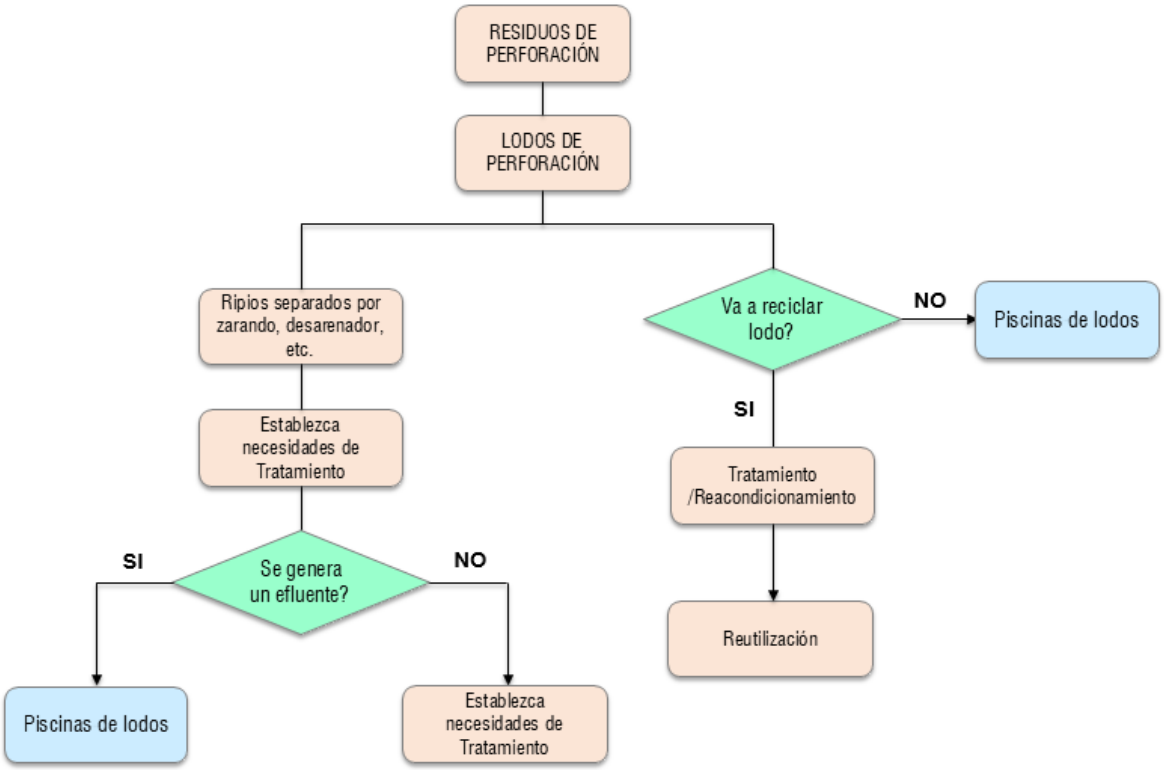
2. Fluidos de perforación a base de aceite (OBF): Diesel, mineral o algún aceite como fase continua.

3. Fluidos de perforación con base sintética (SBF): Materiales sintéticos como polietilenos y esteres vegetales como fase continua.

Los fluidos de perforación a base de aceite son más perjudiciales debido a su contenido de aceite y diesel, pero son, inevitablemente, la mejor opción para algunas condiciones de perforación, por lo que hay una necesidad continua de un método efectivo de manejo de tales cortes de perforación.

La guía de manejo ambiental para proyectos de perforación de petróleo y gas, presenta un esquema que contempla las opciones disponibles de manejo de residuos de cortes o ripios de perforación (Ver Figura 1-2), de acuerdo con la legislación dispuesta por el ministerio ambiental.

Figura 1-2 Diagrama de flujo para manejo ambiental de residuos de perforación



Fuente: Guía básica Ambiental para la perforación de pozos (1999).

1.1.2 Proceso de Perforación

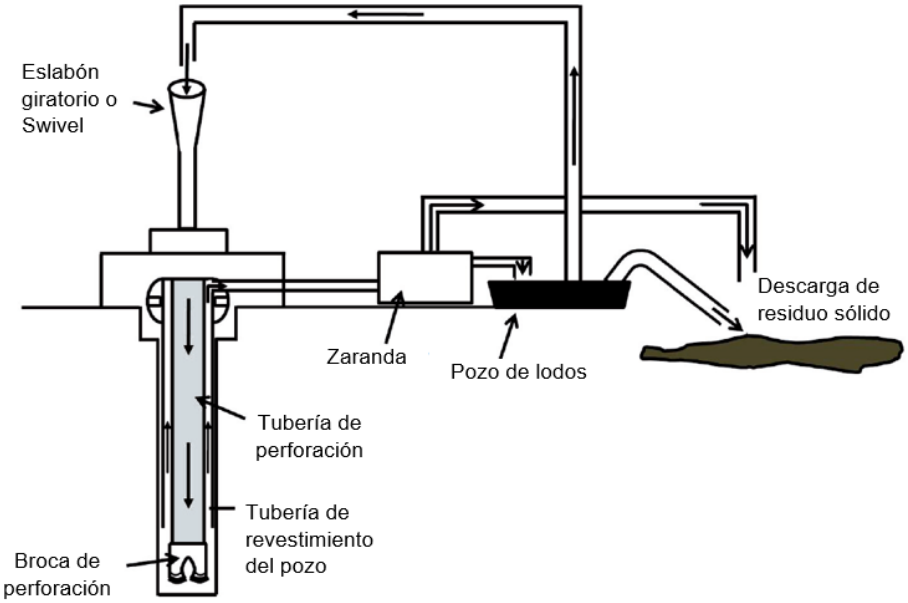
La perforación es un proceso que consiste en realizar en el subsuelo un hueco vertical, inclinado u horizontal, para alcanzar profundidades que van en promedio de 3 a 6 Kilómetros de extensión con el objetivo de llegar a sitios conocidos como formaciones rocosas sedimentarias, posiblemente productoras que pueden tener hidrocarburos (crudo, gas, condensados o una mezcla de estos).

Por medio de la perforación se ubica con certeza los sitios donde se realizarán las siguientes perforaciones apoyándose en la información obtenida en la fase de exploración. Una vez realizado el diseño y la ubicación de las perforaciones se inicia la construcción de las vías de acceso a los pozos.

Los fluidos de perforación se bombean continuamente en el pozo a través de la sarta de perforación y su retorno a través de la corona circular para así llevar la fase rocosa que se extrae del pozo. La última tarea importante es evitar el colapso del pozo. El manejo de la

presión en el pozo se consigue controlando la densidad del fluido, y balanceando la presión que se experimenta en el fondo del pozo mediante la inclusión de minerales muy pesados, tales como barita. A medida que la broca muele las rocas a su paso, estos cortes de perforación de menor tamaño quedan atrapados dentro del flujo de lodos y se llevan a la superficie donde se separan los cortes de perforación de los fluidos y otros contaminantes para que los lodos puedan ser re-utilizados en la operación (Ver Figura 1-3).

Figura 1-3 Ilustración esquemática del proceso de perforación petrolera



Fuente: Waste Management & Research (2011).

Es importante resaltar en esta etapa, la generación de grandes cantidades de residuos sólidos o cortes de perforación. En la región de los llanos orientales, más exactamente en el piedemonte donde por cuestiones geológicas la mayoría de los yacimientos se encuentra a profundidades considerables, es claro que la generación de estos residuos es un problema mayor.

Si se tiene un pozo típico de 16.000 pies (aproximadamente 5 kilómetros) de profundidad pueden ser generados cerca de 650 m^3 de cortes de perforación, los cuales se compondrán principalmente de arenas, arcillas, minerales y aditivos. El mayor inconveniente en este caso no se produce por el volumen de sólidos que se generan, sino por la toxicidad de estos, ya que estuvieron en continuo contacto con el fluido de perforación, por lo que es

muy común tener cortes con impregnaciones de aceites o cualquier otro contaminante (Navarro 1995).

La actividad que genera una mayor cantidad de impactos es la de perforación, ya que esta es la operación que se pretende realizar en esta etapa, además los fluidos de perforación y los cortes asociados a dicha actividad son considerados como uno de los principales problemas ambientales de la actividad petrolera. Se podría considerar en este punto que las facilidades de superficie necesarias para llevar a cabo la perforación de pozos son un factor importante en cuanto a intensidad e impactos ambientales causados.

1.1.3 Marco legal y normativo

La Figura 1-4 muestra un esquema que representa la jerarquía jurídica - ambiental en Colombia. En la Constitución Política de 1991, que definieron los derechos y deberes del Estado y de los particulares frente a los recursos naturales de la Nación.

En 1993 se expidió la Ley 99, que define los principios de la gestión ambiental del país, crea el Ministerio del Medio Ambiente y organiza el Sistema Nacional Ambiental -SINA. Adicionalmente, crea la Licencia Ambiental como instrumento de gestión y planificación para que desde la etapa inicial se contemplen las medidas de prevención, mitigación, corrección, compensación y manejo de efectos ambientales. La Licencia Ambiental previa se estableció como requisito para toda obra, industria, actividad o proyecto que cause:

a) Un deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente y/o

b) Modificaciones notorias o considerables al paisaje

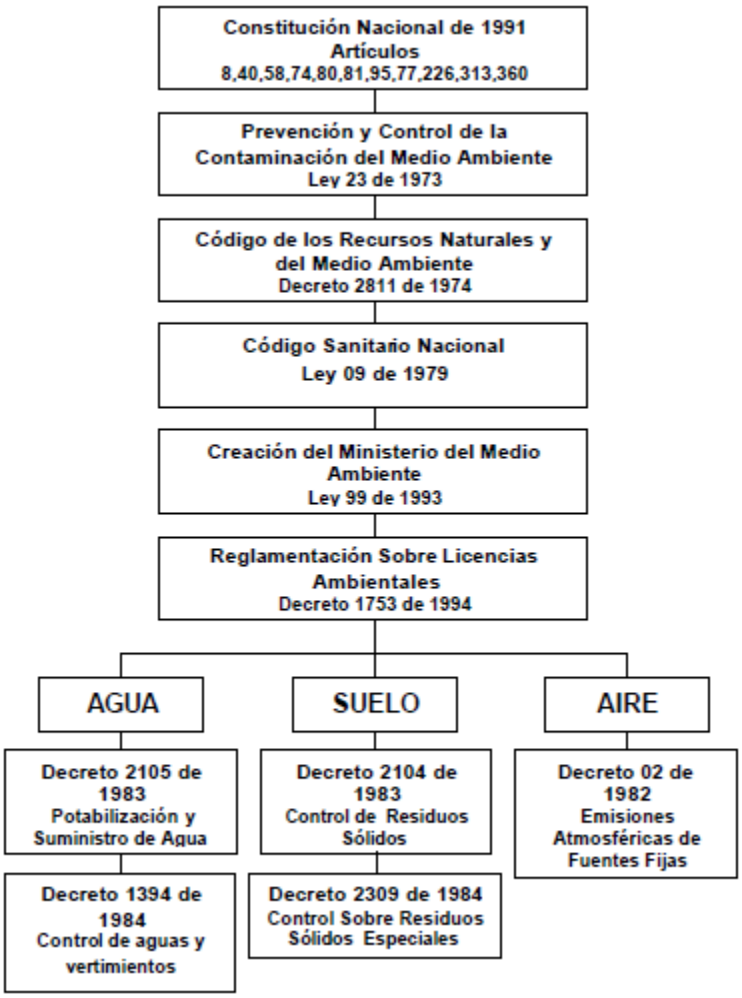
Adicionalmente para la gestión de residuos sólidos se tienen en cuenta los siguientes lineamientos estatales, e internacionales voluntarios.

- ✓ Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente

Establecido en el Decreto Ley 2811 de 1974, cuyos dos primeros objetivos son: “Lograr la preservación y restauración del ambiente y la conservación, mejoramiento y utilización racional de los recursos naturales renovables, según criterios de equidad que aseguren el desarrollo armónico del hombre y de dichos recursos, la disponibilidad permanente de estos y la máxima participación social, para beneficio de la salud y el bienestar de los

presentes y futuros habitantes del territorio nacional", así como "Prevenir y controlar los efectos nocivos de la explotación de los recursos naturales no renovables sobre los demás recursos.

Figura 1-4 Marco legal de la gestión ambiental en Colombia



Fuente: Manejo Ambiental de Campos Petroleros (2005).

- ✓ <u>Resolución 1362 de 2007</u>

En la cual "se establecen los requisitos y el procedimiento para el Registro de Generadores de 16 Residuos o Desechos Peligrosos"; donde se determinan las categorías de gran, mediano y pequeño generador de acuerdo a la cantidad kg/mes de estos residuos, solicitud de inscripción, información a ser diligenciada en el registro, acopio, procesamiento, transmisión y divulgación de la información del registro de generadores de residuos o desechos peligrosos (el IDEAM se encarga del sistema de información).

Adicionalmente, en el título II capítulo I de la parte VII, el artículo 191 cita que "en el sector rural, la instalación de industrias que, por su naturaleza, puedan provocar deterioro ambiental, se hará, teniendo en cuenta los factores geográficos, la investigación previa del área para evitar que las emisiones o vertimientos no controlables causen molestias o daños a los núcleos humanos, a los suelos, a las aguas, a la fauna, al aire o a la flora del área."

- ✓ Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés)

Controla gubernamentalmente las emisiones al ambiente procedentes de los lugares no activos, abandonados o cerrados, mediante el Acta Global de Responsabilidad, Compensación y Respuesta Ambiental. "La ley de Responsabilidad, Compensación y Recuperación Ambiental (Comprehensive Environmental Response Compensation and Liability Act, CERCLA por sus siglas en inglés), creó un impuesto sobre las industrias petroleras de productos químicos; los impuestos fueron al fondo de fideicomiso para limpiar, mejorar y restaurar los sitios abandonados o sitios que tenían desperdicios peligrosos fuera de control.

- ✓ Orden Estatal No. 29-B del Estado de Louisiana

Conocido en el ámbito colombiano como el Protocolo Louisiana 29B. Este documento cuenta con 25 capítulos, destacándose el capítulo 3 "Control de la contaminación – Almacenamiento in situ, Tratamiento y Disposición de residuos de Exploración y Producción (residuos E & P) generados de Perforación y Producción de Petróleo y Pozos de gas", en el que se dan las pautas que debe seguir la industria de hidrocarburos en el manejo de los residuos en las fases de exploración y producción.

1.1.4 Tratamiento Térmico Mecánico (TCC) para cortes de perforación

El tratamiento usado para retirar el contenido de hidrocarburo a los cortes de perforación petrolera, los cuales son objeto del presente trabajo de investigación, corresponde al sistema de desorción térmica, tal como se observa en la Fotografía 1-1.

Fotografía 1-1 Vista de Sistema de Desorción Térmica

Fuente: TWM Total Waste Management (2014)

En un sistema de desorción térmica, se realiza un proceso de no oxidación que usa calor para absorber aceites de los desechos. La mayoría de los sistemas térmicos queman combustible para proveer calor y volatilizar el aceite, pero hay unos sistemas que usan energía eléctrica o electromagnética para calentar.

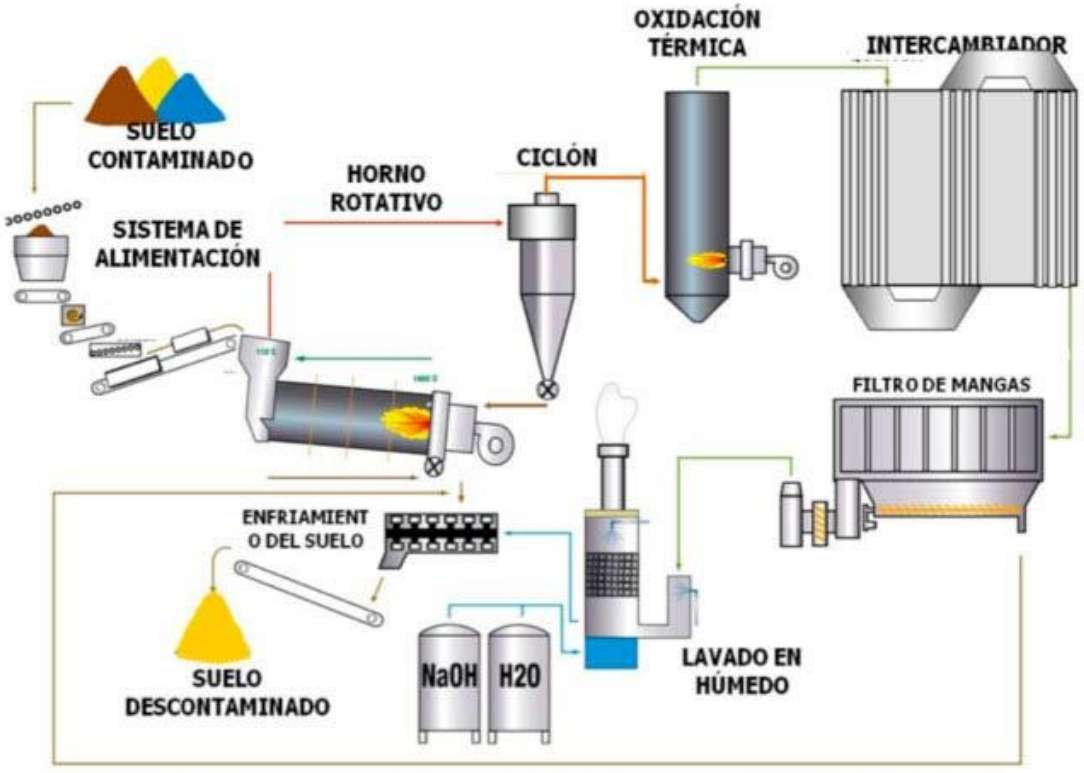
Los sistemas de desorción son generalmente de dos tipos: sistemas de baja temperatura y sistemas de alta temperatura. La temperatura de operación del sistema de baja temperatura es usualmente de 250º a 350º C, mientras los de alta pueden llegar a emplear temperaturas por encima de 520º C. Los sistemas de baja temperatura pueden ser suficientes para tratar desechos con hidrocarburos livianos. Los sistemas de altas temperaturas pueden ser capaces de alcanzar bajos contenidos finales de hidrocarburos pesados en los desechos (Martínez 2005).

La desorción térmica elimina las sustancias químicas dañinas del suelo y otros materiales, como lodo y sedimentos, utilizando calor para transformar dichas sustancias químicas en

gases. Esos gases se recolectan empleando un equipo especial. El polvo y las sustancias químicas dañinas se separan de los gases y se eliminan con seguridad y el suelo limpio se regresa al sitio. La desorción térmica no es igual a la incineración, que se emplea para destruir las sustancias químicas.

La desorción térmica emplea un equipo denominado desorbedor para limpiar los suelos contaminados. Los suelos se extraen mediante excavación y se ponen en el desorbedor. Ese equipo funciona como un horno grande (Ver Figura 1-5). Cuando los suelos se calientan lo suficiente, las sustancias químicas dañinas se evaporan. Para preparar los suelos para el desorbedor, los trabajadores deberán triturarlos, secarlos, mezclarlos con arena o extraerles los detritos. De ese modo el desorbedor puede limpiar los suelos de manera más pareja y fácil.

Figura 1-5 Diagrama del proceso de Desorción Térmica



Fuente: Servicios Ambientales Mexicanos SAMEX (2014).

Este tratamiento garantiza que los niveles de toxicidad y/o contenido de residuos contaminantes cumplan con las dadas en el Protocolo Louisiana 29B y la reglamentación dada por la USEPA, adquiriendo el calificativo de material inerte.

1.2 Antecedentes del uso de ripios de perforación para construcción

Las técnicas relativas a la eliminación y/o disposición de los suelos contaminados incluyen relleno, biorremediación, desorción térmica, y posibles usos como materiales de construcción. A continuación, se resumen las aplicaciones más conocidas en cuanto al aprovechamiento de suelos contaminado con hidrocarburos, o por sus siglas en ingles PCS (Petroleum Contaminated Soil)

1.2.1 Bloques de hormigón

El uso de este tipo de material en la aplicación de la construcción puede ser una técnicamente viable. Los residuos orgánicos o inorgánicos se pueden estabilizar mediante el uso de cenizas volantes, cal, cemento Portland, o una combinación de estos materiales. Esto a menudo resulta en una reacción puzolánica que evite o minimice la liberación de contaminantes en el medio ambiente mediante la producción de una mezcla sólida, y mejorando la maniobrabilidad y la reducción de la movilidad del contaminante en una forma no tóxica.

Meegoda (1993) Sugirió que los PCS se pueden utilizar para la fabricación de bloques de hormigón. El uso de los suelos contaminados en la fabricación de bloques también podría ser una solución viable al problema de la eliminación de PCS. Para evitar la posible emisión de cualquier contaminante, los bloques deben ser cubiertas con baldosas o yeso. Los bloques de hormigón se fabrican en varios tamaños y se componen de cemento Portland, arena y grava; estos bloques de hormigón pueden ser sólidos, celulares o huecos.

Ezeldin (1996) investigó el uso potencial de cinco suelos diferentes contaminados con menos del 1% en el contenido de hidrocarburos en el hormigón. La arena fue reemplazada en un 10%, 20%, y 40% por los suelos contaminados. La sustitución de la arena por PCS dio lugar a una reducción de la resistencia en de un 60% a 40%. Sin embargo, la

durabilidad fue similar a la de la mezcla de control. Las pruebas de lixiviación se llevaron a cabo con los suelos contaminados artificialmente con benceno con un máximo de 3%, en peso del suelo. La lixiviación fue de 95% menor que en el caso de la tierra suelta.

