

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS



**SIMULACIÓN DE UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO APOYADA EN UNA
SUBRASANTE ARCILLOSA FRACTURADA POR DESECACIÓN. ESTUDIO DE
APLICACIÓN EN VÍAS DE LA SABANA DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ.**

Tesis presentada para cumplir con los requisitos legales para obtener

el Título de Magister en Infraestructura Vial

Autor: Ing. Ender Jhobany Orduz Duarte csv.

Director: PhD. Ing Jorge Arturo Pineda Jaimes

Febrero de 2017

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	11
1.1	INTRODUCCIÓN.....	11
1.2	OBJETIVOS Y ALCANCE GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN.....	14
1.2.1	OBJETIVO GENERAL.....	14
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.2.1	TEMAS QUE SE DESARROLLAN EN LA TESIS.....	15
2.	EL PROBLEMA DE DESECACIÓN DE LAS ARCILLAS.....	18
2.1	INTRODUCCIÓN.....	18
2.2	CONCEPTOS ASOCIADOS A LA DESECACIÓN DE SUELOS.....	19
2.2.1	Capilaridad.....	19
2.2.2	La Relación de Vacíos (e) y su Influencia en el Movimiento del Agua en el Suelo . 22	
2.2.3	Succión Matricial en Suelos Arcillosos.....	25
2.2.4	Desecación de las Arcillas	30
2.2.5	Fracturas de Suelos Arcillosos por Desecación	36
2.3	IMPLICACIONES DE LAS FRACTURAS EN LA ZONA DE ESTUDIO	41
2.4	FACTORES QUE FAVORECEN LA DESECACIÓN	47
2.5	MANIFESTACIONES SUPERFICIALES DE FISURAS POR DESECACIÓN EN SUELOS ARCILLOSOS.....	54
2.6	RESUMEN DEL CAPÍTULO.....	63
3.	EVIDENCIAS DE LA DESECACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO	65
3.1	INTRODUCCIÓN.....	65
3.2	CONDICIONES GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	66
3.3	CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	72
3.3.1	Condiciones Geológicas.....	72
3.3.2	Condición Hidrogeológica de la Zona	77
3.3.3	Condiciones Climatológicas.....	83
3.3.4	Uso del Suelo.....	87
3.4	DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS DE LA REGIÓN.....	90

3.5	RESÚMEN DEL CAPÍTULO.....	97
4.	INFLUENCIA DE LA DESECACIÓN EN ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO	98
4.1	INTRODUCCIÓN.....	98
4.2	DEFORMACIONES DE SUBRASANTES SOBRE SUELOS ARCILLOSOS	101
4.2.1	Origen de Patologías en Estructuras de Pavimento	109
4.2.2	Evidencias de los Deterioros	111
4.2.3	Patologías Visibles en la Rodadura.....	113
4.3	RESUMEN DEL CAPÍTULO	125
5.	MODELAMIENTO NUMÉRICO DE PAVIMENTOS EMPLAZADOS SOBRE SUELOS ARCILLOSOS	127
5.1	INTRODUCCIÓN.....	127
5.2	SELECCIÓN DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN UTILIZADO EN EL TRABAJO 128	
5.2.1	PLAXIS 2D.....	130
5.3	CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	146
5.3.1	Caracterización Visual del Material en Sondeos Previos Sobre la Vía Siberia - Tenjo. 146	
5.3.2	Condiciones de Frontera del Modelamiento de suelo.	152
5.3.3	Modelamiento de las Condiciones Actuales de la subrasante	154
5.4	RESULTADOS DEL MODELAMIENTO DE CONDICIONES IDEALES.....	160
5.5	RESUMEN DEL CAPÍTULO	163
6.	MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE REFORZAMIENTO CON GEOSINTÉTICOS. 164	
6.1	INTRODUCCIÓN.....	164
6.2	DEFINICIÓN DEL MODELO DE ANÁLISIS POR DISEÑO TRADICIONAL DE PAVIMENTOS.	165
6.2.1	Determinación de los parámetros para el diseño tradicional.....	166
	• Tráfico de Diseño.	167
6.3	ANÁLISIS DEL DISEÑO MEDIANTE EL PROGRAMA PLAXIS.	176
6.4	SUBRASANTE FISURADA POR DESECACIÓN.	181
6.5	GEOSINTÉTICOS DE REFORZAMIENTO VIAL.....	186
6.5.1	Geotextiles.....	188
6.5.2	Geomembranas	190

6.5.3	Geomallas Biaxiales.....	191
6.5.4	Geoceldas Triaxiales.....	192
6.6.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL REFUERZO	201
6.6.1.	Reajuste del modelo de análisis	202
6.6.2.	Modelo de prueba bajo condiciones de campo.	209
6.6.3.	Modelo cuando se toa una carga de tráfico en un instante de Tiempo.....	213
7.	CONCLUSIONES.....	217
7.1.	De la Zona de Estudio	217
7.2.	De las Condiciones del Corredor Vial Siberia - Tenjo.	219
7.3.	Del Diseño de Pavimento Realizado.....	220
7.4.	Del Reforzamiento.....	222
7.5.	Del modelo propuesto para las condiciones actuales de la vía.	223
7.6.	Limitaciones encontradas.	224
7.7.	Recomendaciones para futuras investigaciones.....	225
	BIBLIOGRAFÍA.....	227

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2,1** Ascenso capilar del agua en tubos delgados
- Figura 2,2.** Estructura molecular de minerales de las arcillas. (*Tetraedro de Silicio*)
- Figura 2,3.** Variación de la relación de vacíos vs el esfuerzo aplicado en suelos arcillosos
- Figura 2,4.** Representación de los esfuerzos totales en suelos
- Figura 2,5.** Curvas de asentamiento por compresión de arcillas normalmente consolidadas
- Figura 2,6.** Variación del Factor de Intensidad de Fractura
- Figura 2,7.** Relaciones de Esfuerzos Efectivo y Permeabilidad con la relación de vacíos
- Figura 2,8.** Variación de la presión de poros con el abatimiento del nivel freático
- Figura 2,9.** Deformaciones de corte contra relación de esfuerzos
- Figura 2,10.** Fisuras de gran tamaño en región del Estado de Arizona
- Figura 2,11.** Curva característica de Succión Matricial
- Figura 2,12.** Curva de Succión Matricial de la Sabana
- Figura 2,13.** Relación de la succión con los esfuerzos principales y valores de sobreconsolidación
- Figura 2,14.** Mecanismos de falla de suelos cohesivos
- Figura 2,15.** Comportamiento a la compresión de arcillas altamente fisuradas con no fisuradas
- Figura 2,16.** Comportamiento de la relación de vacíos contra los esfuerzos efectivos aplicados a suelos arcillosos
- Figura 2,17.** Relación de Vacíos y Grado de Saturación durante ciclos de succión entre 10 y 800 kPa
- Figura 2,18.** Falla de borde en pavimento en zona de estudio
- Figura 2,19.** Asentamientos diferenciales de calzada de vía en Cra 19 en la ciudad de Bogotá
- Figura 2,20.** Perfil Norte – Sur de la ciudad de Morelia, México

Figura 2,21. Hundimientos en vías por asentamientos diferenciales de la estructura

Figura 2,22. Hundimiento de secciones de pavimento de vía pavimentada

Figura 2,23. Grietas superficiales en suelos arcillosos desecados

Figura 2,24. Asentamientos diferenciales producidos por pérdida de humedad ligada a la succión de las raíces de los árboles

Figura 2,25. Fisuras por pérdida de humedad por extracción mediante pozos en ciudad de México

Figura 2,26. Fisuras ocasionadas por succión radicular al suelo

Figura 2,27. Postes eléctricos inclinados por fallas en el suelo de emplazamiento

Figura 3,1. Configuración geológica de la Sabana de Bogotá

Figura 3,2. Vista satelital de la zona de estudio

Figura 3,3. Esquema estructural de fallas de la Sabana de Bogotá

Figura 3,4. Corte estratigráfico de la Sabana de Bogotá

Figura 3,5. Distribución de la Precipitación para Colombia

Figura 3,6. Corte B-B' del mapa Hidrogeológico en la cuenca del río Subachoque

Figura 3,7. Mapa de zonas críticas de Pozos de Extracción de agua

Figura 3,8. Distribución de temperaturas máximas, medias y mínimas mensuales en la sabana de Bogotá

Figura 3,9. Fracturas en suelos arcillosos

Figura 3,10. Plantaciones de árboles como cercado en la zona de estudio

Figura 3,11. Estrato de subrasante en km 11, sentido NW-NE

Figura 3,12. Impacto de la desecación en postes de energía eléctrica

Figura 3,13. Grados de saturación de los sondeos

Figura 4,1. Modelamiento de pavimentos reforzados con geomallas

Figura 4,2. Esfuerzo normal σ y esfuerzo cortante τ para capas de arcilla no reforzada

Figura 4,3. Esfuerzo normal σ y esfuerzo cortante τ para capas de arcilla reforzada

Figura 4,4. Asentamientos modelados para refuerzos en suelos blandos

Figura 4,5. Posicionamiento del plato de pruebas en tramo de prueba

Figura 4,6. Comportamiento de asentamientos y tensiones en pruebas de campo para sensor de pruebas

Figura 4,7. Variación de las deformaciones medidas en la superficie de cada capa antes y después del reforzamiento

Figura 4,8. Relación de altura capilar respecto a la profundidad de la muestra

Figura 4,9. Relación de presencia de árboles respecto a las fallas en pavimento

Figura 4,10. Falla de Pavimentos en Media Luna

Figura 4,11. Fisura de Borde en Pavimento sin Berma

Figura 4,12. Falla por Hundimiento de una región de vía

Figura 4,13. Falla por Abultamiento ocurrida en la región de la Sabana de Bogotá

Figura 5,1. Modelo idealizado del comportamiento elastoplástico perfecto de un material

Figura 5,2. Modelo General de esfuerzos tridimensionales en una partícula de suelo

Figura 5,3. Modelo gráfico del Círculo de Mohr

Figura 5,4. Definición del E_0 y el E_{50} para pruebas triaxiales estándar

Figura 5,5. Descripción del perfil de suelo a 20 metros de profundidad en la zona de estudio

Figura 5,6. Ubicación de las muestras en la carta de plasticidad

Figura 5,7. Caracterización de materiales de la zona

Figura 5,8. Perfil de simulación de material por debajo de estructura del pavimento

Figura 5,9. Esquema de variación del modelo de simulaciones

Figura 5,10. Comportamiento de las desplazamientos verticales en el centro de la estructura de pavimento

Figura 5,11. Deformaciones verticales en la superficie del pavimento

Figura 6,1. Comportamiento del tráfico en estaciones de la región de la sabana

Figura 6,2. Ajuste lineal del comportamiento del tráfico

Figura 6,3. Modelo de estructura diseñada de pavimento en Subrasante continua

Figura 6,4. Comportamiento de las desplazamientos verticales por sobrecarga

Figura 6,5. Comportamiento de las desplazamientos totales

Figura 6,6. Distribución de esfuerzos por estructura del pavimento

Figura 6,7. Modelo de material con estratos fisurados arriba del NF

Figura 6,8. Puntos de Plastificación de uno de los modelos

Figura 6,9. Modelos de falla de material fisurado

Figura 6,10. Distribución de esfuerzos en las columnas de arcilla

Figura 6,11. Instalación de Geotextil en zona vial

Figura 6,12. Geomembrana instalada en obra vial

Figura 6,13. Vía reforzada con geomalla

Figura 6,14. Geoceldas para reforzamiento de vías

Figura 6,15. Deformaciones verticales en la carpeta de rodadura

Figura 6,16. Deformaciones totales en el esquema modelado

Figura 6,17. Modelo gráfico reemplazando peso de estructura por cargas

Figura 6,18. Comparativo de deformaciones en modelo de estructura no reforzada y reforzada con Geoceldas

Figura 6,19. Desplazamientos el eje en superficie de estructura sin reforzar

Figura 6,20. Relación de deformaciones en el eje en superficie reforzada

Figura 6,21. Comparativo de desplazamientos en el eje de la vía

Figura 6,22. Perfil de Apique realizado en campo

Figura 6,23. Perfil de estratigráfico de quinto sondeo de suelos

Figura 6,24. Desplazamientos verticales nivel de junta subrasante subbase con modelo real ajustado

Figura 6,25. Esfuerzos por cargas debidas al peso de un camión

Figura 6,26. Deformaciones superficiales debidas al peso de un camión

Figura 6,27. Comparativo de deformaciones superficiales debidas al peso de un camión

Figura 6,28. Comparativo de deformaciones en columnas debido a carga de camión

LISTA DE TABLAS

- Tabla 3,1.** Leyenda del Mapa Hidrogeológico de la Sabana de Bogotá
- Tabla 3,2.** Temperaturas máximas promedio en la región
- Tabla 4,1.** Tipos de patologías en Pavimentos Flexibles
- Tabla 4,2.** Rangos de evaluación de pavimentos por PCI
- Tabla 5,1.** Caracterización de material a diferentes profundidades en la muestra 1
- Tabla 5,2.** Caracterización de material a diferentes profundidades en la muestra 2
- Tabla 5,3.** Parámetros iniciales del material de campo
- Tabla 6,1.** Tráfico Promedio Diario de estación 753 (Cajicá – Tabio)
- Tabla 6,2.** Comportamiento anual de estaciones de aforo en la región de la Sabana.
- Tabla 6,3.** Tráfico Promedio Diario Ajustado 2016 de estación 753
- Tabla 6,4.** Proyección de ejes equivalentes al periodo de diseño
- Tabla 6,5.** Coeficientes de drenaje m
- Tabla 6,6.** Resultados de análisis racional en DEPAV del pavimento diseñado
- Tabla 6,7.** Condiciones de material de prueba
- Tabla 6,8.** Valores del Factor de Modificación de Módulo (MIF)

RESUMEN

El documento contiene el producto de la investigación de simulación numérica usando Plaxis 2D, del reforzamiento de una estructura de pavimento diseñada para la zona de estudio en el corredor vial que comunica el sector de Siberia en el Municipio de Cota con el Municipio de Tenjo en Cundinamarca; zona afectada por desecación de suelos y cuya estructura de pavimento se encuentra emplazada en subrasantes arcillosas fisuradas por desecación. Se encuentra que el reforzamiento propuesto en el modelo de simulación mediante geoceldas, favorece a la estructura en general debido a que los resultados manifiestan que se mitigan los desplazamientos verticales en la superficie de rodadura con diferentes tipos de grietas posibles existentes. De la misma manera el modelo arroja reducción en las deformaciones horizontales en superficie lo que supone una estructura más resistente y con una vida útil más larga, lo que favorece la mitigación de costos en mantenimiento correctivo en el tiempo para una vía emplazada en suelos con la problemática estudiada.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

En la infraestructura vial se tienen en cuenta aspectos muy importantes para el desarrollo económico de una región, y con ello, las condiciones necesarias y las deseables con las que esta logre la competitividad y las posibilidades para el logro de los objetivos económicos propuestos para dichas regiones. Es por ello que se deben tener vías en buenas condiciones, dado que favorece además de la movilidad, el desarrollo social y económico del sector; sin embargo, cuando las vías presentan patologías superficiales tales como fisuras, hundimientos u otro tipo de falla, se pierde nivel de servicio, la vía se hace más lenta y esto redundará en problemas de accidentalidad, demoras en la movilidad y pérdidas económicas para los usuarios.

Para garantizar un adecuado nivel de servicio, es necesario tener unas buenas condiciones para que los vehículos se movilicen de un lugar a otro sin obstáculos que reduzcan los tiempos de recorrido; por ello se recomienda que la vía tenga los anchos suficientes de carril para la movilidad libre de acuerdo con los diseños, del mismo modo y como disposiciones de tránsito, la vía debe contar con una superficie llana y uniforme para la rodadura adecuada de los vehículos y la comodidad de los usuarios al conducir (Bañón y Beviá, 2000)

La zona occidental de la sabana de Bogotá, presenta problemas de movilidad, debidos a fallas diversas que se identifican en la superficie de los pavimentos flexibles construidos en la zona y que dejan ver la incidencia de la pérdida de continuidad de la subrasante de la vía; este fenómeno ocurre por la pérdida de humedad progresiva que tiene lugar a causa de la desecación de suelos arcillosos. Asentamientos diferenciales, hundimientos, fracturas en los extremos del pavimento y en ocasiones fallas completas en la estructura del pavimento, son entre otras, algunas de las patologías que se perciben en las vías de esa zona de la Sabana de Bogotá (Pineda y García, 2014).

En la zona de estudio se identifican problemas asociados al colapso de estructuras livianas y pavimentos, debidos a procesos de fractura de las arcillas en algunos sitios en particular de los municipios de Cota, Tenjo y Funza; desde el punto de vista técnico, la intervención que se realiza en los sitios en los que se evidencian problemas de esta índole, generalmente no solucionan el fenómeno y el tratamiento suele ser oneroso (por ejemplo inyecciones de cal o aceite sulfonado, acompañadas de rehabilitaciones locales (Rueda, 2012), por tal motivo se hace relevante buscar alternativas o métodos de rehabilitación prácticos que puedan ser implementados para dar solución a este tipo de inconvenientes (Pineda y Auvinet 2013) (Vesga et al. 2002).

El estudio de estos fenómenos ha sido evaluado por diferentes investigadores, y han llevado a la identificación de posibilidades de estabilización o cambio de las condiciones tales como las inyecciones de material estabilizante que puedan mejorar la calidad del material de la subrasante de las carreteras emplazadas en suelos arcillosos con características altamente cohesivas; sin embargo, como las fisuras del material se presentan normalmente desde el nivel freático, las profundidades de las grietas pueden ser tan profundas que el costo de las inyecciones de lechadas vuelvan inviable su aplicación en proyectos de infraestructura vial; además, dichas inyecciones no solucionan el problema de fisuramiento de los materiales arcillosos puesto que cuando el material se sature nuevamente en la temporada de lluvias y retorne el tiempo seco se van a generar nuevas grietas por pérdida de agua de la matriz de suelo (Pineda y García, 2014).

El trabajo de grado busca, a partir de una caracterización geotécnica del subsuelo de la zona de estudio que ya ha sido realizada recientemente en el marco de un proyecto de investigación desarrollado en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás en 2014, y de otros resultados de reconocida confiabilidad, plantear un modelo numérico mediante un programa que facilite la ejecución de una simulación del comportamiento para predecir, mediante un primer acercamiento, el comportamiento en términos de

deformaciones de una estructura tipo de una vía apoyada sobre una subrasante fisurada, con inclusión de geosintéticos como refuerzo.

La simulación se realizará empleando las propiedades mecánicas establecidas a partir de ensayos de campo y laboratorio obtenidos en el proyecto de investigación mencionado anteriormente, empleando modelos constitutivos tipo *Mohr-Coulomb* y *Strain-Hardening*, en un programa de elementos finitos. Inicialmente se calibra el programa con las condiciones del terreno de acuerdo con las características determinadas de los materiales de la zona y las variaciones de la profundidad del nivel freático y profundidades de grietas encontradas en la zona de estudio.

Posteriormente se realiza un modelamiento de posibles mecanismos de falla encontrados en condiciones de simetría, colocando las condiciones de una estructura típica de pavimento para la zona de acuerdo con las características del sector de la vía que comunica a la vereda de Siberia con el municipio de Tenjo en la Sabana del Occidente de la ciudad de Bogotá. Identificadas las deformaciones que demuestra tanto en las columnas de material como en la superficie de la estructura del pavimento, se modela la colocación de un Geosintético que permite reforzar el material de base granular mejorando el módulo Elástico de la estructura e identificando nuevamente el comportamiento tanto en la subrasante como en la superficie de la estructura.

El objeto del presente trabajo es identificar la influencia de la colocación de reforzamiento de estructuras de pavimento flexible en las capas granulares reforzadas con geosintéticos. Los resultados obtenidos dan origen a la identificación de mecanismos de mejoramiento de la vida útil de pavimentos emplazados en subrasantes activas que demuestran fenómenos de expansión y contracción y que en el tiempo van a presentar múltiples variaciones en su estabilidad por efecto de los procesos de desecación.

1.2 OBJETIVOS Y ALCANCE GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Simular la incidencia del uso de geosintéticos como elementos de refuerzo de la estructura de un pavimento flexible apoyada sobre una subrasante fisurada.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las características mecánicas del material arcilloso que compone el suelo de subrasante de las vías localizadas al occidente de la sabana de Bogotá.
- Modelar mediante un programa de elementos finitos las condiciones de operación de las vías considerando las condiciones de fractura que presenta la zona por efecto de la pérdida de humedad del suelo.
- Determinar las deformaciones de la estructura del pavimento flexible a través de un programa de elementos finitos, empleando un modelo M \ddot{o} hr-Coulomb para los materiales involucrados en la problemática.
- Presentar los resultados relacionados con la inclusión de las geosintéticos en la estructura de pavimento en términos de deformaciones, como un estudio para la inclusión de geosintéticos como alternativa de rehabilitación de pavimentos flexibles.

El presente trabajo de grado busca aportar al conocimiento de la Ingeniería Vial con mecanismos útiles que permitan identificar las posibles situaciones que pueden ocurrir en vías emplazadas sobre subrasantes fisuradas por efecto de la desecación de suelos arcillosos que se han visto sometidos a largos períodos de sequía o al abatimiento del nivel freático por causas antrópicas especialmente en el occidente de la sabana de Bogotá.

Se realizó una revisión detallada en la que se identifican las causas del abatimiento del nivel freático y las consecuencias que ello acarrea en suelos

arcillosos, así como las implicaciones que se han evidenciado en campo por la pérdida de la continuidad de la subrasante de las carreteras de la zona, la formación de columnas de material arcilloso y las inestabilidades producidas en el momento de la falla de dichas columnas de material. La investigación parte de estudios previamente desarrollados en la zona de estudio y se generan los modelamientos matemáticos en el programa Plaxis 8,5, del cual se extraen las posibles repercusiones que se pueden dar en la estructura de pavimento con la que se cuenta en las vías de la zona.

Se realizó una serie de modelamientos simétricos en términos geométricos y de carga, en los que se analizó el comportamiento del suelo especialmente en la zona de arcillas preconsolidadas por desecación del suelo y en la superficie de rodadura de las zonas en las que las fallas son percibidas. Se modeló además el comportamiento usando un geosintético de reforzamiento, lo que permitió identificar las variaciones en las deformaciones verticales y horizontales en la zona de subrasante fisurada, así como en la superficie de la rodadura, de manera que se pueda comparar las variaciones que mejoran la calidad del pavimento y con ello la durabilidad que se refleja en vida útil del pavimento y mejores niveles de servicio para la movilidad en la zona. Todas las pruebas correspondieron a cargas estáticas por estructura y no se tuvieron en cuenta para la presente investigación las cargas dinámicas debidas a los camiones.

1.2.1 TEMAS QUE SE DESARROLLAN EN LA TESIS

En este apartado se describen en términos muy generales el contenido de cada uno de los capítulos del presente documento en el que se recoge el producto de la investigación realizada.

Capítulo 1. Muestra el contexto del documento a manera de introducción general en la que se incluyen los objetivos y el alcance del proyecto de manera implícita.

Capítulo 2. Presenta un marco conceptual del problema de la desecación de las arcillas y las repercusiones que esto tiene en los pavimentos, en él se describen algunas implicaciones y factores que inciden en el proceso de desecación y fractura de los suelos arcillosos, así como la importancia del estudio en la problemática de la movilidad.

Capítulo 3. Contiene una caracterización general de la zona de estudio sobre la que se han adelantado previas investigaciones del fenómeno de fracturas por desecación. Se describen los factores que afectan en la región de la sabana del occidente de Bogotá, la conformación geológica y los factores que afectan la región y que hacen que el problema de la desecación en este sector de la sabana sea el referente para el estudio.

Capítulo 4. Muestra un compilado de las mayores implicaciones que tiene en los pavimentos flexibles el tener subrasantes fisuradas. Se describen las patologías que se han encontrado en la zona de estudio y cuáles de ellas se pueden asociar al proceso de fractura de la subrasante por desecación.

Capítulo 5. Presenta el modelamiento matemático usando el programa Plaxis 8,5 con materiales caracterizados en la zona de estudio. En este apartado se identifica el modelamiento mediante el Plaxis y las características de análisis que se tienen en cuenta para el modelamiento matemático usado como referente en la zona de estudio.

Capítulo 6. Contiene el modelamiento realizado para la zona; en este se realiza un diseño estructural de pavimento para las condiciones de la zona de estudio, el análisis numérico de dicha estructura diseñada y su comportamiento en subrasante fisurada con parámetros de separación de fisuras y de profundidad de las mismas variable, la toma de resultados en los dos modelos, sin reforzamiento y reforzadas, el análisis y la discusión de dichos resultados a la luz de las condiciones que se pueden identificar en el sitio y la modelación para la condición real de la zona.

Capítulo 7. Contiene las conclusiones que se logran de los resultados obtenidos como producto de la investigación; del mismo modo se presentan las limitaciones con de la investigación y con ello el rumbo que orienta las recomendaciones que se ofrecen para la comunidad de ingeniería y para la ciencia en términos de los análisis desarrollados para futuras investigaciones.

2. EL PROBLEMA DE DESECACIÓN DE LAS ARCILLAS

2.1 INTRODUCCIÓN

La pérdida de humedad en suelos arcillosos ha sido uno de los temas que han tenido gran importancia en el contexto del análisis geotécnico y las repercusiones que este fenómeno genera en los diversos tipos de proyectos de construcción desarrollados; las edificaciones, la infraestructura vial, las cimentaciones, y en general casi toda obra que se instale sobre suelos arcillosos que presentan reacciones sustanciales por efecto de la humedad del suelo, deben ser analizados debido a los cambios volumétricos que se generan y los efectos que ocasionan en las obras (Vesga *et al.* 2002), (Pineda y Arias, 2014).

En la ciudad de Bogotá así como en algunas poblaciones del occidente de la sabana, los proyectos de construcción suburbana y rural y gran parte de la infraestructura vial que comunica a la capital con dichos municipios, se encuentran emplazadas en terrenos arcillosos de gran profundidad; estos en la medida en la que pierden humedad por efectos naturales o inducidos, van presentando asentamientos cuando hay pesos suficientes para comprimir el suelo de soporte, como es el caso de algunos edificios; sin embargo, cuando se encuentra el material expuesto a cielo abierto, los fenómenos de desecación natural o inducida se aceleran, lo que hace que las fuerzas de succión matricial que se presentan en el material, se reflejen en la superficie con fracturas del suelo y daños en las obras por los cambios volumétricos diferenciales.

El presente capítulo muestra el problema de la desecación de suelos y las repercusiones en las arcillas, además se señalan algunos fenómenos en los que es fácilmente verificable que la desecación se produzca de modo acelerado o que agilizan esta condición, además de mostrar algunos aspectos que evidencian las complicaciones en el material por la desecación acelerada de los suelos arcillosos

y la forma como este fenómeno impacta a la infraestructura vial, haciendo alusión especial y directa a la zona de estudio.

2.2 CONCEPTOS ASOCIADOS A LA DESECACIÓN DE SUELOS

La desecación de los suelos es un fenómeno normal que ocurre en todos los tipos de material y se encuentra ligado al ciclo del agua en el planeta; el agua por sus características tiene un flujo que hace que por procesos naturales o artificiales, ésta se mueva dentro o hacia afuera de la matriz de material que se encuentra en un sitio determinado; es por ello que analizar las condiciones del material y los fenómenos de salida del agua del mismo es muy importante para la comprensión clara de un fenómeno como es el caso de la desecación de suelos arcillosos y sus afectaciones (Rueda, 2012).

2.2.1 Capilaridad

La tensión superficial del agua como propiedad que le permite que las moléculas sean atraídas entre sí, favorece el acomodamiento de esta en gotas que hacen que siendo un fluido, sus partículas se mantengan unidas; debido a dicha tensión superficial y a la atracción de las moléculas iguales por cohesión y a las fuerzas de adhesión a moléculas de otro material, el agua ejerce esfuerzos en las paredes de donde están contenidas. En la medida en que los espacios son más delgados, la fuerza ejercida por la tensión superficial es mayor y se presenta el fenómeno de la capilaridad (Duque y Escobar 2002). De esta manera se define la capilaridad como la propiedad de los líquidos que por la tensión entre sus moléculas permite que éstos asciendan dependiendo de los canales formados en los que se contiene el agua; en la Figura 2,1 se muestra el proceso interno en el que se describe la capilaridad del fluido tipo agua en los tubos capilares, en ella h corresponde a la altura de ascenso del agua en el tubo capilar debido a la tensión entre las

partículas, θ es el ángulo que se forma en la superficie del agua al interior del tubo capilar y se encuentra estrechamente relacionado con el diámetro del ducto al igual que la altura, puesto que a menor diámetro de los tubos de ascenso, mayores son las fuerzas que se ejercen y la altura lograda en el ducto.

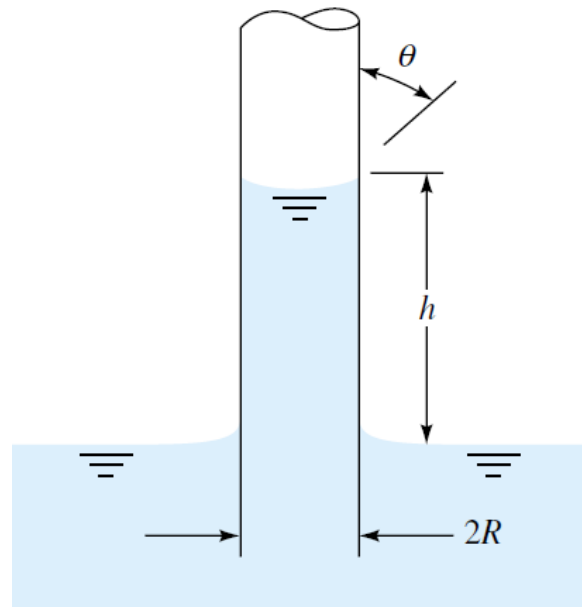


Figura 2,1 Ascenso capilar del agua en tubos delgados (White 1999).

Los suelos de grano fino en condiciones normales por efecto de su conformación en su historia geológica, en estado natural en el ambiente están húmedos a saturados debido a que clásicamente son de tipo lacustre; dependiendo de la cantidad de agua subsuperficial presente en el sitio del depósito de suelo se puede conocer su grado de saturación. El suelo arcilloso tiene partículas con una estructura laminar y de composición química fácilmente reactiva al contacto con el agua, además de una distribución granulométrica muy fina. Las composiciones típicas de las arcillas son silicio, aluminio, oxígeno e hidrógeno en diferentes proporciones, así como otros minerales en menores cantidades, son comprendidas entre los silicatos que son la mayoría de los minerales que comprenden la corteza terrestre (Domínguez y Schifter 1992). La Figura 2,2 muestra la estructura molecular de un material arcilloso típico en la configuración de las arcillas.

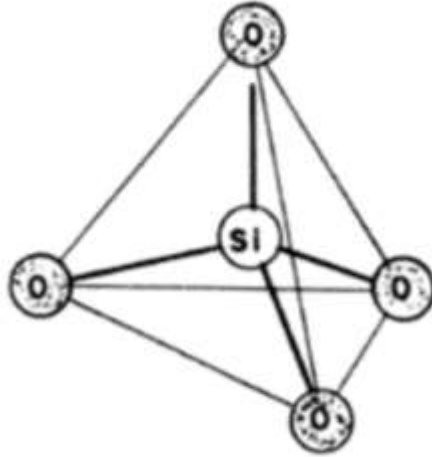


Figura 2,2. Estructura molecular de minerales de las arcillas. (*Tetraedro de Silicio*) (Domínguez y Schifter 1992)

Estos suelos finos por su formación física, química y mineralógica, se contraen al secarse y se expanden en la medida en la que se humedecen o se llenan de agua. Dependiendo de la composición mineralógica y de la distribución granulométrica, es que los materiales arcillosos son más o menos reactivos por la acción del agua en el depósito. La capilaridad del agua en el suelo fino por efecto del ascenso del agua y la tensión entre las partículas del fluido, genera presiones de succión cuando no hay saturación total y la presencia de vacíos que contienen aire en los ductos o tubos capilares que se intercomunican y tienen contacto con la presión atmosférica normal, hacen que las presiones por efecto de la tensión superficial del agua sea significativa (Rizalez y González, 2011). La succión es entonces la fuerza que se ejerce a las partículas de suelo que por efecto de las tensiones que se producen en el agua y de esta con las paredes de los tubos capilares, lo que ocasiona esfuerzos adicionales a los esfuerzos normales del suelo; estos son los que en la bibliografía existente se conocen como los estados de esfuerzos de suelos no saturados (Vanapalli *et al*, 1996).

Las presiones capilares o presiones de succión de poros actúan en el suelo dependiendo de la localización del nivel freático y de las condiciones de estabilidad o de flujo del agua en el suelo. Cuando este se satura las presiones

hidrostáticas ejercen un esfuerzo en la matriz general de material por efecto del peso del agua, dado que todos los vacíos en el suelo son ocupados por el agua; en la parte más alta del nivel de saturación, las presiones pueden tender a cero como se estudia en la mecánica clásica de suelos y que se compagina con la mecánica de fluidos; por encima del nivel de agua en condiciones normales, se presentan presiones de succión que hacen que el agua vaya ascendiendo por los ductos de acuerdo con el principio de capilaridad propuesto por Bernoulli en 1738, y estas presiones que se ejercen en los tubos capilares formados son negativas dada la tensión superficial que el agua ejerce, que tienden a contraer el material en el depósito, lo que hace que se produzcan esfuerzos en la matriz de suelo fino que llevan incluso a la fractura de los estratos material de suelo en general (Dorronsoro, 2015).

2.2.2 La Relación de Vacíos (e) y su Influencia en el Movimiento del Agua en el Suelo .

La relación de vacíos (e), es una característica del suelo que se determina por la fase sólida y la fase de vacíos en una matriz determinada del material. Cuando se tiene un volumen determinado de suelo, este generalmente lo configura material sólido, agua, aire y algunos gases atrapados; lo que se conoce como relación de vacíos es la relación matemática entre el volumen de vacíos (espacios que se encuentran entre las partículas sólidas y que son llenadas por los fluidos mencionados) y el volumen total del suelo analizado (Terzaghi, 1936).

Los espacios vacíos que se encuentran en el suelo dependen de la forma y tamaño de las partículas que lo componen, en la medida en la que los vacíos son mayores, la posibilidad de deformación de la matriz de material es mayor debido al posible acomodamiento, sin embargo, cuando se habla de suelos finos, el concepto de vacíos existentes marcan un parámetro importante de valoración y la forma como están llenos estos vacíos es importante para definir el

comportamiento presente en el suelo en cada punto. Como se mencionaba en el apartado anterior, los espacios que se encuentran parcialmente saturados (agua y aire) presentan esfuerzos normales por efecto del material y de succión por acción del agua, pero los suelos que están totalmente saturados permiten identificar únicamente esfuerzos normales por acción de las partículas y del agua.

Los espacios vacíos que se encuentran llenos de aire o agua en el suelo, en la medida en la que pasa el tiempo o se imponen cargas, se van cerrando lentamente lo que hace que el suelo se compacte, y en el caso de las arcillas, que se contraiga incluso hasta la fractura. La succión del suelo ocasionada por los esfuerzos de tensión interna generados por el agua, ocasionan contracción en los suelos arcillosos, lo que lleva a que el material cambie en su configuración inicial y las sobrecargas impuestas favorecen la falla del material. La figura 2,3 muestra diferentes variaciones de la relación de vacíos en el suelo encontrados en pruebas de laboratorio en las que se deja ver el comportamiento casi lineal de un suelo arcilloso sometido a cargas y la tendencia de disminución de los espacios vacíos con el incremento de los esfuerzos aplicados en el material. Esto permite identificar que a medida que se carga un suelo, este se deforma debido a que la relación de los vacíos presentes disminuye. Si se visualiza de otra forma, los asentamientos verticales o deformaciones tridimensionales en suelos arcillosos, pueden conducir a la falla del mismo es lo que evidencia los cambios volumétricos por sobrecargas puestas en los suelos y esfuerzos internos de succión que reacomodan las partículas.

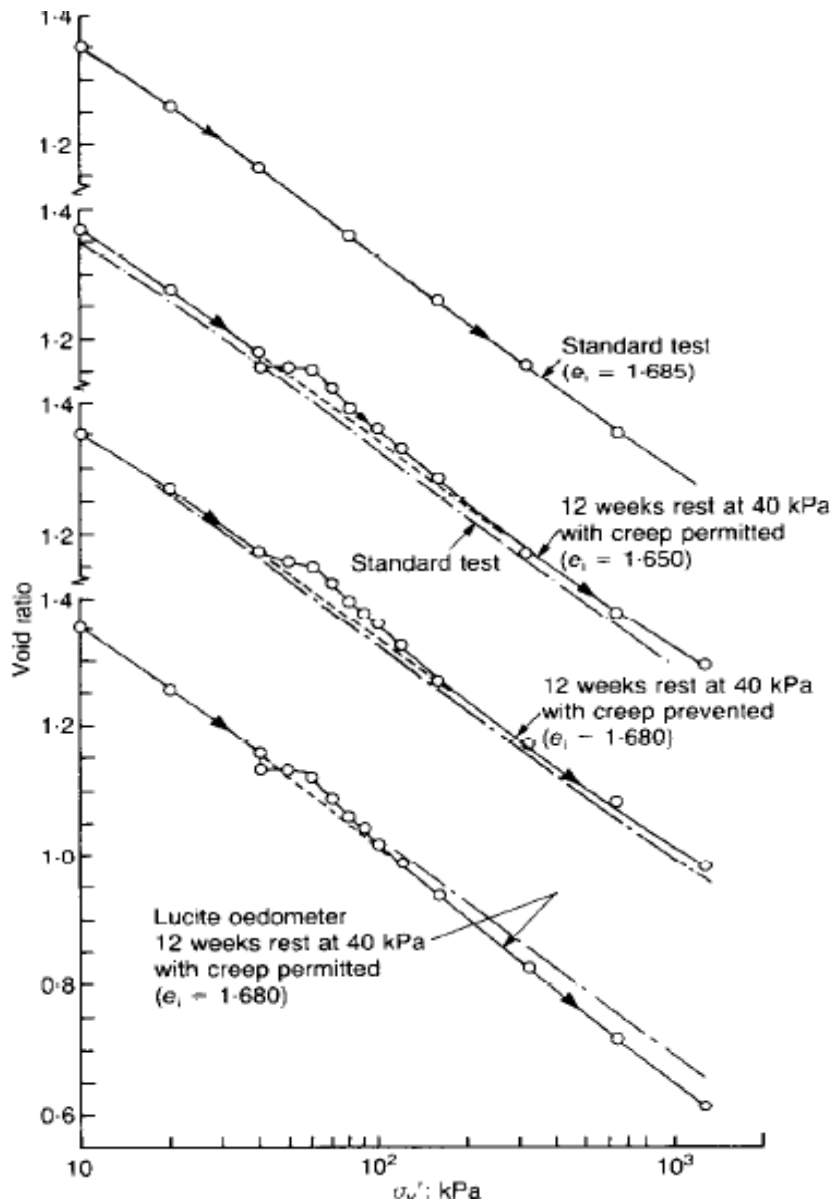


Figura 2,3. Variación de la relación de vacíos vs el esfuerzo aplicado en suelos arcillosos (Burland 1990).

Durante las temporadas secas o de verano, las condiciones atmosféricas hacen que parte del agua presente en el suelo comience a evaporarse; los esfuerzos de succión internos hacen que tanto el peso propio como la acción misma de la succión generen esfuerzos internos que busquen contraer las partículas de material y juntarlas entre sí; las partículas se adhieren y con ello vienen las variaciones de volumen del material arcilloso son fácilmente perceptibles. Perón *et*

al. (2009), mencionan los fenómenos ocurridos durante el proceso de secado de las arcillas por efecto de la acción del ambiente y de fenómenos adicionales que favorecen la pérdida de agua, el endurecimiento del suelo que se deseca y la contracción de la matriz de material que desencadena la aparición de fisuras desde la superficie hasta el nivel del estrato saturado bajo el nivel freático. No todas las arcillas tienen comportamientos semejantes, sin embargo se conserva un patrón que varía de acuerdo con la minerología de los bancos de material, así como de los cambios en las condiciones del entorno.

2.2.3 Succión Matricial en Suelos Arcillosos.

La Mecánica de Suelos clásica propuesta por Terzaghi, plantea que los esfuerzos totales corresponden a los ejercidos por el suelo en condiciones de estabilidad por la fase sólida, adicionados a los que ejerce el agua en condiciones de saturación cuando son analizados por debajo del nivel freático. En la Figura 2,4 (Leal *et al*, 2013) muestran un modelo gráfico modificado de los esfuerzos totales en suelos por efecto del peso del material y la acción de los esfuerzos del agua, además de reacciones diferentes tales como la cohesión del material y la dilatación del mismo. Cuando el material se encuentra total o parcialmente saturado, los esfuerzos de succión por encima del nivel freático, hacen el agua contenida en los tubos capilares genere presiones que en modelamiento se proponen como homogéneas e internamente se tienen como presiones de tensión.

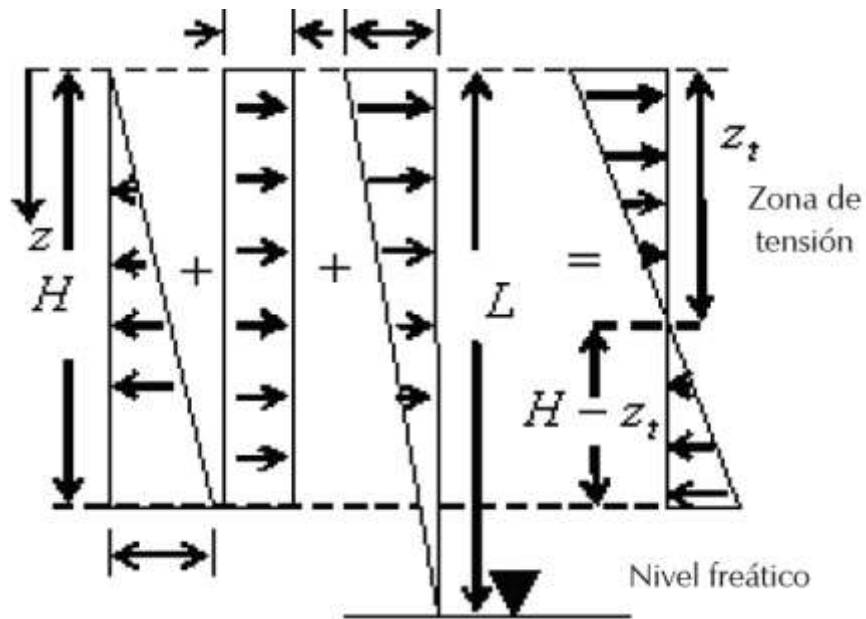


Figura 2,4. Representación de los esfuerzos totales en suelos (Leal *et al*, 2013).

Los esfuerzos efectivos deben ser soportados por las partículas de material a diferentes profundidades; estos esfuerzos están comprendidos por los esfuerzos normales del suelo; cuando se el nivel freático cerca de la superficie, los esfuerzos totales en el suelo comprenden los efectivos sumados con la presión del agua a la profundidad determinada por debajo del nivel freático. Para la condición de suelos no saturados, no es posible esclarecer una ecuación que sea útil para todos los tipos de suelos, dado que las condiciones de succión que se producen en el material por acción del agua como presión de poros no es fácilmente verificable, Bishop (1959) propuso una ecuación para el parámetro (α), con la que se pueden acercar datos de presiones a diferentes alturas arriba del nivel freático, sin embargo esta ecuación no se puede usar en todos los tipos de suelos, puesto que las condiciones de succión varían de un material a otro (Leal *et al*, 2013).

Burland (1990) realiza una serie de análisis que permite correlacionar la variación volumétrica en términos de los esfuerzos efectivos de sobreconsolidación en suelos junto con la relación de vacíos que presentan los materiales arcillosos que son sometidos a la pérdida de humedad dependiendo de su comportamiento. Burland referencia al trabajo desarrollado por Skepmton (1970), en el que toma

una serie de datos que permiten correlacionar la relación de vacíos de algunos materiales con los esfuerzos en ellos manifestados.

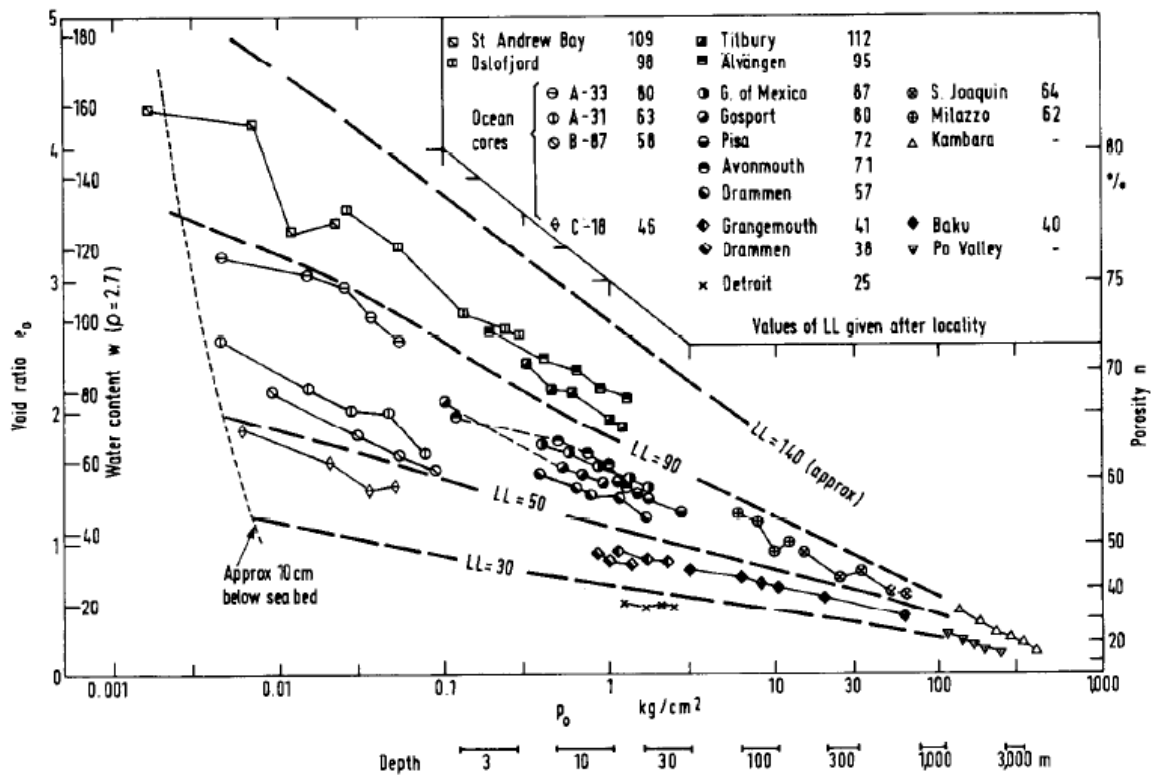


Figura 2,5. Curvas de asentamiento por compresión de arcillas normalmente consolidadas (Skempton 1970).

La Figura 2,5 presenta parte de los resultados logrados en el trabajo de Skempton donde se fundamentan los análisis desarrollados por Burland para encontrar las relaciones directas que se presentan entre la relación de vacíos de un material arcilloso con las cargas soportadas a diferentes profundidades.

Burland propone que las relaciones volumétricas del material es posible identificarlas y relacionarlas desde diferentes pruebas como los límites de Atterberg; dichas pruebas permiten identificar las condiciones que muestra el material con el efecto del agua en el suelo arcilloso, de la misma manera, las pruebas presentadas dejan ver la relación de variación de volumen respecto a cargas aplicadas en la muestra de suelo a diferentes profundidades, de manera que para suelos que pierden humedad, especialmente el caso de suelos

cohesivos, los suelos se reacomodan y la relación de vacíos se hace variable, cosa que también sucede con la aplicación de cargas en suelos que son drenados por efecto del peso. Partiendo de la relación de salida de agua con los cambios volumétricos, Skempton somete a pruebas, arcillas de diferentes características tomadas en muestras en diversos lugares, desarrollando para cada muestra una serie de ensayos de laboratorio y pruebas edométricas para identificar sus propiedades, las variaciones volumétricas que se presentan en las pruebas dan luces para identificar el comportamiento interno de suelo y las reacciones dadas cuando se llenan los espacios vacíos del suelo..

En los análisis se percibe la manera en la que se toman las pruebas a diferentes profundidades y su relación con el límite líquido del suelo en cada profundidad. Estas correlaciones permiten identificar un comportamiento lineal ligado al decremento de la relación de vacíos del suelo sometido a las pruebas de laboratorio. Las diferentes líneas permiten identificar las profundidades en las que se analizan las pruebas en el laboratorio y los valores de e en cada una de ellas, de la misma forma se relacionan con la porosidad y el contenido de agua, de manera que se tienen entonces para los tipos de suelo analizados, las condiciones en profundidad de cada material.

La reducción de los vacíos se produce por el reacomodamiento de las partículas que se da en el caso de las arcillas, con el incremento de los esfuerzos en suelos, lo que hace que los espacios que estaban llenos de agua o aire se van reduciendo y el volumen total de suelo disminuye en la medida en la que los fluidos son drenados. La disminución en el volumen de suelo por asentamientos verticales (subsistencia), y los esfuerzos verticales y horizontales ejercidos en la parte superior del nivel freático ocasionados por la succión matricial, conllevan a la pérdida de la estabilidad con la que el suelo cuenta en condiciones iniciales.

Debido a la distribución granulométrica de las arcillas, se presentan mayores o menores esfuerzos de succión matricial por la pérdida de agua; en pruebas desarrolladas en laboratorio por Miller *et al.* (1995), se describen las características de generación de las grietas de modo preferente en un primer ciclo

de secado y en la primera fase donde se presentan los mayores esfuerzos ocurridos por la pérdida rápida de agua de la matriz de suelo. El modelo sometido a pruebas de laboratorio describe la aparición acelerada de fisuras la arcilla por efecto de las temperaturas que evaporan rápidamente el agua y la succión que hace que las partículas se agrupen. La Figura 2,6 muestra los resultados obtenidos en las pruebas de humedecimiento y secado de un material arcilloso en laboratorio realizado, donde se describe el factor de Intensidad de la fractura (CIF), en relación con el tiempo de secado y las presiones de succión.

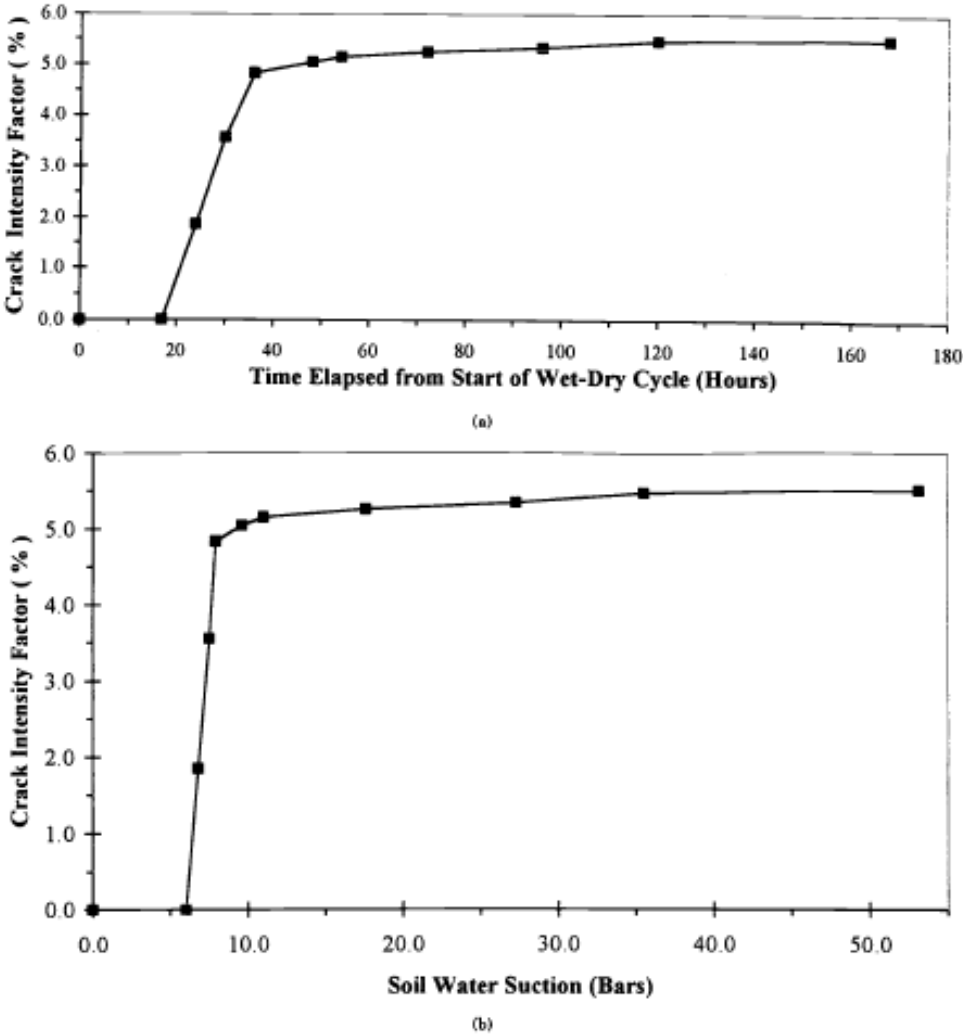


Figura 2,6. Variación del Factor de Intensidad de Fractura (Miller, Mi y Yesiller 1998).

De las pruebas desarrolladas por Miller *et al.* (1995), se puede verificar que la presión de succión ocurrida en el suelo, incrementa el factor de generación de las fisuras en el material tipo arcilloso analizado, y este tiende a estabilizarse cerca a los 10 bares de presión; esto implica que corresponde al proceso de secado en el primer ciclo; posteriormente los humedecimientos y secados que se inducen en las muestras, permiten ver que se presentan una condición preferente, lo que hace que las variaciones de la presión no modifiquen en gran medida el factor de generación de fisuras. De este modo se describe el CIF, como el factor mediante el que se mide el porcentaje de intensidad de las fracturas que se puedan ocasionar en un suelo en desecación, dependiendo del tiempo de secado y de las presiones de succión ejercidas en el suelo como acción del agua en proceso de ascenso.

Las pruebas desarrolladas dejan ver que las fisuras en los suelos dependen especialmente de los esfuerzos que se ejercen internamente por la succión ocurrida en los materiales finos debidos a la pérdida de humedad. Dichos esfuerzos se relacionan especialmente con la capilaridad del suelo por los finos ductos que se forman debido al tamaño de partículas y la tensión del agua en su interior. Esta condición permite inferir que en suelos como los de la sabana de Bogotá, debido a la pérdida de humedad en procesos de secado o por otros efectos naturales o antrópicos, se fisuran por las presiones de succión del suelo. Cabe resaltar que los suelos de la sabana en su mayoría arcillosos cerca de la superficie y en grandes profundidades, ya ha demostrado fisuras visibles estudiadas por autores como Helmes y Van der Hammen, (1995); Vesga, (2000); Vesga *et al*, (2002), Pineda, (2003); Ávila, (2004), entre otros.

2.2.4 Desecación de las Arcillas

La desecación del suelo se produce normalmente por movimiento del agua en el material, sea por la succión de las especies vegetales para sus procesos de

fotosíntesis, sea por escorrentía subterránea o por extracción mecánica para consumo; otra parte se mueve por evaporación producida por efecto del calor. En cualquiera de los casos, la pérdida de agua genera en el material el reacomodamiento de las partículas, lo que ocasiona la variación del volumen así como de sus características y con ello el comportamiento ante la acción de las cargas aplicadas. La pérdida gradual de agua en conjunto con las cargas puestas sobre el suelo, ayudan a comprimir el material y la salida del agua ocurre de forma moderadamente normal. Pero cuando las condiciones de pérdida de la humedad se dá de forma acelerada, el nivel freático desciende rápidamente y el agua que se encuentra por encima, genera presiones succión debido a los efectos de la capilaridad y la tensión superficial del agua contenida. Dichas presiones llevan a fisurar la arcilla iniciando en la superficie expuesta al ambiente y que se extienden en el terreno y se van propagando hacia el fondo normalmente hasta el nivel freático (Vesga *et al*, 2002).

Ya desde finales del siglo anterior se han venido analizando las implicaciones que se generan en los suelos que se fracturan por efectos diversos, pero especialmente la desecación como condición que produce la mayor cantidad de fisuras en suelos. Generalmente en los depósitos de residuos orgánicos que generaban lixiviados altamente contaminantes se usaban capas de arcilla porque es un material que tiene un índice muy bajo de permeabilidad. Sin embargo, se empezó a evidenciar que algunos vertederos de residuos presentaban en el entorno cercano altos índices de contaminación del suelo, por lo que se da paso al estudio detallado de las condiciones de las arcillas y la pérdida de estabilidad por fisuras que se producían y permitían la salida rápida de dichos lixiviados que contaminaban los suelos cercanos (Miller *et al*, 1998).

Abu-Hejleh y Znidarcic, (1995) presentan una teoría de la desecación de suelos que se encuentra dividida en los cuatro procesos consecutivos ocurridos en un material arcilloso que se encuentra en un depósito determinado y con condiciones que son variables. El primero es la contracción bajo cargas de compresión unidimensional, especialmente por efecto del peso propio del material, pero

también por las cargas aplicadas o superpuestas sobre el terreno de material blando; las deformaciones unidimensionales y tridimensionales producto de la pérdida de humedad de la matriz de material se producen por efecto de los cambios volumétricos y presión de succión en el material, que se refleja en variación de la relación de vacíos. La segunda presunción radica específicamente en las deformaciones horizontales que son tomadas cercanas a cero (0), lo que permite modelar las deformaciones con apertura de fracturas en el material arcilloso de forma similar con profundidades iguales. Una tercera condición que propone que el esqueleto sólido de material y el agua soportan las fuerzas pero que una vez se pierde agua el esqueleto sólido presenta cambios que modifican la estructura general. Por último se propone que en los suelos sobreconsolidados el análisis de los esfuerzos efectivos por los planos preferentes dispuestos son los que los autores dedican a analizar, pues muestran una serie de pruebas en las que se relacionan los esfuerzos efectivos de consolidación unidimensional y tridimensional para muestras de material arcilloso blando en China, demostrando que cuando la muestra es sometida a esfuerzos unidimensionales o tridimensionales, permite una compresión que favorece el cambio de volumen con la salida del agua. La figura 2,7 muestra las condiciones de los esfuerzos verticales efectivos unidimensionales y tridimensionales así como el coeficiente de permeabilidad de las arcillas con la relación de vacíos del suelo.

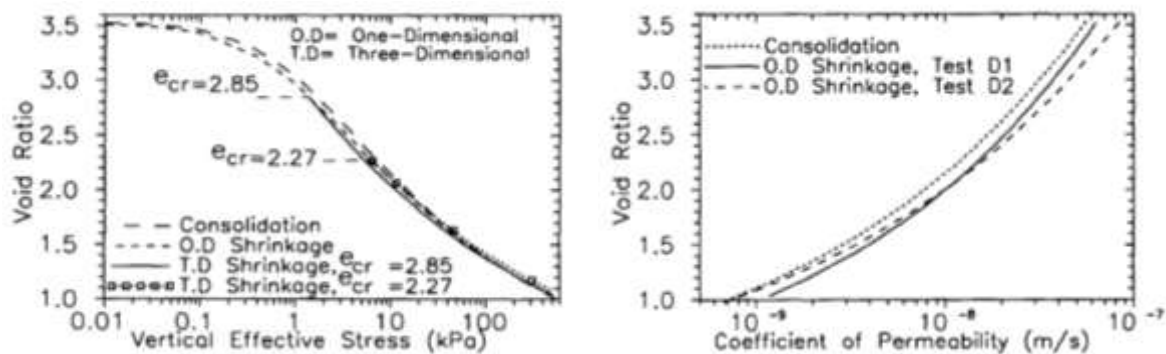


Figura 2,7. Relaciones de Esfuerzos Efectivo y Permeabilidad con la relación de vacíos (Abu-Hejleh y Znidarcic 1995).

Abu-Hejleh y Znidarcic, (1995) analizan la forma como se genera la aparición y propagación de grietas verticales desde la superficie con menor humedad hasta el nivel freático de saturación por efecto de las presiones de succión debidas a la acción del agua en las partículas de material y la liberación de tensión. Los autores analizan las contracciones tridimensionales por efecto de la desecación, lo que hace que el material tenga variaciones no solo en superficie sino que las paredes de las columnas van a manifestar cambios de comportamiento que son gobernados por la estructura tridimensional de la columna generada.

