

**Prefactibilidad geotécnica de un tramo de la línea férrea de la Sabana ubicado entre  
calles 147 y 145 sobre la avenida novena, para la implementación de un metro ligero  
superficial.**

**Angelo Fernando Del Vecchio Cristancho**

**Trabajo de grado  
para optar para el título Ingeniero Civil**

**Dirigido por:**

**Carlos Eduardo Torres Romero**

**Ingeniero Civil**

**Universidad Santo Tomás**

**Ingeniería**

**Bogotá D.C**

**2020**

### **Dedicatoria**

Este trabajo va dedicado a todas las personas que me empujaron a continuar con esta carrera compañeros, docentes y familiares, a las personas que han estado para mí en mis diferentes aciertos y desaciertos a lo largo de mis años de estudios y sobre todo va dedicado a mi mamá Nelly Cristancho, mi papá Angelo P. Del Vecchio (Q.E.P.D), y a mi hermano Mateo Del Vecchio que sirvieron como motor e inspiración para superarme y exigirme cada vez más.

### **Agradecimientos**

Este trabajo se lo quiero agradecer principalmente a mi director el ingeniero Carlos Torres que puso su tiempo a disposición mía para poder darle desarrollo a la idea que tenía y por darse la tarea de explicarme conceptos y herramientas nuevas para mejorar la calidad de este proyecto de grado. De igual forma agradezco al ingeniero Livaniel Viveros quien me colaboró también a darle un cuerpo al trabajo para que fuese más prometedor y para que presentara mejores argumentos y hacer un trabajo destacable. Al ingeniero Fernando Rey quien también me colaboró a desarrollar la idea y a nutrirla con referencias bibliográficas y su amplia experiencia en el tema. Agradezco a mis amigos y futuros colegas que me compartieron ideas para darle un desarrollo propio de la ingeniería civil. Agradezco finalmente a todas las empresas y personas que colaboraron con información y entrevistas para darle sustento y desarrollo a este trabajo.

## Resumen

La movilidad eficiente y eficaz es un factor que estudian los gobiernos de todos los países para intervenir positivamente en su desarrollo. El objetivo general de este proyecto radica en realizar la prefactibilidad geotécnica de un tramo de la línea férrea de la Sabana en la ciudad de Bogotá para determinar si es posible el tránsito de un sistema férreo que permita el transporte de pasajeros y carga simultáneamente, para lo cual se realizó la identificación del perfil estratigráfico de la zona, el avalúo de cargas actuantes del tramo, el comportamiento y respuesta mecánica del suelo, la viabilidad económica y la viabilidad legal del proyecto, para así poder determinar las condiciones iniciales que debe tener un nuevo sistema férreo en la ciudad de Bogotá. Por lo tanto, este trabajo espera presentar alternativas sustentadas que permitan demostrar que el suelo está apto para realizar estudios más detallados para posteriormente hacer un sistema de transporte férreo bidireccional que reemplace el existente y auxilie al sistema de transporte de la capital de Colombia.

**Palabras Clave:** Geotecnia, Tren tram, Tren de la Sabana, Prefactibilidad geotécnica, Metro superficial, Transporte de Bogotá.

### **Abstract**

Efficient and effective mobility is a factor that governments in all countries study to intervene positively in their development. The overall objective of this project is to carry out the geotechnical pre-feasibility of a section of the Sabana railway line in the city of Bogotá to determine whether it is possible to transit a railway system that allows the transport of passengers and cargo simultaneously, for which the identification of the stratigraphic column of the area was carried out , the assessment of acting loads of the section, the behavior and mechanical response of the soil, the economic viability and the legal viability of the project, in order to determine the initial conditions that a new railway system must have in the city of Bogotá. Therefore, this work hopes to present sustained alternatives to demonstrate that the soil is suitable for further studies and subsequently make a two-way railway transport system that replaces the existing one and assist the transportation system of the capital of Colombia.

**Key Words:** Geotechnics, Tram Train, Sabana Train, Geotechnical Prefeasibility, Overground train, Bogotá Transportation.

## Tabla de contenido

<b>Dedicatoria</b>	2
<b>Agradecimientos</b>	3
<b>Resumen</b>	4
<b>Abstract</b>	5
<b>Tabla de contenido</b>	6
<b>Lista de Tablas</b>	9
<b>Lista de Figuras</b>	10
<b>Introducción</b>	13
<b>Objetivos</b>	14
Objetivo General	14
Objetivos Específicos	14
<b>Justificación</b>	15
<b>Capítulo 1: Marcos de referencia</b>	17
Marco conceptual	17
Rieles	17
Traviesas o durmientes	17
Balasto	17
Tren – tram	17
Perfil estratigráfico	18
Marco teórico	18
Aspectos geográficos	18
Aspectos topográficos	19
Aspectos hidrográficos	20
Aspectos Geológicos	22
Amenaza sísmica	25

Aspectos de la población	26
Estado del arte	28
Marco normativo y legal	30
<b>Capítulo 2: Metodología</b>	31
<b>Capítulo 3: Flujograma de actividades</b>	33
<b>Capítulo 4: Cronograma de actividades</b>	34
<b>Capítulo 5: Construcción del perfil estratigráfico</b>	35
Ubicación geográfica georreferenciada	35
Base de datos de los sondeos utilizados	37
Ensayos elaborados in situ	40
Ensayos de SPT	43
Gráficos de interpretación de datos	45
Perfil estratigráfico a partir de la descripción visual	51
Perfil estratigráfico estimado final	54
<b>Capítulo 6: Determinación y avalúo de cargas</b>	61
Avalúo de cargas para la estructura actual	61
Avalúo de cargas para la primera propuesta de estructura	62
Avalúo de cargas para la segunda propuesta de estructura	64
<b>Capítulo 7: Análisis del comportamiento mecánico y de respuesta del suelo</b>	65
Capacidad portante del suelo en condiciones drenadas	69
Capacidad portante del suelo en condiciones No drenadas	72
Cálculo de asentamientos elásticos	75
Representación gráfica del terreno con método de elementos finitos	77
Representación gráfica de los modelos en Phase 2	78
Representación gráfica de los modelos en Settle 3D	85

Análisis de resultados	89
<b>Capítulo 8: Análisis de la viabilidad geotécnica de las alternativas propuestas</b>	97
<b>Capítulo 9: Análisis de la viabilidad económica del proyecto</b>	101
<b>Capítulo 10: Análisis de la viabilidad legal del proyecto</b>	106
<b>Capítulo 11: Contextualización final del propósito último del proyecto</b>	111
<b>Conclusiones</b>	115
<b>Referencias</b>	118

### Lista de Tablas

Tabla 1: Coeficientes espectrales (Alcaldía de Bogotá, 2010)	25
Tabla 2: Diseño metodológico (Autoría propia)	31
Tabla 3: Cronograma de actividades (Autoría propia):	34
Tabla 4: Datos de georreferenciación (Autoría propia)	37
Tabla 5: Base de datos de los Sondeos (Autoría propia)	38
Tabla 6: Valores de los ensayos de resistencia al corte con veleta de campo (Autoría propia)	41
Tabla 7: Valores del ensayo de penetrómetro (Autoría propia)	42
Tabla 8: Valores del ensayo de SPT (Autoría propia)	43
Tabla 9: Datos finales para las propiedades de los estratos. (Autoría propia)	60
Tabla 10: Avalúo de cargas de los trenes que actualmente circulan (Autoría propia)	62
Tabla 11: Avalúo de cargas para trenes de pasajeros (Autoría propia)	63
Tabla 12: Análisis de estabilidad y deformación - modelo bicapa condición drenada (Autoría propia)	69
Tabla 13: Análisis de estabilidad y deformación - modelo bicapa condición NO drenada (Autoría propia)	73
Tabla 14: Análisis de asentamientos elásticos (Autoría propia)	76
Tabla 15: Síntesis del análisis mecánico y de respuesta del suelo (Autoría propia)	95
Tabla 16: Presupuestos de proyectos similares (Autoría propia)	104

### Lista de Figuras

Figura 1: Ubicación geográfica de Bogotá. (Milenioscuro,2015)	19
Figura 2: Ubicación del estudio del proyecto. (Milenioscuro,2015)	19
Figura 3: Radio de estudio del proyecto. (Milenioscuro,2015)	19
Figura 4: Topografía de la ciudad de Bogotá (topografic-map, N/A)	20
Figura 5: Topografía del sector de investigación (topografic-map, N/A)	20
Figura 6: Gráfico de precipitación anual en Bogotá. (IDEAM, 2018)	21
Figura 7: Gráfico de temperatura anual en Bogotá. (IDEAM, 2018)	21
Figura 8: Distribución de la precipitación en Bogotá. (IDEAM, 2018)	22
Figura 9: Mapa geológico de la ciudad de Bogotá (INGEOMINAS, 1997)	24
Figura 10: Corte transversal (oriente – occidente) de la geología de Bogotá (INGEOMINAS, 1997)	24
Figura 11: Curva de diseño para espectro estático. (Alcaldía de Bogota, 2010)	26
Figura 12: Espectro estático de zona de investigación. (Autoría propia, 2020)	26
Figura 13: Proyecciones de población por grupos quinquenales de edad para la localidad de Usaqué (Balanta, 2015)	27
Figura 14: Mapa de la distribución de población en Bogotá (Balanta, 2015)	27
Figura 15: Flujograma de actividades (Autoría propia)	33
Figura 16: Mapa de georreferenciación (IDECA Alcaldía de Bogotá,2020)	36
Figura 17: Gráficos de clasificación del suelo (Autoría propia)	46
Figura 18: Gráficos de capacidad ultima (Autoría propia)	47
Figura 19: Gráficos de pesos unitarios, SPT, ensayo de veleta y penetrómetro (Autoría Propia)	48

Figura 20: Perfil estratigráfico visual (Autoría propia)	52
Figura 21: Perfil estratigráfico estimado final (Autoría propia)	56
Figura 22: Asentamiento elástico un carril base 3.5m altura 0.5m (Autoría propia)	78
Figura 23: Sigma Z un carril base 3.5m altura 0.5m (Autoría propia)	79
Figura 24: Asentamiento elástico un carril base 5.0m altura 1.0m (Autoría propia)	79
Figura 25: Sigma Z un carril base 5.0m altura 1.0m (Autoría propia)	80
Figura 26: Asentamiento elástico un carril base 6.5m altura 1.5m (Autoría propia)	80
Figura 27: Sigma Z un carril base 6.5m altura 1.5m (Autoría propia)	81
Figura 28: Asentamiento elástico dos carriles base 8.0m altura 0.5m (Autoría propia)	81
Figura 29: Sigma Z dos carriles base 8.0m altura 0.5m (Autoría propia)	82
Figura 30: Asentamiento elástico dos carriles base 9.5m altura 1.0m (Autoría propia)	82
Figura 31: Sigma Z dos carriles base 9.5m altura 1.0m (Autoría propia)	83
Figura 32: Asentamiento elástico dos carriles base 11.0m altura 1.5m (Autoría propia)	83
Figura 33: Sigma Z dos carriles base 11.0m altura 1.5m (Autoría propia)	84
Figura 34: Asentamiento por consolidación primaria a 20 años un carril base 3.5m altura 0.5m (Autoría propia)	85
Figura 35: Asentamiento por consolidación primaria a 20 años un carril base 5.0m altura 1.0m (Autoría propia)	86
Figura 36: Asentamiento por consolidación primaria a 20 años un carril base 6.5m altura 1.5m (Autoría propia)	86
Figura 37: Asentamiento por consolidación primaria a 20 años dos carriles base 8.0m altura 0.5m (Autoría propia)	87

Figura 38: Asentamiento por consolidación primaria a 20 años dos carriles base 9.5m altura 1.0m (Autoría propia)	87
Figura 39: Asentamiento por consolidación primaria a 20 años dos carriles base 11.0m altura 1.5m (Autoría propia)	88
Figura 40: Grafico de asentamientos elásticos vs altura de terraplén (Autoría propia)	92
Figura 41: Grafico de asentamiento por consolidación primaria vs tiempo (Autoría propia)	93
Figura 42:Grafico de asentamiento por consolidación primaria vs tiempo (Autoría propia)	94
Figura 43: Punto de falla por capacidad portante (Autoría propia)	98
Figura 44: Ruta de RegioTram norte (Autoría propia)	112

## **Introducción**

A la hora de ejecutar el diseño de una línea férrea apta para el tránsito de los trenes destinados para el uso de la comunidad, es imperativo poseer estudios de diferentes aspectos como la topografía, hidrología, geotecnia entre otros. La problemática que se considera en este proyecto, radica en la carencia de estudios geotécnicos que demuestren que la línea férrea de la Sabana en Bogotá - Colombia es apta para la circulación de una flota de trenes ligeros. El resultado que se obtendrá en este proyecto indicaría, para otra investigación, que se puede realizar estudios geotécnicos más profundos que puedan sustentar un diseño geotécnico a la hora de realizar el diseño del metro ligero superficial que iría en la línea férrea de la Sabana.

Para efectuar la prefactibilidad geotécnica del tramo seleccionado es necesario realizar el análisis de cinco componentes: 1. Caracterización de los estratos de suelo que se encuentren inmediatamente después del contacto del terraplén con el primer estrato de suelo, 2. Determinación de las propiedades mecánicas (carga, esfuerzo, asentamientos y consolidación, etc.) que ejercería la nueva flota de trenes ligeros sobre el suelo existente, 3. Verificación geotécnica, con relación a las propiedades mecánicas del suelo, en cuanto a capacidad portante, asentamientos elásticos y por consolidación primaria, entre otros. 4. Marco económico donde se consignen los costos requeridos para la ejecución del posible proyecto, y 5. Marco jurídico que demuestre la viabilidad política y jurídica de este proyecto para que finalmente se pueda sintetizar la información y demostrar la prefactibilidad geotécnica de las líneas del tren de la Sabana para transporte público.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Desarrollar un estudio de prefactibilidad geotécnica de un tramo de la línea férrea de la Sabana ubicado entre calles 147 y 145 sobre la avenida novena, para la implementación de un metro ligero superficial.

### **Objetivos Específicos**

Estimar las características físicas y mecánicas de los materiales que componen el perfil geotécnico del tramo seleccionado para el conocimiento de la estratigráfica del sector.

Identificar las cargas actuantes de la actual y futura estructura, por efecto de los componentes que conforman las vías férreas.

Determinar el comportamiento mecánico y de respuesta del suelo por efecto de las cargas actuantes.

Analizar la viabilidad del nuevo proyecto con las dos nuevas propuestas, con respecto a la respuesta del suelo.

Determinar la viabilidad económica del proyecto que se requeriría, para implementar alguna de las dos nuevas alternativas.

Establecer los parámetros requeridos para determinar la viabilidad legal del proyecto de acuerdo con la normativa vigente de Bogotá.

## **Justificación**

El manual de normativa férrea para Colombia contempla múltiples diseños ingenieriles que se deben realizar en el país para que se autorice la construcción de una vía férrea. En el apartado de especificaciones de construcción se indican las características que debe cumplir el terraplén de apoyo de la vía férrea, para lo cual es determinante conocer las propiedades mecánicas en donde va a estar sometido el terreno. En los estudios de prefactibilidad geotécnica se deben realizar análisis de las propiedades intrínsecas del suelo, para la determinación de las propiedades mecánicas y económicas para determinar el costo aproximado de la obra. De esta forma este proyecto quiere mostrar las actuales propiedades mecánicas del tramo y las afectaciones geotécnicas que tendría por efecto de una alteración en sus cargas frecuentes, para que de esta forma se pueda demostrar que existe la posibilidad de permitir el paso de un metro ligero y por otro lado incluir la viabilidad económica y legal que involucra este proyecto.