Ezeldin y Vaccari (1996) investigaron el efecto de la solidificación de un suelo contaminado con hidrocarburos por medio de una matriz de hormigón, en la migración de los compuestos orgánicos en el aire. La lixiviación potencial de aire se evaluó mediante la colocación de la mezcla concreto-suelo en frascos sellados y pasando aire a través de las muestras y a través de tubos de adsorción de carbono para la medición de flujo contaminante de la superficie de la muestra. Los resultados indicaron que la difusión efectiva del contaminante dentro del hormigón se redujo de tres a cinco órdenes de magnitud más que la difusión registrada en un control típico de muestras de suelo contaminadas. Esto indica el beneficio de utilizar concreto como un medio de reciclaje seguro y viable para suelo contaminado.

En Omán, Hago y Al Rawas (2007) estudiaron el comportamiento de bloques de concreto fabricados con la inclusión de distintos porcentajes de suelo contaminado (PCS). Se probaron bloques huecos de tamaño 400x200x200 mm, medidas ampliamente utilizadas en Omán; se fabricaron con una proporción de la mezcla de 1:2:4:0.8 para el cemento, agregado grueso, arena, y el agua, respectivamente. El agregado grueso tenía 10 mm de tamaño máximo de agregado. El PCS se sometió al procedimiento de lixiviación característico de toxicidad (TCLP). El análisis químico del extracto indicó que las concentraciones de metales y compuestos orgánicos no superaron los niveles máximos de contaminantes establecidos por la agencia de protección de medio ambiente de los Estados Unidos USEPA (US Environmental Protection Agency) para los extractos TCLP. Se prepararon diferentes mezclas mediante la sustitución de la arena con el PCS con porcentajes de hasta un 80% en peso de la arena en la mezcla. Se llevaron a cabo cinco diferentes pruebas en los bloques de hormigón: densidad, resistencia a la compresión, absorción, resistencia a la compresión de una columna de mampostería, y la conductividad térmica. La prueba de resistencia a la compresión se llevó a cabo después de 14 y 28 días de curado. Las otras pruebas se llevaron a cabo después de 28 días de curado.

En general, los resultados mostraron una reducción en la densidad de los bloques con el aumento en el contenido de PCS. La resistencia a la compresión bloque disminuyó con el aumento en el contenido de PCS. Para el 80% de contenido de PCS, la resistencia a la

compresión es menor que el valor mínimo especificado por los bloques de hormigón que no soportan carga estándar para omaníes. Para la columna de albañilería, la resistencia también disminuyó con el aumento en el contenido de PCS. Una disminución más dramática se produjo cuando se utilizaron 70% o 80% del PCS. La absorción después de la inmersión disminuyó con el aumento de la tierra contaminada hasta 60%. El uso de diferentes porcentajes de PCS no afectó significativamente la conductividad térmica.

1.2.2 Construcción de Carreteras

La estabilización de residuos orgánicos o inorgánicos se puede lograr mediante la adición de subproductos industriales, tales como cenizas volantes, cal y cemento Portland, o una combinación de estos materiales, que a menudo resulta en una reacción puzolánica. Las técnicas de estabilización se utilizan para prevenir o reducir al mínimo la liberación de contaminantes en el medio ambiente mediante la producción de una mezcla sólida, disminuyendo el área superficial para el transporte de contaminantes, la mejora de las características de manejo y la reducción de la movilidad del contaminante en una forma no tóxica.

Varios investigadores han estudiado la estabilización de los residuos peligrosos. Meegoda (1994) por ejemplo, utilizo 2.5% de contenido de glicerol para mejorar las características de compactación de tres suelos: Arcilla de alta plasticidad, arcilla de baja plasticidad y arcilla limosa, con un contenido de 3, 6, y 12% de aceite de motor 12%.

Por su parte, Tuncan (2000) encontró que el PCS estabilizado con 5% de cemento, 10% de cenizas volantes y 20% de cal mostraron buenos resultados de resistencia. Hossam y Taha (2005) también estabilizaron el PCS mezclándolo con cemento, cenizas volantes y cal y recomendaron su uso eficaz y seguro como un material de sub-base para la construcción de carreteras. El proceso de estabilización produjo física, mecánica y químicamente nuevas mezclas de suelo.

Por otra parte, varios estudios han tratado de utilizar el PCS en mezclas de asfalto caliente (HMA). Por ejemplo, en Massachusetts, las negociaciones con el Departamento de Calidad Ambiental y de Ingeniería (DEQE), permitieron el uso de los suelos contaminados que contienen 3% de aceite, gasolina o queroseno y permitiendo hasta un 5% de sustitución

del agregado fino por suelos contaminados para producir mezclas asfálticas en caliente de buena calidad.

Meegoda y Müller (1993) investigaron la incorporación de PCS en mezclas de concreto asfáltico en caliente (HMA) en Nueva Jersey encontrando que era posible incluir hasta un 35% del PCS en la mezcla asfáltica. Se evalúo la estabilidad Marshall y la durabilidad usando la relación de resistencia a la tracción para los especímenes acondicionados y no acondicionados. Los acondicionados se adecuaron por los ciclos humedecimiento-secado y por congelación-descongelación. Los resultados de estabilidad indicaron que las mezclas con PCS tienen mejor desempeño en comparación con las mezclas de control (no adicionadas) aunque se obtuvieron resultados similares en cuanto a durabilidad. Las pruebas de lixiviación no mostraron, aumento significativo de las concentraciones con el tiempo.

Posteriormente, Meegoda (1994) mostró que la relación de resistencia a la tracción (TSR) para mezclas en caliente preparadas con PCS no fue significativamente diferente de la mezcla de control. Los valores de conductividad hidráulica saturada de todos las mezclas de asfalto en caliente (HMA) mezcladas con PCS fueron menores de $2x10^6$ cm/s.

Para evaluar el efecto en la calidad del aire, por el uso de los PCS en las mezclas HMA, Meegoda y Müller (1993), investigaron mediante ensayos de campo la calidad del aire mediante el control de la liberación de COV durante la producción de HMA. Los resultados indicaron que la concentración de los productos químicos de mayor interés, tales como tolueno, xileno y hexano en el aire eran menos de 1 ppm y la concentración de COV fueron inferiores a la especificación permisible en Nueva Jersey (<250 ppm). Se analizó la relación costo/beneficio de la utilización de PCS en el HMA. Se recomendó dar mayor atención a este proceso, por considerar que es una tecnología de reciclaje rentable.

Por otra parte Meegoda (1995) reportó la liberación de COV en el aire a partir de muestras de hormigón de asfalto de mezcla en caliente mediante el desarrollo de una nueva prueba basada en el método de purga y trampa de la EPA. La lixiviación de COV a partir de muestras de HMA mostró que la liberación máxima fue de menos de 25 ppb (partes por cada mil millones) después de someter las muestras a vacío durante 12 h. La mezcla de control (sin PCS) mostró una liberación de 0.05 ppb de COV.

2. Caracterización de la zona de estudio

2.1 Localización General

El territorio del departamento de Vichada corresponde a la región de los Llanos Orientales, en la que se distinguen cuatro conjuntos fisiográficos denominados la llanura aluvial de desborde de la Orinoquia (mal drenada), la altillanura de la Orinoquia (bien drenada), la franja de aluviones de los grandes ríos y el escudo Guayanés. El primero está formado por bajos, playones ubicados al norte en los municipios de Puerto Carreño y La Primavera, cubiertos por vegetación de sabana y temporalmente inundables (Ingeominas 1992).

La altillanura, con diferentes grados de disección, ocupa la mayor extensión del departamento entre los ríos Meta y Vichada; está cubierta por vegetación de sabana alternada con bosques de galería, y en su interior, por bosque de selva tropical entre los ríos Tuparro y Vichada. La franja de aluviones se extiende paralela a los ríos Meta, Tomo, Bita, Tuparro y Orinoco, cubiertas por bosques de galería intervenidos.

La red hidrográfica del departamento de Vichada está conformada por ríos, quebradas, caños y algunas lagunas, que desembocan en el Orinoco por intermedio de los ríos Meta, Vichada, Guaviare y Tomo; además de las corrientes mencionadas, se destacan los ríos Bita, Tuparro, Uvá, Elbita, Muco, Iteviare y Siare, y los caños Tuparrito, Bravo y Mono. Las lagunas de mayor importancia son las de Sesama y Caimán.

Debido a la situación ecuatorial de la Orinoquia, el territorio departamental está bajo la influencia de los vientos alisios del noreste y sureste y por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Se distingue tres áreas pluviométricas; la más seca, al norte del departamento en límites con los departamentos de Arauca y Casanare, se caracteriza por precipitación promedio anual menor de 1.500 mm; una franja intermedia, al centro y norte del territorio, presenta lluvias anuales entre 1.500 y 2.000 mm; la más lluviosa, al sur, registra promedios anuales superiores a 2.000 mm. El régimen de lluvias es básicamente monomodal, con una temporada húmeda que comprende los meses de abril a octubre.

Sus tierras están comprendidas en el piso térmico cálido, donde la temperatura media anual sobrepasa los 25°C (IGAC 1992).

2.2 Localización del Área de Estudio

El área de estudio se localiza al oriente de la cabecera municipal del Municipio de La Primavera, Departamento del Vichada. Geográficamente, la zona de estudio se encuentra ubicada en una franja delimitada en sentido sur - norte por las coordenadas planas (Datum Magna Sirgas) N 1.102.351 - N 1.110.228, y en sentido oeste – este por las coordenadas E 1.430.439 - E 1.442.382, y una cota de elevación entre los 112 msnm y 118 msnm. Su temperatura promedio es de 30°C. (IGAC 1992)

En la Figura 2-1 se visualiza la localización de los apiques realizados dentro de la fase de exploración del subsuelo y distribuidos en un tramo de 58 kilómetros de la carretera terciaria cerca al municipio de La Primavera. También se puede distinguir la distribución de una red de drenaje natural constituida por pequeños caños y quebradas, de aspecto dendrítico, y que alimentan las aguas del río Meta.

Figura 2-1 Localización de la exploración de campo en La Primavera Vichada.

Fuente: A partir de Google Earth (2017)

2.3 Características Geológicas de la Zona de Estudio

Los suelos del Vichada deben sus características particulares a eventos geológicos regionales recientes. Durante el Pleistoceno, se presentó un fallamiento regional que condujo a la formación del río Meta con levantamiento del bloque al oriente del río Meta con respecto al bloque occidente adyacente a la Cordillera Oriental (Ingeominas, 2009; SGC, 2012a; SGC, 2012b; SGC, 2013; SGC, 2014a; SGC, 2014b). Antes de dicho fallamiento, los depósitos del área del Vichada provenían del Piedemonte Llanero y del Escudo de Guyana hacia el área del río Orinoco. Un clima caracterizado por altas temperaturas y con periodos de sequía y lluvias condujo a la meteorización de los sedimentos depositados antes del levantamiento regional dando como resultado la formación de la unidad Costras Ferruginosas (Qcf), con un perfil típico laterítico.

Los perfiles lateríticos se forman en ambientes ácidos cálidos donde hay meteorización avanzada de todo el perfil del suelo. En la estación de lluvias el agua disuelve los minerales tomando en solución los elementos más solubles. Cuando llega la estación seca, el nivel del agua baja tomando estos elementos a los horizontes del suelo inferiores y dejando en los horizontes superiores los elementos no solubles. Este proceso de “lavar” los elementos más solubles en el agua se llama lixiviación.

Así, los horizontes superiores son ricos en Al y Fe y pobres en P, Na, Mg, Ca y K. En cuanto al Si, cuando ya se han lavado los elementos más solubles, el agua toma en solución el Si y lo lixivia de los horizontes superiores. En este caso se forman las costras de hierro y aluminio en el horizonte superior de este tipo de suelos. Esto explica porque la Formación Qcf, la formación más antigua, es la única con costras de hierro en el horizonte superior, en contraste con las formaciones más jóvenes.

2.4 Antecedentes de mejoramiento de los suelos del área estudiada

La firma Hidroconsulta (2013ª y 2013b), realizó dos estudios de ingeniería en la vía La Primavera – Bonanza – La Venturosa del Departamento del Vichada, donde se caracterizaron los suelos marginales, los materiales dos fuentes cercanas a la vía y se evaluaron mejoramientos con cemento y con coloides.

El estudio determinó que los suelos de la zona presentan homogeneidad litológica con predominio de materiales arcillosos de baja plasticidad y consistencia media, con arenas de grano fino, de color amarillo naranja a ocre, dada la meteorización química que presentan estos suelos ferrosos. El índice de plasticidad varía de 10% en los suelos a menos de 1.5 m de profundidad, y hasta 23% por debajo de este nivel. En cuanto a resistencia, se reportan valores de cohesión de 0.55 Kg/cm2 y ángulos de ficción interna de 4° a 12°, a nivel superficial. Para suelos por debajo de 3 m, se reportan resistencias medias a compresión de 2.7 Kg/cm2 y ángulos de fricción entre 10° y 16°.

La capacidad de soporte obtenida en ensayos de CBR inalterados a humedad natural, fue de 5% a 11%, la cual se incrementa a 13% en condiciones de agua óptima; esta capacidad se reduce entre 20 a 40% bajo inmersión. Por esta razón no se consideró que los materiales marginales puedan ser utilizados para la construcción vial, pero tampoco se exploró su posible mejoramiento.

En su lugar, se evaluó la calidad de las dos fuentes del sector: El Tigre y Cuellar. La primera, aporta gravas areno arcillosas tolerables para cimiento y núcleo de terraplenes, La segunda, no satisface los mínimos requisitos para uso vial, por tratarse de un material predominantemente fino. Ambos materiales mostraron buenas respuestas al mejoramiento con cemento para su uso en terraplenes, pero el alto porcentaje de cemento requerido para alcanzar estas respuestas, lo hace inviable económicamente, en virtud de los volúmenes de material a estabilizar para la conformación de dichos terraplenes. También se encontró que desde el punto de vista de durabilidad, la estabilización con coloides no es apropiada, debido a la desaparición de las fuerzas cohesivas entre agente y partículas al contacto con el agua.

Por otra parte, en forma paralela al presente trabajo final de maestría, se desarrollaron otras investigaciones enlazadas al Proyecto ***"CEIBA – DROMOS: materiales y métodos constructivos para la estabilización de la malla vial: una visión eficiente, económica y sostenible"*** contratado por la Gobernación del Vichada por medio del Programa Nacional de Regalías, para caracterizar y estudiar el comportamiento de los suelos encontrados del Departamento, considerando alternativas con y sin mejoramiento, para evaluar su utilización como material de construcción vial. A continuación se mencionan los resultados más relevantes para este trabajo.

A partir de un estudio del potencial expansivo de los suelos cercanos a Puerto Carreño (Jerez y Murillo, 2016) y su comparación con el comportamiento al adicionar ceniza de cuesco de palma africana, se concluye que el suelo natural presenta el menor potencial expansivo y la mayor succión total, comparado con el suelo adicionado con ceniza. Resulta razonable pensar que se generarían problemas de deformabilidad asociados al incremento en el potencial expansivo inducido por la adición, afectando la resistencia y de durabilidad a largo plazo y en especial, bajo ciclos de humedecimiento y secado.

Por su parte, Rodado y Caicedo (2015), evaluaron el comportamiento de un ripio o laterita del Vichada al ser mezclado con poli-acrilato de sodio, conocido también como Polímero Super Absorbente – SAP, el cual, en contacto con el agua forma un gel que puede incrementar el volumen en más del 400%. En modelo a escalas en centrifuga de un terraplén con material natural mezclado con 1.0% de SAP, se encontró que aunque se disminuye considerablemente el agua infiltrada en el terraplén, se generan expansiones considerables en la cara externa del mismo, lo cual era de esperarse, considerando la altísima capacidad de absorción y de incremento de volumen. Adicionalmente, el agua absorbida queda retenida en la estructura y para su liberación requiere tratamientos adicionales. Estos hechos hacen inviable el uso del SAP como potencial impermeabilizante de terraplenes, en una región que sufre temporadas de lluvia intensas.

En otro estudio de Caicedo y Lotero (2016) se evaluó la longitud y amplitud de onda que se genera por el paso vehicular en materiales lateríticos secos y compactados de la zona de Puerto Carreño, empleando un modelo en pista de prueba. Se concluyó que la compactación en condiciones óptimas reduce la presencia de ondulaciones en la superficie pero no evita que se presente ahuellamiento. Cabe anotar que en este estudio no se aborda el comportamiento bajo las condiciones críticas del suelo con contenidos de agua cercanos a niveles de saturación, ni de materiales mejorados.

Consistente con los resultados obtenidos por Hidroconsulta en suelos de la zona de Primavera, Agudelo (2015), concluyó que la adición de cemento al 10% o más en suelos de Puerto Carreño, incrementa notablemente la rigidez del suelo laterítico del Vichada, para uso potencial como material de subbase o base para vías con transito medio a bajo en la región. Sin embargo, la viabilidad de uso del cemento hidráulico debe estudiarse con detalle, teniendo en cuenta los costos por la adición de porcentajes altos, la pérdida de manejabilidad en obra al emplear dichos porcentajes, la restricción de su uso por constituir

insumos utilizados para la producción de alcaloides y en especial, el criterio fundamental a garantizar con el mejoramiento en cuanto a durabilidad ante las condiciones climáticas extremas predominantes en la región.

Por último, el antecedente de mayor relevancia para este trabajo, lo constituye la investigación de Caballero (2017), donde se evalúa la combinación de silicato de sodio con una concentración del 40% en el agua de compactación, y una resina acrílica impermeabilizante, como agentes mejoradores para muestras preparadas con los mismos suelos de interés. Es importante aclarar que la resina se aplicó como capa impermeabilizante superficial luego de finalizar el proceso de curado.

Dentro de dicho trabajo, se compactaron probetas de material local o de préstamo, para luego desarrollar pruebas de compresión inconfinada, desleimiento durabilidad, corte directo, microscopía electrónica de barrido (SEM), electroscopía por dispersión de energía (EDS) y un análisis petrográfico de las muestras de suelo. Se simularon las condiciones de temperatura y humedad relativa de la zona mediante una cámara de estabilidad para hacer un curado de las probetas compactadas, a cero (0), siete (7), y catorce (14) días.

Los resultados de la fase experimental, permitieron en primer lugar, definir un porcentaje óptimo del 50% de solución de silicato de sodio adicionada al agua de compactación de la muestra. Bajo este escenario, también se demostró que el 90% de la mayor resistencia registrada en la prueba de compresión inconfinada se obtuvo a los (7) días, y que no había una diferencia significativa con respecto a las probetas ensayadas con mayor tiempo de curado. Al parecer se produjo una rápida reacción química cementante bajos las condiciones de temperatura y humedad mencionadas.

Respecto a las pruebas de Desleimiento, la variable del tiempo de curado demostró ser relevante dado que, para muestras con silicato de sodio al 50% y tiempo de curado de catorce (14) días se obtuvo un Índice de desleimiento hasta del 70% en el segundo ciclo del ensayo. También se evidenció, que con tan sólo la aplicación de la resina, se mejora el índice de desleimiento para muestras de suelo natural.

En cuanto a los parámetros de resistencia del ensayo de corte directo, también se reflejó una clara ganancia de resistencia con valores de cohesión de 0.63 Kg/cm2 y un ángulo de fricción de 33° (muestras al 50% y curado 14 días), respecto a los valores reportados por Hidroconsulta Ltda (2013) para el suelo en condición in situ, que indican resistencia por

cohesión de 0.55 Kg/cm2 y ángulos de ficción interna de 4° a 12° para los suelos más superficiales, mientras que para suelos por debajo de 3 m, se reporta resistencias a compresión media del orden de 2.7 Kg/cm2, ángulos de fricción entre 10° y 16°.

Por último, se evaluó la variación de la resistencia al ensayo de compresión inconfinada de las probetas óptimas, mediante ciclos de humedecimiento secado, los cuales consistían en sumergir completamente cada probeta en agua y posteriormente secarlas en la cámara de estabilidad bajo tiempos recomendados según la norma INV E-612-13. Se pudo concluir, como era de esperarse, que las probetas de suelo natural se disgregaban fácilmente ante la presencia de agua en cuestión de minutos; mientras que con la adición de silicato de sodio, las muestras soportaban hasta dos ciclos de humedecimiento – secado, y presentaron una resistencia de hasta 12 kg/cm^2. Al probar con algunas muestras impregnadas con resina, se pudo evaluar la resistencia a la compresión hasta cuatro ciclos de humedecimiento – Secado, sin tener una influencia en la ganancia de resistencia de las probetas ensayadas.

Con base a lo anterior, Caballero (2017) también señala que: "*En lo concerniente a la resistencia se encuentra que la rigidez de la muestra no varía significativamente, mientras la resistencia aumenta en un 8% aproximadamente, después del primer ciclo; lo anterior puede indicar que luego de la compactación y curado de la muestra no reacciona todo el silicato de sodio y ésta reacción termina luego del primer ciclo de humedecimiento secado; otra hipótesis viable, corresponde a que por el procedimiento de secado a una temperatura de 70°C ±5, el silicato presente alguna reacción de polimerización que se traduzca en ganancia de resistencia en la muestra*".

Con base en los hallazgos de las diferentes investigaciones previas que se han mencionado en este numeral, se puede establecer que se han caracterizado los materiales de la región, con y sin mejoramiento, utilizando desde la compactación hasta la adición de agentes como el cemento, la ceniza del cuesco de palma africana, el poliacrilato de sodio y el stasoil. La mayoría de los agentes mejoran la resistencia, la rigidez o de comportamiento a fatiga de los suelos, pero tienen efectos adversos sobre otras propiedades y no evalúan la durabilidad ante los ciclos de saturación y secado.

3. Metodología

Para el logro de los objetivos planteados en esta investigación se dio inicio con la fase de **trabajos de campo**: exploración del suelo, pruebas *in situ* y muestreo, la cual se definió en función al tipo y cantidad de ensayos requeridos para evaluar el uso de los residuos de cortes de perforación petrolera como agente de mejoramiento del suelo encontrado en el sector de La Primavera.

Luego, se procedió a iniciar la caracterización básica tanto la ceniza como el suelo de la zona de estudio en su estado inicial, para evaluar sus propiedades índice y la composición química – mineralógica mediante pruebas de microscopía y de Rayos X.