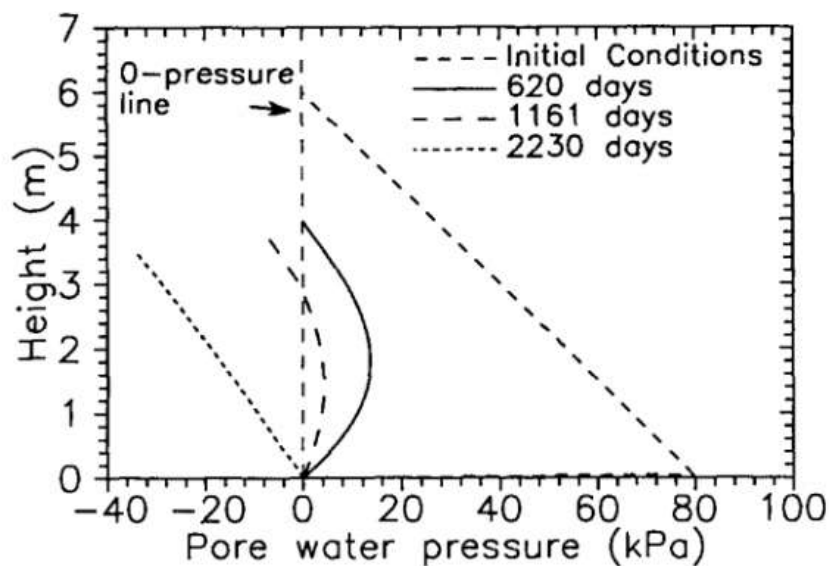


Figura 2,8. Variación de la presión de poros con el abatimiento del nivel freático (Abu-Hejleh y Znidarcic 1995)

La Figura 2,8 permite identificar que la mayor presión de succión por efecto del descenso del nivel freático o la pérdida de agua simulada en el programa (*CADA, Consolidation And Dessication Analysis*), se presenta para la prueba de los 620 días, que corresponden a los mayores esfuerzos de succión matricial por efecto de la desecación del material arcilloso modelando las ecuaciones con los valores de succión matricial obtenido en las pruebas de laboratorio. Esta condición mostrada mediante los análisis permitió a los autores encontrar la relación estrecha entre la contracción del material y la consolidación ligada de forma directa con las presiones de poros ocurridas por efecto de la pérdida de humedad en el material,

ocasionando la disminución en la relación de vacíos y con ello la aparición de fisuras en el material arcillosos. En las pruebas, los autores lograron identificar la relación directa que existe entre la pérdida del agua con los asentamientos superficiales que ocurren en los suelos que se desecan y las deformaciones tridimensionales que ocasionan las fracturas y generación de grietas que se desplazan desde la superficie y hacia el nivel freático.

Stark y Eid (1997) presentan las fallas o fracturas en suelos arcillosos que son identificadas y estudiadas en su comportamiento mecánico mediante las pruebas de corte directo con el fin de determinar la influencia de la composición del material y su influencia en la falla del mismo con la pérdida de humedad, siendo este uno de los factores más relevantes en el estudio de la presente investigación.

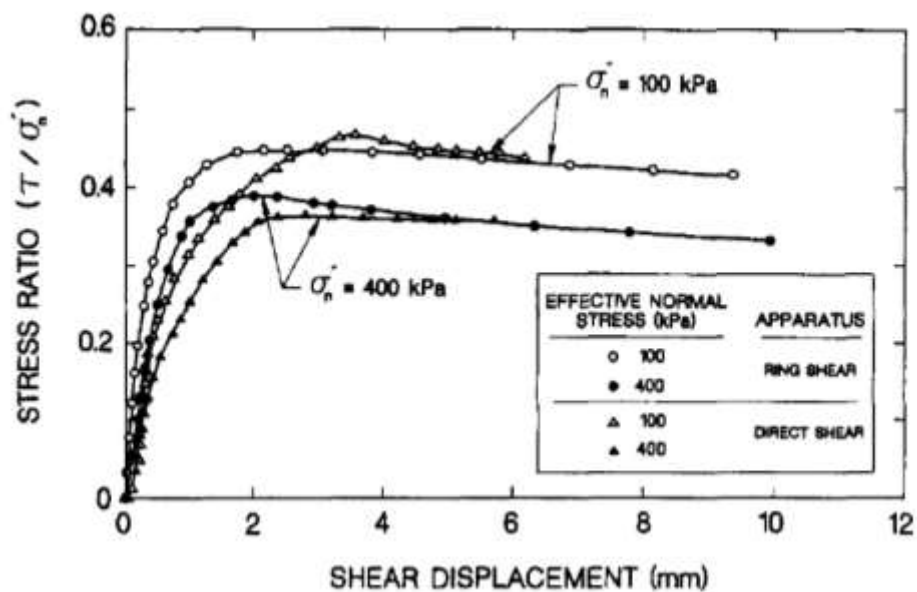


Figura 2.9. Deformaciones de corte contra relación de esfuerzos (Stark y Eid 1997).

Las variaciones de los esfuerzos mostrados con diferentes relaciones de esfuerzos normales y esfuerzos de corte obtenidos de pruebas, contra las deformaciones de falla encontradas se muestran en la Figura 2.9. Cuando los esfuerzos normales aplicados al suelo son menores, la relación de los esfuerzos

de corte y normales es mayor que cuando las cargas aplicadas son mayores, como se refleja en las aplicaciones de esfuerzo de 100 y de 400 kPa respectivamente. Se puede decir que en pruebas de material arcilloso, los esfuerzos por efecto de las cargas hacen que las deformaciones varíen hasta un valor determinado, lo que representa la zona elástica como respuesta del suelo para una relación de vacíos que tiende a cero (0), estas deformaciones permiten reflejar el comportamiento que pueden llegar a tener en condición de succión. Por otra parte, cuando se tienen relaciones de vacíos muy elevadas, se muestra una condición probable de deformaciones muy altas tanto para las pruebas de anillo de corte como de corte directo para cargas de 100 kPa y 400 kPa.

Otro de los factores estudiados en esta línea corresponde al análisis de los esfuerzos internos de succión que generan fisuras que comprometen la calidad del suelo y ponen en riesgo la estabilidad y calidad de las estructuras emplazadas, como es el caso de las carreteras ubicadas en zonas de afectación de este tipo de material (Morris *et al.* 1992). Las condiciones naturales tales como la temperatura, la presión misma del suelo y el agua subsuperficial, la topografía y el flujo de agua, hacen que la cabeza de presión de agua que se rige por la ley de Darcy para el manejo de los fluidos, presente cambios internamente en el material cuando se producen variaciones del nivel de agua (Perón *et al.*, 2009). Menciona también Harris, (2003), cómo en la región de Arizona, en los Estados Unidos, se vienen dando problemas de agrietamientos de gran tamaño debidos a las variaciones de la cantidad de agua que se presenta por efecto de las estaciones, y cómo en algunos lugares se han venido desarrollando una serie de grupos de grietas en el material fino que en periodos relativamente cortos de tiempo se han identificado por su gran tamaño y las graves repercusiones que ello genera en el suelo de la zona.



Figura 2,10. Fisuras de gran tamaño en región del Estado de Arizona (Harris, 2003).

Las deformaciones percibidas por efecto de los procesos de desecación debidas a la succión matricial interna de los materiales arcillosos de la región, como lo manifiesta Harris (2003), muestran un comportamiento de aparición de fallas en superficie que se van desarrollando en profundidad y que gradualmente se van interconectando para generar grandes fisuras como la mostrada en la Figura 2,10.

2.2.5 Fracturas de Suelos Arcillosos por Desecación

Los suelos arcillosos presentan por condiciones de saturación una baja resistencia al corte y baja compresibilidad, esto es una condición típica de los suelos de origen lacustre y se ubica de manera que conforman un suelo completamente saturado (Van der Hammen, 1995). Por el descenso del nivel freático en el depósito, la cantidad de agua comienza a perderse y el material se ve sometido a esfuerzos debidos a la pérdida de cantidad de agua por succión debida a diversos factores. (Harris, 2003) relaciona las evidencias de los graves daños ocurridos en la Región de Arizona en los Estados Unidos, donde el fenómeno de las fracturas además de ser visible y de dimensiones considerables, se interconecta ocasionando daños de gran magnitud en las cercanías a las regiones habitadas o

a la infraestructura vial, sin embargo el caso de Ciudad de México es muy diferente y se asemeja mucho más a la condición de la Sabana de Bogotá, puesto que corresponde a una ciudad construida sobre depósitos de arcilla de gran tamaño.

En el estudio de la pérdida de agua en condiciones hidrostáticas de suelos, uno de los efectos que se analiza principalmente es la evapotranspiración en condiciones normales (Williams y Pidgeon 1983) y (Ravina 1983), tocan estrechamente el tema que relaciona la cantidad de precipitación y la entrada y salida del agua en suelos arcillosos por condiciones normales, así como la temperatura de la zona y la humedad relativa del sitio, todos adheridos al fenómeno de la fisura de las arcillas por la pérdida de humedad; también el fenómeno es revisado por (Driscoll 1983), (Richards *et al*, 1983), (Alonso *et al*, 1995), (Holtz y Kovacs, 2010), integran en fenómeno de la pérdida de agua del suelo con el deterioro que se produce en el material por efecto de las raíces de diferentes tipos de árboles presentes en el sector cercano donde la influencia de la succión radicular es significativa.

Del mismo modo (Vesga, 1999), y (Pineda, 2003), estudian la relación que se tiene entre la pérdida de humedad por diferentes agentes que hacen que agua del suelo sea extraída y los procesos de agrietamiento que ocurren en esta misma matriz de material. Rueda (2012) presenta la influencia que el fenómeno de la desecación de los suelos presentado en la sabana del occidente de Bogotá, tiene sobre las estructuras de pavimento flexible y la acción que genera la siembra de árboles de gran tamaño en zonas cercanas a la banca de la carretera de la zona de estudio.

Como se menciona previamente, el descenso del nivel freático en el suelo arcilloso, por las leyes de la hidrostática, se produce el ascenso de agua capilar o suspensión del agua entre las partículas sólidas por efecto de los vacíos que forman ductos de forma y tamaño variable de acuerdo a la estructura del mismo, que generalmente se comunican con la superficie y la presión atmosférica en todas las direcciones. La tensión superficial del agua genera esfuerzos de succión que la matriz de material presenta dependiendo del contenido de agua y los

efectos atmosféricos producidos sobre nivel freático. (Fredlund y Xing, 1994) presentan mediante sus estudios de succión matricial la curva característica de retención humedad en suelos cohesivos que se presenta en la Figura 2,11.

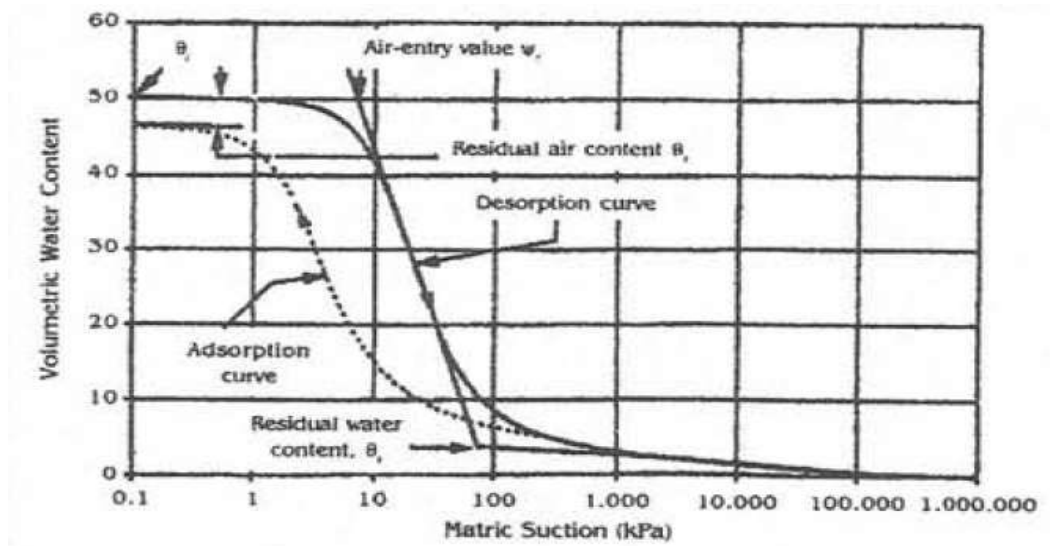


Figura 2,11. Curva característica de Succión Matricial (Fredlund y Xing, 1994).

De la succión presentada por materiales finos parten estudios como el realizado por Vesga, Mesa y Caicedo (2002) que demuestra las condiciones mediante las que se desarrollan procesos de análisis de los mecanismos de falla y fractura de los suelos arcillosos del occidente de la sabana de Bogotá, debidos a la pérdida de humedad y su comportamiento por efecto de la succión matricial, lo que ocasiona fisuras superficiales y profundas en el suelo que ha perdido la humedad de forma acelerada. Como puede verse en la Figura 2,12 y revisado en diversos estudios, a medida que desciende el nivel freático, las presiones de succión que se ejercen al esqueleto de material sólido incrementan de forma significativa, evidenciando en el banco, fallas o fisuras que vuelven discontinuo el suelo.

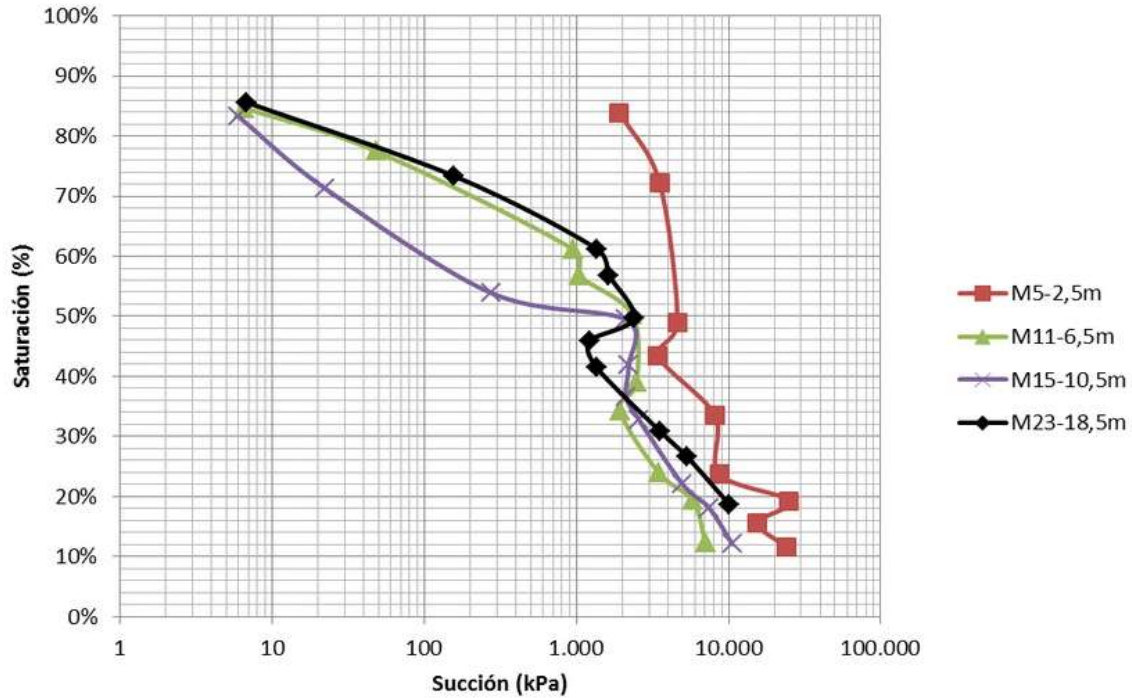


Figura 2,12. Curva de Succión Matricial de la Sabana (Pineda y García, 2014).

El material cuando es sometido a la pérdida de humedad en el terreno por efecto de los agentes ambientales, tiende a demostrar un comportamiento variable de las condiciones y características internas; la salida del agua hace que el material arcilloso que se encuentra en depósitos se vuelva más rígido con respecto a las condiciones iniciales, correspondientes a un suelo normalmente consolidado producto de la construcción de las capas de material originados con las eras geológicas y la manera como se ven afectados. Los suelos que demuestran abatimiento del nivel freático y que en el tiempo han venido reflejando esta condición, permiten correlacionar las características de succión y cómo la relación de sobreconsolidación está ligada con las presiones de succión del material en profundidad (Pineda *et al*, 2015).

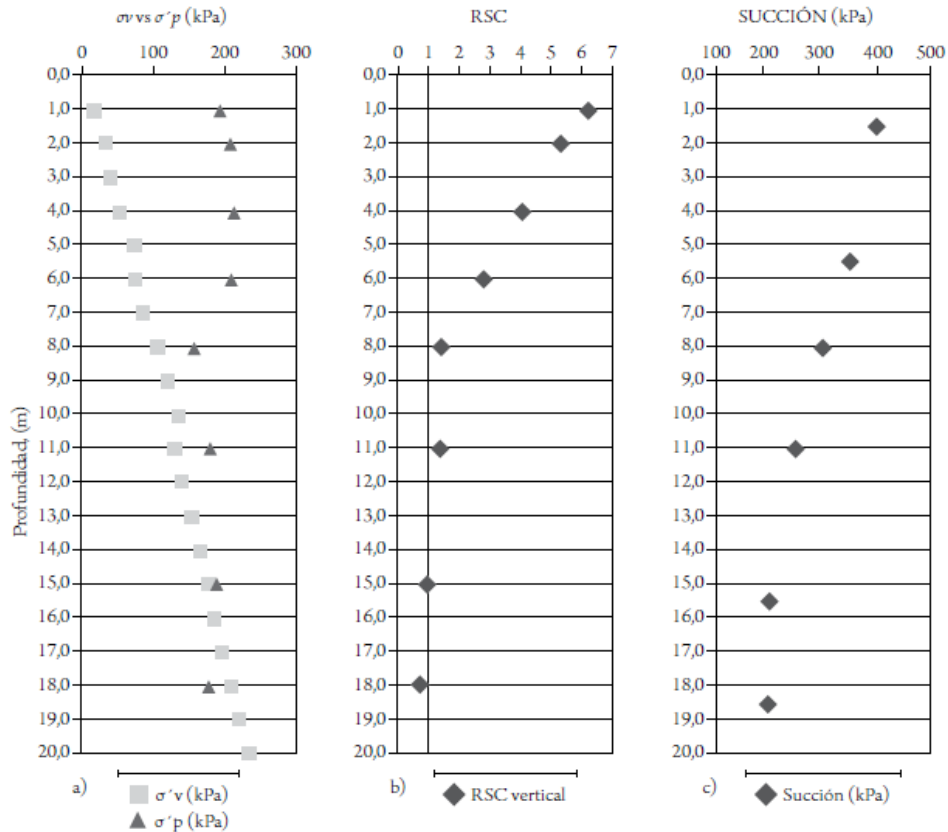


Figura 2,13. Relación de la succión con los esfuerzos principales y valores de sobreconsolidación (Pineda *et al*, 2015).

La Figura 2,13 muestra la correlación en la profundidad de la medición de los esfuerzos verticales y horizontales obtenidos para diferentes muestras tomadas en campo en el corredor vial Siberia – Tenjo, en el que se desarrollaron pruebas edométricas y de succión. (Pineda *et al*, 2015) encontraron que los valores de coeficiente lateral de tierras para la zona *Ko* obtenidos a partir de la correlación de los esfuerzos de preconsolidación se aproximan a 1,0; dichos valores plantean que la sobreconsolidación ligada a la succión matricial de suelos, ha generado que el esqueleto de material demuestre valores muy parecidos si se aplica presión en las direcciones vertical y horizontal, lo que indica que la desecación es uno de los factores que infiere de forma directa en la configuración de fisuras y que los valores del coeficiente *Ko* demuestran relaciones variables entre la condición de

suelos saturados por debajo del nivel freático normalmente consolidado y la superficie con los mayores valores de sobreconsolidación del material.

2.3 IMPLICACIONES DE LAS FRACTURAS EN LA ZONA DE ESTUDIO

Cuando se analizan las fracturas en los suelos cohesivos, se pueden tener varias razones que favorecen que la matriz de material arcilloso presente fallas en las que las partículas se reacomodan y ocasionan cambio en el comportamiento mecánico ante las cargas sobrepuestas y el peso propio del material. Mencionan (Shin y Santamarina, 2011) que los suelos pueden fallar por el ingreso de fluidos miscibles y no miscibles, es decir, que pueden o no disolver minerales presentes en el suelo. la Figura 2,14 muestra diferentes tipos de falla con apertura de grietas de fluidos miscibles como el agua encontrados en laboratorio como fundamento de la generación de discontinuidades que a nivel macro se pueden presentar en un entorno natural en la parte (a). del mismo modo las fisuras por fluidos no miscibles como aceites saturados en el agua del suelo (parte b). En la parte (c) de la figura se muestran fallas por aire atrapado en suelos arcillosos saturados, mientras que en la parte (d) se pueden ver fracturas por desecación en condiciones normales en la parte superficial de las muestras tomadas; la parte (e) evidencia una imagen de fisuras ocasionadas por agua congelada dentro del suelo, situación que ocurre normalmente en zonas donde se presentan las estaciones y en la parte (f) la falla interna del suelo se visualiza por la acción de raíces de plantas en el material.

Los patrones de apertura de grietas en cada mecanismo de generación puede ser diferente, dependiendo de las condiciones y la forma como se presentan; sin embargo, el comportamiento mecánico una vez ocurridas las fallas, modifican las condiciones de análisis del suelo de la mecánica clásica a modelos mucho más complejos que se identifican como suelos parcialmente saturados con características variables y discontinuas.

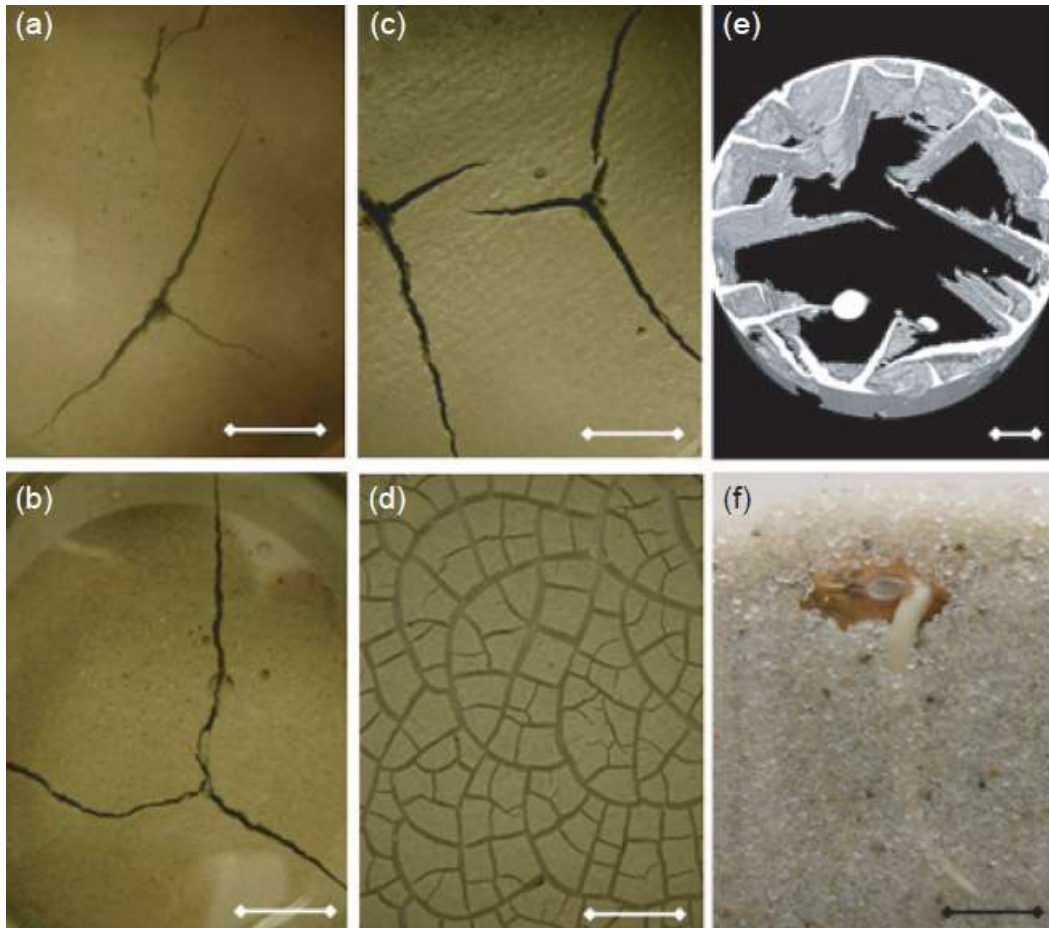


Figura 2,14. Mecanismos de falla de suelos cohesivos (Shin y Santamarina 2011).

Las arcillas que se han visto sometidas a procesos de fracturación interna en las muestras de prueba del material, reflejan un comportamiento mecánico que presenta líneas de falla que se producen internamente en el esqueleto de material sometido a la pérdida de humedad. La configuración de algunas arcillas del sur de Italia son evaluadas (Vitone *et al*, 2009), los autores toman pruebas edométricas y triaxiales, con el fin de identificar los mecanismos de falla de elementos sometidos a prueba, lo que concluye que cuando el material se encuentra fisurado con fracturas de un tamaño significativo, a nivel interno se presenta de la misma manera una tendencia de falla dadas las condiciones de la generación de las micro y macro fisuras del esqueleto completo del material.

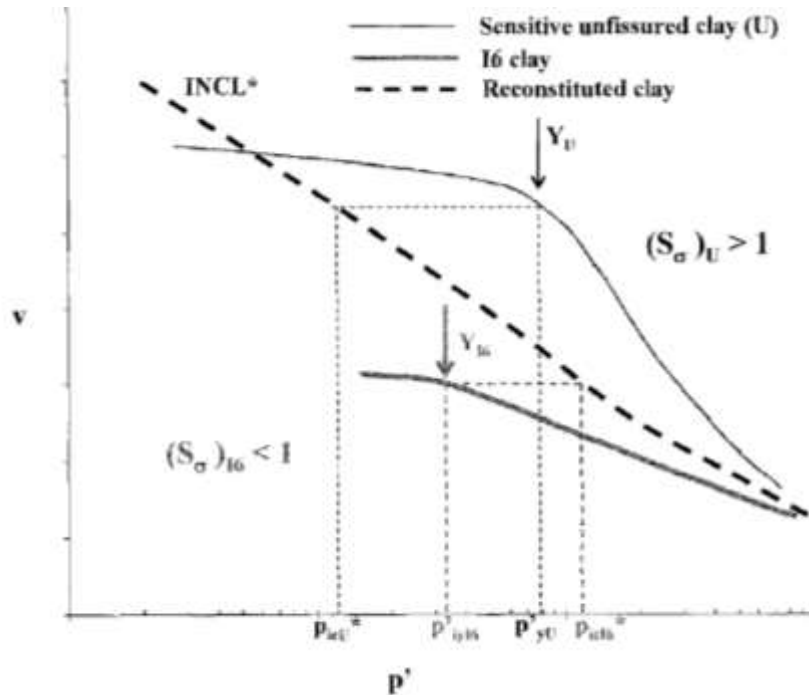


Figura 2,15. Comportamiento a la compresión de arcillas altamente fisuradas con no fisuradas (Vitone *et al*, 2009).

En la Figura 2,15 la comparación que Vitone *et al.* (2009), realizan de arcillas que se encuentran sometidas a pruebas de laboratorio con el fin de comparar la variación del volumen de cada una de ellas por acción de las cargas aplicadas. Se percibe que la deformación de las arcillas reconstituidas para la prueba, dejan ver un comportamiento constante en el que se reduce su volumen específico con la acción de las cargas. Las arcillas no fisuradas presentan un comportamiento semejante pero con menor variación del volumen por aplicación de la carga; en el caso de las arcillas fracturadas la variación es menor hasta determinada carga donde se produce una ruptura de la estructura del material y se presentan unas deformaciones que generan mayor tasa de cambio de volumen con la carga aplicada. Este fenómeno se relaciona estrechamente con las condiciones de estabilidad que puede tener un esqueleto de material desecado sobreconsolidado en el campo que demuestra un comportamiento previo a la falla en condiciones estáticas, pero que en algún punto de carga que puede significar el aumento en la

longitud en profundidad de las fisuras, que conducen a la falla del esqueleto completo de suelo.

En el comportamiento del suelo parcialmente saturado, la fase de vacíos comienza a presentar variaciones dado que los esfuerzos aplicados o por efecto del peso propio del material, hacen que la relación de vacíos disminuyan de manera gradual con la aplicación de las cargas. La Figura 2,16 muestra una el comportamiento de la relación de vacíos para diferentes tipos de grados de saturación inicial y su variación con la aplicación de cargas verticales producto de los esfuerzos efectivos con carga unidimensional para diferentes condiciones de saturación del material. Plantean (Hong *et al*, 2012), que los esfuerzos de succión matricial en el suelo arcilloso reconstituidos son variables y permite ver que las deformaciones por aplicación de cargas que disminuyen los vacíos y se produce la densificación de las muestras de material. Del mismo modo cuando las arcillas son tratadas con agua por humedecimiento, las deformaciones o variación de la relación de vacíos con la aplicación de la carga se hace mayor que en arcillas sobreconsolidadas en las que los vacíos de la estructura de suelo se encuentra más rigidizada.

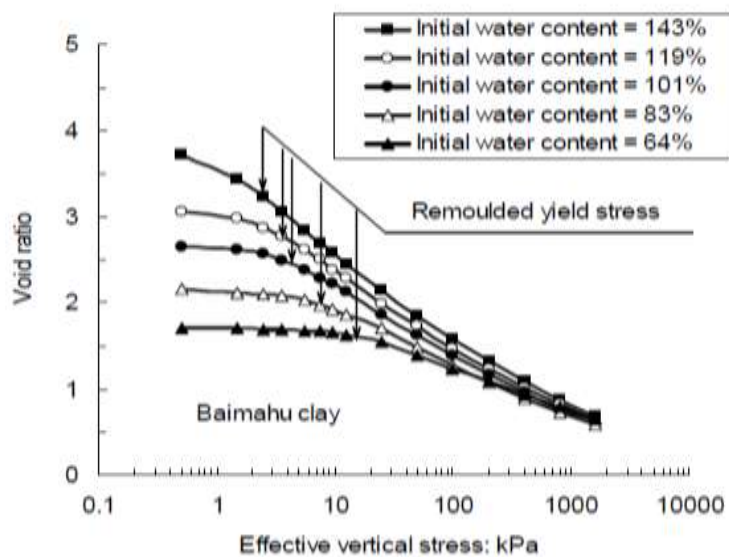


Figura 2,16. Comportamiento de la relación de vacíos contra los esfuerzos efectivos aplicados a suelos arcillosos (Hong *et al*, 2012).

Este comportamiento analizado permite identificar factores ligados a los cambios volumétricos que se manifiestan en un suelo sometido ciclos de desecación y de humedecimiento, puesto que factores como la relación de vacíos y los esfuerzos de succión de suelos son tenidos en cuenta para comprobar los cambios volumétricos y con ello la posible generación de fisuras en el suelo arcilloso dadas las características del material.

(Rosone *et al*, 2016) presentan los resultados de pruebas hechas a muestras de suelo tomadas y caracterizadas en una obra de estabilización de suelos arcillosos, a la cual le aplican ensayos de porosimetría por intrusión de mercurio. Con estos resultados se puede identificar el comportamiento del material arcilloso y limoso que presenta cambios volumétricos en ciclos de humedecimiento y secado; en ellos se presentan deformaciones irreversibles durante dichos ciclos de variación en el contenido de agua. Se comprueba en sus análisis que la relación de vacíos en materiales arcillosos analizados mediante pruebas de laboratorio para arcillas estabilizadas bajo una estructura de pavimento, presenta una variación considerable en el primer ciclo de humedecimiento y secado, mientras que al ser sometido a ciclos repetitivos de humectación en condiciones controladas, la relación de vacíos no muestra cambios considerables en la medida en la que se presentan incrementos en la presión de succión.

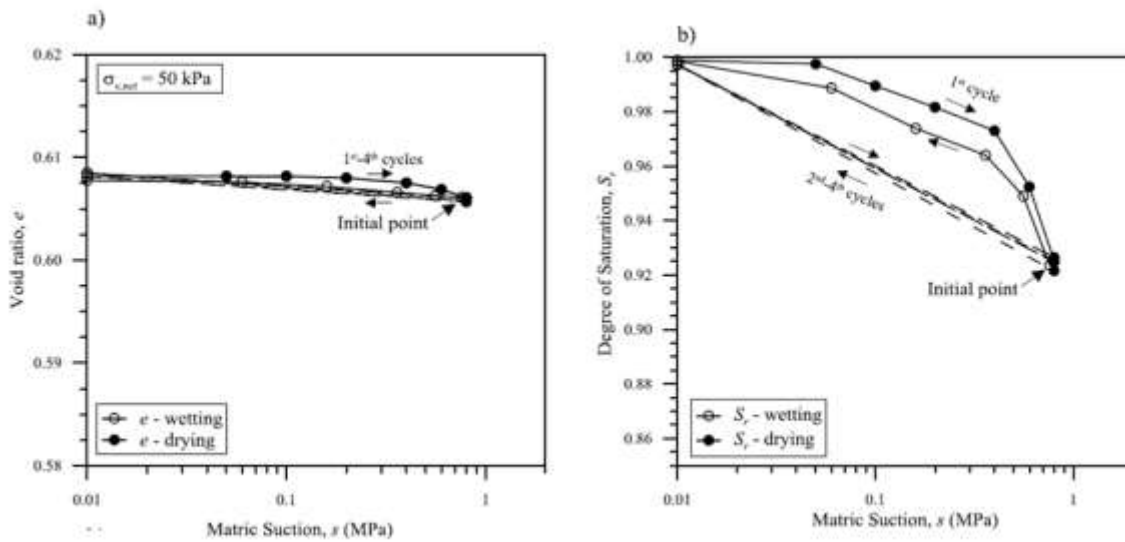


Figura 2,17. Relación de Vacíos y Grado de Saturación durante ciclos de succión entre 10 y 800 kPa (Rosone *et al*, 2016).

La Figura 2,17 muestra las curvas obtenidas de las pruebas de laboratorio a muestras inalteradas tomadas a subrasantes arcillosas configuradas en un terraplen estabilizado para carreteras en Sicilia. Se evidencia que en la medida en la que se incrementa la presión de succión en la matriz de material fino, la relación de vacíos en la parte a, presenta un descenso evidente durante el primero ciclo, y se estabiliza en variaciones más homogéneas durante los otros tres ciclos de humedecimiento y secado aplicados. Del mismo modo se muestra que las variaciones del grado de saturación, durante el primer ciclo son altamente considerables, mientras que para los otros tres ciclos aplicados su comportamiento es lineal (Rosone, y otros 2016). Estas relaciones son muy importantes, dado que en la medida en la que se presente el proceso de desecación de materiales y un primer ciclo de secado, las relaciones de vacíos y los grados de saturación se pueden volver más sencillos de analizar, aún cuando no se toman como base para el estudio desarrollado; su interpretación adecuada permite que las pruebas aplicadas en el modelamiento presenten un menor grado de incertidumbre respecto a los resultados obtenidos.

Puede inferirse que las fisuras que se generan en zonas de material arcilloso, permiten identificar que las fallas del material son debidas a la desecación de suelos y que corresponden a ciclos de humedecimiento y secado que se pueden dar por diferentes causales en el entorno. Esta condición plantea que las fisuras en el material arcilloso que ya se generaron en el tiempo, van a mantenerse y que los ciclos de humedecimiento y secado favorecen que en el abatimiento del nivel freático las condiciones del material de la zona se siga fisurando en profundidad y que las columnas de material que se generen van a tener mecanismos de falla predefinidos sobre las condiciones ya existentes y que se incrementen en el tiempo (Rosone *et al*, 2016).

2.4 FACTORES QUE FAVORECEN LA DESECACIÓN

En suelos finos las deformaciones son significativas y las presiones de succión generan deformaciones verticales y fisuras en la matriz de material. Para que ocurra desecación en un suelo arcilloso primero debe darse el abatimiento del nivel freático; dicho nivel puede estar en condiciones hidrostáticas especialmente cuando los suelos son finos que van en concordancia con la topografía y la estratigrafía de la zona de estudio, o puede tener condiciones hidrodinámicas con corrientes de agua que fluyen dentro de la matriz de material que se pueden dar en suelos granulares donde el agua puede fluir fácilmente, aunque en suelos finos las redes de flujo de agua se presentan de un modo mucho más lento por el movimiento normal de abatimiento diferenciado en sectores cercanos.

Considerando que la pérdida de agua en condiciones hidrostáticas de suelos, uno de los efectos que se analiza principalmente es la evapotranspiración en condiciones normales (Williams y Pidgeon 1983) y (Ravina 1983), tocan estrechamente el tema que relaciona la cantidad de precipitación y la entrada y salida del agua en suelos arcillosos, así como la temperatura de la zona y la humedad relativa del sitio, todos adheridos al fenómeno de la fisura de las arcillas por la pérdida de agua; también (Driscoll 1983), (Richards *et al*, 1983), (Alonso *et*

al, 1995), integran el fenómeno de la desecación del suelo con el deterioro que se produce en la matriz de material por efecto de las raíces de diferentes tipos de árboles presentes en el sector cercano donde la influencia de la succión radicular es significativa.

Vesga, (1999) y Pineda, (2003), hacen un acercamiento a la relación que se tiene entre la pérdida de humedad por diferentes agentes que hacen que agua del suelo sea extraída y los procesos de agrietamiento que ocurren en esta misma matriz de material sean cada vez más evidentes. Rueda, (2012) muestra la influencia que el fenómeno genera sobre las capas granulares y la estabilidad de la banca de la carretera, así como los daños ocurridos en estructuras y pérdida de la verticalidad de postes eléctricos y árboles por la falla de los suelos que se fisuraron y en los que la presencia de árboles es fácilmente verificable, así como su relación con las fallas de la subrasante.

Rueda (2012), estudia el grado de incidencia de los árboles en la pérdida de humedad del suelo de subrasante en el sector de la sabana del occidente de Bogotá; esta zona se ha visto sometida condiciones de pérdida de humedad y la acción de los árboles en la temporada de verano es uno de los factores que evidencia daños por la aparición de fisuras debidas al incremento en la succión de la matriz de suelos y que se reflejan en superficie en fallas ocasionadas en el sistema estructural del pavimento. En la región existe un buen número de especies arbóreas nativas y no nativas que cuentan con sistemas radiculares que favorecen la succión de agua del suelo y especialmente en sectores donde la cantidad de árboles se hace más densa. Se perciben en la estructura del pavimento problemas de hundimiento y otras fallas producto de problemas asociados a la pérdida de agua de la matriz de material. La Figura 2,18 muestra una falla longitudinal paralela al eje de la vía en una zona en la que se tiene una hilera de árboles que favorecen la pérdida rápida de agua de la subrasante.

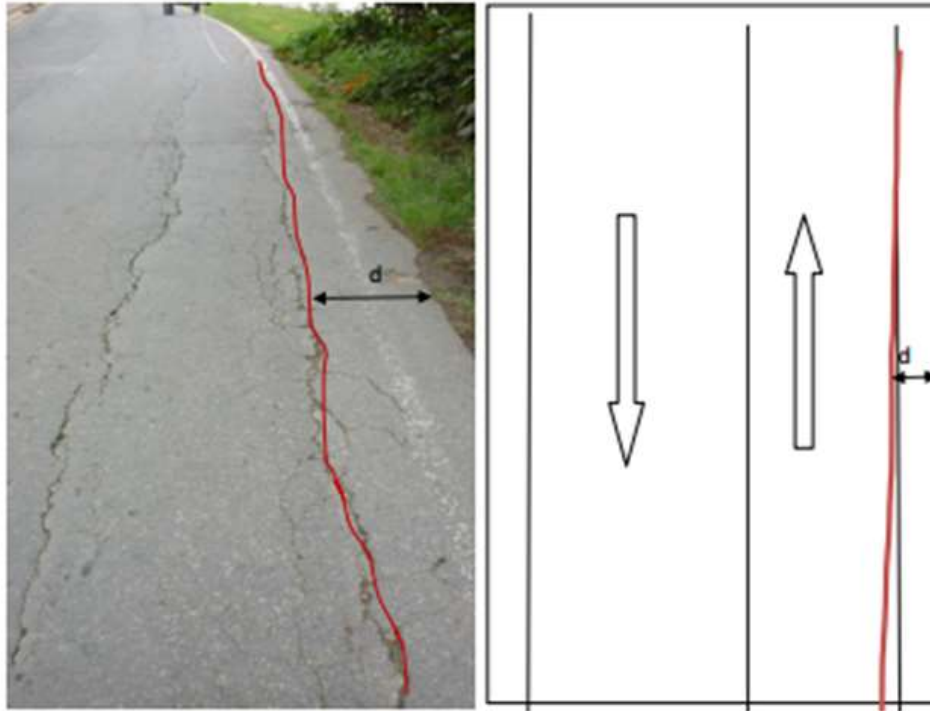


Figura 2,18. Falla de borde en pavimento en zona de estudio (Rueda, 2012)

Estudios en los suelos de la Sabana de Bogotá suponen que se produce abatimiento del nivel freático y material desecado en la zona. Las variaciones significativas en el comportamiento mecánico y los cambios volumétricos por efecto de la sobreconsolidación ocasionada por encima del nivel freático se pueden corroborar en pruebas de laboratorio con las pruebas de succión matricial y relación de vacíos que ayudan a inferir el comportamiento en el campo. (Lozada *et al*, 2015) verifican que el material que se encuentra sometido a desecación pierde capacidad portante para el emplazamiento de estructuras debido a la pérdida de continuidad y variación de su comportamiento mecánico en el tiempo. En suelos arcillosos en los que se pierde capacidad portante por efecto de las fisuras y la variación de los esfuerzos internos en el suelo, es necesario revisar el comportamiento del suelo frente a las cargas estáticas de edificaciones u otro tipos de estructura, así como el paso de vehículos que inducen cargas dinámicas.

Una de las causas más usuales de la pérdida de agua es la presencia de árboles que favorecen la salida de agua en las zonas aledañas al tronco por efecto de la succión que las raíces de dichos árboles generan en el suelo; en la Figura 2,19, se puede identificar las condiciones de un pavimento y la acción que ocasionan los árboles grandes en la totalidad de la estructura del pavimento, generando cambios volumétricos que redundan en asentamientos diferenciales cerca de la banca. Para el caso de la figura, por ser en la zona urbana, el régimen de salida e ingreso de agua es muy diferente al sector rural, debido a que en la superficie los pavimentos de calles y andenes impiden la infiltración de agua en un periodo de lluvias. Las deformaciones que se perciben en los pavimentos de zonas urbanas son prácticamente irrecuperables sin intervenciones de reparación en el que debe removerse la carpeta y volverse a construir la estructura de pavimento



Figura 2,19. Asentamientos diferenciales de calzada de vía en Cra 19 en la ciudad de Bogotá (Autor).

Otro fenómeno que favorece la pérdida de humedad en el suelo y que se encuentra estrechamente ligado a lo anterior es el calentamiento global. Las dinámicas atmosféricas del planeta son cambiantes, pero con el fenómeno de aumento global de las temperaturas en todos los continentes, se incrementan los ciclos de tiempo seco y las temperaturas promedio, esto ocasiona mayor índice de evaporación de agua y mayor demanda para el consumo de fuentes subterráneas. Ésto repercute en la vegetación, dado que en la medida en la que las temporadas

de lluvias son más extensas e inconstantes, la dinámica hídrica en el suelo presenta un comportamiento semejante, por ende, las plantas absorben la humedad natural del suelo y extraen el agua de una forma más rápida, especialmente en los sitios en los que hay plantaciones que demandan gran consumo hídrico (Altieri y Nicholls 2009).

Así mismo, la explotación del agua subterránea por extracción para consumo, favorecen la pérdida acelerada de humedad y el abatimiento del nivel freático, lo que ocasiona que las fallas que se producen en el material se hagan cada vez más perceptibles. Un ejemplo concreto del abatimiento del nivel freático y sus repercusiones se percibe en Morelia, en México; allí se han analizado las fallas en el suelo y las condiciones del mismo debido a la explotación de los acuíferos para la potabilización y el consumo de esta agua por parte de los habitantes de la ciudad (Rocha *et al*, 2001).

La pérdida de agua en la zona del valle de México por efecto de la explotación de los acuíferos inicialmente dejó ver unas fallas de suelo casi imperceptibles, en sus orígenes se mostraban algunos asentamientos que no reflejaban un problema que fuera grave para la ciudad, sin embargo, en la medida en la que la explotación se incrementó y los niveles descendieron rápidamente y de manera diferencial, los asentamientos acumulados para la fecha del estudio ya estaban en alrededor de 100 centímetros y las fallas que se producían estaban ligadas a las formaciones geológicas y mecanismos de falla existentes en la zona de Morelia y ciudades cercanas. Estos asentamientos como no son constantes sino que dependen de la estratigrafía de la zona, demuestran que los asentamientos son variados y se presentan suelos fracturados en diferentes sitios de la ciudad que van ocasionando daños en sectores residenciales, industriales, en hospitales y en sitios de asentamiento de familias de escasos recursos, además de las redes de servicios así como la infraestructura vial de las zonas de afectación (Jiménez *et al*, 2004).

La Figura 2,20 muestra un perfil de la pérdida de agua en suelo arcilloso en la ciudad de Morelia en México, se pueden evidenciar diversas profundidades de

pozos de extracción y los sistemas diferenciales de nivel de agua subterránea dependiendo del tipo de pozo; en la parte superior la zona más clara corresponde a un material con sedimentos más recientes que la zona oscura, por ello se perciben variaciones en los niveles de extracción. La demanda de agua de cada uno y las variaciones que ello genera, ligado a las fallas geológicas de la zona que ponen en vulnerabilidad a diferentes sectores que se ven afectados por las grietas superficiales y daños en los sistemas de redes con los que cuenta la ciudad de Morelia (Rocha *et al*, 2001).

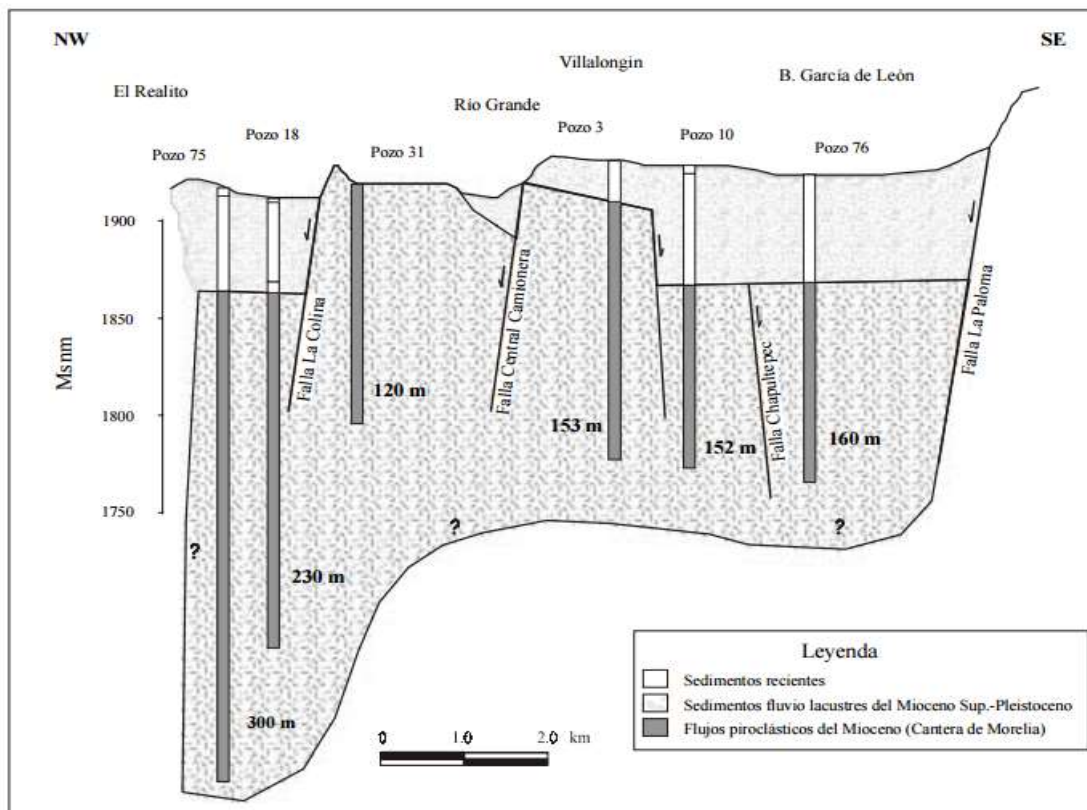


Figura 2,20. Perfil Norte – Sur de la ciudad de Morelia, México (Rocha *et al*, 2001).

Otros estudios han identificado los dos fenómenos principales del proceso acelerado de abatimiento del nivel freático. Vesga y Meza (2001), Garduño *et al*, (2001), Van Der Hammen, (2002), Vesga *et al*, (2002), Skolmen y Ledig (1990), Rueda y Pineda (2012), Pineda y Arias (2014), entre otros autores, han adelantado estudios concernientes a los efectos del abatimiento del nivel freático

de una forma acelerada por efecto de las raíces de los árboles de gran tamaño y por la explotación de acuíferos, lo que ocasiona asentamientos diferenciales que se reflejan en las estructuras y en las vías. La Figura 2,21 permite observar las fallas en el pavimento flexible de la vía que conduce entre la vereda Siberia y el municipio de Tenjo en Cundinamarca, una región colombiana afectada por la desecación de los suelos arcillosos.



Figura 2,21. Hundimientos en vías por asentamientos diferenciales de la estructura (Autor).

Se muestra el tipo de falla de media luna que describe Rueda (2012), en la que ven los pinos sembrados a uno de los costados de la vía en la Figura 2,21, permite identificar el visible deterioro superficial a que se empieza a ver sometido el pavimento. La Figura 2,22 presenta una imagen más detallada la carpeta de rodadura y repercuten en la pérdida de la velocidad normal de movilidad de los vehículos en la zona.



Figura 2,22. Hundimiento de secciones de pavimento de vía pavimentada (Autor).

En investigaciones desarrolladas con exploración del subsuelo en la zona de estudio se han encontrado evidencias de fallas por fisuras en el suelo que ha perdido agua; los esfuerzos de sobreconsolidación por succión de material han mostrado algunos mecanismos de falla como los presentados por Rueda (2012), en donde se analizan los mecanismos propuestos por Vesga *et al*, (2002), y donde se identifica en campo condiciones de falla en el material de la zona de estudio.

2.5 MANIFESTACIONES SUPERFICIALES DE FISURAS POR DESECACIÓN EN SUELOS ARCILLOSOS

El estudio de los suelos arcillosos y de su comportamiento en los que se producen fracturas asociadas a la acción de presiones negativas que ocurren cuando hay succión producida por acción de las presiones de poros capilares, puede ser realizado mediante la mecánica de fractura de elementos sólidos que se basa en

la mecánica de fractura lineal elástica (*LEFM*) por su sigla en inglés. Este método de análisis busca generar una formulación de la energía disponible para que se realice la propagación de una grieta en el suelo con la energía necesaria para que la grieta se produzca. Dicho análisis de las fracturas permite identificar tres posibles mecanismos de falla, uno ocasionado por la separación del material por succión debida a la desecación, generando grietas superficiales (ver Figura 2,23), de la misma manera se analiza un modo de fractura por falla horizontal superficial que ocurre por efectos de las tensiones en la superficie del suelo desecado y un tercer modo de fractura por rotura transversal que se produce cuando se presentan tensiones aplicadas en diferentes sentidos de la superficie de fractura del material (Shin y Santamarina 2011)



Figura 2,23. Grietas superficiales en suelos arcillosos desecados (Ibañez y Manríquez 2011)

La mecánica de la fractura de las arcillas se debe estudiar con el fin de verificar en los suelos arcillosos, los esfuerzos de tensión por succión matricial, puesto que las obras civiles construidas en suelos que se fracturan deben ser aptas y funcionales durante toda su vida útil, para lo que hay que identificar los daños posibles y las necesidades de estabilización de las mismas Rodríguez, (2005). La extracción de

agua en la sabana del occidente de Bogotá ocurre hacia las márgenes de la cuenca en la que se observan arcillas orgánicas, arenosas y turba-lignita. El pozo con el que se extrae el agua tiene por lo menos 320 metros de profundidad llamado Funza II, y está constituido por sedimentos finos y en los dos metros superiores son suelos constituidos por cenizas volcánicas; en general son arcillolitas grises con locales intercalaciones de arenas finas y niveles delgados de gravas y turbas.

Addison y Hansen (2001), analizan la influencia de los árboles en las condiciones de suelos finos y el comportamiento que se genera así como la afectación a las construcciones por efecto de la pérdida de humedad; los autores explican las funciones radiculares de los árboles como sistemas dinámicos del ciclo de la vegetación, los cuales crecen en relación directa con el tamaño del árbol y con las condiciones presentes en el subsuelo, donde se encuentra disponible agua y nutrientes. En los estudios realizados de interacción suelo – vegetación, las raíces necesitan 15% de oxígeno para su crecimiento, 10% para mantenerse y con menos de 1% pierden peso y mueren. Un suelo fisurado, debido al fenómeno de desecación, brinda condiciones favorables para los procesos de fotosíntesis de las especies arbóreas situadas en el mismo, ya que en las fisuras es posible encontrar oxígeno, el cual buscan los sistemas radiculares para extenderse, razón por la cual es evidente en campo encontrar problemas en superficies aledañas a especies arbóreas con demanda hidráulica alta.

La evapotranspiración es posible en cuanto haya disponibilidad de agua en el subsuelo, en tiempos de sequía en la región Sabana de Bogotá, los niveles descienden y es más difícil para los sistemas radiculares tener disponible agua, por tal motivo se generan altas presiones de succión de las raíces para extraer el agua del subsuelo (Blight 2005). En las zonas en las que se encuentran árboles cerca de las estructuras de carretera o calles, se presentan fenómenos visibles de subsidencia por efecto de la succión de agua que generan estos a las arcillas. En la Figura 2,24 se muestra el fenómeno de subsidencia por abatimiento del nivel freático aislado por efecto de las raíces de los árboles. Tanto en temporadas

secas como lluviosas, la cantidad de agua presente no logra abastecer lo suficiente para evitar que las raíces ocasionen daños en la estructura del pavimento por efecto de la demanda hídrica que se produce.



Figura 2,24. Asentamientos diferenciales producidos por pérdida de humedad ligada a la succión de las raíces de los árboles (Autor).

Estas situaciones se presentan en diferentes partes del mundo donde se extrae agua subterránea para diferentes usos, en la municipalidad de Chalcao en Ciudad de México, en el 2011 se presentó un fenómeno acelerado de apertura de grietas que se asocian directamente con la pérdida de humedad mediante el uso del agua tomada de los acuíferos para el consumo humano; la Figura 2,25 publicada en el periódico El Observador en Julio de 2011, impresiona por el tamaño de la falla de suelos, el académico Jorge Legorreta, de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) planteaba en su momento que la ciudad no recibe nuevos aportes de agua de fuentes externas para el consumo de los habitantes de la ciudad y la necesidad se ha resuelto extrayéndola del subsuelo, presentando esta situación como un

círculo que demuestra que el problema no se va a detener fácilmente (Hernández 2011).



Figura 2,25. Fisuras por pérdida de humedad por extracción mediante pozos en ciudad de México (Hernández, 2011).

Kodikaray Costa (2013), proponen en su estudio que los planos preferentes de la configuración de grietas corresponden a los ductos de mayor tamaño que se forman para el movimiento del agua o capilares mediante los que fluye la mayor cantidad de agua hacia afuera durante el secado del suelo, esto hace que la succión del agua en la matriz de material permita que se conformen las fisuras y se interconecten de acuerdo con el proceso de pérdida de humedad. En este sentido, los estados de falla se originan en los puntos más sensibles donde se presentan las mayores presiones de tensión por succión matricial. Por lo anterior se plantea que no se pueden predecir características detalladas de la falla o los

mecanismos que se van a presentar en un proceso de desecación a menos que se induzca a la falla con procesos mecánicos y que se generen las fracturas del material de forma controlada.

Las condiciones que se producen de fractura y su respectivo análisis se ha venido modelando desde diversos enfoques, teniendo en cuenta las características del material y las condiciones ambientales que se presentan en la zona en la que se realizan cada uno de los estudios. Kodikara y Costa (2012) presentan un resumen de diversos mecanismos usados para determinar modelos que puedan explicar el comportamiento de los materiales arcillosos en ciclos de humedecimiento y secado, de tal manera que se logren identificar algunos patrones de falla. Del mismo modo otros investigadores como el caso de Pineda y Auvinet (2013), han incursionado en mecanismos de análisis del comportamiento de materiales arcillosos usando nuevas tecnologías y con un programa especializado en modelamientos matemáticos y métodos numéricos por elementos finitos, de tal modo que han buscado modelar el comportamiento de elasticidad lineal de suelos a diferentes profundidades y suelos heterogéneos, de modo que se pueda dar respuesta a la reacción de suelos arcillosos a diferentes profundidades, esto se debe revisar con cuidado debido a que el comportamiento de los suelos fracturados por desecación presentan mayor vulnerabilidad a las fallas en masa cuando la desecación se hace más profunda y las condiciones del material se van volviendo más complejas y los materiales por efecto de la pérdida de cantidad de agua cambian las características que gobiernan su comportamiento.

Múltiples autores han trabajado en la evaluación de las fallas del suelo arcilloso, ya desde finales de la década del cincuenta se estudiaba en México y en otras regiones de Estados Unidos el fenómeno de la subsidencia con deformaciones verticales en suelos de depósitos arcillosos, pero también se identificaba la aparición de grietas superficiales que se hacían visibles durante algunas temporadas del año y que tendían a desaparecer en otras. En los mismos se da cuenta no solo de la aparición y estudio visual de las grietas, sino que se hacen modelamientos matemáticos con el fin de determinar de acuerdo con las

condiciones del material y sus características, cuál es el comportamiento en cuanto a la generación y propagación de las grietas en depósitos de material de origen fluvio-lacustre, de tal manera que se permita identificar las condiciones en las que se encuentra la zona de estudio pero que de la misma forma se identifiquen elementos que lleven a mitigar el impacto especialmente de las fracturas y la influencia que ello tiene en la estructura de la ciudad (Carreón, Hidalgo y Hernández 2006)

La construcción de pozos para la extracción de agua, para fines principalmente de consumo humano o animal o para riego de cultivos, afecta el comportamiento mecánico de los suelos arcillosos y genera que las características de un mismo tipo de material sean diferentes con la profundidad y cercanía al nivel freático. En la ciudad de México se requiere la extracción de agua subterránea para consumo humano de forma significativa y las repercusiones por asentamientos diferenciales debidos a la salida de agua mediante los pozos de extracción se manifiestan claramente. En la zona de estudio el uso de los sistemas de riego que son utilizados para la ganadería y en cultivos industriales de flores, el cual corresponde a una de las principales actividades agrícolas de la región Sabana del noroccidente de Bogotá, que ocupa un total de 4.043 hectáreas de terreno según datos del plan de ordenamiento territorial de la cuenca alta del río Bogotá. Los municipios de la región sabana donde se cultivan las flores son Anolaima, Bojacá, Cota, El Rosal, Facatativá, Funza, Madrid, Mosquera, Subachoque, Tenjo, Nemocón, Zipaquirá, Cajicá y Zipacón; en estos municipios la demanda de agua para irrigación es muy elevada a pesar las condiciones controladas para el cultivo de las flores, por ende, los propietarios abastecen sus cultivos con agua extraída del subsuelo mediante pozos de los acuíferos que permiten el uso del agua subterránea sin tratar.

En la sabana del occidente de Bogotá que se compone de arcillas altamente deformables por efecto de la pérdida o entrada de agua, se encuentran diferentes factores que favorecen el proceso de la desecación del suelo. Pozos de extracción con los que se puede obtener agua subterránea de una forma ágil, desde la zona

noroccidental hasta el sur de la región, se identifican gran cantidad de pozos con profundidades variables mediante los que se hace la extracción de agua del subsuelo para uso en diversos servicios, que en esta región son especialmente para actividades agropecuarias (INGEOMINAS, 2002).