La información recolectada en un informe de febrero del 2018 de la revista digital Portafolio; dice que la agencia nacional de infraestructura ha destinado cerca de \$208.000 millones de pesos para rehabilitación de la vía férrea, para el tránsito de trenes de carga, que a la fecha representa la investigación más reciente, sin embargo, no contemplan la posibilidad de trenes para pasajeros y se desconoce el tipo de intervención que se realizó en las vías férreas. Así pues, este proyecto estaría aportando estudios en materia geotécnica, que pueden servir como base para los diseños geotécnicos, necesarios para la implementación de un sistema masivo de transporte para pasajeros. Lo que se traduciría a futuro como una solución para aliviar los sistemas de transporte de la ciudad de Bogotá. Adicionalmente la utilidad que se le podría dar al resultado de este

proyecto, es que ya se conocerían parámetros necesarios para replicarlo a lo largo de la restante vía férrea disminuyendo investigaciones y traduciéndose en ahorro de recursos.

Al ser una investigación de una disciplina específica (la geotecnia) no tendría una incidencia social alta, en el sentido que no aporta al conocimiento general de los habitantes de Bogotá. Sin embargo, el alcance que podría llegar a tener el resultado de este proyecto sería habilitar la vía férrea para el tránsito de trenes para uso público. Con lo anterior, se podrían estar beneficiando los habitantes de siete localidades de Bogotá, que sería por donde circula la actual vía férrea. Adicionalmente, se estaría solucionando, parcialmente, el problema de la falta de información geotécnica que hay en el tramo seleccionado, lo que determina que se construiría una fuente de referencia para el análisis del tramo restante. Al final, este proyecto sugiere que, continuar con los parámetros que se contemplaron en este informe, se pueda realizar este mismo estudio a lo largo del tramo restante para conocer la geotecnia básica de la línea férrea de la Sabana.

Finalmente, este proyecto podría servir como elemento articulador para la investigación en otras disciplinas de la ingeniería civil como la topografía, el diseño ferroviario o hidráulico, que permitirían desarrollar fuentes de información adicionales para la implementación del metro ligero en la existente línea del tren de la Sabana.

## **Capítulo 1: Marcos de referencia**

Este primer capítulo está destinado a brindar toda la información relevante que requiere conocer un ingeniero civil a la hora de ejecutar cualquier obra civil. Cabe resaltar que en esta ocasión la información corresponde al sitio donde se tiene pensando realizar el estudio, tanto en ubicación global como local. A lo largo de este capítulo se irá desarrollando información sobre el marco conceptual, marco teórico del proyecto, estado del arte y marco legal, que funcionaran como elementos articuladores para el entendimiento del propósito de este proyecto.

### **Marco conceptual**

#### **Rieles**

Elemento metálico con forma determinada que permite el desplazamiento de las ruedas de los trenes o tranvías. Es de las partes fundamentales de las vías férreas para el soporte y guiado de los trenes. (LET, 2020)

#### **Traviesas o durmientes**

Es el elemento transversal al eje de la vía que permite mantener unidos a una distancia fija los dos rieles que conforman una vía férrea. Pueden ser en hormigón, madera o hierro. Además, son los encargados de transmitir las cargas al suelo. (Ferropedia, 2017)

#### **Balasto**

Piedra machacada que se usa en la explanación de la vía férrea y que tiene como finalidad sostener las traviesas y los rieles, por otra parte, permite absorber las cargas generadas por el tren y permite drenar el agua lluvia. (Ferropedia, 2017)

#### **Tren – tram**

Vehículo derivado del tranvía que permite el tránsito de varias rutas tanto rurales como urbanas, está destinado para uso en infraestructuras ferroviarias con velocidades máximas de 70km/h en ciudad y 100km/h en perímetros regionales. (Ferropedia, 2017)

### **Perfil estratigráfico**

Sección vertical a través de un terreno que me permite determinar los espesores, cantidades y características de las capas que se encuentran en la sucesión de una excavación. Permite determinar el comportamiento mecánico del terreno. (Pasotti, 2015)

### **Marco teórico**

#### **Aspectos geográficos**

El terreno geográfico en el cual se realizará el estudio de prefactibilidad geotécnica es en la ciudad de Bogotá – Colombia. La ciudad de Bogotá se ubica en las coordenadas 4°36'46'' N 74°04'14'' O. Pertenece a uno de los 32 departamentos del estado de Colombia. Esta ciudad se encuentra ubicada en el centro del país y pertenece a la región andina. Sus fronteras colindan con los departamentos del Meta y el Huila al sur y Cundinamarca al norte. Adicional a esto, esta ciudad tiene conexión con más de 19 pueblos que se encuentra cercanos a la ciudad. La extensión del territorio alcanza los 1775 km<sup>2</sup> de superficie y se encuentra dividido en 20 localidades 19 urbanas y una rural. (Martínez, 2012)

Por otro lado, la zona específica donde se realizará la investigación es en la localidad de Usaquén en el barrio Cedritos, en el norte de la ciudad entre calles 147 y 145 con avenida novena. Sus coordenadas geográficas son 4°43'24.68'' N 74°01'56.48'' O. Además, tiene conexión con las avenidas principales de la ciudad; la autopista norte, la carrera 7ma y la avenida novena, lo cual representa facilidad de conexión a cualquier punto de la ciudad. (Martínez, 2012)

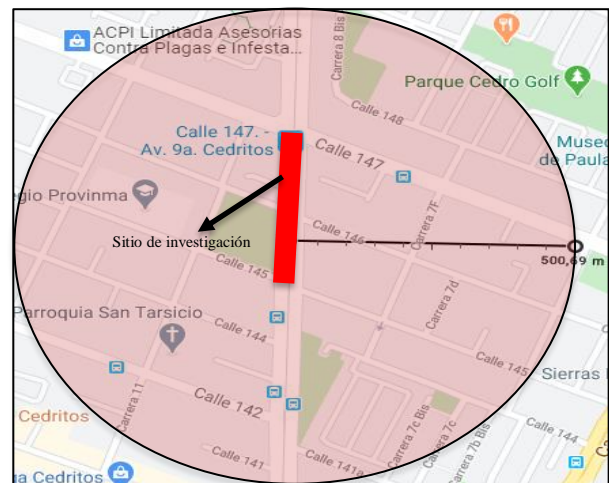
Figura 1: Ubicación geográfica de Bogotá. (Milenioscuro,2015)



Figura 2: Ubicación del estudio del proyecto. (Milenioscuro,2015)



Figura 3: Radio de estudio del proyecto. (Milenioscuro,2015)



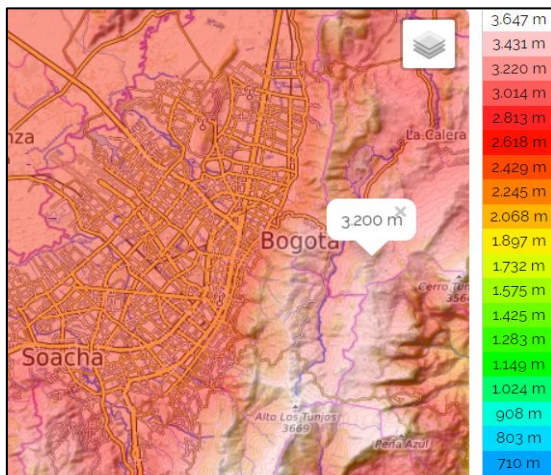
### Aspectos topográficos

Bogotá se encuentra dentro de la topografía colombiana denominada como la Sabana de Bogotá en el altiplano cundiboyacense, justo al lado de la cordillera oriental. Se caracteriza por tener una gran extensión de tierra plana al interior de la ciudad, aunque se entrecorta con algunos sectores con terrenos montañosos, que principalmente se ubican en los límites de la ciudad,

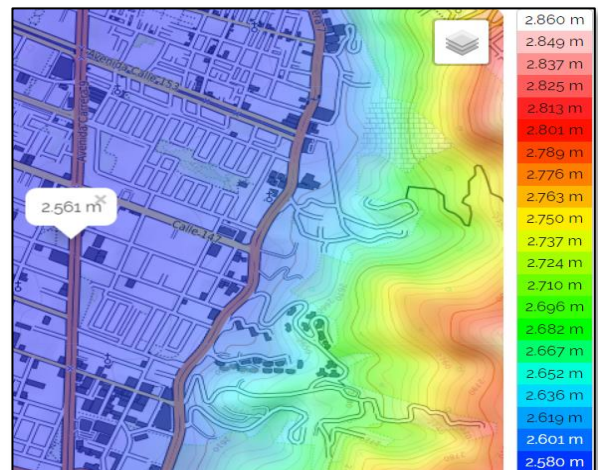
exceptuando la localidad rural. Su altitud varía entre los 2540 a 4000 m.s.n.m, sin embargo, la altura promedio de la ciudad es de 2640 m.s.n.m. (Bell, 2012)

El sector de Usaquén se caracteriza por ser una de las 20 localidades de Bogotá en tener su topografía dividida, por lo menos un 30% es montañoso con curvas de nivel que van desde 2.600 hasta los 2.800 m.s.n.m. Su otro 70% es plano, con curvas de nivel que no superan los 15 metros de diferencia. Es aquí, en su sector plano, donde está la gran mayoría de construcciones y donde pasa la línea férrea que va a ser evaluada. En la topografía del sector de investigación se puede observar que es de aproximadamente 2.560 m.s.n.m y que no presenta ninguna variación de altura para lo cual se puede considerar que es completamente plano. (Bell, 2012)

*Figura 4: Topografía de la ciudad de Bogotá (topografic-map, N/A)*



*Figura 5: Topografía del sector de investigación (topografic-map, N/A)*



### Aspectos hidrográficos

Se estima que alrededor de 200 cuerpos de agua se encuentran dentro de la ciudad de Bogotá y están conformados por quebradas, ríos, canales y humedales, lo cuales tiene la tarea de recibir la mayor cantidad de agua producto de la precipitación de la ciudad. La mayoría de estas fuentes

hídricas alimentan los ríos Tunjuelito, Fucha, y Juan Amarillo, estos tres ríos desembocan al río principal de la ciudad que es el río Bogotá. Adicionalmente, cuenta con una de las reservas naturales más grandes del país que permite captar la gran mayoría del agua que se usa en la ciudad. Bogotá se caracteriza por tener precipitaciones zonales, por lo que en algunos sitios llueve más que en los otros, pero se puede decir que la precipitación promedio anual es de la ciudad es de 866mm y su temperatura promedio es de 14 °C. (IDEAM, 2010)

Con respecto al sitio de investigación no se encuentra ningún cuerpo de agua circundante en la zona, todo se encuentra canalizado en el sistema de acueducto y alcantarillado. Sin embargo, y según cifras del instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM), la localidad de Usaquén se encuentra dentro de la zona donde la precipitación promedio anual es de 500 a 1000 mm. (IDEAM, 2010)

Figura 6: Gráfico de precipitación anual en Bogotá. (IDEAM, 2018)

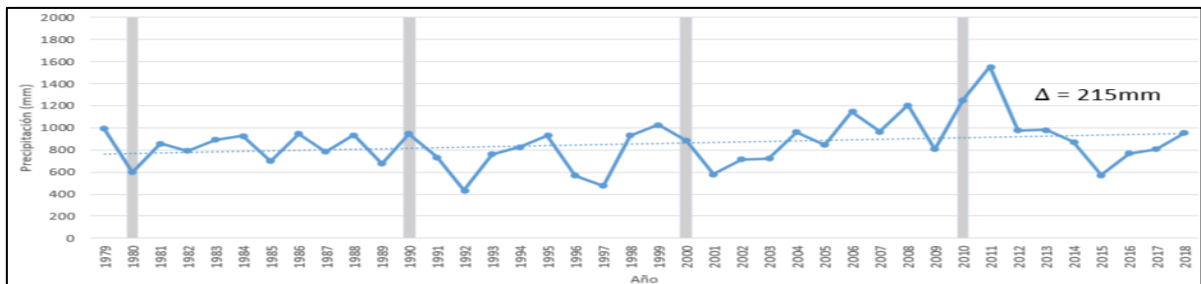


Figura 7: Gráfico de temperatura anual en Bogotá. (IDEAM, 2018)

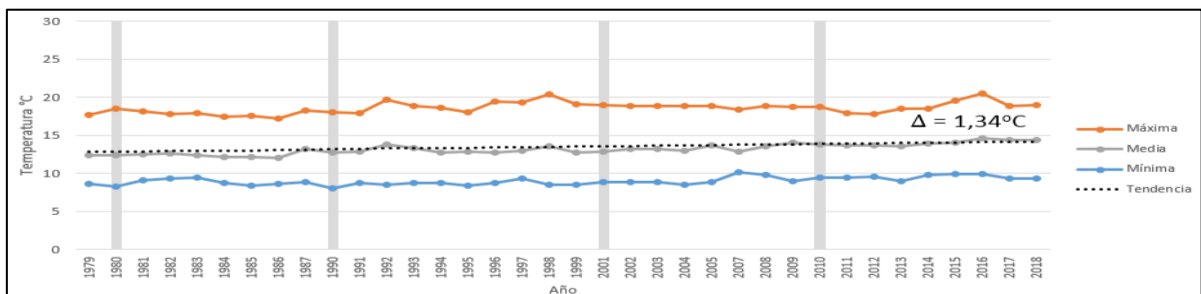
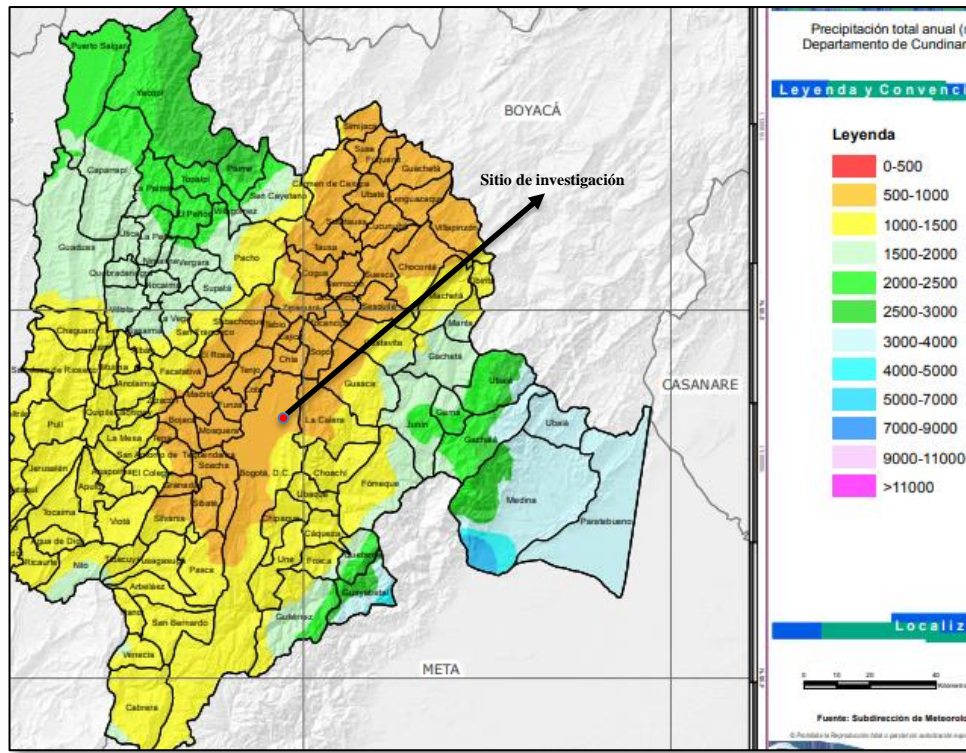


Figura 8: Distribución de la precipitación en Bogotá. (IDEAM, 2018)



### Aspectos Geológicos

La geología de la Bogotá está determinada en gran parte por tres tipos de zonas geológicas que son suelos lacustres, cerros y suelos aluviales. Las capas lacustres y aluviales se encuentran caracterizadas por ser depósitos con resistencias al corte muy bajas por el orden de 0.2 a 0.4 Kg/cm<sup>2</sup> además de estar conformadas por capas poco consolidadas de arcillas plásticas grises y verdes. Es importante mencionar que dentro del análisis geológico hay dos fallas significativas que atraviesan de occidente a oriente; la falla de San Cristóbal y la falla de Usaquén – Sasaima, lo que significa que la respuesta de sísmica de los suelos en los sectores de la falla puede ser más elevada. (Elena Corredor & Terraza Melo , 2015)

En una descripción más detallada de la geología del sector de investigación se encontró que, según el mapa geológico de Santafé de Bogotá del IGEOMINAS, en la carrera novena entre calles 147 y 145 el tipo de suelo que predomina es el tipo QCC que corresponde a COMPLEJO DE CONOS: “depósitos de flujos torrenciales de piedemonte oriental y conos del río Tunjuelito y de terreros” (INGEOMINAS, 1997).