Posteriormente, se determinaron las condiciones óptimas de compactación del suelo con adición de ceniza. Para esos fines fue necesario realizar pruebas de Próctor estándar variando la cantidad de ceniza mezclada al suelo para encontrar la proporción en peso y el contenido óptimo de agua. Bajo estas condiciones, se prepararon y compactaron muestras de suelo-ceniza a utilizar en ensayos de caracterización física, de resistencia y durabilidad.

Por otra parte, se consideró una alternativa de mejoramiento combinado, para aprovechar los buenos resultados logrados en términos de resistencia y rigidez, tomando como base las experiencias documentadas sobre el uso de un agente adicional (Caballero, 2017). Para este caso, se adicionó la ceniza a mezclas de suelo - silicato de sodio y se prepararon nuevas muestras para evaluar el efecto benéfico de la ceniza tanto en resistencia y rigidez, como en durabilidad de estos suelos ya mejorados En todas las opciones de mejoramiento consideradas, también se efectuaron evaluaciones microscópicas y de rayos X.

Con el fin de evaluar la durabilidad, se simuló el efecto de las condiciones climáticas de sequía e inundación predominantes en la zona de estudio, en el comportamiento de diferentes mezclas de suelo, silicato y ceniza, empleando ciclos de humedecimiento

secado y ensayos de desleimiento durabilidad, para tratar de evaluar el cambio en el aspecto físico y en la resistencia a agentes ambientales de cada muestra ensayada.

Paralelamente, se evaluaron las características de resistencia del suelo natural y de mezclas de suelo con los agentes de mejoramiento (silicato y ceniza). El análisis integral de los resultados de todas las pruebas de campo y de laboratorio, permiten hacer comparaciones , encontrar relaciones y apreciar la incidencia del tipo de agente, el tiempo de curado, las diferentes proporciones empleadas, en las respuestas de cada ensayo ejecutado, para finalmente llegar a las conclusiones y formular las recomendaciones en cada caso. En resumen se evaluaron las siguientes opciones: suelo sin mejoramiento, suelo-ceniza, suelo-silicato-ceniza, suelo- silicato.

A continuación, se describen en detalle los aspectos más relevantes de cada una de las etapas mencionadas.

3.1 Toma de Muestras y Ensayos de Campo

La fase de exploración del subsuelo se desarrolló durante 1 semana en el mes de junio de 2014 y estuvo apoyada por tres estudiantes de la Maestría en geotecnia y personal de la zona. En total se realizaron 6 apiques con dimensiones de 1.50 m de lado y 1.0 m de profundidad, las coordenadas planas de cada apique se referencian en la Tabla 3-1.

Luego de retirar la capa vegetal del terreno en cada apique, cuyo espesor variaba de 20 cm a 30 cm, se realizó el ensayo de campo de penetrómetro dinámico de cono PDC, con el fin de establecer el perfil de variación de la capacidad de soporte de la subrasante (CBR) con la profundidad y se tomó una muestra inalterada tipo bloque.

Adicionalmente se tomaron 3 muestras con molde de CBR, las cuales fueron sometidas posteriormente a prueba de penetración CBR en el laboratorio. Por otra parte, se tomaron muestras alteradas de suelo de cada apique sumando un total de 135 sacos de 40 kg de peso cada una, aproximadamente.

Tabla 3-1 Coordenadas de los apiques realizados en la campaña de exploración

	Geográficas		Magna Sirgas Este	
APIQUE	Longitud	Latitud	Este (m)	Norte (m)
1	70° 05' 16.44" W	5° 34' 45.99" N	1.442.382	1.110.228
2	70° 07' 4.04" W	5° 32' 8.78" N	1.439.096	1.105.366
3	70° 10' 50.20" W	5° 29' 19.93" N	1.432.153	1.100.121
4	70° 17' 3.33" W	5° 31' 3.58" N	1.420.622	1.103.238
5	70° 20' 57.16" W	5° 30' 36.41" N	1.413.415	1.102.354
5A	70° 21' 3.75" W	5° 30' 35.52" N	1.430.439	1.102.351

Fuente: Elaboración propia.

En la Fotografía 3-1, se presenta una galería de imágenes con la secuencia de la fase exploratoria. De izquierda a derecha se ve la ejecución de un ensayo de PDC, luego la extracción de una muestra tipo bloque y finalmente la toma de un molde de CBR de campo.

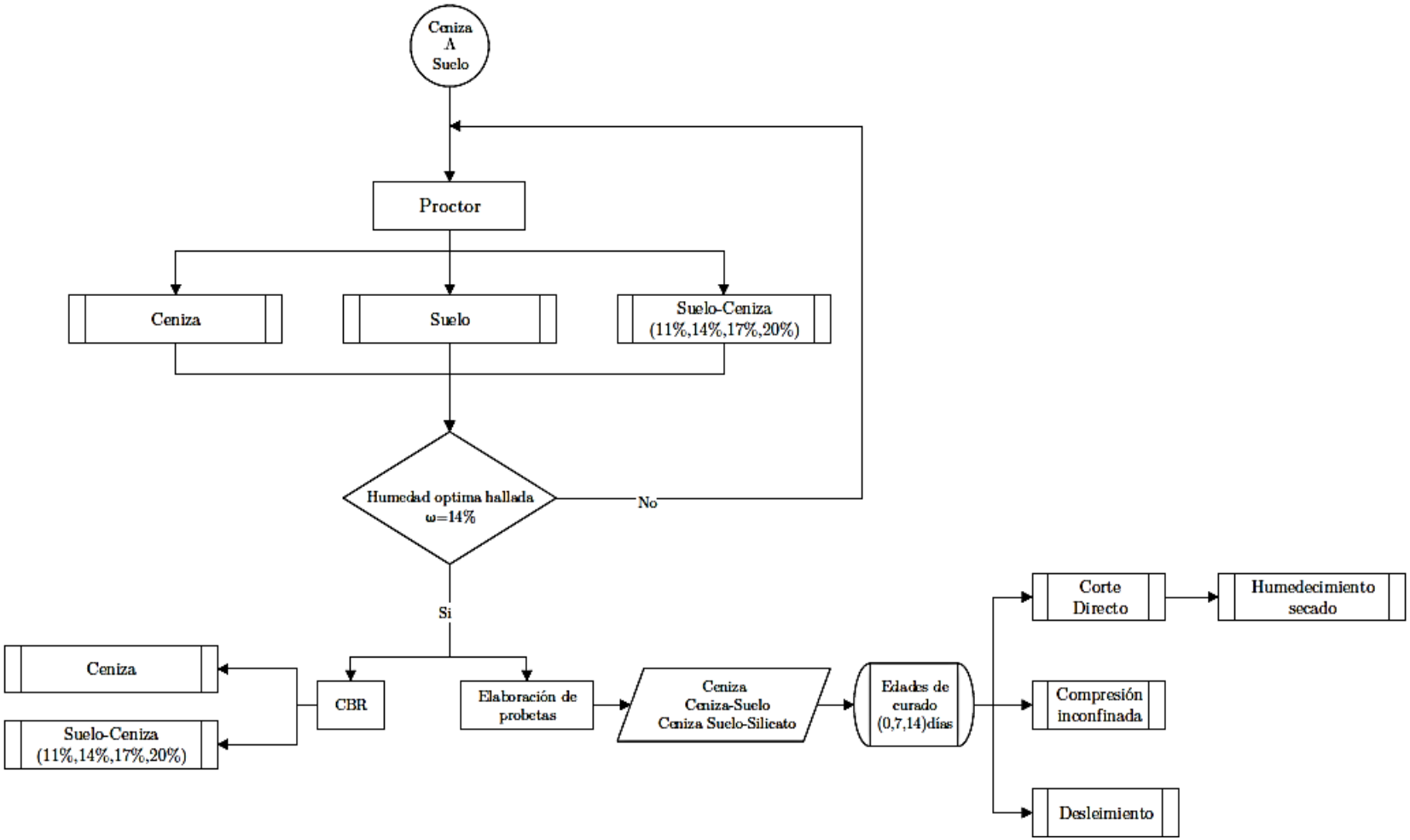
Fotografía 3-1 Vista de la extracción de muestras de suelo y ensayos de campo.

Fuente: Elaboración propia (2014).

3.2 Diseño experimental en laboratorio

El diagrama de flujo con el diseño experimental aplicado durante las diferentes etapas del trabajo de maestría “Evaluación sobre el Uso de Cortes de Perforación Petrolera en la Construcción de Vías Terciarias” se presenta en la Figura 3-1.

Figura 3-1 Diagrama de flujo para diseño experimental



Fuente: Elaboración propia.

Todos los ensayos se realizaron bajo los estándares de las Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras del INVIAS (2013), las cuales se relacionan en la Tabla 3-2.

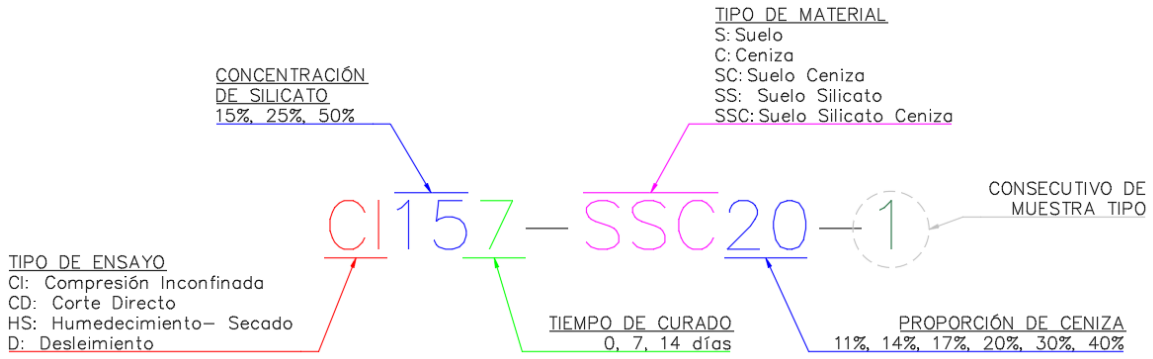
Tabla 3-2 Relación de normas INVIAS consultadas para la ejecución de ensayos

Norma	Nombre
INV E-124 -13	Análisis granulométrico de suelos por tamizado
INV E-123 - 13	Análisis granulométrico por medio de hidrómetro
INV E-122 -13	Determinación en el laboratorio del contenido de agua(Humedad) de suelo, roca y mezclas suelo-roca
INV E-128 -13	Determinación de la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral
INV E-126 - 13	Límite plástico e índice de plasticidad
INV E 125 - 13	Determinación del límite líquido de los suelos
INV E-235 - 13	Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenante mineral
INV E-133 - 13	Equivalente de arena y agregados finos
INV E-141-142	Relaciones de humedad-masa unitaria seca en los suelos (Ensayo normal de compactación o modificado)
INV E-148 - 13	Relación de soporte del suelo en el laboratorio(CBR de laboratorio)
INV E-152 - 13	Determinación de la resistencia al corte. método de corte directo (CD)
INV E-236 -13	Método para la determinación del índice de desleimiento – durabilidad
INV E-807 - 13	Humedecimiento y secado de mezclas de suelo cemento compactadas

Fuente: Elaboración propia.

Para llevar un buen control de etiquetado de muestras fue necesario implementar una codificación en función al tipo de ensayo, y al contenido del suelo con los agentes de mejoramiento y estabilización. En la Figura 3-2 se desglosa la codificación empleada para las diferentes probetas elaboradas.

Figura 3-2 Sistema de codificación empleado para listado de probetas



Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Proceso de compactación de probetas

Para el proceso de fabricación de probetas, se utilizó una máquina Versatester para compactar en capas de 2.0 cm de espesor las muestras requeridas (Ver Fotografía 3-2). Para este fin, se utilizaron dos moldes metálicos de 3.5 cm y 5.0 cm, con una altura de 10 cm. Teniendo en cuenta los resultados del ensayo proctor modificado para el suelo y la ceniza, y la humedad natural de los materiales al momento del ensayo, se calculaba la proporción de agua necesaria para agregar a la muestra. Luego se realizaba un mezclado manual de los materiales hasta lograr una apariencia homogénea y se procedía al proceso de compactación, no sin antes engrasar internamente cada molde con vaselina. Cada muestra fue extraída del molde con la ayuda de una palanca hidráulica.

Fotografía 3-2 Vista de proceso de compactación de las probetas en laboratorio

Fuente: Elaboración propia.

En total se conformaron 130 probetas, de las cuales 43 probetas correspondían a las diferentes combinaciones de suelo, ceniza de cortes de perforación y silicato.

3.2.2 Proceso de Curado de Probetas

A través de una cámara de estabilidad, fue posible realizar un curado de las muestras bajo las condiciones de humedad relativa y temperatura típicas de la zona de estudio. Este equipo tiene la apariencia de un horno convencional para secado de muestras de suelo, permitiendo regular la temperatura hasta un máximo de 110 °C, y también valores de humedad relativa hasta del 100% (Ver Fotografía 3-3).

Fotografía 3-3 Cámara de estabilidad utilizada durante el curado de las probetas.

Fuente: Elaboración propia.

En este estudio, el proceso de curado se ejecutó para tres (3) edades que corresponden a cero (0), siete (7) y catorce (14) días con el fin de obtener la variación de los ensayos de resistencia, durabilidad y velocidad de onda. Este proceso se llevó a cabo en la cámara de estabilidad simulando temperatura de 30° y humedad relativa de 70%, Elaboración propias de la región en la época seca, que es cuando se llevarían a cabo las labores de construcción vial.

3.2.3 Ensayos de Compresión Inconfinada

Para el ensayo de compresión inconfinada, se usó una máquina universal Shimadzu – AGX, a velocidad para deformación controlada de 1mm/min. Las probetas de suelo y de mejoramiento con silicato presentaban una humedad óptima del 15% y un peso unitario de 1,8g/cm3, mientras que para suelos con algún porcentaje de ceniza agregada se trabajaban probetas con un peso unitario de 2,05g/cm3 y una humedad óptima del 14%.

En la Fotografía 3-4 se presentan imágenes de probetas sometidas al ensayo de compresión inconfinada; de izquierda a derecha: Suelo (S), suelo ceniza (SC), suelo silicato (SS) y suelo silicato ceniza (SSC). Adicionalmente, se realizó una medición de velocidad de propagación de onda P, a cada una de las probetas ensayadas, cuyos resultados se describen en el capítulo 5.

Fotografía 3-4 Vista de muestras ensayadas a compresión inconfinada.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.4 Ensayos de Desleimiento - Durabilidad

Las probetas elaboradas con 3.5 cm de diámetro y 10 cm de altura se utilizaron en el ensayo de desleimiento durabilidad. Este ensayo tiene como objetivo determinar la resistencia de una muestra de roca al ablandamiento y desintegración cuando se somete a dos ciclos patrones de humedecimiento – secado, pero resultó bastante útil para evaluar los suelos mejorados. El término desleimiento durabilidad se refiere a la resistencia de un material a la pérdida de sus propiedades físicas o de apariencia, como resultado de un proceso de la acción de la intemperie (INVIAS 2013). En nuestro caso, algunas probetas registraron valores altos de resistencia a la compresión, lo cual permite que sean comparadas con algunas rocas blandas.

El ensayo consiste en inducir un desgaste al material en dos ciclos, bajo condición saturada, mientras la probeta ensayada rota lentamente bajo el eje del tambor del equipo de desleimiento por 10 minutos en cada ciclo (Ver Fotografía 3-5). Las muestras de suelo sin mejoramiento, terminaron desintegradas en el transcurso del primer ciclo, mientras que las muestras de suelo ceniza y suelo ceniza silicato lograron superar ambos ciclos.

Fotografía 3-5 Vista de ensayo de Desleimiento – durabilidad muestra de suelo ceniza.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.5 Ciclos de Humedecimiento - Secado

El propósito del presente ensayo era determinar la competencia del material luego de pasar por varios ciclos de humedecimiento y secado que buscaban simular las condiciones climáticas en cuanto a ciclos de sequía e inundación de la zona de estudio en un periodo de 5 años. Para ello se fallaron muestras a compresión inconfinada después de 1, 3 y 5 ciclos completos de humedecimiento y secado. Si bien no existe una norma como tal para este ensayo, la norma INVE-612-13 sirvió como guía para establecer los parámetros generales del proceso a realizar, los cuales consisten en un tiempo de humedecimiento de 5 horas y un proceso de secado de 42 horas a una temperatura constante de 70°C.

Fotografía 3-6 Desarrollo de la técnica de Humedecimiento – Secado aplicada.

Fuente: Elaboración propia.

4. Caracterización básica de los materiales

4.1 Suelo Natural de La Primavera

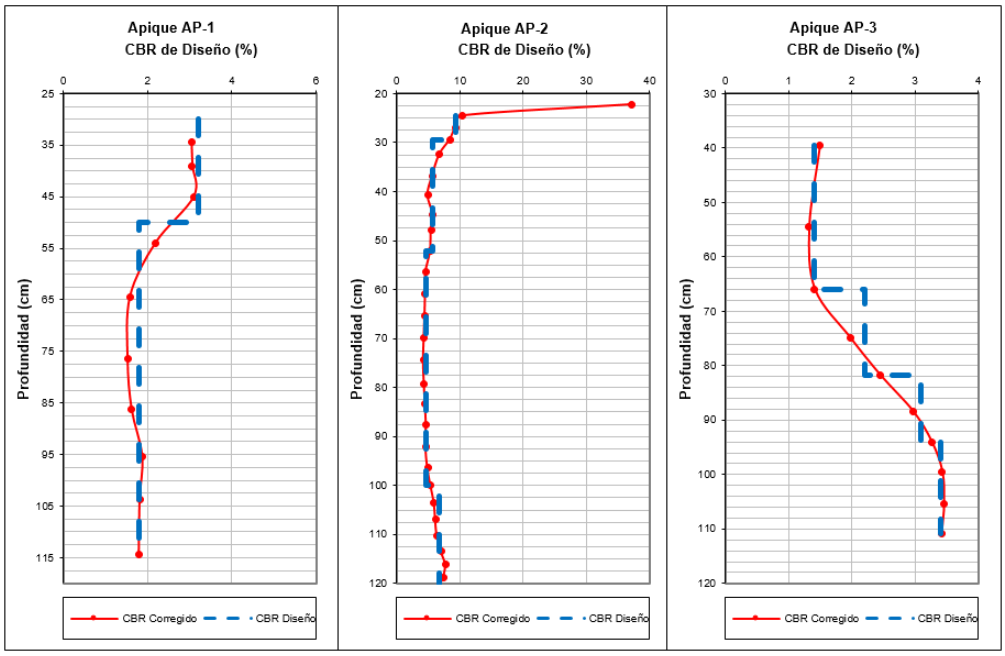
Como producto de las pruebas de PDC realizadas en campo para determinar la capacidad de soporte de la subrasante, en la Figura 4-1 y la Figura 4-2, se muestran los perfiles obtenidos de la variación del CBR con la profundidad aplicando la correlación para el CBR recomendada en la norma INV E172-13, y corresponde a la ecuación 1:

$$CBR=292 / (PDC^{1.12}) \qquad \text{Ec. (1)}$$

Se encontró que, para los apiques 2 y 4, se obtuvieron valores de CBR mayores al 10% en la parte superficial, disminuyendo hasta alcanzar valores promedio en un rango de 3.0% a 4.0%, por debajo de los 0.5 m, considerándose como una subrasante de muy mala a mala.

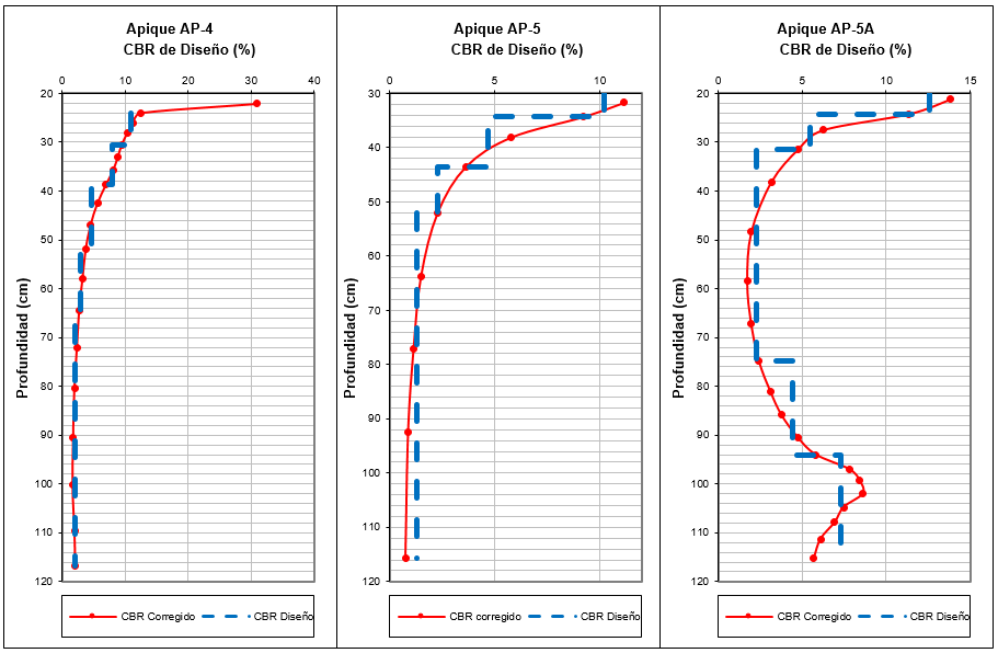
Para la determinación de las propiedades índice de los suelos de La Primavera y el ajuste de las descripciones realizadas en campo, se realizaron los siguientes ensayos de clasificación: contenido de agua natural, límites de Atterberg, granulometría, peso unitario, azul de metileno y equivalente arena. En la Tabla 4-1 Resultados de ensayos de caracterización básica para los suelos se muestra el resumen de los ensayos básicos de caracterización de las muestras extraídas en los apiques realizados.