La cantidad de árboles y arbustos sembrados en la región, hacen que el volumen de agua que se extrae del suelo sea significativa y conjugado con la extraída de los pozos, se tiene un abatimiento considerable del nivel freático, así como el agua que cae por la lluvia, es rápidamente devuelta a la atmósfera por evaporación, evapotranspiración o por el uso en actividades agropecuarias o industriales que una vez utilizada se lleva a canales que la conducen a los ríos y no se retorna al suelo de la región (Pineda, Murillo y Colmenares 2015). La Figura 2,26 permite ver la forma como se genera un mecanismo de falla tipo grieta de material arcilloso asociado a la succión que ejercen las raíces de los árboles en el suelo.

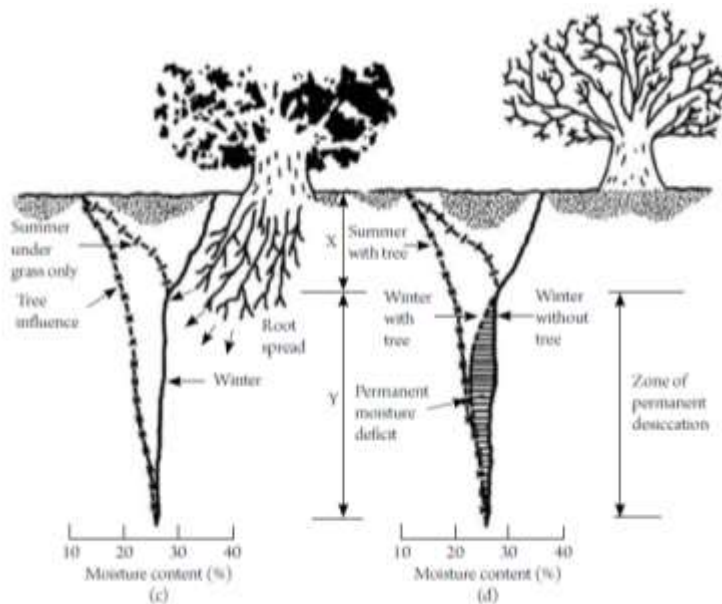


Figura 2,26. Fisuras ocasionadas por succión radicular al suelo (modificada (Pineda, Murillo y Colmenares 2015).

En el estudio realizado por Pineda, Murillo y Colmenares (2015), se presentan características de las implicaciones que genera en el pavimento flexible la aparición de las grietas en la subrasante arcillosa, entre ellas, la succión de las

raíces de la vegetación existente en la zona cercana a la vía. El uso de mecanismos de medición de patologías de pavimento asociadas a la vegetación por las presiones de succión, así como las patologías ligadas a la inestabilidad de las estructuras tipo postes eléctricos, viviendas, bodegas o cualquier tipo de estructura construida de la región estudiadas por Rodríguez (2005), permiten corroborar que la aparición de las grietas por efecto de la desecación de suelos arcillosos es un problema con el que se debe convivir y al cual es necesario adaptar las características de las construcciones que en la zona se deben desarrollar.

Los pavimentos de las carreteras de la región se ven sometidos todos los años a procesos de humedecimiento y secado, y la entrada y salida de agua de la región demuestra problemas considerables por efecto de los movimientos que se dan en estos suelos. La aparición de grietas en la subrasante es un fenómeno que se hace evidente y que se manifiesta cuando el problema ya está muy avanzado, sin embargo, en las zonas aledañas a la carretera y con la existencia de diversas especies arbóreas, es posible identificar las zonas de mayor vulnerabilidad, con el fin de contrarrestar las consecuencias que ocasiona la falla de las columnas de material. La inclinación de postes (ver Figura 2,27), así como la de los mismos árboles y los daños ocasionados en las vías, son las formas más perceptibles mediante las que se identifican los problemas de la subrasante de la vía que conduce entre Siberia y Tenjo en el departamento de Cundinamarca. Las implicaciones de estas fallas del suelo ocasionan perjuicio a la infraestructura y disminución en la calidad de la carretera por el deterioro permanente de la carpeta de rodadura, deformaciones que vuelven incómoda la movilidad y pérdida del nivel de servicio como elementos externos mediante los cuales es posible verificar que patologías ligadas al suelo está presentandose en la región.



Figura 2,27. Postes eléctricos inclinados por fallas en el suelo de emplazamiento (Autor).

2.6 RESUMEN DEL CAPÍTULO

La desecación de suelos arcillosos genera presiones negativas en la matriz de material; la acción de estas presiones ligadas a la reacción de los minerales de arcilla con el agua, hace que se produzcan fisuras que se originan en la superficie y que a medida en la que desciende el nivel freático, las grietas se extienden en profundidad ocasionando discontinuidades en la matriz de material fino. El suelo preconsolidado por desecación es más rígido e incrementa la susceptibilidad a la fractura, lo que genera un comportamiento general complejo de analizar.

Las fuentes consultadas coinciden en que el comportamiento de los suelos arcillosos desecados, son un problema para las construcciones aledañas sean estructuras livianas, obras viales, redes u obras puntuales, dado que se pierde continuidad en el suelo de soporte y se incrementa el riesgo de daño por asentamientos diferenciales que clásicamente ocurren y que no son fáciles de predecir para contrarrestarlos con obras que impidan el fenómeno. Del mismo modo las fuentes coinciden en que la diversidad de vegetación y la extracción de agua mediante pozos de extracción, hacen que el comportamiento del suelo sea aún más variable debido a la afectación variable que se produce dependiendo de la cercanía al punto de toma del agua subterránea.

Las carreteras son de los tipos de obras que se ven afectadas más gravemente por efecto del abatimiento del nivel freático y por los asentamientos diferenciales que se ocasionan por la pérdida de agua a causa de la vegetación o de la explotación de los acuíferos. Dicha infraestructura vial es una de las que más daños presenta dado lo delgada que puede ser una estructura de pavimento en comparación con todo el suelo de subrasante sobre la que se emplaza y las discontinuidades que se pueden presentar debajo de ella. Cuando el pavimento es rígido, las losas actúan como vigas que se soportan sobre material moderadamente estable, el efecto viga por la rigidez permite que la losa actúe en condiciones de soporte sobre apoyos (Ameri *et al*, 2011) y la influencia superficial, antes que se fracture la losa, es menos perceptible que en pavimentos flexibles, donde las cargas son básicamente soportadas por las capas granulares sí dejan ver el grave daño superficialmente debido a la pérdida de estabilidad tanto en la subrasante como en la estructura de pavimento, por lo que las fallas en la carpeta de rodadura tanto por asentamientos diferenciales debidos a la succión matricial, como por fisuras generadas debidas a los mismos procesos de desecación del material, afectan directamente la movilidad y los niveles de servicio de la carretera.

3. EVIDENCIAS DE LA DESECACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO

3.1 INTRODUCCIÓN

Los suelos finos y plásticos como las arcillas son complejos de manejar y deben tenerse en cuenta aspectos importantes de la génesis del suelo tales como la distribución granulométrica, las condiciones de localización del depósito y el contenido de agua en el mismo; es pertinente además conocer la reacción que estos tienen por diversos efectos en los procesos constructivos, por ejemplo la estabilización para emplazamiento de obras de construcción y la respuesta del tipo de suelo a dicho proceso durante la fase constructiva, así como durante la vida útil de las estructuras. Los suelos finos no permiten el flujo rápido del agua, lo que ocasiona en el tiempo variaciones significativas de las condiciones de soporte de la obra emplazada; en gran medida los dramáticos cambios en las condiciones se dan por la acción del agua en la matriz de material.

La Sabana de Bogotá es una zona de un manejo bastante cómodo para trabajo vial desde la perspectiva topográfica dada la baja accidentalidad del terreno en gran parte de su territorio; construir una carretera en la zona de la sabana no demanda grandes volúmenes de corte de material y por lo plano del terreno, los rellenos básicamente los comprende la estructura diseñada del pavimento para el tráfico que se espera albergar en el periodo de diseño. Sin embargo la geología de la zona muestra condiciones bastante complejas para garantizar la estabilidad de la subrasante de las carreteras y con ello la seguridad y la durabilidad de las obras que se construyen en esta región, dado el comportamiento del material de suelo existente y las variaciones abruptas que dicho material presenta por la acción del agua.

En este capítulo, se presenta de forma detallada la descripción de la zona de estudio en la que se desarrolló la simulación de las vías reforzadas con geotextil y las condiciones del material y la región, de tal modo que se presentan las

condiciones típicas en la zona de la sabana del occidente de la ciudad de Bogotá y de una vía tipo con características de movilidad de vía secundaria como es el caso de la carretera entre Siberia y Tenjo; con los estudios que se han realizado previamente de caracterización de materiales, condiciones climatológicas, efectos naturales y acción antrópica en la zona en estudio se hace una descripción del fenómeno de desecación con el fin de definir condiciones de posible comportamiento del suelo de subrasante para obras viales en la zona con los cuales se realiza el modelamiento matemático y se pone a prueba la opción de reforzamiento de la estructura de pavimento con geosintéticos de manera simulada.

3.2 CONDICIONES GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio para el proyecto de investigación se encuentra en la región de la Sabana del Occidente de Bogotá. Los materiales, de depósito lacustre, se encuentran en todo el sector y comprenden arcillas en su mayoría saturadas y que son identificadas por múltiples autores en trabajos de caracterización geológica en el entorno. La sabana se compone de materiales arcillosos que se catalogan entre illitas y montmorillonitas altamente deformables cerca de la superficie entre el occidente de la ciudad y los municipios aledaños tales como El Rosal, Subachoque, Tenjo, Tabio, Siberia, Cota, Funza, y los sectores rurales en los que se presenta la mayor área de material expuesto a superficie ambiente por ser zonas de cultivo y ganadería (Rojas y Rivera 2014).

Las características topográficas de la zona de estudio permiten determinar el potencial de agua subterránea con el que cuenta la Sabana en general, puesto que la formación Sabana y la configuración general de la región, favorece que el contenido de agua en el suelo origen lacustre no se pierda rápidamente sino que se mantenga en un depósito normalmente consolidado de arcillas finas. Durante su configuración se depositaron además capas de arenas y material filtrante lo que

permitió la conformación de los acuíferos en la región. Esta zona tiene caracterizaciones de suelo que demandan estudios adecuados del comportamiento hídrico y régimen de entrada y salida de agua del suelo. La salida del agua libre de los poros de suelos arcillosos, es un proceso normal que ocurre por diferentes factores ambientales como se detalla en el capítulo anterior, sin embargo, los regímenes hidráulicos de la zona no demuestran equilibrio entre la cantidad de agua que sale contra la que ingresa en el suelo por efecto de las lluvias. La pérdida acelerada de agua hace que el nivel descienda lo que puede generar problemas comunes en el suelo, especialmente en términos de la estabilidad del material (Helmens y Van der Hammen 1995)

El uso de pozos de extracción para riego de cultivos, así como para el consumo humano en fincas de la región, es un mecanismo de abastecimiento del agua se ha venido utilizando en la zona (CAR 2008). Fenómenos naturales como la evaporación del agua del suelo mediante la acción combinada del clima y la vegetación (evapotranspiración), además de la absorción de agua que realizan las raíces de grandes árboles ubicados en la zona, son factores que favorecen que cada día sea mayor la cantidad de agua que se pierde del subsuelo (Rueda, 2012). La desecación de las arcillas de la región, es un fenómeno natural que hace parte de la cotidianidad en la dinámica de las regiones especialmente con economía afianzada en el sector primario; sin embargo, esto conlleva a cambios volumétricos y a la fractura del material de la zona que se compone especialmente de arcillas y turbas. En algunos puntos de la sabana se han encontrado por exploración directa del subsuelo, grietas cuya profundidad está entre los 3.0m a los 7.0 metros de profundidad, y con anchos de grieta variables dependiendo de la localización y la separación entre las fisuras (Vesga, Meza y Caicedo 2002), (Rodríguez, 2005), (Pineda, García y Cavana, 2014), (Pineda y García, 2014).

De la zona además, se estudia la influencia que tienen los árboles nativos y los árboles no nativos en las patologías que presentan los pavimentos de la zona. Por acción de la succión de agua que genera la vegetación y en especial las raíces de grandes árboles, se favorece que el nivel freático descienda gradualmente y

conforme al comportamiento de las arcillas, se presentan fenómenos comunes de subsidencia de suelos con la manifestación mediante hundimientos superficiales, por fracturas en los puntos de mayores esfuerzos de succión que al irse extendiendo e interconectando dan origen a la formación de columnas de arcilla del suelo, y mediante la posterior falla de las columnas generadas que obliga un reacomodamiento del material en la matriz de material. En la figura 3,1 se muestra un mapa geológico de la formación Sabana de la Sabana de Bogotá presentado por Ingeominas, ahí se pueden identificar algunos humedales superficiales y cuencas que permiten la conducción del agua de lluvia y de evacuación de la ciudad; sin embargo, las características de los materiales generan que la infiltración de agua superficial tipo escorrentía o pluviosidad sea muy lenta dadas las características de tamaño y configuración de las partículas del material arcilloso en la zona (Rueda y Pineda 2012).

El material y las condiciones geológicas que presenta la región de la Sabana de Bogotá se describe desde mediados del siglo pasado; la Sabana está sobre una formación lacustre que por millones de años se decantó y se colocó en capas que variaron dependiendo de los periodos de formación (Julivert 1961). En esta región se encuentra en una gran mayoría estratos arcillosos, sin embargo hay algunos estratos filtrantes de material granular tipo arena que fue arrastrada al lecho lacustre y nuevamente capas de arcillas y turbas que son las localizadas en la parte superior. En la Sabana se encuentra principalmente las formaciones Tilatá y Sabana, y en ella existen estratos de gravas, arenas, limos, arcillas y turbas que permiten la configuración de acuíferos que favorecen la extracción de agua. Las formaciones permiten que los acuíferos se alojen en zonas en las que las capas arcillosas impidan el flujo rápido de agua, pero que las capas granulares favorecen el movimiento, depósito en secciones confinadas y la explotación con calidad del agua de buena a regular (Patiño y Bermoudes 2002).

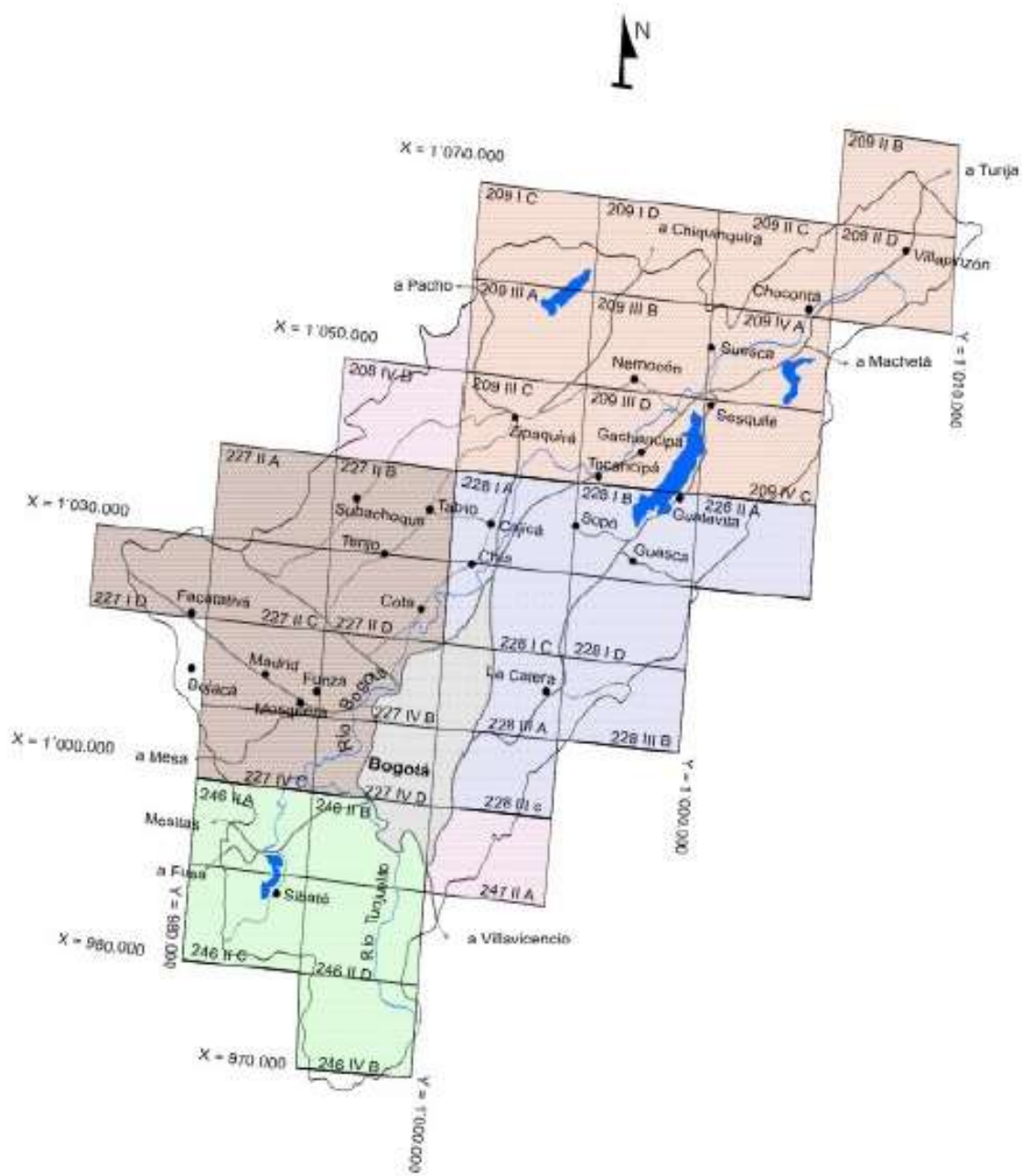


Figura 3,1. Configuración geológica de la Sabana de Bogotá (Ingeominas, 2005).

La formación elevada de la cordillera oriental de los Andes que atraviesa parte del país desde el centro hacia Venezuela, es la cadena montañosa más joven que emerge en la topografía colombiana; la elevación del suelo permitió en su formación geológica que se configuraran lagos y depósitos de agua como es el caso de la Sabana de Bogotá. En esta región el régimen de aguas al no contar con una topografía muy empinada y temporadas lluviosas constantes pero de bajo

volúmen, se considera que su régimen hidrológico es inestable. En este sentido, las lluvias en las cercanías a los cerros orientales de Bogotá son constantes, pero que la cantidad de agua que cae en la sabana descubierta no es frecuente, por lo que se describe unas variaciones considerables de la cantidad de agua disponible en la zona para el reabastecimiento del agua subterránea del depósito de material. Pabón (2012) menciona que la región de la Sabana y en general del Altiplano Cundi-boyacence para el periodo de proyección va a presentar temporadas de tiempo seco de larga duración, lo que permite presumir que las condiciones de agua no van a ser suficientes para abastecer el gasto de agua subterránea del suelo de la Sabana.

La región localizada en la zona de estudio, contempla parte del occidente de la sabana en la sección Norte-Oeste de la ciudad de Bogotá; el entorno es un ambiente de sabana en el que predominan las praderas y que por sus características tanto topográficas, geológicas, climatológicas, así como su cercanía a la ciudad, se ha convertido en una región de alto atractivo para la construcción de conjuntos residenciales, chalets, cabañas, instituciones de educación, entre otra serie de obras que se destacan en la zona. La Figura 3,2 presenta una vista satelital de parte del entorno de la sabana del Occidente de la capital colombiana donde se señala demarcada la región de afectación en el entorno de la carretera que conduce desde Siberia hacia el municipio de Tenjo. Esta región como puede verse en la Figura, presenta dos afloramientos de material rocoso de la formación Guadalupe que se visualizan en la zona que se conoce como los Cerros de Suba en el Occidente de la Ciudad de Bogotá, y otro afloramiento en la Región de Subachoque, que permite un depósito de material que en su mayoría se compone de arcillas de la formación QTs (Sabana).



Figura 3,2. Vista satelital de la zona de estudio (Google Maps Recuperado 2016)
Modificado por el Autor.

Las condiciones de calidad del agua y la cantidad de agua posible que se tiene en un acuífero que puede ser explotable depende de factores que afectan la entrada y salida de esta de la matriz de material. Los acuíferos normalmente se recargan mediante la infiltración que se produce del agua de escorrentía producto de las lluvias que caen en una región determinada o por la filtración de agua de fuentes hídricas tales como ríos y quebradas. Cuando el material es permeable, los acuíferos presentan un régimen de abatimiento y reabastecimiento bastante rápido, dado que la cantidad de agua que puede moverse en el suelo es considerable, aunque las condiciones de calidad de esta agua no sea muy buena debido al volúmen de material parículado que puede llevar. En suelos arcillosos el régimen de entrada y salida de agua es más lento pues la cantidad de vacíos que quedan en el suelo hacen que el movimiento sea muy lento y que en algunos

casos se obstruye casi en su totalidad. Sin embargo el material saturado puesto en contacto con lechos filtrantes que permiten la salida de agua de manera más sencilla, van a favorecer la explotación de agua de una manera ágil (Castillo y Ramos 2014).

En desarrollo del siguiente subcapítulo se detallan más a fondo las condiciones de la región y la zona de estudio que permite identificar el contexto del problema de la desecación de las arcillas en el entorno mismo de la zona de estudio.

3.3 CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO.

En este segmento se hace una presentación de las condiciones que permiten identificar la zona de estudio respecto a las características con las que cuenta a nivel Geológico, Hidrológico, Climatológico y de uso del Suelo en la región, que influyen en el comportamiento de los suelos y que dan lugar a la interpretación de la problemática que se analiza en el documento.

3.3.1 Condiciones Geológicas

En la zona en estudio se tiene una formación geológica de origen lacustre, lo que implica que se han conformado por depósitos de material que es arrastrado y decantado en lagunas en el tiempo y mediante la configuración del material (Julivert 1961), (Helmens y Van der Hammen 1995), (Rodríguez, 2005), (Pineda y García, 2014) . La zona de estudio comprende como una región configurada desde el Cretácico hasta el presente de modo lacustre por depósitos consolidados y no consolidados durante su historia geológica. Este material fino arcilloso en su mayoría que se encuentra en la zona y por las condiciones originales de laguna, se puede definir como un material moderadamente estable en condiciones normales de suelo saturado, sin embargo, con los cambios piezométricos que se generan por efecto del abatimiento natural e inducido del nivel freático en el suelo,

los cambios en el material son representativos y pueden acarrear dificultades en el análisis de su comportamiento, así como problemas en el funcionamiento del material con la colocación de cargas (Garzón 2011), (Castillo y Ramos 2014), (Pineda y García, 2014), (Pineda, García y Cavana, 2014).

La formación Geológica de la zona se origina a finales del mioceno (ma) e inicios del plioceno (ma), épocas en las que se reactivó el vulcanismo de la cordillera de los Andes en la región central y occidental, dando origen al surgimiento de la cordillera oriental y generando entre ellas una serie de lagos y lagunas que cubrieron parte de lo que se conoce como la sabana y que fue además conformada por cenizas volcánicas que dan origen al suelo de la región. Patiño y Bermoudes (2002) mencionan que las formaciones geológicas por fallas en sentido Norte-Este son denominadas Longitudinales y las que se encuentran en el sentido Norte-Oeste se definen como transversales. De estas estructuras se evidencia que las fallas longitudinales predominantes dieron origen mediante procesos de cabalgamiento y/o retrocabalgamiento a una configuración de picos en las fallas Mosquera y El Porvenir, que generan un espacio bajo que posteriormente se configura por la falla Transversal Rodadero (Ver Figura 3,3) que produce un depósito en el que durante el cuaternario se genera parte de todo lo que es la formación Sabana, pero que especialmente en la zona localizada entre los municipios de Cota, Tabio y Tenjo, ha permitido mediante exploraciones Geoeléctricas medir hasta 300 metros de depósito de la formación sabana .

Estos depósitos de material particulado que conjugado con cenizas producto del vulcanismo que se produce durante la formación de la cordillera llega a los espacios que quedan en medio de las fallas generadas y se empiezan a formar zonas lacustres que además empiezan también a recibir material granular de arrastre. Durante el periodo cuaternario entonces se fueron depositando las capas de material que se consolidó en los bancos de material arcilloso con algunas capas de material granular filtrante que se encuentra en la región y que por

formación y secuencia normal ha presentado ciclos de humedecimiento y secado (Garzón 2011).

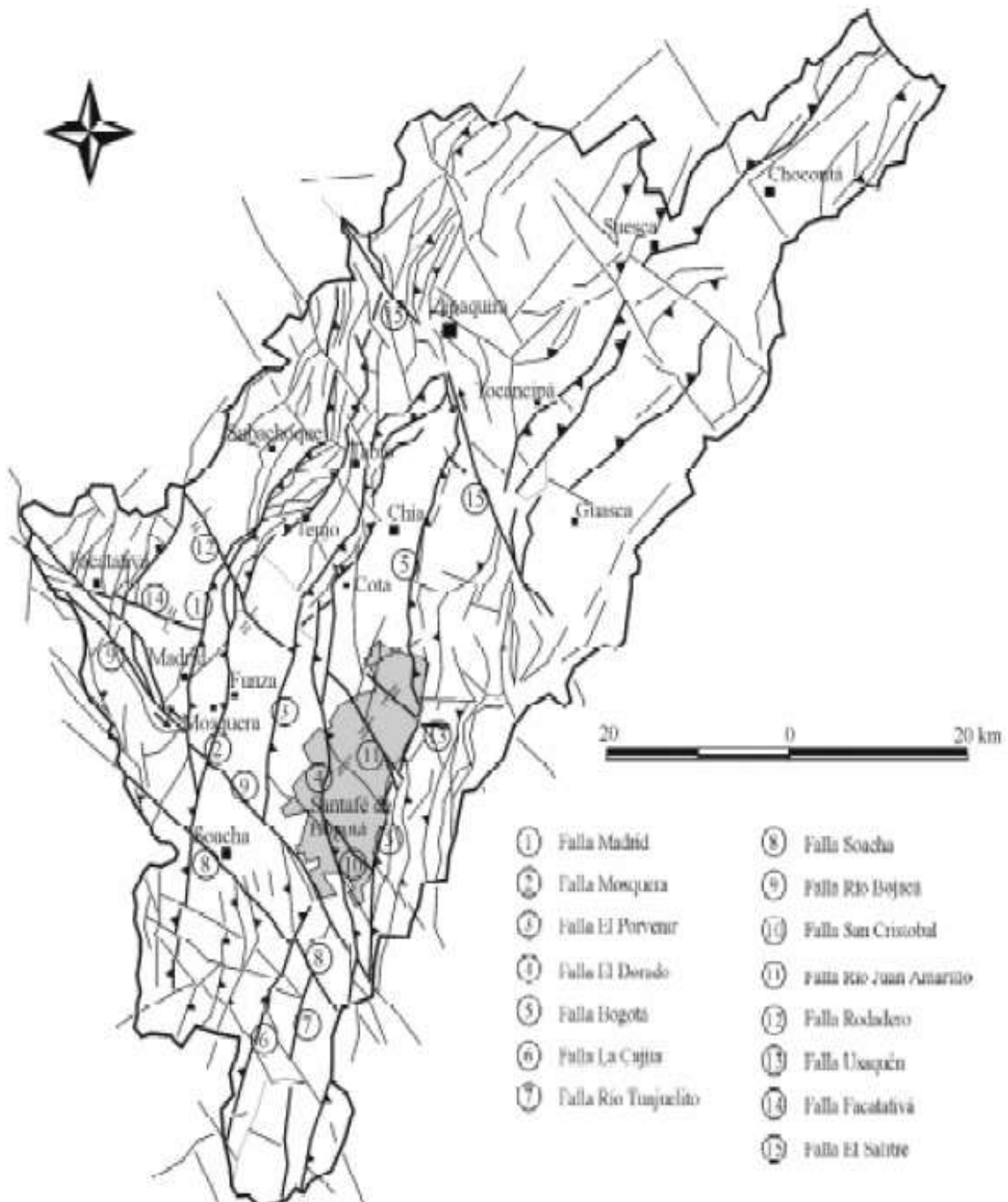


Figura 3.3. Esquema estructural de fallas de la Sabana de Bogotá (Patiño y Bermoudes 2002)

Los eventos atmosféricos normales de arrastre de material por lluvias y viento, conducen material particulado como es el caso de las cenizas de la actividad volcánica de la cordillera central. Del mismo modo los procesos de congelamiento y deshielo que se presentaron en la época, permitieron que el profundo lago que se configuró con los fenómenos geológicos, se fuera llenando gradualmente y el material en suspensión o flotante se evacuaba permitiendo que se depositara material fino más pesado en el lecho lacustre; en la Figura 3,4 se presenta un modelo esquemático de la geología del sector ajustada por Patiño y Bermoudes, que contiene elementos que permiten visualizar las condiciones geológicas principales en la zona, las fallas de la cordillera y el depósito de material arcilloso de la sabana de Bogotá.

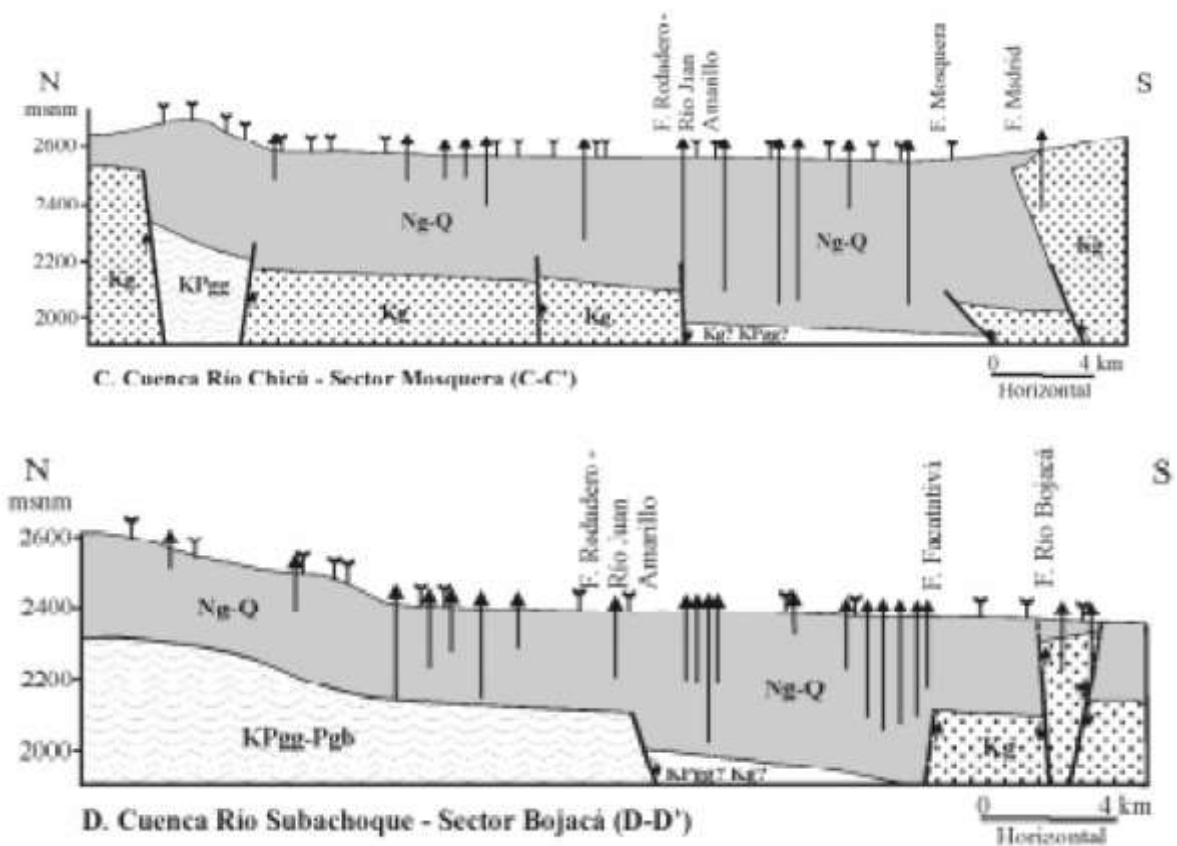


Figura 3,4. Corte estratigráfico de la Sabana de Bogotá (Patiño y Bermoudes 2002)

En la Figura 3,4 se puede identificar un corte en el que se evidencia del lado izquierdo la zona Nor-Este y del derecho la zona Sur-Oeste de la Sabana de Bogotá, en ella se percibe especialmente en la zona en estudio unos espesores significativos de formación Sabana, ubicado sobre una capa más delgada de formación Tilatá y puestos sobre terreno rocoso de la formación Guaduas y Guadalupe, que se presentan variables por las fallas ocurridas y que hacen que se produzca un afloramiento de la formación Guadalupe que disminuye los espesores de las arcillas entre la región de Subachoque y hacia la Ciudad de Bogotá. Este corte en el mapa geológico de la zona favorece la identificación los grandes espesores de material arcilloso, cerca de la zona de estudio se tiene hasta 320 metros de profundidad, y que por ser un material arcilloso, es susceptible de presentar asentamientos diferenciales muy marcados por la pérdida de humedad (Patiño y Bermoudes 2002)

Las arcillas en la zona de estudio se componen de silicatos hidratados de aluminio, con tamaño de los granos muy finos que hacen que en estado húmedo sus características de plasticidad y maleabilidad permitan una manipulación fácil, y en condición seca del suelo son duros y quebradizos. (Rizalez y González 2011) describen otros escenarios como el caso de las arcillas en Anzoátegui, Venezuela, en donde los usos son muy diversos, en su mayoría como cerámicos para la construcción; sin embargo, sus usos y aplicaciones se deben especialmente a su composición mineralógica, al estado físico y a la historia geológica del depósito en el que se encuentra el material. Por su composición natural las arcillas se originan de minerales como cuarzos, feldspatos, plagioclasas, piroxenos rutilos, limolitas y material orgánica, que dependiendo de la acidez y las condiciones de conformación del material, pueden dar origen a arcillas de tres tipos o clases, las caolinitas, las ilitas y las montmorillonitas, y se producen en ambientes que favorecen la conformación de unas o de otras en su historia geológica. Este material descrito por los autores se asemeja al de la región de la Sabana de Bogotá y su descripción permite identificar además posibles usos del material explotado para la industria.

Clasificadas las arcillas en el contexto de la ingeniería, se pueden explotar para el uso y elaboración de cerámicos, arcillas de alta horno o refractarias, para usos industriales, dependiendo del color y de la plasticidad; en general, las arcillas son suelos muy usados y muy necesarios en el contexto de la industrialización y la minería. De acuerdo al contexto de uso que se les va a dar, si se requiere explotar las arcillas para la minería, se analizan especialmente las condiciones mineralógicas de las mismas, pero si el fin es el de la construcción, es más importante el análisis de comportamiento del material, las condiciones físicas y químicas, la actividad de estas por entrada o salida de agua, con el fin de determinar si es o no viable, el material como soporte o material para las construcciones civiles en la ingeniería (Rizalez y González 2011)

3.3.2 Condición Hidrogeológica de la Zona

Desde la condición hidrológica, la Sabana del Bogotá se encuentra en una región del altiplano cuya altura se encuentra alrededor de los 2600 msnm; en esta región se presenta un régimen de lluvia que por la altura y las condiciones climáticas favorecen el ingreso y salida de agua del suelo de manera equilibrada. (Diaz-Granados y Camacho 2012), presentan que en la medida en la que se analiza el comportamiento de los ciclos hidrológicos de la región, se tienen variaciones que presentan una tendencia decreciente en las última décadas de la cantidad de agua que cae en algunas zonas de la región de la sabana, especialmente las que se encuentran alejadas de los cerros. (Pabón 2012) y (Diaz-Granados y Camacho 2012) hacen referencia a los fenómenos de calentamiento global y las variaciones que en la actualidad se presentan con respecto a las características de pluviosidad de una región determinada, y la manera como dichas variaciones climáticas ha generado cambios abruptos en los regímenes normales de caída de agua en la región por lluvia, pues se ha pasado a periodos de retorno con lluvias muy fuertes de menor tiempo, pero periodos de tiempo seco y caluroso más extendidos.

Para la zona, el informe del IDEAM, sobre las cantidades de precipitación desarrollado en el 2012, donde se identifica el comportamiento de la cantidad de agua que cae por efecto de las lluvias, muestra al altiplano en la zona de estudio en una condición muy compleja, puesto que en la zona es en una de las regiones del país en la que menos cantidad de agua lluvia cae en la región como se percibe en la Figura 3,5. En el mapa se muestran las regiones del país analizado desde diferentes enfoques de cantidad de lluvia en el que se demarca a la región de Bogotá y la sabana con precipitación anual entre 500 a 1000 milímetros, lo que para efectos del recargue de los acuíferos o de la infiltración de agua en los suelos es muy poco comparado con la cantidad de agua que puede salir, por los efectos ya mencionados.

Considerando el movimiento del agua subterránea que se compone básicamente del agua lluvia que se infiltra en el suelo para la región, se sabe que si el material es más fino la movilidad del agua dentro de la matriz de suelo va a ser más lenta, mientras que si se tiene material granular de mayor tamaño de partículas, se va a tener más espacio para que el agua fluya y con ello para la explotación de la misma. En la Figura 3,6 junto con la Tabla 3,1 muestran un perfil elaborado por INGEOMINAS como corte del mapa hidrogeológico de la zona en la cuenca del río Subachoque, perteneciente a la formación Guadalupe, pero que además tiene los perfiles de la zona con presencia de la formación Sabana y la formación Tilatá.

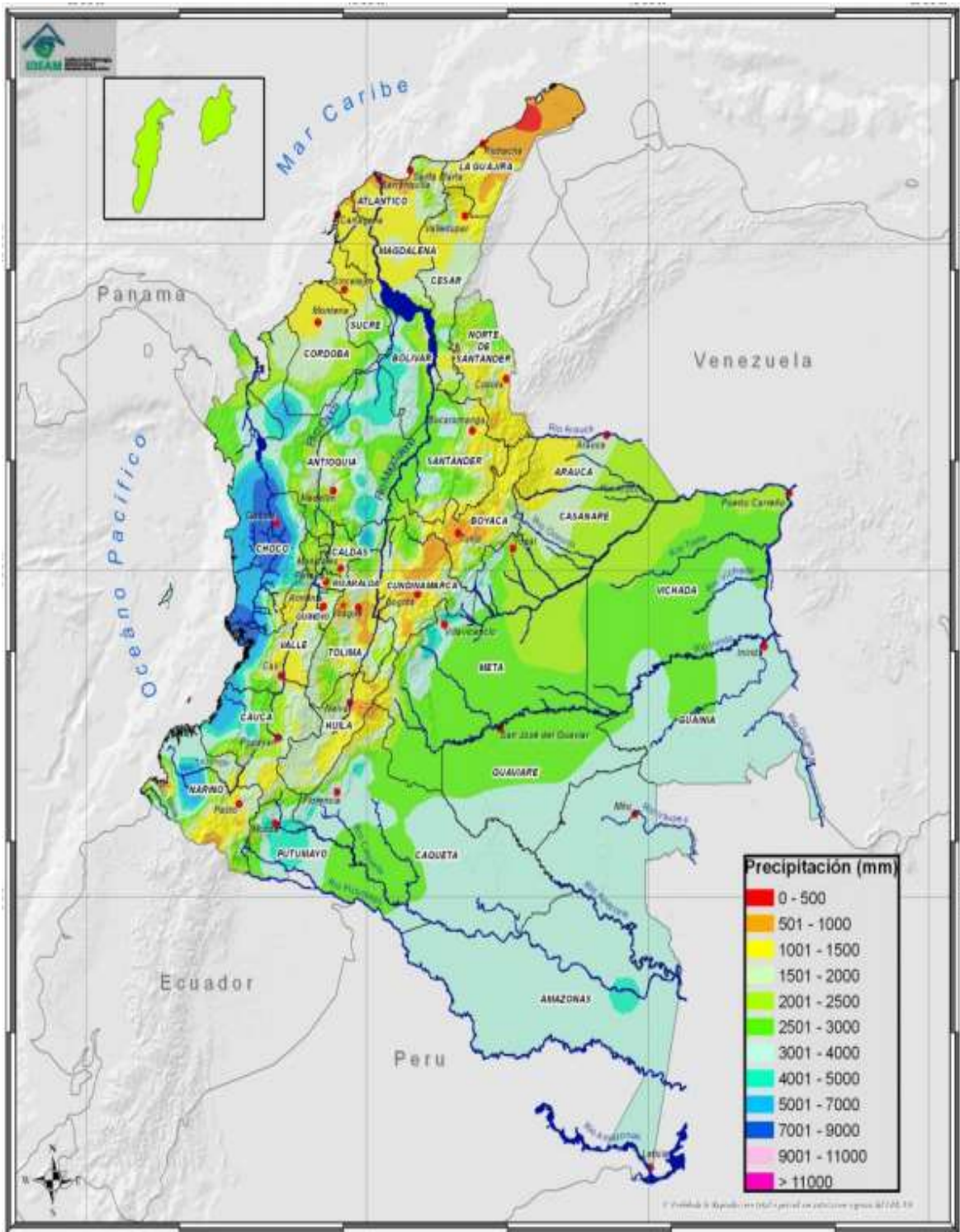


Figura 3.5. Distribución de la Precipitación para Colombia (Arango, y otros 2012)

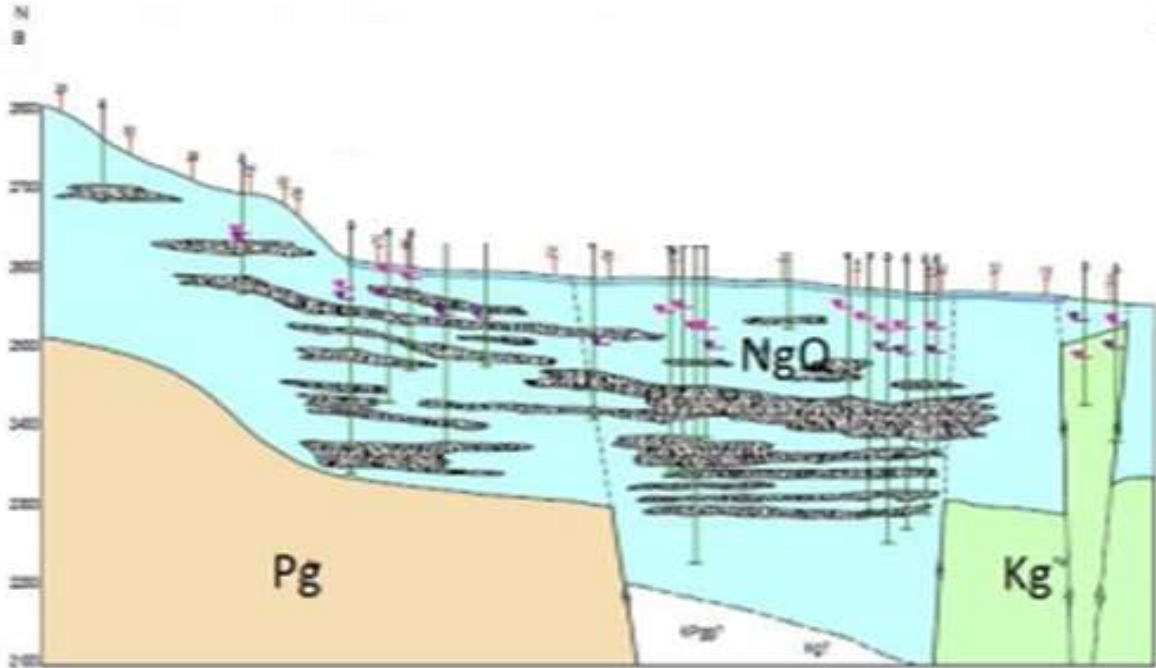


Figura 3,6. Corte B-B' del mapa Hidrogeológico en la cuenca del río Subachoque (INGEOMINAS 2002).

Tabla 3,1. Leyenda del Mapa Hidrogeológico de la Sabana de Bogotá (INGEOMINAS 2002).

	Unidades Hidrogeológicas	Características de las Unidades Hidrogeológicas
NgQ	Complejo acuífero de los depósitos no consolidados Neógeno-Cuaternario	Acuíferos discontinuos de extensión Regional y Local, conformados por sedimentos no consolidados principalmente de origen lacustre y fluvial.
Kg	Complejo acuífero Guadalupe	Acuíferos continuos de formación regional conformados por rocas sedimentarias consolidadas de ambientes marinos con porosidad primaria y secundaria.
Pg	Complejo Acuitardo del Paleógeno	Complejo regional de rocas consolidadas con composición principalmente arcillosa de origen continental, en general de muy baja productividad

Así mismo en la configuración de la región de la sabana se pueden encontrar un número considerable de pozos de extracción de agua de los acuíferos que se perciben en la Figura 3,6, de manera que en la Figura 3,7 se muestra un esquema desarrollado con base en los estudios realizados por la CAR en el 2005, donde se presenta que la zona de estudio donde se analiza el problema de las fracturas por desecación de suelos se presenta en la parte de la región donde se define la condición más crítica por el número de pozos de extracción.

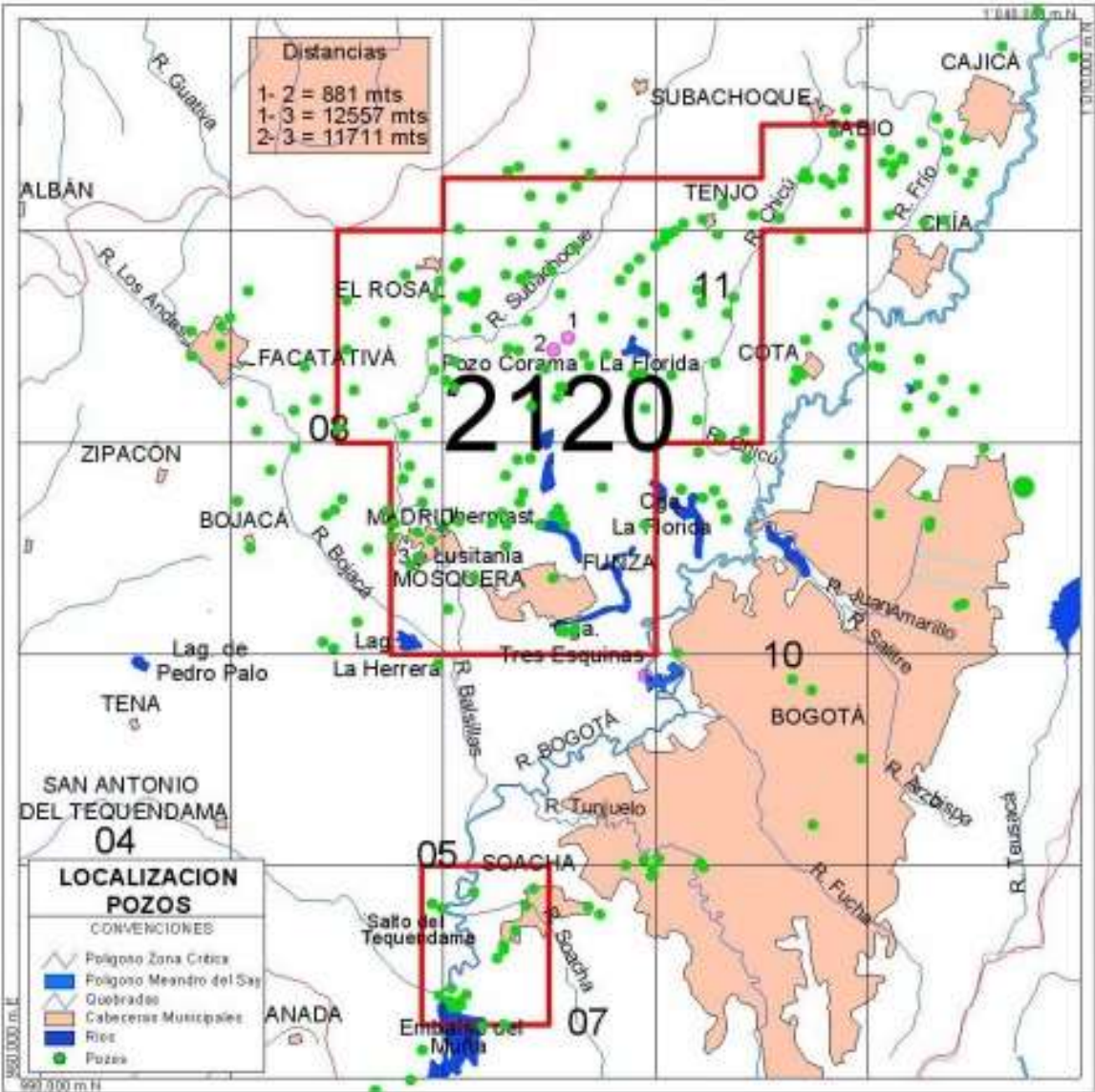


Figura 3.7. Mapa de zonas críticas de Pozos de Extracción de agua (CAR, 2008)

Se pueden ver los pozos de extracción mediante líneas verticales que llegan hasta las regiones sombreadas que comprenden estratos permeables desde donde se puede extraer el agua subterránea de una forma más ágil, sin embargo, se presume que los lentes de arena no se encuentran interconectados lo que dificulta su recargue y se produce el abatimiento del nivel freático. Se evidencia que desde la zona norte ubicada al lado izquierdo del mapa, hasta la zona sur de la región, se identifica una gran cantidad de pozos con profundidades variables mediante los que se hace la extracción de agua del subsuelo para uso en diversos servicios, que en esta región son especialmente para actividades agropecuarias.

Como se describe anteriormente, la cantidad de árboles y arbustos sembrados en la región, favorecen que la cantidad de agua que se extrae del suelo sea significativa y conjugado con la extraída de los pozos, se tenga el movimiento considerable del agua que cae de la lluvia en la matriz de material y sea rápidamente devuelta a la atmósfera por evaporación, evapotranspiración o por el uso en actividades agropecuarias o industriales que una vez utilizada se lleva a canales que la conducen a los ríos y no se retorna al suelo de la región.

Para efectos del abastecimiento, a pesar de ser un material que es altamente permeable y que el movimiento del agua en el suelo es lento, en la región de la sabana la formación Tilatá es la que tiene mejores condiciones para abastecimiento de agua para explotación debidas sus características de material filtrante. Corresponde depósitos cuaternarios de material de grano grueso del tipo areniscas cuarzosas; todo este material se encuentra envuelto en una matriz de limo-arcillosa, lo que permite que haya flujo de agua del estrato de formación Sabana (INGEOMINAS 2002).

De esta formación es de donde más se tiene extracción de agua mediante pozos que permiten la explotación principalmente con fines agrícolas. La Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) es el ente encargado de revisar el uso y abastecimiento de agua en la región; para el año 1990 la CAR tenía un inventario de 3.672 pozos de explotación de aguas subterráneas, pero en las más de dos décadas que han pasado desde este registro la zona sigue demandando

cada vez más agua y constantemente se percibe que las profundidades de los pozos se vuelven insuficientes para satisfacer la demanda. Hacia 2010 se tenía un registro de cerca de 500 pozos nuevos perforados en las formaciones cuaternarias y muchos de los acuíferos o zonas de explotación de aguas subterráneas de la región presentan desabastecimiento pues la recarga no logra recuperar los índices de descarga que se están presentando (INGEOMINAS 2010).

3.3.3 Condiciones Climatológicas

En la zona de estudio se presentan condiciones de climatología del altiplano, con altura cercana a los 2600 metros sobre el nivel del mar. La temperatura máxima promedio de la región, tomada desde cercanías a la sabana del occidente de Bogotá, se encuentra cerca a los 19°C. La temperatura ha variado como se muestra en la Tabla 3,2, donde registros históricos del IDEAM, han manifestado una tendencia leve al incremento de las temperaturas máximas en la región que comprende la zona de estudio; esta dinámica va en concordancia con los registros desde diversas estaciones a nivel mundial que dan cuenta de un incremento generalizado de las temperaturas promedio en todo el planeta. De igual manera en la Figura 3,8, muestra las variaciones de la ciudad de Bogotá medidas desde la estación meteorológica del aeropuerto el Dorado, que permite identificar los promedios de temperaturas máximas a lo largo de los meses del año. Esta estación de medición por su localización geográfica es la que presenta mayor cercanía a la zona de estudio y con la que se puede tener un punto comparativo de las características propias del entorno en el que se realiza el estudio.

Tabla 3.2. Temperaturas máximas promedio en la región

ESTACIÓN	TEMPERATURA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
APTO EL DORADO	MEDIA	13,1	13,5	13,8	14,0	14,0	13,8	13,3	13,3	13,3	13,4	13,5	13,2	13,5
	MÁXIMA ABS	24,9	24,8	24,9	23,2	23,5	23,1	22,4	23,6	23,3	23,6	24,0	23,8	24,9
	MÍNIMA ABS	-3,0	-6,4	-3,2	0,0	0,7	1,0	0,4	-1,5	-0,2	0,5	-3,0	-6,0	-6,4
	MÁXIMA MEDIA	19,9	20,0	19,8	19,5	19,2	18,6	18,2	18,5	18,9	19,1	19,3	19,5	19,2
	MÍNIMA MEDIA	5,6	6,6	7,7	8,7	8,8	8,4	7,8	7,4	7,2	7,8	8,0	6,6	7,5
APTO. GUAYMARAL	MEDIA	12,9	13,2	13,6	13,8	13,5	13,0	12,7	12,9	13,0	13,0	13,2	12,9	12,9
	MÁXIMA ABS	24,8	24,2	24,7	24,5	24,8	24,0	24,0	24,5	24,0	24,5	24,5	24,8	24,8
	MÍNIMA ABS	-2,9	-3,0	-2,0	0,0	1,0	0,1	-0,1	-1,0	-1,0	-3,0	-2,0	-3,2	-3,2
	MÁXIMA MEDIA	20,1	20,1	19,9	19,4	19,2	18,7	18,5	18,7	19,0	19,1	19,1	19,6	19,3
	MÍNIMA MEDIA	5,9	6,5	6,8	7,7	8,1	7,5	7,2	6,9	6,4	6,9	7,0	6,8	7,0
ESC. COL. DE INGENIERÍA	MEDIA	13,7	14,4	14,4	14,5	14,4	13,9	13,4	13,5	13,7	14,0	14,2	13,8	14,0
	MÁXIMA ABS	23,4	23,8	23,5	23,8	23,0	23,8	23,8	22,8	23,6	23,8	23,6	23,6	23,8
	MÍNIMA ABS	-0,4	-1,4	-2,8	1,0	3,4	1,0	1,6	1,0	1,0	1,0	2,0	-2,2	-2,8
	MÁXIMA MEDIA	20,1	20,1	19,9	19,4	19,2	18,7	18,5	18,7	19,0	19,1	19,1	19,6	19,3
	MÍNIMA MEDIA	5,9	6,5	6,8	7,7	8,1	7,5	7,2	6,9	6,4	6,9	7,0	6,8	7,0

Fuente (IDEAM y FOPAE 2004)

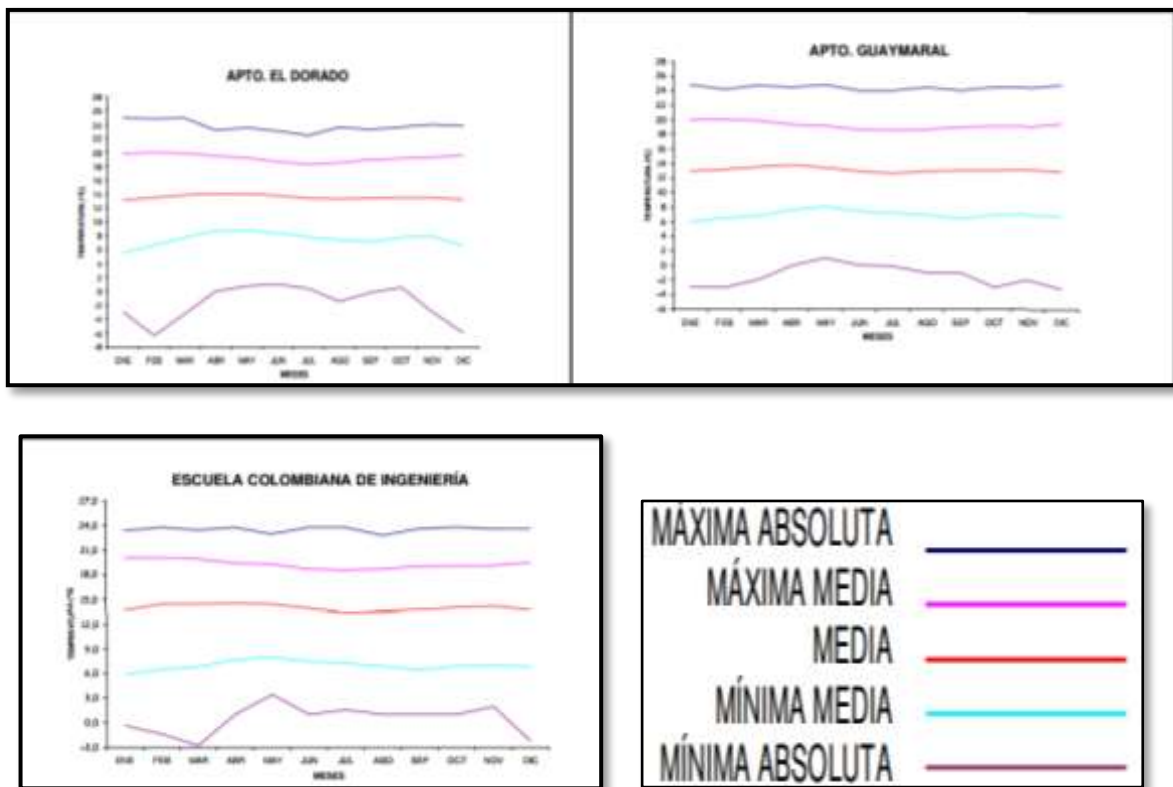


Figura 3.8. Distribución de temperaturas máximas, medias y mínimas mensuales en la sabana de Bogotá (IDEAM y FOPAE 2004).

Se puede evidenciar que en el período de estudio para el que se encuentran informes detallados de temperaturas de la zona, las tres estaciones que tienen cobertura que permite proyectar la zona de estudio, muestran una variación de temperaturas mínimas que entre los meses de diciembre y febrero bordeaban los -3 °C en las estaciones Guaymaral y Escuela, mientras que en la estación El Dorado pueden estar alrededor de los -6°C., por su parte el histórico durante el promedio de cada mes en el año las máximas absolutas se encuentran en las estaciones de El Dorado y Aeropuerto de Guaymaral con temperaturas cercanas a los 25 °C y las máximas absolutas para la estación de la Escuela Colombiana de Ingeniería presenta temperaturas cercanas a los 24 °C (IDEAM y FOPAE 2004).

La climatología del Altiplano ha presentado fuertes variaciones en lo corrido de las últimas décadas, en estudios realizados acerca del tema en los últimos años y planteando los análisis de frecuencias y modelamiento futuro de las condiciones climatológicas de todo el país, muestra que la zona de estudio inmersa en la región denominada Altiplano Cundiboyacense, donde las alturas superan los 2500 msnm, manifiesta las variaciones más complejas de temperatura debido a los efectos ambientales normales, pero incrementados en intensidad y que de alguna forma se explican con el efecto invernadero que conduce a un calentamiento generalizado de la superficie del planeta (Ángel, Ramírez y Domínguez 2010)

Los fenómenos climatológicos en la zona de estudio han venido rápidamente cambiando las secuencias presentadas en el informe que detalla el IDEAM y el FOPAE como los últimos oficiales emitidos por estas entidades; las temporadas de calor son cada vez más intensas y con temperaturas crecientes de manera frecuente se favorece la pérdida de agua del subsuelo debido a las condiciones previamente explicadas. Las variaciones climatológicas y los incrementos en la temperatura máxima promedio, dejan ver que en la región del altiplano las variaciones en los regímenes de pluviosidad ocasionan cambios volumétricos significativos en el material arcilloso que se encuentra depositado en la Sabana de Bogotá.

Los largos periodos de tiempo sin presencia de lluvias en la zona que satisfagan la demanda de agua subterránea, hacen que el nivel freático en algunos sectores descieran rápidamente, dicho descenso hace que las raíces de los árboles absorban el agua que se encuentra suspendida en los tubos capilares del material arcilloso, y esto a su vez genera fuerzas de succión sobre la matriz de suelo que han conducido a grietas en el material seco. La Figura 3,9 deja ver la superficie de falla del corte de material que evidencia una grieta en el material arcilloso, el tamaño de la misma demuestra que las fuerzas de succión generan superficies inclinadas de falla del material fino presente.