Al ser la geotecnia el eje principal de este proyecto se realizó una descripción más detallada de la geología del sector de investigación, el resultado es el siguiente:

En los cortes que presenta el mapa geológico, con representación gráfica de aproximadamente 1000m por debajo de la rasante, la estratigrafía descrita en el sector corresponde a:

1. De 2.600m a 2.500m aprox: Qcc
2. De 2.500m a 2.300m aprox: Tqt + Qsu (F. tilata y F. Subchoque: complejo de arcillas, arenas y gravas.
3. De 2.300m a 1.750m aprox: Ktg (Formación guaduas: en la parte superior predominio de arcillolitas, con esporádicas intercalaciones de areniscas; intermedia, areniscas con intercalaciones de arcillolitas; en la base arcillolitas con intercalaciones delgadas de areniscas e importantes mantos de carbón).
4. De 1.750m a 1.600m aprox: Ksglt (Formación labor - tierna: areniscas de color gris claro, grano fino a grueso, con esporádicas intercalaciones de arcillolitas y limolitas silíceas).
5. De 1.600m a 1.500m aprox: Ksgp (Formación Plaeners: en la parte superior predominio de limolitas y arcillolitas silíceas; parte intermedia,



### **Amenaza sísmica**

Como se mencionó anteriormente la amenaza sísmica está determinada por las diferentes fallas geológicas presentes en la ciudad. La falla de Usaquén – Sasaima representa la mayor contribución a la amenaza sísmica en Bogotá. Según el título A de la norma sismo resistente de Colombia (NSR-10), Bogotá se encuentra catalogada como una ciudad con amenaza sísmica intermedia, adicional a esto la intensidad del sismo puede variar según el tipo de suelo de cada punto de la ciudad. (Alcaldía de Bogotá, 2010)

Con respecto a la zona de investigación del proyecto y según el mapa de microzonificación sísmica de Bogotá encontrado en la página web del IDIGER; en la carrera novena entre calles 147 y 145 la respuesta sísmica correspondiente al sector es LACUSTRE 100. Para lo cual y según el decreto 523 del 2010, que rige la respuesta sísmica de Bogotá, los coeficientes espectrales que le corresponden a este terreno son:

*Tabla 1: Coeficientes espectrales (Alcaldía de Bogotá, 2010)*

<b>Coeficiente espectral</b>	<b>Valor</b>
Fa (475)	1.30
Fv (475)	3.20
Tc (s)	1.58
Tl (s)	4.0
$A_0$ (g)	0.20

Figura 11: Curva de diseño para espectro estático. (Alcaldía de Bogotá, 2010)

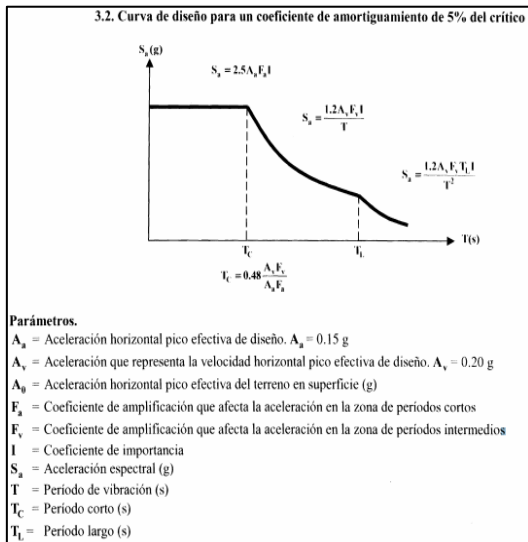
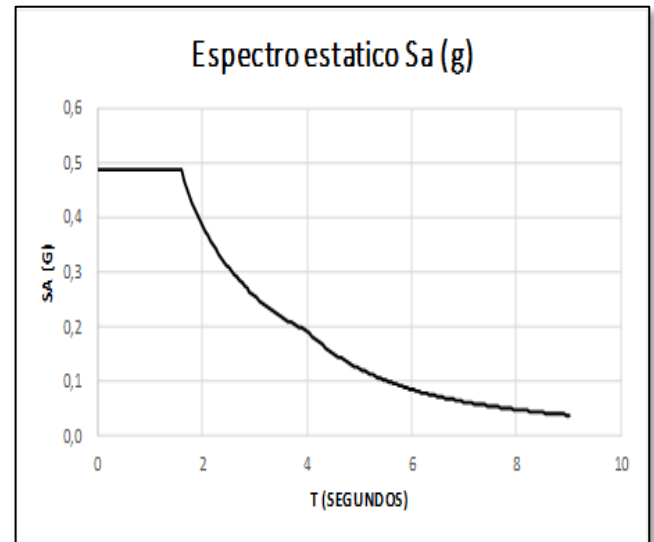


Figura 12: Espectro estático de zona de investigación. (Autoría propia, 2020)



### Aspectos de la población

De acuerdo con la última proyección del censo nacional de población y vivienda que realizó el departamento administrativo nacional de estadística (DANE) en el 2018, para el año 2020 serán aproximadamente 7.743.955 habitantes en la ciudad de Bogotá, con proyecciones de seguir aumentando la población en alrededor de 70.000 habitantes por año. Lo que convierte a Bogotá en la ciudad más poblada de Colombia. Adicionalmente, según cifras del DANE, de los casi ocho millones de habitantes en Bogotá aproximadamente 2.5 millones usan transporte público al día y alrededor de 1 millón usan vehículo propio. (DANE, 2020)

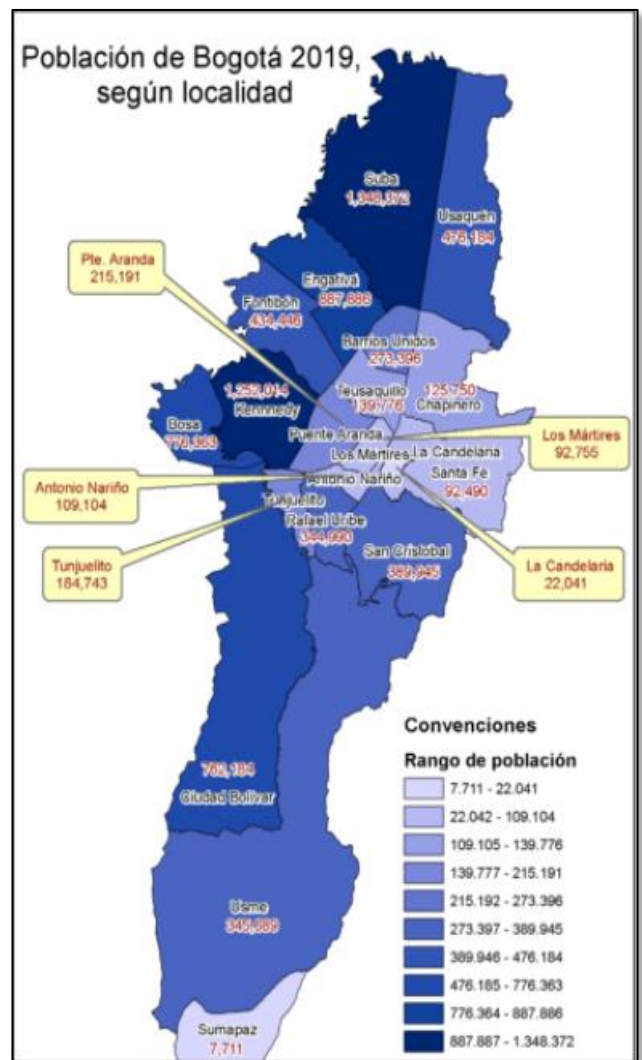
En esta primera instancia de aspectos de población únicamente se introduce el número aproximado de habitantes para la localidad donde se encuentra el punto de investigación, sin embargo, más adelante se profundizará en las cifras que se utilizarán para el desarrollo de este proyecto.

Puntualizando en la localidad de Usaquén donde se tiene pensado analizar el tramo de línea férrea, y según cifras de la secretaria distrital de planeación en Bogotá, la localidad de Usaquén es la quinta localidad más poblada con aproximadamente 556.542 habitantes en una porción de terreno de 65.31 Km<sup>2</sup> de superficie, siendo la segunda localidad más grande en superficie. Como dato adicional es la segunda localidad con menos densidad población; aproximadamente 8.5321,54 habitantes/ Km<sup>2</sup>. (Balanta, 2015)

Figura 13: Proyecciones de población por grupos quinquenales de edad para la localidad de Usaquén (Balanta, 2015)

2020			
Localidad	Edad	Hombres	Mujeres
Usaquén	0-4	13.335	12.631
Usaquén	5-9	14.047	13.244
Usaquén	10-14	14.983	14.143
Usaquén	15-19	15.136	15.609
Usaquén	20-24	16.742	17.479
Usaquén	25-29	17.259	18.056
Usaquén	30-34	17.368	18.443
Usaquén	35-39	17.520	20.692
Usaquén	40-44	16.806	19.832
Usaquén	45-49	15.127	17.988
Usaquén	50-54	14.452	17.741
Usaquén	55-59	13.958	17.770
Usaquén	60-64	11.850	15.804
Usaquén	65-69	9.169	12.709
Usaquén	70-74	6.685	9.670
Usaquén	75-79	4.136	6.389
Usaquén	80+	3.517	6.641

Figura 14: Mapa de la distribución de población en Bogotá (Balanta, 2015)



### **Estado del arte**

El apresurado incremento en la población de Bogotá ha traído innumerables problemas en los diferentes sectores de la economía local, entre estos el sistema de transporte público de la ciudad. El uso de los sistemas de transporte público hace parte del día a día de los habitantes y estar a la vanguardia del transporte determina la efectividad de los desplazamientos que requiere un individuo en su diario vivir. Es por esto que, desde hace aproximadamente 10 años las alcaldías locales vienen invirtiendo en el mejoramiento de la flota de buses para uso público haciéndolos más confortables y contribuyendo a la mejora de la calidad del aire, esto se ha hecho conocer por los planes de trabajo de cada uno de los alcaldes que ha habido desde entonces. (Jolonch, 2013)

Por otro lado, dentro de los planes de desarrollo para la movilidad en Bogotá la contemplación de un sistema de transporte férreo ha sido escaso, tanto así que hasta hace dos años (2018), y después de incontables estudios, se logró llegar al consenso que la ciudad de Bogotá necesitaba de carácter urgente un sistema de líneas férreas para poder solventar las necesidades del deficiente sistemas de transporte público actual y así es como se concreta la primera línea de metro para la ciudad. Paralelamente al consenso de construir un metro dentro de la ciudad, se proponía un sistema de tren regional que pudiese conectar la ciudad de Bogotá con los municipios cercanos al sur occidente. Hasta el momento son las dos únicas propuestas que existen en materia de vía férrea para el tránsito de pasajeros. Por esta razón es que la existencia de documentos sobre líneas férreas en Bogotá se limita a trabajos de grados y tesis de investigadores que analizan la posibilidad de extender las vías férreas en toda la ciudad. (Moller, 2010)

Lo que se alcanza a recolectar en materia de referencia proviene de diferentes trabajos de investigadores que propone alternativas de transporte para mejorar la movilidad en Bogotá y en algunos casos contemplan reestructurar la actual vía férrea de la Sabana, que funciona para el transporte de carga y atracción turística. Por lo tanto, se puede partir de la información recolectada por los investigadores que han adelantado investigaciones sobre; proponer un sistema de transporte masivo en la línea férrea de la Sabana, añadir a la información existente un modelo geotécnico que permita determinar la aceptación del terreno para poder proponer el sistema de transporte de tren liviano, y no solo en una dirección como lo es ahorita, sino que sea bidireccional. (MARÍN, 2013)

Después de sintetizar la información que se recolectó en repositorios universitarios e instituciones públicas de Bogotá sobre adelantos en materia férrea en la ciudad, se considera que la información existente es escasa y no demuestra que en la actual vía férrea de la Sabana se pueda reformar para construir un sistema de transporte férreo bidireccional. Por otro lado, si existe conocimiento sobre qué; la agencia nacional de infraestructura invertirá cerca de 208.000 millones de pesos para la rehabilitación de la vía férrea de la Sabana al interior de la ciudad. (MARÍN, 2013)

A partir de aquí es la iniciativa de este proyecto, el poder reforzar lo que se desconoce sobre la vía férrea de la Sabana y el por qué no se ha utilizado este terreno para mejorar el sistema de transporte en la ciudad, si es que su extensión de casi 28 km al interior de la ciudad se pueden destinar para mejorar la conexiones, inclusive facilitar la movilidad a los municipios cercanos de la ciudad que se encuentra a la salida por el norte de la capital.

### **Marco normativo y legal**

- Manual de normatividad férrea parte 1: Definición de aspectos técnicos de diseño construcción, operación, control y seguridad. Ministerio de transporte de Colombia. 2013
- Norma AREMA (American Railway Engineering and Maintenance of Way Association)
- Normas UIC (Union Internationale des Chemins de Fer)
- Norma colombiana de diseño de puentes CCP 2014 sección 10.

En la actualidad, en Colombia la normativa y legislaciones son muy reducidas en materia ferroviaria, no se tiene regulaciones nacionales que determinen el desarrollo y construcción de las vías férreas. Sin embargo, para términos prácticos se usará la normativa más reciente en Colombia que es el manual de normatividad férrea del ministerio de transporte de Colombia del 2013, que viene siendo el manual más completo para el diseño y construcción que hay en Colombia.

Por otro lado, se usarán como guías las normativas internacionales AREMA y UIC que estandarizan tanto los procesos constructivos como los procesos de diseño para la construcción de estructuras férreas y materiales de construcción. Además, que son las que adoptan la mayoría de países que tienen sistemas ferroviarios en sus territorios. Se incluye la norma colombiana de diseño de puentes CCPP14, con el fin de tener referencias en materia de construcción de cimentaciones en Colombia.

## Capítulo 2: Metodología

En este capítulo se encontrará todo el proceso metodológico que se planteó para realizar efectivamente la investigación. Además, se encontrará información que evidencia las acciones y los procedimientos que serán necesarios para conseguir el resultado de los objetivos planteados.

El desarrollo efectivo de este proyecto consistirá en realizar la investigación y aplicación de conceptos geotécnicos, junto a un análisis de viabilidad tanto constructivo como económico. Para cumplir con la precisión que requiere la meta de este proyecto es necesario que cada uno de los pasos listados sea realizado con un alto nivel de precisión. De esta forma se garantizará que el resultado obtenido se lo más cercano a la realidad.