Figura 4-1 Variación del CBR a partir del índice de PDC con la profundidad AP-1 a AP-3



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-2 Variación del CBR a partir del índice de PDC con la profundidad AP-4 a AP-6



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-1 Resultados de ensayos de caracterización básica para los suelos

APIQUE	PROF. (m)		PROPIEDADES ÍNDICE						CARACTERÍSTICAS MATERIAL FINO			
			ω	L. Líquido	L. Plástico	IL	IP	IG	Pasa 200	A. Metileno	Equivalente Arena	Actividad Arcillas
	De	A	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	-	(% en peso)	(mg/g)	(%)	-
1	0,3	1	13,6	31,4	18,0	-0,32	13,4	65,0	97,0%	2,3	3	0,14
2	0,3	0,6	12,3	26,2	18,1	-0,71	8,1	24,0	59,7%	0,5	3	0,14
3	0,4	0,6	11,7	30,4	17,3	-0,43	13,1	47,0	79,9%	3,2	5	0,16
4	0,3	0,6	10,4	29,0	18,4	-0,75	10,6	63,0	97,5%	1,5	4	0,11
5	0,4	0,6	16,7	29,0	17,6	-0,08	11,3	55,0	89,1%	1	3	0,13
5A	0,4	1	11,2	29,3	16,6	-0,43	12,7	52,0	85,1%	1,8	2	0,15

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la tabla anterior, en el sitio de estudio predominan materiales finos de composición arcillosa cuyo contenido de humedad natural se encuentra entre el 11% y el 13.6% con un promedio de 12.4%, el limite liquido varía entre el 29.0% y 31.4% con un promedio de 30.7%, y el limite plástico varía entre el 16.6% y 18.4% con un promedio de 1.5%. De acuerdo con la carta de plasticidad de Casagrande, todos los ensayos muestran que estos materiales se clasifican como arcillas inorgánicas de mediana plasticidad (CL).

El resultado del ensayo de azul de metileno se puede emplear para estimar la cantidad de arcillas dañinas y materia orgánica presente en un agregado. Un valor significativo indica una gran cantidad de arcilla o de materia orgánica presentes en la muestra. De acuerdo con los resultados obtenidos, las arcillas de baja plasticidad encontrada en los apiques, tiene un valor de azul de metileno inferior a 5 considerándose como no nocivo desde el punto de vista del cambio volumétrico, siendo clasificados como de baja actividad.

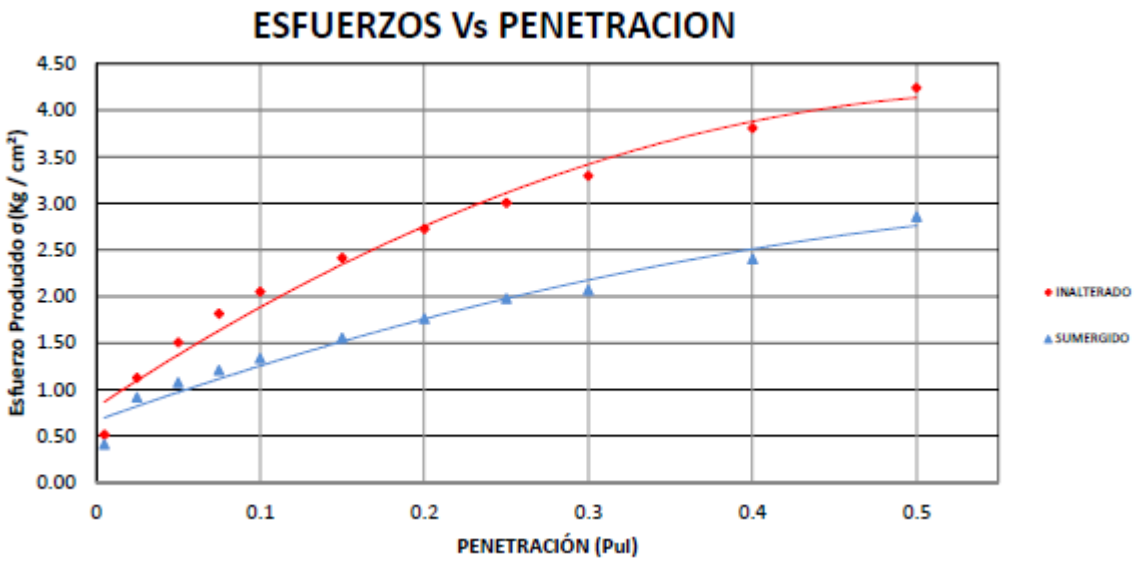
En cuanto a los ensayos de densidad proctor modificado se tiene que las muestras presentan densidad óptima entre 1.74 Kg/m^3 y 1.79 Kg/m^3, y humedad óptima entre 9,5% y 11.90%. Los CBR obtenidos para los moldes inalterados, se encuentran entre 2.63% y 5.60% mientras que en con inmersión se encuentran entre 1.80% y 4.70%. De la Figura 4-3 a la Figura 4-4 se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de CBR, los cuales resultan coherentes con los valores obtenidos en las pruebas de capacidad de soporte en campo.

Tabla 4-2 Resultados de Proctor y CBR para las muestras de suelo natural

APIQUE	PROF. (m)		PROCTOR		CBR			Gs	CLASIFICACION DEL MATERIAL		COLOR
			Yd opt	ω opt	PDC	Sin Inmersión	Con inmersión		AASHTO	USCS	
	De	A	kg/m3	(%)	(%)	(%)	(%)	-			
1	0,3	1	1740,00	11,70	2,4	2,63	1,80	2,62	A-6	CL	Gris
2	0,3	0,6	1750,00	11,90	5,70	5,60	1,80	2,62	A-4	CL	Marrón
3	0,4	0,6	1750,00	9,80	1,80	-	-	2,65	A-4	CL	Marrón amarillento
4	0,3	0,6	1770,00	9,50	4,70	5,50	4,70	2,66	A-4	CL	Rojo
5	0,4	0,6	1750,00	10,60	3,50	-	-	2,69	A-6	CL	Marrón
5A	0,4	1	1790,00	9,70	3,90	-	-	-	A-6	CL	Marrón

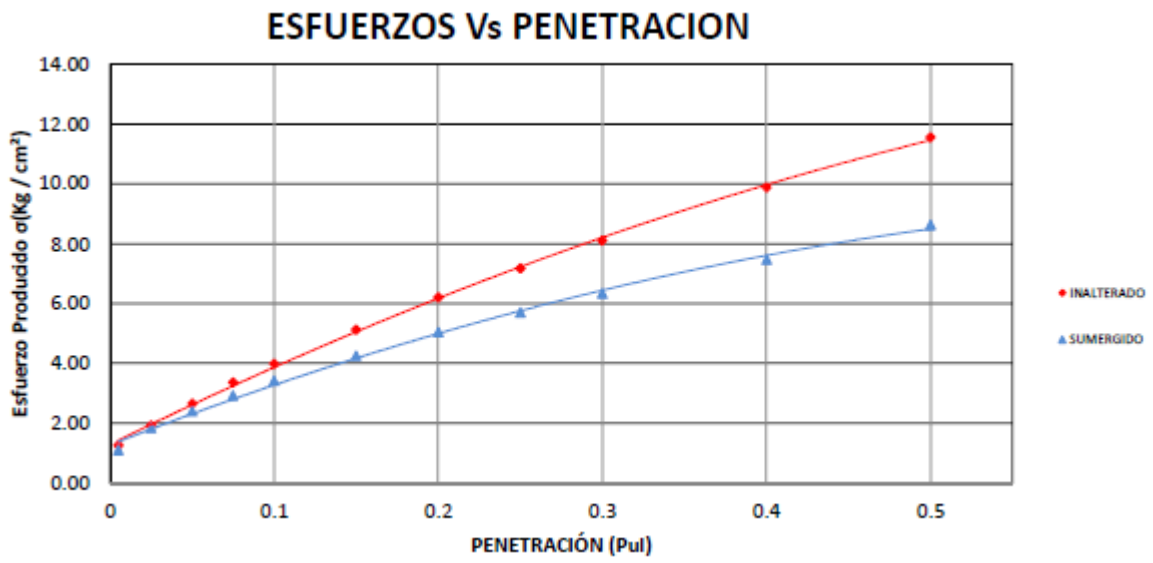
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-3 Curvas de esfuerzo vs penetración para ensayo CBR muestra apique 1.



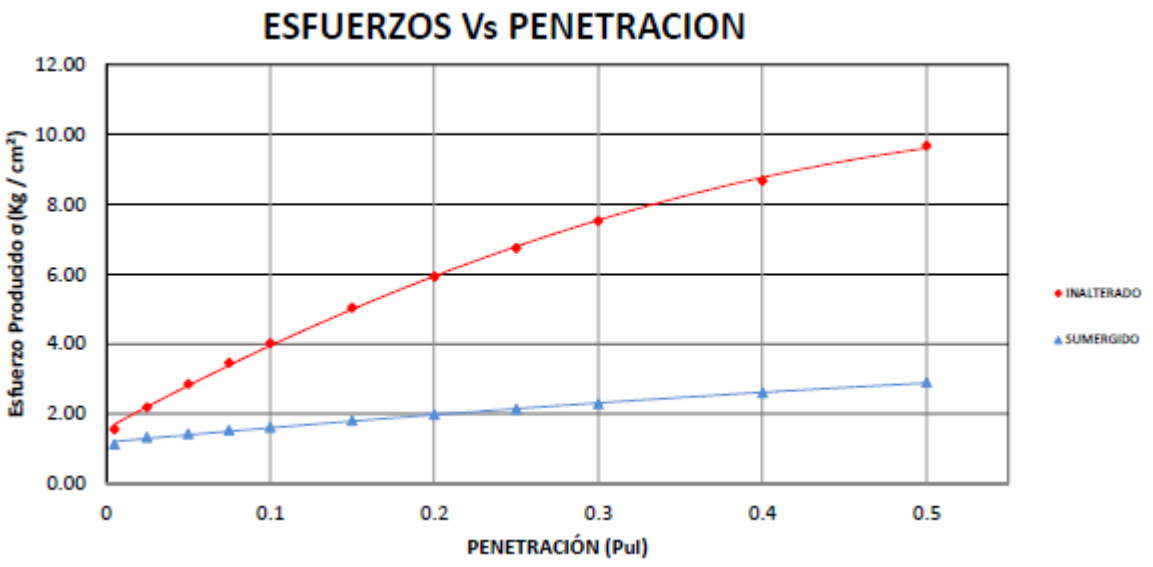
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-4 Curvas de esfuerzo vs penetración para ensayo CBR muestra apique 2.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-5 Curvas de esfuerzo vs penetración para ensayo CBR muestra apique 4.



Fuente: Elaboración propia.

4.2 Ceniza de Cortes de Perforación

Debido a que el material de cortes de perforación es sometido a un proceso térmico, y su apariencia final por su coloración y aspecto es similar al de una ceniza, ha sido nombrado

como “Ceniza de cortes de perforación”; sin embargo la textura del material no deja de ser terreo.

A continuación, se presentan los resultados de una caracterización física y química para una muestra de cortes de perforación generados en la zona de piedemonte llanero.

4.2.1 Caracterización Física

Los resultados de la caracterización física de los Residuos Sólidos de Tratamiento Térmico Mecánico de limpieza de cortes de perforación RS-TCC, son las siguientes:

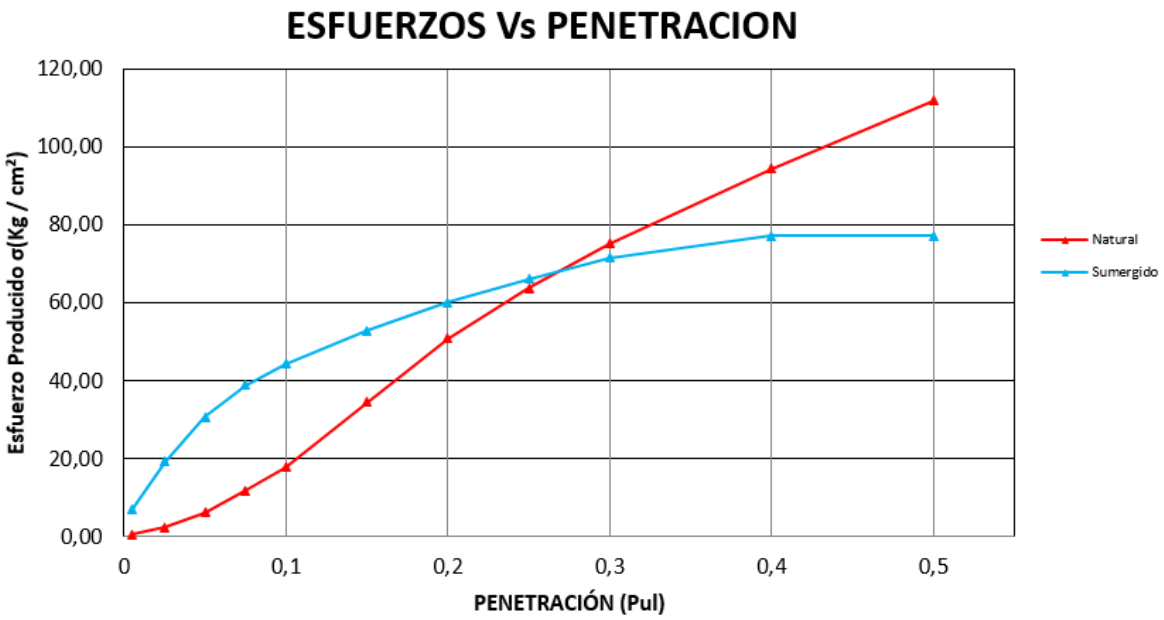
- Clasificación SUCS: SP Arenas finas mal gradadas clasificadas con pocos finos
- Humedad natural: Baja (8.4%),
- Plasticidad: No plástica, el material no absorbe el agua y tampoco se altera ante la presencia de ésta.
- Proctor Modificado: Densidad Máxima 1.94 gr/cm3 Humedad optima 11%
- Densidad: 1,89 g/cm3 humedad 8.4%
- Resistencia CBR: Saturado y Consolidado al 95% del Proctor 55.54%
  No Saturado y Consolidado al 95% del Proctor 47.91%
  Saturado y Consolidado al 100% del Proctor 58.46%
  No Saturado y Consolidado al 100% del Proctor 50.43%

Los cortes de perforación sometidos al TCC pueden presentar condiciones geo mecánicas favorables; el material no absorbe agua y tampoco se altera ante la presencia de ésta. La resistencia CBR aumenta en condiciones sumergidas o saturadas y las densidades obtenidas ante el ensayo de proctor son relativamente altas. Lo anterior se evidencia en la Figura 4-6; al parecer la ceniza limita la hidratación de las partículas debido a la condición de absorción de agua, por los componentes químicos que contiene. En la prueba de expansión realizada a la muestra sumergida, se registró un valor 1.2%, lo cual refleja la condición favorable en cuanto al potencial cambio volumétrico.

Una vez concluida la prueba, se evidenció que el material contenido en el molde conserva la humedad óptima luego de haber sido sumergidos durante cuatro días. También se observó que al interior presenta una humedad muy baja respecto a la que exhibe el material en la superficie. Este hallazgo es importante, porque da indicios del efecto hidrofobante de la ceniza sin que existan cambios volumétricos importantes. Por otra parte

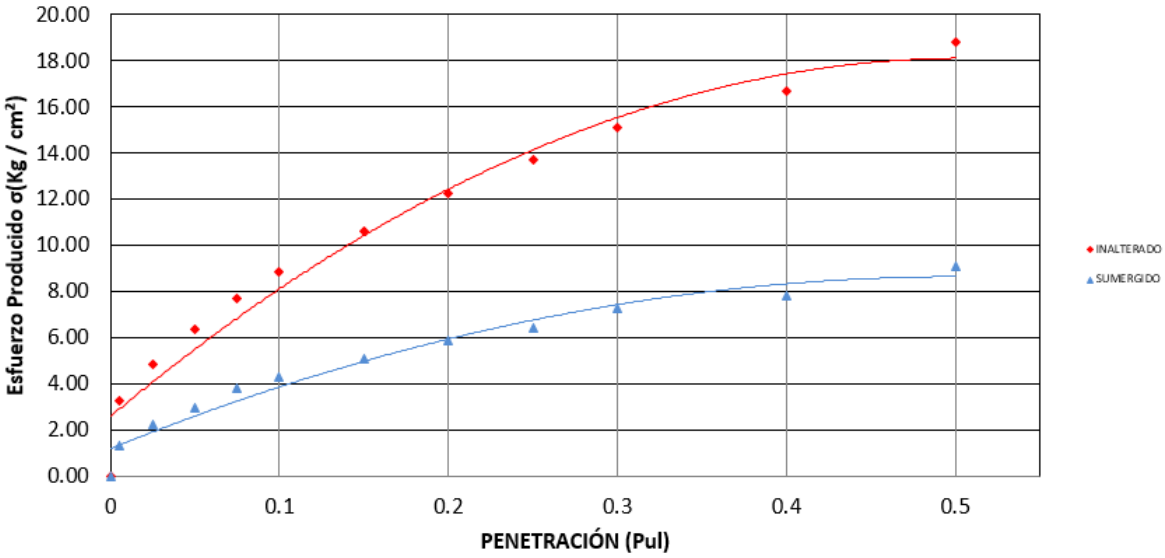
en la Figura 4-7 se presentan las curvas para el ensayo de CBR practicado en una muestra de suelo Ceniza, obteniéndose valores de 12.04% y 5.72% en estado sumergido y sin sumergir respectivamente. En la Fotografía 4-1 se observa una vista de la ejecución del ensayo.

Figura 4-6 Curvas de esfuerzo vs penetración para ensayo CBR muestra de ceniza



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-7 Curvas de esfuerzo vs penetración para ensayo CBR muestra suelo ceniza



Fuente: Elaboración propia.

Fotografía 4-1 Falla de CBR para probeta de suelo + ceniza (20%)

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Caracterización Química

Los resultados del análisis químico, además de los niveles reglamentarios dados por el Protocolo Louisiana 29B y la reglamentación dada por la USEPA se muestran en la Tabla 4-3. El test o análisis TCLP ha sido diseñado para determinar la característica de toxicidad del material por lixiviación.

Dichos resultados indicaron que el suelo contaminado analizado puede ser considerado como un residuo no peligroso. La concentración total de hidrocarburos (TPH) en el extracto de suelo se determinó por espectroscopia de infrarrojos y se encontró que era 9000 mg / L. En el tramo de la carretera de estudio, se producen inundaciones en la época de lluvias, y por tanto se podría generar algún tipo de lixiviado cuando el agua entre en contacto con la ceniza.

Tabla 4-3 Análisis TCLP para muestra de ceniza

Parámetro de Análisis	Método	Límite Detección	Incertidumbre	Resultado	Unidades
Lixiviado - GyA (IR)	LAC 43: XIX / LDNR	0.5	0.02	< 0.5	mg/L
Lixiviado - TPH I:R:	LAC 43:XIX / LDNR	0.5	0.02	< 0.5	mg/L
S-Arsénico	SW-846 / 7473	0.2	0.02	1247.0	µg/Kg As
S-Bario	SW-846 / 7473	0.3	0.01	8560.0	µg/Kg Ba
S-Cadmio	SW-846 / 7473	0.02	0.002	32.00	µg/Kg Cd
S-Cromo Total	SW-846 / 7473	0.01	0.002	107.00	µg/Kg Cr
S-Mercurio	SW-846 / 7471A	0.1	0.02	25.4	µg/K Hg
S-Plata	SW-846 / 7473	0.05	0.01	67.00	µg/Kg Ag
S-Plomo	SW-846 / 7473	0.1	0.03	267.0	µg/Kg Pb
S-Selenio	SW-846 / 7473	0.3	0.02	0.8	µg/Kg Se
S-Zinc	SW-846 / 7473	0.03	0.004	9851.00	µg/Kg Zn

Fuente: Equion Energy (2012).

4.2.3 Caracterización ambiental

Debido a que la ceniza de cortes de perforación es un material sin antecedentes en cuanto a su uso como agente de mejoramiento y estabilización de suelos en nuestro medio, fue necesario plantear inicialmente una caracterización ambiental de una muestra de ceniza para conocer su potencial contaminante. Como ya se ha mencionado, las condiciones climáticas y geomorfológicas del Vichada, son propicias para que se presenten inundaciones en la época de lluvias, y por tanto se podría generar algún tipo de lixiviado cuando el agua entre en contacto con los suelos mejorados con la ceniza.

Por lo anterior, se le práctico un análisis de toxicidad con Daphnia magna y un ensayo de Inhibición del crecimiento de un cultivo de algas, en el laboratorio de ingeniería ambiental de la Universidad Nacional de Colombia. La muestra se procesó de acuerdo al protocolo establecido en la resolución No. 0062 del 2007 del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Los resultados de ambos ensayos clasificaron a la muestra como “NO ECOTÓXICA”.

5. Caracterización de resistencia y durabilidad

Luego de la caracterización básica del material de la sub rasante del terreno natural, y de la ceniza de los cortes de perforación petrolera, se procedió a implementar el plan de elaboración de probetas compactadas bajos las condiciones óptimas de humedad y densidad, resultantes del ensayo proctor estándar.

Como ya se mencionó, con la ayuda de una cámara de estabilidad, se pudo recrear las condiciones del ambiente en La Primavera (Vichada) en cuanto a una humedad relativa del 70% y una temperatura media de 30°C, bajo las cuales se realizó el proceso de curado de todas las muestras. Se llevó un control de las fechas de elaboración de las probetas identificadas para ser ingresadas a la cámara de estabilidad y conservarlas allí durante los tiempos preestablecidos de curado (0, 7 y 14 días).