Figura 3,9. Fracturas en suelos arcillosos (Vesga, Meza y Caicedo, 2003).

La tendencia de incremento de las temperaturas sigue en su dinámica creciente, un posible modelamiento teniendo en cuenta las frecuencias climatológicas que se traen especialmente con las variaciones ocurridas en los últimos cincuenta años por Pabón (2012). Él propone que la tendencia sigue siendo al aumento de las temperaturas promedio. El incremento de temperatura genera modificaciones en

los regímenes de lluvia presentados en la zona, por tanto se va a seguir presentando déficit de agua en la medida en la que las fuentes de agua en superficie sean cada vez más insuficientes para abastecer el consumo de personas y cultivos, así como para los usos industriales en los que se requiera. En este contexto es importante tener en cuenta además, que las condiciones normales son las propuestas por el autor, sin embargo cuando se analizan los periodos atípicos como el fenómeno del Niño, la cantidad de agua que se extrae puede ser mucha y no hay reabastecimiento superficial, situación que agudiza el problema ya presentado.

Menciona también Pabón (2012) que el cambio dramático que se espera siga ocurriendo en toda la región Andina y particularmente en el Altiplano, demuestra que en la medida en que el fenómeno del calentamiento siga su rumbo con la tendencia con la que viene, es muy probable que las condiciones de lluviosidad se disminuyan y por tanto la cantidad de agua disponible superficialmente para el consumo sea cada vez menos para una población que no frena su tasa de crecimiento y con ello de demanda de agua para cultivos, ganadería y ciertamente para su propio consumo. Con estas apreciaciones dadas por Pabón, puede encaminarse el estudio entonces a que el fenómeno ocurrido en Ciudad de México en el que fue necesario extraer el agua subterránea para el consumo, pueda darse en un tiempo no muy lejano en la región y que la formación lacustre con gran contenido de agua en la que se emplaza la ciudad de Bogotá, se vea enfrentada a problemas de asentamientos significativos por la pérdida de humedad.

3.3.4 Uso del Suelo

La región además de contar con una temperatura y climatología adecuadas para la agricultura y la ganadería de altura, permite el crecimiento de vegetación que marca parámetros importantes en el comportamiento del suelo. La vegetación presente en la zona es un elemento importante a considerar en cuanto al uso del

suelo, dado que en las temporadas de sequía, la vegetación foránea fomenta la pérdida de humedad de mismo (Rueda y Pineda 2012).

Plantea Soto (2008) en su estudio acerca de la succión del agua del suelo por efecto de las raíces, que muchas de las especies que hoy se encuentran presentes en la zona de estudio, cuentan con una condición de alta resistencia a las temporadas secas, en las que el nivel del agua subterránea desciende por efectos de la evaporación y de la evapotranspiración; del mismo modo la mayoría de las especies de este tipo, cuentan con una red suficiente de raíces que favorecen que el agua presente en el suelo sea absorbida por los árboles para su supervivencia. Se plantea entonces que en temporadas normales, cuando el nivel freático comienza a descender, gran cantidad de agua es succionada por la vegetación, principalmente por los árboles de gran tamaño, esto ocasiona que la humedad del suelo se vaya perdiendo gradualmente; así mismo, cuando se llegan las temporadas de lluvia, los espacios o las zonas que se vieron afectadas por el abatimiento del nivel del agua en el suelo tiendan a recuperar los niveles normales, pero el tamaño de los ductos que favorecen el flujo del agua son tan delgados que el proceso es más demorado.

La vegetación de la zona de estudio comprende en su mayoría pastos que no son propios de la región; también hay presencia de plantas tales como pino ciprés, acacias y eucaliptos; esta vegetación cuenta con características importantes de longitud y distribución de las raíces, así como las implicaciones que conlleva este tipo de vegetación con respecto al tema de la pérdida de agua en el suelo por efecto de la evapotranspiración. Árboles como el eucalipto generan condiciones que dificultan la estabilidad o conservación de la cantidad de agua en el suelo, debido a que sus raíces son largas y con ramificaciones que hacen que el árbol absorva gran cantidad del agua presente (Rueda, 2012). El problema se agudiza debido al tipo de plantaciones de eucalyptus y pinos, así como urapanes que se ha desarrollado en la zona con rapidéz (ver Figura 3,10).



Figura 3,10. Plantaciones de árboles como cercado en la zona de estudio (Autor).

Estudios recientes reportados por (Pineda *et al*, 2015), muestran la relación que existe entre las plantaciones de árboles de diferentes tipos en la zona de estudio, con las patologías estudiadas por Rueda (2012) en las estructuras del pavimento de la región. Los resultados arrojan que efectivamente la mayor cantidad de patologías asociadas a la estabilidad de la estructura del pavimento y que se reflejan en la superficie de rodadura, se asocian de forma directa con el tamaño y tipo de árboles plantados en la zona en la que se realizan los estudios.

Del mismo modo los suelos de la Sabana del occidente de la ciudad, cuentan con otros tipos de uso que son derivados de los cultivos y plantaciones que se desarrollan en la zona; en las últimas décadas con la generación de nuevos mecanismos y técnicas de cultivo, así como de la adaptación que se puede realizar de cultivos con condiciones que favorecen una mayor productividad, ocasionan una significativa demanda de agua para abastecer los cultivos mediante la irrigación, así como para el proceso de beneficio o cosecha que se realiza durante diferentes temporadas del año. En el sector desde la producción agrícola, se cuenta con cultivos en invernaderos de flores, hortalizas y otros productos para el consumo, así como pastos para la ganadería, demandan cantidades

considerables de agua. Gran parte de la cantidad de agua demandada debe extraerse de pozos mediante los que se logra el abastecimiento, pero que conducen al abatimiento del nivel freático de manera diferencial y más acelerada cerca a los pozos (Rueda, 2015).

3.4 DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS DE LA REGIÓN

La sabana del occidente de Bogotá por su conformación geológica, presenta de modo característico fuertes cambios volumétricos ligados a la pérdida de humedad. La salida del agua por condiciones naturales debidas a las raíces de los árboles o a los procesos de evaporación del agua en las temporadas de calor, así como por la extracción de agua subterránea para actividades del hombre, y conjugado con las condiciones propias del suelo debido a sus índices de contracción, generan la aparición de grietas debidas a las fuerzas de succión del suelo que desencadenan la conformación de redes de fisuras que en profundidad se reflejan en forma de columnas de arcilla que se van extendiendo desde la superficie del terreno normalmente hasta la profundidad del nivel freático del suelo. Vesga, Meza y Caicedo (2002), Pineda y Colmenares, (2006), Rueda, (2012), Pineda, García y Cabana (2014), Pineda y García (2014), han adelantado diferentes estudios en la zona que llevan a comprender las complicaciones que se producen en un territorio en terreno arcilloso como es el caso de la zona de estudio, cuando se pierde la cantidad de agua necesaria requerida para las condiciones normales de estabilidad del suelo y las consecuencias tanto superficiales como de capacidad, a las que se ve enfrentado el entorno con el abatimiento acelerado del nivel freático.

La pérdida de agua subterránea que se presenta en la zona del occidente de Bogotá se ha identificado en diferentes lugares del mundo y ha sido analizado por diversos investigadores que han concordado en que el abatimiento del nivel de agua en suelos arcillosos completamente saturados y a los que se les extrae el agua contenida, presentan cambios volumétricos por efecto de los fenómenos de

contracción de las arcillas como una propiedad intrínseca del material. Estos cambios volumétricos del material y las variaciones que se evidencian desde la superficie del terreno son identificadas con la subsidencia de suelo Vesga, Meza y Caicedo (2002), Pineda y Colmenares (2006), Garzón (2011), Rueda, (2012), Pineda, García y Cabana (2014).

Para Helmes y Van Der Hammen (1995) los suelos arcillosos que se encuentran en la zona del occidente de la ciudad de Bogotá presentan un comportamiento que se ha visto afectado por la extracción de agua. Esta formación está constituida principalmente por arcillas y hacia las márgenes de la cuenca se localizan arcillas orgánicas, arenosas y turba-lignita. Este depósito tiene por lo menos 320 m (pozo Funza II), está constituido por sedimentos finos y en los dos metros superiores son suelos constituidos por cenizas volcánicas; en general son arcillolitas grises con locales intercalaciones de arenas finas y niveles delgados de gravas y turbas.

Según la descripción del estado natural del suelo presentada por Vesga, Meza y Caicedo (2002), en la zona mencionada del occidente de Bogotá se tienen dos horizontes principales:

- Una capa superficial conformada por suelos orgánicos de unos 20 a 30 cms.
- Dos intercalaciones de cenizas volcánicas con un espesor típico de unos 20 a 30 cm la superior de color pardo, y una inferior con espesor de 10 a 20 cm de color amarillo claro.
- Arcillas habanas y grises de diversa consistencia y humedad, pero con tendencia a disminuir de resistencia con la profundidad y a aumentar su humedad en el mismo sentido.

En la zona de estudio según pruebas de campo realizadas en el contexto del proyecto de investigación, se realizaron varios sondeos de exploración de suelo arrojando unos estratos compuestos en los que se encuentran materiales diversos como arenas, arcillas, limos y turbas aún en proceso de descomposición como se

percibe en la Figura 3,11. Del mismo modo en los estratos superiores más cercanos al nivel superior de la subrasante se encuentra que el material está ya mezclado con la estructura del pavimento que se instaló en el momento de la construcción de la carretera en la región, además de demostrar que por un largo tiempo la carretera se conformaba por recebo afirmado sin pavimentar y posteriormente se realizó la instalación de una carpera con un mejoramiento bastante leve que no comprende un diseño de pavimento.

En el informe realizado por los asistentes de investigación, se muestra los perfiles de cuatro apiques realizados en los que se tomaron muestras alteradas de suelo para desarrollar las respectivas clasificaciones del material del sitio, así como de la toma de algunas muestras inalteradas para análisis especializados en los que se logra generar un perfil estratigráfico de 14,5 metros de profundidad en el punto de pruebas ubicado en el km 11 en dirección NW-NE Ver Figura 3,11.

PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL
0 - 1.50	Limo con suelo orgánico y arena de relleno color amarillo, presenta material granular usado como soporte de la vía existente. Tipo DL
1.50 - 7.00	Arcilla Limosa café con oxidaciones, levemente fisurada, humedad media, consistencia media-alta, plasticidad baja Tipo CL
7.00 - 10.00	Arcilla gris verdosa de humedad alta consistencia baja y plasticidad media - alta Tipo OH
10.00 - 20.00	Arcilla gris oscura, de humedad alta consistencia baja y plasticidad alta Tipo CH

Figura 3,11. Estrato de subrasante en km 11, sentido NW-NE (Arias, 2015).

La construcción de pozos para la extracción de agua, para fines principalmente de consumo humano o para riego, es otro de los aspectos que tiene relación directa y significativa en el proceso de abatimiento del nivel freático suelos arcillosos. En la zona el problema apenas inicia, el uso de los sistemas de riego que son utilizados para la ganadería y en cultivos industriales de flores, el cual corresponde a una de las principales actividades agrícolas de la región sabana del noroccidente de Bogotá, que ocupa un total de 4.043 hectáreas de terreno según datos del plan de ordenamiento territorial de la cuenca alta del río Bogotá, hacen que se comience a percibir la fuerte demanda de agua que se extrae del subsuelo y que no se repone de manera normal. Los municipios de la región sabana donde se cultivan las flores son Anolaima, Bojacá, Cota, El Rosal, Facatativá, Funza, Madrid, Mosquera, Subachoque, Tenjo, Nemocón, Zipaquirá, Cajicá y Zipacón; estos municipios demandan cantidades considerables de agua para irrigación en condiciones controladas para el cultivo de las flores, por ende, los propietarios abastecen sus cultivos con agua extraída del subsuelo mediante pozos o acuíferos que permiten el uso del agua subterránea sin tratar, dado que el agua de escorrentía superficial no abastece las necesidades de todos. La Figura 3,12 muestra la incidencia que representa la extracción de agua del suelo y la posible fractura del material en la zona de estudio, lo que genera que los postes de energía se inclinen incluso representando un riesgo para los usuarios de la región.



Figura 3,12. Impacto de la desecación en postes de energía eléctrica (Autor).

En los suelos finos y especialmente en las arcillas blandas de la zona de estudio, se producen por los factores naturales o artificiales mencionados, algunos procesos de retracción de las arcillas debido a la succión matricial, lo que inicialmente ocasiona un asentamiento unidireccional, y posteriormente se generan agrietamientos por la expansión y retracción de la arcilla, que pueden llegar hasta una profundidad equivalente al nivel freático, tal profundidad se conoce como “Altura de grietas”, esta condición depende del sector y de la influencia de salida acelerada del agua que contiene la matriz de suelo arcilloso (Vesga, Meza y Caicedo 2002).

Estudios previos proponen que se han registrado sitios en los que las grietas llegan hasta de 20 metros de longitud superficial, 5 cm de abertura y más de 6 metros de profundidad en el perfil estratigráfico de suelo. El agrietamiento puede ser muy profundo, dependiendo de las condiciones de abatimiento del nivel

freático que tiende a profundizarse aún más en épocas secas produciendo un desconfinamiento total del suelo generando un medio discontinuo formado por “columnas de suelo” que a la postre tienen dos tipos de falla principales; por pandeo y por cortante o cizallamiento (Vesga, 2000).

En la región se han visto cómo las obras viales especialmente, pero algunas otras edificaciones, se han afectado por los fenómenos de desecación que se originan debido a que la cantidad de agua por efecto de las precipitaciones y la escorrentía superficial, no son suficientes para mitigar los efectos de pérdida de humedad que se producen por la evapotranspiración del suelo por la vegetación, la succión que las raíces de árboles grandes de la zona ocasionan, la extracción de agua por pozos elaborados, entre otros factores ambientales y artificiales que hacen que el suelo pierda agua. La Figura 3,13 se muestra la manera como varía la saturación del suelo en los dos sondeos realizados en el estudio, esto se presenta debido a la diferencia en los factores que influyen en la salida de agua del suelo de la región en estudio (Pineda y García, 2014).

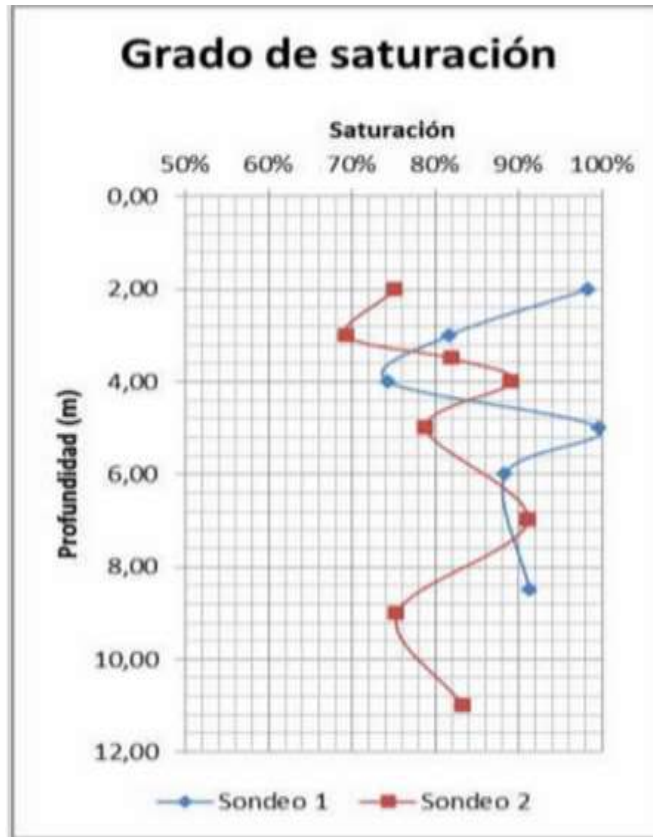


Figura 3,13. Grados de saturación de los sondeos (Pineda y García, 2014).

En estos estudios, además de analizar los asentamientos de la superficie del suelo que se producen, se hace una revisión de los efectos de la succión de los suelos ante la pérdida de humedad de manera gradual; los suelos cohesivos presentan una reacción muy sensible con la acción del agua, y en la medida en la que un suelo cohesivo pierde humedad, va presentando una variación en la relación de las presiones normales del suelo y se van ocasionando presiones de poros negativas por succión; estos cambios de presión de hidrostática por debajo del nivel freático a presión de succión, repercuten en la aparición fisuras que van separando las partículas de suelo arcilloso, liberando las tensiones, y configurando columnas de material reacomodado en el suelo (Pineda y García, 2014).

3.5 RESÚMEN DEL CAPÍTULO.

La zona de estudio se encuentra localizada en la Sabana del occidente de Bogotá, con una altura que oscila alrededor de los 2.600 msnm., y que tiene temperaturas promedio que oscilan entre los 5 °C y los 19 °C durante el año. La cantidad de precipitación que cae en la región oscila entre los 500 a los 1.000 milímetros, sin tener en cuenta los periodos de retorno atípicos como el fenómeno del niño (verano intenso) y de lluvias torrenciales (Inviernos prolongados). De la misma manera identificado el tipo de suelo, se puede ver que la región se ubica sobre material preferentemente fino que impide el paso libre del agua y su movimiento rápido tanto para la explotación del agua subterránea, como para el reabastecimiento de la misma.

En la región la demanda de agua se hace cada vez mayor, el caudal del río Bogotá, conjugado con los altos niveles de contaminación, hacen que muchos hayan decidido realizar sus propios pozos de suministro mediante la explotación del agua del subsuelo, lo que favorece el abatimiento acelerado de las aguas subterráneas por efectos antrópicos. Del mismo modo, la proliferación de especies arbóreas diversas de gran tamaño y con un desarrollo radicular complejo y de gran longitud, permiten también que la cantidad de agua que se extrae del suelo sea significativa, y que las presiones de succión que se producen sean considerables.

Por otra parte, en la región dado el proceso de desecación de los suelos por los efectos mencionados, se generan grietas por los esfuerzos de succión matricial ocurridos en el material, lo que ocasiona la apertura de grietas a diferentes profundidades, que se pueden originar directamente en superficie o se pueden producir en los estratos arcillosos cercanos a la superficie por debajo de la capa orgánica. El desarrollo de las grietas generadas ha permitido la conformación de columnas de material de secciones transversales que dan lugar a columnas que tienden a fallar por su peso propio, por ello se espera que la acción de cargas dinámicas debidas al tráfico o a los movimientos sísmicos hagan fallar más fácilmente el sistema.

4. INFLUENCIA DE LA DESECACIÓN EN ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO

4.1 INTRODUCCIÓN

En el desarrollo económico de una región es fundamental que la infraestructura vial cuente con las condiciones necesarias y las deseables que favorezcan la competitividad y las posibilidades para el logro de los objetivos económicos propuestos para dichas regiones. Es por ello que tener buenas vías, favorece además de la movilidad, el desarrollo social y económico de un sector; sin embargo, cuando las vías presentan fisuras, hundimiento u otras patologías, se pierde nivel de servicio, la vía se hace más lenta y se generan repercusiones desde diferentes enfoques en el sector afectado. Rueda (2012) menciona que los daños se producen en la estructura del pavimento y que se reflejan en la superficie de rodadura, reducen el espacio de la carpeta para movilizarse cómodamente y favorecen la ocurrencia de accidentes al intentar esquivar los daños, o en su defecto, la disminución significativa de las velocidades de operación posibles para los vehículos.

Para garantizar un adecuado nivel de servicio, es necesario tener las condiciones ideales para que los vehículos se movilicen de un lugar a otro sin presentar problemas de obstáculos que reduzcan los tiempos de recorrido; es por ello que cuando se realiza el diseño geométrico de una carretera, se tienen en cuenta aspectos del tráfico y del tipo de vía que se espera construir, de tal manera que se cuente con los anchos suficientes de carril para la movilidad, los bermas que favorezcan las posibles detenciones momentáneas, las cunetas con las que se protege a la estructura de pavimento del ingreso de agua, además de contar con una superficie de rodadura llana y uniforme que se diseña con el alzado o perfil longitudinal, así como sistemas de drenaje adecuados, todo esto con el fin de satisfacer las necesidades básicas de los usuarios de una carretera: comodidad al

conducir, seguridad en la operación y rapidéz que agilice los tiempos de tráfico (Bañón y Beviá, 2000).

La zona en estudio presenta problemas de movilidad debidos condiciones de diseño geométrico, dado que es una vía que tiene un ancho de carriles de vía de baja velocidad, no tiene bermas ni cunetas, lo que hace que la percepción del conductor durante el recorrido sea de inseguridad ante los posibles obstáculos cercanos a su carril de operación. De la misma manera la movilidad se afecta de forma considerable por los diferentes tipos de patologías de los pavimentos de las carreteras que unen a los municipios entre sí, y a estos con la capital del país. En la carretera que conduce entre la vereda de Siberia y Tenjo en Cundinamarca, se ha venido identificando la incidencia de la pérdida de continuidad de la subrasante por la pérdida de humedad progresiva que tiene lugar mediante el fenómeno de desecación. Asentamientos diferenciales, hundimientos lineales o en media luna, fracturas en los extremos del pavimento y en ocasiones fallas completas en la estructura del pavimento, son entre otras, algunas de las patologías que se perciben en las vías de ésta zona de la Sabana (Pineda y García, 2014).

(Pineda, Murillo y Colmenares 2015) mencionan que la afectación de los árboles es el factor de mayor relevancia en las patologías que presentan los pavimentos de las carreteras de la Sabana del occidente de Bogotá. La descripción presentada muestra que en largos periodos secos el agua libre en el suelo arcilloso es succionada y liberada a la atmósfera por procesos naturales debidos a las condiciones de evapotranspiración y fotosíntesis de las plantas, lo que ocasiona que el suelo cercano a los arboles se contraiga por la pérdida de humedad y desencadene daños en la estructura del suelo por dicho fenómeno. El estudio concluye que los daños son congruentes con la cercanía y tamaño de los árboles de cada uno de los sectores analizados y las patologías en las zonas de mayor influencia son mucho mayores que las de árboles más pequeños y alejados de la banca de la carretera.

En la región se identifican problemas asociados al colapso de estructuras livianas y pavimentos debidos al fisuramiento de las arcillas superficiales en algunos sitios en particular, los municipios de Cota, Tenjo y Funza, entre otros corredores mucho más importantes respecto a la movilidad como es el acceso por la zona Norte a la ciudad de Bogotá. Desde el punto de vista técnico, la intervención que se realiza en los sitios en los que se evidencian problemas de esta índole, generalmente consisten en reparcheos o cambio de parte de la estructura y de la carpeta de rodadura, dado que el tratamiento de patologías ligadas a subrasantes fisuradas suele ser oneroso (por ejemplo inyecciones de cal o aceite sulfonado, acompañadas de rehabilitaciones locales) (Rueda, 2012), por tal motivo se hace relevante buscar alternativas o métodos de rehabilitación prácticos que puedan ser implementados para dar solución a este tipo de inconvenientes (Pineda *et al* 2013) (Vesga, Meza, y Caicedo, 2002).

El estudio de estos fenómenos ha sido evaluado por diferentes investigadores, y han llevado a la identificación de posibilidades de estabilización de las arcillas como las inyecciones de material estabilizante que pueda mejorar las condiciones de calidad del material (Rodríguez, 2005); sin embargo, como estas fallas de material se presentan normalmente desde el nivel freático, las profundidades de las grietas pueden originar que las inyecciones de lechadas sean tan costosas que la solución sea inviable para un proyecto de infraestructura vial para el sector; además, estas inyecciones vuelven inviable la metodología para el tratamiento del problema dado que no solucionan el problema de fisuras de los materiales arcillosos, son más un paliativo para mitigar los daños durante periodos de tiempo que varían de acuerdo con los niveles de agua en el suelo (Pineda y García, 2014).

En este capítulo se asocia el problema de la desecación de los suelos arcillosos de la zona de estudio y la relación con fallas que se pueden encontrar en la subrasante; del mismo modo toca los problemas básicos y fundamentales que se producen en la zona de estudio, además de la identificación de la problemática

que se ha presentado en otros lugares donde existen grandes depósitos de material arcilloso y en donde se han identificado patologías por efecto de la falla de las columnas de material que se generan cuando el material sufre esfuerzos de succión efecto de las presiones intersticiales y de los árboles que ocurren con el descenso del nivel freático y la desecación del suelo se incrementa.

4.2 DEFORMACIONES DE SUBRASANTES SOBRE SUELOS ARCILLOSOS

Las subrasantes conformadas por arcillas blandas se han analizado por largo tiempo, dado que el comportamiento de este tipo de material favorece las deformaciones en superficie de manera significativa debido a la baja capacidad portante y alta compresibilidad con la que este tipo de material cuenta, ya revisaban el comportamiento de suelos arcillosos y los problemas de deformaciones en las estructuras de pavimento, lo que los llevó a implementar una simulación numérica con el fin de reforzar la estructura del pavimento en las capas granulares, de manera que se mitigaran las deformaciones en la superficie de rodadura y que se disminuyera el espesor de las mismas, dado que combatir la inestabilidad de la subrasante puede ser mucho más costoso que realizar un reforzamiento (Love *et al*, 1987)..

Los autores identificaron las condiciones mecánicas de un tipo de suelo blando con características altamente deformables; posteriormente se generó un modelamiento matemático mediante la metodología de elementos finitos y se modela con la aplicación de una carga tipo zapata, correspondiente a anchos de llanta entre 8 cm y 15 cm, variando los anchos para identificar la acción de cada uno de ellos en condiciones estáticas y se modeló usando las condiciones normales de la estructura del pavimento. Después se aplicó un reforzamiento tipo geomalla en la parte baja de la capa granular usada como base de soporte y se modeló nuevamente con el fin de identificar si presentaban variaciones en su comportamiento.

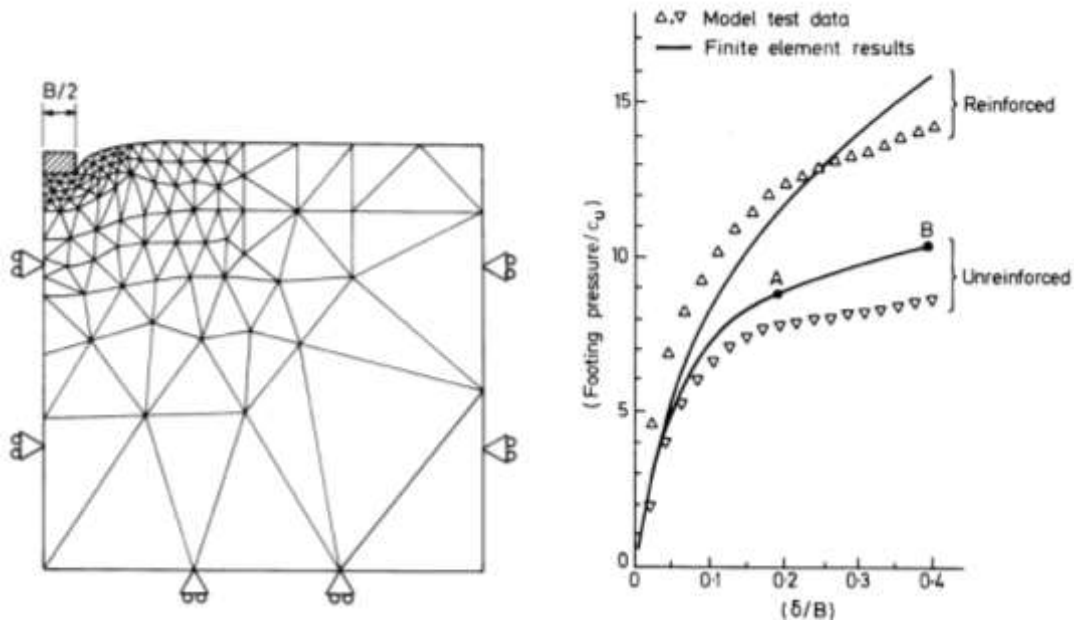


Figura 4,1. Modelamiento de pavimentos reforzados con geomallas (Love *et al*, 1987).

El modelo realizado con un tipo de refuerzo de malla triangular geosintética, permitió identificar que en el mecanismo de análisis, considerando el comparativo que se muestra en la Figura 4,1, muestra que las variaciones de la presión de contacto contra la resistencia del material de subrasante, correlacionada como la penetración o deformaciones en superficie de la calzada, contra el ancho de aplicación de la carga, deja ver que las resistencias del material mejoran en casi un 50% a las que se muestran en condiciones semejantes pero de capas granulares sin reforzar (Love, y otros 1987). Este desarrollo llevado a cabo hace casi 40 años, es el inicio en el análisis numérico para la posible simulación del comportamiento de los materiales blandos y una manera de mitigar la afectación que generan las cargas específicamente sobre la superficie de rodadura. En el estudio se encuentra además que las diferencias entre la parametrización de las cargas aplicadas contra los anchos de base de aplicación de la carga para presiones en las zapatas analizadas (ver Figura 4,2).

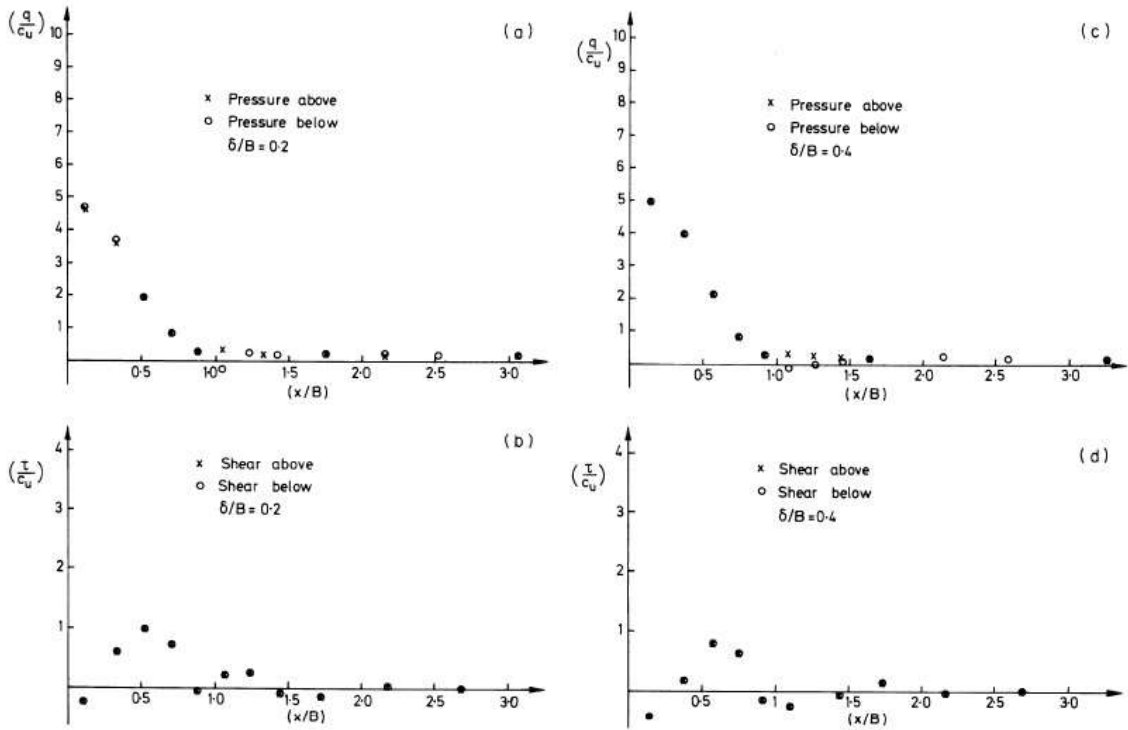


Figura 4.2. Esfuerzo normal σ y esfuerzo cortante τ para capas de arcilla no reforzada (Love *et al*, 1987).

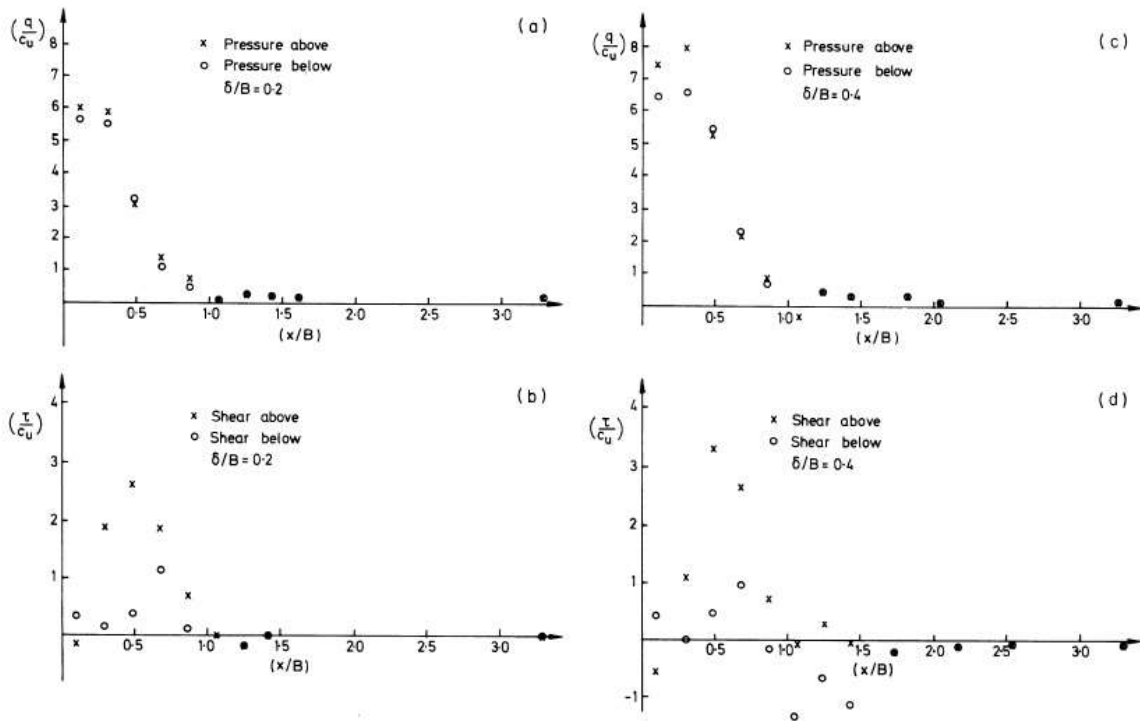


Figura 4.3. Esfuerzo normal σ y esfuerzo cortante τ para capas de arcilla reforzada (Love *et al*, 1987).

En las Figuras 4,2 y 4,3 se permite ver las relaciones que se generan en el modelo para cuatro tipos de condiciones paramétricas de presiones de carga por efecto de zapatas y de esfuerzos de corte en la parte inferior del suelo de soporte arcilloso que recibe las cargas variables en el modelo matemático realizado por (Love *et al*, 1987). En el eje de las (y) se encuentra la carga impuesta en el suelo por efecto del sobrepeso y en el eje (x) se encuentra la relación paramétrica (x/B), donde (B) es la base de aplicación de la carga y (x) es cualquier punto desde el eje de simetría. Se concluye en el estudio que cuando los suelos son reforzados con geomallas, las relaciones demuestran que las deformaciones en superficie y en profundidad varían de manera considerable que cuando se modela sin reforzamiento. Al igual que en el modelo de estudio, se tienen en cuenta los modelos matemáticos usando cargas estáticas para simular la respuesta del suelo y la manera como éste se deforma en el tiempo antes y después de reforzar teniendo en cuenta la misma carga aplicada.

El problema de las fisuras en arcillas se hace visible también en Japón, (Chai y Miura 2002) analizaron arcillas de la población de Saga en el país asiático, en ellas encontraron que las deformaciones que presentaban los pavimentos en la superficie demostraban que eran irreversibles y llevaban a comprender que el suelo blando no era lo suficientemente resistente para soportar las cargas del tráfico. El análisis de los materiales se realizaron mediante tres pruebas de material de la zona, la primera tomada en el aeropuerto de la ciudad de Saga, la segunda en cercanías a la alcaldía de la ciudad y la tercera en una variante de la carretera 34, que es una vía nacional. Esto debido a que las características del tráfico son elevadas comparadas con las características de la movilidad en regiones cercanas.

Los análisis desarrollados mediante métodos empíricos para el diseño de pavimentos permite identificar las estructuras normales partiendo de unos mínimos estipulados de deformaciones verticales y de esfuerzos de tensión permisibles en las estructuras de pavimento que se requieren diseñar. Se identifica que los

espesores dependiendo del sector de vía oscilan entre los 0,75 metros y los 2,7 metros, y las deformaciones son aceptables para estos tipos de estructura (ver Figura 4,4). Además se comprueba que el uso de métodos analíticos comparado con el uso de los empíricos, favorecen la mitigación de las demandas de material debido a los ajustes que se pueden hacer, lo que implica que pasar de modelos de diseño de pavimentos de lo empírico a lo analítico puede garantizar mejores niveles en la precisión del diseño propuesto (Chai y Miura 2002). Este estudio se vuelve muy importante dado que se sigue fortaleciendo la idea de que el uso de modelamientos matemáticos con herramientas digitales cada vez más robustas y con la posibilidad de incluir más variables, puede mejorar la calidad en los diseños disminuyendo los espesores de capas del terraplén necesario como mejoramiento previo a la instalación de la estructura del pavimento. En el caso de los suelos que se hacen discontinuos por la contracción por desecación, el uso de estas herramientas favorece mejores acercamientos a los resultados más precisos.

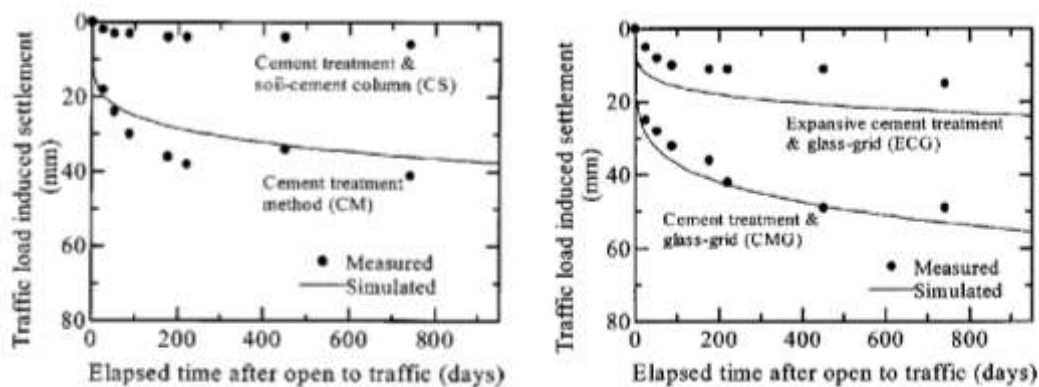


Figura 4,4. Asentamientos modelados para refuerzos en suelos blandos (Chai y Miura 2002).

Otros estudios también desarrollan un análisis de las condiciones de los suelos blandos y las complicaciones que estos presentan por las deformaciones, para ello identifica el comportamiento de reforzamientos con geosintéticos tipo geomallas en carreteras no pavimentadas, en ellas se plantea como una solución, colocar de un mejoramiento de material debido a que los suelos no son suficientemente resistentes con material granular en tres capas que fueron reforzadas con

geomallas para ganar estabilidad en la estructura de material compactado (Hufenus *et al*, 2006). En el estudio se realizó un modelamiento matemático mediante elementos finitos de la subrasante arcillosa y el mejoramiento con material granular que se coloca en tres capas, además se construyó un tramo de pruebas en el que se identificaron las condiciones reales de comportamiento de cada una de las capas con el reforzamiento, con el fin de contrastar la deformaciones encontradas en campo con los resultados de los modelos matemáticos (Ver Figura 4,5).

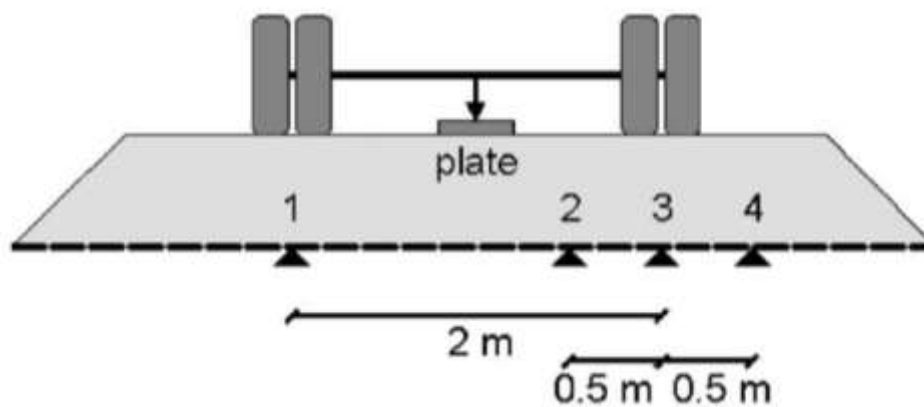


Figura 4,5. Posicionamiento del plato de pruebas en tramo de prueba (Hufenus *et al*, 2006)

El modelamiento permitió identificar que las deformaciones superficiales en la estructura de material granular usada para mejorar la rodadura en las líneas de huella de las ruedas, presentaban un comportamiento mecánico, que sin reforzar, evidenciaban deformaciones significativamente mayores a las encontradas tanto en el modelamiento como en las pruebas de campo con el material de mejoramiento reforzado con las geomallas. En la Figura 4,6 se muestra el comportamiento obtenido de las deformaciones en el nivel superior de la subrasante y los datos tomados del medidor de esfuerzos de tensión en la parte baja de la carpeta en la zona cercana al eje de aplicación de la carga. Este comportamiento es lógico conforme a la localización de los puntos, dado que los puntos 1, 2 y 3 presenta esfuerzos contrarios comparados con los del punto 4.

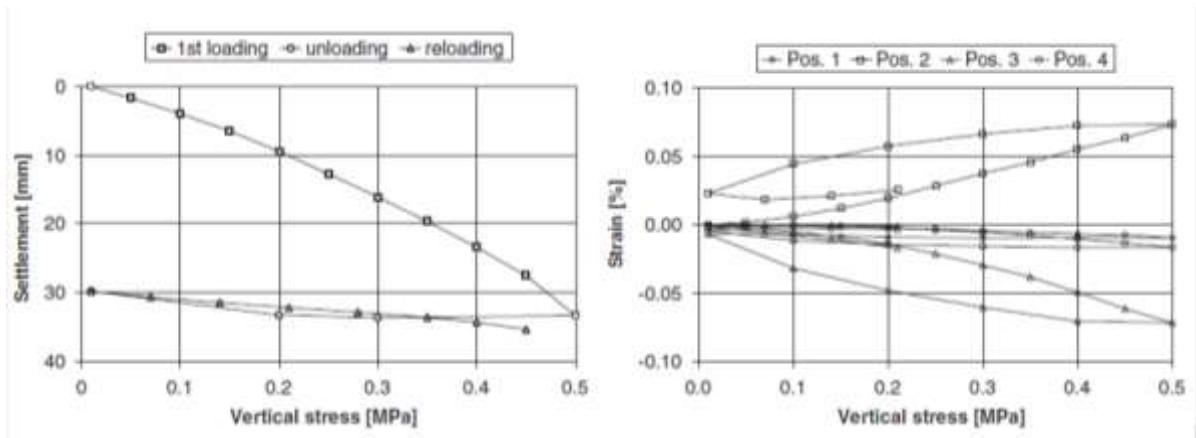
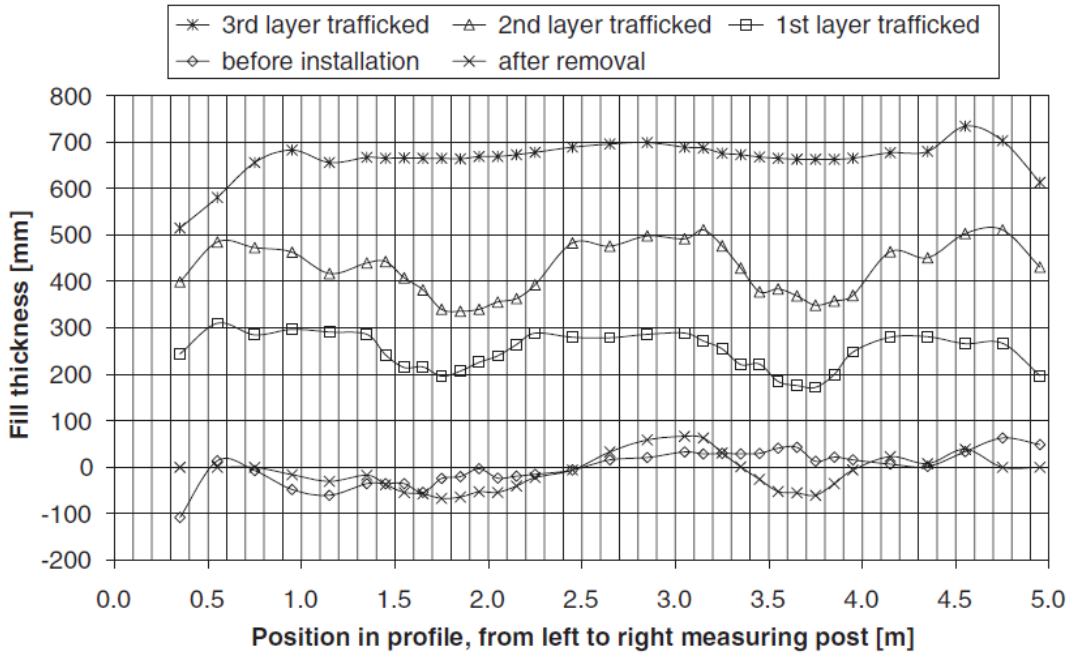
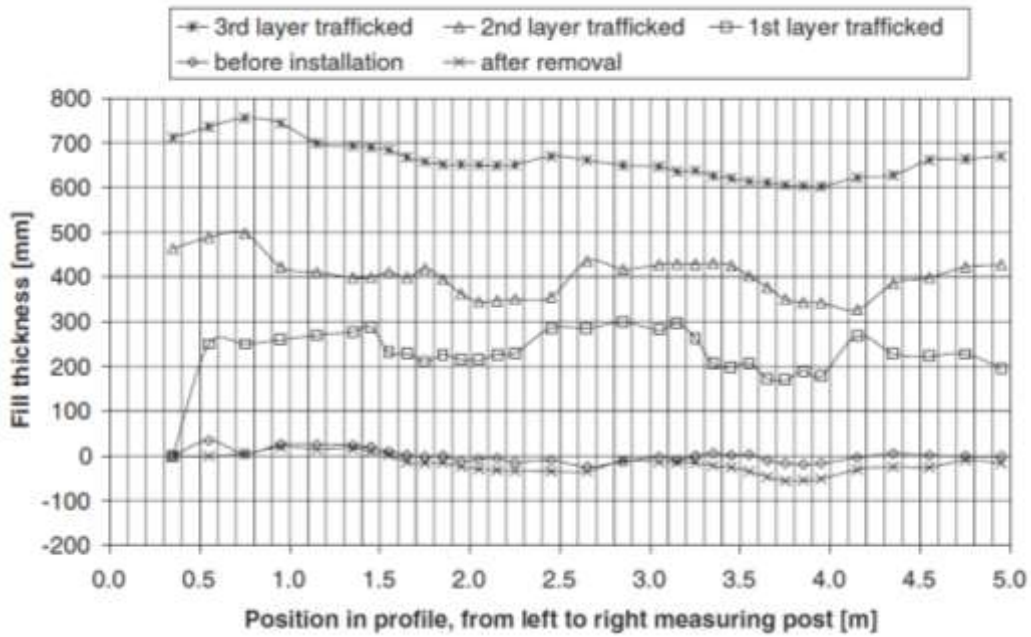


Figura 4.6. Comportamiento de asentamientos y tensiones en pruebas de campo para sensor de pruebas (Hufenus *et al*, 2006).

Del mismo modo se identificó que la acción de las geomallas en la mitigación de las deformaciones en superficie del material compactado es superior cuando las capas son más delgadas, dado que el espesor de material en sí mismo ayuda en la redistribución de cargas, por lo que con espesores mayores, para este último caso las geomallas demostraron una acción de confinamiento y resistencia menos eficiente que para capas más delgadas de material (Hufenus *et al*, 2006). La Figura 4,7 presenta los resultados gráficos comparativos de una estructura de similares características en el tramo de prueba, en el que se miden las configuraciones de huella en las zonas cercanas a los ejes en la superficie de cada una de las capas medidas de izquierda a derecha; en la parte (a) se muestra la estructura sin reforzar, mientras que en la (b) se percibe la disminución de las deformaciones cercanas a las huellas en el tramo de prueba reforzado. Cuando los suelos son blandos, presentan una elevada susceptibilidad a las deformaciones verticales por efecto de las cargas de tráfico como lo proponen entre otros autores (Love *et al*, 1987), (Vesga, 2000), (Vesga, Meza y Caicedo 2002) (Chai y Miura 2002), (Hufenus *et al*, 2006), (Pineda y García, 2014), quienes concuerdan que dichos suelos son altamente afectados con deformaciones que pueden ser considerables y que llegan afectar en gran medida la calidad de una estructura de pavimento, lo que redundaría en la disminución de su nivel de servicio y perjuicio en la seguridad y la comodidad en la operación por parte del usuario.



(a)



(b)

Figura 4.7. Variación de las deformaciones medidas en la superficie de cada capa antes y después del reforzamiento (Hufenus *et al*, 2006).

Los suelos arcillosos blandos que además de tener una baja capacidad portante pierden humedad (Vesga, 2000) y, por ende, son sometidos a desecación, manifiestan altos índices de vulnerabilidad a la falla por efecto de las deformaciones debidas a las cargas dinámicas, y a cargas estáticas tales como la estructura de pavimento que se ubica sobre la subrasante arcillosa y el peso propio del material en la medida en la que se forman columnas de material. En una estructura de pavimento elaborado sobre subrasantes fisuradas, las afectaciones ocasionadas en la superficie de rodadura pueden ser desde simples asentamientos casi imperceptibles hasta fracturas considerables de la totalidad de la estructura; todo depende del mecanismo de generación de las columnas de material y las dimensiones de los elementos conformados en material antes del colapso (Rueda, 2012). La falla de suelos en suelos usados como potrero, tiene afectaciones directas por las raíces superficiales; sin embargo, no genera grandes dificultades además de la inadecuada movilidad para las personas y animales que transiten por el sector. Cuando la succión ocasiona fisuras amplias, las estructuras del pavimento pueden presentar daños estructurales que demandan la demolición y reemplazo completo, lo que redundaría en elevados costos de reparación.

4.2.1 Origen de Patologías en Estructuras de Pavimento

El análisis que se realiza de modo cotidiano a los suelos, y especialmente los suelos arcillosos, comprenden consideraciones del material ideales, que identifican a los suelos como materiales isotrópicos, homogéneos y continuos; estas condiciones se alejan de la realidad, dado que cuando el suelo pierde humedad, los esfuerzos presentados en el material ocasionan fracturas y se produce un cambio de comportamiento que no es posible medir asumiendo condiciones idealizadas al momento de analizar el material en el que claramente se tienen comportamientos muy diferentes. Las fisuras generan elementos discontinuos tipo columnas, en las que el peso de la arcilla sobreconsolidada por la pérdida de agua, caracterizan materiales diferentes por encima y por debajo del nivel freático, incluso materiales diferentes en las mismas columnas de material

por los grados de humedad y plasticidad que tiene la arcilla con mayor o menor contenido de agua. (Vesga, Meza, y Caicedo, 2002).

Estos factores hacen que analizar el comportamiento del material no sea posible mediante modelos clásicos de la mecánica de suelos, por lo que en la actualidad con ayuda de las nuevas tecnologías se suelen usar herramientas de modelamiento como un programa de simulación mediante el método matemático de elementos finitos para ajustarse un poco mejor a las condiciones reales del comportamiento del material en campo.

(Zhou y Kerry 2003) realizan un modelamiento como uno de los primeros acercamientos que se hacen en torno al uso de elementos finitos mediante programas especializados en este tipo de desarrollos para la identificación y medición de las condiciones de falla que se presentan en arcillas, los fenómenos de fractura que se producen por efecto de la pérdida de humedad y las características que demuestran las probetas de solo 0,3 metros pero que dejan ver como en la muestra se presentan potenciales de capilaridad que manifiestan un incremento ostensible con la profundidad. En la Figura 4,8 se muestra la variación de la altura capilar para diferentes profundidades en las que se mide en muestras de 30 centímetros en laboratorio para el modelamiento

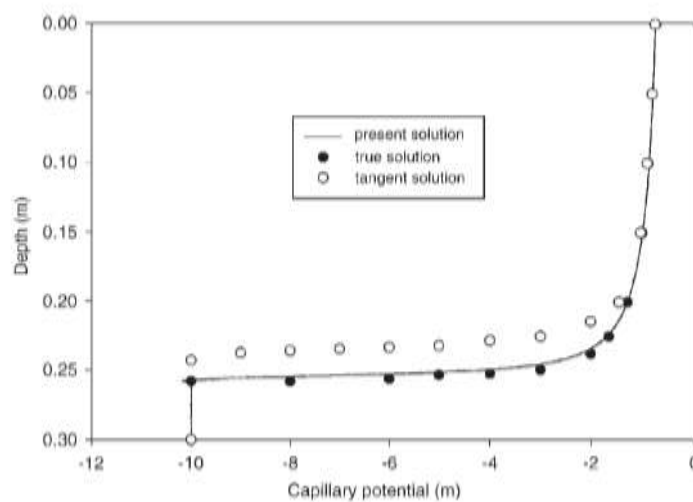


Figura 4,8. Relación de altura capilar respecto a la profundidad de la muestra (Zhou y Kerry 2003).

Estos procesos de fracturación de las arcillas se producen cuando ocurren sobre el suelo diferentes condiciones de análisis. El proceso de la transferencia de calor, los cambios de temperatura, la presencia de viento o de humedad relativa, los periodos de lluvias y de tiempo seco, tienen gran influencia en que haya más o menos presencia de agua que ingresa, y el calor favorece la evaporación y pérdida de agua de forma directa o con ayuda de la vegetación que absorbe líquido del suelo para sus procesos de fotosíntesis y que posteriormente por evapotranspiración es enviada a la atmósfera en forma gaseosa. Así mismo, el proceso comprende el flujo de masa relacionado de la misma forma con la pérdida de peso por la salida de agua del suelo, así como la relación que existe entre densificación de las arcillas contraídas con la desecación. Del mismo modo la acción de los esfuerzos y con ello las deformaciones que se producen en por este mismo fenómeno y que generan cambios volumétricos ligados a factores propios del material y factores externos del ambiente. Estos elementos marcan pautas en la generación de las fisuras superficiales que van a desencadenar las mallas de fracturas y la configuración de las columnas de material arcilloso (Vesga, Meza y Caicedo 2002), (Zhou y Kerry 2003).

4.2.2 Evidencias de los Deterioros

Las carreteras y calles urbanas o suburbanas y andenes, son vulnerables a la acción de la vegetación, especialmente cuando en los corredores viales se tienen árboles sembrados en los costados de las calles y andenes. (Randrup, McPherson y Costello 2003) mencionan las implicaciones que tienen los sembradíos de árboles de diferentes tamaños junto a los andenes, bordillos y carreteras. Algunas de las primeras apreciaciones del estudio muestra que los tamaños de las raíces y la necesidad de alimento de las plantas, generan que muchas raíces busquen la superficie para encontrar agua y oxígeno libre para la fotosíntesis. Algunos de los deterioros en la superficie de calles, andenes y bordillos ocurren por la entrada de agua por irrigación a la estructura y los procesos de acomodamiento de las

partículas de suelo se produzcan desestabilizando las capas granulares y permitiendo daños en la superficie tanto de andenes como de carreteras por efecto del movimiento del material y con ello, por la acción de las raíces.

Los daños de la superficie especialmente en las carpetas de rodadura cuando se trabaja sobre pavimentos flexibles, se relaciona principalmente con las raíces de los árboles que generan daño en la estructura de las capas granulares; los empujes que se pueden producir por efecto del momento de empotramiento que se produce en la base del árbol y la cercanía de este a las calles, bordillos y carreteras (Randrup, McPherson y Costello 2003). Del mismo modo parte de los conflictos que las raíces de los árboles que se producen, se ligan al suelo, a la succión del agua y a la pérdida de volumen del material sobre el que se emplaza las estructuras viales (Chai y Miura 2002), (Rodríguez, 2005), (Rueda, 2012), (Pineda, Murillo y Colmenares 2015).

Cuando la estructura de pavimento se inunda o entra en contacto con el agua se pueden identificar algunos problemas de estabilidad, este es el caso de carreteras que son construidas sin pavimentar; en este tipo de vía las evidencias de las fallas internas por efecto del agua son fácilmente corroborables por los daños evidentes que se producen en la rodadura. (Hufenus *et al*, 2006) permiten suponer la mejora que se genera al modelar reforzamiento con geosintéticos en las regiones en las que la acción del agua se produce en el invierno y la primavera, de manera que durante un largo periodo del año, los efectos del agua son muy bajas y los reforzamientos actúan dando durabilidad a la rodadura. Cuando se tienen carreteras sin pavimento en regiones donde las temporadas de lluvia y tiempo seco no tienen periodos definidos con certeza dado que no se encuentra marcado con las cuatro estaciones, es importante que se aisle el agua y las raíces de los árboles a la estructura del pavimento.

Algunos modelos matemáticos son implementados en programas de elementos finitos para prevér en el tiempo los posibles deterioros que se puedan identificar y

las metodologías que se puedan usar para prevenir daños prematuros por efecto de las debilidades en suelos blandos o las condiciones de inestabilidad puntual de los mismos (Mulungye, Owende y Mellón 2007) (Mohammad y Adel 2014). El uso de las herramientas electrónicas permiten prevér un acercamiento más racional al comportamiento del material de subrasante y las condiciones que puede tener la estructura por acción de las cargas del tráfico, por el peso propio de la estructura o incluso por acción de la desecación dado que los cambios volumétricos y las deformaciones se pueden simular si se cuenta con las características reales del material de la zona en la que se prevé aplicar el modelamiento.

4.2.3 Patologías Visibles en la Rodadura.

Las obras viales se construyen teniendo en cuenta elementos que dependen del tráfico que se espera movilizar por la vía, los análisis de flujo que le permitan a la vía funcionar y prestar el servicio adecuada para el que se diseña y se construye y con las características de la rodadura disponibles para que la movilidad se pueda garantizar en las condiciones y los períodos de diseño de las mismas (Cárdenas 2013). Cuando la carretera no cuenta con las condiciones previstas, como es el caso de los límites máximos de tráfico, cargas que exceden las cargas de diseño, o estructuras o subrasantes que se vuelven inestables, se producen en las vías una serie de afectaciones que hacen que las condiciones de diseño no se puedan garantizar.

Con el fin de identificar la existencia de patologías en los pavimentos, se debe inicialmente hacer una identificación de las patologías de la superficie de rodadura, posterior a ello se pasa a evaluar problemas estructurales desde mediciones o con ayuda de equipo especializado, dado que existen diferentes tipos de daños relacionados con agentes externos como el tiempo, daños por uso, otros debidos a las características de los materiales o incluso al proceso de instalación, aunque hay otros daños mucho más complejos que comprometen la estructura y que

generalmente dependen del material de subrasante (Pineda, Murillo y Colmenares 2015).

Rueda (2012), hace un estudio en el que caracteriza las patologías que afectan especialmente los pavimentos flexibles para la zona de estudio, de tal manera que muestra una correlación entre las condiciones del pavimento, los tipos de patología y los efectos de la fisura del material de subrasante, así como las implicaciones que pueden tener con respecto a los problemas de la estabilidad o calidad de la superficie de rodadura. (Pineda, Murillo y Colmenares 2015) muestran en su estudio la medición de las áreas de influencia por efecto de los árboles en algunos puntos de análisis tomados, en los que la presencia de árboles cerca de los costados de la banca de la carretera es verificable y las distancias a las que se ubican dichos árboles puede por la caracterización del tipo de árbol, tener influencia directa en las patologías demostradas en superficie por efecto de la succión inducida por las raíces de los árboles presentes.

Los pavimentos flexibles son diseñados para que la carpeta de rodadura reciba las cargas y las transfiera a las capas granulares que son las que cumplen la función de soportarlas y distribuir las de manera que la afectación directa se perciba lo menos posible en la subrasante, más aún, cuando se trata de materiales débiles. En este tipo de estructuras de pavimento se producen diversos tipos de patologías que pueden darse dependiendo de la capacidad portante del suelo, de los materiales usados y la conformación de las capas granulares, de condiciones ambientales, de afectaciones antrópicas, como las principales causas que ocasionan daños en la carpeta de rodadura, y que representan pérdida en la calidad de la superficie de la vía y disminución en los niveles de servicio de la misma (Rueda 2012).