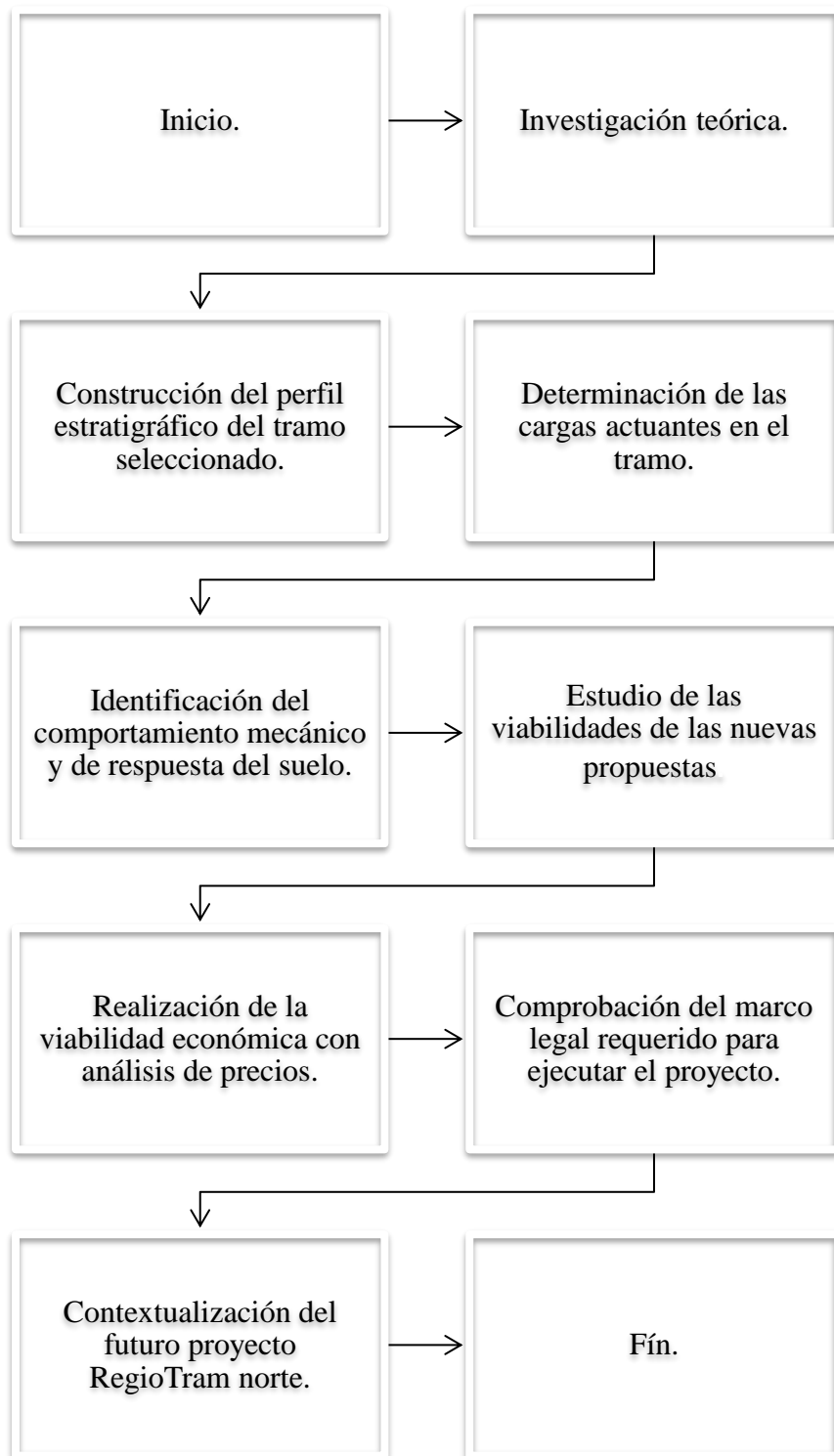
*Tabla 2: Diseño metodológico (Autoría propia)*

<b>Objetivo</b>	<b>Actividad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Actores</b>
<b>Construir perfil estratigráfico</b>	Buscar los estudios de suelos de los proyectos que se encuentren en el perímetro del tramo.	Construir el perfil estratigráfico a partir de estudios de suelos cercanos al área.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Curadurías</li> <li>✓ Alcaldía de Usaquén</li> <li>✓ Administradores de los proyectos cercanos.</li> </ul>
<b>Determinar y clasificar las cargas actuantes</b>	Realizar la investigación de las características de todos los materiales que aportan carga al tramo.	Utilizar las revistas de construcción para determinar las especificaciones de los elementos que le aportan carga al tramo, para determinar la carga total actuante.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Revistas de construcción.</li> <li>✓ Normatividad local e internacional</li> </ul>
<b>Análisis del comportamiento mecánico y de respuesta del suelo</b>	Identificar la respuesta del suelo con la carga actual. Identificar la respuesta del suelo con una línea férrea de pasajeros. Identificar la respuesta del suelo	Analizar el comportamiento del suelo con las cargas actuales y las futuras, con dos nuevas posibilidades.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Programas de modelación de elementos finitos. Phase 2 o Settle 3D.</li> </ul>

	con un nuevo diseño de línea ferra para pasajeros de doble sentido.		
<b>Análisis de la viabilidad del nuevo proyecto con las dos nuevas propuestas</b>	Identificar los factores que interviene a la hora de escoger alguna de las dos propuestas y evidenciar cuál de las dos funciona, con respecto a la respuesta que del suelo y las necesidades de la comunidad.	Se requiere conocer la viabilidad del nuevo proyecto con las dos alternativas. Mirar la respuesta de las condiciones del suelo y de no existir respuesta favorable proponer una alternativa viable con base a las dos nuevas alternativas	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Programas de modelación de elementos finitos. Phase 2 o Settle 3D.</li> </ul>
<b>Análisis de la viabilidad económica del proyecto</b>	Planteamiento de un esquema universal para la construcción de vías ferroviarias, y análisis de precios para los elementos requeridos de las alternativas.	Se pretende construir una propuesta de costos de acuerdo a los lineamientos que se están utilizando en el mundo para la construcción de vías ferroviarias, y que tenga conexión con lo que se desarrollará en Bogotá en materia ferroviaria.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Revistas de costos Construdata</li> <li>✓ Listado de precios del INVIAS y IDR.</li> <li>✓ Listado de precios de distribuidores internacionales.</li> </ul>
<b>Análisis de la viabilidad legal del proyecto</b>	Verificar la propiedad de los terrenos de la actual línea férrea. Identificar los permisos requeridos para hacer uso de la línea férrea. Indagar las razones del por qué no se han usado esas líneas ferras antiguamente.	Con el ánimo de identificar todos los aspectos legales que con llevaría realizar este proyecto, se cree pertinente analizar el marco legal y de antecedentes para poder justificar el desarrollo de este proyecto de manera precisa.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Base de datos de la alcaldía de Bogotá.</li> <li>✓ Base de datos de catastro.</li> </ul>

### Capítulo 3: Flujograma de actividades

Figura 15: Flujograma de actividades (Autoría propia)





## **Capítulo 5: Construcción del perfil estratigráfico**

Este capítulo está destinado para la elaboración e interpretación del perfil estratigráfico que corresponde, aproximadamente, al perfil estratigráfico que se encuentra debajo del tramo de emplazamiento de la vía férrea seleccionada para este proyecto. De esta forma se elaboró una base de datos alimentada por información ofrecida por los estudios de suelos de los edificios que se encuentra cercanos al tramo. Así pues, este capítulo contiene la información necesaria para estimar un perfil estratigráfico y contiene la descripción de: Georreferenciación de los sondeos incluidos en la base de datos, elaboración del cuadro de datos con la información recolectada de los estudios de suelos, ensayos geotécnicos elaborados in situ, gráficos de interpretación de datos, perfil estratigráfico visual y perfil estratigráfico estimado final.

Cabe aclarar que, para la elaboración del perfil estratigráfico, para el desarrollo de este proyecto, proviene de estudios de suelos realizados en años anteriores, con el fin de entregar los diseños de cimentación para edificios de vivienda familiar y están sujetos a verificación posterior dado el caso de seguir con la línea de investigación. Se hace una estimación de la geotecnia del tramo con un radio aproximado de 170 m a la redonda y se parte de la premisa que esa circunferencia de 170 m es geotécnicamente homogénea. De esta forma los resultados obtenidos son los siguientes:

### **Ubicación geográfica georreferenciada**

El propósito de la georreferenciación de este proyecto es para que en futuros diseños exista un precedente de las coordenadas geográficas del tramo seleccionado, además permite la fácil ubicación de las personas que deseen ubicar la zona que fue estudiada en este proyecto. De esta forma se utilizó la base de datos de la infraestructura de datos espaciales de Bogotá (IDECA) y

se hizo un rastreo de los sondeos realizados y del tramo de investigación con el fin de construir una tabla con los datos de latitud y longitud que permitan el fácil acceso a la información de análisis, es importante conocer que la información obtenida corresponde al sistema de coordenadas Magna sirgas geográficas y que los datos están sujetos a verificación por un especialista en georreferenciación. La información que se obtuvo es la siguiente:

Figura 16: Mapa de georreferenciación (IDECA Alcaldía de Bogotá, 2020)



Tabla 4: Datos de georreferenciación (Autoría propia)

No	PROYECTO	SONDEOS	LATITUD	LONGITUD
1	Carrera 11 # 146-91	SONDEO 1	4,725111	-74,033427
		SONDEO 2	4,725319	-74,033448
		SONDEO 3	4,725398	-74,033201
		SONDEO 4	4,725635	-74,033301
2	Calle 146 # 7F - 80	SONDEO 1	4,723975	-74,031391
		SONDEO 2	4,723928	-74,031514
		SONDEO 3	4,723798	-74,031564
		SONDEO 4	4,723702	-74,031455
3	Tramo de análisis	Arista NW	4,725349	-74,032341
		Arista NE	4,725319	-74,032240
		Arista SW	4,722671	-74,032424
		Arista SE	4,722649	-74,032320

En Figura 16 se puede observar un pantallazo de IDECA en la página web de la alcaldía de Bogotá, como se puede observar hay ubicados ocho sondeos y cuatro aristas del tramo de investigación que están plenamente georreferenciado, como se dijo antes, en la tabla 4. Los sondeos que se evidencia en la anterior tabla corresponden a dos estudios de suelos que fueron facilitados para la elaboración de este proyecto. La ubicación espacial de los dos estudios de suelos y el tramo de línea férrea se encuentra delimitados por el radio de análisis que se planteó anteriormente correspondiente a 170 m.

### **Base de datos de los sondeos utilizados**

Como el propósito de este capítulo es hacer una estimación para un perfil estratigráfico, no se realizaron estudios de suelos del tramo seleccionado, sino que, con el fin de reducir costos en esta investigación, se decide hacer la construcción de una base de datos provenientes de estudios de suelos cercanos al tramo. Así pues, se solicitó formalmente los estudios de suelos que se realizaron para la construcción de los proyectos, a las administraciones de dos edificios de

vivienda familiar cercanos al tramo. Estos estudios de suelos están elaborados de acuerdo con la normativa nacional de Colombia: Norma sismo resistente NSR-10 titulo H sección H.3.2 que describe como deben realizarse los sondeos para cada nivel de construcción y constituyen una fuente confiable para construir el perfil estratigráfico estimado del tramo. De esta forma los datos son los siguientes:

*Tabla 5: Base de datos de los Sondeos (Autoría propia)*

LOCALIZACIÓN	SONDEO	MUESTRA	PROFUNDIDAD			ESTRATO
No	SONDEO	MUESTRA	INICIO	FIN	MEDIA	ESTRATO
1	SONDEO 1	1	1,4	1,9	1,65	3
1	SONDEO 1	2	2,4	2,9	2,65	4
1	SONDEO 1	4	6	6,5	6,25	5
1	SONDEO 1	10	19,6	20,1	19,85	6
1	SONDEO 2	5	9,2	9,7	9,45	6
1	SONDEO 2	8	17	17,5	17,25	6
1	SONDEO 3	3	3,6	4,1	3,85	5
1	SONDEO 3	7	13,6	14,1	13,85	6
1	SONDEO 3	11	24,1	24,6	24,35	6
1	SONDEO 4	3	4,8	5,3	5,05	5
2	SONDEO 1	5	4,5	5	4,75	4
2	SONDEO 1	9	12,5	13	12,75	5
2	SONDEO 1	15	24,5	25	24,75	7
2	SONDEO 1	21	36,5	37	36,75	8
2	SONDEO 2	3	2	2,5	2,25	3
2	SONDEO 4	6	6,5	7	6,75	4

CLASIFICACIÓN					qu				
USCS	WN	LL	LP	IP	w%4	$\gamma_t$ (kn/m <sup>3</sup> )	qu (kpa)	Cu(kpa)	E(kpa)
MH	67,0%	88,7%	60,0%	28,7%	67,0%	15,608	75,511	37,756	2801,900
CH	29,1%	45,2%	30,8%	14,4%	29,1%	18,442	94,144	47,072	497,724
CH	71,2%	92,3%	29,3%	63,0%	71,2%	16,608	36,285	18,142	1279,128
CH	73,0%	85,1%	28,5%	56,6%	73,0%	16,000	41,188	20,594	1337,270
CH	74,5%	104,7%	33,4%	71,3%	74,5%	16,383	37,265	18,633	1279,128
MH	95,4%	105,5%	53,4%	52,1%	95,4%	13,028	28,439	14,220	623,544
CL	25,0%	36,1%	20,4%	15,7%	25,0%	14,391	56,879	28,439	1716,164
CH	70,2%	88,6%	30,5%	58,1%	70,2%	15,990	38,246	19,123	1885,894
CH	65,2%	98,8%	35,5%	63,3%	65,2%	14,323	21,575	10,787	754,358
CH	62,8%	98,2%	32,2%	66,0%	62,8%	16,157	50,014	25,007	817,221
CH	100,4%	165,3%	48,1%	117,2%	100,4%	13,420	58,840	29,420	1902,783
MH	141,8%	187,7%	54,5%	133,2%	141,8%	-	-	-	-
CH	86,4%	121,3%	35,1%	86,2%	86,4%	14,744	42,169	21,084	1756,415
CH	41,7%	63,3%	31,1%	32,2%	41,7%	17,109	132,390	66,195	7485,992
CH	96,2%	115,3%	36,8%	78,4%	96,2%	8,123	44,130	22,065	2415,071
CH	118,2%	150,0%	43,5%	106,5%	118,2%	13,871	35,304	17,652	1024,575

CONSOLIDACIÓN							PESO UNITARIO	
Gs	$\gamma_t$ (kn/m <sup>3</sup> ) <sub>3</sub>	w%2	e0	Cc	consolidación	Cr	$\gamma_t$ (kn/m <sup>3</sup> ) <sub>4</sub>	$\gamma_d$ (kn/m <sup>3</sup> ) <sub>42</sub>
-	-	-	-	-	-	-	18,600	15,608
-	-	-	-	-	-	-	18,443	14,323
-	-	-	-	-	-	-	16,608	9,702
-	-	-	-	-	-	-	16,000	15,264
-	-	-	-	-	-	-	16,383	9,388
-	-	-	-	-	-	-	13,028	6,671
-	-	-	-	-	-	-	14,391	11,478
-	-	-	-	-	-	-	15,990	9,418
-	-	-	-	-	-	-	14,323	8,672
-	-	-	-	-	-	-	16,157	9,928
-	-	-	-	-	-	-	13,420	6,700
2,33	12,027	141,8	3,304	1,36	0,55	0,745	-	-
-	-	-	-	-	-	-	14,744	7,907
-	-	-	-	-	-	-	17,109	12,076
-	-	-	-	-	-	-	14,470	8,123
-	-	-	-	-	-	-	13,871	6,357

En la tabla 5 se pueden observar la compilación de los datos extraídos de los estudios de suelos de las empresas José William Guerrero P consultoría y construcciones y Espinosa & Restrepo ingeniería de suelos, empresas constituidas legalmente en Bogotá – Colombia que operan en el sector de la exploración y estudios de suelos. Estas dos empresas realizaron la exploración de los terrenos 1 y 2, respectivamente, y se extrajeron los siguientes datos, que se consideran pertinentes para el posterior análisis mecánico del suelo; Profundidad, estrato, Clasificación con los límites de Attenberg, Capacidad ultima, Parámetros de consolidación y pesos unitarios. El resultado de los datos finales es proveniente de los ensayos de compresión inconfiada y límites de consistencia y se clasificaron en el orden que se evidencia en la tabla para su posterior interpretación.