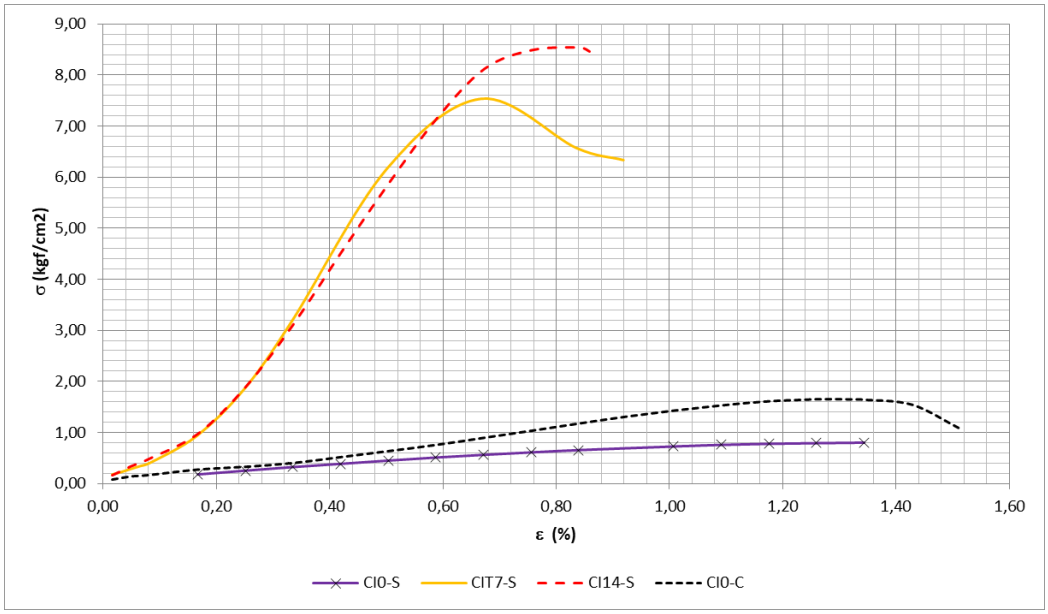
Después del curado, se realizaron los ensayos respectivos de resistencia a compresión inconfinada y corte directo y para evaluar el comportamiento esfuerzo – deformación; así mismo, se efectuaron pruebas de desleimiento durabilidad para evaluar la susceptibilidad al desgaste de las muestras por condiciones ambientales. Todo ello, bajo diferentes porcentajes de ceniza y un porcentaje óptimo de solución de silicato de sodio al 50% preestablecido en investigación previa (Caballero, 2017). A continuación se presentan los resultados obtenidos en las diferentes pruebas.

5.1 Resultados de Compresión Inconfinada

Se puede apreciar en la Figura 5-1, que tanto la muestra de suelo solo no curado como la muestra de ceniza sola, presentan valores muy bajos de resistencia. Así mismo se nota la influencia del proceso de curado a 7 y 14 días, alcanzando aproximadamente 8 veces la resistencia de la probeta de suelo no curada. Para realizar los ensayos se usó una máquina

universal Shimadzu – AGX, la cual a partir de sensores tiene control por desplazamiento (mm/min), fuerza (N/s), tensión (MPa/s) y deformación (%/min).

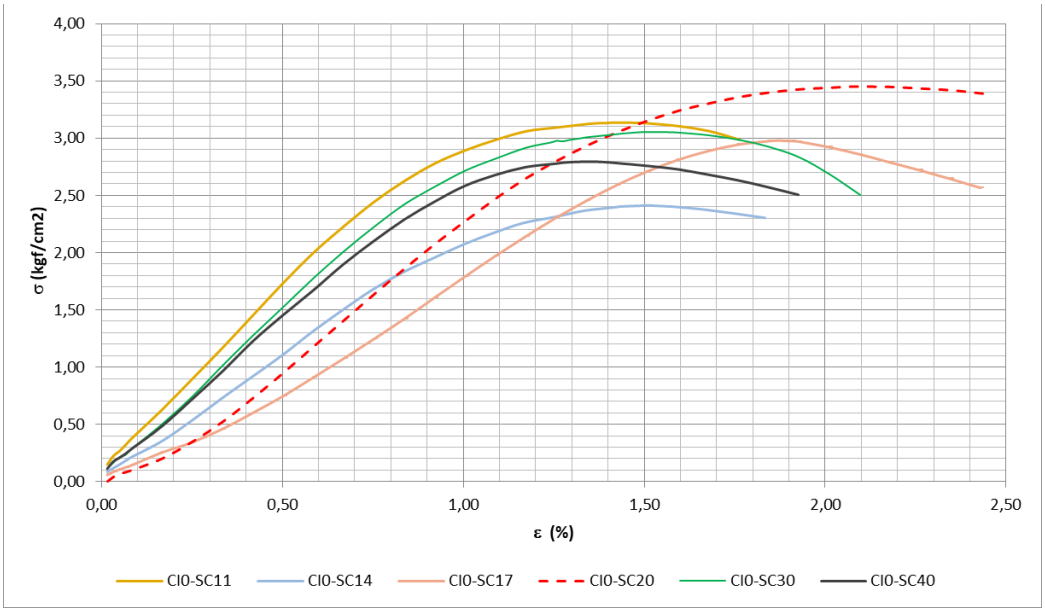
Figura 5-1 Curvas esfuerzo deformación para probetas de suelo compactado a diferentes edades y muestra compactada de ceniza.



Fuente: Elaboración propia.

Para comparar el efecto de la ceniza de los cortes de perforación sobre el suelo arcilloso, en cuanto al mejoramiento de su resistencia, se fabricaron probetas de suelo con seis diferentes proporciones de ceniza en peso (11%, 14%, 17%, 20%, 30% y 40%). A los suelos así mejorados y sin curado, se les realizaron pruebas de compresión inconfinada, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 5-2, con base en los cuales se definió un porcentaje óptimo de ceniza del 20% en peso, por alcanzar la mayor resistencia (3.45 kg/cm2) sin afectar la rigidez. Para este porcentaje se observa un comportamiento más dúctil antes de alcanzar el valor de falla.

Figura 5-2 Curvas esfuerzo deformación para probetas no curadas de suelo – ceniza



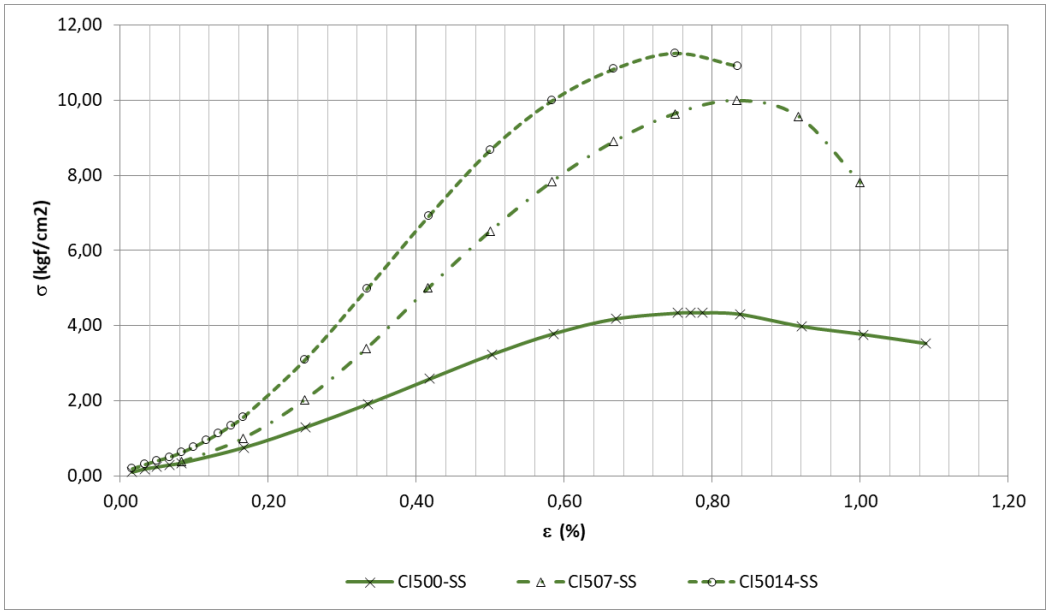
Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, como se mencionó anteriormente, se explora la aplicación de un agente adicional no convencional como el silicato de sodio, con base en los resultados alcanzados por Caballero (2017). En dicho trabajo se usó el silicato de sodio con una concentración de fábrica del 40%, el cual fue diluido en el agua de compactación en proporciones del 15, 25 y 50%, lo que implica concentraciones reales de silicato del 6, 10 y 20%, equivalentes a porcentaje en peso del 0.9%, 1.5% y 3.0% respectivamente.

A partir de diferentes ensayos, se llegó a la conclusión que las probetas elaboradas con silicato de sodio al 50% presentaban mejores resultados en cuanto a resistencia y durabilidad. La definición de dicho porcentaje óptimo fue objeto de una de tesis de maestría complementaria, y por consiguiente su alcance no se encuentra dentro del presente trabajo de investigación. En la Figura 5-3 se presentan las curvas de compresión inconfinada para las probetas de suelo adicionadas con silicato y curadas a 0,7 y 14 días, donde se alcanzan valores de esfuerzo máximo del 4.3 kg/cm2, 10 kg/cm2 y 11.2 3 kg/cm2; estos valores

reflejan incrementos del 30 % en la resistencia para las probetas de mayor curado, con respecto al suelo sin mejoramiento.

Figura 5-3 Curvas esfuerzo deformación para probetas de suelo mejoradas con silicato en un 3.0 % en peso (Concentración de 50% en el agua de compactación).



Fuente: Elaboración propia.

Bajo los porcentajes óptimos definidos tanto para la ceniza (20% en peso), como para el silicato de sodio (50% diluido en el agua de compactación), se fabricaron probetas adicionales para ser sometidas a ensayos de resistencia a compresión inconfinada. En la Tabla 5-1 se presenta el inventario de todas las probetas ensayadas con sus valores de resistencia obtenidos y su respectiva descripción.

En la Figura 5-4, se presentan de manera agrupada las curvas de compresión inconfinada para las probetas ensayadas, de acuerdo a la mezcla óptima de suelo ceniza silicato, para las edades de curado consideradas.

Allí, se puede observar el notable incremento de más del 100% en la resistencia a la compresión al adicionar los porcentajes óptimos de silicato y ceniza a las probetas de suelo, comparadas con las probetas a las cuales se les mezclo únicamente silicato o ceniza. Para el caso de la probeta no curada “CI500-SSC20-1”, al parecer su comportamiento es típico de un material que se endurece a medida que se deforma, mientras que las demás curvas tienen un comportamiento un poco más fuerte, rígido y

menos frágil en la falla. Aunque no es del todo concluyente, al parecer, las edades de curado de 7 y 14 no marcan una diferencia significativa en las curvas obtenidas de esfuerzo - deformación, pues posiblemente se produce una rápida reacción química de los minerales del suelo natural con la combinación de silicato de sodio y ceniza de cortes de perforación petrolera.

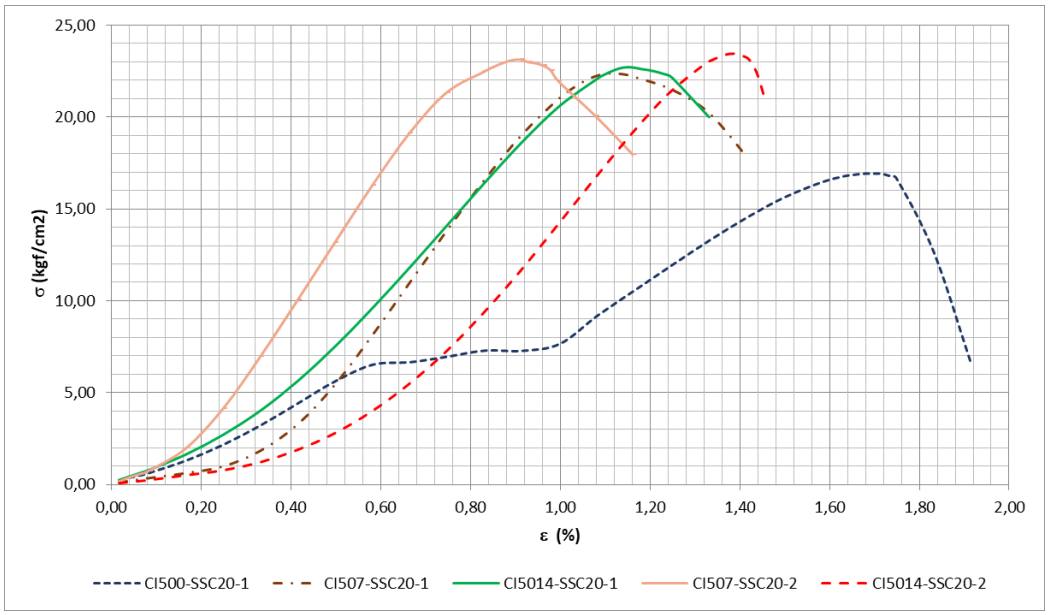
Tabla 5-1 Relación de probetas ensayadas a compresión simple.

# Muestra	ID	Curado (días)	Carga máxima (Kgf)	Esfuerzo máximo (Kgf/cm^2)	Descripción de la probeta ensayada
24	CI0-S	0	17,597	0.80	Suelo
20	CI7-S	7	162,36	7,54	Suelo
72	CI14-S	14	182,06	8,54	Suelo
48	CI0-C	0	36,08	1,64	Ceniza
28	CI0-SC11	0	68,99	3,14	Suelo + 11% Ceniza
29	CI0-SC14	0	52,58	2,41	Suelo + 14% Ceniza
30	CI0-SC17	0	65,04	2,98	Suelo + 17% Ceniza
31	CI0-SC20	0	74,63	3,45	Suelo + 20% Ceniza
46	CI0-SC30	0	66,71	3,05	Suelo + 30% Ceniza
47	CI0-SC40	0	61,30	2,79	Suelo + 40% Ceniza
69	CI500-SSC20-1	0	371,06	16,94	Suelo + Silicato + 20% Ceniza
68	CI507-SSC20-1	7	491,56	22,39	Suelo + Silicato + 20% Ceniza
74	CI507-SSC-20-2	7	504,11	23,12	Suelo + Silicato + 20% Ceniza
130	CI507-SSC20-2	7	488,60	22,40	Suelo + Silicato + 20% Ceniza
57	CI5014-SSC20-2	14	514,35	23,44	Suelo + Silicato + 20% Ceniza
56	CI5014-SSC20-1	14	497,10	22,71	Suelo + Silicato + 20% Ceniza
87	HS14-SC20-1	14	302,51	13,83	Suelo + 20% Ceniza
96	HS5014-SSC20-4	14	780,22	35,00	Suelo silicato + 20% Ceniza Ciclo 1
95	HS5014-SSC20-3	14	572,00	25,73	Suelo silicato + 20% Ceniza Ciclo 3
94	HS5014-SSC20-2	14	260,26	11,67	Suelo silicato + 20% Ceniza Ciclo 5

Fuente: Elaboración propia.

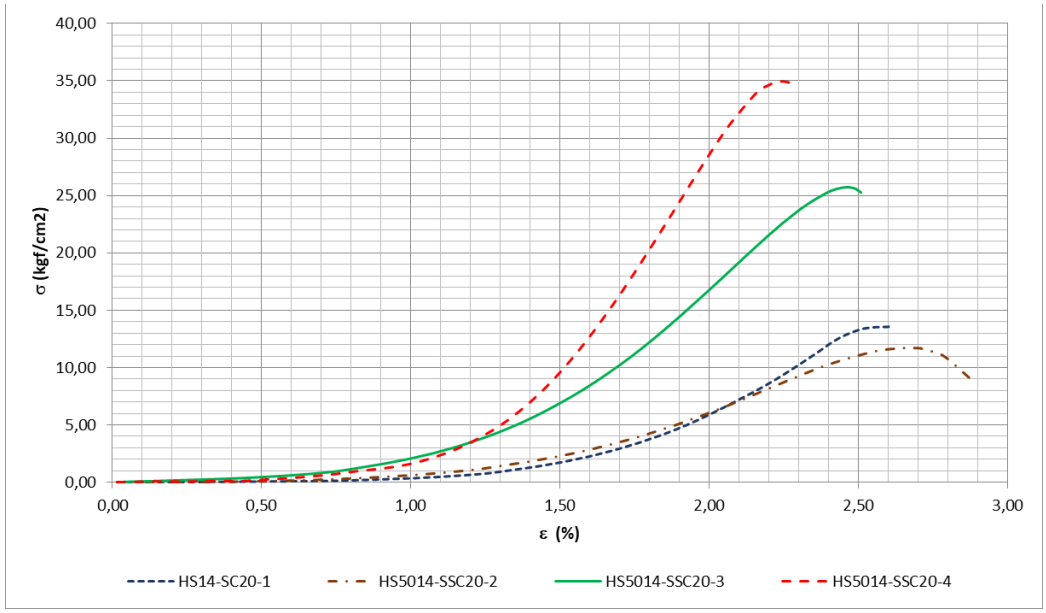
Finalmente se fallaron a compresión, probetas adicionales sometidas a ciclos de humedecimiento secado, para mostrar la influencia de los escenarios cíclicos de condiciones de inundación y sequía presentes en la zona de estudio, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 5-5.

Figura 5-4 Curvas esfuerzo deformación para probetas de suelo mejoradas con ceniza y silicato.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-5 Curvas esfuerzo deformación para probetas mejoradas sometidas a ciclos de humedecimiento – secado, curadas a 14 días.



Fuente: Elaboración propia.

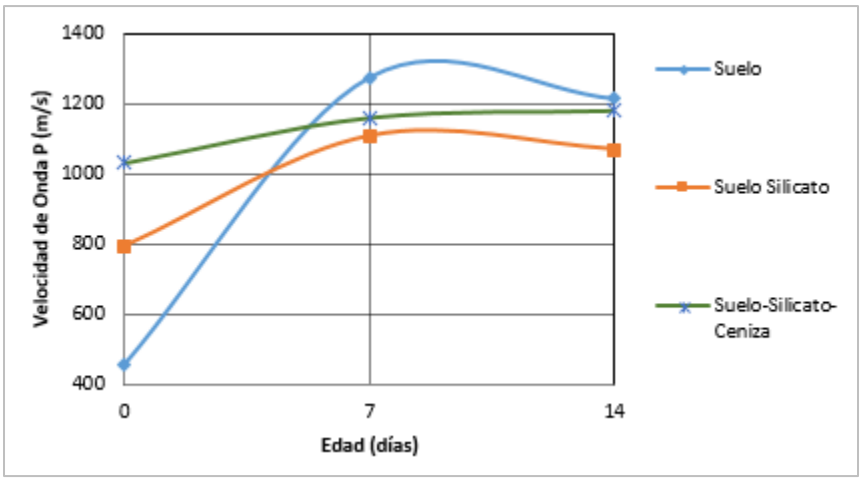
Se puede observar que la probeta fallada luego del primer ciclo de inmersión y secado (HS5014-SSC-4) es la presenta la mayor resistencia de todas las muestras ensayadas, con un valor de 35 kg/cm2, seguida de la de tres ciclos (HS5014-SSC-3) con 25 kg/cm2; ambas presentan un comportamiento blando hasta alcanzar un valor de deformación unitaria del 1.3% aproximadamente, y luego su comportamiento tiende a ser rígido hasta llegar a la falla, donde presentan fragilidad. Vale la pena resaltar que estas dos probetas exhiben resistencias superiores a aquellas no sometidas a procesos de humedecimiento secado, lo cual puede responder a una mayor activación de los estabilizantes durante el proceso, o eventualmente a una polimerización por efecto de las temperaturas de secado.

Por su parte, el comportamiento de la probeta después de quinto ciclo de humedecimiento secado reduce su resistencia a 14 kg/cm2, siguiendo un comportamiento similar al de una probeta de suelo ceniza curada en la cámara de estabilidad en un lapso de 14 días. Estas resistencias sin embargo resultan superiores a las alcanzadas para el mejorado con solo ceniza o silicato, mostrando los beneficios en la ganancia de resistencia no solo a compresión sino también al intemperismo.

5.2 Medición de Velocidad de Onda

Antes de fallar las probetas de suelo, suelo silicato y suelo silicato ceniza, se realizaron mediciones de velocidad de onda P mediante el equipo Pundit Lab diseñado para concretos, Las probetas típicas utilizadas en este ensayo fueron las mismas usadas en la prueba de compresión inconfinada. Primero se tomaron las medidas de cada probeta, su altura, diámetro y peso son necesarios para la aplicación de este ensayo. A partir de los resultados se construyeron diferentes gráficas mostrando la relación entre el parámetro de velocidad de onda versus la edad de curado, humedad de la muestra, y la resistencia a la compresión inconfinada resultante en cada caso. En general se observa que las velocidades obtenidas se estabilizan luego de los 7 días de haber sido compactadas las muestras, tal como se observa en la Figura 5-6.