La metodología de estudio de la calidad de los pavimentos asfálticos PCI (*Pavement Condition Index*), define las patologías que se presentan en las vías con pavimentos asfálticos de modo común; éstas definen el tipo de daño y la

necesidad de reparación que dichos daños exigen, si es una falla superficial o estructural. la Tabla 4,1 presenta las diferentes patologías que el PCI presenta para pavimentos.

Tabla 4,1. Tipos de patologías en Pavimentos Flexibles.

Tipo de Daño	Descripción de la Patología	Unidad de Medida
<i>Piel de Cocodrilo</i>	Son grietas interconectadas que se producen por fatiga del Concreto Asfáltico. Se consideran un daño estructural importante y se pueden acompañar por hundimientos en la carpeta.	m ²
<i>Exudación</i>	Corresponde a una película de bitumen que se localiza en la superficie de rodadura, es brillante, reflectora y cristalina y puede en ocasiones ser pegajosa a las llantas.	m ²
<i>Agrietamiento en Bloque</i>	Son grietas de la carpeta que se producen en formas organizadas e interconectadas y que fragmentan el pavimento en bloques rectangulares generalmente.	m ²
<i>Abultamiento y Hundimiento</i>	Son pequeños desplazamientos verticales que se producen en la superficie de rodadura por posibles fallas de la subrasante, se dan hacia arriba o hacia abajo dependiendo del tipo de falla.	m ²
<i>Corrugación</i>	Son una serie de cimas y depresiones continuas muy cercanas una a la otra ocasionadas generalmente por arrastre de la carpeta por frenado de vehículos pesados.	m ²

Tipo de Daño	Descripción de la Patología	Unidad de Medida
Depresión	Son zonas moderadamente amplias de superficie del pavimento que se encuentran ligeramente por debajo de la superficie de rodadura continua de la vía.	m ²
Grietas de Borde	Son grietas paralelas al borde de la calzada usualmente a distancias inferiores a un metro, normalmente se producen junto al eje de vehículos pesados.	mL
Pulimiento de agregados	Corresponde a la pérdida de material fino y bituminoso en la carpeta y el desgaste de los agregados en la superficie generada comúnmente por el tráfico repetitivo de cargas.	m ²
Huecos	Se presentan como pérdidas de la carpeta del material en segmentos inferiores a 90 cm de diámetro, generando depresiones de alto riesgo en la vía.	Unidad

Fuente (Metodología de análisis de pavimentos por PCI, modificado Autor, 2016)

En los estudios de patologías de pavimentos se analizan estos tipos de fallas que se pueden conjugar entre ellas y ocasionar un deterioro fuerte y acelerado de las condiciones del pavimento y la pérdida nivel de servicio del corredor vial.

Para medir las patologías en los pavimentos, o mejor, cuando se pretende caracterizar las condiciones de un pavimento construido, uno de los mecanismos más usados es el Índice de Condición de Pavimento PCI (*Pavement Condition Index*). Este es un mecanismo generado en los Estados Unidos con el fin de

hacer la medición de los daños que se producen en las estructuras de pavimento, y especialmente en los que se reflejan en la carpeta de rodadura, de tal modo que se pueda definir el tipo de patología y la intensidad de la misma (Vásquez 2002).

El Índice PCI tiene las ventajas de descripción de los daños y las amenazas de daño que refleja un pavimento durante los trabajos de medición, sin embargo los valores dados a cada tramo, falla o daño leve, son “valores deducidos” por la persona o grupo de personas que se encargan de hacer las inspecciones visuales y que determinan el grado de daño de cada tramo en estudio, de acuerdo con algunas condiciones dispuestas en el manual de PCI y que va a ser medido en seis categorías desde Excelente hasta Fallado. En la tabla 4,2 se muestra los rangos de calificación final de la rodadura evaluada con la que se determina el estado del pavimento según el método PCI.

Tabla 4.2. Rangos de evaluación de pavimentos por metodología PCI.

Rango	Calificación
100 - 85	Excelente
85 - 70	Muy Bueno
70 - 55	Bueno
55 - 40	Regular
40 - 25	Malo
25 - 10	Muy Malo
10 - 0	Fallado

Fuente (Vásquez 2002).

Este método PCI, permite identificar los daños o fallas en el pavimento de en mediante inspección visual, e ir generando una calificación que al final repercute en la severidad del daño del pavimento, partiendo especialmente de variables como el clima y el tráfico de la carretera. Dicha severidad se puede determinar como baja (*L low*), cuando en la movilidad se perciben ciertas vibraciones pero no se requiere disminuir la velocidad operacional, media (*M medium*) cuando en el vehículo se aprecian vibraciones considerables que por efectos de comodidad y/o de seguridad sugieren en el conductor disminuir la velocidad a la que se moviliza y

alto (*H Higt*) en la que los daños son severos y las vibraciones del vehículo obligan a disminuir la velocidad de manera significativa para evitar accidentes y por efectos de comodidad durante la operación.

Las mediciones que se realicen visualmente por la severidad o en condiciones de movilidad, sino que con las dimensiones geométricas reales en campo en relación con las áreas definidas en la metodología dependiendo del tipo de vía, son los parámetros con los que se emite un concepto sobre la calidad de la vía y sobre el índice de condición de pavimento (PCI) que se tiene. Una vez identificado el tipo de daño y la severidad del mismo se determina el tipo de intervención que debe hacerse, sea mantenimiento preventivo, correctivo o reparaciones, todo esto ya se encuentra vinculado en los manuales propios para el país publicados por los entes que se encargan de administrar las vías nacionales, departamentales o municipales (Rueda 2012).

Existen además otras metodologías de análisis de las condiciones de un pavimento flexible de acuerdo con la calidad con la que cuenta para el uso adecuado y servicio operacional, sin embargo, Rueda (2012) hace una comparación del método PCI, con el método francés Vizir o con el PCR, y describe que las mejores condiciones de análisis detallado las ofrece el modelo PCI, debido a que tiene en cuenta la mayor cantidad de variables posibles y determina con un mejor grado de ajuste las características de medida de la calidad de un pavimento desde la carpeta de rodadura.

En la zona de estudio (Pineda, Murillo y Colmenares 2015) encontraron particularmente cuatro tipos de daños asociados específicamente a la desecación de las arcillas de subrasante y se trabajó por una metodología de verificación que tenía en cuenta aspectos como el tipo de daño, la cantidad de veces que se presentaba en tramos de referencia, el carril en el que se encontraba, las dimensiones de la falla y los tipos y cantidad de especies vegetales presentes en la zona, con el fin de correlacionar específicamente la ingerencia de los diferentes

tipos de árboles con los daños presentados en la superficie de rodadura del pavimento.

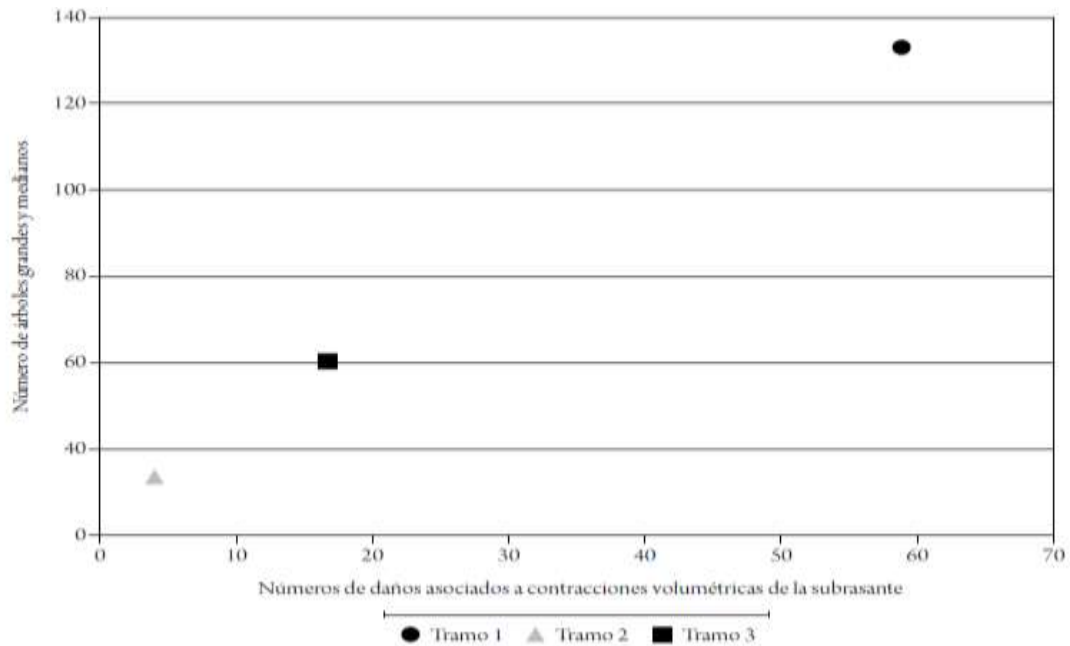


Figura 4,9. Relación de presencia de árboles respecto a las fallas en pavimento (Pineda, Murillo y Colmenares 2015)

Se percibe en la Figura 4,9 la manera como interfiere la cantidad de árboles de tamaños medianos y grandes en el número de daños que se evidencian en la superficie de rodadura de tres tramos escogidos para el análisis en los que la presencia de daños es visible y en los que la ingerencia de los árboles en los daños es innegable. Se puede ver que a mayor cantidad de árboles cercanos a la carretera, mayor es la cantidad de fallas visibles en la estructura del pavimento para cada uno de los tramos. Esta condición permite concluir que aunque se piensa que es la vegetación no nativa la que genera mayor succión de agua del suelo, es el tamaño de los árboles y su densidad de plantación, las características que más influyen en los daños ocurridos en suelos arcillosos sometidos a desecación (Pineda, Murillo y Colmenares 2015).

(Rueda, 2012) identifica los tipos y características de los daños evidenciados en la carretera que comunica a Siberia y Tenjo en el occidente de la ciudad. Las

patologías que la vía manifiesta, algunas se asocian a las condiciones climáticas y de tráfico por fatiga de la carpeta de rodadura debidas al uso que se les ha dado; otras se asocian especialmente a la falla de la estructura del pavimento por efectos propios de la conformación de columnas de material arcilloso producto de la desecación generada por la extracción acelerada de agua de la matriz de suelo; por ello se tiene un leve recuento de las patologías que la vía presenta.

Del mismo modo Pineda, Murillo y Colmenares (2015) verifican la influencia directa entre la cantidad de los árboles y los tamaños de estos en diferentes tramos de la carretera en la que el estudio mostrado previamente deja ver que los suelos arcillosos son afectados por los árboles y las estructuras de pavimento emplazadas sobre suelos fallados demuestran en superficie daños considerables ligados al número de árboles y lógicamente a la cercanía que estos pueden tener a la estructura de pavimento. Es importante aclarar que cerca de los tramos medidos no se encontraban fuentes de escorrentía superficial de agua, dado que en tal caso, la demanda de agua que generara desecación iba a tener características muy diferentes.

A continuación se hace un leve recuento del trabajo adelantado en la zona de estudio en la investigación de campo realizada por Rueda y Pineda (2012), con la que se obtienen los diferentes tipos de patologías existentes en la estructura de la vía en la zona de estudio, que según el estudio tienen relación directa y estrecha con la desecación de los suelos arcillosos de la región, sea por abatimiento directo del nivel freático, o sea por la generación de grietas profunda que son producto del descenso generalizado del mismo y los altos esfuerzos de succión a los que el material se ve sometido.

- ***Fisuras de Media Luna***

Corresponden a un tipo de patología en la que se producen asentamientos diferenciales desde un punto determinado en uno de los bordes de la banca de la

vía. Estos asentamientos son significativos y evidentes mediante una fisura parabólica alrededor de un elemento determinado que genera los asentamientos. Dos de las causas principales de este tipo de falla son en vías en ladera, la presencia de inestabilidades de la banca de la vía, y en zonas planas de subrasante arcillosa, las inestabilidades que se ocasionan por las discontinuidades que dejan las fisuras por desecación del material como la mostrada en la Figura 4,10 (Rueda, 2012).



Figura 4,10. Falla de Pavimentos en Media Luna (Rueda 2012).

- ***Fisuras de Borde***

Son fisuras que se presentan de forma casi paralela al eje de la carretera junto a los bordes de la calzada de la vía pavimentada; este tipo de falla ocurre principalmente cuando no se construye berma que protejan la estructura del pavimento o cuando el nivel de este permite el ingreso de agua que cambie las condiciones de estabilidad de la estructura en sus capas granulares. El manual de PCI hace mención a este tipo de fisuras conforme a las condiciones climáticas o particularmente a la entrada y salida de agua de la estructura de pavimento y de la subrasante de la misma. Estas fallas se pueden producir entre los 0,3 m hasta los

0,6 metros dependiendo de la afectación del agua. La Figura 4,11 muestra un tipo de falla longitudinal en la zona de estudio.



Figura 4,11. Fisura de Borde en Pavimento sin Berma (Rueda 2012).

- ***Hundimientos***

Son depresiones diferenciales que ocurren en el pavimento y que ocasionan cambios de nivel significativos con respecto a la cota diseño de la rasante de la vía que corresponden a las cotas de construcción. Estas patologías ocurren normalmente por inestabilidades de la subrasante de la vía, en tramos de ladera por problemas de falla geológica localizada y en regiones planas por inestabilidades ligadas a los asentamientos diferenciales de la subrasante que se reacomoda. Este tipo de fallas pueden tener manifestaciones superficiales de forma diversa, dado que no dependen de la estructura sino del material de

soporte, por lo que pueden ser longitudinales, transversales o diagonales al eje de la vía. La Figura 4,12 deja ver un mecanismo de falla por hundimiento de una franja de vía.



Figura 4,12. Falla por Hundimiento de una región de vía (Rueda 2012).

- ***Abultamientos***

Este tipo de falla ocurre en ocasiones particulares cuando el material de subrasante se compone de arcillas expansivas. Son fallas poco usuales en las que por efectos naturales, el material cuando se configura la subrasante arcillosa, se compacta de alguna forma mecánica para dar estabilidad, pero que con la llegada de agua por lluvias a la subrasante de arcillas compactadas, se produce hinchamiento del material que hace que se empuje hacia la estructura y se presenten los abultamientos en la carpera por expansión del suelo. La Figura 4,13 permite identificar un tipo de falla por abultamiento en la región de la Sabana. En el Manual PCI se hace alusión a este tipo de falla ocasionado principalmente por procesos de congelación de agua en la estructura del pavimento y su respectiva expansión, puesto que el agua en estado sólido es menos densa que en estado

líquido, lo que hace que incremente su volumen al cambiar a estado sólido por congelación en los inviernos de las zonas cercanas a los polos.



Figura 4,13. Falla por Abultamiento ocurrida en la región de la Sabana de Bogotá (Rueda 2012)

Otras patologías adicionales tales como piel de cocodrilo, descascaramientos, o fisuras superficiales de la carpeta que se ligan principalmente a la edad del pavimento y a su envejecimiento por efectos del tránsito o por acción directa del clima que ocasiona desgaste en el aglutinante (Bitúmen). La variación de la temperatura en la zona es significativa, el pavimento en algunas temporadas del año puede pasar de temperaturas inferiores a los cero grados (0°C) en horas del amanecer como se presentaba en el capítulo anterior, hasta temperaturas medias cerca de los veinticinco grados centígrados (25°C) pasado el medio día; estas diferencias de temperatura favorecen un envejecimiento acelerado del asfalto usado en los pavimentos flexibles de la región. Sin embargo, al no ser fallas asociadas al problema de estudio no se tuvieron en cuenta en trabajos de investigación mencionados previamente.

4.3 RESUMEN DEL CAPÍTULO

Los pavimentos rígidos y flexibles presentan un buen servicio, sin embargo, debido a la agilidad con la que se pueden instalar los flexibles, que permiten rapidéz en la puesta en servicio, son más comunmente usados en las carreteras. La configuración de su estructura y los costos son otros dos factores que hacen favorable el uso de pavimentos de este tipo en carreteras. Sin embargo, por su funcionamiento, las cargas aplicadas son transmitidas desde la carpeta de rodadura hacia las capas granulares que trabajan muy bien mientras se encuentran confinadas y aisladas de la humedad, además de la estabilidad requerida de la subrasante de la región donde son instalados los pavimentos.

La estructura de pavimentos se planea con diferentes tipos de materiales que descritos desde la superficie de rodadura, comprenden una carpeta que recibe las cargas y las transfiere a las capas granulares y que garantizan una superficie llana que favorece la comodidad en la operación vehicular de la vía; se configuran además capas granulares que son las que se encargan de soportar y redistribuir los esfuerzos aplicados, con el fin de impedir que lleguen a la subrasante esfuerzos significativos que ocasionen daños; por último se tiene la subrasante, que es el material de la zona con el que no hay muchas opciones de modificación puesto que comprende al material natural y real del sitio, entre ellas las inyecciones de cal, de cemento, el uso de polímeros o mallas de reforzamiento para mejorar sus características y su comportamiento mecánico.

En la zona de estudio por efecto de las condiciones topográficas, geotécnicas y climatológicas, se pueden presentar diversas patologías en la carpeta de rodadura de los pavimentos flexibles, algunas asociadas al envejecimiento o fatiga de la rodadura, que se corrigen con mecanismos de prevención mediante un adecuado mantenimiento; y otras fallas que son estructurales y afectan especialmente a las capas granulares que reciben y transfieren las cargas aplicadas de una manera uniforme al suelo de soporte. Cuando se producen este tipo de patologías que

están más relacionadas con las condiciones de humedad tanto de la estructura como con la estabilidad de la subrasante, los problemas son más complejos y su reparación es más costosa. En ocasiones, los mecanismos de mitigación o prevención prematura de estos problemas se hace muy complejo como es el caso de las inestabilidades causadas por la pérdida de la continuidad de la subrasante de la vía que como se explica en el capítulo 2, pueden no hacerse visibles en superficie hasta el momento de la falla de los sistemas de columnas de material.

En la zona de estudio se presentan fallas estructurales de media luna, longitudinales, por hundimiento y por levantamiento, que se relacionan particularmente a los fenómenos de desecación de la subrasante arcillosa y la pérdida de la continuidad de la misma. Dichas fisuras hacen que las estructuras de suelo que se forman durante la desecación del material, generen inestabilidades que se pueden dar de diferentes tipos como se explicara en en capítulo anterior del presente documento, y estas fallas generan daños superficiales en la rodadura.

Cada una de las patologías presentadas en los pavimentos flexibles ocasionan repercusiones en la comodidad y seguridad en los viajes; esto hace que los usuarios deban reducir la velocidad en algunos puntos afectados y por ende, la pérdida de rapidez promedio, lo que disminuye de forma significativa la calidad de la vía y los niveles de servicio que esta puede ofrecer, además de generar daños crecientes que van a demandar costos elevados para su recuperación.

5. MODELAMIENTO NUMÉRICO DE PAVIMENTOS EMPLAZADOS SOBRE SUELOS ARCILLOSOS

5.1 INTRODUCCIÓN

Las herramientas electrónicas son en la actualidad una poderosa ayuda para la solución de problemas de análisis del comportamiento del suelo anisotrópico, dado que los comportamientos variables de este, hacen que las fórmulas de la mecánica clásica de suelos sea inviable para análisis detallado de estos en condiciones reales. El uso programas de simulación numérica son de gran ayuda en el momento de realizar análisis de problemas geotécnicos. El modelamiento matemático mediante elementos finitos se configura en regiones discretas simplificadas e interconectadas. El modelo debe considerar que el modelo es inicialmente estático, lo que permite conectar todo el sistema mediante un esquema de ecuaciones mediante las que se correlacionan las fuerzas estáticas que actúan sobre el material. Del mismo modo se le pueden incluir elementos dinámicos y conformar un robusto paquete de ecuaciones que permiten resultados cercanos a lo que ocurre internamente en los materiales dada la posible variabilidad de los mismos (Hughes, 2012).

En el presente capítulo se identifican las condiciones de funcionamiento del programa PLAXIS, que usa la metodología de análisis por métodos numéricos mediante elementos finitos. Para ello es importante definir como parámetros de entrada que inicia con la caracterización del material, se definen las variables con las que el suelo cuenta y que son requeridas por el programa para simular el comportamiento mecánico de estos; una vez definida la geometría del modelo, los parámetros de los materiales y las condiciones de frontera para el este, se procede a generar una simulación de las condiciones estáticas del sitio. El programa ofrece información útil que calibrada sirve para encontrar el posible comportamiento y la caracterización de los tipos de falla y los asentamientos que se producen en la carpeta de rodadura y las deformaciones en toda la estructura así como en las columnas de material.

5.2 SELECCIÓN DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN UTILIZADO EN EL TRABAJO

El uso de herramientas electrónicas de elementos finitos de materiales y estructuras geotécnicas, permite acercarse al comportamiento real del material en el campo; cuando las características de los suelos y las condiciones que se suponen como datos de entrada definen un estado semejante al real en el sitio de las pruebas, la simulación del comportamiento del material, ofrece respuestas que además de acercarse la realidad, permiten ser modificadas o ajustadas para las condiciones cambiantes de mismo. El suelo como un material heterogéneo, aún en estratos similares, no tiene un comportamiento continuo, es decir, los esfuerzos internos que debe soportar son variables con la profundidad, tamaño de granos, contenido de agua, mineralogía, entre otras condiciones, que hacen que la respuesta ante la aplicación de cargas sea variable. El suelo es considerado un material es variable y anisotrópico, y la manera como responde a los esfuerzos aplicados depende de múltiples factores que se pueden modelar o simular, sin embargo, generar capas que tengan comportamientos parecidos a la realidad, permite lograr resultados más cercanos al suelo en el sitio.

Como mecanismos para el análisis numérico existen algunos programas que han utilizado la metodología de elementos finitos para generar respuestas que si bien no corresponden a valores reales y específicos del material, dadas las condiciones altamente variables de los suelos, si permiten un mayor acercamiento al comportamiento en campo con algunas condiciones conocidas y previamente definidas. Es importante señalar que el comportamiento analizado en cada elemento de la malla que se genera, es tomado como isotrópico, sin embargo, el hecho de dividir todo el modelo en muchas partes que si pueden tener variables sus condiciones, hace que los resultados obtenidos sean un poco más detallados que analizando el todo.

El fin del análisis es encontrar un programa de simulación que se adapte o que contemple variables propias del suelo o de las rocas, del comportamiento del mismo, de las características que manifiesta cuando se someten a la acción del agua en condiciones de equilibrio estático o cuando el agua está en movimiento, así como su acción en el mismo. Se identificaron en desarrollo de la investigación las características y modelos matemáticos constitutivos usados por la geotecnia para definir el programa que fuera más adecuado de acuerdo con las variables solicitadas y los resultados que este puede arrojar. Se tuvo en cuenta el *PHASE 2* del paquete *RockScience*, es un programa de simulación numérica bastante completo que permite modelar especialmente rocas y las estructuras geológicas internas que se forman por el diaclasamiento de las mismas; es un programa que se puede usar con suelos, sin embargo no contempla todos los modelos de análisis de suelos mediante los enunciados que gobiernan la mecánica de los suelos, dadas las características de la entrada y modelos matemáticos constitutivos del mismo.

Se verificó además el ANSYS 2D; este es un programa útil para el análisis matemático de materiales, que permite análisis de objetos o elementos sometidas a fenómenos físicos y para el diseño mecánico; este programa permite al usuario resolver problemas de materiales sometidos a esfuerzos térmicos, fluidos, vibración y otras aplicaciones específicas. Si bien es posible de usar en suelos, los usos de esta herramienta se orientan más a la mecánica de los materiales. De la misma manera se realizó el análisis del PLAXIS, este es un programa de modelamiento muy usado en el entorno de trabajo de los suelos y cuenta con variables y mecanismos de dibujo de los modelamientos que se ajusta en buena medida a lo que se espera simular como producto de la investigación. Del estudio desarrollado se encuentra que es una herramienta electrónica que satisface las necesidades que se requieren abordar y que la lógica de trabajo del programa se adhiere a los modelos clásicos de la mecánica de suelos mediante modelamiento

numérico, lo que permite la obtención de resultados con un nivel de detalle bastante favorable para el fundamento del presete trabajo.

5.2.1 PLAXIS 2D

El paquete Plaxis permite realizar análisis numéricos en elementos geoestructurales en los que se pueden definir algunas condiciones del material analizado, al cual se le pueden tomar medidas de estabilidad y deformaciones en dos o en tres dimensiones, es decir, las deformaciones horizontales y verticales de un segmento de material sea en corte o en volumen, dependiendo de los parámetros y del uso que se le dé al programa. Su uso ha reflejado buenos resultados en la ingeniería geotécnica, dado que favorece el acercamiento a las condiciones reales de comportamiento del suelo en cuanto que se pueden simular capas, características de cada una, colocación de cargas, cortes o conformación del material, conjugado con la acción del agua en el suelo, lo que permite identificar algunos parámetros propios de su desempeño en diferentes circunstancias (PLAXIS 2D 2006).

Plaxis permite la configuración del suelo con características incluidas y calculadas, que se pueden lograr en los sondeos y pruebas de laboratorio y con las que se simula el comportamiento del mismo, partiendo de condiciones reales en cada uno de los sondeos o muestras tomadas que permiten reconocer con un nivel aceptable de confiabilidad la zona. El programa usa la teoría de ondas con el fin de modelar, mediante cálculos matemáticos de múltiples variables, el comportamiento o respuesta del material de modo general en las condiciones definidas en el mismo; así mismo, permite identificar las repercusiones que se puedan manifestar en el suelo y en los alrededores de los puntos en los que las cargas son aplicadas (PLAXIS 2D 2006).

A continuación se presenta un glosario de variables que se usan en los modelos constitutivos que estructuran las ecuaciones del programa internamente y que son usadas en desarrollo de los cálculos matemáticos que arrojan los resultados de la simulación; las ecuaciones 1 a la 35 usan las variables presentados a continuación:

ε : Deformación

ε_e : Deformación elástica

ε_p : Deformación plástica

E : Módulo de Young

G : Módulo de Bulk

ν : Relación de Poisson

ν^{ur} : Relación de Poisson de carga y descarga

E_{oed} : Módulo Edométrico

n : Porosidad

e : Relación de vacíos

φ : Ángulo de fricción interna del material

c : Cohesión del material

ψ : Ángulo de dilatancia del material

f_i : Función de correlación elástica de esfuerzos

g_i : Función de correlación plástica de esfuerzos

σ : Esfuerzo en el material

σ_t : Esfuerzo admisible

E_0 : Módulo medido desde la tangente en ($\sigma_1 - \sigma_3 = 0$)

E_{50} : Módulo medido desde la secante al 50% de ($\sigma_1 - \sigma_3$)

K_0 : Coeficiente lateral de presión de tierras en reposo

K_0^{nc} : Coeficiente lateral de presión de tierras normalmente consolidadas

OCR : Relación de sobreconsolidación

POP : Presión de precarga

M_{sf} : Factor de seguridad en el análisis

λ : Índice de compresibilidad

s : Grado de saturación

El programa usa el principio básico de elastoplasticidad del suelo, en el que se pueden identificar que las deformaciones totales que tienen una parte elástica que se recupera cuando la carga se libera y una parte plástica que se percibe como irre recuperable al momento de la liberación de las cargas; dichas deformaciones se pueden entonces descomponer como se presenta en la ecuación 1:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (\text{Eq. 1})$$

El concepto de elastoplasticidad se puede relacionar desde las deformaciones con la ley de Hooke, en la que se pueden ligar los esfuerzos con las deformaciones y reemplazando las condiciones propias del material en la fase elástica se puede entonces decir que:

$$\sigma' = D_e * \varepsilon_e \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\sigma' = D_e * (\varepsilon - \varepsilon_p) \quad (\text{Eq. 3})$$

Hill, (1950), planteaba la teoría matemática de la plasticidad del suelo y su acercamiento al comportamiento real del mismo en una componente plástica que más adelante en el modelo de Mohr-Coulomb vienen a correlacionar la función (g) con las condiciones de plasticidad del material descrito desde la velocidad a la que ocurren las deformaciones plásticas en un suelo de la siguiente manera:

$$\varepsilon_p = \lambda \frac{\delta g}{\delta \sigma'} \quad (\text{Eq. 4})$$

En la ecuación 4 el factor (λ) es un factor que solo tiene una correlación para un comportamiento en la fase plástica; por su parte para la fase elástica del material, dicho factor tiene un valor de cero (0). En la Figura 5,1 se muestra un modelo del comportamiento de un material de suelo en el que se pueden identificar fácilmente las fases elástica y plástica.

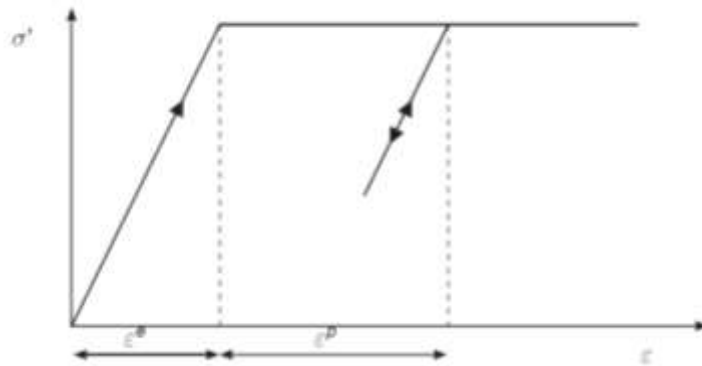


Figura 5,1. Modelo idealizado del comportamiento elastoplástico perfecto de un material (PLAXIS 2D 2006)

Para el modelamiento matemático del comportamiento de un suelo, se deben tener en cuenta las condiciones de frontera que proponen que el material se comporta de forma elastoplástica en estratos semejantes, de tal modo que si se tienen estratos de material diferentes, se deben analizar por separado. Para este caso es necesario considerar que se usa la ley de fricción interna del modelo del Mohr-Coulomb, cuyo modelamiento completo implican los esfuerzos principales relacionados con la cohesión del material (c) y el ángulo de fricción interna (φ) del material mismo. La Figura 5,2 permite identificar el modelo general de esfuerzos en una partícula infinitesimal que se somete a cargas y con las cuales se realiza posteriormente el análisis de las deformaciones ligadas a las cargas y esfuerzos aplicados.

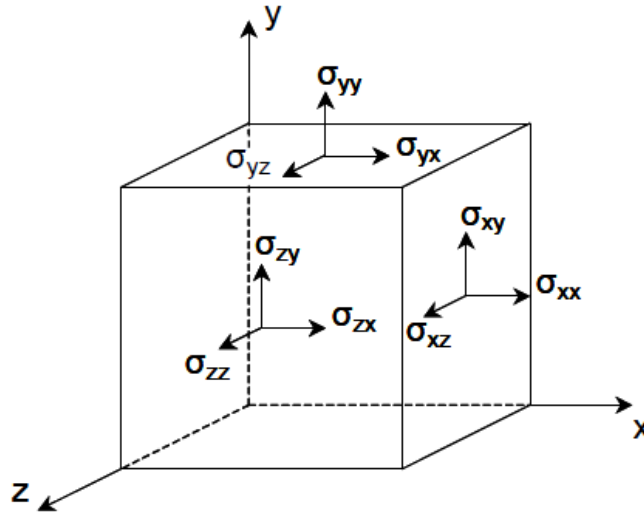


Figura 5.2. Modelo General de esfuerzos tridimensionales en una partícula de suelo (PLAXIS 2D 2006).

Este modelamiento de los esfuerzos que se identifican en un suelo, es más asertivo cuando las condiciones reales son más parecidas a la homogeneidad, es decir, cuando son estratos de arcillas saturadas en las que los tamaños de partícula y el contenido total de agua en condiciones reales son más parecidas al comportamiento de esfuerzos hidrostáticos en los que se aplica el principio de Terzaghi, en el que los esfuerzos totales corresponden a la sumatoria de los efectivos del material adicionados a los de la presión del agua en el suelo a la profundidad de medida.

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_w \quad (Eq. 5)$$

De este modo y analizando mediante el modelamiento de Mohr-Coulomb los esfuerzos principales en cada una de las caras, se obtiene la matriz de esfuerzos que permiten relacionar el comportamiento del material desde el análisis matemático, con el comportamiento real del suelo que se encuentra con pruebas de campo pero especialmente en el laboratorio.

Cuando se desarrollan las relaciones matemáticas el programa utiliza el principio general de esfuerzos usando la matriz de esfuerzos principales definidos como σ_1 , σ_2 y σ_3 , donde dichos esfuerzos son los que representan el círculo de esfuerzos identificado como el círculo de Mohr (ver Figura 5,3), de tal forma que se usan de manera cotidiana y en el modelamiento matemático del programa los esfuerzos mayor y menor de acuerdo con los parámetros del suelo que fueron o deben ser encontrados con las pruebas de laboratorio de dichos materiales. El modelo gráfico identifica los valores de σ_1 , σ_2 y σ_3 negativos, puesto que son valores de compresión como lo muestra la Figura.

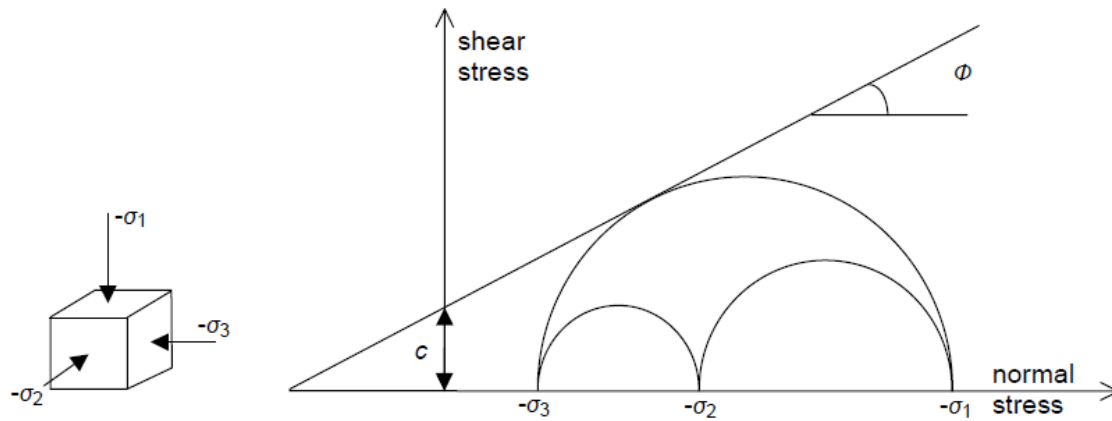


Figura 5,3. Modelo gráfico del Círculo de Mohr (PLAXIS 2D 2006)

El modelamiento de la fluencia de los materiales que son evaluados con las leyes de Mohr-Coulomb, muestran que al ser analizadas las variables de esfuerzo, ángulo de fricción y cohesión del material, se tienen entonces seis funciones diferentes que identifican las relaciones posibles de los parámetros obtenidos en las pruebas hechas a los materiales en el laboratorio. Las funciones de relación de las variables cohesión y ángulo de fricción interna para formar los planos en el esquema tridimensional desde los esfuerzos principales se relacionan a continuación.

$$f1a = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3)\text{sen}\varphi - c * \text{cos}\varphi \leq 0 \quad (\text{Eq.6})$$

$$f1b = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_2)\text{sen}\varphi - c * \text{cos}\varphi \leq 0 \quad (\text{Eq.7})$$

$$f2a = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1)\text{sen}\varphi - c * \text{cos}\varphi \leq 0 \quad (\text{Eq.8})$$

$$f2b = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)\text{sen}\varphi - c * \text{cos}\varphi \leq 0 \quad (\text{Eq.9})$$

$$f3a = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2)\text{sen}\varphi - c * \text{cos}\varphi \leq 0 \quad (\text{Eq.10})$$

$$f3b = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_1)\text{sen}\varphi - c * \text{cos}\varphi \leq 0 \quad (\text{Eq.11})$$

Las funciones presentadas son directas e inversas, lo que permite generar una función de superficie que garantiza un espectro de valores quee envuelven todas las posibles funciones con los valores σ_1 , σ_2 y σ_3 para la ser relacionados con la cohesión del material y el ángulo de fricción interna del mismo.

El modelo de Mohr-Coulomb, además de presentar las condiciones que se desarrollan en las funciones de fluencia (f) del modelo elastoplástico, muestra además de ello otras seis funciones del potencial de plasticidad (g) que se señalan a continuación.

$$g1a = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3)\text{sen}\psi \quad (\text{Eq. 12})$$

$$g1b = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_2)\text{sen}\psi \quad (\text{Eq. 13})$$

$$g2a = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1)\text{sen}\psi \quad (\text{Eq. 14})$$

$$g2b = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)\text{sen}\psi \quad (\text{Eq. 15})$$

$$g3a = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2)\text{sen}\psi \quad (\text{Eq. 16})$$

$$g3b = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_1)\text{sen}\psi \quad (\text{Eq. 17})$$

En esta nueva relación de ecuaciones entra la variable de ángulo de dilatancia (ψ), para el cálculo de la función de potencial de plasticidad, esto se da cuando el modelamiento general de los estados de esfuerzos de Mohr-Coulomb son analizados con los criterios completos para la tensión del suelo, sin embargo para el caso de los suelos, el manual de Plaxis recomienda siempre usar un valor de cero (0) en la dilatancia como estado crítico del material, ésta configuración implica que el material se encuentra alineando con el ángulo de fricción interna cada una de las pruebas y que no puede lograrse una mayor resistencia de fricción que soporte más cargas.

Cuando este análisis se realiza para cohesiones diferentes de cero ($c \neq 0$), se tiene entonces que el programa puede manejar además otras funciones como son:

$$f4 = \sigma'_1 - \sigma_t \leq 0 \quad (\text{Eq. 18})$$

$$f5 = \sigma'_2 - \sigma_t \leq 0 \quad (\text{Eq. 19})$$

$$f6 = \sigma'_3 - \sigma_t \leq 0 \quad (\text{Eq. 20})$$

Donde σ_t corresponde al esfuerzo admisible de corte del material.

Para este fin se utilizan el Módulo de Young, (E') y la relación de Piosson (ν); estos dos datos son importantes en el análisis dado que el módulo de elasticidad permite la tenacidad o rigidéz de un material para resistir deformaciones y conservar su forma original después de retirada la carga. Así mismo, la relación de poisson (ν), que define la relación entre las deformaciones horizontales y verticales cuando un elemento de determinado material es sometido a cargas de compresión o de tracción. En la Figura 5,4 se muestra el modelo gráfico del comportamiento de un material que cuenta con un Módulo de Young y la forma como este varía.

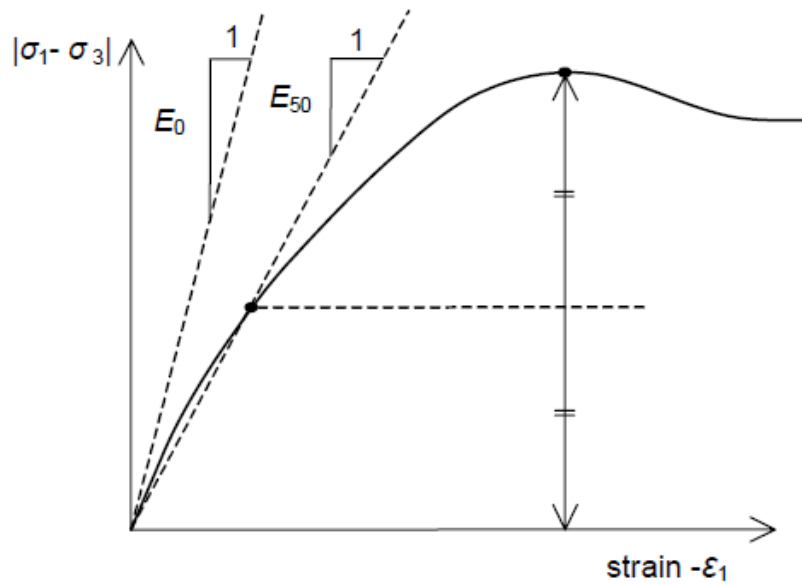


Figura 5,4. Definición del E_0 y el E_{50} para pruebas triaxiales estándar (PLAXIS 2D 2006)

Se puede percibir del modelo gráfico de la Figura 5,4, que en el eje de las abscisas se encuentra la medición de las deformaciones del material sometido a esfuerzos y en el eje de las ordenadas se tiene la diferencia de los esfuerzos principales mayor y menor, lo que indica que ofrece una serie de valores de relaciones de esfuerzos contra deformaciones en diferentes tiempos de la prueba triaxial, del mismo modo se encuentra que tanto para el inicio de aplicación de la carga se tiene una recta de pendiente E_0 y para la relación de la mitad de la diferencia de esfuerzos con mayores deformaciones se tiene una pendiente de E_{50} . El manual de plaxis propone que para cargas de material de suelo se use el E_{50} especialmente cuando se realiza el análisis de túneles, mientras que para talúdes y otras aplicaciones superficiales en material de suelo que tiene un amplio rango lineal elástico se use el valor de E_0 .

El uso de la Relación de Poisson (ν), es muy fácil de integrar al modelo matemático, considerando que para materiales elásticos se tiene que:

$$K'o = \frac{\sigma'h}{\sigma'v} \quad (\text{Eq. 21})$$

Cuando se realizan sobre el material las pruebas triaxiales drenadas estándar, en la que se aplica carga de compresión unidimensional y se revisan los esfuerzos verticales y horizontales que se presentan en la muestra, asemejando las condiciones normales de suelo y la acción que esto genera en el mismo, se tiene entonces que:

$$\frac{\sigma'h}{\sigma'v} = \frac{\nu}{1-\nu} = K'o \quad (\text{Eq. 22})$$

Estos valores de relación de Poisson (ν) pueden encontrarse normalmente para suelos arcillosos entre 0,3 y 0,4 cuando son revisados en pruebas normales de carga en el laboratorio, sin embargo, se recomienda que cuando son casos de aplicación de ciclos de carga y descarga, se usen valores entre 0,15 y 0,20 (PLAXIS 2D 2006).

El parámetro de la cohesión para suelos tiene un valor que se aproxima a cero especialmente cuando se trabajan suelos granulares, en los que no existe fricción entre partículas, o en el caso de las estructuras de pavimento que se configuran o capas de material granular compactado, se considera que estos materiales no tienen cohesión, sin embargo, el modelamiento matemático recomienda no usar valores de cero sino muy cercanos al mismo. Con respecto a las subrasantes arcillosas, se considera por la mecánica de suelos que las arcillas tienen una cohesión aparente que le permite juntarse en condiciones normalmente consolidadas y demostrar una rigidez del material con la pérdida de humedad; dichos valores son encontrados de la curva lograda mediante el modelo de Mohr-Coulomb una vez graficados los esfuerzos principales en la prueba (PLAXIS 2006).

El ángulo de dilatación en un material depende especialmente de dos factores fundamentales que son la densidad del material y el ángulo de fricción interna del

mismo; este valor de la dilatancia para suelos arcillosos tiende a un valor de cero, dado matemáticamente se describe la variable en términos del ángulo de fricción interna como se muestra a continuación.

$$\psi = \varphi - 30^{\circ} \quad (\text{Eq. 23})$$

Cuando se trabajan subrasantes arcillosas y conformaciones de estructura de pavimento en material compactado, no suelen tenerse valores muy grandes de fricción interna, de tal manera que usar la ecuación (23), significa que el valor del ángulo de dilatancia viene a ser negativo, por lo que siempre para suelos el modelo del programa recomienda el uso de una dilatancia de cero.

Antes de modelar las condiciones generales del material, se plantea la posibilidad de incluir algunos parámetros más avanzados del modelo de Mohr-Coulomb como es el caso de la rigidez incrementada o la cohesión incrementada; esto se da debido a que la mecánica de suelos plantea que la rigidez de un suelo comúnmente incrementa con la profundidad a la que se encuentra el mismo, es decir, un suelo que aparentemente tiene las mismas características demuestra una rigidez en las capas superficiales, pero en la medida en la que se tenga mayor profundidad, se va a presentar un incremento de ésta. El programa permite colocar si se requiere y si se conocen las condiciones de incremento de la rigidez del material en profundidad, un incremento en el módulo de Young en una tasa de crecimiento respecto a una referencia de profundidad. Del mismo modo esto se puede realizar para la cohesión del material dado que se plantea que un material por consolidación en el tiempo adquiere mayor valor de cohesión interna entre partículas (PLAXIS 2006).

Estos valores avanzados permiten modelar de forma más detallada las estructuras de material siempre que se tenga para un mismo perfil, las pruebas que permitan

medir la rigidez de manera concreta y real a cada profundidad y se tenga una relación específica de incremento por metro de profundidad, dado que cuando esto se realiza, las condiciones del módulo de Young se incrementan gradualmente con la profundidad, y de la misma manera la cohesión (PLAXIS 2006).

En el programa se pueden modelar los elementos geométricos en los que se tiene la configuración del suelo, de manera que una vez definidas estas condiciones de frontera se realice un modelamiento general del comportamiento de la masa total del modelo; esto significa que se pueden analizar elementos o configuraciones de materiales en suelo plano, excavaciones para cimentaciones, taludes, cimentaciones en estratos variados, y en el caso del proyecto, se puede realizar el modelamiento de columnas de material fracturadas por efecto de la desecación de las arcillas, de tal manera que mediante análisis múltiples en condiciones físicamente complejas de comprender se puedan tener acercamientos al comportamiento real.

La puesta en marcha del programa una vez caracterizado el material y la geometría de los elementos que se esperan analizar, implica cimentación (descargas paulatinas por excavación) o construcción de obras que se van cargando y que van reaccionando mediante un modelo no lineal del comportamiento del suelo. Estas condiciones garantizan que se tenga un acercamiento a la realidad, ofreciendo mejores resultados que los encontrados en la mecánica de suelos clásica, dado que este ya se encuentra en función del tiempo, de características anisotrópicas del suelo o de la roca y de su comportamiento diferenciado.

El modelamiento además permite la presencia de presiones hidrostáticas o correr el programa sin ellas e identificar la acción de las fuerzas de agua en el material que se encuentra y su respuesta como un todo. Los datos de salida permiten

identificar algunas condiciones del comportamiento que el material probablemente puede presentar una vez es sometido a los esfuerzos que se programen por efecto de las sobrecargas o descargas del material de las condiciones originales a las nuevas condiciones. Especialmente en dos dimensiones se pueden tener las características del comportamiento bidimensional mediante un robusto análisis numérico que permite identificar el material en corte desde la superficie hasta los puntos donde se tomen datos. El programa arroja resultados confiables en cuanto se tengan unas condiciones de frontera bien definidas y garantice que los datos de entrada del programa, simulen las condiciones reales del suelo y de las descargas o sobrecargas posibles sobre la matriz de material.

Es importante en el programa definir claramente las condiciones de frontera en el que los desplazamientos en el eje (X) y el eje (Y) debidos a las cargas aplicadas son cero. Tener condiciones de frontera con estas características refleja que la acción de las fuerzas ejercidas sobre el suelo están siendo contrarrestadas por la acción misma del suelo y que su capacidad interna mitiga los esfuerzos. Si bien las deformaciones en diferentes puntos del contorno del modelo van a tener ciertos valores, es importante analizar mediante la mecánica de suelos clásica los bulbos de presión con el fin de definir las fronteras adecuadas en las que los esfuerzos correspondan al peso propio del material y la acción del agua y no a las cargas aplicadas.

El programa permite además generar cambios e ir definiendo las condiciones de geometría de cada uno de los elementos que se encuentran en la estructura que se desea analizar, incluir materiales como geosintéticos (geomallas) que de alguna manera favorecen la construcción de elementos grupales en los que se desarrollen modelamientos con elementos de acuerdo a los que se ha propuesto como material fallado en columnas verticales.

Para la adecuada simulación de carreteras se tienen en cuenta aspectos importantes desde el enfoque de la mecánica de suelos, dado que corresponde a las capas granulares distribuir adecuadamente los esfuerzos y a la subrasante soportar la estructura del pavimento así como las cargas dinámicas debidas a los camiones. Normalmente el comportamiento es analizado desde la comprensión que producen los esfuerzos efectivos en un suelo que se evalúa desde la mecánica de los materiales y la geotecnia. Los esfuerzos verticales iniciales se identifican mediante la mecánica de suelos, sin embargo, el análisis de los esfuerzos menores u horizontales, son hallados con los valores de $K'o$, correspondiente entonces al esfuerzo horizontal máximo. En esta condición se tienen que los valores de $K'o$ se definen como:

$$K'o, X = \frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{yy}} \quad (\text{Eq. 24})$$

$$K'o, Z = \frac{\sigma_{zz}}{\sigma_{yy}} \quad (\text{Eq. 25})$$

Esta expresión muestra que el valor de $K'o$ en la dirección (x) se obtiene de relacionar los esfuerzos principales horizontales y verticales (x, y), del mismo modo para el caso de (z) corresponde al mismo valor de $K'o$ en (z, y). Esto se genera debido a que el suelo se analiza en condiciones geostáticas ($\sigma_v = \gamma * h$), de manera que los esfuerzos tridimensionales en una matriz de suelo con características moderadamente homogéneas, presentan esfuerzos verticales por la gravedad y esfuerzos horizontales en el plano de dos ejes que numéricamente tienen igual valor, de modo paralelo el programa supone los criterios de Jakys, para el ángulo de fricción interna del material de suelo de la siguiente manera:

$$K'o = (1 - \text{sen}\varphi) \quad (\text{Eq. 26})$$

Bajo los criterios de Mohr-Coulomb, se tiene que el parámetro de empuje lateral de tierras Ko , se encuentra también basado en la forma de Jaky's, este criterio es abordado desde diversas perspectivas dependiendo del modelo dispuesto para el desarrollo y que se muestra en la siguiente expresión:

$$K'o, X = K'o^{nc}OCR - \frac{v^{ur}}{1-v^{ur}}(OCR - 1) + \frac{K_o^{nc}POP - \frac{v^{ur}}{1-v^{ur}}POP}{\sigma^o yy} \quad (Eq. 27)$$

Cuando no se controlan los esfuerzos, los valores de $K'o$ se pueden ver alterados los resultados obtenidos, pues se trata de una alteración que se refleja en los estados de esfuerzos de Mohr-Coulomb, del mismo modo se tiene que en material cohesivo para evitar dicha relación, el valor del $K'o$ está dado en función de la siguiente delimitación:

$$\frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi} < K'o < \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \quad (Eq.28)$$

De la misma manera en el programa se usa el modelo de Hoek-Brown, esta modalidad de cálculo genera algunas diferencias leves con respecto al modelo de Mohr-Coulomb, este valor cambia debido a que en el modelo de Hoek-Brown, se incluyen los factores de reducción de esfuerzos y mejorar la seguridad de las aplicaciones que se realicen.

$$f_{HB} = \sigma'1 - \sigma'3 + f_{red}(\sigma'3) \quad (Eq.29)$$

Y

$$f_{red} = \frac{f}{\eta} = \frac{\sigma_{ci}}{\eta} \left(m_b \frac{-\sigma'3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (Eq.30)$$

$$\eta = \frac{1}{2} \left[\sum M_{sf} (2 - f) \sqrt{1 + \frac{\left(\frac{1}{\sum M_{sf}^2 - 1} \right) f^2}{(2-f)^2}} + f \right] \quad (Eq.31)$$

Donde

$$f' = \frac{\partial f}{\partial \sigma'3} = -a m_b \left(m_b \frac{-\sigma'3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{a-1} \quad (Eq.32)$$

Se tiene de las ecuaciones 29 a la 32 que:

f_{HB} =Factor de esfuerzos modificado

f_{red} = Factor de reducción de esfuerzos

η =porosidad

s =grado de saturación

M_{sf} = Factor de seguridad en el análisis

Estas expresiones abordadas desde el modelo de Hoek–Brown, permiten encontrar un factor de reducción de los esfuerzos, con esta información y las condiciones de frontera, es posible tener un acercamiento al comportamiento normal del suelo, debido a que es muy importante que se identifiquen los valores cuando las mediciones se realizan en condiciones de discontinuidad y el programa permita delimitar fronteras y definir los parámetros de trabajo del análisis.

El programa trabaja mediante la verificación de datos coherentes y que parten de la información de campo o con la inclusión de elementos de modelamiento teórico. Para ello es importante que los datos de entrada sean los adecuados para que el mismo brinde las respuestas deseables, por lo que las pruebas de laboratorio y los datos de campo deben tomarse con la mayor rigurosidad. De igual modo, con toda la información incluida en la herramienta Plaxis, debe cuidarse de no cometer errores, dado que al momento de hacer los cálculos, si encuentra información incompatible, no guarda los modelos y envía al usuario a completar la información en la sección de ingreso de datos. Así mismo cuando los datos son ilógicos o hacen que los cálculos sean indeterminados, el programa muestra unas señales de alerta que permiten que el usuario haga una nueva revisión detallada de la información de datos de entrada para evitar que se cometan equivocaciones en el proceso de cálculos, pues si bien el programa cuenta con algunas restricciones, claramente es una herramienta que no puede interpretar datos sino simplemente calcular con la información que se le introduce.

5.3 CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO DE LA ZONA DE ESTUDIO

El terreno ha sido analizado en diferentes estudios previos, de ahí se parte en la presente investigación con el fin de tener una caracterización de las condiciones existentes en la zona de estudio, dado que han sido hechos en diferentes etapas y con las que se ha venido identificando las propiedades del material de la Sabana de Bogotá y con ello su comportamiento como las subrasantes de suelo en estructuras de pavimento de la zona.

En la sabana del occidente de Bogotá se cuenta con una formación arcillosa que con algunas capas de arenas y de turbas, lo que compone la denominada formación sabana, en la que se encuentra emplazada gran parte de la ciudad de Bogotá y algunos municipios aledaños, entre ellos la zona de estudio que se localiza entre Siberia y el municipio de Tenjo en Cundinamarca (Van der Hammen y Gonzalez 1960) (Arias, 2015). Con las descripciones previamente presentadas, se pretende en esta sección compilar los datos de entrada que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del modelamiento con el que se simula el comportamiento del material bajo la afectación de cargas por efecto de la estructura de pavimento, sin tener en cuenta las cargas dinámicas de la estructura del pavimento.

5.3.1 Caracterización Visual del Material en Sondeos Previos Sobre la Vía Siberia - Tenjo.

El material arcilloso de la zona ha sido frecuentemente analizado por su comportamiento con la entrada o pérdida de agua de la matriz de suelo, estas condiciones deben verificarse considerando diferentes parámetros de la zona, con los cuales se realiza el modelamiento del comportamiento del suelo en su estado original y sobre el que se espera analizar el comportamiento por efecto de la desecación y apertura de grietas en la superficie del terreno. Una caracterización del material arcilloso de la zona fue realizada por Pineda, García y Cavana (2014),

partiendo de muestras alteradas e inalteradas, que permiten identificar las condiciones con las que se cuenta en el sitio.

Dicha caracterización comprende estudios realizados previamente en el contexto de las investigaciones realizadas por Pineda *et al.* (2006), Pineda *et al.* (2011) y Pineda *et al.* (2012) en la zona de estudio, y que son insumo para el modelamiento matemático del comportamiento, inicialmente en condiciones geostáticas con subrasante continua, para posteriormente dar paso al modelamiento del suelo fisurado o subrasante discontinua para las estructuras de pavimento.

El perfil estratigráfico del suelo cercano a superficie se obtuvo en dos sondeos exploratorios realizados en la zona de estudio, que permiten identificar colores, consistencia y características visuales que se muestran en la Figura 5,5.

PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL
0 - 1.50	Limo con suelo orgánico y arena de relleno color amarillo, presenta material granular usado como soporte de la vía existente. Tipo SM
1.50 - 7.00	Arcilla Limosa café con oxidaciones, levemente fisurada, humedad media, consistencia media alta, plasticidad baja Tipo CL
7.00 - 10.00	Arcilla gris verdosa de humedad alta consistencia baja y plasticidad media - alta Tipo OH
10.00 - 20.00	Arcilla gris oscura, de humedad alta consistencia baja y plasticidad alta Tipo CH

Figura 5,5. Descripción del perfil de suelo a 20 metros de profundidad en la zona de estudio (Arias, 2015).

De la misma manera se realizó un segundo sondeo que permitió identificar condiciones parecidas en la zona cercana. Los dos sondeos fueron hechos junto a la carretera que comunica al sector de Siberia con el municipio de Tenjo, zona en la que se presenta una alta influencia de fallas por desecación en la superficie de rodadura.

El material que se extrajo de los sondeos en la zona, permitió mediante pruebas de laboratorio para muestras alteradas e inalteradas, encontrar características del comportamiento geomecánico para el material algunos de los parámetros que gobiernan el comportamiento y con ello se infieren mediante relaciones factibles desde la mecánica de suelos, proyectar características de capacidad ante posibles cargas aplicadas tales como estructuras de pavimento (Pineda y Arias, 2015).

A las muestras se les aplicaron pruebas de laboratorio de:

- ✓ *Contenido de humedad natural*
- ✓ *Límites de Atterberg (líquido, plástico y de contracción)*
- ✓ *Peso Unitario Total*
- ✓ *Hidrometría*
- ✓ *Gravedad Específica*
- ✓ *Consolidación Unidimensional*
- ✓ *Índice de succión matricial (método del papel filtro)*
- ✓ *Ensayos Triaxiales*

Cada uno de estos ensayos que se realizaron a probetas de material a diferentes profundidades, cumplen con las normas propias para cada una de las pruebas de laboratorio. Los datos iniciales encontrados en la primera muestra son consignados en la Tabla 5,1, donde se muestran los estratos o el perfil mediante mediciones desde superficie y en él, condiciones de humedad natural, peso específico total, límites de Atterberg y gravedad específica.

De dicha información se puede notar que la humedad natural que en superficie es solo del 10,52%, demuestra un incremento con la profundidad que va hasta el 105,96% a una profundidad entre los 4,5 - 5,0 metros, lo que indica que el nivel freático se encuentra cerca de esta región en el punto del sondeo. De la misma forma se puede ver que los pesos específicos del material cambian con la profundidad, esto se puede explicar debido a los esfuerzos de sobreconsolidación donde los materiales que se ven sometidos a fuerzas de succión se contraen y tienden a tener mayor peso por unidad de volumen, por debajo del nivel freático los valores que se encuentran en la medición se tienden a ver más estables con la profundidad, dado que en esta región el suelo se encuentra normalmente consolidado.

Tabla 5,1. Caracterización de material a diferentes profundidades en la muestra 1.

SONDEO	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	$\omega_n(\%)$	γ_T (kN/m ³)	LÍMITES				Gs
					LL (%)	LP (%)	LC (%)	IP (%)	
1	1	0,00 - 0,50	10,52	-	-	NTLP	-	-	2,48
	2	0,50 - 1,00	48,16	-	-	NTLP	-	-	2,46
	3	1,00 - 1,50	-	-	-	NTLP	-	-	-
	4	1,50-2,00	73,45	15,26	116,95	55,42	39,42	61,53	2,66
	5	2,00 - 2,50	-	-	-	-	-	-	-
	6	2,50-3,00	90,01	12,8	135,98	48,86	52,06	87,12	2,79
	7	3,00 - 3,50	-	11,3	-	-	-	-	-
	8	3,50 - 4,00	105,96	-	171,44	56,93	33,29	114,51	2,69
	9	4,00 - 4,50	-	-	-	-	-	-	-
	10	4,50 - 5,00	108,13	14,6	149,64	50,40	25,42	99,24	2,74
	11	5,00 - 5,50	-	-	-	-	-	-	-
	12	5,50 - 6,00	139,32	12,1	180,08	76,63	34,70	103,45	-
	13	6,00 - 6,50	-	-	-	-	-	-	-
	14	6,50 - 7,00	141,70	13,2	172,11	94,77	27,99	77,34	2,70
	15	7,50 - 8,00	-	-	-	-	-	-	-
	16	8,00 - 8,50	110,14	-	160,00	54,77	31,59	105,23	2,79
	17	9,00 - 9,50	-	-	-	-	-	-	-
	18	9,50 - 10,00	104,25	11,5	131,46	46,97	28,35	84,49	2,66
	19	10,50 - 11,00	-	-	-	-	-	-	-
	20	11,00 - 11,50	115,56	-	172,11	81,91	27,68	90,20	2,78
	21	12,00 - 12,50	-	-	-	-	-	-	-
	22	12,50 - 13,00	201,15	11,3	-	-	33,12	-	2,76
	23	13,50 - 14,00	-	-	-	-	-	-	-
	24	14,00 - 14,50	127,70	-	143,55	76,34	-	67,21	2,75
	25	15,00 - 15,50	-	-	-	-	-	-	-
	26	15,50 - 16,00	206,08	-	93,39	55,63	-	37,76	2,75
	27	17,00 - 17,50	-	-	-	-	-	-	-
	28	17,50 - 18,00	115,64	-	134,49	110,97	27,57	23,52	2,77
	29	18,00 - 18,50	-	-	-	-	-	-	-
	30	18,50 - 19,00	133,58	-	-	-	17,07	-	2,73
	31	19,50 - 20,00	-	-	155,71	-	-	-	-

Fuente. (Arias, 2015).