### **Ensayos elaborados in situ**

Dentro de la recolección de los datos que se encontraban en los estudios de suelos se pudo evidenciar la elaboración de dos ensayos geotécnicos in situ que son los de resistencia al corte con veleta de campo y el ensayo de penetrómetro. Estos ensayos son importantes mencionarlos dentro del análisis puesto que hacen parte de la justificación de la información de la base de datos. Para este proyecto, el ensayo in situ, de resistencia al corte con veleta de campo sirve para rectificar lo hallado en el laboratorio con respecto a coeficiente de uniformidad. Lo anterior sirvió como elemento de verificación de los datos del laboratorio, puesto que al contrastarlos se evidencia que efectivamente los datos coinciden y sirven para relacionar los dos estudios de suelos (esto se podrá ver reflejado en el análisis de gráficos). Los datos son los siguientes:

Tabla 6: Valores de los ensayos de resistencia al corte con veleta de campo (Autoría propia)

TERRENO 1 SONDEO 1		TERRENO 1 SONDEO 2		TERRENO 1 SONDEO 3		TERRENO 1 SONDEO 4	
Profundidad	Sv (Kpa)	Profundidad	Sv (Kpa)	Profundidad	Sv (Kpa)	Profundidad	Sv (Kpa)
1,6	50,995	1,2	49,033	1,6	37,265	1,4	49,03325
2	47,072	1,6	47,072	2	47,072	1,8	47,07192
2,4	47,072	2	31,381	2,6	45,111	2,2	41,18793
2,6	29,420	2,2	29,420	3	23,536	2,6	43,14926
3	27,459	2,4	27,459	3,4	25,497	3	41,18793
3,4	25,497	2,8	29,420	3,8	25,497	3,4	31,38128
6,1	25,497	3,2	29,420	4,2	27,459	3,8	33,34261
6,5	23,536	5	25,497	4,6	27,459	5	25,49729
6,9	21,575	5,4	23,536	5	25,497	5,4	23,53596
8	21,575	5,8	21,575	5,4	21,575	5,8	21,57463
8,4	21,575	6,2	25,497	6,6	21,575	6,2	23,53596
8,8	23,536	8	17,652	7	25,497	7,8	17,65197
9,2	17,652	8,4	25,497	7,4	23,536	8,2	25,49729
11,6	21,575	8,8	21,575	7,8	25,497	8,6	21,57463
12	19,613	9,2	21,575	8,8	19,613	9	21,57463
12,4	17,652	10	20,594	9,2	17,652	11	25,49729
14	15,691	10,4	17,652	9,6	17,652	11,4	23,53596
14,4	17,652	10,8	21,575	11	17,652	11,8	23,53596
14,8	19,613	11,2	17,652	11,4	21,575	14	23,53596
15,2	21,575	11,6	21,575	11,8	19,613	14,4	23,53596
16	21,575	12	23,536	12,2	23,536	14,8	21,57463
16,4	19,613	12,4	17,652	12,4	21,575	15,2	21,57463
16,8	15,691	12,8	21,575	12,8	21,575		
17,2	17,652	13,8	23,536	13,2	23,536		
		14,2	21,575	14	23,536		
		14,6	19,613	14,4	21,575		
		17	21,575	14,8	21,575		
		17,4	17,652	15,5	17,652		
		17,8	19,613	17,8	23,536		
		18,2	17,652	18,2	21,575		
		18,6	23,536	18,6	23,536		
		19	21,575	19	23,536		
		19,4	21,575				
		19,8	17,652				

Tabla 7: Valores del ensayo de penetrómetro (Autoría propia)

TERRENO 2 SONDEO 1		TERRENO 2 SONDEO 2		TERRENO 2 SONDEO 3		TERRENO 2 SONDEO 4	
Profundidad	Penetro- metro (Kpa)	Profundidad	Penetro- metro (Kpa)	Profundidad	Penetro- metro (Kpa)	Profundidad	Penetro- metro (Kpa)
2	147,100	1,8	49,033	2,8	24,517	2	49,033
3	24,517	3,5	49,033	4,5	24,517	3	49,033
4	24,517	6,5	24,517	8,5	24,517	4	24,517
5	19,613	8,5	24,517	10	24,517	6	24,517
6	24,517	10	24,517			7	24,517
8	53,937					9	24,517
12	9,807					11	24,517
14	8,826					13	24,517
16	24,517					15	24,517
18	24,517					17	49,033
19	49,033					19	24,517
21	24,517					21	49,033
23	24,517					23	73,550
25	24,517					25	49,033
27	29,420						
29	49,033						
31	49,033						
33	49,033						
35	49,033						
37	49,033						
39	24,517						
40	24,517						

## Ensayos de SPT

Solo en uno de los dos estudios de suelos se encontró información con respecto a ensayos de SPT, la razón se desconoce, pero para este proyecto se considera útil usar todos los datos que provenga de los estudios de suelos. De esta manera, se recogió la información de los ensayos de SPT del terreno 2 con el fin de que en el capítulo de análisis mecánico se apliquen las correlaciones existentes para determinar aspectos como compacidad, resistencia y deformabilidad. Se encontró lo siguiente:

*Tabla 8: Valores del ensayo de SPT (Autoría propia)*

<b>TERRENO 2 SONDEO 1</b>				
<b>Profundidad</b>	<b>SPT</b>			<b>N45 golpes de campo</b>
	<b>15 cm</b>	<b>15 cm</b>	<b>15 cm</b>	
2	3	2	2	4
4	1	1	2	3
6	1	1	1	2
11	0	0,08	1	1,083
15	1	2	1	3
18	3	3	4	7
22	2	1	1	2
27	2	2	2	4
30	2	3	2	5
35	3	2	2	4
38	1	2	1	3

**TERRENO 2  
SONDEO 2**

Profundidad	SPT			N45 golpes de campo
	15 cm	15 cm	15 cm	
1	1	1	1	2
2	2	2	2	4
6,5	1	1	1	2

**TERRENO 2  
SONDEO 3**

Profundidad	SPT			N45 golpes de campo
	15 cm	15 cm	15 cm	
3	1	1	2	3
6,5	0	0	0,056	0,056
10	1	1	1	2

**TERRENO 2  
SONDEO 4**

Profundidad	SPT			N45 golpes de campo
	15 cm	15 cm	15 cm	
2	3	3	2	5
3	2	3	2	5
5	1	2	1	3
6	1	2	1	3
7	2	2	1	3
13	1	1	1	2
16	1	1	1	2
20	1	1	2	3
25	2	2	1	3

Donde:

<b>Cohesivos (consistencia)</b>		
Muy blanda	0	2
Blanda	2	4
Medio Blanda	4	8
Firme	8	15
Muy Firme	15	30
Dura	30	45
Muy Dura	45	

<b>Granulares (Compacidad)</b>		
Muy suelta	1	4
Suelta	4	10
Medio suelta	10	20
Medio densa	20	30
Densa	30	50
Muy densa	50	

### **Gráficos de interpretación de datos**

Para la interpretación de los datos se creyó conveniente realizar gráficos que representaran la información de forma esquemática con el fin de identificar las tendencias y los patrones de comportamiento de los datos extraídos de la base de datos. De esta forma para todos los datos que se encuentra en la tabla 4 se les realizó un gráfico que relacionaba el factor de análisis con respecto a la profundidad. Además, que es una forma eficiente de sintetizar la información y realizar conclusiones con respecto a la información mostrada. Así pues, el resultado de todos los gráficos es el siguiente:

Figura 17: Gráficos de clasificación del suelo (Autoría propia)

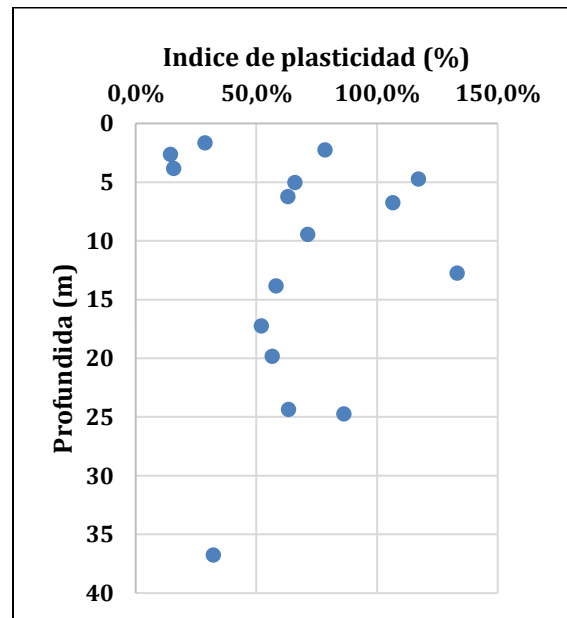
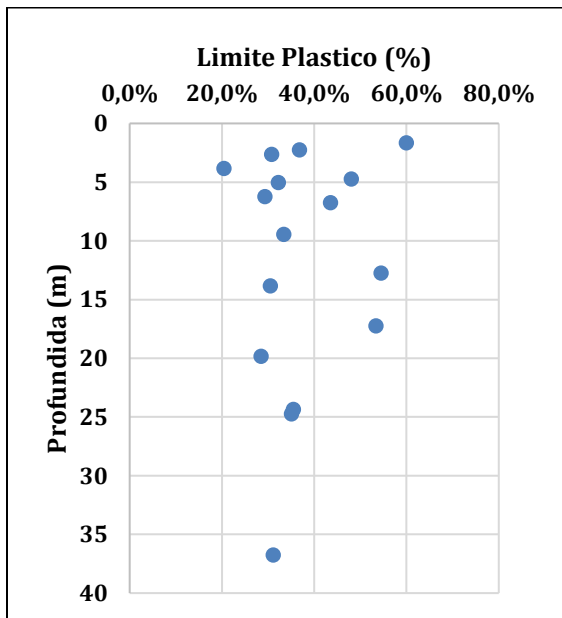
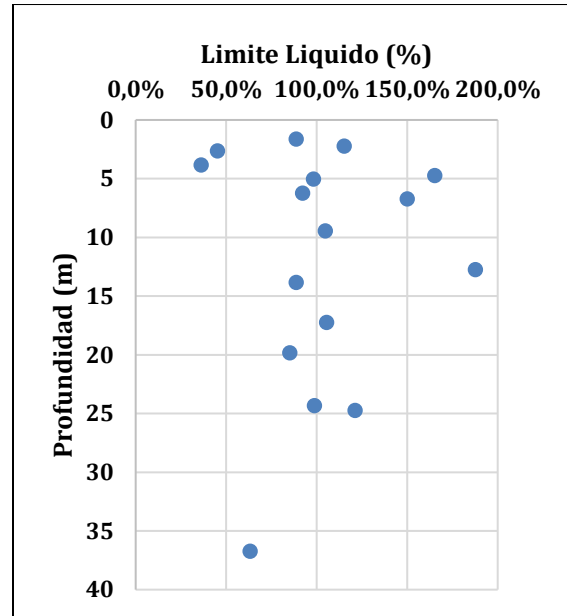
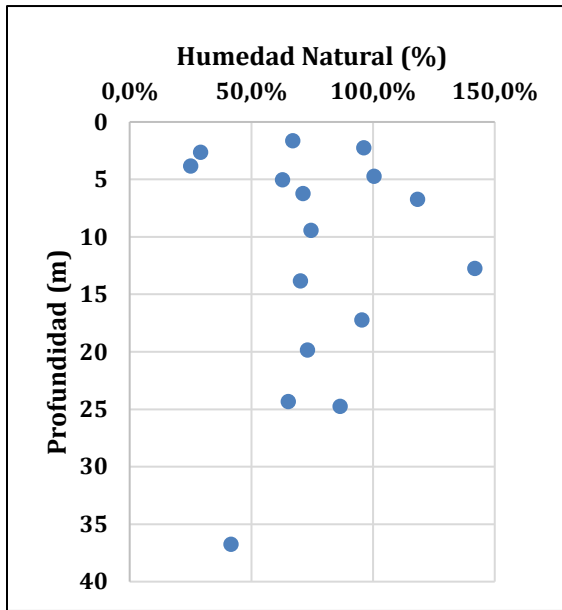


Figura 18: Gráficos de capacidad ultima (Autoría propia)

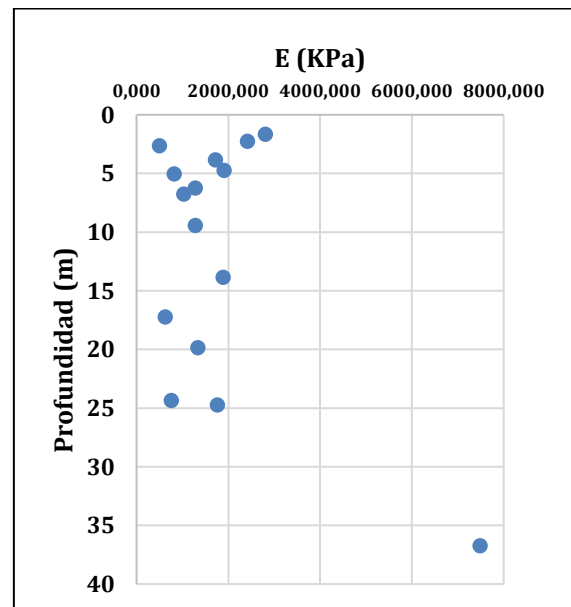
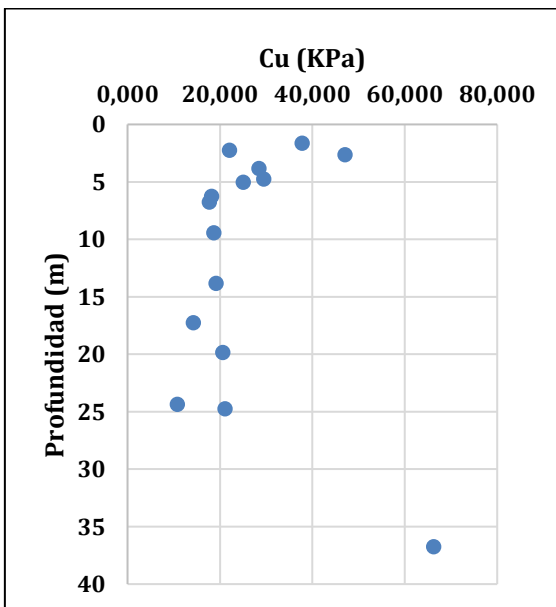
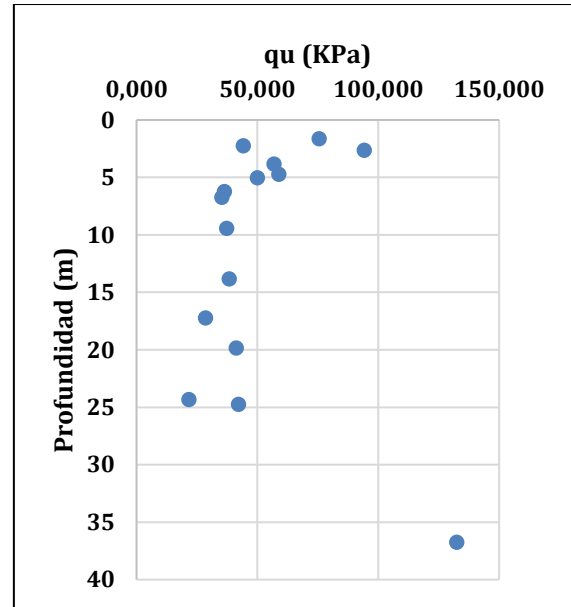
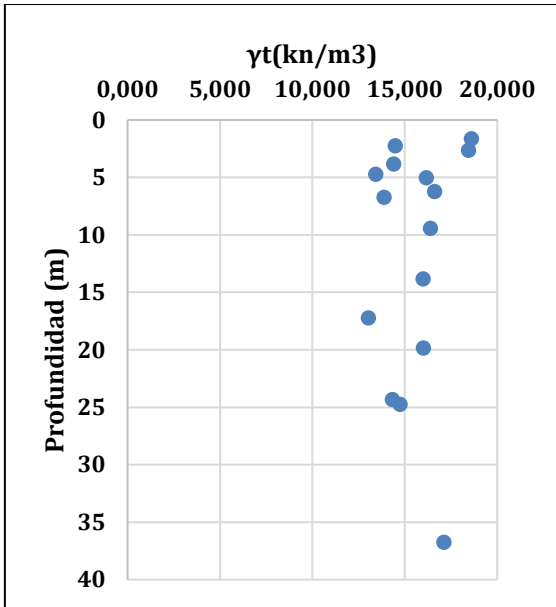
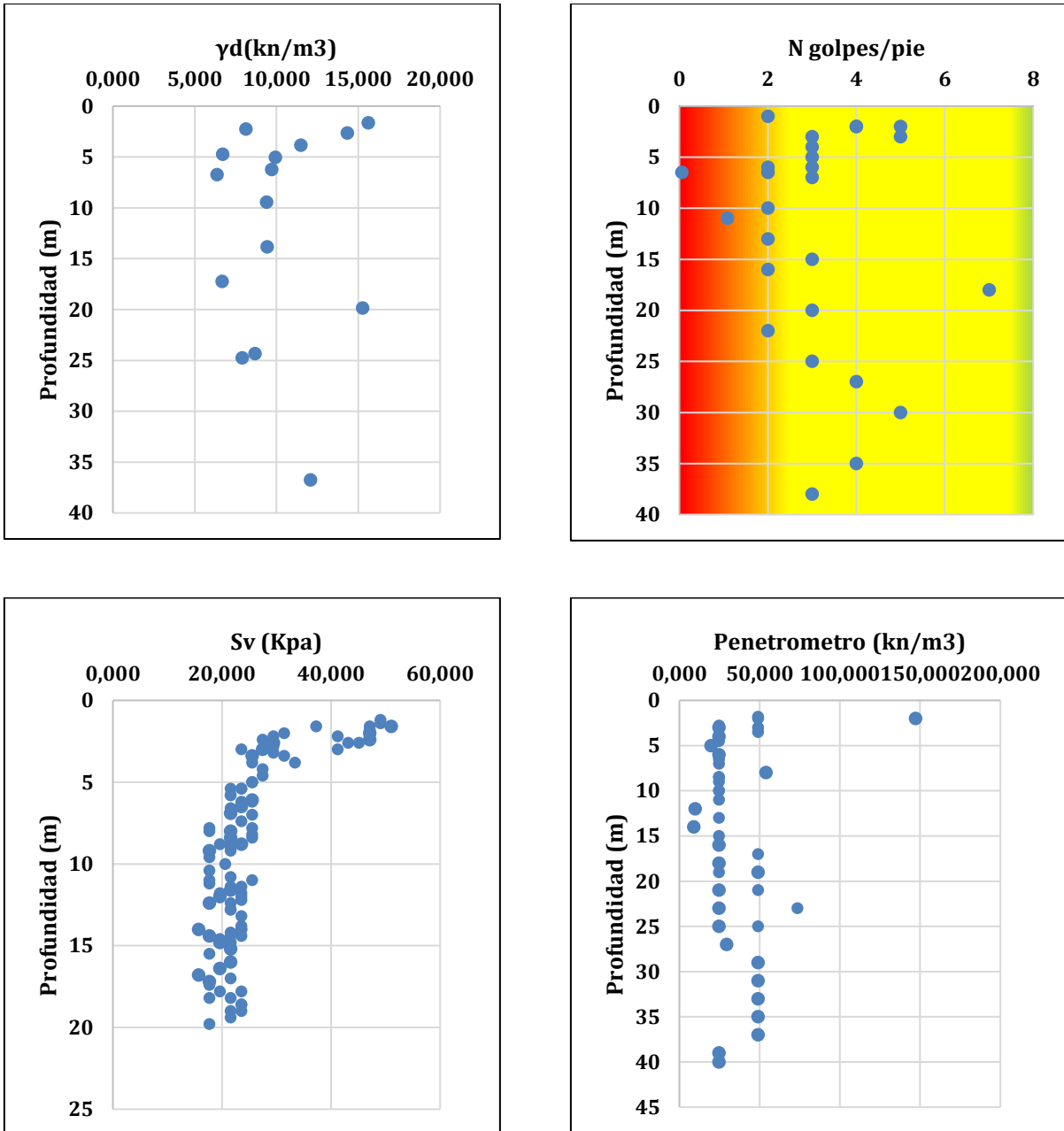