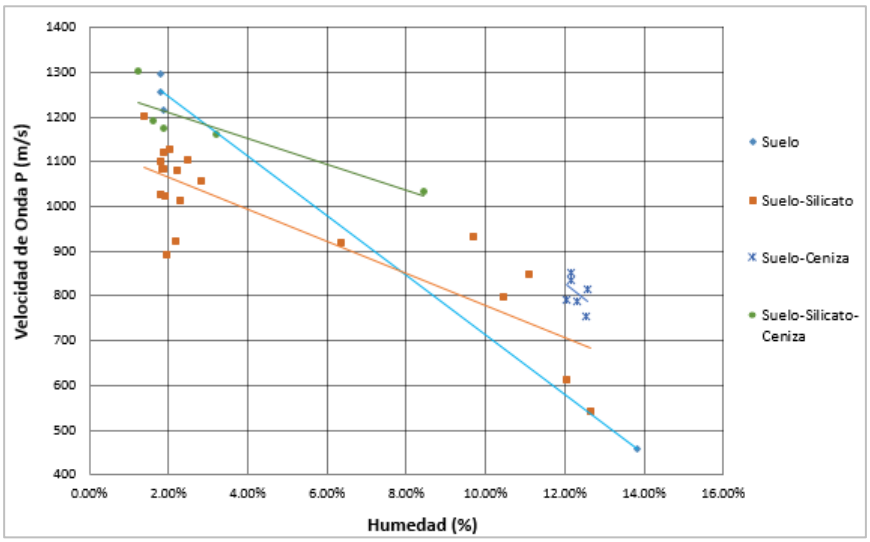
Figura 5-6 Velocidades de onda P vs Edad de curado



Fuente: Elaboración propia

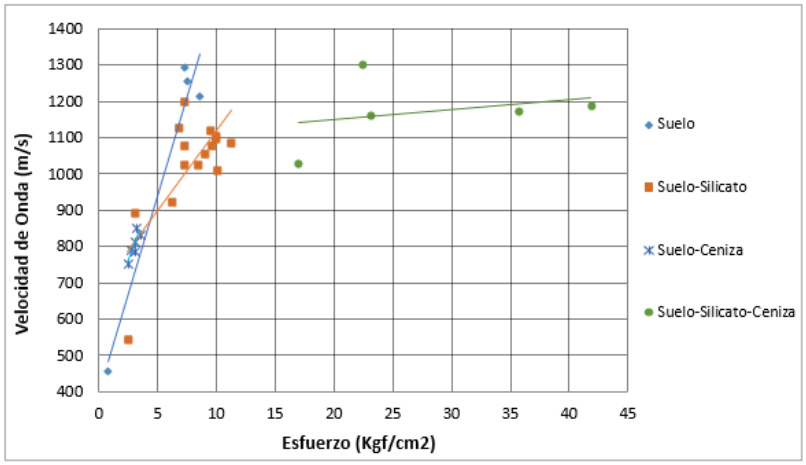
En el caso de la humedad de las muestras (Ver Figura 5-7), se ve claramente una disminución en los valores obtenidos para la velocidad de propagación de onda en función del aumento de las humedades de las muestras. A pesar de que las muestras de suelos estabilizados sólo con ceniza tienen mediciones de onda sólo a los cero días, es decir con valores muy cercanos entre sí a la humedad de compactación, se puede apreciar una tendencia similar a la ya expuesta. En la Figura 5-8, se puede observar que las de las velocidades de propagación de onda de las muestras aumentan significativamente conforme el esfuerzo último a compresión inconfinada de las mismas. Sin embargo, se puede apreciar que en las muestras cuyo mejoramiento consistió en la adición de silicato y ceniza, si bien presentan una relación directa entre los valores obtenidos de velocidades de onda y el esfuerzo último, su aumento no es tan significativo como en las demás combinaciones estudiadas.

Figura 5-7 Velocidades de onda P vs Humedad (%)



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-8 Velocidades de onda Vs Esfuezo



Fuente: Elaboración propia

5.3 Resultados de Desleimiento - Durabilidad

Como complemento a la evaluación de la durabilidad del suelo mejorado, se ejecutó el ensayo de Desleimiento Durabilidad de acuerdo a lo establecido en la norma INVE-236-13, para determinar la influencia de ciclos de humedecimiento secado, en las mezclas de los materiales y en las proporciones definidas. En la Tabla 3 2 se resumen los resultados del índice de desleimiento-durabilidad (SDI) para las muestras sometidas a dicho ensayo.

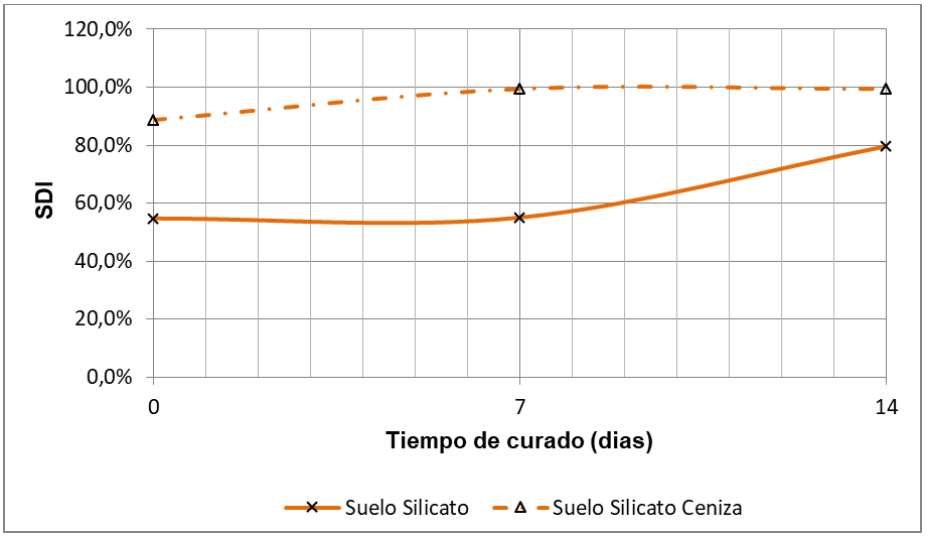
Tabla 5-2 Resumen de los ensayos de desleimiento – durabilidad realizados

ID	Curado (días)	Muestra #	Ciclo 1		Ciclo 2		Índice de Desleimiento			Descripción de probeta ensayada
			Peso inicial probeta (g)	Peso final Probeta (g)	Peso inicial probeta (g)	Peso final Probeta (g)	SDI (1)	SDI (2)	SDI (%)	
D0-S	0	32	181,18	0	0	0	-	-	-	Suelo
D7-S	0	23	180,9	0	0	0	-	-	-	Suelo
D14-S	0	49	179,05	0	0	0	-	-	-	Suelo
D500-SS	0	51	186,28	131,24	131,6	102	70,45	77,51	54,8%	Suelo Silicato
D507-SS	7	54	183,84	134,93	134,98	101,23	73,40	75,00	55,1%	Suelo Silicato
D5014-SS	14	55	201,88	169,94	170,74	160,76	84,18	94,15	79,6%	Suelo Silicato
D0-SC11	0	82	184,42	137,89	137,89	32,48	74,77	23,56	17,6%	Suelo + 11% ceniza
D0-SC14	0	37	184,15	140,26	140,26	41,12	76,17	29,32	22,3%	Suelo + 14% ceniza
D0-SC17	0	83	184,11	145,67	145,67	54,15	79,12	37,17	29,4%	Suelo + 17% ceniza
D0-SC20	0	81	204,1	155,54	155,54	95,9	76,21	61,66	47,0%	Suelo + 20% ceniza
D500-SSC20	0	92	193,21	193,21	197,71	171,15	100	86,57	88,6%	Suelo silicato + 20% ceniza
D507-SSC20	7	109	198,35	198,35	199,63	185,22	100	92,78	93,4%	Suelo silicato + 20% ceniza
D5014-SSC20-1	14	58	201,19	201,19	218,01	199,85	100	91,67	99,3%	Suelo silicato + 20% ceniza
D5014-SSC20-2	14	59	200,86	200,86	215,5	183,8	100	85,29	91,5%	Suelo silicato + 20% ceniza

Fuente: Elaboración propia

Aunque este ensayo es usado específicamente para evaluar la durabilidad de rocas blandas, los resultados servirán para para determinar la resistencia de las probetas ante la pérdida de sus propiedades físicas o de apariencia. Para dicho ensayo se compactaron probetas de 3.8 cm de diámetro y 10.0 cm de altura, teniendo en cuenta las mismas consideraciones de humedad óptima de los ensayos proctor. En la Figura 5-9 se representa la variación del SDI para muestras de suelo silicato y suelo silicato ceniza, en función del tiempo de curado.

Figura 5-9 Variación del SDI con el curado para suelo silicato y suelo silicato ceniza.



Fuente: Elaboración propia.

De la figura anterior, se evidencia el efecto que tiene el tiempo de curado en las muestras de suelo mejoradas con silicato y ceniza, siendo más evidente en el caso de las probetas de suelo silicato. Tomando como referencia los rangos presentados en la Tabla 5-3, la durabilidad de las muestras de suelo silicato se clasifica como media, mientras que para el caso de probetas de suelo silicato ceniza su durabilidad se define como media alta a alta.

Tabla 5-3 Rangos de durabilidad en función del SDI propuesta por Gamble (1989)

Durabilidad	% retenido luego del primer ciclo	% retenido luego del segundo ciclo
Muy Alta	>99	98
Alta	98-99	95-98
Media Alta	95-98	85-95
Media	85-95	60-85
Baja	60-85	30-60
Muy Baja	<60	30

Fuente: Elaboración propia

En la Fotografía 5-1, se observa el aspecto de las probetas de suelo silicato ceniza, luego de haber culminado el segundo ciclo del ensayo. Se puede notar que las muestras conservan su forma cilíndrica y se nota un cambio en la coloración debido a un desgaste superficial leve.

Fotografía 5-1 Aspecto de las probetas de suelo silicato ceniza luego del segundo ciclo de desleimiento durabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

5.4 Parámetros de Resistencia en Ensayo de Corte Directo

Mediante la ejecución del ensayo de corte directo según la norma INVE-154-13, se evidenció el mejoramiento de los parámetros de resistencia de ángulo de fricción y cohesión de los suelos mejorados, considerando su potencial uso como material de terraplén. En la Tabla 5-4 se presentan los resultados de los ensayos de corte directo; el mayor ángulo de fricción corresponde a la muestra de suelo ceniza silicato, mientras que la cohesión más alta se obtuvo en el ensayo con la muestra de suelo silicato.

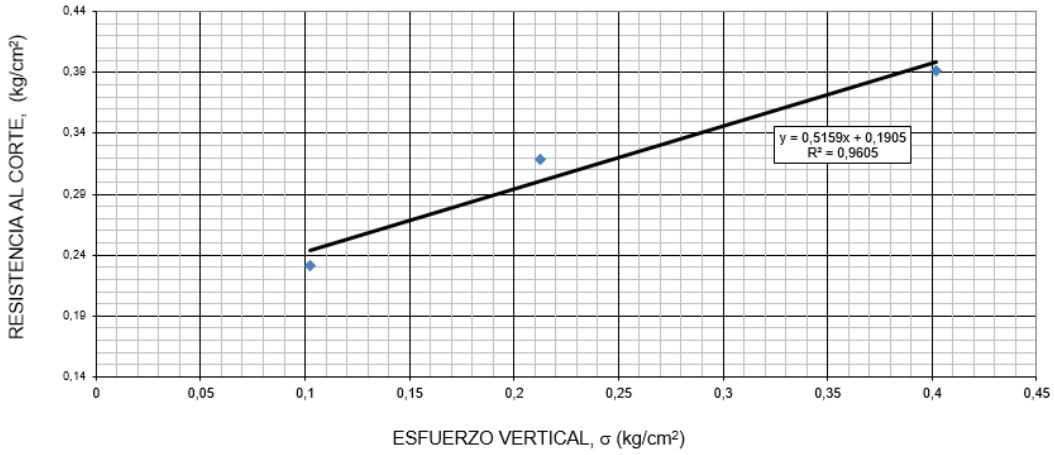
Los valores de ángulos de fricción obtenidos para las mezclas de suelo ceniza y suelo silicato ceniza, se encuentran dentro de los rangos típicos para una roca blanda; aunque el parámetro de cohesión no corresponde propiamente al de este tipo de material. En la Figura 5-10 y la Figura 5-11 se presentan las gráficas de resistencia al corte correspondientes a los mejoramientos suelo ceniza y suelo silicato ceniza.

Tabla 5-4 Parámetros de resistencia al corte para las opciones consideradas.

ID	Muestra #	Ángulo de Fricción ϕ (°)	Cohesión (kg/cm^2)	Descripción
CD14-S-1	100	21,4	0,113	Suelo
CD14-S-2	119			
CD14-S-3	120			
CD0-C1	135	23	0,08	Ceniza
CD0-C1	136			
CD0-C1	137			
CD14-SC20-1	126	27,3	0,191	Suelo + 20% Ceniza
CD14-SC20-2	127			
CD14-SC20-3	128			
CD5014-SS-1	101	33,4	0,637	Suelo Silicato
CD5014-SS-2	116			
CD5014-SS-3	122			
CD5014-SSC20-1	117	36	0,11	Suelo Silicato Ceniza
CD5014-SSC20-2	118			
CD5014-SSC20-3	124			

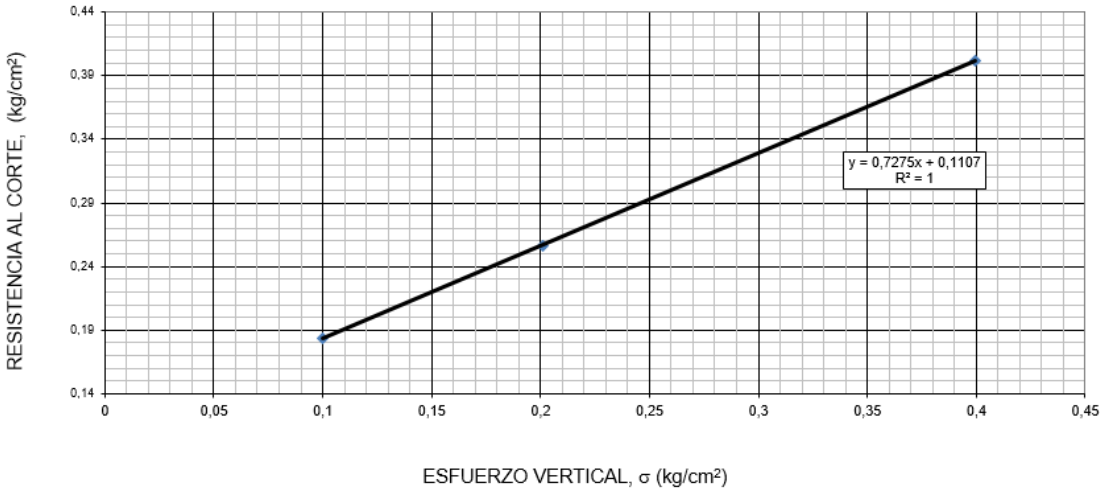
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5-10 Resistencia al corte en la muestra de suelo + 20% de ceniza de cortes de perforación.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-11 Resistencia al corte en la muestra de suelo silicato + 20% de ceniza de cortes de perforación.



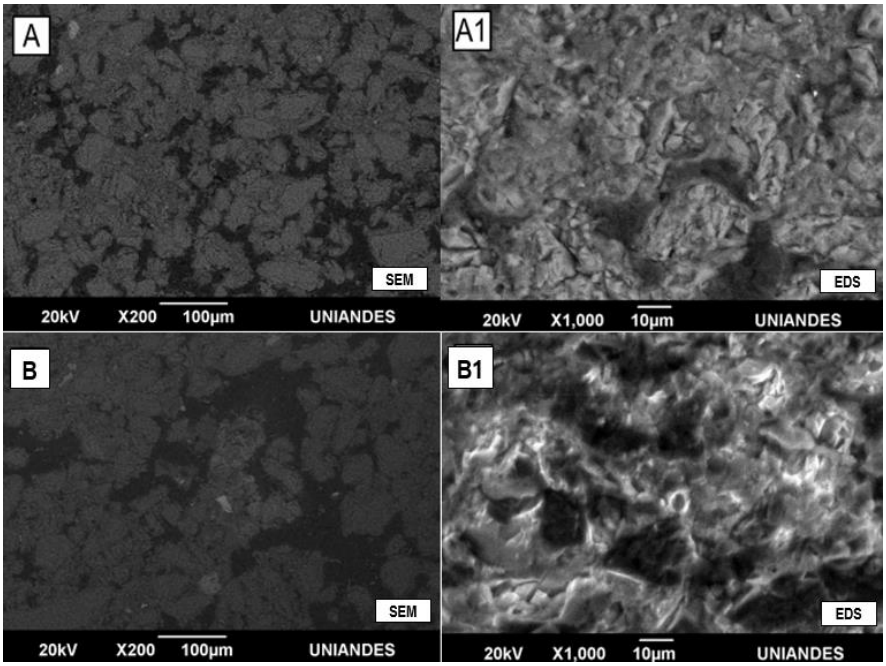
Fuente: Elaboración propia.

5.5 Análisis microscópico de las muestras

Como complemento a las pruebas de resistencia y durabilidad, se realizaron ensayos de microscopía electrónica de barrido (SEM), y de electroscopía por dispersión de energía (EDS); así como un análisis petrográfico de las probetas compactadas de mezcla de suelo, silicato y ceniza de cortes de perforación. El ensayo SEM da como resultado una imagen que permite identificar la micro estructura de las diferentes muestras, mientras que el EDS permite conocer la composición química de los mismas. Dichos ensayos permiten identificar el nivel de porosidad y fracturación en las muestras de suelo.

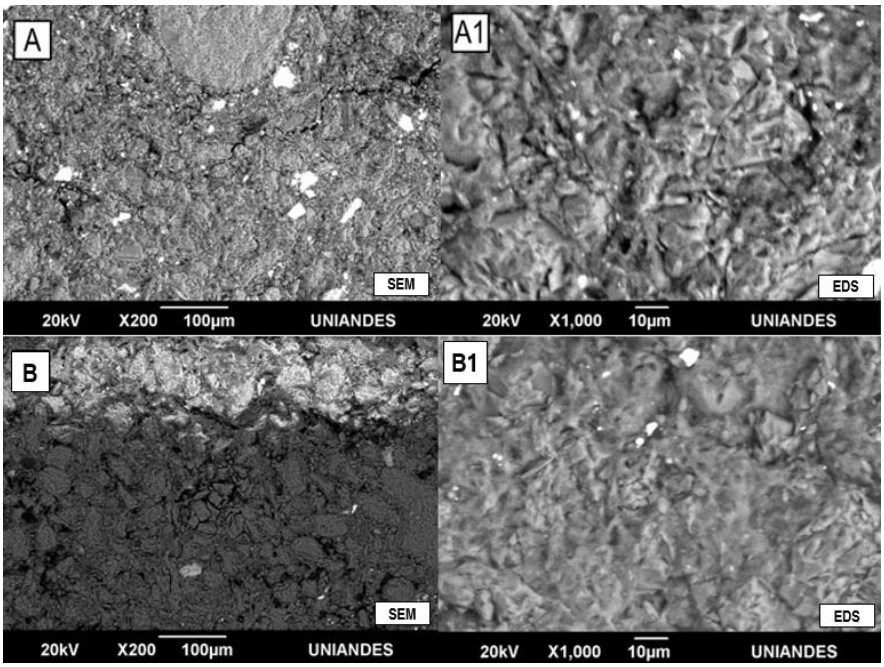
Los resultados de estos ensayos hacen concluir que los suelos del área son pertenecientes a perfiles lateríticos, encontrando que dichos suelos son ricos en Si, C, O, Al y Fe, pobres en fosfatos, alcalinos y alcalinotérreos. Los principales minerales observados fueron cuarzo, hidróxidos de Al, óxidos e hidróxidos de Fe, caolinita. Los suelos del Vichada presentan características mineralógicas que se deben a los eventos geológicos del área posteriores al Pleistoceno y al clima cálido con ciclos de sequía y lluvias. A continuación, en la Figura 5-12 a la Figura 5-14 se muestran las imágenes tomadas bajo el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) y el detector de espectroscopía por dispersión de energía (EDS).

Figura 5-12 Imagen SEM y microfotografía con análisis EDS para una muestra de suelo arcilloso sin proceso de curado (A-A1) y con proceso de curado (B-B1).



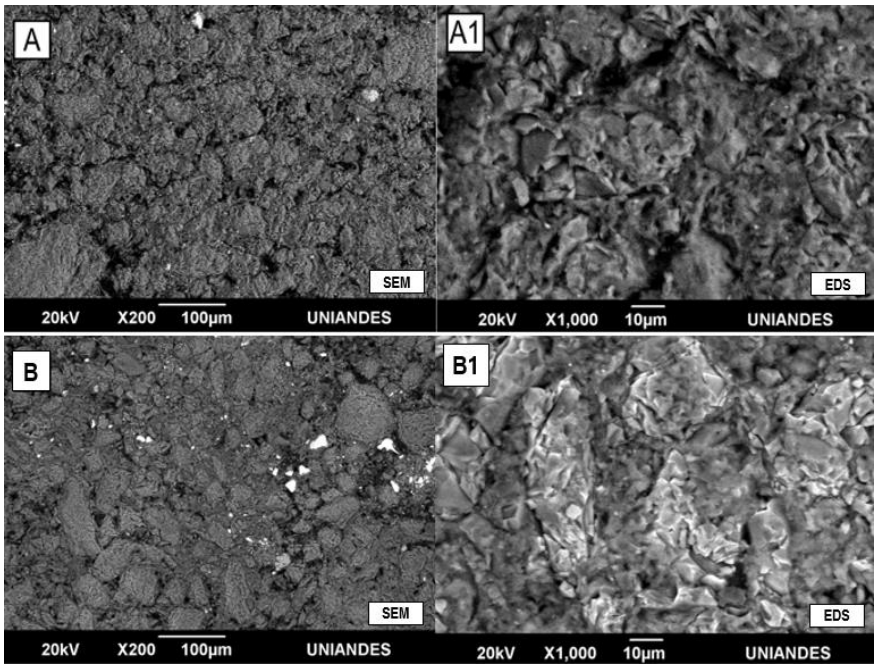
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-13 Imagen SEM y microfotografía con análisis EDS para una muestra de suelo arcilloso + Ceniza sin proceso de curado (A-A1) y con proceso de curado (B-B1).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-14 Imagen SEM y microfotografía con análisis EDS para muestra de suelo arcilloso + ceniza + silicato sin curado (A-A1) y con proceso de curado (B-B1).



Fuente: Elaboración propia.