Según la descripción que se hace del material, este ya tiene señales de pequeñas fisuras en que se pueden extrapolar a la zona aledaña al sitio de la toma de la muestra, por tanto, es probable comprender que se tenga un peso específico total mayor que el resto del estrato, pues donde se tiene humedad cercana al 100% en la misma capa se cuenta con peso específico de $11,3 \text{ kN/m}^3$, cerca a los 7 metros de profundidad. Del mismo modo se pueden evidenciar variaciones visibles en los resultados de los límites líquido, plástico y de contracción, así como de la gravedad específica a diferentes profundidades y de acuerdo con los materiales encontrados en el sondeo por capas de diferentes espesores (Arias, 2015).

En la Tabla 5,2 se muestran condiciones semejantes correspondientes al sondeo 2 hecho a un perfil de suelo cercano en la zona de estudio; estos resultados como se puede observar, presentan variaciones correspondientes a diferentes profundidades, dado que para esta muestra el nivel freático se encuentra cerca de los 11 metros, lo que genera cambios en el comportamiento especialmente del peso específico total y de los límites, aunque la tendencia de comportamiento del material se mantiene.

Con esta información obtenida de los análisis de laboratorio, se pueden clasificar con ayuda de los límites de Atterberg mediante el sistema USCS muestran que las arcillas se encuentran entre caolinitas e illitas, tal como se muestra en la Figura 5,6.

Tabla 5.2. Caracterización de material a diferentes profundidades en la muestra 2.

SONDEO	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	$\omega_n(\%)$	γ_t (kN/m ³)	LÍMITES				G_s
					LL (%)	LP (%)	LC (%)	IP (%)	
2	1	0,00 - 0,50	49,39	-		43,50	-	-	2,38
	2	0,50 - 1,00	0,00	-		51,03	-	-	2,24
	3	1,00 - 1,50	49,39	-		44,89	-	-	2,60
	4	1,50 - 2,00	45,45	14,4	79,56	57,74	28,56	21,82	2,70
	5	2,00 - 2,50	-	-	-	-	-	-	-
	6	2,50 - 3,00	74,90	13,0	100,60	52,12	30,91	48,48	2,70
	7	3,00 - 3,50	45,76	14,1	114,79	56,88	21,92	57,91	2,71
	8	3,50 - 4,00	56,48	-	128,59	53,90	25,86	74,69	2,67
	9	4,00 - 4,50	-	-	-	-	-	-	-
	10	4,50 - 5,00	76,48	14,1	-	-	31,64	-	2,7
	11	6,00 - 6,50	-	-	-	-	-	-	-
	12	6,50 - 7,00	110,99	12,8	158,32	66,64	26,69	91,68	2,77
	13	8,00 - 8,50	-	-	-	-	-	-	-
	14	8,50 - 9,00	125,96	10,9	160,62	68,13	16,19	92,49	276
	15	10,00 - 10,50	-	-	-	-	-	-	-
	16	10,50 - 11,00	112,47	-	141,26	53,24	23,52	88,02	
	17	12,00 - 12,50	-	-	-	-	-	-	-
	18	12,50 - 13,00	127,66	12,3	135,65	77,25	23,45	58,40	2,76
	19	14,00 - 14,50	-	-	-	-	-	-	-
	20	14,50 - 15,00	116,97	-	134,84	50,00	27,78	84,84	2,79
	21	16,00 - 16,50	-	-	-	-	-	-	-
	22	16,50 - 17,00	116,19	11,3	152,01	-	34,39	-	2,76
	23	18,00 - 18,50	-	-	-	-	-	-	-
	24	18,50 - 19,00	134,35	-	160,28	62,41	37,57	97,87	2,73

Fuente. (Arias, 2015)

Terzaghi (1953) presentó la teoría de compresibilidad de un material de suelo arcilloso de condiciones teóricamente homogéneas; mediante el ensayo de Consolidación Unidimensional, se pueden identificar los esfuerzos que se producen en un suelo saturado, donde los esfuerzos son transmitidos por la fase sólida y la fase líquida. A medida que se va perdiendo agua, se presenta cambio volumétrico por acomodamiento de las partículas de fase sólida, de tal modo que se pueden proyectar con mediciones los esfuerzos de consolidación de una arcilla con ayuda de esta prueba (Das, 2001)

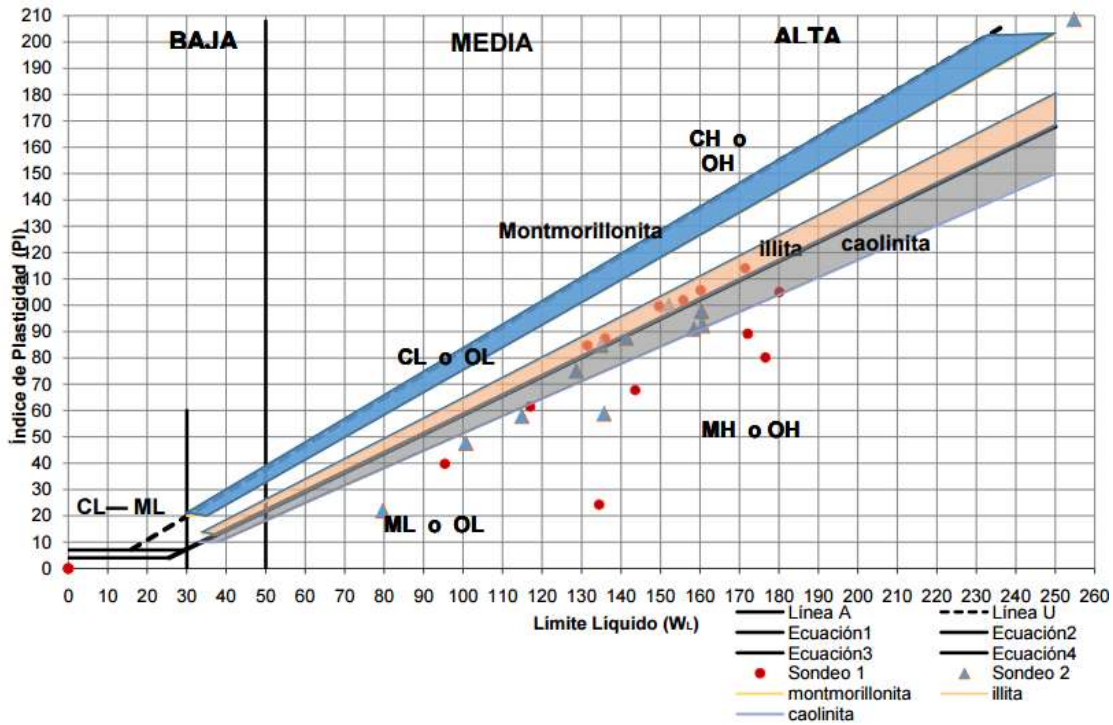


Figura 5.6. Ubicación de las muestras en la carta de plasticidad (Arias, 2015).

Del mismo modo se midió para las muestras de laboratorio la succión matricial mediante método del uso del papel filtro Whatman; éste es un mecanismo avalado por la norma I.N.V.E. 159-07, que permite determinar la succión del suelo arcilloso que se presentan en la medida en la que se tienen condiciones de presión negativa por abatimiento del nivel freático en la matriz de suelos. Con estos datos se pueden identificar correlaciones para determinar el peso específico seco y saturado del material, así como un leve acercamiento a los valores que pueden llegar a ofrecer en cohesión aparente y ángulo de fricción interna que puede tener el suelo con la profundidad a medida que va perdiendo agua (Lozada *et al*, 2015).

5.3.2 Condiciones de Frontera del Modelamiento de suelo.

En un modelo de análisis del comportamiento del suelo, se deben tener en cuenta las condiciones de frontera para su desarrollo, esto debido a que el programa trabaja en condición de estabilidad del sistema con el presupuesto que en puntos

de frontera no se presentan cambios volumétricos o deformaciones en ninguna de las direcciones producidas por las cargas que se apliquen. En el caso de estudio, considerando fisuras verticales que demuestran discontinuidades en la subrasante, es importante tener condiciones definidas de frontera, aunque en un modelo real, cargas externas puestas sobre el suelo, peor las fallas se dan por efectos de las fisuras. En los elementos arcillosos tipo columna las deformaciones pueden llegar incluso al colapso de material de la subrasante lo que hace que el modelo matemático sea analizado de una forma propia para el caso de las discontinuidades (Rodríguez, 2005).

Para el modelamiento matemático, se debe identificar la información de datos iniciales que permitan al programa realizar los cálculos adecuados de los materiales, además deben simular la condición de vacío en los espacios de las grietas por debajo de la estructura del pavimento. El caso de estudio contempla un modelo que considera espacios entre grietas en los cuales se va a tener libertad para que los elementos tengan deformaciones horizontales. Es importante que en los vacíos se incluya para modelo algún tipo hipotético de material que tenga una muy baja resistencia y unas condiciones muy deficientes, de tal modo que sea muy elástico y que favorezca que las fallas de las columnas de material arcilloso tengan libertad de deformación en todas las direcciones, sea de aplicación de la carga o del empuje horizontal y vertical de los suelos.

Se pretende que los esfuerzos que se producen en el suelo no sean resistidos por el material que simula el vacío, sino que esto ocurra en las arcillas. Una buena estructuración de estas condiciones permite comparar el modelo para el conjunto completo de estructura de pavimento, subrasante fisurada y el material que simula los espacios vacíos. Simular el material por debajo de la estructura del pavimento permite al programa reconocer el medio continuo y buscar las condiciones de estabilidad inicial, así como un acercamiento a las posibles deformaciones de las columnas de arcilla una vez llega el punto de colapso por

efecto de las cargas bien sea por el peso propio o por sobrecargas de la estructura de pavimento o el paso de los vehículos.

El modelo gráfico que se elabora en el programa y las características que se le dan a cada uno de los estratos o materiales que se incluyen, deben conservar los criterios de equilibrio de los materiales para poder ser analizados, es decir, si se modela una estructura de suelo con diferentes capas, y las condiciones de frontera no ancladas, ocasionan inestabilidad al modelo, de modo que la sumatoria de fuerzas no se iguala y por ende no es probable definir deformaciones internas.

5.3.3 Modelamiento de las Condiciones Actuales de la subrasante

Para definir las características del modelo matemático mediante el que se van a desarrollar los cálculos de las deformaciones presentadas en la condición inicial y la forma como dicho modelo se comporta, se usan características de los materiales de la zona que puedan simular el comportamiento real, las deformaciones en la superficie del pavimento y las fallas de las columnas de material, deben reflejar un mecanismo de falla que sea coherente con lo que en la realidad puede llegar a ocurrir en las condiciones definidas.

Para tal fin se usan parámetros de entrada, algunos propios de las muestras del material en las pruebas de campo y de laboratorio previamente realizadas. Otros datos son tomados de parámetros determinados en materiales con características semejantes. Si bien este proceso no determina con exactitud las condiciones reales del material, es posible definir condiciones cercanas a la realidad que puede tener el material de la zona de estudio para lograr algún nivel de precisión en las condiciones reales del entorno.

Las propiedades del suelo tales como peso específico seco y saturado, Módulo de Young, Relación de Poisson, cohesión, ángulo de fricción interna de la matriz de

material, y un ángulo de dilatación del material son datos principales que el programa pide como entrada. De la misma manera calcula el Módulo de referencia (G) y el Módulo Edométrico (K), así como las velocidades mediante las siguientes expresiones.

$$K' = \frac{E'}{3(1-2\nu')} \quad (\text{Eq. 33})$$

Donde K es el mayor módulo posible en el esqueleto de suelo, E corresponde al Módulo de elasticidad de Young y ν' es la relación de Poisson para el material, del mismo modo se tiene que:

$$K_u = \frac{2G(1+\nu_u)}{3(1-2\nu_u)} \quad (\text{Eq. 34})$$

Donde K_u corresponde al Módulo obtenido en el esfuerzo último.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu')} \quad (\text{Eq. 35})$$

En este caso es importante que la relación de Poisson para el caso último corresponde aproximadamente a 0,5, donde el material no presenta cambio volumétrico; aunque el programa toma el último valor como 0,495 que es el que considera el material más deformable o con la relación extrema de deformabilidad al aplicar la fuerza.

Una vez se incluyen los valores de Módulo E y Relación de Poisson ν' , se tiene entonces de manera directa los demás valores calculados internamente por el programa. Sin embargo, las ventanas de cada uno de estos valores permite que sean editados, de tal modo que si se han realizado las respectivas pruebas de laboratorio y se han medido dichos módulos previamente a colocarlos en el programa, se pueden hacer los ajustes pertinentes con el fin de tratar de colocar en Plaxis los datos más ajustados a la realidad como sea posible.

El material arcilloso encontrado en los sondeos realizados en la zona de estudio, dan cuenta de un material tipo arcillas y turbas arcillosas altamente plásticas, que en pruebas de suelo se han identificado profundidades de nivel freático diversas, entre los 2,0 y los 8,0 metros. Hay gran variedad de posibles casos de falla de materiales que se van deformando en la medida en la que se abate el nivel freático; así mismo, se pueden considerar las variaciones que ocurren entre una región y otra, dado que dependiendo de la velocidad a la que el agua sale de la matriz de material, se pueden presentar presiones de poros por succión de suelos diferentes y por tanto, anchos de grietas superiores o con separaciones diferenciadas entre sí.

Por lo anterior en la simulación de las condiciones originales del material, se realizaron pruebas de suelo a diferentes profundidades que van desde los 3,0 metros de profundidad del nivel freático, hasta los 7,0 metros de profundidad de grietas correspondiente al máximo valor analizado de profundidad del nivel freático, con materiales de diferentes características que se muestran en la Tabla 5.3.

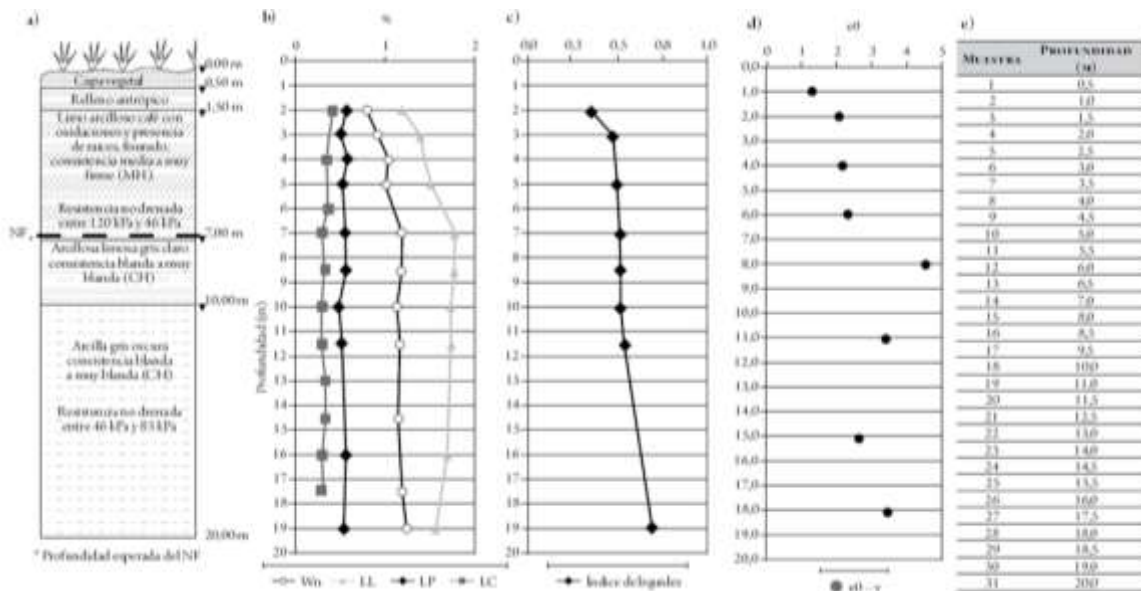


Figura 5.7. Caracterización de materiales de la zona (Pineda *et al*, 2015).

La Figura 5,7 muestra los resultados de un sondeo hecho en la zona de estudio, en la que se presentan las relaciones de límites de Atterberg, índice de liquidéz y relación de vacíos en profundidad de la zona, lo que permite apoyar los criterios en la determinación de los parámetros iniciales de ingreso al programa de modelación matemática de los suelos de la zona.

Tabla 5.3. Parámetros iniciales del material de campo.

<i>Material</i>	<i>Y_d</i>	<i>Y_{sat}</i>	<i>E_o</i>	<i>v</i>	<i>C</i>	<i>φ</i>
	<i>kN/M³</i>	<i>kN/M³</i>	<i>kN/M²</i>	()	<i>kN/M²</i>	°
Arcilla saturada abajo NAF	10	12,5	1000	0,35	2	18
Arcilla estrato intermedio Arriba NAF	12	14,5	3000	0,32	3	21
Arcilla Estrato superior	14	15,5	5000	0,30	5	23
Simulacion del vacío	1	1,1	2	0,2	0,01	0,003

Fuente Autor.

Se tienen tres tipos de arcilla; una que es normalmente consolidada con características de material más débil y deformable, una segunda capa sobreconsolidada con propiedades que definen mejores parámetros de material, y una tercera en superficie, con un grado de sobreconsolidación superior y que manifiesta un material más duro pero a su vez más frágil.

El modelo propuesto aunque no es constante se propone en como modelo preliminar mediante el que se simula un comportamiento de este tipo como base para una futura complejización del problema. En el modelo presentado se percibe que por debajo del nivel freático los suelos se encuentran en saturación total y las condiciones son homogéneas. por su parte, el material que se encuentra por encima de este, es un material que por desecación ha presentado una sobreconsolidación que vuelve el material más rígido y probablemente más resistente para soportar cargas, pero a su vez el material se contrae dejando unos vacíos que en el programa son simulados con un material que cuenta con unas condiciones débiles por debajo de la estructura del pavimento, de este modo que se permita en el Plaxis la condición de estabilidad (ver Figura 5,8).

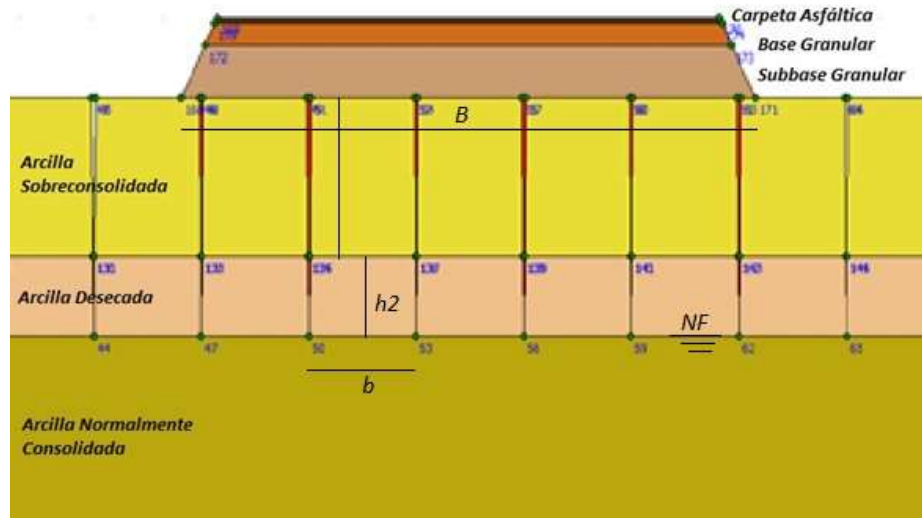


Figura 5,8. Perfil de simulación de material por debajo de estructura del pavimento (Autor).

En la Figura 5,8 se pueden ver las condiciones mediante las que se realizó la simulación teniendo en cuenta diferentes parámetros de entrada. En el modelo se muestra un material amarillo terroso en la parte inferior, que corresponde a la parte de arcillas normalmente consolidadas, estrato superior que se encuentra fisurado sobreconsolidado y un material en superficie que corresponde el material sobreconsolidado de condiciones más críticas por desecación. Las aberturas desde la superficie con una apertura de 5,0 centímetros hasta la profundidad del nivel freático y con material de características de simulación de vacío mostradas en la tabla 5,3, se colocan sólo debajo de la estructura de la vía.

Se percibe en los estudios de exploración de la zona junto la estructura del pavimento, que el material de base granular que se encuentra en la parte superior, tiene una capa de 30 centímetros de espesor y con características típicas de una base granular. Sin embargo, por debajo de esta se encuentra un material de recebo limoarcilloso, en algunos sectores se encuentran escombros de construcción como relleno para la configuración de la estructura de la carretera. Estas exploraciones dejan ver que la carretera fue construida inicialmente sin un diseño de pavimento, es probable que haya funcionado como una vía en material

afirmado sin pavimentar por un tiempo prolongado debido a las variaciones de material encontrado en diferentes puntos de exploración.

Los sondeos dejan ver que la estructura del pavimento no corresponde a un diseño de acuerdo con las características de la zona, siendo esta una vía secundaria de la región cercana a la capital del país. Los diferentes perfiles encontrados dejan ver espesores diferentes de material de mejoramiento de la subrasante, aunque posiblemente corresponden a capas de mejoramiento y mantenimiento de la rodadura sin pavimentar. En estas condiciones, no se puede simular una subbase típica de material granular, sino que se deben tener en cuenta las características de las capas de recebo para configurar el esquema en modelo del programa.

Con este mecanismo se realizaron los modelamientos de separación de fisuras desde 1 metro, hasta una distancia de la mitad del ancho de la banca de la vía siendo de 3,5 metros, con variaciones cada 50 centímetros. Este modelo se replicó para cada una de las profundidades de nivel freático iniciando en 3,0 metros y variando cada 1,0 metro de profundidad hasta una profundidad máxima de grietas de 7,0 metros. El modelamiento se realiza siempre con simetría, buscando que en el centro de la banca, se alinie con el centro de una de las columnas de material que se forman por las fisuras (ver Figura 5,9). Esto se hace con el fin de mantener condiciones de simetría del un lado y otro del modelamiento gráfico, y con ello, tener valores de deformaciones que sean comparables entre las diferentes mediciones o resultados obtenidos de cada modelo desde el programa de simulación numérica.

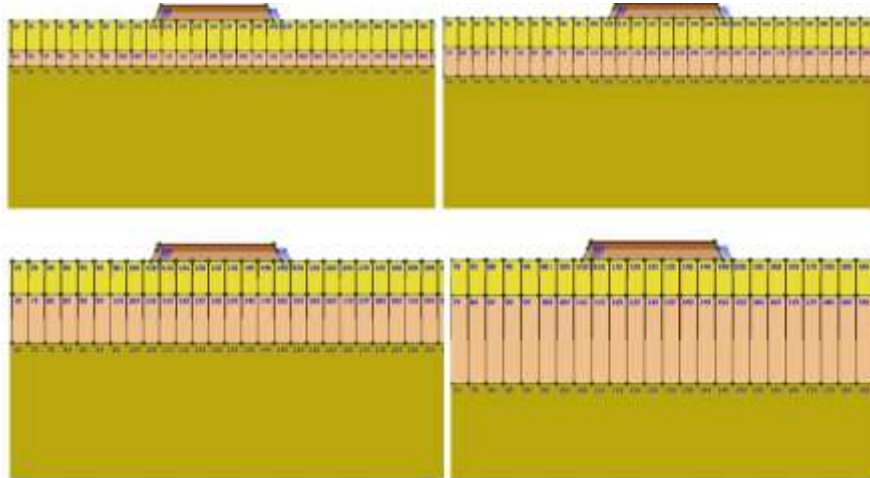


Figura 5,9. Esquema de variación del modelo de simulaciones (Autor).

Una vez realizado cada uno de los modelamientos, se toma en cuenta las deformaciones superficiales en la carpeta superior. La estructura de pavimento no corresponde a un modelo de pavimento de acuerdo con las normas, dado que las características que se colocan del material de base - subbase granular, determinan condiciones que no corresponden realmente a una base sino más a un mejoramiento de suelo y una carretera en afirmado que trabajó así por un tiempo considerable antes de ser pavimentada.

5.4 RESULTADOS DEL MODELAMIENTO DE CONDICIONES IDEALES

Para el desarrollo del modelo se parte de condiciones estáticas del peso propio de la estructura del pavimento sin tener en cuenta cargas dinámicas por el movimiento de los vehículos. Se realizaron modelamientos en los que se tomaron diferentes profundidades de grieta, lo que sugiere variaciones en la profundidad del nivel freático, de tal manera que se puedan ofrecer resultados que simulen las condiciones reales del terreno. Se muestra en la Figura 5,10 el comportamiento de las deformaciones en el eje central de la estructura de pavimento en el modelo desarrollado para una subrasante continua con los estratos previamente definidos; el modelo presenta la profundidad del nivel freático en el esquema a los 7,0

metros, sin embargo las líneas describen la variación de los asentamientos en profundidad para cada una de las variaciones del nivel freático.

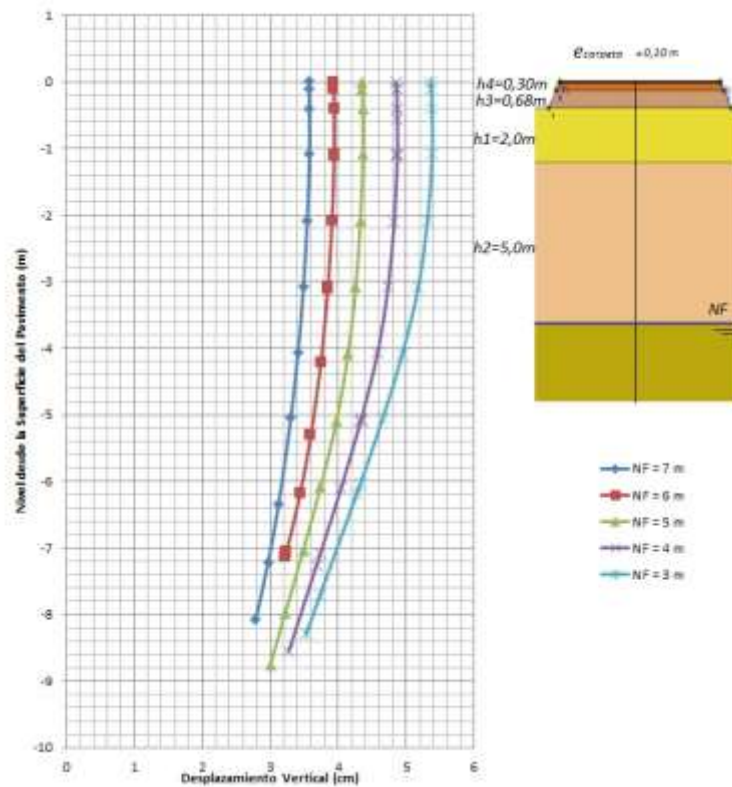


Figura 5,10. Comportamiento de las desplazamientos verticales en el centro de la estructura de pavimento (Autor).

En la Figura 5,10 se muestran las deformaciones verticales o los asentamientos ocurridos desde la parte superficial de la subrasante hasta profundidades de alrededor de los 8 metros con variaciones del nivel freático en cada modelo. Dichas deformaciones son relativamente pequeñas puesto que llegan hasta los 1,80 centímetros en superficie para la profundidad de 3 metros al nivel freático. Esto se puede verificar de mayores desplazamientos en superficie para menores profundidades del NF, dado que como se presume material sobreconsolidado, se tienen capas más gruesas de un material más rígido cerca de la superficie que por debajo, y el hecho de no tener espacio para deformarse hace que las deformaciones sean menores por efecto de las cargas.

De la misma manera se miden las deformaciones superficiales en la carpeta de rodadura con el material que se propone como modelo preliminar para definir su comportamiento, como se muestra en la Figura 5,11. En ella se puede ver el comportamiento de las deformaciones verticales en el eje y en los extremos de la banca de la vía para la estructura diseñada propuesta en el modelo con espesor de capa superior de 2,0 metros y capa intermedia variable con el nivel freático y medida desde el eje de la estructura del pavimento, donde como es esperable, se presenten asentamientos más significativos en el eje de la banca y menos pronunciados en los extremos de la misma.

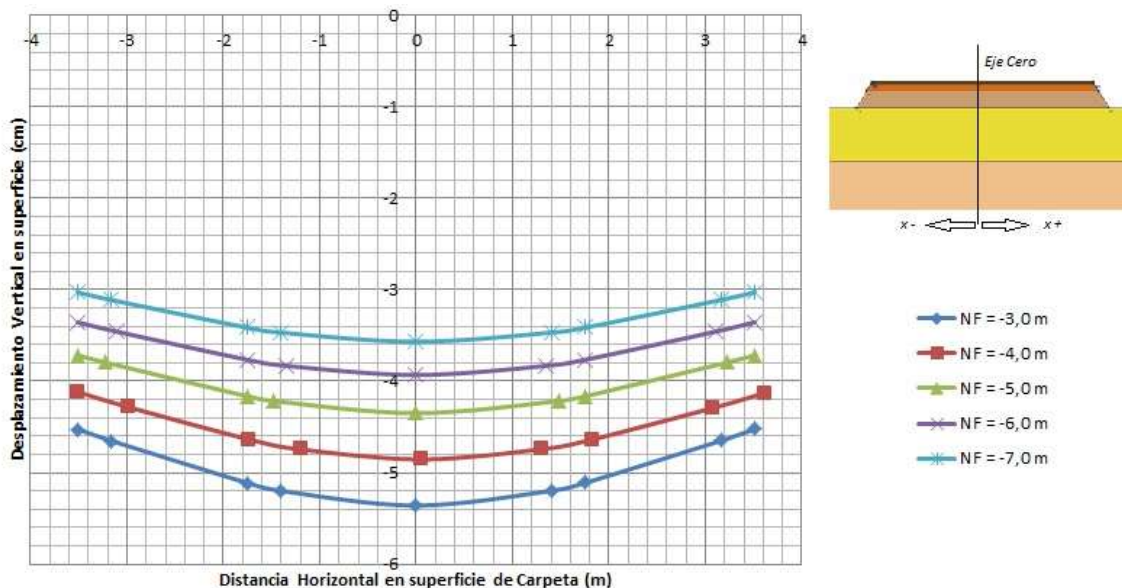


Figura 5,11. Deformaciones verticales en la superficie del pavimento (Autor).

Se puede notar que la tendencia de asentamientos en subrasante continua sigue siendo la que se refleja en el eje de la estructura a diferentes profundidades, dado que en la medida en la que el nivel freático desciende, las deformaciones en superficie son menos pronunciadas debido al incremento de espesores de estratos con mayor rigidéz.

5.5 RESUMEN DEL CAPÍTULO

En la zona de estudio las condiciones de estabilidad del suelo de subrasante son complejas dadas las características del material, esto se explica por la alta vulnerabilidad que presenta a la falla interna del suelo, producto de las fisuras por desecación de en la región. Las simulaciones de suelo en la región se muestran con la posible condición de niveles freáticos a diferentes profundidades y se perciben características ideales de subrasante continua que no presenta problemas de estabilidad sino de capacidad portante normal vistas desde la mecánica de suelos tradicional.

Simular el posible comportamiento de una estructura y sus condiciones desde la subrasante habiendo caracterizado el material y habiendo definido las condiciones de frontera que favorezcan un buen proceso de calibración del modelo para esperar resultados confiables, hacen que el proceso de desarrollo que se espera de la simulación de las fisuras arroje resultados lógicos y confiables a las características de la zona de estudio.

Con las características del suelo, el modelamiento matemático realizado permite inferir que las condiciones son cambiantes y que las deformaciones superficiales en el modelo inicial dejan ver que si los niveles superiores de mayor rigidez tienen mayor espesor, los desplazamientos verticales disminuyen dada la capacidad de las capas de soportar cargas. El nivel es cambiante como se ha encontrado en las exploraciones y el modelo permite simular el comportamiento original sin que se produzcan fisuras, de manera que en el capítulo 6 donde se propone la simulación de las fisuras se van a tener condiciones que ajustarán mejor a la realidad.

6. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE REFORZAMIENTO CON GEOSINTÉTICOS.

6.1 INTRODUCCIÓN

Las deformaciones superficiales de los pavimentos ocurren por diferentes causas, ligadas especialmente a la inestabilidad del suelo de subrasante, lo que ocasiona que las capas granulares de la estructura pierdan la estabilidad desencadenando daños en la carpeta de rodadura. Las deformaciones del material arcilloso por desecación hacen que el suelo de subrasante del pavimento, pierda estabilidad y continuidad, y su comportamiento comienza a variar de manera considerable a una subrasante discontinua.

Los modelamientos matemáticos realizados de las condiciones actuales del terreno en la zona de estudio, permiten identificar los modelos propuestos por Vesga, Meza y Caicedo (2002); la forma en que se generan daños en la subrasante de las vías emplazadas en terrenos arcillosos, dependen de la forma posible que puedan adquirir las estructuras formadas por el material debido a las fisuras, dado que las variaciones debidas a la apertura de grietas en el material pueden ser múltiples.

Generar un modelamiento matemático que simule el comportamiento de los pavimentos con la inclusión de geosintéticos, permitirá identificar mediante simulación, el funcionamiento posible del mismo y determinar si son viables los reforzamientos usados para mejorar la durabilidad de un pavimento y así extender su vida útil, o si por el contrario los gastos de inversión en este tipo de solución, no arroja los resultados esperados que satisfagan los costos en los que se incurre para que mejore la calidad y durabilidad de las estructuras de pavimento.

En el presente capítulo se identifica una estructura de pavimento diseñada por los modelos tradicionales usados en Colombia y se revisan algunos modelos de

mejoramiento con geosintéticos. El comportamiento de los reforzamientos de material de subrasantes, bases y subbases es fundamental para comprender las condiciones de frontera del análisis. Posterior a ello se toma un material útil y se incluye en el modelamiento más factible con el fin de identificar los cambios que muestra la estructura en su conjunto. Dicha inclusión se toma como un reforzamiento de las capas granulares, y se compara la influencia que tiene en el módulo de elasticidad de la estructura; con ello en la mitigación de los asentamientos superficiales que conducen a la falla.

Al final se toma el material encontrado en el campo según las exploraciones realizadas al suelo y las características con las que se cuenta en el sitio de los sondeos, de manera que se pueda llevar un modelamiento bajo condiciones de diseño de pavimento adaptado a los métodos tradicionales y su posible comportamiento adaptado a las condiciones reales de la vida en este momento.

6.2 DEFINICIÓN DEL MODELO DE ANÁLISIS POR DISEÑO TRADICIONAL DE PAVIMENTOS.

Con el fin de analizar mediante simulación matemática el comportamiento de estructuras de pavimento emplazadas sobre suelos fisurados por desecación, se deben verificar las condiciones de un pavimento diseñado por métodos tradicionalmente usados y aceptados en Colombia. Este proceso identificando las condiciones reales de la zona, permite definir los espesores de capas granulares en estructuras de pavimento flexible semejante al que se encuentra en el sector de influencia del estudio.

Para la investigación se han definido características de un material propio de la zona respecto a la capacidad portante en algunas profundidades y con propiedades de capas granulares de Base y Subbase típicas de este tipo de estratos usados de manera clásica en obras viales, así como una carpeta de rodadura en pavimento asfáltico y espesor semejante al encontrado en las

exploraciones de material en la zona de estudio. Los criterios de análisis de los materiales usados para esta primera fase, salvo las capas granulares, son aproximados a las condiciones de campo bajo el presupuesto de un diseño cuyos resultados se acercaran a las condiciones propias del sector.

6.2.1 Determinación de los parámetros para el diseño tradicional.

Para diseñar una estructura de pavimento se cuenta con algunos métodos empíricos como es el caso de la SHELL, que permite desarrollar mecanismos de análisis de materiales y de la proyección del tráfico, en aras de planear una estructura con espesores de capas granulares para el pavimento. En Colombia y muchos países, el método AASHTO es el más usado; este permite encontrar un número estructural (*SN Structural Number*) con el que se encuentran los espesores de capa para garantizar una estructura que cumpla con las condiciones requeridas por el tráfico durante el periodo de diseño buscando los menores costos de construcción y posterior mantenimiento.

Para efectos del modelo preliminar se ha usado el método de la AASHTO 93 para diseñar el pavimento que se requiere en la vía de afectación en la zona de estudio, de manera que tenga una estructura que satisfaga las condiciones de diseño y los resultados tengan punto de comparación con lo que se ha encontrado en los sitios de trabajo exploratorio.

Es importante al momento de diseñar el pavimento, identificar esfuerzos, deformaciones y deflexiones de acuerdo con las cargas de tráfico esperadas para la zona durante el periodo de diseño. La metodología relaciona las reacciones de los materiales a las cargas estáticas con el comportamiento de la estructura del pavimento como las deformaciones verticales en la superficie de rodadura del modelo. En el diseño se tienen en cuenta factores como el nivel de confiabilidad, las condiciones de drenaje y aspectos climáticos de la región que son datos de entrada importantes para el mismo. De la misma forma se define el índice de

servicio final que se espera para el pavimento considerando las características del tráfico de diseño desde los volúmenes actuales y hacia el período proyectado de la vida útil de la vía.

- **Tráfico de Diseño.**

Con el fin de identificar el tráfico esperado durante el periodo de diseño de pavimento para la zona, se debe identificar el tráfico de la región respecto al comportamiento social y económico de la misma. En la zona se encuentra en la definición de estaciones de conteo del Invías para aforos de tránsito de las carreteras nacionales la estación 980. Dicha estación no cuenta con la información permanente y actualizada sino que se tiene información de la década de los 80s.

Por efecto de las condiciones de movilidad y considerando las disposiciones del Invías, se debe tener un aforo de la vía o tomar con alguna precaución los aforos existentes de carreteras con características semejantes respecto a la economía, topografía y condiciones socioeconómicas de la región, con el fin de transferir un comportamiento semejante de los aforos dispuestos para este fin. Por lo anterior, basado en los criterios del Instituto Nacional de Vías para determinación de la variable tránsito para el periodo de diseño de la estructura de pavimento, se tomó la estación 753 correspondiente al corredor Cajicá-Tabio.

De la estación tomada se tiene que para el aforo del año 2006 que es con la información caracterizada de la zona con la que cuenta el Invías, se tiene la caracterización de vehículos pesados que se presenta en la Tabla 6,1.

Tabla 6,1. Tráfico Promedio Diario de estación 753 (Cajicá – Tabio)

TPDS CAMIONES AÑO 2006					
TOTAL	C - 2P	C - 2G	C - 3 - 4	C - 5	>C - 5
2.223	879 37,83%	865 37,24%	205 8,82%	246 10,59%	28 5,53%

Fuente. Datos de Tablas del INVÍAS Modificada por Autor (2016).

De la misma forma como para los años posteriores no se cuenta con datos de la estación utilizada, se toman las características de los años siguientes con el fin de determinar las variaciones del tráfico para hacer una aproximación a la zona particularmente esperando acercarse a la dinámica de crecimiento normal del tránsito para el periodo de diseño. En la Tabla 6,2 se muestran algunas estaciones cercanas extraídas del mismo que permiten hacer un ajuste del crecimiento normal del tránsito para la región.

Tabla 6,2. Comportamiento anual de estaciones de aforo en la región de la Sabana.

TPDS CAMIONES DE TODOS LOS TIPOS						
ESTACION	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Siberia – La Punta	11437	12800	13566	14410	18475	19411
Mosquera – Siberia	11450	14169	15869	16561	20776	21139
Mosquera – Tres Esquinas	52900	51395	41484	55044	70109	74971

Fuente. INVÍAS, Modificado por el autor (2016).

De los datos obtenidos en las tablas se tiene un comportamiento de la región ascendente que se puede trabajar respecto a los análisis de datos crecientes (ver Figura 6,1), ello se explica con el mejoramiento de la infraestructura vial de la Sabana y del crecimiento económico nacional que son condiciones lógicas de la dinámica del tráfico de las regiones y del desarrollo que ha mostrado el país en los últimos años.

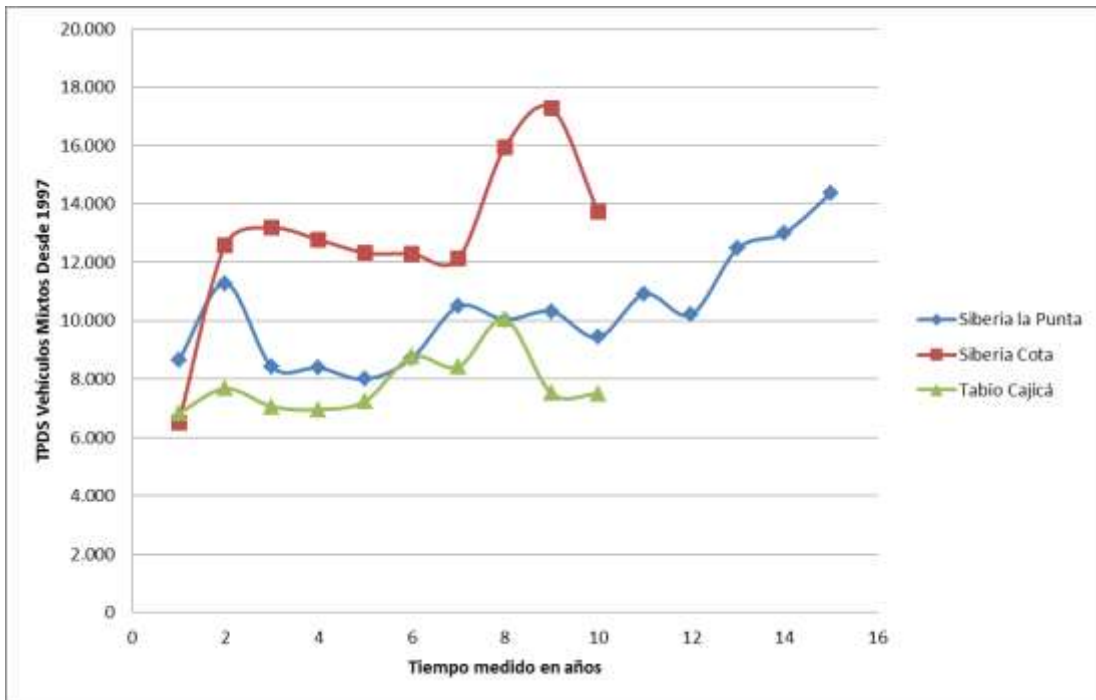


Figura 6,1. Comportamiento del tráfico en estaciones de la región de la sabana (Autor usando datos del INVIAS).

Tomando para la zona la estación de Cajicá - Tabío e identificando su comportamiento de crecimiento, se realiza el ajuste por regresión lineal con el fin de determinar la ecuación que permita proyectar el tráfico para años en los que no se cuenta con datos de los aforos y para la proyección del tráfico futuro en el periodo de diseño. Posterior a ello se toma para el tráfico futuro la distribución del tráfico tomado de la estación 753. La Figura 6,2 permite con la información de la estación de ajuste ver la regresión lineal, considerando que para el año 2004 se presenta un pico en el tráfico de los vehículos totales, así como en el incremento de los camiones que transitaron por la región.

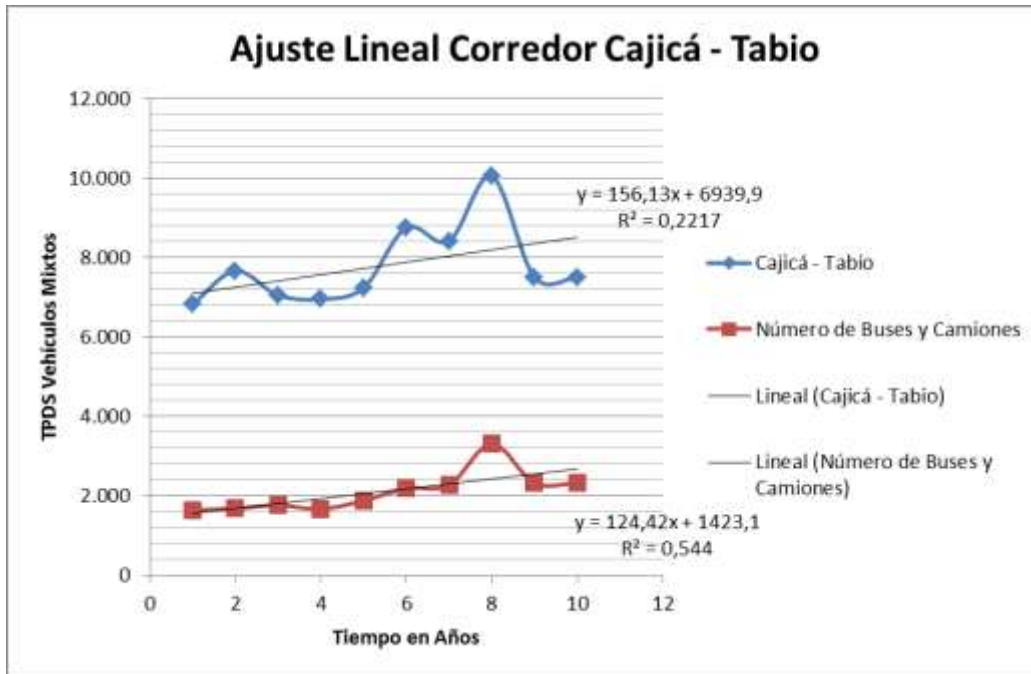


Figura 6,2. Ajuste lineal del comportamiento del tráfico (Autor).

Con el comportamiento de la región se proyectan los datos para el tráfico al inicio del periodo de diseño siendo este el año 2016, lo que va a permitir tener datos cercanos a las condiciones de la zona.

$$y = 124,42x + 1423,1 \quad (\text{Eq. 36})$$

De la ecuación 36 se tiene que para el año 2016 si se considera un crecimiento normal correspondiente a la ecuación se puede decir que el tráfico de vehículos pesados tipo Buses y Camiones a 2016 es:

$$y = 124,42(10) + 1423,1$$

$$y = 2.667$$

Con estos datos se puede pensar que para el año 2016 en el corredor vial Tabio – Cajicá, se esperarían un número de alrededor de 2.667 camiones y buses como TPD, siendo esta una cantidad considerable para el análisis de flujo esperado para la región en el periodo de diseño.

Con este análisis se tiene que el número de ejes equivalentes para el periodo de diseño de 15 años típico de un proyecto de carretera con pavimento flexible, corresponde a la proyección hecha y el número de ejes equivalentes con los que se cuenta respecto a los porcentajes de distribución de vehículos pesados en la zona. En la Tabla 6,3 se realiza el ajuste de las condiciones de distribución para el año de inicio del periodo de diseño del tráfico a 2016 en la estación planeada.

Tabla 6,3. Tráfico Promedio Diario Ajustado 2016 de estación 753.

TPDS ESPERADO DE CAMIONES AÑO 2016					
TOTAL	C - 2P	C - 2G	C - 3 - 4	C - 5	>C - 5
25.740	9.737 37,83%	9.586 37,24%	2.270 8,82%	2.708 10,59%	1.803 5,53%

Fuente Autor.

El análisis de las cargas de cada uno de los tipos de camión, permite proyectar el tráfico a un periodo de diseño de 15 años, desde el 2017 hasta el 2031. En la Tabla 6,4 se muestra la distribución del tráfico que se espera a 2016 de tráfico como el actual, y la proyección al periodo de diseño del pavimento; se presentan también los factores de ajuste de cargas por eje en cada una de las categorías, considerando en el aforo como camiones pequeños las busetas y como camión grande los buses, dado que las características de dichos vehículos corresponden a la caracterización internacional de camiones para el diseño del pavimento.

Se obtiene que para el periodo de diseño de la zona se puede tener un tráfico de unos 16'197.882 ejes equivalentes de 8,2 toneladas que corresponden a un tráfico normal en la región, puesto que es una carretera de una calzada y es un municipio pequeño en el que la mayoría de los vehículos que se movilizan son livianos que no son tenidos en cuenta para el análisis de las cargas en la estructura del pavimento.

Tabla 6,4. Proyección de ejes equivalentes al periodo de diseño.

Tipo Camión	Traf. Actual	Tráfico 2031	Tipo	Factor	Eje Equivalente
CP	1009	368.258	Sencillo	3,8	1.399.381
				6,6	2.430.503
CG	993	362.515	Sencillo	3,8	1.377.556
				8,2	2.972.620
C3-C4	235	85.859	sencillo	6,6	566.668
			Tanden	15	1.287.881
C5	282	102.797	sencillo	6,6	678.459
			Tanden	15	1.541.953
			Tanden	15	1.541.953
C6	147	53.832	sencillo	6,6	355.292
			Tanden	15	807.481
			Triden	23	1.238.137
TOTAL EJES EQUIVALENTES					16.197.882

Fuente. Autor.

Después de hecho el análisis se diseña con material de condiciones semejantes a las encontradas en la región, partiendo de la ecuación de comportamiento del tráfico W18 que corresponde al propuesto como el tráfico para el periodo de diseño de la estructura de pavimento flexible.

$$\text{Log } W_{18} = (z_r)(S_o) + (9.36)(\log(SN+1)) - 0.20 + \frac{\log\left[\frac{\Delta ISP}{4.2-1.5}\right]}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{1.18}}} + (2.32)(\log M_r) - 8.07$$

(Eq. 37)

Las consideraciones que el método AASHTO toma para el análisis de la ecuación de comportamiento son:

- W18.* Número de aplicaciones de carga 8,2 ton.
- SN.* Número Estructural del Pavimento.
- ΔISP.* Diferencia de Índice de Servicio Inicial y Final.
- MR.* Módulo de Resiliencia de la Subrasante.
- So.* Desviación estandar de los posibles errores por tráfico y diseño.
- Zr.* Parámetro estadístico asociado a la distribución normal de datos.

Con estos datos y usando el método empírico de diseño se obtiene el número estructural del pavimento (SN) que se desarrolla para un diseño adecuado. Para el proceso de diseño se usa un nivel de confiabilidad del 80%, dado que es una vía rural secundaria que comunica carreteras principales con un centro poblado que demanda tráfico de todos los tipos.

Del modelo de análisis se tiene que la ecuación de diseño de capas de acuerdo con el número estructural encontrado para el modelo corresponde a:

$$SN = a_1 * D_1 + a_2 * m_2 * D_2 + a_3 * m_2 * D_3 \quad (Eq. 38)$$

Con la Ecuación 38 se tiene que el Número Estructural (SN), se encuentra dependiendo de:

- a = Coeficiente Estructural de Capa, que depende del módulo de cada capa.
- D = Espesor de la capa.
- m = Coeficiente de drenaje.

Los coeficientes a de cada una de las capas depende de las condiciones de los materiales, de los procesos constructivos, de los estados de esfuerzo de las capas y se debe tomar mediante análisis de material en campo, que comunmente se logra mediante correlaciones con el CBR del material compactado. Estos coeficientes corresponden a 0,44 para mezclas asfálticas, 0,14 para bases granulares y 0,11 para subbases. Del mismo modo los coeficientes de drenaje se relacionan especialmente a las características del material que permite que el agua lluvia que cae, drene fácilmente y sea evacuado de la estructura del pavimento, o si por el contrario el agua que cae se deposita y se demora mucho tiempo en el proceso de drenaje, lo que hace que el material de la estructura se inunde y genere daños en la estructura. Estos coeficientes de drenaje también

dependen de las características de evacuación de agua y las condiciones climáticas de la zona.

Tabla 6,5. Coeficientes de drenaje *m*.

Capacidad de Drenaje	% de tiempo en el que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación.			
	Menos del 1 %	1 a 5 %	5 a 25 %	Más del 25 %
Excelente	1,40 – 1,35	1,35 – 1,30	1,30 – 1,20	1,20
Bueno	1,35 – 1,25	1,25 – 1,15	1,15 – 1,00	1,00
Regular	1,25 – 1,15	1,15 – 1,05	1,00 – 0,80	0,80
Malo	1,15 – 1,05	1,05 – 0,80	0,80 – 0,60	0,60
Muy malo	1,05 – 0,95	0,95 – 0,75	0,75 – 0,40	0,40

Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

De la tabla 6,5 se presentan los coeficientes de drenaje (*m*) con los que se hace el ajuste a las capas para el cálculo de los espesores de material, una vez se encuentra el número estructural del pavimento.

Se toma un CBR de la subrasante del 1% considerando que es un material arcilloso, de baja capacidad portante en condiciones de saturación, pero que además puede presentar fisuras por desecación. Luego se hace el análisis para las condiciones de la zona considerando un ΔPSI de 2,2 y una desviación estándar de 0,4. Estos datos arrojan por modelo gráfico del método AASHTO un número estructural SN de 6,8. Se vuelve con este dato a la ecuación 38 y se tiene que.

$$SN = a_1 * D_1 + a_2 * m_2 * D_2 + a_3 * m_2 * D_3$$

Para este diseño se toman las capas granulares con capacidad de drenaje normales dadas las características de la zona en la que el agua puede durar entre 3 a 6 días en salir completamente, puesto que no existen drenes, la zona es muy plana y el material es impermeable, lo que hace que se tenga un m_2 y m_3 de 1,1,

así como coeficientes de estabilidad de 0,44 para carpeta, 0,14 para base y 0,11 para subbase.

$$6,8 = 0,44 * 3,93 + 0,14 * 1,1 * D2 + 0,11 * 1,1 * D3$$

$$5,07 = 0,154 * D2 + 0,121 * D3$$

$$D2 = 11,81 \text{ Pulgadas}$$

$$D3 = 26,87 \text{ Pulgadas}$$

$$D2 = 30,0 \text{ Centímetros}$$

$$D3 = 68,3 \text{ Centímetros}$$

Con esta estructura se realiza el análisis de las deformaciones a tensión mediante el DEPAV, siendo este un programa de diseño racional de pavimentos en la estructura con la que se cuenta, a la que se le deben hacer los análisis de las deformaciones verticales en la parte más baja de la carpeta y de cada una de las capas granulares, así como las deformaciones de tracción en la parte inferior de la carpeta de concreto asfáltico, con el fin de determinar que las deformaciones sean admisibles para el tráfico esperado.

Analizado el modelo mediante el programa que trabaja por modelo racional, se encuentra que las deformaciones existentes en la parte baja de la estructura del pavimento con el diseño encontrado, se usó un material de base granular con un módulo de elasticidad típico de 2.500 kg/cm² y una subbase granular típica de 1.200 kg/cm². Estos valores junto con relaciones de Poisson típicos de 0,25 para cada uno, dejaron ver en el diseño las siguientes condiciones.

Deformaciones verticales bajo la carga de 8,2 ton y los esfuerzos de tracción que se localizan en la parte baja de la carpeta de rodadura se pueden analizar en el programa con el fin de limitar y caracterizar si el pavimento sobre diferentes tipos de arcilla blanda muestran un comportamiento adecuado que responda al diseño (ver tabla 6,6).

Tabla 6.6. Resultados de análisis racional en DEPAV del pavimento diseñado.

	<i>Arcilla</i> <i>E 800kg/cm2</i>	<i>Arcilla</i> <i>E 700kg/cm2</i>	<i>Arcilla</i> <i>E 600kg/cm2</i>	<i>Arcilla</i> <i>E 500kg/cm2</i>
ϵ Carpeta (mm)	$1,14 \times 10^{-4}$	$1,14 \times 10^{-4}$	$1,14 \times 10^{-4}$	$1,14 \times 10^{-4}$
ϵ Base (mm)	$1,25 \times 10^{-4}$	$1,26 \times 10^{-4}$	$1,27 \times 10^{-4}$	$1,28 \times 10^{-4}$
ϵ Subbase (mm)	$6,06 \times 10^{-5}$	$6,08 \times 10^{-5}$	$6,10 \times 10^{-5}$	$6,14 \times 10^{-5}$
τ Carpeta (kg/cm^2)	7,81	7,82	7,83	7,84

Fuente. Autor

Los resultados permiten verificar que, para condiciones de subrasantes blandas se producen altas deformaciones cuando las cargas de contacto de la llanta de camiones son las cargas de diseño permisibles en las normas de INVIAS; el estudio mediante el programa muestra que no se exceden los desplazamientos verticales permisibles debidos a la carga de vehículo en la estructura de pavimento, especialmente en la superficie de la subrasante; la dinámica de diseño con la que se desarrollan los análisis para el diseño del pavimento propuesto, permite garantizar que en condiciones de subrasante continua, las cargas de los camiones ejercen unos esfuerzos que son distribuidos en las capas granulares y transmitidos al suelo de subrasante de forma homogénea..

6.3 ANÁLISIS DEL DISEÑO MEDIANTE EL PROGRAMA PLAXIS.

Las estructuras de pavimento que se diseñan bajo cualquiera de los métodos empíricos, son desarrollados mediante supuestos relacionados con las características de los materiales en el campo, las condiciones de compactación de las capas granulares y materiales confinados que permiten que su comportamiento sea satisfactorio en el nivel de la subrasante. Por lo anterior, se presume que la capa de soporte de la estructura de pavimento, se supone las características usadas para el modelamiento en condiciones de isotropía por debajo de la estructura, lo que favorece que los cálculos matemáticos por métodos tradicionales sea aplicable.

Sin embargo, cuando se considera que las subrasantes arcillosas presentan fisuras por desecación y abatimiento del nivel freático que cambia gradualmente las características de la subrasante, se tiene entonces un mecanismo de análisis que vuelve un poco más complejo que el modelo usado para el diseño, pues si la subrasante presenta fisuras en superficie, se producen discontinuidades del material, lo que hace que la estructura ya no trabaje como el modelo idealizado de diseño de pavimento propone, sino que tenga estructuras de material que van a tener un comportamiento diferente.

El siguiente paso para comparar la estructura de pavimento modelada, consistió en realizar una serie de modelamientos de la estructura diseñada del pavimento y analizada por el modelo racional, con el fin de determinar si el comportamiento de toda la estructura emplazada sobre subrasantes fisuradas, presenta variaciones significativas en la superficie considerando las deformaciones en subrasante continua ahora por efecto del peso propio de la estructura en el tiempo. Posteriormente se hace el análisis de la misma estructura determinada en el modelamiento y se procede a desarrollar el análisis mediante el programa Plaxis para diferentes condiciones de fractura del suelo arcilloso producto de la desecación de suelo.

La estructura diseñada mediante el método AASHTO es llevada al programa de simulación Plaxis modelando tres perfiles de material de suelo de subrasante y sobre la capa superficial se coloca la estructura de pavimento como puede verse en la figura 6,3. Del mismo modo se tiene que en la estructura del pavimento se toman las capas de material de subbase y de una base, siendo características semejantes a las usadas en el análisis por DEPAV con el fin de garantizar que los resultados obtenidos de la estructura correspondan a la estructura diseñada por el método racional. Es importante señalar que el uso del DEPAV se desarrolla para definir que los espesores de capa propuestos en el diseño por *AASHTO*

garanticen la estabilidad, pero las propiedades que se llevan al PLAXIS son las condiciones de módulo de elasticidad y relación de Poisson.

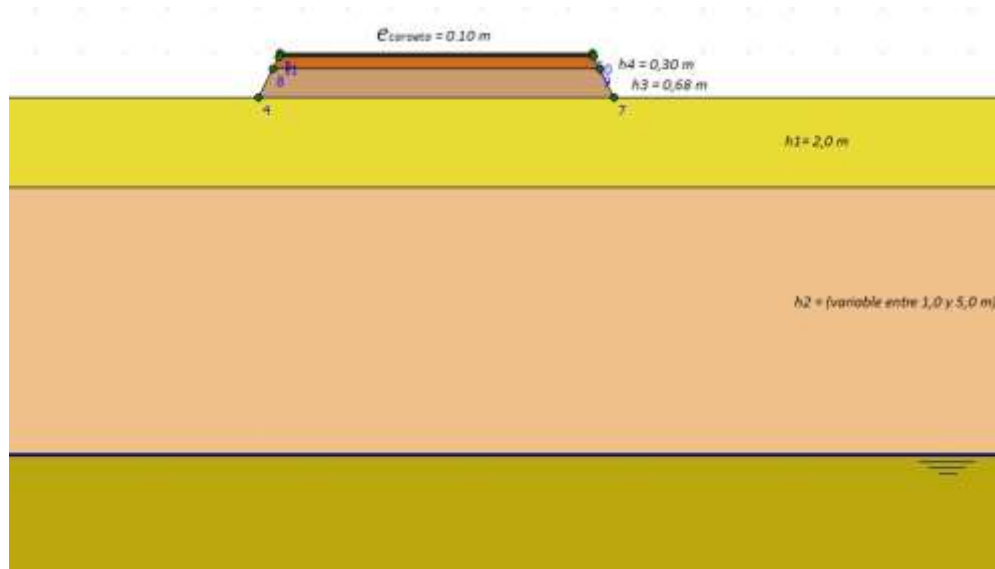


Figura 6,3. Modelo de estructura diseñada de pavimento en Subrasante continua (Autor).