Figura 19: Gráficos de pesos unitarios, SPT, ensayo de veleta y penetrómetro (Autoría Propia)



Los 13 gráficos anteriores representan de forma esquemática y sintetizada los datos recolectados en la tabla 4 y se puede ver el comportamiento del compilado de los ocho sondeos y de cómo el suelo va variando según su profundidad, con esto se puede deducir lo siguiente:

- En la figura 17 se presentan cuatro gráficos correspondientes al comportamiento de los límites de consistencia de las muestras extraídas de los ocho sondeos; se encuentra la interpretación de humedad natural, límite líquido, límite plástico y índice de plasticidad vs la profundidad. Esta información permite caracterizar el comportamiento del tipo de suelo. Dentro del análisis de los cuatro gráficos se evidencia que hay una variación significativa en los primeros cinco metros, no representa una información concluyente pues se encuentran suelos con contenidos de agua desde el 20% hasta el 100%, lo que puede significar presencia de diferentes suelos. Sin embargo, de los cinco metros para abajo se empieza a reflejar una consistencia mayor en los datos y se puede traducir a que pasa de ser un suelo heterogéneo a uno homogéneo, ya que solo se ve una variación en el contenido de agua del 15% a medida que se vuelve más profundo.
- En la figura 18 se presenta cuatro gráficos correspondientes al comportamiento del suelo con respecto a su capacidad última. De las muestras extraídas de los ocho sondeos; se encuentra la interpretación de: Peso unitario total, capacidad última, coeficiente de uniformidad y el módulo de elasticidad vs profundidad. Dentro de los primeros seis metros se encuentra inconsistencia en los datos, no demuestra un valor concluyente para las cuatro gráficas, lo cual quiere decir que existe la presencia de diferentes tipos de suelos, sin embargo, del metro seis en adelante se evidencia que los

datos comienzan a ser uniformes y se puede considerar que existe presencia de un solo suelo.

- Por otro lado, y anexo a lo anterior, se dificulta estimar un valor representativo de cada gráfica en sus primeros seis metros puesto que no son valores concluyentes, pero de los seis metros en adelante se puede realizar estimaciones estadísticas que permiten asignarle un valor que corresponda al estrato. Adicionalmente e interpretando lo que se ve de las gráficas de la figura 8 y según la literatura de (Sivakugan & Das, 2010), p 59) se puede decir que el suelo presenta una consistencia media. En cuanto al módulo de elasticidad, los resultados analizados en las gráficas y de acuerdo con la literatura de ((Budhu, 2006), p 73) los suelos demuestran ser suelos muy flojos o muy blandos. Es importante discriminar esta información, puesto que en el análisis mecánico del suelo se evidenciarán todos estos parámetros.
- Por último, se tiene la figura 19, que consta de dos partes, la primera lo conforman los ensayos adicionales que se incluyeron dentro del análisis que son: el ensayo de SPT y la determinación del peso unitario seco. La segunda parte son ensayos de verificación in situ, que permiten verificar la información del laboratorio, estos últimos corresponde al ensayo de penetrómetro y el ensayo de veleta en campo. Como se dijo anteriormente el ensayo de SPT se usará con el fin de determinar parámetros de entrada por efecto de las correlaciones, en la gráfica se muestra que los resultados con respecto a consistencia y compacidad aluden a que son materiales con características medio blanda, en su gran mayoría, lo cual estaría confirmando lo hallado en los ensayos de laboratorio y la literatura sobre que los suelos son blandos en su gran mayoría, por lo cual se puede inferir que correspondan a limos o arcillas.

- Por último, la tendencia del resultado de los ensayos de veleta en campo, corroboran los datos encontrados en el coeficiente de uniformidad, puesto que es claro que ambos tienen la misma dispersión de puntos y se evidencia la clara presencia de un mismo suelo después de los cinco metros. Adicional a esto se puede afirmar que la resistencia de los suelos que hay entre la rasante y los cinco metros varia, puesto que es evidente que existe más de una capa de suelo.

Así pues, con la interpretación que se realizó anteriormente se da paso al siguiente aspecto que tiene como objetivo corroborar la información descrita en las gráficas. La información que le dará sustento a las gráficas es la descripción visual que se le hizo a las muestras extraídas y que se encuentra dentro de los estudios de suelos realizados.

### **Perfil estratigráfico a partir de la descripción visual**

Dentro del proceso de construcción del perfil estratigráfico cabe incluir el aspecto visual que realizó el operador en campo y el ingeniero que revisó y corrigió los reportes. Dentro de la lectura de los sondeos que se realizaron se encuentra la construcción de los perfiles estratigráficos correspondientes a los análisis visuales que hizo el operario y que aportan para la construcción definitiva del perfil estratigráfico con el cual se piensa trabajar los análisis del comportamiento y respuesta del suelo. De esta forma la compilación de los ocho sondeos es la siguiente:



En la figura 20 se puede ver claramente las distribuciones de las diferentes capas de suelos analizadas visualmente por el operario en campo. Se puede observar notoriamente ocho columnas con sus diferentes profundidades y con un esquema de colores que determina el material observado en campo y que están descritos al inicio de la figura. Cinco de los ocho sondeos fueron realizados hasta los 25 metros, los otros tres a 40, y 10 metros. En cada uno demuestra sus diferentes capas y se referencia el nivel freático. Los operarios de cada estudio de suelos identificaron lo siguiente:

- En el terreno identificado con la nomenclatura 1 – S# se puede evidenciar una clara distribución de las capas, no hay variación de estratos en las perforaciones y el operario indica que en los cuatro sondeos realizados se evidencia la clara presencia de una capa de 20cm de capa vegetal, una capa de 80cm de relleno heterogéneo, una capa de 1m de arcilla limosa café de consistencia media, una capa de 1m de arcilla habana oxidada de consistencia media, una capa de 2.20m de limo arcilloso gris verdoso consistencia media a blanda y por último una capa de 18m de limo arenoso de color carmelito y/o gris de consistencia dura. El nivel freático varía en aproximadamente 20cm entre sondeo sin embargo en promedio se ubica a 1.80m de profundidad.
- Por otro lado, el terreno identificado con la nomenclatura 2 – S# se puede evidenciar que no hay completa consistencia entre sondeos, cada perforación indica diferente distribución de sus estratos, sin embargo, se puede observar que en los primeros 2m coinciden con los del terreno 1. Donde es claro que los primeros 20cm hay capa vegetal, luego 80cm de relleno heterogéneo y 1 m de arcilla limosa café de

consistencia media. Pero, por otro lado, después de los 2 metros las capas empiezan a variar y empiezan a aparecer estratos de limos arenosos de color carmelito y/o gris de consistencia dura. Se puede decir que después de los 7m hay una presencia importante de limos arcillosos gris a café de consistencia media a blanda con la presencia de capas de 4 a 10 m de otros materiales como arcillas y arcillas limosas.

De los análisis anteriores de los operarios se puede decir que hay inconsistencias en cuanto a la interpretación visual de estratos se refiere, la razón puede ser la experiencia de cada uno y el método de análisis con el cual interpretan la muestra. O que realmente si existan alteraciones en los estratos de análisis. Dicho de otro modo, se puede concluir que los limos predominan el perfil estratigráfico después de los 7m, y esta puede ser la razón de que en los gráficos de las figuras 17,18 y 19 existan consistencia en los datos. Por otra parte, del metro 2 al 7 si existen variaciones que pueden ser las que reflejen las inconsistencias en los datos de las gráficas, pero se refleja que predomina más las capas de arcilla. Finalmente se puede obviar el hecho de que los dos primeros metros son capas jóvenes que por su proceso de meteorización se han ido depositando uniformemente y se puede rectificar la información con la figura 10 que indica que son depósitos de flujos torrenciales de piedemonte oriental.

### **Perfil estratigráfico estimado final**




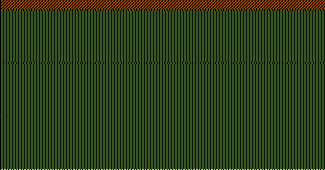
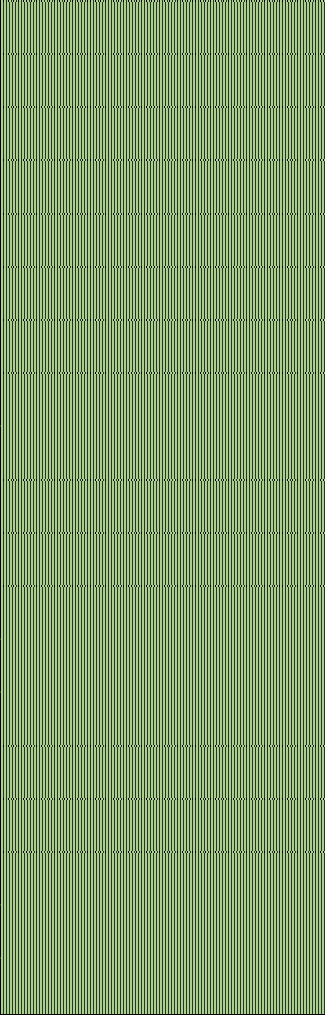
El perfil estratigráfico final servirá como referencia de lo que se infiere hay debajo de la actual vía férrea. Una de las dificultades de este proyecto radica en el hecho de que no se pueden realizar sondeos directamente sobre el terreno de la vía férrea, aquí es donde entraría el termino estimado, pues cabe aclarar que el perfil no representa exactamente lo que hay debajo de las vías

férreas, pero si es una construcción muy aproximada. Por otra parte, las gráficas son una buena fuente de información que permiten construir perfiles estratigráficos más confiables.

Con lo anterior, se decidió realizar dos métodos para construir el perfil estratigráfico final, un método analítico visual, donde se construye un perfil de acuerdo con las coincidencias que existían dentro de los ocho sondeos y otro método estadístico implementando conocimientos básicos de estadística descriptiva que permiten hacer aproximaciones e inferencias de acuerdo con la información y variables que se presentan.

Dentro del análisis estadístico que se realizó se implementaron procesos estadísticos descriptivos para la determinación de las propiedades de los diferentes estratos y asimismo los materiales que corresponden a esas propiedades. El propósito fue eliminar valores atípicos de las gráficas mediante métodos de clasificación, “Box Plot”, que es un método que permite relacionar los datos con más frecuencia y elimina los que no representa la variable. Con los valores identificados dentro de la frecuencia del “box” se procedió a realizar la media aritmética para determinar el parámetro final y el estrato correspondiente a los datos identificados. El resultado fue el siguiente:

Figura 21: Perfil estratigráfico estimado final (Autoría propia)

P (m)	Perfil Estratigráfico	Descripción
0		Capa vegetal
1		Relleno heterogéneo
2 ↓		Arcilla limosa café consistencia media
3		Arcilla habana oxidada consistencia media
4		Limo arcilloso gris verdoso consistencia media a blanda
5		
6		
7		
8		
9		
10		Limo arcilloso gris a café consistencia media a blanda
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25	<b>Nivel Freático a 2.00 m</b>	

La figura 21 es la representación gráfica de los estratos de suelos que se presume hay debajo de la línea férrea analizada en este proyecto y con el cual se va a realizar todos los procesos de análisis mecánicos y de respuesta del mismo. La intención de este capítulo era sintetizar ocho sondeos realizados en un radio de 170m y construir un perfil que pudiese ser más cercano a la realidad. Este fue el resultado, que incluyó los siguientes aspectos para construir un perfil que fuese apropiado y no intuitivo. Las conjeturas para construir el perfil fueron las siguientes:

- ✓ (Cota 0m – 0.2m). La primera capa corresponde al material vegetal con un espesor de 20cm; para esta capa no fue necesario hacer un análisis profundo, solo se identificó que en los ocho sondeos realizados existía la misma porción de estrato, por lo tanto, se dedujo que se mantendría la capa vegetal con la misma profundidad.
- ✓ (Cota 0.2m – 1m). La segunda capa corresponde al relleno heterogéneo con un espesor de 80 cm; de igual forma que en la capa vegetal el análisis que se realizó no fue sustancial, puesto que al igual que la capa anterior en los ocho sondeos se identificó la misma porción de terreno y de igual forma hace parte del primer metro de suelo que por lo general es antrópico y se debe retirar para cualquier tipo de construcción.
- ✓ (Cota 1m – 2m). La tercera capa corresponde a una arcilla limosa café de consistencia media con un espesor de 1m; para la construcción de este estrato se tuvo en cuenta el análisis visual del perfil a esta profundidad. Se llegó a la conclusión de dejar la arcilla limosa debido a que coincidían en seis de ocho sondeos, el mismo estrato. Los otros dos sondeos a esta profundidad reflejaban material antrópico y un limo arcilloso que no representaban una participación sustancial en la toma de la decisión.