El detector de espectroscopía por dispersión de energía (EDS) permite además la realización de microanálisis cualitativos y cuantitativos mediante la detección del espectro de emisión de rayos x particular de cada elemento producido por el haz de electrones sobre la muestra, siendo la intensidad de los rayos X una medida de la concentración de los elementos. En la tabla Tabla 5-5 se resumen los resultados promedio obtenidos en el análisis mediante el uso de la Microsonda de Rayos X (EDX):

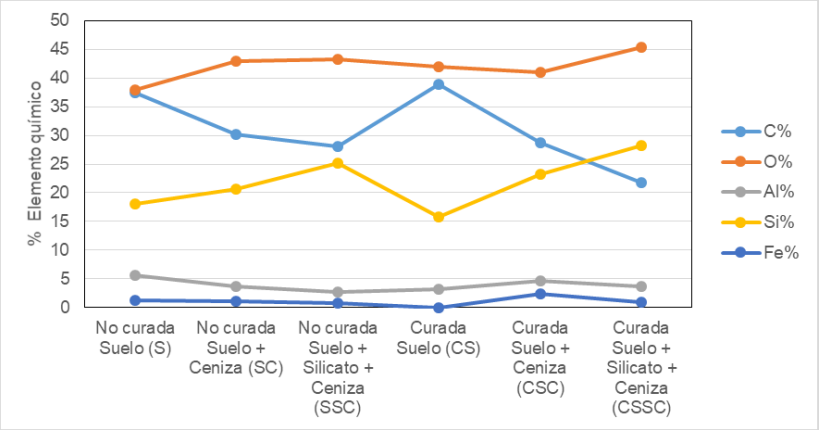
Tabla 5-5 Composición química promedio en los sectores de las muestras analizados.

MUESTRA	C%	O%	Al%	Si%	Fe%
Curada Suelo (CS)	38.9	42.0	3.2	15.8	0.0
Curada Suelo + Ceniza (CSC)	28.8	41.0	4.6	23.2	2.4
Curada Suelo + Silicato + Ceniza (CSSC)	21.7	45.3	3.7	28.3	0.9
No curada Suelo (S)	37.4	37.9	5.6	18	1.2
No curada Suelo + Ceniza (SC)	30.2	42.9	3.6	20.7	1.0
No curada Suelo + Silicato + Ceniza (SSC)	28.1	43.3	2.7	25.1	0.8

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5-15, se plasma la variación de los principales componentes químicos para las combinaciones de materiales establecidas.

Figura 5-15 Identificación de elementos químicos en las mezclas ensayadas.



Fuente: Elaboración propia.

Al realizar una comparación sobre el comportamiento de los principales elementos químicos identificados en las diferentes mezclas de suelo, ceniza de cortes de perforación tratados y silicato, se observa que el porcentaje de sílice aumenta con la adición de la ceniza, mientras que la presencia de carbono disminuye considerablemente; los demás elementos no manifiestan una variación importante.

Como actividad complementaria a los ensayos de microscopia electrónica, se llevó a cabo un análisis petrográfico de las muestras de suelo, para describir y clasificar los constituyentes de la muestra, determinar sus cantidades relativas, identificar minerales, junto con su nivel de porosidad y fracturación. Para el análisis microscópico se elaboraron secciones delgadas con muestras representativas del material y el análisis se llevó a cabo con microscopio de luz transmitida.

En resumen, las muestras presentan un color marrón a marrón amarillo de acuerdo con la tabla Munsell, y se encuentran compuestas principalmente por granos de cuarzo tamaño limo a arena gruesa, opacos, en algunas ocasiones con grados de mica y arcillolita, embebidos en una masa basal de filosilicatos y óxidos de hierro (Ver Tabla 5-6). Asimismo, en las muestras con adición de ceniza, se observa la presencia de fragmentos de tipo calcáreo a arcilloso con tamaños varían entre 0.20mm a 2mm. También se observó la presencia de vacíos y microporos con tamaños varían entre 4µm a 2mm, presentando algunos formas angulares o irregulares. En la Figura 5-16 y la Figura 5-17, se muestran microfotografías bajo el estéreo microscopio, en donde se distingue la apariencia general

y la textura de la masa basal (MB), la presencia de granos de cuarzo (Qz) tamaño arena media y la distribución de los fragmentos calcáreos ya mencionados (Fr).

Tabla 5-6 Composición petrográfica de las muestras analizadas.

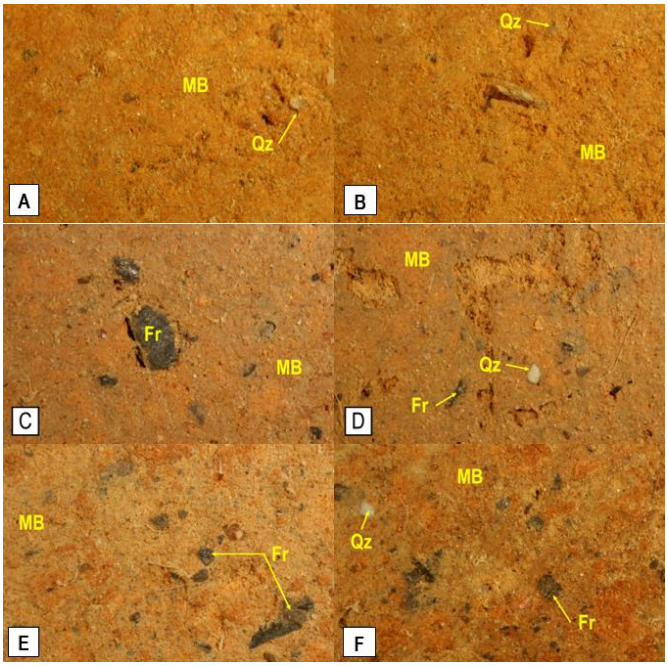
CARACTERÍSTICA DE LOS CONSTITUYENTES	MUESTRAS SIN CURADO			MUESTRAS CURADAS		
	S	SC	SSC	CS	CSC	CSSC
	Porcentaje de Partículas (%)					
Cuarzo (tamaño limo)	40	25.5	23.2	36.5	28.6	29.4
Masa basal de filosilicatos y oxido	55.3	44.1	61.1	58.8	43.7	47.1
Cuarzo (tamaño arena media a gruesa)	3.5	9.8	2.1	3.5	4.2	7.6
Opacos	1.2	1	1.1	1.2	5	3.4
Fragmentos de rocas	0	14.7	11.6	0	17.6	9.2
Calcita	0	1	1.1	0	0	3.4
Arcillolita	0	3.9	0	0	0	0
Mica	0	0	0	0	0.8	0
Total	100	100	100	100	100	100
% de vacíos y microporos	31.5	24.4	11.2	28.6	13.8	6.3

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los valores expuestos en la Tabla 5-6, el porcentaje de la masa basal disminuye con la adición de ceniza + silicato al suelo, para muestras sin y con proceso de curado respectivamente.

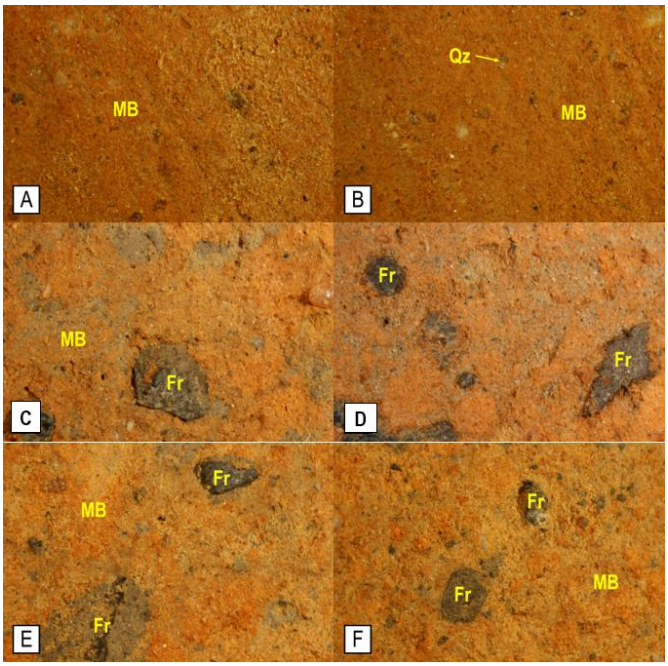
También se puede inferir que el porcentaje de cuarzo aumenta, lo cual se debe seguramente al aporte de minerales de las rocas trituradas que hacen parte de la ceniza de cortes de perforación. Otro hallazgo importante, es una clara disminución del porcentaje de vacíos y micro poros en las muestras. Se obtuvo una reducción de vacíos para muestras de suelo + ceniza entre el 23% (sin curar) y 52% (curadas); mientras que para las muestras de suelo + ceniza + silicato el rango de variación se encuentra entre el 64% (sin curar) y 80% (curadas). A continuación se presenta una galería de microfotografías a las secciones delgadas obtenidas y analizadas de cada muestra.

Figura 5-16 Microfotografías a través del estéreo microscopio de las muestras. No Curadas. Suelo (A y B), Suelo + Ceniza (C y D), Suelo + Silicato + Ceniza (E y F).



Fuente: Elaboración propia.

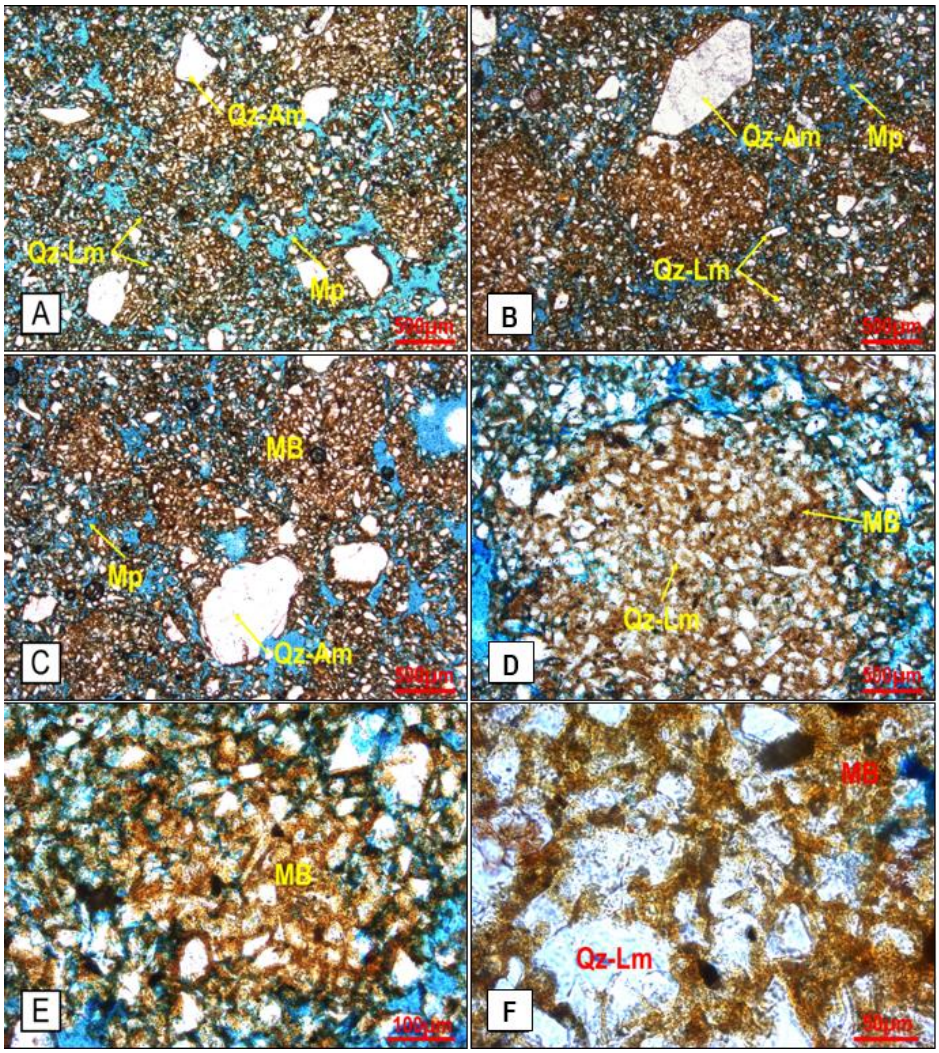
Figura 5-17 Microfotografías a través del estéreo microscopio de las muestras Curadas. Suelo (A y B), Suelo + Ceniza (C y D), Suelo + Silicato + Ceniza (E y F).



Fuente: Elaboración propia.

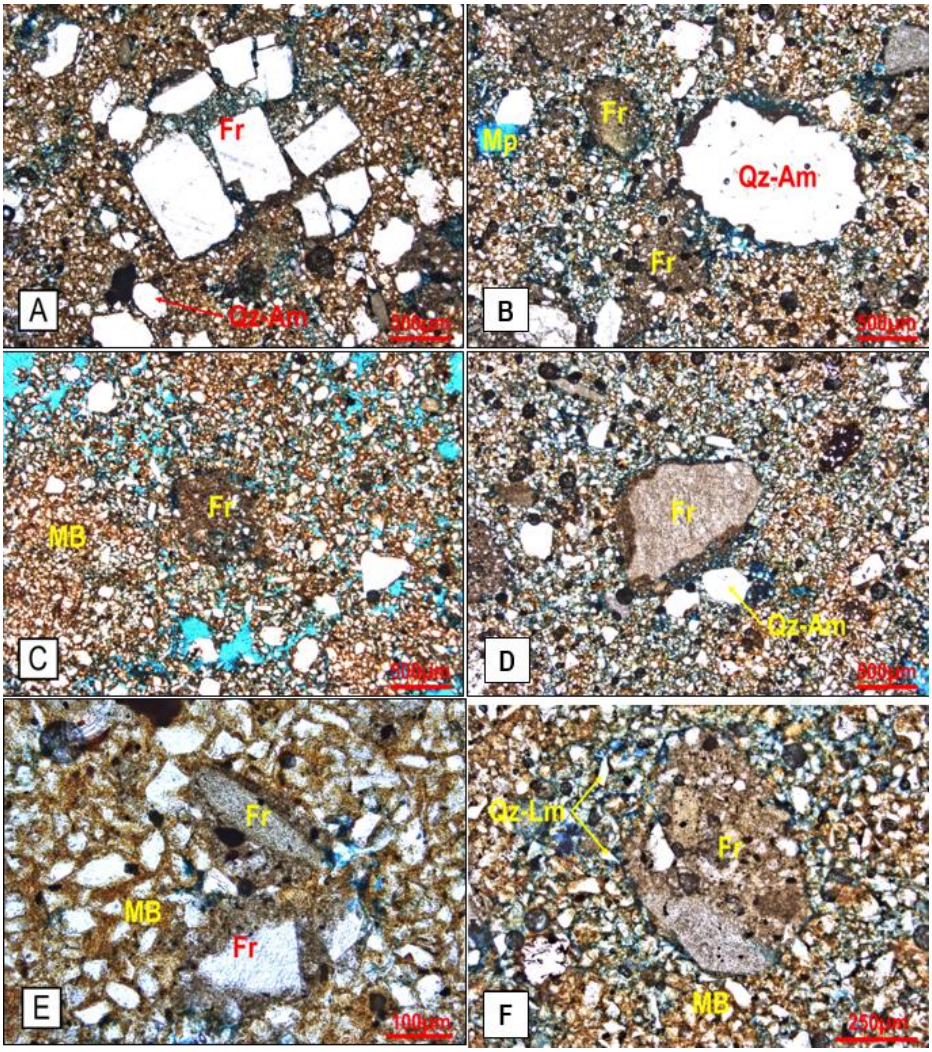
A cada una de las muestras, se le inyectó una resina epóxica de color azul, con el propósito de aumentar la cohesión de la misma, permitiendo un manejo más fácil en la elaboración. El color de la resina facilita además, el reconocimiento de la porosidad y micro fisuras presentes en la muestra (Ver Figura 5-18 y Figura 5-19). Al contrastar la cantidad de manchas del colorante azul, notadas en las microfotografías de suelo y de suelo + ceniza, se refleja la disminución del porcentaje de vacíos anteriormente mencionados, lo cual se traduce en una mayor densidad de la muestra y acoplamiento de los minerales. En ambas figuras se presenta la distribución de granos de cuarzo tamaño limo (Qz-Lm) y tamaño arena media (Qz-Am), la textura de la masa basal (MB) y la presencia de microporos (Mp).

Figura 5-18 Microfotografías capturadas con nicoles paralelos de la muestra de Suelo sin proceso de curado (A, C, E) y con proceso de curado (B, D, F)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-19 Microfotografías capturadas con nicoles paralelos de la muestra de Suelo + Ceniza sin proceso de curado (A, C, E) y con proceso de curado (B, D, F)

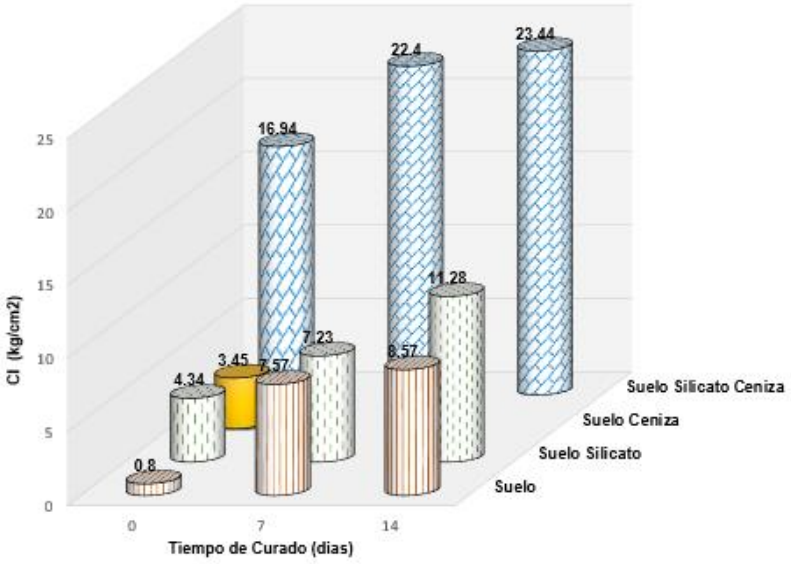


Fuente: Elaboración propia.

6. Análisis de Resultados

A partir de las técnicas de análisis de laboratorio empleadas en el diseño experimental del presente trabajo de investigación, se obtuvieron resultados que permitieron sustentar el uso de los cortes o ripios de perforación petrolera como agente de mejoramiento de suelos arcillosos de baja plasticidad relativos a un tramo de vía terciaria cerca del municipio de La Primavera. En la Figura 6-1, se observa el contraste de los valores de resistencia a la compresión inconfinada (CI), destacándose los resultados para la probetas de suelo silicato y ceniza, los cuales triplicaron el parámetro de resistencia frente a las muestras de suelo curadas a 7 y 14 días. En términos generales, no hay una ganancia de resistencia que marque la diferencia entre las pruebas curadas de suelo, y de suelo silicato.

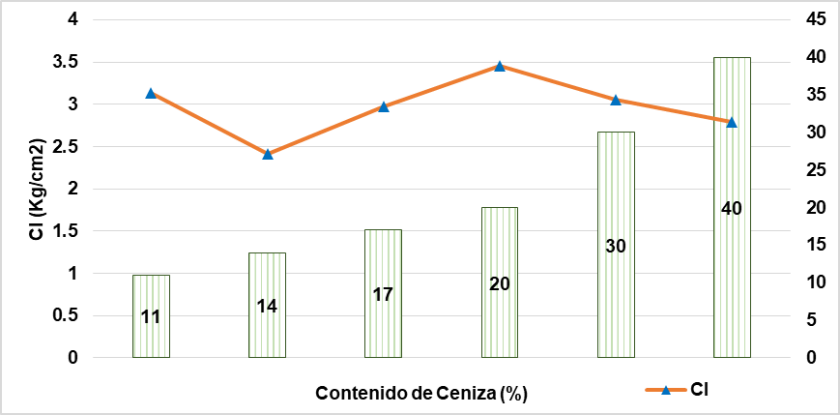
Figura 6-1 Resumen gráfico de los resultados del ensayo de compresión inconfinada



Fuente: Elaboración propia.

También se comprobó, que las probetas no curadas y falladas para diferentes combinaciones de suelo y ceniza, no obtuvieron valores importantes de resistencia, y pareciera en primera vista, que la ceniza no tiene una influencia en el mejoramiento de los suelos de la zona de estudio, ya sus resultados de resistencia a la compresión inconfinada (CI) son muy parecidos en magnitud (Ver Figura 6-2).

Figura 6-2 Comparación de la resistencia de probetas no curadas de suelo con diferentes porcentajes de ceniza.

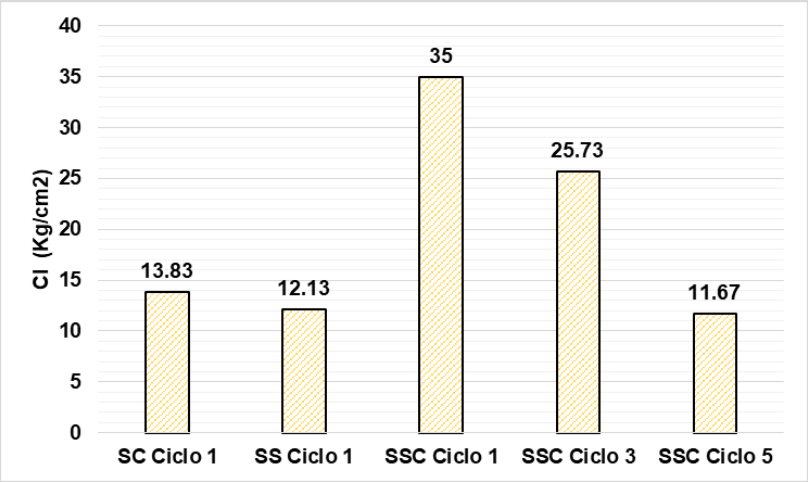


Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, al experimentar con las muestras a ciclos de humedecimiento secado, y también a ciclos de desleimiento, se nota el valor agregado de la ceniza en cuanto a durabilidad se refiere. De acuerdo a la investigación de Caballero (2017), las muestras que presentaron mejores resultados a los ciclos de humedecimiento – secado, fueron las impregnadas con la resina, dado que esta capa acrílica impedía el contacto del agua con las partículas de suelo; es decir que cumplió la función de un agente hidrófobo.