El modelo desarrollado fue replicado con diferentes profundidades de nivel freático, usando las mismas tres capas de material arcilloso, una capa superficial de 2 metros, una segunda capa que es variable desde los primeros 2 metros hasta el nivel freático y un tercer tipo de material por debajo del nivel freático que corresponde al material normalmente consolidado. Cada uno de los modelos propuestos ha sido analizado mediante el programa y evaluadas las deformaciones verticales en el sistema estructura suelo.

En la Figura 6,4 se puede ver el comportamiento de los desplazamientos verticales en la estructura de pavimento simulando en la que se considera una subrasante continua con espesores de capa arcillosa variable en profundidad considerando el abatimiento del nivel freático cada metro. Este modelo es un punto de partida para el análisis de las deformaciones superficiales en la carpeta de rodadura y en la estructura debidas al peso propio del material granular y la carpeta; en este modelo no se van a tener en cuenta las cargas dinámicas sino

únicamente el peso propio de la estructura de pavimento diseñada para las condiciones de la zona.

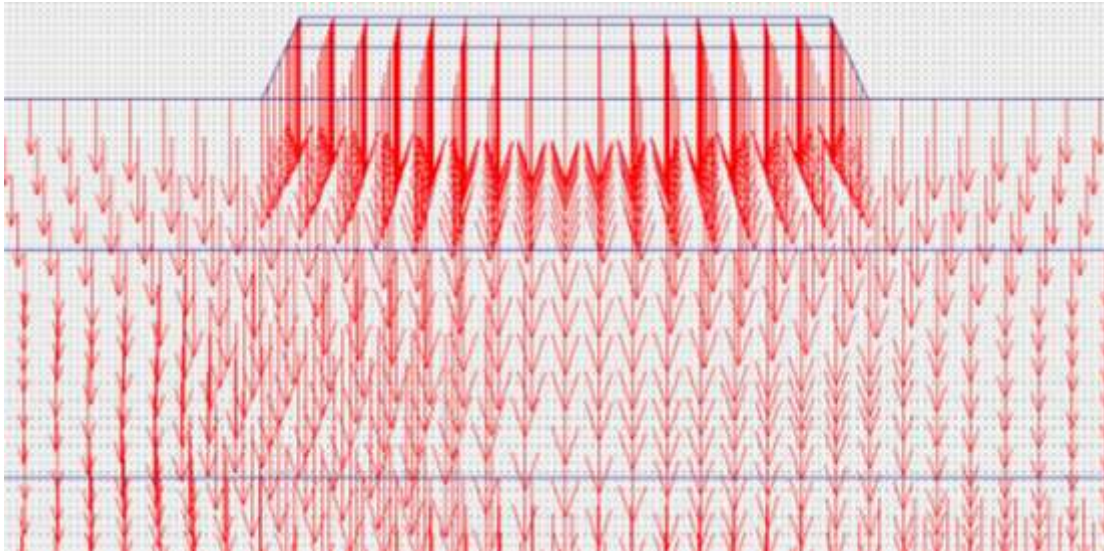


Figura 6,4. Comportamiento de las desplazamientos verticales por sobrecarga (Autor).

La figura 6,5 muestra la forma como se representan mediante el programa de simulación los desplazamientos totales debidos a la carga independientes del tiempo; en éste modelo se conjugan los desplazamientos verticales y los horizontales y se percibe la manera como las cargas de la estructura de pavimento generan empuje que hacen que las flechas de vector de desplazamiento presentan direcciones acordes a lo esperado por dichos empujes.

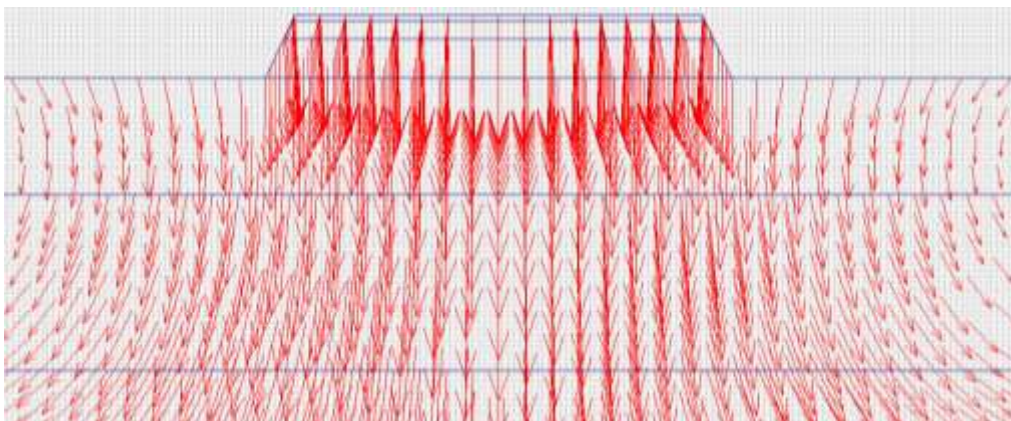


Figura 6,5. Comportamiento de las desplazamientos totales (Autor).

En la Figura 6,6 se muestra un esquema típico de los esfuerzos que se producen tanto en la estructura del pavimento como en la subrasante; puede notarse que en estratos diferentes, el bulbo de presiones que se genera por debajo de la sobrecarga presenta un comportamiento de mayores esfuerzos en la región de material desecado, mientras que por debajo del nivel freático la distribución de los esfuerzos el bulbo de presiones es similar al modelado desde la teoría de Boussineq.

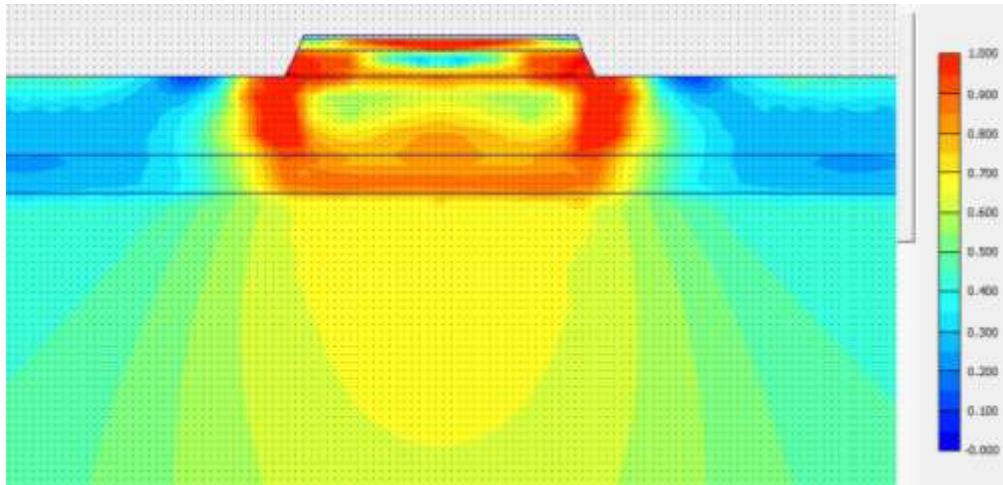


Figura 6,6. Distribución de esfuerzos por estructura del pavimento (Autor).

La distribución de esfuerzos se desarrolla de modo coherente con el modelo clásico de la mecánica de suelos; en este modelo como se presenta en el capítulo 5, se analizan los desplazamientos totales tanto en profundidad como en superficie, lo que permite simular la acción de las cargas en la estructura general del suelo y la manera como el mismo responde; sin embargo, este modelo ideal de suelo que se deseca pero que no se fractura no es real, debido a las fuerzas de succión que ocurren en el material en la medida que desciende el nivel freático, tema que fue descrito en detalle en el capítulo 2. Por lo anterior, es importante genera un modelo de simulación que identifique las fisuras como discontinuidades de la subrasante y la manera como se comporta el suelo cuando esto ocurre.

6.4 SUBRASANTE FISURADA POR DESECACIÓN.

En la zona de la sabana del Occidente de Bogotá, se han encontrado lugares en los que por desecación de las arcillas, el material se ha fracturado y las evidencias en superficie demuestran que los daños internos del material por pérdida de agua repercuten en la superficie. El modelamiento numérico para simular esta condición se hace complejo dado que al ser el suelo un material heterogéneo, complejiza predecir el lugar exacto por donde el suelo iniciará su fisuramiento interno, por lo que es necesario hacer modelos generales múltiples que permitan abordar un amplio espectro de posibles fallas del material, a fin de buscar las condiciones más críticas esperadas en la simulación.

Para determinar el modelo se tomaron los tres estratos de suelo mencionados en el capítulo 5; una capa superficial fisurada de arcillas sobreconsolidadas, una capa intermedia fisurada y una capa inferior normalmente consolidada por debajo del nivel freático del suelo. El modelo plantea una estructura de pavimento típica emplazada sobre una subrasante con fisuras que se abren desde la superficie del terreno hasta la profundidad del nivel freático.

Es importante aclarar que los modelos se consideran simétricos, lo que implica que las fisuras propuestas para el modelo matemático desarrollado, se ubican de forma semejante en todo el esquema de análisis, considerando la misma amplitud de las grietas formadas, igual longitud de fisura y separaciones constantes de las mismas. Este modelo idealizado se realiza de tal manera que permita hacer un primer acercamiento al comportamiento del suelo arcilloso fisurado por desecación, que permite dar resultados que se aproximen a las condiciones idealizadas de deformación en la estructura del pavimento y con ello tener criterio de comparación de la acción de los reforzamientos.

Con el fin de simular las discontinuidades del material, se realizó un modelamiento de fisuras cuya mayor abertura es de 5,0 centímetros en la superficie y que se

suponen verticales hasta la profundidad del nivel freático, lo que representa para el modelo bidimensional, en columnas de material arcilloso de diferentes estratos que fallaron y se ven sometidos a presiones internas de succión, así como a las presiones por el peso propio del material que queda por encima de la base de las columnas formadas (ver Figura 6,7).

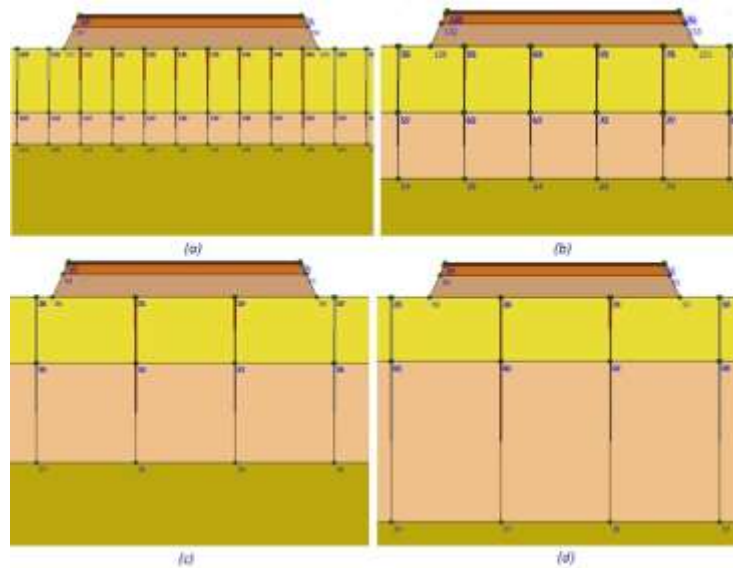


Figura 6,7. Modelo de material con estratos fisurados arriba del NF (Autor).

Puede notarse en la Figura 6,7 que los modelos varían de separaciones entre fisuras y que las profundidades del nivel freático cambian, manteniendo constante la capa de arcilla de la superficie con un espesor de 2,0 metros. En la parte (a) se muestran fisuras cada metro con profundidad de grietas de 3,0 metros, la parte (b) muestra fisuras cada 2,0 metros con profundidades de 4,0 metros; la sección (c) deja ver fisuras cada 3,0 metros con profundidad de fisuras de 5,0 metros y la parte (d) presenta fisuras cada 3,5 metros a 7,0 metros de profundidad. Por debajo de la estructura las discontinuidades fueron propuestas con un material que simula vacío, dado que se prevé que son espacios vacíos por las fisuras. En el modelo de simulación se incluye un material de muy baja resistencia a las deformaciones con el fin de simular el vacío al permitir que el material de suelo no encuentre resistencia lateral a las deformaciones. Esto debe hacerse, dado que el programa

exige como parámetro para su funcionamiento que estos espacios no se comporten de forma indeterminada, sino que sea factible analizarlo como material en subrasante.

Para calibrar las posibles variaciones se tomaron condiciones diferentes de estado del suelo; se realizaron variaciones de separación de fisuras desde 1,0 metro cada una hasta el ancho de la mitad de la banca, con variaciones cada 50 cm. Así mismo, se hizo para profundidades de nivel freático desde los 3,0 metros de profundidad que ha sido la condición típica encontrada en múltiples partes en la región de la Sabana de Bogotá, hasta una profundidad de 7,0 metros como condición de análisis. Para todas las profundidades determinadas se han definido la misma condición de fisuras con separaciones variables.

Cada uno de los modelos son analizados con la misma estructura de pavimento de acuerdo con el diseño realizado por el método *AASHTO* para este tipo de vías. La ubicación de la estructura sobre el suelo fisurado se realizó considerando siempre que en el centro de la estructura de pavimento coincidiera con el centro de la columna de material arcilloso central en el modelo, con el fin de brindar simetría en los extremos del pavimento para el análisis. Esto se realiza de esta manera con el fin de dar un primer mecanismo que aunque idealizado, permite calibrar parámetros posibles de operación adecuada del programa. Las condiciones del nivel freático y acción del agua fueron aplicadas a cada uno de los modelos y desarrollado el cálculo de mallas muy finas en las que cada elemento del análisis tiene 15 nodos de manera que se obtienen resultados con la mayor precisión posible esperada para cada modelo.

Desarrollados los análisis se toman los resultados de desplazamientos verticales en el eje de la estructura del pavimento desde la superficie de la rodadura hasta una profundidad semejante de aproximadamente 7,0 metros por debajo del nivel de la superficie y se correlacionan a diferentes profundidades del nivel freático para determinar las variaciones de dichas deformaciones en cada uno de los

casos propuestos. Posterior a este proceso se identifican las variaciones en deformaciones superficiales que ocurren en cada uno de los modelos analizados para luego ser comparados con el modelo de estructura de refuerzo mediante la inclusión de geosintéticos. Las relaciones propuestas en el modelo se ejecutan con el fin de determinar la manera de colocar la estructura y la forma más adecuada para definir su afectación real en la estructura de completa incluyendo sus efectos en la subrasante.

En la Figura 6,8 se muestra un esquema de los puntos de plastificación mediante los que se identifican las posibles condiciones de falla de cada una de las columnas de material; se puede ver la forma de simetría en la que se señalan los puntos plásticos que generan unas superficies de falla probables que permiten prever las zonas por las que se espera que fallan las columnas de material.

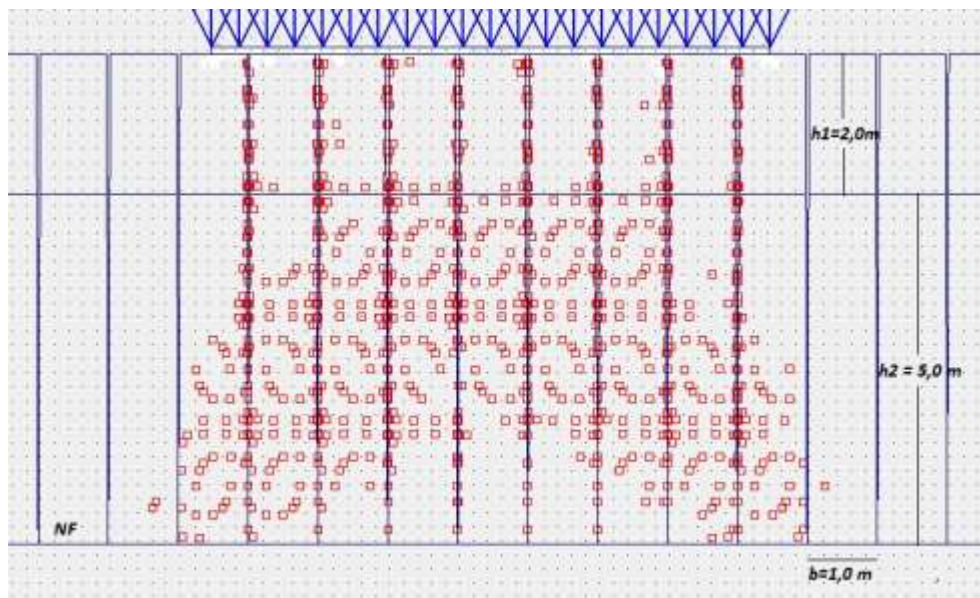


Figura 6,8. Puntos de Plastificación de uno de los modelos (Autor).

Como puede verse el modelo dispone de unas cargas que son equivalentes al peso total de la estructura de pavimento, esto se coloca de esta forma para simular el peso propio del material granular y la carpeta de rodadura que conforman la estructura. Del mismo modo puede verse que el modelo mostrado presenta unos puntos plásticos ubicados especialmente en el material que rellena

las fisuras, debido principalmente a que el programa evalúa sus deformaciones, pero por debajo de la estructura se percibe una serie de puntos en la segunda capa, correspondiente al material intermedio desecado.

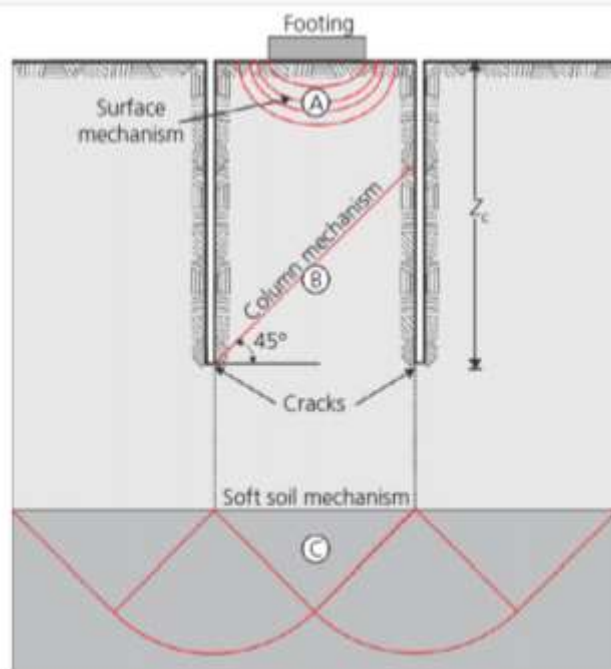


Figura 6,9. Modelos de falla de material fisurado (Lozada *et al*, 2015).

La Figura 6,9 propuesta por Lozada *et al*, (2015), presentan en un modelo desarrollado con una zapata de carga puesta sobre una estructura con fisuras inducidas tres mecanismos de falla en el modelo. El propuesto por lozada especialmente en el mecanismo de falla de las columnas tiene concordancia con el esquema en la falla (B), es un mecanismo que presenta una orientación a la fisura en un ángulo de 45° , esto permite identificar y comparar de las figuras 6,9 a 6,9, que el mecanismo de falla que aparece modelado desde los puntos plásticos del material, puede reflejar un esquema cercano a la falla diagonal propuesta en el estudio de los autores mencionados.

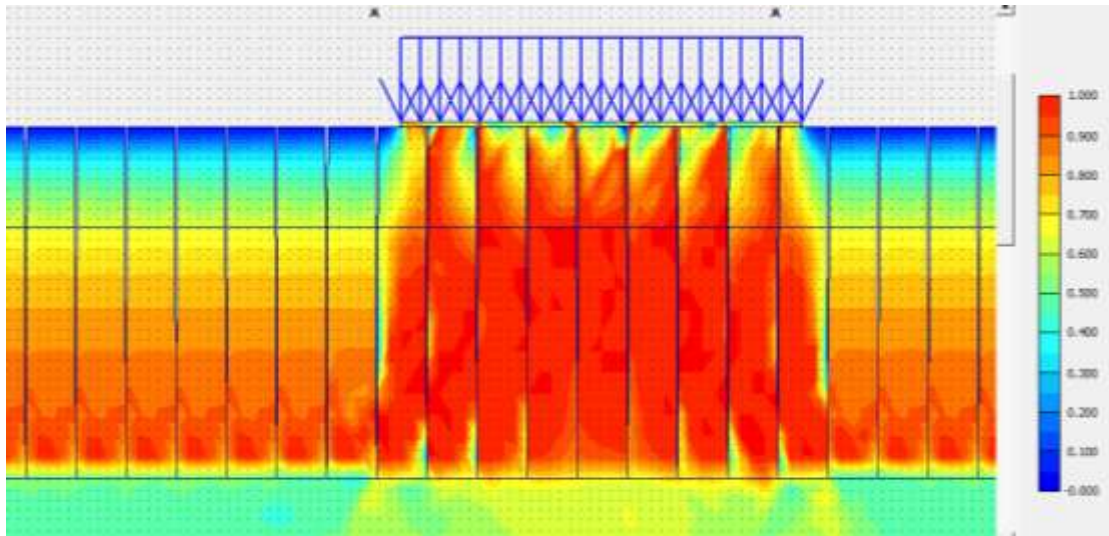


Figura 6,10. Distribución de esfuerzos relativos en las columnas de arcilla (Autor).

La Figura 6,10 permite identificar la forma como se distribuyen los esfuerzos en cada una de las columnas por debajo de la estructura del pavimento y la forma como las sobrecargas actúan sobre el material configurado en columnas; del mismo modo se percibe que a los lados de la zona de afectación los esfuerzos son semejantes en cada una de las columnas de material formado, lo que permite identificar que la afectación que se produce sobre las columnas de arcilla por debajo de la estructura debida a su peso propio puede llevar a la falla de las mismas en la medida que el material no soporte las cargas por peso propio y por estructura de pavimento.

6.5 GEOSINTÉTICOS DE REFORZAMIENTO VIAL.

En el mercado de los proyectos viales existe un gran número de productos usados para el mejoramiento de la durabilidad de un pavimento, siendo este, parte de la esencia de la ingeniería vial que busca tener obras de buena calidad y sostenibles en el tiempo, de tal modo que el mantenimiento demande el mínimo costo posible, puesto que las obras de buena calidad y con las menores inversiones es lo que se espera de un buen desarrollo de la ingeniería vial.

En el diseño de pavimentos flexibles se espera durante el periodo de diseño se presenten patologías que lleven a falla por fatiga de la carpeta de rodadura, este tipo de patologías se van percibiendo lentamente y los mantenimientos que se deben hacer de forma preventiva son poco costosos y fáciles de realizar; además cuando este es el caso, no es necesario intervenir la estructura de capas granulares que obliga a que se suspenda de forma temporal el tráfico por una carretera que debe ser reparada. Sin embargo, en muchas ocasiones, se evidencia que las fallas más comunes, corresponden a problemas de índole estructural, particularmente por efecto de la subrasante de la carretera, pues corresponde generalmente a patologías en la estabilidad de las subrasantes lo que hace que se presenten este tipo de daños.

La proliferación del uso de los polímeros en el mercado actual y sus amplios campos de acción han llevado a que se busquen soluciones de este tipo para reforzar estructuras de pavimento que se presentan en zonas en las que la estabilidad de la subrasante o incluso de los suelos de fundación de estructuras, no cuentan con las capacidad portante o la estabilidad en el tiempo y se requiere mejorar sus condiciones para extender la vida útil de las obras que sobre estos tipos de material son implementados (Geosistemas 2012).

Existen diferentes tipos de materiales usados con el fin de mejorar la capacidad de los suelos para distribuir las cargas aplicadas o formas de mitigar los esfuerzos que se generan en el suelo y con ello los efectos producidos por los procesos constructivos y operacionales, así como de mejorar la durabilidad de las obras. Los geosintéticos se encuentran en el mercado en varias presentaciones y con usos diversos que modifican algunas características del comportamiento generalizado de una sección de la estructura, dado que las propiedades particulares son más complejas y costosas de intervenir (Geosistemas 2012).

A continuación se describen algunos materiales que se encuentran en el mercado y que se usan con el fin de mejorar la infraestructura vial de diferentes maneras de

tal modo que mejoran el comportamiento del material en el tiempo y hacen que el mantenimiento preventivo se deba hacer con menor frecuencia o incluso que generen ahorros en material en el momento de la construcción, dado que mejoran el comportamiento mecánico de las capas.

6.5.1 Geotextiles

Los geotextiles comprenden materiales poliméricos de baja densidad que inicialmente son encontrados en el mercado como material que favorece el paso del agua y la retención de partículas de suelo. Estos materiales son usados generalmente como telas de polímeros tales como polipropileno, poliéster, polietileno y nylon, que en su gran mayoría se usan para lechos filtrantes en sitios en los que las redes de flujo subterráneas deben ser intervenidas para evitar que algunos sectores reciban excesos de humedad que pongan en riesgo las obras a construir. Se usan especialmente para separar estratos de material, de tal manera que un material granular que debiera tener cierto comportamiento no sea contaminado por otro más fino que genere perjuicio a la estructura (Haeri, 2000).

En el mercado se encuentran como geotextiles tejidos, desarrollados con material filamentado y que se teje como telas que se acoplan para dar consistencia al material en un todo. También los hay no tejidos, que se elaboran con filamentos poliméricos que se unen al todo de manera aleatoria, que ofrecen gran consistencia y mejores condiciones filtrantes y de flujo que aquellos que se elaboran tejidos (ver Figura 6,11). Normalmente son usados en mejoramientos viales, muros de contención, drenes y subdrenes, recubrimientos para gaviones, presas, diques, canales y en general, obras en las que se requiere separa un material filtrante de algunas construcciones o de otros tipos de material (Haeri, 2000).



Figura 6,11. Instalación de Geotextil en zona vial (Martínez, 2012)

En el tema de la estabilización de pavimentos, considerando el problema que se estudia en la presente investigación, uno de los usos probables es la adecuación del estrato de subbase que se localiza sobre las subrasantes arcillosas que fallan y se fracturan; estas fracturas ocasionan pérdida de material granular y la desestabilización de las capas granulares, razón por la que se hace necesario un material que sea adecuado para el confinamiento y para conservar la cantidad de material en la subbase y la base en el tiempo. Hacer un reforzamiento a la estructura es muy útil en la medida en la que el material permanezca confinado en el tiempo. Los geotextiles por sus características, favorecen estructuralmente el funcionamiento en el tiempo, puesto que impiden que el material cercano a la subrasante pierda la estabilidad por salida de partículas a las fisuras posibles generadas, lo que hace que las capas de estructura del pavimento funcionen como material continuo.

6.5.2 Geomembranas

Otro de los productos desarrollados en geosintético son las geomembranas, cuya función especial en las obras viales consiste en aislar el agua de la estructura del pavimento con el fin de evitar que el agua conjugada con las fuerzas ejercidas en el material granular generen licuación de las arenas y el reacomodamiento que hagan perder la estabilidad a la estructura del pavimento. Éstas son fabricadas a partir de combinaciones de polímeros termoestables o termoplásticos, por lo general son para la retención de líquidos y vapores en estructuras u otras obras de construcción. Por sus características de retención de agua, su uso se encuentra más ligado a temas ambientales en los que se requiere evitar que el agua fluya por ambientes contaminados que puedan ocasionar daños considerables al ambiente, o para evitar que líquidos altamente contaminantes como los lixiviados de los rellenos sanitarios fluyan en el suelo libremente contaminando el suelo aledaño (Rowe, Rimal y Sangam, 2009)



Figura 6,12. Geomembrana instalada en obra vial (Pavco, 2012)

En obras viales se usa normalmente para proteger la estructura del pavimento de la entrada de agua, aunque por costos se usan de forma más usual los filtros en

material granular con recubrimiento de geotelas o geotextil. En general el uso de los materiales geosintéticos han permitido y seguirán ofreciendo respuestas diversas para los desafíos presentes y futuros de la ingeniería, pues el uso de uno o más de ellos en las obras viales favorecen la obtención de resultados que brindan mejoras en la calidad y durabilidad de las construcciones (ver Figura 6,12) (Leshchynsky 2009).

6.5.3 Geomallas Biaxiales

El concepto de implementación de las mallas biaxiales se origina en el proceso de operación de la carreteras y vías pavimentadas que en la medida en la que se usan van perdiendo estabilidad en la superficie por falla de fatiga de la carpeta de rodadura. Las estructuras de material granular se desarrollan con material bien gradado que permite que la mayoría de los espacios vacíos sean llenados por las arenas y limos, y los materiales ganen la mayor estabilidad posible con la compactación. Sin embargo, por el ingreso de agua en la estructura debida a las fisuras de la carpeta por fatiga, o a la separación entre la carpeta y las bermas o cunetas, una cantidad considerable de agua puede ingresar a la estructura ocasionando que el material más fino comience a moverse y se presente variaciones de la estabilidad por migración del material más fino en la estructura del pavimento (ver Figura 6,13) (Pavco, 2012).



Figura 6,13. Vía reforzada con geomalla (Pavco, 2012)

Pavco presenta en su Manual de Diseño de reforzamiento con geosintéticos, un mecanismo para garantizar que aún perdiendo la estabilidad de transferencia de esfuerzos que producen las partículas pequeñas a las de mayor tamaño, estas pueden confinarse de manera tal que impidan la pérdida de estabilidad en la estructura del pavimento. El mecanismo de funcionamiento de las mallas biaxiales coextruidas, radica en un mecanismo de identificación del número estructural por el modelo AASHTO de diseño de pavimentos, mejorando la capacidad de las capas de gravas con ayuda de las mallas que impiden el reacomodamiento de las partículas de mayores tamaños y con ello las deformaciones considerables en la estructura completa (Pavco, 2012).

El modelo lo que busca es evitar que los estratos tengan variaciones considerables, lo que favorece que el comportamiento sea duradero en el tiempo, o que permita la disminución de espesores de capas granuales, dado que el módulo de Young (E), en cercanías a las geomallas biaxiales se mantengan y se garantice la adecuada distribución de los esfuerzos verticales mediante las mallas a una mayor área de influencia bajo los ejes de carga que transmiten el peso de los vehículos de carga sobre la subrasante. De este modo lo que se pretende es garantizar una adecuada disminución de los esfuerzos distribuyendo la carga aplicada en la mayor área obtenida en la junta estructura-subrasante que para el caso de estudio se presenta como un modelo fisurado con alto riesgo de falla (Zorngberg, 2013).

6.5.4 Geoceldas Triaxiales

Las geoceldas son otro tipo de material de confinamiento de material al que se le desean mejorar sus características de comportamiento mecánico frente a la acción de cargas variables como es el caso de las vías. Las geoceldas son denominadas de esta manera debido a la forma y actuación que estos materiales tienen y son una serie de celdas en geosintéticos que al ser rellenas y compactadas, mejoran sustancialmente el comportamiento al generar una serie de

confinamientos mediante los que se retiene el material granular o el material de suelo y se genera un elemento monolítico que permite mejorar su módulo de elasticidad mediante el efecto viga (Pavco, 2012)



Figura 6,14. Geoceldas para reforzamiento de vías (Pavco, 2012)

La tecnología se encuentra en Colombia comercializada como el Neoweb, es una marca registrada que trae la metodología del uso de los polimeros de Nylon, Poliestireno y Polipropileno, que se configura en una estructura que es elaborada como una red o un panel, en el que los pequeños compartimientos reciben una cantidad determinada de material y al compactarla como un todo evitan que se disperse el material y el reacomodamiento de partículas ocurre al interior de las celdas, de tal manera que favorece la resistencia mecánica de los pequeños elementos interconectados entre sí pero que funcionan mecánicamente como elementos individuales mejorando con ello el comportamiento al arrastre o desgaste por empuje de material, a la fatiga, a las fisuras por aplicación de fuerzas, a los efectos de la temperatura, a la oxidación e incluso a la acción de los rayos solares, dado que el material ofrece una muy alta resistencia y mejora los módulos de la matriz de material (Pavco, 2012).

En desarrollo de obras viales es uno de los geosintéticos de mayor aplicación, dado que este modelo además de generar el efecto de vigas que rigidiza mucho más el material granular compactado evitando que se pierda por disgregación cuando se deben realizar terraplenes. Los pequeños elementos confinados de material granular, genera una rigidez en la estructura como elementos difícil para mover, y en condición de movimientos sísmicos o paso de agua por las capas granulares, las celdas de geomalla evitan el reacomodamiento o pérdida del material, lo que ayuda a mantener una mayor rigidez del elemento configurado en el tiempo además de tener una durabilidad considerable, algunos productores hablan de entre sesenta y ochenta años (Cuartas, 2015).

Revisada la bibliografía, los usos comunes de cada uno de los geosintéticos considerados y las técnicas constructivas, es importante definir que debido a las condiciones de la zona y a la problemática de inestabilidad de la subrasante de forma diferencial, la mejor opción de uso son las geoceldas con uso de geotextil de separación de subrasante. Las fisuras que se producen por efecto de la desecación, ocasionan en la estructura esfuerzos de tensión que el material granular por sí mismo es incapáz de resistir; el uso de las geomallas biaxiales aunque pueden resistir, no configuran toda la capa granular, mientras que el uso de la geocelda como lo menciona el manual técnico, produce un efecto de viga. Desde la mecánica de los materiales en el análisis estático, las vigas soportan esfuerzos de compresión, flexión, torsión, así como resistencia al corte; esto mejora las condiciones y favorece que la estructura sea más rígida.

Tener una estructura configurada con la rigidez necesaria para evitar que el material de la estructura se pierda dado que no tiene cohesión, permite que la estructura tenga un comportamiento de mayor estabilidad, así mismo, el uso del geotextil en la superficie de la subrasante, evita que el material granular de la capa de subbase se pierda con la aparición de grietas, lo que permite que se mantenga una estructura más rígida en el tiempo; por todo lo anterior se analiza como opción de estudio para el análisis las geoceldas para el reforzamiento de la estructura.

Para el desarrollo del análisis se toman las características de una sección típica de pavimento en una estructura normal usada para la región de la ciudad con las características antes mencionadas de acuerdo con el diseño realizado en la sección 6.2. Una vez desarrollado el análisis preliminar en condiciones típicas de módulos de cada uno de los materiales, se revisan en el método racional de pavimentos. Estos materiales mostrados en la Tabla 6,7, son usados en el análisis se realiza mediante una estructura típica en un programa de diseño de pavimentos estilo DEPAV que usa el método racional para este fin.

Tabla 6,7. Condiciones de material de prueba.

<i>Material</i>	<i>Y_d</i>	<i>Y_{sat}</i>	<i>E_{ref}</i>	<i>v</i>	<i>C</i>	<i>φ</i>
	<i>kN/m³</i>	<i>kN/m³</i>	<i>kN/m²</i>	()	<i>kN/m²</i>	°
Arcilla normalmente consolidado	10	12,5	1000	0,35	2	18
Arcilla Sobreconsolidada	14	15,5	5000	0,30	3	23
Subbase Granular	17	20,0	30.000	0,25	6	28
Simulacion del vacío	1	1,1	2	0,49	0,01	0,003
Base Granular	18	21,0	60.000	0,25	8	30
Carpeta Asfáltica	22		120.000	0,27	15	32

Fuente (Autor)

Si bien en los estratos de material sobreconsolidado, las características del mismo son variables con la profundidad, para el modelo de estudio se van a tomar las condiciones como un único material que tiene las mismas características, siendo este el primer paso para complejizar mucho más el proceso de análisis de los materiales conforme a las condiciones reales en el campo. La arcilla saturada normalmente consolidada presenta un valor bastante bajo en condiciones de saturación, este valor fue el encontrado en las exploraciones realizadas en la zona de estudio como el mínimo valor medido en laboratorio, por lo que se usa para simular la posible condición más crítica y simular las condiciones más complejas de soporte de la estructura del pavimento.

Se usa como estructura de pavimento:

Carpeta asfáltica	10 cm
Base Granular	30 cm
Subbase Granular	68 cm
Subrasante	Arcilla

Utilizando el material con el que se cuenta y con el uso de geoceldas, se tiene que los espesores de capa varían de acuerdo con las necesidades del diseño; la intención preliminar de este tipo de reforzamiento es la reducción de espesores de modo que se deben calcular unos módulos de elasticidad combinados para tal fin. Se tiene que con los materiales anteriores en las dimensiones presentadas, la base granular tiene unas modificaciones de módulo según la ecuación 39.

$$E_{mod} = \frac{(E * MIF + H) + (E * H2)}{H_{total}} \quad Eq. 39$$

Donde:

E_{mod} = Módulo de Young modificado para la base granular.

E = Módulo de Young de la base granular

H = altura de las geoceldas

$H2$ = Altura del material adicional

H_{total} = Altura total de la capa granular

Para materiales en subrasantes de mala calidad tipo arcillas en los que el módulos de Young están entre 1 y 5 MPa, se pueden identificar algunos factores de la Tabla 6,8 en la que Pavco determina unos valores de Factor de Modificación de Módulos de trabajo (MIF), con los que se realizan los ajustes necesarios a las capas para determinar sus espesores.

Tabla 6,8. Valores del Factor de Modificación de Módulo (MIF)

Capa de Soporte E_{Soporte} (MPa)	Módulo del material de lleno = E_{lleno} (MPa)				
	80	110	150	200	300
50	4.0	3.6	3.0	2.5	1.8
100	4.2	3.8	3.2	2.8	2.0
150	4.5	4.0	3.4	2.9	2.1
200	4.8	4.2	3.6	3.1	2.2
300	5.0	4.4	3.8	3.3	2.3

Fuente (Geosistemas 2012)

Como puede identificarse en la Tabla 6,8 para valores de 50 Mpa como la mínima condición y con material de llenado menor de 80 MPa se tiene un Factor de Modificación del Módulo de 4,0 que se reemplaza para el espesor de la capa de base granular en la ecuación 39 de la siguiente manera:

$$E1 = \frac{(60 * 4 * 14,5) + (60 * 15,5)}{30}$$

$$E1 = 147,0 \text{ MPa}$$

Se tiene que para verificar las condiciones de la misma se desarrolla el análisis de la modificación de la calidad de la subbase de la siguiente forma:

$$E2 = \frac{(40 * 4 * 2) + (40 * 66)}{68}$$

$$E2 = 43,5 \text{ MPa}$$

Si se incluye Geoceldas en la capa de Sub Base Granular, se tienen las siguientes consideraciones:

- E Base (60 MPa)
- E SubBase (40 MPa)
- E Subrasante (5 MPa)

Se modifica la subbase y la base, considerando que la geocelda es colocada en la parte inferior de la base en contacto con la subbase granular y se reemplaza nuevamente en la ecuación 39.

$$E_{mod} = \frac{(E * MIF * H1) + (E * H2)}{H_{capa}} \quad Eq. 40$$

Como se tiene una capa de soporte con módulo inferior a 50 MPa, se toma la primera línea de modificación del MIF y se tiene que el material de subbase tiene 40 MPa, por lo que se toma un MIF de 4,0

$$E2 = \frac{(40 * 4 * 14,5) + (40 * 53,5)}{68}$$

$$E2 = 65,60 \text{ MPa}$$

Para la capa de base correspondiente a 30 cms, se tiene que los dos primeros centímetros se modifican:

$$E1 = \frac{(E * MIF * H1) + (E * H2)}{H_{capa}} \quad Eq. 41$$

$$E1 = \frac{(60 * 4 * 2) + (60 * 28)}{30}$$

$$E1 = 72,0 \text{ MPa}$$

Identificada la variación de los módulos de elasticidad modificados pero partiendo del mismo espesor de capas granulares de acuerdo con el diseño preliminar, lo que se realiza es la verificación de los cambios que se producen si se coloca el reforzamiento en la capa de base o en la de subbase, considerando de alguna forma la metodología de análisis de los módulos modificados encontrados en el modelo anterior. Con ello se verifican las condiciones iniciales sin refuerzo, con la base reforzada y con la subbase reforzada, con el fin de determinar y comparar la acción que ejerce el reforzamiento en cada capa.

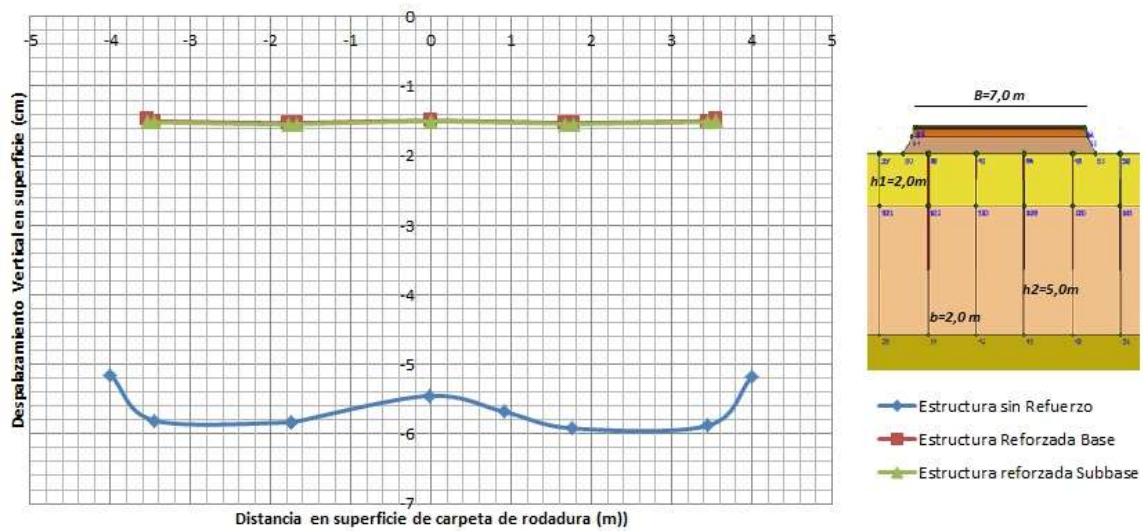


Figura 6,15. Deformaciones verticales en la carpeta de rodadura (Autor).

En la Figura 6,15, se muestran los desplazamientos verticales en la superficie medidas en la prueba más crítica correspondiente a un modelo de fisuras de 7,0 metros de longitud de columna y 2,0 metros de ancho de base de las columnas verticales analizadas en el modelo de reforzamiento; esto permiten corroborar que, aunque reforzar la base o la subbase, mejoran las condiciones de la estructura y se mitigan las deformaciones verticales en la superficie, la mejor condición tal como lo plantea el manual de diseño de pavimentos con geoceldas del proveedor, demuestra una mayor efectividad cuando se refuerza la base granular compactada. El modelo permite ver una tendencia de falla en superficie asociada a la ubicación de las fisuras, cerca de las cuales se presenta la mayor deformación vertical en los tres casos, sin embargo, reforzando la capa de base se puede ver que las deformaciones son las menores en todo el ancho de la carpeta de rodadura que para el modelo se toma de 7,0 metros de ancho.

Puede verse que con el reforzamiento de la capa de subrasante los desplazamientos verticales medidos en centímetros se reducen en valores de 5,8 cm, hasta valores de 1,55 cm. Esto representa una proporción de reducción de deformaciones verticales del 74,5% para reforzamiento en la capa de base, y con una proporción del 70% de reducción si se refuerza en la capa de subbase. Dicha

proporción de reducción de los asentamientos para la condición más crítica demuestra un muy buen comportamiento del geosintético como material de refuerzo con el fin de dar estabilidad a la carpeta de rodadura de la carretera.

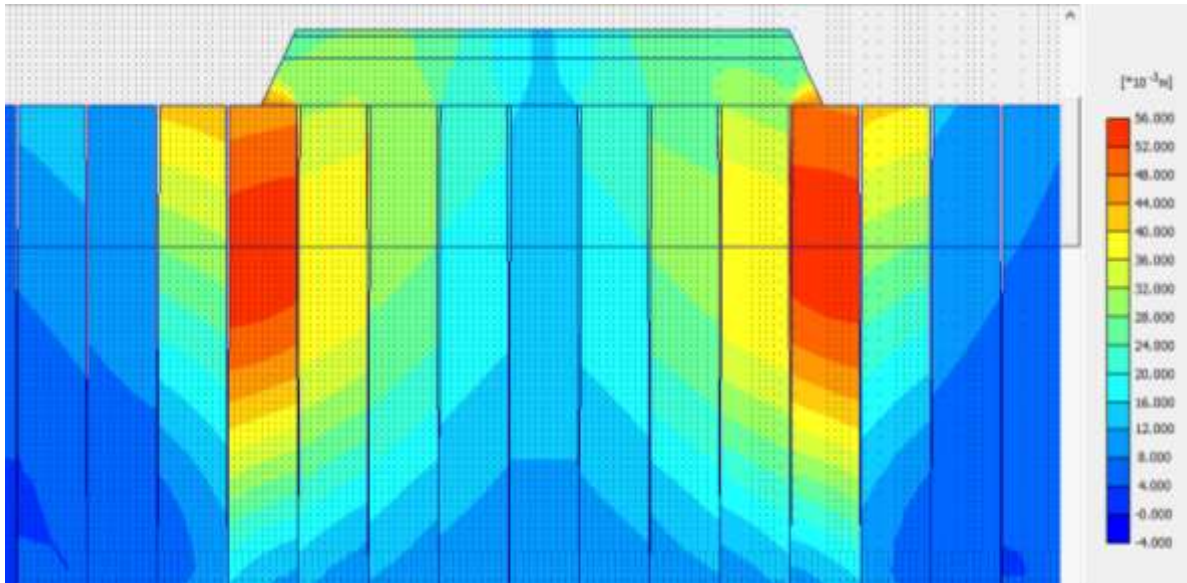


Figura 6,16. Deformaciones totales en el esquema modelado (Autor).

En la Figura 6,16 se muestran los desplazamientos totales que se presentan en el modelo de material fisurado sobrecargado con una estructura de pavimento. En el programa se describe la influencia general de la falla que hace que por el peso fallen las columnas de material y se genere un movimiento considerable en las columnas laterales que soportan la estructura, además de las deformaciones horizontales que se producen por el empuje de las columnas de material cerca de la superficie del pavimento.

Bajo esta condición, todos los modelos desarrollados en el mecanismo de estudio presentado, se realizaron con el reforzamiento de la capa de base granular, de tal manera que se busca que el comportamiento analizado sea el óptimo, y que las condiciones de trabajo de la estructura reforzada según el modelamiento desarrollado mediante el programa Plaxis, permita identificar la condición más favorable para el comportamiento final de la estructura reforzada con geoceldas.

6.6. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL REFUERZO

Elaboradas todas las pruebas que se desarrollaron de acuerdo con los análisis previos de estructuras de pavimento emplazadas sobre columnas de material arcilloso y con fisuras que varían entre los 3,0 y 7,0 metros de profundidad, considerando un nivel freático que desciende de forma acelerada y no da tiempo a que el material se sobreconsolide por desecación, sino que simplemente pierda humedad y se deforme de manera considerable; se tiene que en la superficie, las deformaciones son afectadas dependiendo de la forma de las fisuras superficiales en la subrasante y de acuerdo con el ancho de base de dichas fisuras, así como de la profundidad de las mismas. En la Figura 6,17, se muestra el esquema desarrollado para modificar la forma de aplicación de las cargas, debido a que la estructura del pavimento se modifica para que las cargas se distribuyan sobre las columnas de material de manera más ajustada a la realidad.

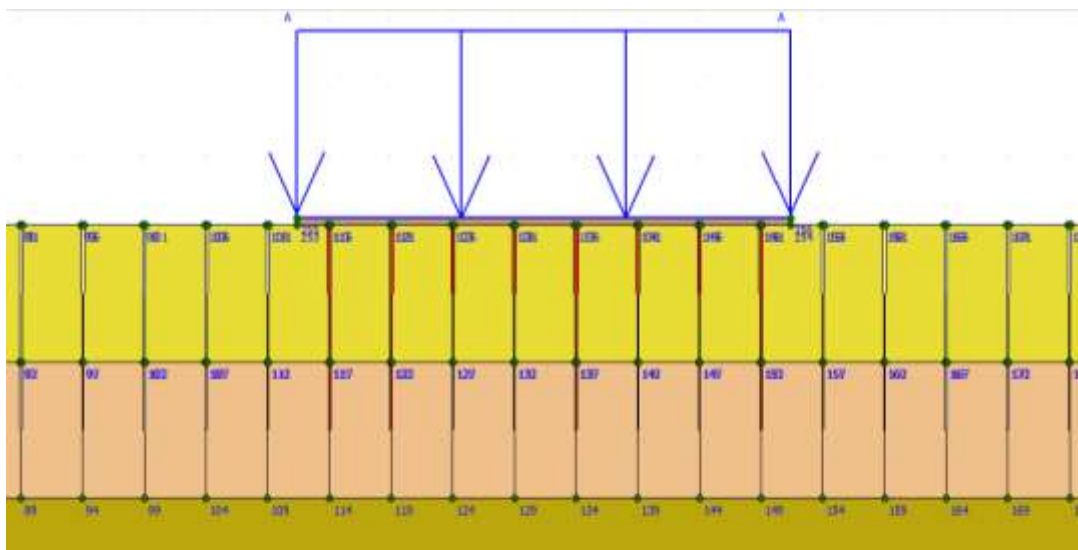


Figura 6,17. Modelo gráfico reemplazando peso de estructura por cargas (Autor).

Se puede identificar que en el análisis de los asentamientos en la superficie con las estructuras previamente determinadas se consideran todas como material confinado, es decir, que el peso del material es concentrado sobre las columnas por separado y el esquema opera como material elástico que soporta internamente las deformaciones por efecto de las cargas de peso propio.

6.6.1. Reajuste del modelo de análisis

En el modelo matemático se consideró que cada una de las capas granulares y de estrato de suelo cuentan con unas condiciones tales como pesos específicos seco y húmedo, una relación de Poisson y un Módulo de Young o de elasticidad del material. Suponer estas condiciones es válido considerando que se está haciendo un análisis matemático mediante el modelo axisimétrico bajo los parámetros de Mohr-Coulomb. Sin embargo, cuando el material se encuentra sobre una estructura de material continua es sencillo de manejar matemáticamente, pero cuando se analiza el material puesto sobre una estructura fisurada, el comportamiento puede ser considerablemente variable.

En el modelo matemático mostrado en la Figura 6,17, presenta una configuración en la que las capas de concreto asfáltico, base granular y buena parte de la subbase, son reemplazadas por la carga equivalente. Este proceso se realiza dado que si se considera que la estructura es elástica, cuando se pierde continuidad por efecto de las fisuras, el material de subbase actúa como una viga con la elasticidad definida en las condiciones iniciales, de manera que presentaría una resistencia a la flexión, cosa que en condiciones normales no es cierta, puesto que el material granular no puede considerarse como un material que resista esfuerzos de este tipo.

En el modelo desarrollado en el remodelamiento, se cuenta con una capa de 10 cm con las características de la subbase granular, y de este modo todo lo que se encuentra por encima del mismo es reemplazado por una carga distribuida de forma equivalente en su superficie, permitiendo un análisis mucho más concreto. Luego se modelan nuevamente todas las estructuras falladas con el fin de comparar el material sin reforzamiento, y se comparan con los resultados en la estructura dispuesta con los módulos rediseñados para la estructura del pavimento reforzada con geoceldas del tipo Neoweb.

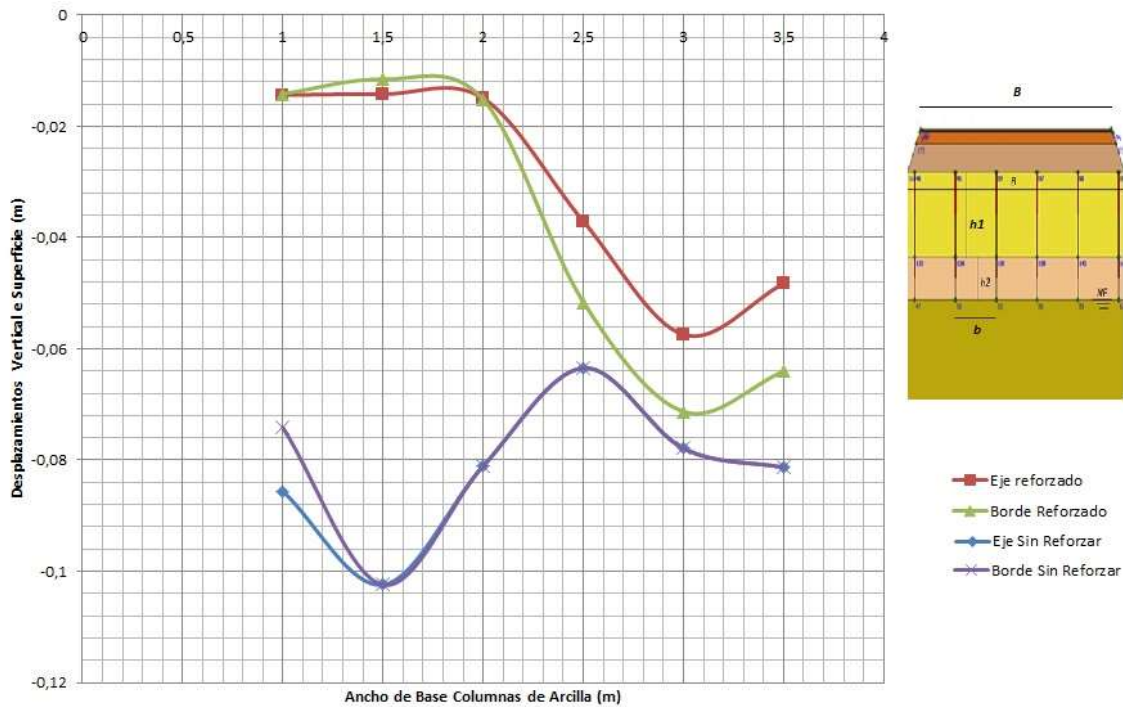


Figura 6,18. Comparativo de deformaciones en modelo de estructura no reforzada y reforzada con Geoceldas (Autor).

Como se puede ver en la Figura 6,18, las deformaciones en el eje de la estructura de pavimento en un modelo no reforzado y reforzado, y en los bordes para esta misma condición, permiten identificar que en la medida en la que las fisuras son más cercanas, las diferencias de deformación vertical con el reforzamiento son mucho más considerables que cuando las fisuras son más separadas. Los desplazamientos en las estructuras sin reforzamiento oscilan entre los 6,5 hasta 11 centímetros de desplazamiento tanto en el eje como en los bordes de la estructura del pavimento, mientras que para el caso de las estructuras reforzadas se tienen deformaciones en la superficie de la subrasante de entre 1,5 cm, para separación de fisuras de 1,0, 1,5 y 2,0 metros; esto representa para el caso de columnas de 1,5 metros, una reducción de los asentamientos del 41%, mientras que para la de 2,0 metros la reducción se refleja en , aumentando hasta un máximo cercano a los 5,8 cms en el eje y cerca de los 7,0 cms en los bordes para la estructura con base de columnas de material de 3,0 metros.

Los desplazamientos del material en la superficie de la subrasante reducen con mayor representatividad cuando el ancho de las columnas modelado es menor; la lógica de ello radica en que cuando el suelo tiene fisuras muy seguidas y no se refuerza, una falla ocasiona el empuje de unas columnas sobre otras generando el efecto dominó y produciendo asentamientos considerables en superficie, mientras que cuando los anchos de base de las columnas de arcilla son mayores, el efecto posible es menor y los desplazamientos aunque se reducen, ocurren en menor proporción.

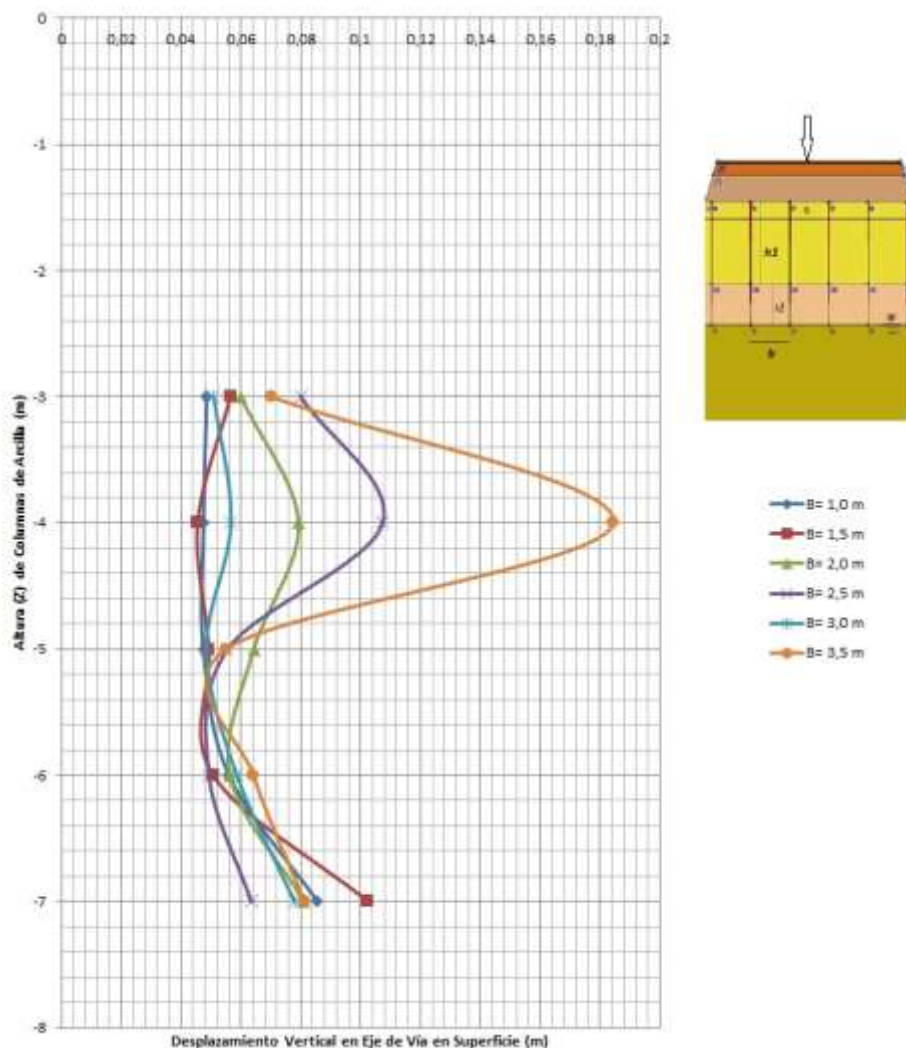


Figura 6,19. Desplazamientos el eje en superficie de estructura sin reforzar (Autor).

En la Figura 6,19 se puede ver la relación de los desplazamientos que se presentan en la superficie de rodadura con respecto de las longitudes de columna de material (Z) que se tomaron variando dichas alturas de columna de arcilla desde 3,0 hasta 7,0 metros de profundidad. Se puede ver que los desplazamientos verticales para cada uno de los anchos de base de columna de arcilla presentan una tendencia variable que refleja para las menores separaciones de fisuras, una variación menor de los desplazamientos, mientras que para mayores anchos de base de columna se incrementan de forma considerable representando que para la profundidad de columna de 4,0 metros, el desplazamiento vertical en superficie es de 4,6 cm, para columnas de 1,5 m, mientras que es de 18,5 cm para columnas de 3,5 metros de ancho de base, correspondiente a una deformación alrededor de 4 veces mayor para el mismo tipo de estructura.

Los desplazamientos evidenciados son considerables según el modelo analizado en el programa independiente del tiempo, si se ausculta en el terreno de la zona de estudio, puede verse que en algunos puntos las mediciones pueden reflejar condiciones parecidas por fallas de gran profundidad, sin embargo, aún cuando el modelo sólo se tiene en cuenta las deformaciones por efecto de la carga y peso propio y no se consideran los asentamientos por subsidencia que se producen por la pérdida de humedad en el material, es claro que las cargas dinámicas en el tiempo lo que hacen es acelerar el proceso, por lo que el estudio se desarrolla independiente del tiempo en el que esto ocurra.