- ✓ (Cota 2m – 3m). La cuarta capa corresponde a una arcilla habana oxidada de consistencia media con un espesor de 1m; en el perfil estratigráfico visual se evidencia que en el terreno 1 coincide que en la misma profundidad hay capa de arcillas, en el terreno 2 se observa que en tres sondeos se evidencian limos y en el cuarto arcilla. Visualmente predominan la arcilla habana de consistencia media, pero se ratifica la decisión, al realizar dos apreciaciones en las gráficas, la primera apreciación se hizo desde los límites de consistencia y la capacidad ultima, la literatura de ((Sivakugan & Das, 2010), dice que dentro de las propiedades de las arcillas está que son de baja permeabilidad y su límite liquido es superior a 20% y que cuando su límite liquido es bajo es menos compresible, razón que se evidencia en las figuras 17 y 18. Por otra parte y haciendo uso de la estadística, usando el método de “Box Plot” se observa que no hay valores atípicos, por lo cual se infiere que la los valores se encuentran en el mismo margen y se puede traducir a que es solo un material.
- ✓ (Cota 3m – 6m). La quinta capa corresponde a un limo arcilloso gris verdoso de consistencia media con un espesor de 3m; se identificó visualmente que en las tendencias de las gráficas desde los 3m de profundidad hasta los 6m se reflejaba consistencia en los datos, lo que traduce que dentro de este rango existía la presencia de un solo material y a diferencia de los estratos anteriores que reflejaban valores atípicos en la muestra. En el perfil estratigráfico visual se confirma el hecho que, en los ocho sondeos, en siete se encontraron las mismas características que correspondían a limos, solo en uno se visualizó presencia de arcilla limosa, pero solo hasta la mitad de la capa. Por consiguiente, no se requirió de un análisis a profundidad puesto que visualmente es claro la presencia de este tipo de limo.

- ✓ (Cota 6m – 25m). La sexta y última capa corresponde a un limo arcilloso gris a café de consistencia media a blanda con un espesor de 19m; en este punto del análisis fue indiscutible la suposición del estrato, puesto que en los gráficos se mostraba la clara agrupación de datos en un margen delimitado por los mismos. La similitud de los resultados del coeficiente de uniformidad y el ensayo de veleta fue determinante para corroborar la presencia de un material con unas características determinadas. Por otro lado, el perfil estratigráfico visual demuestra que la presencia del limo predomina en las muestras y que, a pesar de existir estratos pequeños de arcillas, el limo siempre sobresale. Por último y teniendo en cuenta la literatura de la geotecnia, en el libro de (Budhu, 2006), indica que los suelos limo arcillosos se caracterizan por tener un color gris pálido y tienden a tener un límite líquido alto, por encima del 80%, lo que sin duda es un acierto para lo propuesto en el perfil estratigráfico final.

Con el perfil estratigráfico final definido, solo bastaría deducir, conscientemente, los valores que le corresponde a cada estrato de suelo definido. Para este proyecto no se utilizará los valores estandarizados que menciona la literatura, sino que se tendrá en cuenta únicamente lo relacionado en las gráficas y descripciones de los estratos. Lo anterior con el fin de continuar con la construcción de datos a partir de los estudios de suelos utilizados para este proyecto. Así pues, se hizo la relación de datos con base al método propuesto de estadística denominado “Box Plot” que consiste en identificar valores atípicos y omitirlos de la muestra y así poder sacar una media aritmética de los valores que si representan la muestra. Con este método se llegó a la conclusión que a cada estrato se le iba asignar un valor, en sus diferentes propiedades, para poder construir

una tabla similar a la que representa la base de datos de este proyecto tabla 5. El resultado fue el siguiente:

*Tabla 9: Datos finales para las propiedades de los estratos. (Autoría propia)*

Estrato	Inicio Prof. (m)	Fin Prof. (m)	W/N	LL	LP	IP	$\gamma_t$ (kn/m <sup>3</sup> )	$q_u$ (kpa)	$C_u$ (kpa)	$c'$ (kpa)	$E$ (kpa)	$\gamma_d$ (kn/m <sup>3</sup> )	$S_v$ (kpa)	N golpes/pie	Angulo de fricción $\phi$	Penetrómetro
Capa vegetal	0	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Relleno heterogéneo	0,2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Arcilla limosa	1	2	67,0%	88,7%	60,0%	28,7%	18,600	75,511	37,756	5,484	2801,900	15,608	45,111	4	29,500	98,067
Arcilla	2	3	62,6%	80,3%	33,8%	46,4%	16,456	69,137	34,569	4,503	1456,400	11,223	36,425	5	29,750	36,775
Limo arcilloso gris verdoso	3	6	67,0%	95,2%	32,5%	64,5%	14,656	55,244	27,622	9,168	1478,720	9,368	26,633	3	29,250	24,374
Limo arcilloso gris a café	6	25	76,6%	100,3%	34,4%	64,6%	15,118	36,059	18,029	7,202	1242,540	8,300	21,200	3	29,250	24,517

La anterior tabla servirá de ahora en adelante para la evaluación de los parámetros de diseño y para determinar la respuesta mecánica del suelo. Los valores de la tabla 9 son el resultado del análisis estadístico propuesto, que permitió deducir los valores con base en las gráficas y los parámetros propuestos anteriormente, cabe aclarar que los valores del ángulo de fricción ( $\phi$ ) son provenientes de la literatura de (Carmona Álvarez & Ruge Cárdenas, 2015), con base a las correlaciones de Terzaghi & Peck. Con las cargas que se presentarán en el siguiente capítulo y estos valores se procederá a realizar el análisis correspondiente para determinar la viabilidad del suelo.

## **Capítulo 6: Determinación y avalúo de cargas**

El capítulo 6 está destinado para determinar el avalúo de cargas que se espera tenga el tramo de estudio de este proyecto. Para realizar este avalúo de cargas fue necesario determinar el tipo de estructura que se va a manejar y contrastarla con la actual. De esta manera se encontrará el avalúo de cargas para tres tipos de estructuras, la primera se determinó la actual carga que presentan las superestructura e infraestructura con el funcionamiento de los trenes existentes, la segunda corresponde a la primera propuesta de este proyecto que concierne a una línea férrea con la carga correspondiente a pasajeros y carga pesada y la tercera corresponde a la segunda propuesta de este proyecto que será una estructura conformada por dos líneas férreas para funcionamiento bidireccional con cargas de pasajeros y cargas pesadas. Los avalúos son los siguientes:

### **Avaluó de cargas para la estructura actual**

Para el avalúo de cargas que existe actualmente se tomó como referencia las cargas que generan los trenes que se encuentran en circulación y la carga generada por la infraestructura. Se tiene en cuenta que actualmente estos trenes están destinados para el transporte de carga y en ocasiones para el transporte de pasajeros, por lo cual se asumen cargas con la máxima capacidad de arrastre de las actuales locomotoras, adicional a esto es importante mencionar que el análisis se hace para solo un sentido, ya que es lo que se encuentra en la actualidad. Las cargas de los trenes actuales son las siguientes:

*Tabla 10: Avalúo de cargas de los trenes que actualmente circulan (Autoría propia)*

TIPO DE TREN	CARGA TOTAL (Ton)	CARGA TOTAL POR EJE (Ton)
Locomotoras a vapor Baldwin + infraestructura y superestructura	46	11,5
Locomotoras Diesel GE UB-10 de 1000 HP de potencia + infraestructura y superestructura	50	12,5
Autoferreros fabricados por A.S.J Jonkopin remotorizados cada uno con Motor Cummins + infraestructura y superestructura	38	9,5

Los datos expresados en la tabla 10 provienen del trabajo de investigación sobre las vías férreas en Colombia (Ramirez Palacios, 2001) e indican la carga total que generan cuando los trenes se encuentran con su carga máxima. Vale aclarar que estos datos son teóricos y son para establecer parámetros hipotéticos para darle desarrollo a el ejercicio. Para establecer los valores reales habría que efectuar periódicamente ensayos con los diferentes trenes, en diferentes trayectos de la vía, puesto que hay una variable adicional que influye en el cálculo de las cargas que es la pendiente de la vía y en que en este caso se desprecia. Sin embargo, estos datos proporcionan una estimación real que permite contemplar las cargas generadas por los diferentes trenes. La carga se distribuye por el número de ejes de los trenes que corresponde a cuatro ejes.

### **Avaluó de cargas para la primera propuesta de estructura**

Como se ha dicho en reiteradas ocasiones en este trabajo se tiene considerado realizar dos alternativas que sirvan para darle cabida a la investigación de este trabajo. En este apartado entra informalmente la primera propuesta que es utilizar el mismo eje férreo existente, solo que se modificaría sus características para permitir el paso de un tren tipo Tram para pasajeros y carga y no los actuales trenes, descritos anteriormente.

Con base en la anterior información se procedió a realizar el primer paso para evaluar las cargas del nuevo tipo de tren Tram, es el estudio de la demanda de carga, que en resumidas cuentas es la capacidad de transporte de una línea férrea y es definida por el tonelaje máximo de mercancías que se transportan en ambos sentidos. (MARÍN, 2013). Además, como este informe se basa es en la geotecnia y no en el transporte, se optó por utilizar la información del informe realizado por (MARÍN, 2013) que analizó la demanda de pasajeros para la línea férrea de la Sabana y estimó una capacidad de carga basado en las fórmulas de la American Association of Railroads (AAR), el resultado final es que aproximadamente son 24 toneladas las que se aportaría en personas más el peso del tren Tram que son 18 toneladas para un total de 42 toneladas. La siguiente información se esquematiza en la siguiente tabla:

*Tabla 11: Avaluó de cargas para trenes de pasajeros (Autoría propia)*

<b>TIPO DE TREN</b>	<b>CARGA TOTAL (Ton)</b>	<b>CARGA TOTAL POR EJE (Ton)</b>
Tren tipo tram marca Siemens Piso bajo S70 + infraestructura y superestructura	42	10,5

Como en este punto se desconoce el tipo de tren que se utilizaría para el transporte de carga, se asume, con fines académicos, que el peso de los trenes de carga sea equivalente al peso del tren con pasajeros, por lo tanto, los valores de la tabla 11 corresponden al peso de los trenes de carga que se transportarían en las mismas condiciones del tren de pasajeros más infraestructura y superestructura.

### **Avaluó de cargas para la segunda propuesta de estructura**

Dentro de los objetivos de este proyecto está el contrastar la información con varias posibilidades, se propone que la futura estructura férrea contenga dos carriles con el fin de permitir el constante flujo de la flota de trenes. En una entrevista que se realizó con el fin de tener conocimiento de las posibilidades de la línea férrea de la Sabana, “el Ingeniero Fernando Rey especialista en planeación, construcción, mantenimiento y rehabilitación de ferrocarriles, afirmó que el espacio donde actualmente se encuentran las vías férreas da para que se incluya otro eje vial en sentido contrario” (Rey, 2020). Lo que significa que para este trabajo constituye como una propuesta más para analizar. Con lo anterior dicho se puede decir que la carga aplicada sobre el terreno correspondería al doble de lo indicado en la tabla 11, puesto que las condiciones serán las mismas y se presume que el tren sea de las mismas características.

Cabe aclarar que el tren que se está contemplando para la propuesta uno y dos corresponde a un tren tipo Tram con las características similares al que se utilizara en el proyecto de RegioTram de occidente en Bogotá-Colombia, y que la información sobre sus especificaciones técnicas son un aproximado entre lo que se encuentra en la página web de Siemens y los proyectos de investigación ya citados anteriormente. En síntesis, de lo anterior las cargas presentadas en las tablas 10 y 11, corresponden a valores hipotéticos aproximados y están sujetos a verificación en el caso de ser extendida la información de este proyecto.

## **Capítulo 7: Análisis del comportamiento mecánico y de respuesta del suelo**

El capítulo 7 se dispuso para ser la sección que le da el cuerpo a este trabajo, puesto que en esta sección se encontrará todo el análisis del comportamiento mecánico y de respuesta del suelo de acuerdo con los parámetros establecidos en el capítulo 5. A lo largo del desarrollo de este capítulo se expondrán las evidencias de respuesta del suelo al variar las nuevas geometrías y de cómo el suelo se está comportando con las respectivas cargas, para que de esa forma se expongan mediante el uso de herramientas de modelación el resultado de los análisis numéricos.

Cabe aclarar que el análisis de este capítulo solo radica en el diseño del terraplén que soporta la estructura y que transmite los esfuerzos al suelo. Para aclarar el contexto, la estructura de una vía férrea se compone de dos partes la superestructura que es conformada por: los rieles, durmientes, balasto y subbalasto y la infraestructura que es el terraplén el cual soporta la superestructura. Por consiguiente, el análisis de este trabajo solo tiene en cuenta la infraestructura y se diseña de acuerdo a lo establecido en la norma internacional AREMA capítulo 8.

El propósito fundamental de este trabajo es contrastar las diferentes alternativas, que se suponen viables, para implementar un tren superficial y que parten de lo que actualmente se encuentra en el terreno. Para eso se plantearon dos nuevas alternativas, para que en el capítulo 8 se establezca cuál de las dos nuevas alternativas es más viable. Así pues, el análisis que se realizó en este capítulo comprende de tres aspectos principales donde se analizan las respuestas mecánicas y de comportamientos de la actual y futura línea férrea, los tres análisis son: La línea de tren actual unidireccional, una línea férrea nueva unidireccional con variaciones en la

geometría del terraplén y dos líneas férreas nuevas bidireccionales también con variaciones en la geometría del terraplén.

Se consideró que para hacer más sustancial el análisis era pertinente proponer diferentes alternativas para reconocer cual era más factible, de acuerdo con esto se realizó el análisis de las dos nuevas líneas férreas variando la geometría de los terraplenes que soportan la estructura. Estas variaciones permiten identificar diferentes aspectos a la hora de construir la línea férrea, aspectos tales como los procesos constructivos, los costos de ejecución y sobre todo el confort y armonía que pudiesen afectar en una posterior ejecución de la obra.

De esta forma, en el análisis se podrá encontrar que los terraplenes varían en altura, base y funcionalidad todo esto teniendo en cuenta la normativa vigente internacional que estandariza los procesos de diseño para los terraplenes de los trenes. Para este caso, se tuvo en cuenta la norma internacional AREMA que describe las características que debe tener el terraplén de las líneas férreas. La norma es flexible en cuanto su base de terraplén respecta, lo que si debe ser importante es la pendiente para la cual se deben diseñar los terraplenes, en la sección 8-3-7 describe que el terraplén debe ser construido con una pendiente de 1.5:1 con el fin de garantizar la estabilidad del terraplén de acuerdo con su base y altura.

Con base a esto, se diseñó la geometría en forma trapezoidal a partir de una base menor que cumpliera con las dimensiones mínimas de un terraplén, la base menor según la AREMA sección 8-3-5 es de dos metros asumiendo un ancho de riel de 1435mm, con esto y la pendiente de 1.5:1 se varió su altura y se le fue agregaron un metro adicional para variar su geometría, esto en el caso de la línea férrea unidireccional. En el caso de la línea férrea bidireccional se tomaron

los mismos parámetros solo que para este caso se duplico el ancho con el fin de cumplir con el espacio necesario para el tránsito de dos trenes en diferentes sentidos.