De manera similar, en el presente trabajo de maestría, se pudo demostrar que la adición de ceniza a las muestras de suelo y silicato, generó una propiedad hidrófoba, que mejoró notablemente los resistencia a la compresión inconfinada, tal como se muestra en la Figura 6-3.

Figura 6-3 Resultados de resistencia a la compresión Inconfinada (IC) en muestras con ciclos de humedecimiento – secado.



Fuente: Elaboración propia.

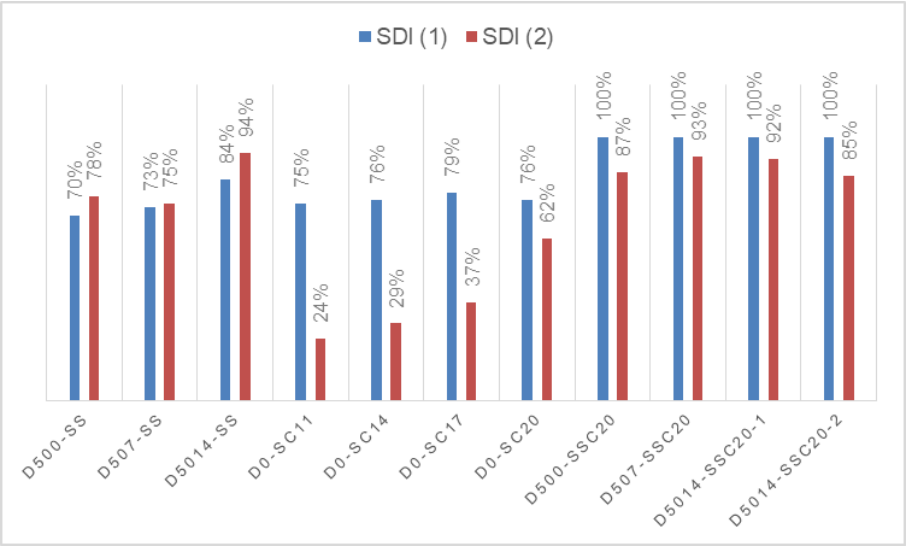
Con respecto a los resultados de las pruebas de desleimiento, las muestras de suelo sin mejoramiento alguno se desintegraron totalmente luego del primer ciclo sin importar la edad de curado, lo cual se refleja en las condiciones reales de la zona de estudio en época de lluvia.

Posteriormente se ensayaron muestras no curadas de suelo ceniza con proporciones entre el 11% y 20%, cuyo SDI aumenta del 17.6% al 47.0%; Si bien hay un mejoramiento considerable en la durabilidad del material y todas las muestras de suelo ceniza perdieron un 25% de su peso en el primer ciclo, los índices no resultan del todo satisfactorios. Por su parte, las muestras mejoradas con solo silicato, presentan un mejor desempeño, logrando índices del 84% al 94% en aquellas curadas a mayor edad.

Finalmente, las que mejor desempeño tuvieron fueran las muestras con el mejoramiento combinado suelo-ceniza-silicato, logrando índices del 100% después del primer ciclo y alrededor del 90% después del segundo ciclo. En la Figura 6-4, se presenta un diagrama de barras para representar la variación del SDI en ambos ciclos del ensayo.

Respecto a los ensayos de corte directo realizados, se observó que hubo un aumento de 3 grados (°) en el parámetro de ángulo de fricción, lo que puede significar un mejor empaquetamiento de las partículas y cementación lograda con la adición tanto del silicato y la ceniza.

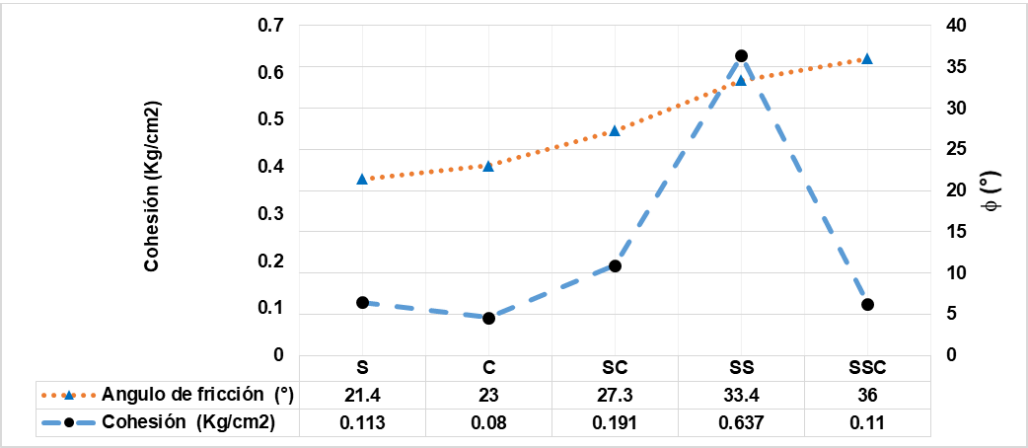
Figura 6-4 Variación del SDI del primer y segundo ciclo para las probetas ensayadas.



Fuente: Elaboración propia.

Los valores de cohesión en general están por debajo de los 0.2 Kg/cm^2 excepto para la muestra de suelo silicato en donde hubo un aumento de dicho parámetro por encima de los 0.6 kg/cm^2. Mediante las pruebas de corte directo, nuevamente se refleja la ganancia de resistencia del suelo al combinarse con los agentes de mejoramiento utilizados (Ver Figura 6-5). Nuevamente se evidencia un mejoramiento de la condición de resistencia del suelo, que establece un referente para el diseño de terraplenes como medida para superar el inconveniente de inundaciones en la temporada de lluvias.

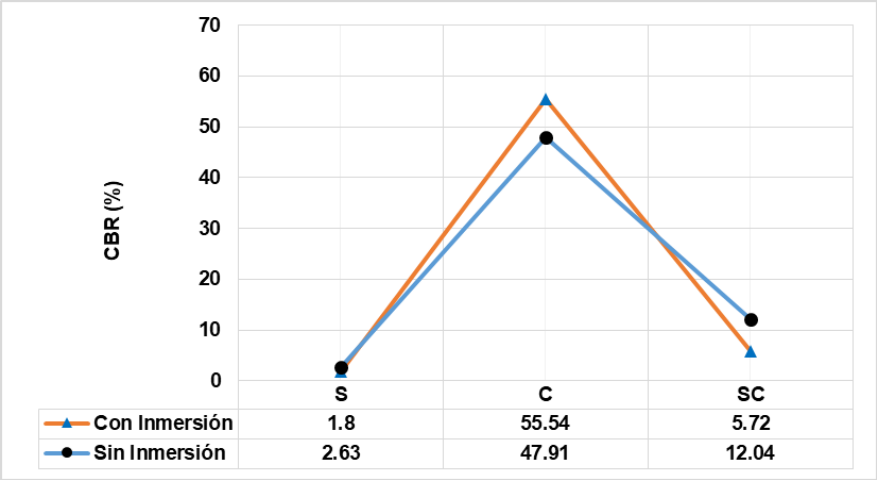
Figura 6-5 Variación de los parámetros de C´ y Φ para las probetas ensayadas



Fuente: Elaboración Propia

En cuanto al parámetro de capacidad de soporte CBR del suelo, se ejecutaron únicamente tres ensayos: El primero para una muestra de suelo inalterada; el segundo para una muestra de ceniza y el tercero para una combinación suelo y ceniza con dosificación al 20% en peso (Ver Figura 6-6). No fue posible llevar a cabo un ensayo de CBR para una muestra de la combinación suelo silicato ceniza, debido a que en su momento la cantidad de material tipo ceniza disponible para esta prueba no era suficiente. Los resultados muestran que la condición actual de la subrasante natural en el tramo de estudio se clasifica como muy pobre. Por otra parte, el ensayo para la ceniza compactada muestra valores de CBR cercanos al 50%, clasificándose el material bueno y siendo recomendable utilizarlo como material de sub-base y base en la construcción de carreteras según la AASHTO (2004). Finalmente para la muestra de suelo y ceniza, se observa una disminución en el valor de CBR cercano al 10%, clasificándose como regular, y permitiendo su uso en la conformación de terraplenes para vías de bajo tránsito. Es de esperarse, que al realizar el ensayo con una muestra de suelo silicato ceniza, se presenten valores entre el 20% y el 30%, basados en los resultados de los ensayos de compresión inconfinada y los ensayos de durabilidad y humedecimiento secado, que indican un mejoramiento de la rigidez del material y por ende una menor deformación; así como un aumento en su resistencia de 2 a 3 veces la inicial.

Figura 6-6 Variación del CBR para las muestras ensayadas



Fuente: Elaboración propia

7. Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

En este trabajo final se ha estudiado el comportamiento de suelos de tipo laterítico mejorado para uso vial, pertenecientes a un tramo de la vía terciaria La Primavera – El Tigre, localizada en el departamento del Vichada. En el sitio de estudio predominan materiales finos de composición arcillosa cuyo contenido de humedad natural se encuentra entre el 11% y el 13.6% con un promedio de 12.4%, el limite liquido varía entre el 29.0% y 31.4% con un promedio de 30.7%, y el limite plástico varía entre el 16.6% y 18.4% con un promedio de 1.5%. De acuerdo con la carta de plasticidad de Casagrande, todos los ensayos muestran que estos materiales se clasifican como arcillas inorgánicas de baja plasticidad (CL).

Para el mejoramiento se utilizó un material proveniente de procesos de la industria petrolera clasificado como cortes o ripios de perforación bajo un Tratamiento Térmico Mecánico (TTC) correspondiente a Desorción Térmica. Dicho material tiene un aspecto de ceniza, de textura areno limosa y de olor fuerte. Se observó que la ceniza al entrar en contacto con agua se aglutina retardando el proceso de hidratación, y homogenización de la mezclas con el suelo. Debido a su variedad mineralógica, la ceniza es un material difícil de caracterizar, ya que resulta de la trituración mecánica de formaciones rocosas sedimentarias mezcladas con los lodos de perforación base aceite. Es un material cuya fracción fina no presenta plasticidad y genera inconvenientes en la ejecución de algunos ensayos como hidrometría de partículas, ya que se produce una especie de espuma.

Se determinó, por medio de múltiples ensayos, que el mejoramiento adecuado, de los propuestos en el proyecto, es una combinación de 20%, dosificada en peso, de ceniza

producto de residuos petroleros más silicato de sodio dosificado al 50% dentro del agua de compactación del suelo.

A las diferentes dosificaciones de mejoramiento planteados se le midieron velocidades de propagación de onda, dando como resultado un aumento en los valores obtenidos de velocidad en función del tiempo de curado, siento este aumento bastante pronunciado en los primeros días; al parecer es en este periodo que desarrolla la mayor parte de la reacción de los agentes estabilizantes con el suelo. Durante la medición de las velocidades de propagación de onda, se apreció que la magnitud de este parámetro aumentaba en función de la resistencia adquirida para las muestras de suelo silicato y suelo silicato ceniza. Se observó además que, la velocidad de propagación de la onda es inversamente proporcional al contenido de agua del suelo y al peso unitario de las probetas.

Los resultados mostraron que uno de los principales beneficios del uso de las cenizas de los cortes de perforación, es la durabilidad, al parecer por el efecto hidrófobo que produce una disminución de la migración de agua por capilaridad, muy seguramente asociado a la reducción de las fuerzas de tensión superficial.

De acuerdo con los resultados de Caballero (2017), la aplicación de la resina en la superficie de las muestras, favoreció significativamente la durabilidad de los suelos ante los ciclos de humedecimiento secado. Sin embargo, dicha resina puede llegar a cristalizarse bajo la exposición del sol, abriendo la posibilidad de que el agua de inundación en las planicies del Vichada altere la estructura del suelo. Esta situación no se daría al combinar la ceniza de cortes de perforación con el suelo, ya que se demostró en diferentes ensayos, que la ceniza tiene de alguna manera un efecto hidrófobo, que lo hace más resistente ante los efectos ambientales. En resumen, la adición de ceniza aporta mejoras adicionales a las propiedades ya logradas por Caballero.

En el presente trabajo de tesis no se consideró la adición de cemento como alternativa en las mezclas de suelo y ceniza, pues los estudios previos indican que se requieren porcentajes altos de cemento hidráulico, para que los suelos de la región muestren señales de mejoramiento. Lo anterior lo hace inviable económicamente y además existen restricciones para su uso, por ser un insumo para la producción de narcóticos.

7.2 Recomendaciones

Teniendo en cuenta la cota de inundación establecida en los estudios realizados por la firma Hidroconsulta (2013), a partir de las condiciones hidrológicas y geomorfológicas de la zona de estudio, la cual se encuentra en un rango de 1.0 m a 1.5 m, se debe considerar conformar terraplenes viales en las vías de la región, complementado con un sistema de drenaje, que interaccione con los drenajes naturales.

Por otra parte, de acuerdo a lo observado en los apiques de campo, existe una costra superficial de minerales de hierro lixiviados debido a los continuos ciclos de humedecimiento – secado, controlados por el régimen de lluvias. Dicha costra genera una resistencia aparente a la penetración con el ensayo de cono dinámico (PDC), frente al resto del perfil del suelo en profundidad. Por lo anterior es recomendable que la cota de construcción del terraplén con el material mejorado de suelo silicato ceniza, esté por lo menos a 20 cm del nivel actual de la subrasante del terreno natural.

Para el mezclado y la colocación del material mejorado con la alternativa planteada en este estudio, se debe realizar preliminarmente un escarificado de la subrasante, y realizar una buena disgregación del material del suelo natural y de la ceniza mediante el uso de buldócer antes de ser mezclados, de tal manera que se elimine la mayor cantidad de partículas gruesas. Uno de los inconvenientes constructivos sería garantizar una mezcla homogénea del suelo y la ceniza, y posteriormente la adición de la solución del silicato, debido a que la mezcla óptima fue encontrada bajo condiciones controladas de laboratorio.

Por lo anterior, uno de los aspectos constructivos más importantes será controlar la humedad natural de los materiales, para que la dosificación del silicato de suelo, esté acorde con los hallazgos en esta investigación. Se recomienda entonces, construir un tramo de prueba que permita afinar la dosificación de los materiales, y también su comportamiento ante las cargas de tránsito esperadas.

A futuro se recomienda hacer experimentos adicionales, para buscar usos adicionales al reemplazar el contenido de arena por una mezcla de ceniza, en muestras de base y sub-base granular; así como también en mezclas asfálticas, para evaluar su comportamiento mecánico y de durabildad.

En necesario, implementar modelos a escala para medir deformaciones y permeabilidad en terraplenes conformados para mezclas de diferentes tipos de suelo con la ceniza, especialmente para materiales encontrados en zonas apartadas del país, de similares características geográficas al departamento del Vichada, en donde no existen fuentes de materiales cercanas.

Bibliografía

Agudelo J, (2015). Influencia del porcentaje de cemento en el comportamiento mecánico de una mezcla de fracción fina de suelo “laterita” con cemento y agua. Tesis de maestría Universidad de Los Andes. URI:https://documentodegrado.uniandes.edu.co/documentos/7913.pdf

Ahmaruzzaman M. (2010). A review of the utilization of fly ash. Department of Chemistry, National of Technology Silchar. Assam. India. Journal of Progress in Energy and Combustion Science. No.36, pp. 327-363.

Architectural Engineering, Sultan Qaboos University. Muscat Sultanate of Oman. Construction and Building Materials No.19, pp. 646–652.

Argote, C. y Martínez, J. A. (2011). Comparación del método Endrill con los métodos convencionales de tratamiento de cortes de perforación”. Tesis de pregrado. Facultad de Ingenierías Físico- Químicas. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

Ball A, and Stewart R, y J, Schliephake K. (2011). A review of the current options for the treatment and safe disposal of drill cuttings. Waste Management and Research. No.30, pp. 457–473.

Caballero, O.J. (2017). Estabilización Química con Silicato de Sodio del Material de Préstamo de la Vía La Primavera – Bonanza – La Venturosa en el Departamento del Vichada. Tesis de Maestría en revisión. Universidad Nacional de Colombia.

Lotero V, (2016) Modelación del comportamiento ondulatorio de vías sin pavimentar del Departamento del Vichada, por medio de ensayos en pista de prueba. Tesis de

maestría Universidad de Los Andes. URI: https://documentodegrado.uniandes.edu.co/documentos/9469.pdf

Calao, J. E. (2004). Caracterización Ambiental de la Industria Petrolera: Tecnologías Disponibles para la Prevención y Mitigación de Impactos Ambientales. Tesis de grado. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.

Caro S., & Caicedo B, (2017) Tecnologías para Vías Terciarias: Perspectivas y Experiencias desde la Academia, *Revista de Ingeniería*, nº 45, 2017, pp. 12-21

Cotes, L. and Murillo, C., (2015). Estabilización de suelos arcillosos mediante la dosificación de la ceniza del cuesco de la palma africana. XV Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica - From Fundamentals to Applications in Geotechnics,: 1678-1685.

Corporinoquía. (1998) Guía para plantaciones Forestales comerciales. Serie de documentación No. 38. Santa Fé de Bogotá.

Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. (2013). Instituto Nacional de Vías - (INVIAS). Ministerio de Transporte de Colombia.

Hago, A.W., and Hassan, H.F., A. Al Rawas, R. Taha, S. Al-Hadidi. (2007), Characterization of concrete blocks containing petroleum-contaminated soils, College of Engineering, Sultan Qaboos University, Oman. Construction and Building Materials No. 21, pp. 952–957.

Hidroconsulta (2013a), Estudio Geotécnico para el Diseño de Pavimento, Estudios Y Diseños De Las Vías Priorizadas En El Plan Vial Departamental Del Vichada, Gobernación del Vichada

Hidroconsulta (2013b), Estudio de estabilidad y estabilización de taludes, Estudios Y Diseños De Las Vías Priorizadas En El Plan Vial Departamental Del Vichada, Gobernación del Vichada

Hossam, F. H., and Ramzi T, Amer A. R., and Badr A. S. (2005). Potential uses of petroleum-contaminated soil in highway construction. Department of Civil and Architechtural Engineering, Sultan Qaboos University. Muscat Sultanate of Oman. Construction and Building Materials No.19, pp. 646-652.

IGAC. (1992). Atlas de Colombia. Bogotá.

IGAC, 2004. Estudio General de suelos y zonificación de tierras, Departamento de Meta. Bogotá 2004. República de Colombia, Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Instituto Geográfico" Agustín Codazzi," Subdirección Agrológica.

Ingeominas (2009). Memoria explicativa de las planchas 162, 162Bis, 182 y 182Bis, Puerto Carreño, Vichada. Bogotá D.C.

Ingeominas. (2002). Geología del departamento del Meta. Escala 1:400.000, Bogotá.

Ingeominas (2001). Geología del Departamento del Meta. Memoria Explicativa Bogotá.

Ingeominas. (1986). Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia. Pub. Geol. Esp. Nº 14-1 Bogotá.

Jerez R. Laura D. &, Murillo F. Carol A., (2016), Determinación del potencial expansivo de un suelo natural y estabilizado del Vichada, empleando SWCC. XV Congreso Colombiano de Geotecnia & II Conferencia internacional especializada en rocas blandas, Cartagena 5 al 7 de Octubre de 2016

Martínez, R. G. (2005). Metodología para la Evaluación de Procesos de Tratamiento y Opciones de Disposición de Desechos de Perforación Generados Costa Afuera. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

Meegoda J. N., and Muller R. T. (1993). Petroleum contaminated soils highway construction. In: Symposium proceedings: recovery and in effective reuse of discarded materials and by-products for construction of highway facilities, Denver, CO, pp. 483–495.

Ministerio del Medio Ambiente. (1999). Guía de manejo ambiental para proyectos de perforación de pozos de petróleo y gas. República de Colombia. Versión No1.

Ministerio de Transporte (2014). Propuesta para la creación del Programa CEIBA – DROMOS. Materiales Y Métodos Constructivos Para La Estabilización De La Malla Vial Terciaria En Colombia: Una Visión Eficiente, Económica Y Sostenible.

Rodado N., Caicedo B., (2015), Estudio del Comportamiento de Terraplenes Modificados con Poli-Acrilato de Sodio considerando el efecto de la Inundación recuperado el 29 de Octubre de 2017, https://documentodegrado.uniandes.edu.co/documentos/7943.pdf.

Rozo C. E., Meneses R. J. (2005). Manejo Ambiental para Campos Petroleros en los Procesos de Exploración, Perforación y Producción de Hidrocarburos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

Servicio Geológico Colombiano (2012). Geomorfología de Seis Planchas del Departamento de Vichada. Bogotá.

Servicio Geológico Colombiano. (2012). Cartografía Geológica y Muestreo Geoquímico de las planchas 159, 160, 161, 179, 180 y 181. Puerto Carreño, Vichada. Memoria Explicativa. Bogotá.

SGC, (2012a). Memoria explicativa. Cartografía geológica plancha 254 (San José de Ocuré) Bloque 9 – Departamento del Vichada. Bogotá 2012.

SGC, (2012b). Memoria explicativa. Cartografía geológica plancha 253 (Guacamayas) Bloque 9 – Departamento del Vichada. Bogotá 2012.

SGC, (2014). Memoria explicativa. Cartografía geológica y muestreo geoquímico de las plancha 197 y 198 – Departamento del Vichada. Bogotá 2014.

Taborda, D. F. (2011). Alternativas para la eliminación de arsénico en lodos y cortes de perforación utilizados en el sector hidrocarburos. Tesis de grado. Facultad de Ingeniería. Instituto de postgrados. Universidad Libre.

Torres, M.C. (2011). Efectos de los ciclos de carga-descarga y humedecimiento –secado en el comportamiento geomecánico de rocas lodosas de los andes colombianos, Bogotá, Colombia.

Tuncan, A., and Koyuncu H. (2000). Use of petroleum contaminated drilling wastes as sub-base material for road construction. Waste Manage Res 2000. Cap 18, pp. 489–505.