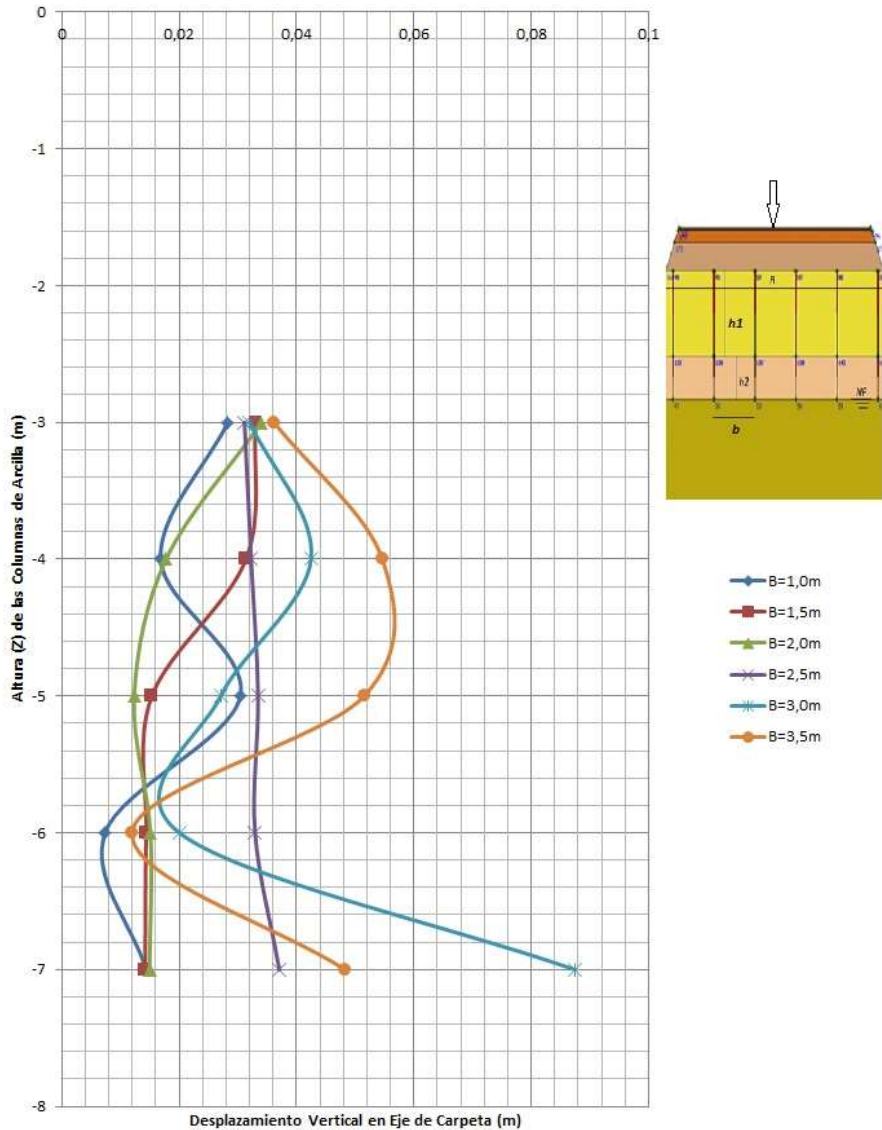


Figura 6,20. Relación de deformaciones en el eje en superficie reforzada (Autor).

Al comparar las deformaciones con el modelo de la Figura 6,20, se tiene que las mayores deformaciones verticales por efecto de las cargas del modelo matemático se producen en las columnas de 3,0 metros en la base y 7,0 metros de profundidad, que llevan a una medición de deformaciones verticales en el eje de estructura de menos de 9,0 centímetros. Este modelo sin reforzar al ser comparado presenta una condición muy similar a la estructura reforzada, puede dar un punto de comparación que para longitudes mayores de columna de material, las deformaciones son más parecidas, debido a que la falla

particularmente ocurre en la estructura de arcilla a nivel general y no se reflejan mitigaciones en superficie.

Es posible percibir en el análisis que en los modelos estructurados sin reforzamiento, las mínimas deformaciones se encuentran alrededor de los 5,0 cm, mientras que para el reforzamiento se perciben asentamientos que están cercanos a 1,0 cm, esto implica un 80% en la mitigación de las deformaciones superficiales. Del mismo modo se puede ver que en la condición medida de columnas de 4,0 metros que sin refuerzo en separación fisuras de 3,5 metros, se reduce de cerca de 18,5 cm a unos 5,5 cm demostrando un mejoramiento considerable de cerca de 13,0 cm de mitigación de las deformaciones debidas a las cargas correspondiente al 70,3% de la reducción en las deformaciones superficiales.

Midiendo en profundidad en una de las condiciones más vulnerables como es el caso de las columnas de 7,0 metros de profundidad (Z), presenta asentamientos de alrededor de 82,0 milímetros en superficie en estructura sin reforzar, hasta unos 17,0 milímetros de asentamiento en superficie cuando se coloca el reforzamiento de geoceldas como se muestra en la Figura 6,20; esto representa el 79,3% en reducción de las deformaciones, deostrando con ello que al colocar las geoceldas propuestas para reforzar, se modela una disminución considerable de los asentamientos de la estructura mejorando la estabilidad y con ello la movilidad de la zona.

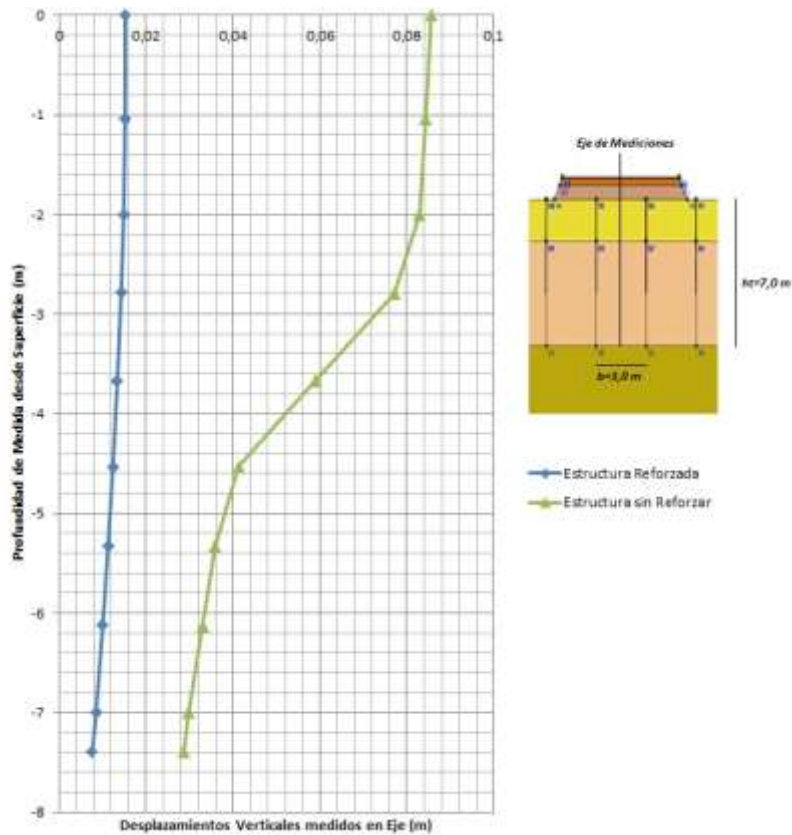


Figura 6,21. Comparativo de desplazamientos en el eje de la vía (Autor).

La Figura 6,21 permite verificar el comportamiento que ocurre en el eje de la vía desde la superficie hasta el nivel freático para la condición de ancho de base de 3,0 metros y de altura de columna 7,0 metros como la condición más crítica para el reforzamiento. Se puede ver que se reduce en casi el 80% los desplazamientos en la superficie y eso se refleja en profundidad reduciendo en alrededor del 66% al nivel freático. Estos datos reflejan que el material usado como reforzamiento y que se ha venido trabajando para reducir el espesor de las capas granulares, puede ayudar de manera considerable en la mitigación de los daños ocurridos en un pavimento alargando su vida útil en el tiempo.

6.6.2. Modelo de prueba bajo condiciones de campo.

Si se analizan las condiciones de campo, es importante considerar que en los perfiles encontrados en la zona de estudio se tienen algunas exploraciones en las que se identifican condiciones parecidas a las propuestas en el modelamiento realizado, sin embargo, es pertinente identificar la estructura de pavimento con la que se cuenta en la zona de estudio. Dadas las exploraciones y los resultados encontrados en las mismas, pudiera llegar a pensarse que la carretera que conduce entre la vereda de Siberia y el municipio de Tenjo en Cundinamarca, es una carretera en la que posiblemente no se tuvo un diseño de pavimento, sino que evolucionó como un carreteable destapado que en la medida en la que perdía estabilidad por efecto de las lluvias, se le colocaba material granular tipo recibos o escombros como se percibe en algunos apiques realizados.



Figura 6,22. Perfil de Apique realizado en campo (Arias, 2015).

En la Figura 6,22 se puede ver la estructura que se refleja una de las exploraciones de subrasante de la carretera tomados en el segundo semestre del 2016 (19 – 24 septiembre), en los que las condiciones del suelo reflejan que no se

genera una estructura ligada a un diseño de pavimento, sino que aparecen capas de material reciclado de mejoramiento de la subrasante y que en la carpeta superior se encuentra un pequeño espesor de material para estabilizar la carpeta de rodadura, condición que se hace constante en los diferentes apiques desarrollados.

Por lo anterior, se va a considerar una estructura de pavimento con un material de recebo en la subbase y la base de 30 cm encontradas en los diferentes apiques, así como una carpeta de pavimento en concreto asfáltico de 10 cm. La Figura 6,22 permite ver un perfil de suelo de cerca de 15 metros de profundidad en el que se pueden identificar los estratos existentes en los que se va a desarrollar un análisis aplicado de las condiciones de operación.

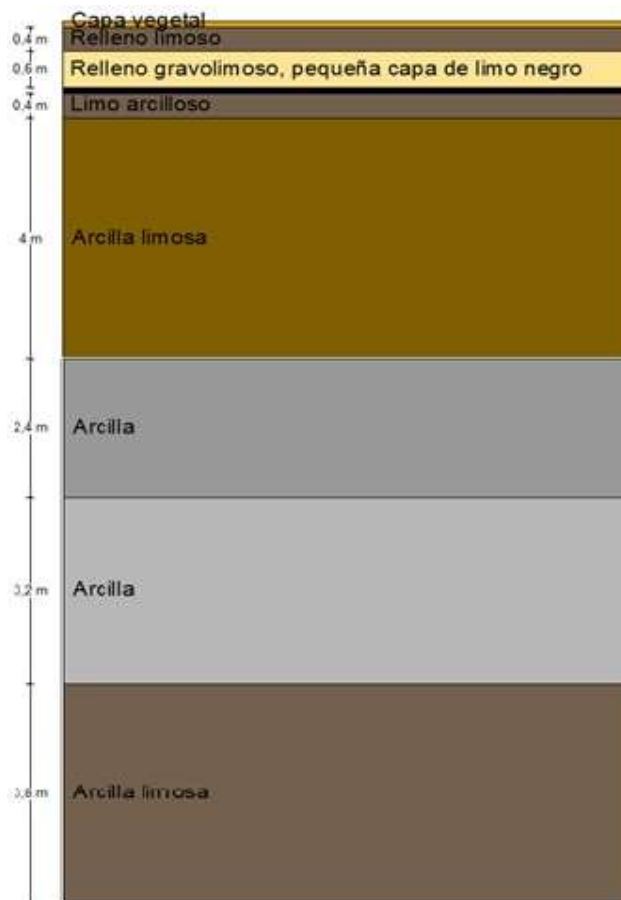


Figura 6,23. Perfil de estratigráfico de quinto sondeo de suelos (Arias, 2015).

En la Figura 6,23 puede verse el perfil logrado del quinto sondeo, ubicado en el km 2, sentido NW-NE, en la carretera que une la vereda de siberia y el casco urbano del municipio de Tenjo en el Departamento de Cundinamarca. Con estos perfiles se modela en el Plaxis para determinar la condición del suelo en la que se ha encontrado el Nivel freático cercano a los 5,0 metros de profundidad. Para este perfil se va a emplazar el modelo considerando la capa común en cercanías a la superficie con recebo gravolimoso y limoso de características variables y material de espesor 40 y 60 centímetros sobre la subrasante arcillosa.

Por lo anterior, se va a considerar una estructura de pavimento con un material de recebo en la subbase y la base de 30 cm encontradas en los diferentes apiques, así como una carpeta de pavimento en concreto asfáltico de 10 cm. Las capas inferiores a la base encontrada son muy variables, puesto que se encuentran materiales como recebo común en una matriz de arcilla, incluso material tipo escombros de construcción embebidos en el material arcilloso. Esto se puede explicar por la posible forma de construcción inicial de la carretera que como en algunas de la zona, son carreteables sin pavimentar que funcionan por mucho tiempo y en temporadas de lluvias el daño es considerable, para dar movilidad se coloca material de relleno que permita mejorar la movilidad y este material no seleccionado simplemente se configura por el paso de los vehículos.

Por lo anterior, se tiene que el material que se va a simular corresponde a una estructura de una base granular de 30 cm y una carpeta de 10 cm mediante los que se simula un comportamiento cercano a la realidad de la zona con cargas semejantes a las del diseño propuesto.

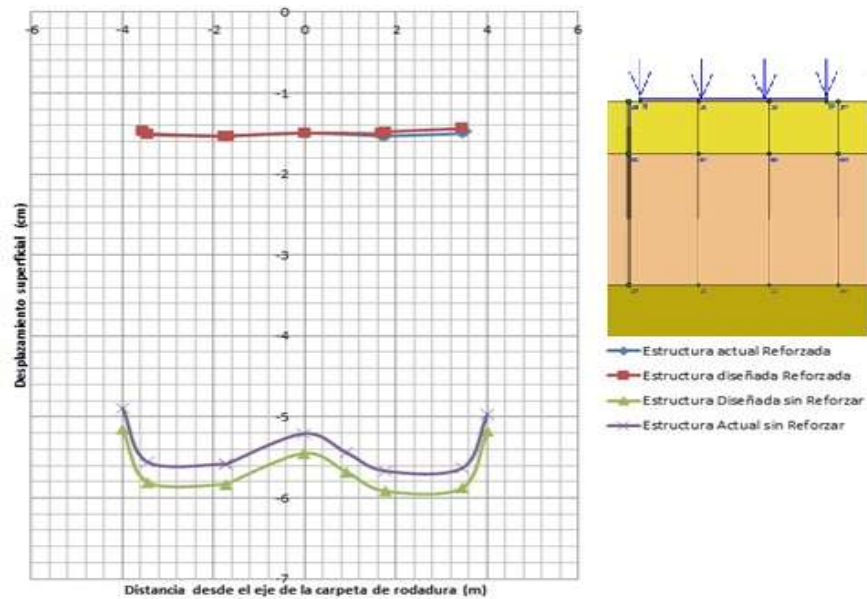


Figura 6,24. Desplazamientos verticales nivel de junta subrasante subbase con modelo real ajustado (Autor).

En la Figura 6,24 se presenta el modelamiento en el que se tiene la estructura real existente en el momento considerando las deformaciones en la carpeta de rodadura comparada con el modelo diseñado propuesto en el modelamiento sin reforzar y con el refuerzo. Se puede ver que las deformaciones en la superficie se mitigan de forma considerable analizando la estructura actual reforzándola con el modelo de Neoweb. En este sentido se tiene que aunque el modelamiento actual no corresponde con un diseño para las necesidades actuales, se puede mitigar las deformaciones por carga propia debidas al peso propio por acción del peso de la estructura.

Cabe resaltar que el ajuste al modelo se realiza sobre materiales con base similar al modelo de diseño pero subbase con un recebo más débil, puesto que las codiciones que se proponen a la estructura no cuentan con los espesores similares y las características de la estructura no son semejantes al modelo del diseño, sin embargo, esta primera fase permite identificar el funcionamiento que puede llegar a presentar el reforzamiento de la estructura existente.

6.6.3. Modelo cuando se toa una carga de tráfico en un instante de Tiempo.

El tráfico es uno de los factores que generan esfuerzos por acción del peso de los camiones sobre un sector de carretera, lo que hace que las cargas que se reciben, además de ser transmitidas a la subrasante, ocasionan daños completos en la estructura del pavimento. El modelamiento del presente documento no busca el estudio de las cargas de tráfico, dado que son cargas dinámicas que además de ejercer presiones sobre la estructura y con ello sobre el suelo, se ha querido identificar lo que sucede al momento de colocar una carga de un eje triden para camión de 52 toneladas como el estándar permitido para el país.

En el modelo se dispone la carga que genera el eje triden de forma puntual sobre la estructura del pavimento con el fin de analizar las condiciones que se reflejan en la estructura y en las columnas de material de suelo. esto se desarrolla para la condición más crítica correspondiente a una profundidad de nivel freático de 7,0 metros y se toma para una separación de grietas de 2,0 metros. La Figura 6,25 permite identificar el modelo que refeja las cargas con un esquema de las deformaciones que se producen en el material.

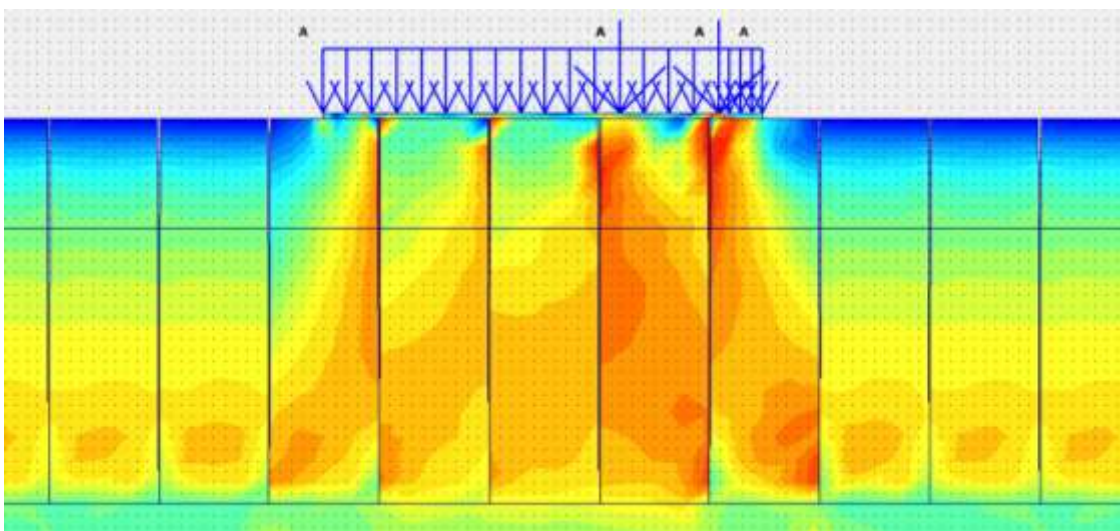


Figura 6,25. Esfuerzos por cargas debidas al peso de un camión (Autor)

De la Figura 6,25 puede verse que los esfuerzos soportados por las estructuras de suelo pierden simetría, dado que en este caso se tiene un camión colocado como carga equivalente sobre el carril derecho de la vía con respecto de la figura. El modelo deja ver el comportamiento de las deformaciones que se presentan en el momento en el que se tiene la carga aplicada sobre la estructura.



Figura 6,26. Deformaciones superficiales debidas al peso de un camión (Autor)

En la Figura 6,26 se muestran las deformaciones que ocurren por efecto de la estructura del pavimento además de la colocación de la carga del camión en la superficie del pavimento; estas medidas son tomadas en el nivel de subrasante, de manera que se pueda identificar la influencia de la estructura además de los desplazamientos inducidos por la carga del camión en condiciones estáticas en un momento en el tiempo. Puede notarse que en el borde izquierdo de la vía, sobre el carril en el que no hay carga del camión, las deformaciones corresponden a las generadas por efecto del peso de la estructura, pero en la zona donde se presenta el camión, dado que hay cercanía a una fisura y las cargas ya no son simétricas, se perciben desplazamientos verticales hasta de 3,8 centímetros, lo que excede en casi dos centímetros las deformaciones verticales, correspondiente al 72,7% de exceso de deformación.

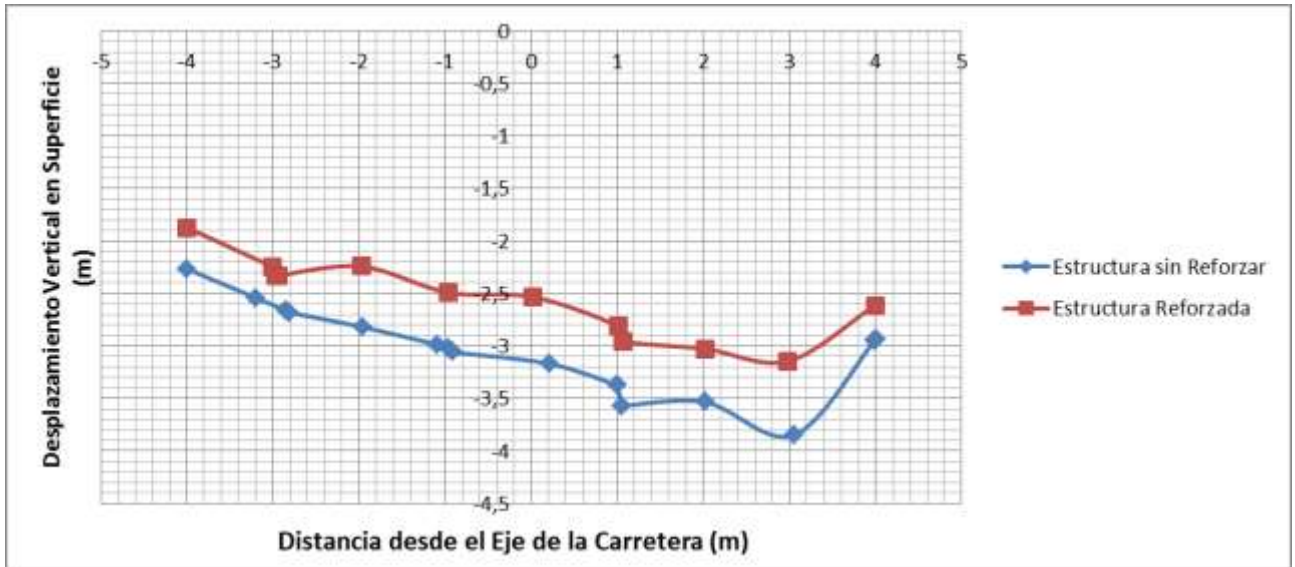


Figura 6,27. Comparativo de deformaciones superficiales debidas al peso de un camión (Autor)

En la Figura 6,27 se muestra la relación de las deformaciones superficiales en el esquema de estructura sin refuerzo y estructura reforzada; inicialmente puede notarse que en general los desplazamientos verticales son inferiores a los ocurridos por efecto del peso de la estructura sin reforzar; del mismo modo se puede ver que en la zona de aplicación de las cargas del camión, aunque se presentan con una tendencia similar debido a las fisuras y a las cargas de los ejes de aplicación de las mismas, las reducciones son considerables. La diferencia de deformaciones en el borde sin carga al ocurrido bajo la carga más crítica desciende en la estructura reforzada al respecto al borde izquierdo de la misma. Sin embargo, si se compara con la estructura con la estructura sin reforzamiento, la mitigación de los desplazamientos verticales de la subrasante se disminuyen en un 19% con respecto a los ocurridos sin el reforzamiento.

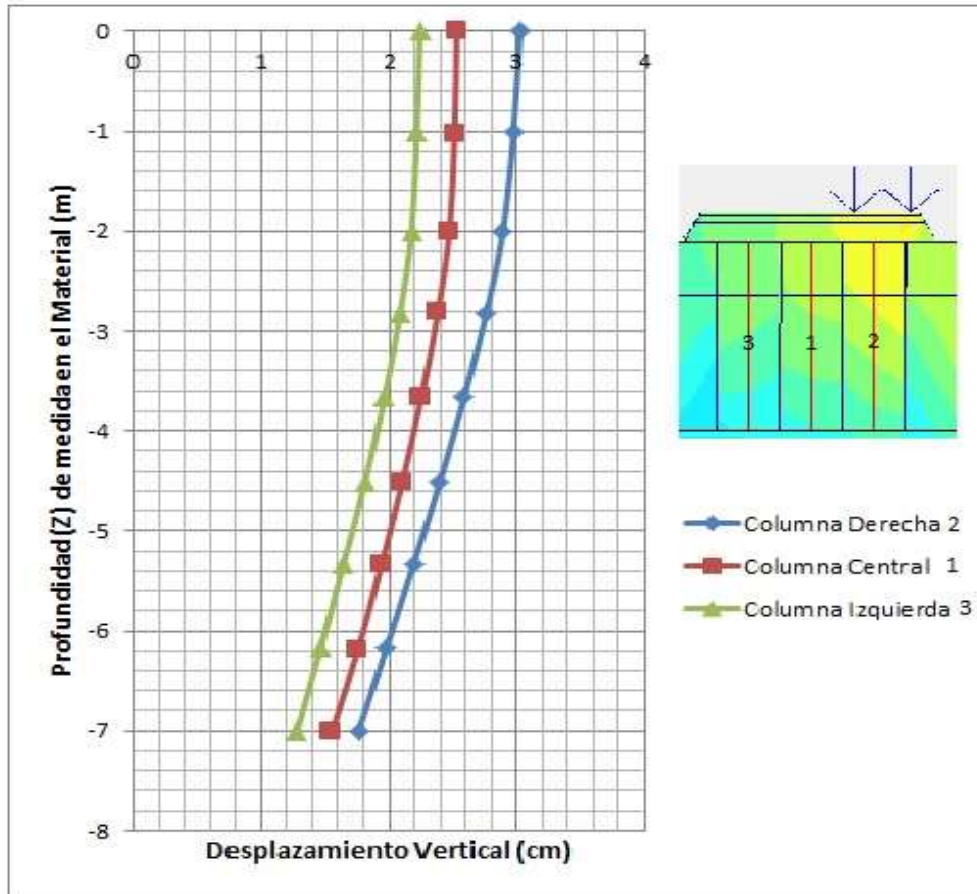


Figura 6,28. Comparativo de deformaciones en columnas debido a carga de camión (Autor)

La Figura 6,28 muestra además el comportamiento de tres columnas de material respecto a los desplazamientos verticales en desarrollo de la columna; puede notarse que la columna 1 que corresponde a la columna del eje de la vía, demuestra deformaciones verticales inferiores a las ocurridas en la columna 2 que es la de la derecha en la que se ha propuesto la carga del camión; del mismo modo la columna 3 permite identificar que las deformaciones son menores, lo que permite inferir que el efecto de la estructura transfiere las cargas de la manera propuesta según los diseños, pero que además la relación de deformaciones en profundidad se presenta con una tendencia de presentar variaciones simétricas dada la simetría del esquema en el que cada columna funciona por separado y no como un todo.

7. CONCLUSIONES

En el presente capítulo se recopila la información que se concluye del trabajo de estudio hecho en la región, especialmente en el sector de Siberia a Tenjo que ha sido parte de los análisis de campo y de la identificación de la problemática de la zona. Se describen inicialmente condiciones de la región, posteriormente de los pavimentos de la región y de los diseños que aplicaran de estructura de pavimento para el tipo de vía, posteriormente se describen los resultados encontrados del reforzamiento con geoceldas y la aplicabilidad a las condiciones de la zona de estudio. En la parte final se hacen las recomendaciones para investigaciones futuras en el tema en estudio.

7.1. De la Zona de Estudio

Los suelos de la zona por su distribución granulométrica, además de la composición mineralógica, reaccionan con en presencia de agua de forma considerable y manifiestan cambios volumétricos significativos ante la entrada y salida de agua de la matriz de material. Los estratos de arcilla de gran espesor, por su conformación geológica, generalmente son depósitos de tipo lacustre lo que hace que se mantengan saturados en condiciones iniciales y el comportamiento de este material en condiciones normales favorece la entrada y salida de agua, de modo que los cambios por contracción o hinchamiento son perceptibles en el tiempo.

Las arcillas como material de subrasante de un pavimento permiten una construcción rápida de obras viales en dicho terreno por las características del material y la facilidad en los procesos constructivos para conformar la banca de la vía, especialmente dado que el material al estar en una configuración lacustre, no es complejo el proceso de corte o relleno para confirmar la banca; sin embargo, en el tiempo, dicho material manifiesta complicaciones de operación debidas a los cambios en los regímenes de agua en la matriz de material.

Los suelos que se encuentran normalmente consolidados por debajo del nivel freático presentan un comportamiento típico de arcillas saturadas que se trabajan de acuerdo con las leyes de la mecánica de suelos tradicional; sin embargo, los suelos ubicados por encima del nivel freático del suelo van de saturados con presiones de poros negativas cerca de dicho nivel, hasta suelos desecados y fracturados en superficie; este comportamiento gobierna las condiciones de contracción del material debido a la interacción de las reacciones físicas y químicas del agua y las partículas de arcilla, lo que hace que las presiones de succión del material sean considerables en el suelo. Si se considera que a mayor humedad, mayor es la succión presentada, se puede decir que en la parte cercana al nivel freático es donde se presentan los menores valores de presión de succión o hidrostática en el suelo arcilloso, puesto que las fuerzas se contraponen y tienden a cero, pero en la medida en la que el material se deseca, las presiones de succión incrementan con la altura y la cantidad de agua que ejerce dichos esfuerzos de tensión.

Las presiones de succión en el suelo son ocasionadas por la pérdida de humedad generando fisuras producto de la desecación del material; las causas de este fenómeno pueden ser variables y dependen del depósito, la extracción acelerada por efecto de pozos de explotación de los acuíferos, la evapotranspiración que los árboles de gran tamaño desarrollan o los regímenes de temperatura y humedad que favorecen la pérdida de agua desde la superficie y gradualmente en profundidad. Dicha pérdida de humedad desencadena en hundimientos por subsidencia del material o en la fractura del suelo con fisuras que se desarrollan desde la superficie y hasta la profundidad del nivel freático normalmente.

En las zonas en las que se producen fisuras, es importante tener completamente claro que los mecanismos de falla no se producen en un solo sentido y no tienen completa verticalidad, sino que varían dependiendo de los elementos que afecten las presiones de succión, así como en la forma como se hayan generado las redes de flujo de agua dentro de la matriz de material. Si bien para el modelamiento se

consideran fisuras verticales, con separación simétrica, las condiciones reales en campo no corresponden al modelamiento propuesto, sino que este último es una manera metodológica de introducir en la investigación de estos tipos de análisis.

En la zona de estudio se presentan problemas de pérdida de humedad aceleradas por efecto de la explotación cercana de agua mediante pozos profundos para irrigación y para la ganadería en la zona; del mismo modo la presencia cercana a las carreteras de grandes árboles nativos y no nativos de la región, favorecen que la succión de sus raíces aceleren la salida de agua especialmente en temporadas de tiempo seco comunes en la zona por efecto de las variaciones considerables que presentan las temporadas de lluvias en la región, y la pérdida de las corrientes superficiales debido al uso que se da a dicha agua en la cuenca.

7.2. De las Condiciones del Corredor Vial Siberia - Tenjo.

Los pavimentos de la zona de estudio presentan patologías de diferentes tipos ligadas a la presencia de árboles de gran tamaño cerca de la estructura de la vía, y otras asociadas a las fisuras de suelos por pérdida generalizada de agua debidas al abatimiento del nivel freático. Fallas en carpeta tales como piel de cocodrilo y fisuras por envejecimiento de la carpeta asfáltica son comunes en todo el corredor. Fracturas completas en las que se ve afectada toda la estructura del pavimento son fácilmente verificables en campo y se pueden relacionar con las fracturas que presenta el suelo arcilloso de la región producto de la pérdida de humedad y desecación de los suelos de la zona.

En los apiques realizados en el corredor vial junto a la vía analizada, se han encontrado suelos tipo arcillas blandas, limos arcillosos, turbas, algunos lentes arenosos y material de arrastre que posiblemente fue depositado en las eras geológicas debido a los cambios de régimen de lluvias en la región. Las cuencas de la zona favorecen la presencia de agua subterránea debido al tipo de depósito

encontrado y descrito en diversos estudios de caracterización de los suelos de la formación sabana.

7.3. Del Diseño de Pavimento Realizado.

Para la determinación de un diseño de pavimento particular se determinaron condiciones de la zona de acuerdo con las características propias de suelos posibles en la región y encontrados en los apiques de suelo. Se tuvieron en cuenta condiciones de material arcilloso normalmente consolidado por debajo del nivel freático y en los dos metros superiores se consideró arcillas sobreconsolidadas endurecidas por contracción debido a la desecación ocurrida en la era geológica más reciente. Como material de soporte también se consideró una arcilla intermedia que varía entre los dos metros superiores y el nivel freático, cuya resistencia está ligada no a procesos de consolidación pero sí a la contracción ocurrida por procesos de pérdida de humedad. Para la estructura de pavimento se identificó el espesor de pavimento encontrado en la zona que correspondió a 10 centímetros, las capas granulares fueron calculadas considerando una subbase en recebo de subbase B400 con una gradación del 95% de tamaños menores que 2 pulgadas, con un Índice de Plasticidad inferior al 6% y un desgaste menor al 50% como material común para un tránsito mediano como es el caso de la zona de estudio. Del mismo modo se analizó usando un material de base tipo C que corresponde a la base con condiciones de mayor vulnerabilidad en la zona. Los materiales fueron definidos con las mínimas condiciones debido a que en los apiques no se percibe la elaboración de una estructura de pavimento diseñada, sino que se demuestra un recebo común de espesores variables dependiendo del apique y una base granular de 30 cms en los dos puntos de inspección.

Los espesores de cada una de las capas fueron calculados considerando un tráfico de carretera de la estación de aforo N° 753, correspondiente al corredor entre Cajicá y Tabio, debido a que la estación N° 680 del Invías correspondiente al corredor en estudio, no cuenta con la información suficiente dado que esta

estación es móvil y no fue instalada por tiempo suficiente; el diseño fue planeado para un periodo de 15 años a partir del 2016 considerando el crecimiento normal del tráfico que se percibe en la estación aforada, que guarda una estrecha relación debido a la cercanía, las condiciones de movilidad y el tipo de vía, así como por ser una carretera que comunica el sector dado que es el corredor vial Siberia – Tenjo – Tabio – Cajicá – Chía.

Los espesores de cada una de las capas fueron calculados por el método de diseño de la AASHTO 93, aceptado en Colombia por normativa para diseños de pavimento, siendo este un método empírico de diseño y tradicional para los pavimentos flexibles de la región. Se consideraron condiciones climáticas propias de la zona tomadas de estudios previos de la región y se definió como diseño deseable para compararlo de acuerdo con un pavimento normal, y reforzado con geoceldas de acuerdo con el modelo propuesto por Pavco en su manual de diseño de reforzamiento de geosintéticos tipo Neoweb de 12,5 centímetros de altura, siendo de celda para confinamiento de material.

La metodología de reforzamiento por geoceldas debe considerar el uso adicional de geosintético para la condición particular del material de la zona, debido a que por efecto de las fisuras generadas en el estrato de subrasante, se puede perder material de la subbase y hace que se presente desconfinamiento del material granular, por ello el manual de diseño recomienda que para evitar la pérdida de material y en este caso por efecto de las fisuras, se debe colocar un geosintético tipo tela, de manera que se separe la estructura del pavimento del suelo de soporte y permita que las capas granulares y la carpeta asfáltica funcionen de una manera más homogénea.

Las deformaciones encontradas para separaciones de fisuras muy grandes en la superficie son significativas, esto implica que de acuerdo con los parámetros de diseño de las estructuras de pavimento, no cuentan con la durabilidad deseable de acuerdo de la norma INVIAS dado que excede las tolerancias de deformación

vertical, sin embargo, este mecanismo de reforzamiento si bien no va a garantizar la vida útil durante todo el periodo de diseño de la estructura, es posible que permita extender la durabilidad por las variaciones considerables que manifiestan los regímenes de lluvias en la zona de la sabana de Bogotá, en la que cada vez las temporadas secas son más largas y las de lluvias son más intensas.

Las deformaciones en superficie deben medirse se acuerdo con las condiciones de cada zona en particular, dado que dependiendo de la rapidez en la pérdida de agua de la matriz de suelo arcilloso, va a depender la configuración de las fisuras generadas en el suelo, lo que hace que la separación y ubicación de las mismas se hace compleja de analizar por modelos tipo, sino que se debe tener en cuenta los factores particulares de cada punto.

Las fisuras se plantearon todas verticales y equidistantes, lo que permitió un modelo simétrico que permite facilidades en el análisis, sin embargo las condiciones reales del campo no son las propuestas en el modelo idealizado; sin embargo, este es un punto de inicio importante en el que se identifica la configuración y distribución de los esfuerzos, así como la identificación de los parámetros que afectan la estabilidad de las columnas de material, lo que favorece la introducción de variables más detalladas en futuras investigaciones.

7.4. Del Reforzamiento.

El reforzamiento mediante el uso de geosintéticos para obras de infraestructura vial se ha usado como un producto de uso comercial que favorece la capacidad de soporte de cargas por efecto de los camiones; el diseño de un pavimento de acuerdo con las condiciones de la subrasante y las características de los materiales que se usan para conformar la estructura de pavimento asfáltico, determinan unos espesores que al ser modificados con el reforzamiento permiten el ahorro de material y con ello la disminución de costos en la obra.

Para el efecto del uso de reforzamientos en zonas de inestabilidad como la analizada en el presente documento, es importante identificar las reducciones que se realizan de desplazamiento de material que incluso llegan al 80%. Esto significa que para las condiciones analizadas de forma propuesta en la investigación, se puede pensar que el pavimento al verse afectado un 80% menos que sin el uso de los reforzamientos, puede ofrecer mayor durabilidad, mejores condiciones en la rodadura y una movilidad mucho más adecuada para los usuarios.

El reforzamiento que se realiza para modelos de fisuras muy juntas favorece un mayor impacto en la mitigación de los asentamientos del material en la superficie; esto implica que cuando las fallas se producen muy cercanas, la potencialidad de mejora de los pavimentos es mayor al momento de reforzar. Así mismo, cuando las fisuras se presentan en columnas de mayor ancho de base, los desplazamientos medidos presentan reducciones en menor proporción; la causa puede deberse a que las fallas son de mayor incidencia y los asentamientos con o sin refuerzo se perciben como elementos de mayor tamaño que al fallar su peso propio impide una mejor reacción del reforzamiento, sin embargo, en superficie si se puede ver una mejor distribución de los desplazamientos, por lo que de la misma manera se cree que mitiga la afectación.

7.5. Del modelo propuesto para las condiciones actuales de la vía.

En la zona de estudio se encuentran que las capas de material granular son muy variables comparadas con un esquema de diseño real de acuerdo con las indicaciones de un diseño elaborado por el método AASHTO 93, puesto que no se encuentran en los apiques realizados en la zona de estudio un esquema de estructura típica de un diseño, sino que en todos los sondeos desarrollados los resultados arrojan mejoramientos tipo material reciclado o recibos contaminados de mejoramiento de suelo.

Puede inferirse de los sondeos de suelo que las características de la región han dado paso a mejorar la vía con material de estabilización del material arcilloso en las temporadas de lluvias que hacen que el tipo de suelo sea inadecuado para el tráfico. Esto probablemente evoluciona a una carpeta de rodadura en concreto asfáltico que ha venido siendo adaptado con sobrecarpetas en el tiempo, pero que no ha presentado un mantenimiento adecuado y diseñado para las cargas de tráfico encontradas en la zona, así como las implicaciones de los cambios volumétricos en el sitio.

Generar un reforzamiento en la estructura de pavimento de la zona con geoceldas puede dar resultados de mitigación de las deformaciones superficiales considerables en la superficie que pueden verificarse en el mejoramiento de las características de las capas granulares con el confinamiento de los materiales de la estructura del pavimento y la calidad en la vía de la zona, sin embargo para corroborar estos resultados se debe abrir paso a nuevas investigaciones en las que se desarrolle un tramo de prueba para identificar el comportamiento en el tiempo y validando los análisis numéricos desarrollados.

7.6. Limitaciones encontradas.

El estudio presenta un modelamiento simétrico en el que se colocan fisuras de igual apertura en superficie, igual profundidad e igual separación para cada uno de los modelos propuestos en el estudio; esto limita la obtención de resultados ajustados a las condiciones de campo reales, dado que si bien corresponde a un primer modelo importante en un campo en el que no se perciben en los estudios e investigaciones previas resultados ligados a las fisuras de las arcillas, claramente se sabe que las fracturas del material no se producen de forma simétrica.

Las profundidades colocadas de manera simétrica simulan el descenso del nivel freático de una manera constante, sin embargo, las evidencias en estudios previos

realizados dejan ver que cerca de los árboles de gran tamaño los asentamientos del material son mayores que en las zonas alejadas a los mismos; esta condición también limita, puesto que el nivel freático puede verse abatido en regiones cercanas a los grandes árboles de una forma más rápida y esto genere que las fracturas tengan diferentes profundidades, lo que implica que los resultados son también cambiantes.

Aunque el modelo usado se desarrolla independiente del tiempo y por ende no se tiene en cuenta la acción de las cargas dinámicas producto del paso de los camiones, los resultados se ven limitados a cargas estáticas, siendo este un primer acercamiento simulado a lo que puede suceder en un suelo fracturado cuando se coloca reforzamiento a la estructura de pavimentos y la manera como se mejora las condiciones de estabilidad; sin embargo en el momento en el que pasen vehículos, es muy probable que las cargas aplicadas por efecto del paso de camiones ocasione indicios adicionales de falla en las columnas de material.

7.7. Recomendaciones para futuras investigaciones.

Es recomendable que partiendo del modelo desarrollado producto del presente trabajo, se incursione en la complejización de los modelos generando la simulación con fisuras variables, lo que implica que las columnas de material ya no son simétricas y que puede acercarse de una mejor forma a las condiciones reales del campo. Del mismo modo proponer profundidades variables también en el nivel freático, puede, arrojar posibles mecanismos de falla diferentes que permitan verificar si el uso de los reforzamientos sigue siendo útil con las proporciones encontradas en la investigación presentada en el presente documento.

Del mismo modo se puede pensar en el uso de un sistema de modelamiento tridimensional que permita generar un model variable para identificar el comportamiento en las tres dimensiones y verificar el comportamiento de un modo

mucho más amplio; este nuevo enfoque permitirá incluir los efectos de los asentamientos y posibles mecanismos de falla como se presentan en la región de la Sabana de Bogotá y la afectación de los surcos de árboles sembrados en los costados de la carretera.

Futuros estudios pueden adentrarse también en modelar el comportamiento dinámico en función del tiempo, con el fin de proyectar de una mejor manera el proceso de descarga y recargue de agua en los suelos arcillosos, así como la aplicación de las cargas de los camiones que pasan por la carretera y las afectaciones que se pueden encontrar, de tal forma que se tengan resultados que se acerquen a las condiciones reales que ocurren en el campo y la respuesta real que pueda dar el reforzamiento ante tales condiciones.

BIBLIOGRAFÍA

ABU-HEJLEH, A. N., Y D. ZNIDARCIC. «*Desiccation theory for soft cohesive soils.*» *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995: 493-502.

ALONSO, E. E., LLORET, A., GENS, A., y YANG, D. Q. *Experimental behaviour of highly expansive double-structure clay. En PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS/UNSAT'95/PARIS/France/6-8 SEPTEMBER 1995. VOLUME 1. 1995.*

ALTIERI, M. A., Y C. I. NICHOLLS. «*Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas.*» *LEISA revista de agroecología*, 2009: 5-8.

AMERI, M., A, MANSOURIAN, K. M. HEIDARY, M. R. M. ALIHA, Y M. R. AYATOLLAJI. «*Cracked asphalt pavement under traffic loading – A 3D finite element analysis.*» *Engineering Fracture Mechanics*, 2011: 1817–1826.

ÁNGEL, L., G. A. RAMÍREZ, Y C. E. A. DOMÍNGUEZ. «*Isla de calor y cambios espacio - temporales de la temperatura en la ciudad de Bogotá.*» *Revista Académica Colombiana de Ciencias*, 2010: 171-183.

ARANGO, C., J. DORADO, D. GUZMÁN, Y J. F. RUIZ. *Cambio Climático más probable para Colombia a lo largo del siglo XXI respecto al clima presente. Bogotá, Colombia: Grupo de modelamiento de tiempo, clima y escenarios de cambio climático. IDEAM, 2012.*

ARIAS, DILAN EDUARDO M. *Determinación del coeficiente lateral de presión de tierras en reposo "Ko" para una arcilla superficial del occidente de la Sabana de Bogotá D.C. Bogotá: Universidad Santo Tomas, 2015.*

BARBOSA, H. C. A., Y S. E. F. CASAS. Informe de pruebas de campo para proyecto de Investigación. Bogotá: Universidad Santo Tomás, 2016.

BLIGHT, G. E. «*Desiccation of a clay by grass, bushes and trees.*» *Geotechnical & Geological Engineering*, 2005: 697-720.

BOURLAND, J. B., *On the compressibility and shear strength of natural clays. Geotechnique*. 1990, 329-378.

BURNETT, David S. *Finite element analysis: from concepts to applications*. 1987.

DAS, B. M. Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica. California, Estados Unidos: Thomson Editores, 2001.

CAR, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Plan de Manejo Ambiental de agua subterránea de la sabana de Bogotá y zona crítica. Bogotá: CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA (CAR), 2008.

CÁRDENAS, G. J. *Diseño Geométrico de Carreteras*. Bogotá: Ecoe, Ediciones, 2013.

CARREÓN, F. D., M. C. HIDALGO, Y M. M. HERNÁNDEZ. «Mecanismos de fracturamiento de depósitos arcillosos en zonas urbanas. Caso de deformación diferencial en Chalco, Estado de México.» *Sociedad Geológica Mexicana*, 2006: 237-250.

CASTILLO, O. O. A., y G. A. RAMOS. «“Lo del agua al agua”: desarrollo y desastre en la Zona Metropolitana del Valle de México.» *Revista de Geografía*., 2014: 81-110.

CHAI, JIN-CHUN, y N. MIURA. «Traffic-Load-Induced Permanent Deformation of Road on Soft Subsoil.» *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002: 907-916.

CUARTAS RAMÍREZ, Claudia Milena, et al. Optimización y Refuerzo de Estructuras de Pavimento Flexible Mediante Geoceldas. 2015. Tesis de Licenciatura. Universidad Militar Nueva Granada.

DIAZ-GRANADOS, O. M. A., Y B. L. A. CAMACHO. «Valoración de cambios hidrológicos en la cuenca del río Bogotá.» *Revista de Ingeniería*, 2012: 77-85.

DOMÍNGUEZ, J. M., y I. SCHIFTER. Las Arcillas, El Barro Noble. 1992. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/109/html/arcillas.html>.

DORRONSORO, F. C. (30 de Mayo de Actualizado 2015). *Edafología.net*. Recuperado el 25 de Junio de 2015, de <http://www.edafologia.net/index.htm>

DRISCOLL, R. «The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clay soils in Britain.» *Geotechnique*, 1983: 93-105.

DUQUE, E. GONZALO, y P. CARLOS E. ESCOBAR. Mecánica de Suelos. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2002.

FODEIN, (Fondo de Investigaciones de la Universidad Santo Tomás), proyecto de investigación 027 de 2015.

FREDLUND, D. G., y RAHARDJO, H. *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons, 1993.

FREDLUND, D. G., y XING, A. *Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian geotechnical journal*, 1994. 31(4), 521-532.

GARZÓN, R. J. Evaluación de los asentamientos por consolidación generada por descenso del nivel freático. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2011.

GOOGLE MAPS, es. *Google Maps*. 12 de Septiembre de Recuperado 2016. <https://www.google.es/maps/@4.8438687,-74.134679,16799m/data=!3m1!1e3>.

HAERI, S. M.; NOORZAD, R.; OSKOOROUCHI, A. M., Effect of geotextile reinforcement on the mechanical behavior of sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 2000, vol. 18, no 6, p. 385-402.

HELMENS, K., y T VAN DER HAMMEN. «Memoria explicativa de los mapas del Neógeno y Cuaternario de la Sabana de Bogota-Cuenca alta del Rio Bogota (Cordillera Oriental, Colombia).» *IGAG Análisis Geográficos*, 1995: 91-142.

HERNÁNDEZ, RAMIREZ JOSE ANTONIO. «Aparecen nuevas Grietas en las comunidades de Chalcao.» *El Observador*, 13 de Julio de 2011: <https://feyiyi1.wordpress.com/2011/07/13/aparecen-mas-grietas-en-comunidades-de-chalco/>.

HILL, R. (1950). *Theory of plasticity*.

HONG, ZHENSHUM, LING L. ZENG, YU-JUN CUI, YUANG Q. CAI, y CHENG LIN. «*Compression Behaviour of Natural and Reconstituted Clays.*» *Geotechnique*, 2012: 291-301.

HUFENUS, R., R. RUEEGGERB, R. BANJAC, M. MAYOR, M. S. SPRINGMAN, y R. BRÖNNIMANN. «*Full-scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved roads on soft subgrade.*» *Geotextiles and Geomembranes*, 2006: 21–37.

HUGHES, Thomas JR. *The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis*. Courier Corporation, 2012.

IBAÑEZ, J. J., y C. F. MANRÍQUEZ. Mi I+D Un lugar para la Ciencia y la Tecnología. 6 de Octubre de 2011. <http://www.madridmasd.org/blogs/universo/2011/10/06/140062>.

IDEAM, y FOPAE. Estudio de Caracterización Climática de Bogotá y la Cuenca Alta del Río Tunjuelo. Bogotá, Colombia: IDEAM Y Alcaldía Mayor de Bogotá, 2004.

JIMÉNEZ, B., M. MAZARI, R. DOMÍNGUEZ, y CIFUENTES E. El agua en el Valle de México. Mexico: Science Academy, Mexico., 2004.

JULIVERT, M. «Observaciones sobre el Cuaternario de la Sabana de Bogotá.» *Boletín de Geología*, 1961: 1-36.

KODIKARA, J., Y S. COSTA. «*Desiccation Cracking on Clayey Soils, Mechanisms and Modelling.*» *Springer series in Geomechanics and Geoengineering*, 2013: 21-32.

LEAL, V. J. C., F. G. GALLEGOS, y G. E. ROJAS. «Estimación de esfuerzos efectivos a partir del parámetro X de Bishop en una arena limosa.» *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 2013: 139-151.

LESHCHYNSKY, DOV. «*Research and Innovation: Seismic performance of various geocell earth-retention system.*» *Geosynthetics*, 2009: 1-8.

LOVE, J. P., H. G. BURD, G. W. E. MILLIGAN, y G. T. HOULSBY. «*Analytical and model studies of reinforcement of a layer of granular fill on a soft clay subgrade.*» *Canadian Geotechnical Journal*, 1987: 611-622.

MARTINEZ, L. J., Geotextiles, <http://jorgemartinezlarios.com/geotextiles/#.WKieGIXhDIV>, 2012, Recuperado 18 de febrero de 2017.

MILLER, C. J., H. MI, y N. YESILLER. «*Experimental Analysis of Desiccation Crack Propagation in Clay Liners.*» 1998: 677-686.

MOHAMMAD, NADERI POUR, y ASAKEREH ADEL. «*A Review of Critical State Elasto-Plastic Proposed Constitutive Models to Predict Behavior of Clay Soils .*» *International Journal of Engineering Innovation and Research*, 2014: 1-7.

MULUNGYE, R. M., P. O. M. OWENDE, y K. MELLÓN. «*Finite Element Modelling of Flexible Pavements on Soft Soils Subgrade .*» *Materials and Design* 38 (2007): 739-756.

PABÓN, C. J. D. «Cambio Climático en Colombia: Tendencias de la Segunda Mitad del Siglo XX y Escenarios Posibles para el Siglo XXI.» *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 2012: 261-278.

PATIÑO, V. F. A., y DE, O. BERMOUDES. «Fallas Longitudinales y Transversales en la Sabana de Bogotá, Colombia.» *Boletín de Geología*, 2002: 37-48.

PAVCO, Geosistemas de PAVCO. *Manual de Diseño con Geosintéticos*. Bogotá: Geosistemas PAVCO, 2012.

PERÓN, H., L. LALOU, T. HUECKEL, y L. BO-HU. «Desiccation cracking of soils.» *European Journal of Environmental and Civil Engineering (EJECE)*, 2009: 869-888.

PINEDA, C. A. R., y G. G. AUVINET. «Método del elemento finito estocástico en geotecnia, Enfoque Espectral.» *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 2013: 11-22.

PINEDA, J. J. A., L. D. A. GARCÍA, y V. M. J. CAVANA. «Propiedades de Retención de Humedad de Arcillas Fisuradas: Una Herramienta para el Análisis de Problemas asociados a Deseccación.» *Twelfth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2014)*. Guayaquil, Ecuador: (LACCEI'2014), 2014. 1-4.

PINEDA, J. J. A., y J. E. COLMENARES. *Influence of desiccation on volumetric behavior of Bogotá clay*. Venezuela: Sociedad Venezolana de Geotecnia, 2006.

PINEDA, J. J. A., y L. D. A. GARCÍA. «Relaciones Succión - Humedad y comportamiento Volumétrico de Arcillas Lacustres Fisuradas por Deseccación.» *Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura*. La Habana, Cuba: CUJAE, 2014. 1-10.

PINEDA, J. J. A., y M. D. E. ARIAS. *Esfuerzos de Preconsolidación y su Importancia en la Determinación del Coeficiente Lateral de Presión de Tierras en Reposo (K_o) en Suelos Arcillosos Sedimentarios*. Guayaquil, Ecuador: DuoDécimo LACCEI Conferencia Latinoamericana y del Caribe para Ingeniería y Tecnología, 2014.

PINEDA, J. JORGE A., F. CAROL A. MURILLO, y JULIO E. COLMENARES. «Caracterización de patologías asociadas a la acción de especies vegetales en una vía del occidente de la sabana de Bogotá.» *Épsilon*, 2015: 39-68.

PINEDA, J. JORGE. A., M. DILAN E. ARIAS, L. DIEGO A. GARCÍA, y JULIO E. COLMENARES. «Variaciones del coeficiente lateral en reposo K_0 en arcillas superficiales del occidente de la sabana de Bogotá.» *Epsilon*, 2015: 177-201.

PLAXIS 2D, Manuals. *Plaxis 2D Version 8,5*. Netherlands: Delft University of Technology and Plaxis b,v., 2006.

PSR. *Stabilizing and Unstable World*. <http://www.prs-med.com/prs-neoweb-geocell/neoloy-novel-polymer-alloy> 2012. (último acceso: 26 de Junio de 2016).

RANDRUP, T. B., E. G. MCPHERSON, y L. R. COSTELLO. «A review of tree root conflicts with sidewalks, curbs and roads.» *Urban Ecosystems* 5, 2003: 209-225.

RAVINA, I. «The influence of vegetation on moisture and volume changes.» *Géotechnique*, 1983: 151-157.

RICHARDS, B. G., P. PETER, y W. W. EMERSON. «The effects of vegetation on the swelling and shrinking of soils in Australia.» *Geotechnique*, 1983: 127-139.

RIZALEZ, R. A. M., Y G. A. y. GONZÁLEZ. Caracterización de las Arcillas Cementantes de las Arenas Productoras Pertenecientes al Campo el Roble del Distrito de Gas Anaco. Puerto la Cruz, Anzoátegui, Venezuela: Universidad del Oriente, 2011.

ROCHA, E. A., G. M. R. TORRES, I. I. ALCÁNTARA, y V. H. G. MONROY. «Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México.» *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2001: 37-54.

RODRÍGUEZ, O. J. A. «Análisis de Interacción Suelo Estructura para Refuerzo de Suelos Fisurados.» *Ingeniería*, 2005: 135-153.

ROJAS, P. LAURA L., y P. SEBASTIÁN A. RIVERA. Caracterización de suelos arcillosos desecados al occidente de la sabana de Bogotá. Bogotá: Universidad Santo Tomás, 2014.

ROSONE, MARCO, F. CAMILO AIRO, ALESSIO FERRARI, CLAUDIO TORTA, y CLARA CELAURO. «*Suction controlled drying and wetting cycle effects on the volumetric behaviour of a lime-treated high plasticity clay.*» *E-UNSAT*, 2016: E3S Web Conference 9.

ROWE, R. K.; RIMAL, S.; SANGAM, H. *Ageing of HDPE geomembrane exposed to air, water and leachate at different temperatures. Geotextiles and Geomembranes*, 2009, vol. 27, no 2, p. 137-151.

RUEDA, M. Y., y J. J. A. PINEDA. Patologías asociadas a fenómenos de desecación en pavimentos flexibles del occidente de la sabana de Bogotá. Bogotá, Colombia: Universidad Santo Tomás, 2012.

RUEDA, P. MÓNICA YASMÍN. Estado del arte de la problemática asociada a la desecación en pavimentos en la zona occidental de la sabana de Bogotá. Bogotá: Universidad Santo Tomás, 2012.

SHIN, H., Y J. C. SANTAMARINA. «*Open-mode discontinuities in soils.*» *Geotechnique Letters*, 2011: 95-99.

SKEMPTON, A. W. *First-time slides in over-consolidated clays. Geotechnique*, 1970. vol. 20, no 3, p. 320-324.

SKOLMEN, R. G., y T. F. LEDIG. «*Eucalyptus globulus Labill. bluegum eucalyptus.*» *Burns, R.; Honkala, B. eds. Silvics of North America* (Burns, R.; Honkala, B. eds. Silvics of North America), 1990: 299-304.

SOTO, M. A. A.. Geotecnia en suelos no saturados. *Revista académica*. 2008 p. 471-481

STARK, T. D, y H. T. EID. «*Slope stability analyses in stiff fissured clays.*» *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997: 335-343.

TERZAGHI K. *The shear resistance of saturated soils, on: Proc. 1st, International Conference Soils Mechanics, Foundation Engineering*, Cambridge MA, volumen 1, 1936, pp. 54-56

VAN DER HAMMEN, THOMAS. *Global change, biodiversity and conservation of Neotropical montane forests*. The New York Botanical Garden, 1995.

VAN DER HAMMEN, TH., y ENRIQUE GONZALEZ. «*Upper pleistocene and holocene climate and vegetation of the "Sabana de Bogota" (Colombia, South America).*» *Leidse Geologische Mededelingen*, 1960: 261-315.

VANAPALLI, S. K., D. G. FREDLUND, D. E. PUFALH, y A. W. CLIFTON. «*Model of the prediction of shear strength with respect to soil suction.*» *Can. Geotech*, 1996: 379-392.

VÁSQUEZ, V. L. R. *Pavement Condition Index (PCI)*, Para pavimentos pavimentos asfálticos y de concreto en carretera. Manizales, Colombia: INGEPAV Ingeniería de Pavimentos, 2002.

VESGA, L.F., Agrietamiento profundo de los suelos de la Sabana de Bogotá. X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana. Sociedad Colombiana de Ingenieros. Bogotá, D.C. 1999.

VESGA, L. F., L. E. MEZA, y B. CAICEDO. «Comportamiento de Subsuelo Arcilloso de la Sabana de Bogotá Debido al Agrietamiento Profundo Causado por Deseccación.» *IX Congreso Colombiano de Geotecnia*, 2002.

VESGA, M. L. F. «Agrietamientos en Suelos del Occidente de la Sabana de Bogotá.» *Boletín Colombiano de Geotecnia*, 2000: 35-46.

VIPULANANDAN, C., M. B. ADDISON, y M. HANSEN. *Expansive clay soils and vegetative influence on shallow foundations*. Houston, Texas, USA: ASCE, 2001.

VITONE, C., F. COTECCHIA, J. DESRUES, y G. VIGGIANI. «An approach to the interpretation of the mechanical behaviour of intensely fissured clays.» *Soils and Foundations*, 2009: 355-368.

WHITE, F. M. *Fluid Mechanics*. MGW, 1999.

WILLIAMS, A. A. B., y J. T. PIDGEON. «Evapo-transpiration and heaving clays in South Africa.» *Géotechnique*, 1983: 141-150.

ZHOU, Y., y R. R. KERRY. «Development of a technique for modelling clay liner desiccation.» *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2003: 473-493.

ZORNBERG, Jorge G., Sistemas de pavimentos reforzados con geosintéticos *Geosynthetic-reinforced Pavement Systems. Ing. Civ.*, 2013, vol. 171, p. 5-25.