El análisis mecánico y de respuesta del suelo que se realizó fue con base a la teoría de la geotecnia, donde se analizaron tres de los componentes más importantes que se deben tener en cuenta a la hora de realizar una cimentación, la capacidad portante, los asentamientos elásticos y los asentamientos por consolidación primaria. Además, se tuvo en cuenta dos diferentes contextos; suelo en condiciones drenadas y no drenadas con el fin de garantizar un análisis optimo y que sirviese como base para futuros análisis geotécnicos complementarios. Por otra parte, para realizar estos análisis se tuvo en cuenta todos los parámetros geotécnicos que se extrajeron de los ensayos de laboratorio y que fueron sintetizados en la tabla 9, los cuales son la base de datos para elaborar las tablas que irán más adelante de este capítulo.

Como se habló en capítulo 2 se usaron dos softwares de modelación por elementos finitos para contrastar lo que se obtuvo en el análisis numérico que se realizó en Excel, esto con el fin de corroborar y modelar todos los aspectos que comprende la infraestructura y lo correspondiente a la estratigrafía presente. Estas herramientas permiten validar los análisis que se realizaron de acuerdo a la literatura de geotecnia donde se utilizó la teoría de Terzaghi, Meyerhof, Boussinesq, entre otros para calcular las capacidades portantes y los asentamientos.

Con los parámetros definidos solo restaba identificar cual carga usar, en el capítulo 6 se hizo una descripción sobre los tipos de cargas que actuaban en la estructura, para lo cual se detalló los diferentes trenes que transitan o transitaran en la nueva línea férrea. Sin embargo, para realizar el análisis se decidió optar por la carga más critica que correspondería al hipotético caso de un tren de carga que transite por las posibles nuevas estructuras. Con esta carga definida se le adicionó la

carga correspondiente a la superestructura y de esta forma se identificó cual sería la carga más crítica para cualquiera de las dos alternativas.

Por último, dentro de los datos de entrada que se requerían para realizar los análisis numéricos y los análisis por softwares se debían identificar variables que son propias de la normativa colombiana estipulada en la norma colombiana de diseño de puentes CCP 2014 sección 10 sobre la conformación de cimentaciones. Variables como el factor de reducción y valores aproximados del módulo de Young y el coeficiente de consolidación para la ciudad de Bogotá. Serían los últimos datos que alimentan la elaboración de los cuadros de análisis numéricos para determinar la capacidad portante y los asentamientos.

Con la información expuesta anteriormente se procedió a realizar los dos tipos de análisis de este capítulo: el análisis numérico elaborado en Excel con los parámetros de la literatura de geotecnia y los modelos en las herramientas computacionales de Phase 2 y Settle 3D para construir un análisis detallado de la respuesta mecánica y comportamiento del suelo. Para que al final se pudiese sintetizar la información en una tabla y poder exponer la justificación de este capítulo.

En los siguientes apartados se encontrarán los diferentes análisis que se realizaron de acuerdo con las características descritas; los análisis serán en tablas elaboradas en Excel y en modelos de elementos finitos que irán acompañadas de una leve descripción sobre cómo funcionan. Sin embargo, será hasta el final de todas las tablas y modelos que se realizará la justificación y análisis detallado de todo lo expuesto, con el fin de dar un análisis sintetizado de toda la información que será expuesta a continuación.

### Capacidad portante del suelo en condiciones drenadas

En este apartado se encuentra el análisis numérico que se realizó en Excel para determinar la capacidad portante del suelo en condiciones drenadas con la información detallada en párrafos anteriores. La tabla muestra la solución de la teoría de Meyerhof para capacidad portante de estabilidad y deformación para modelos bicapa con todas las variables que requieren para determinar la capacidad portante, además en el final de la tabla se encuentra el resultado de lo que se determinó en esta tabla. Así pues, la información es la siguiente:

Tabla 12: Análisis de estabilidad y deformación - modelo bicapa condición drenada (Autoría propia)

<b>ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y DEFORMACION - MODELO BICAPA</b>			
<b>PARÁMETROS DE ENTRADA</b>			
<b>DATOS DEL CIMIENTO</b>		<b>DATOS DEL SUELO</b>	
Tipo de cimiento:	RECTANGULAR	<b>PARÁMETROS NO DRENADOS</b>	<b>PARÁMETROS DRENADOS</b>
Profundidad cimiento, $D_f$ [m] =	1,0	$c_{u1}$ [ton/m <sup>2</sup> ] = 2,82	$c'_1$ [ton/m <sup>2</sup> ] = 0,92
Espesor capa 1, $h_1$ [m] =	5,00	$c_{u2}$ [ton/m <sup>2</sup> ] = 1,81	$c'_2$ [ton/m <sup>2</sup> ] = 0,72
$\gamma_t$ capa 1 [ton/m <sup>3</sup> ] =	1,68		$\phi'_1$ = 29,75
Espesor capa 2, $h_2$ [m] =	6,00	<b>TIPO DE ANÁLISIS</b>	$\phi'_2$ = 29,25
$\gamma_t$ capa 2 [ton/m <sup>3</sup> ] =	1,49	Condición: Drenada	<b>PARÁMETROS ELÁSTICOS</b>
Distancia al estrato 2, $H$ [m] =	4,00	<b>MODELO A UTILIZAR</b>	$E_{máx1}$ 148,51 (T/m <sup>2</sup> ) = 14
Profundidad del N.F. (m) =	2,00	Suelo duro sobre blando	$\nu_1$ = 0,3
Factor de reducción =	0,38	<b>FACTORES DE CAPACIDAD</b>	$G_{máx1}$ (T/m <sup>2</sup> ) = 57
Posición relativa del N.F.: bajo el cimiento		$N_c$ (Prandtl, 1921) = 27,86	$E_{máx2}$ 124,58 (T/m <sup>2</sup> ) = 7
Posición relativa del cimiento: capa 1		$N_q$ (Reissner, 1924) = 16,44	$\nu_2$ = 0,3
Sobrecarga por terreno, $q$ [t/m <sup>2</sup> ] =	1,678	$N_g$ (Vesic, 1975) = 19,34	$G_{máx2}$ (T/m <sup>2</sup> ) = 48

## ANÁLISIS DE CAPACIDAD PORTANTE (CONDICIÓN DRENADA)

	GEOMETRÍA DE LA CIMENTACIÓN (m) - CIMIENTO RECTANGULAR					
	Ancho propuesto para un carril			Ancho propuesto para dos carriles		
B (m)	3,50	5,00	6,50	8,00	9,50	11,00
L (m)	35,00	50,00	65,00	80,00	95,00	110,00
ESTABILIDAD DEL ESTRATO DE CIMENTACIÓN (falla controlada sólo por el estrato de cimentación, no considera el inferior)						
B/L	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
D/B	0,286	0,200	0,154	0,125	0,105	0,091
$\zeta_{cs}$	1,059	1,059	1,059	1,059	1,059	1,059
$\zeta_{cd}$	1,114	1,080	1,062	1,050	1,042	1,036
$\zeta_{qs}$	1,057	1,057	1,057	1,057	1,057	1,057
$\zeta_{qd}$	1,083	1,058	1,045	1,036	1,031	1,026
$\zeta_{\gamma s}$	0,960	0,960	0,960	0,960	0,960	0,960
$\zeta_{\gamma d}$	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
$cNc^*$	30,247	29,316	28,81 5	28,502	28,287	28,131
$qNq^*$	31,587	30,861	30,47 1	30,227	30,060	29,938
$0.5\gamma BN\gamma^*$	54,515	77,878	101,2 41	124,605	147,96 8	171,331
<b><math>\sigma_{bu1}</math> [t/m<sup>2</sup>]</b>	<b>116,35</b>	<b>138,06</b>	<b>160,5 3</b>	<b>183,33</b>	<b>206,31</b>	<b>229,40</b>
REDUCCIÓN DE LA CAPACIDAD PORTANTE POR COMPRESIBILIDAD						
Sobrecarga a $Df+B/2$	4,61	5,873	7,131 5	8,39	9,6485	10,91
$lr_1$	16,06	13,36	11,43	9,99	8,88	7,98
$lr_2$	14,50	11,95	10,17	8,84	7,83	7,02
$lr$ definitivo =	16,06	13,36	11,43	9,99	8,88	7,98
$lr_{critico}$	136,51	136,51	136,5 1	136,51	136,51	136,51
¿Hay efecto de compresibilidad?	si	si	si	si	si	si
$\zeta_{qc}$	0,388	0,358	0,334	0,315	0,299	0,285
$\zeta_{\gamma c}$	0,388	0,358	0,334	0,315	0,299	0,285
$\zeta_{cc}$	0,323	0,289	0,263	0,242	0,224	0,209
<b><math>\sigma_{bu1}</math> compresibilidad [t/m<sup>2</sup>]</b>	<b>43,19</b>	<b>47,39</b>	<b>51,6</b>	<b>55,62</b>	<b>59,50</b>	<b>63,23</b>
ESTABILIDAD POR PUNZONAMIENTO (falla controlada por el sistema bicapa)-Modelo de Brown & Meyerhof, 1969 (Winterkorn&Fang)						

$k (C_2/C_1)$	0,783	0,783	0,783	0,783	0,783	0,783
Índice de punzonamiento, $\beta$	0,40	0,57	0,74	0,91	1,08	1,25
Nm	25,60	24,85	24,44	24,19	24,02	23,89
$\sigma_{bu_{bi\ capa}} [t/m^2]$	<b>9,29</b>	<b>8,29</b>	<b>7,60</b>	<b>7,06</b>	<b>6,63</b>	<b>6,27</b>
<b>ESTABILIDAD POR PUNZONAMIENTO (suelo duro/blando) - Modelo de Meyerhof &amp; Hanna, 1978 (DAS)</b>						Arcilla dura/arcilla blanda
$q_1 [t/m^2]$	82,42	106,75	131,09	155,43	179,76	204,10
$q_2 [t/m^2]$	70,62	92,29	113,96	135,62	157,29	178,96
$q_2/q_1$ (según tipos de suelo)	0,642	0,642	0,642	0,642	0,642	0,642
Ks	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05
$c_a [t/m^2]$	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
$c_2 N c_2^* = c_2 N c_2 \zeta_{cs2}$	21,24	21,24	21,24	21,24	21,24	21,24
$\gamma_1 (Df+H) N q_2 \zeta_{qs2}$	145,69	145,69	145,69	145,69	145,69	145,69
$0.5 \gamma_2 B N \gamma_2 \zeta_{\gamma s}$	90,14	90,14	90,14	90,14	90,14	90,14
$q_b [t/m^2]$	257,07	257,07	257,07	257,07	257,07	257,07
$q_u$ Arcilla dura/arcilla blanda $[t/m^2]$	13,41	12,74	12,37	12,15	11,99	11,88
$q_t [t/m^2]$ caso general	43,19	47,39	51,57	55,62	59,50	63,23
$\sigma_{bu_{bi\ capa}} [t/m^2]$	<b>13,41</b>	<b>12,74</b>	<b>12,37</b>	<b>12,15</b>	<b>11,99</b>	<b>11,88</b>
<b>CAPACIDAD PORTANTE DEFINITIVA</b>						
B (m)	3,50	5,00	6,50	8,00	9,50	11,00
$\sigma_{bu}$ (ton/m <sup>2</sup> )	<b>9,29</b>	<b>8,29</b>	<b>7,60</b>	<b>7,06</b>	<b>6,63</b>	<b>6,27</b>
$\sigma_{bs}$ (kPa)	<b>35,29</b>	<b>31,52</b>	<b>28,86</b>	<b>26,82</b>	<b>25,18</b>	<b>23,82</b>

La tabla 12 evidencia todos los cálculos numéricos que se debieron realizar para determinar la capacidad portante del suelo en condiciones drenadas de acuerdo con la literatura de la geotécnica y con los autores anteriormente mencionados. En primera instancia es importante aclarar los valores que fueron utilizados como datos de entrada en esta tabla: Los datos del cimiento proviene de lo expresado en el capítulo 5 en la construcción del perfil estratigráfico y de sus respectivas características expresadas en dicho capítulo, se habla de una profundidad de cimiento  $Df = 1m$  correspondiente a lo que se estima será removido por ser material

heterogéneo, se aclara que la geometría en contacto con el suelo es cuadrada y se agrega el factor de reducción  $Fr = 0.38$  que es el indicado en la norma de puentes colombiana LRFD tabla C10.6.2.6.1-1 para este tipo de cimentaciones. Por otro lado, están los parámetros mecánicos de los suelos que son todos los descritos en la tabla 9 y el módulo de Young para suelos con estas características que es de 0.33.

En la tabla se encuentran los anchos de las bases propuestas para el análisis de los diferentes tipos de terraplenes, cabe aclarar que por facilidad del ejercicio se asumió el largo del cimiento como 10 veces el ancho, puesto que no se considera dentro del análisis al ser una línea férrea de largo muy superior a su base. Por otra parte, se evidencia que la tabla está organizada de tal forma que se hagan los cálculos respectivos para diferentes anchos de terraplén teniendo en cuenta los tres casos propuestos.

### **Capacidad portante del suelo en condiciones No drenadas**

En este apartado se encuentra el análisis numérico que se realizó en Excel para determinar la capacidad portante del suelo en condiciones NO drenadas con la información detallada en párrafos anteriores. La tabla muestra la solución de la teoría de Meyerhof para capacidad portante de estabilidad y deformación para modelos bicapa con todas las variables que requieren para determinar la capacidad portante, además en el final de la tabla se encuentra el resultado de lo que se determinó en esta tabla. Así pues, la información es la siguiente:



$\zeta_{Cd}$	1,114	1,080	1,062	1,050	1,042	1,036
$\zeta_{qs}$	1,057	1,057	1,057	1,057	1,057	1,057
$\zeta_{qd}$	1,083	1,058	1,045	1,036	1,031	1,026
$\zeta_{\gamma s}$	0,960	0,960	0,960	0,960	0,960	0,960
$\zeta_{\gamma d}$	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
$cNc^*$	16,474	15,967	15,695	15,524	15,407	15,322
$qNq^*$	1,921	1,877	1,853	1,838	1,828	1,821
$0.5\gamma BN\gamma^*$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b><math>\sigma_{bu1}</math> [t/m<sup>2</sup>]</b>	<b>18,40</b>	<b>17,84</b>	<b>17,55</b>	<b>17,36</b>	<b>17,24</b>	<b>17,14</b>
<b>REDUCCIÓN DE LA CAPACIDAD PORTANTE POR COMPRESIBILIDAD</b>						
Sobrecarga a Df+B/2	4,61	5,873	7,132	8,39	9,649	10,91
$l_{r1}$	20,26	20,26	20,26	20,26	20,26	20,26
$l_{r2}$	26,47	26,47	26,47	26,47	26,47	26,47
$l_r$ definitivo =	20,26	20,26	20,26	20,26	20,26	20,26
$l_{r\text{critico}}$	12,96	12,96	12,96	12,96	12,96	12,96
¿Hay efecto de compresibilidad?	no	no	no	no	no	no
$\zeta_{qc}$	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
$\zeta_{\gamma c}$	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
$\zeta_{Cc}$	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b><math>\sigma_{bu1}</math> compresibilidad [t/m<sup>2</sup>]</b>	<b>18,40</b>	<b>17,84</b>	<b>17,5</b>	<b>17,36</b>	<b>17,24</b>	<b>17,14</b>
<b>ESTABILIDAD POR PUNZONAMIENTO (falla controlada por el sistema bicapa)-Modelo de Brown &amp; Meyerhof, 1969 (Winterkorn&amp;Fang)</b>						
$k$ ( $C_2/C_1$ )	0,642	0,642	0,642	0,642	0,642	0,642
Índice de punzonamiento, $\beta$	0,40	0,57	0,74	0,91	1,08	1,25
$N_m$	5,88	5,13	4,72	4,47	4,29	4,17
<b><math>\sigma_{bu\text{bi capa}}</math> [t/m<sup>2</sup>]</b>	<b>18,26</b>	<b>16,13</b>	<b>14,99</b>	<b>14,27</b>	<b>13,78</b>	<b>13,42</b>
<b>ESTABILIDAD POR PUNZONAMIENTO (suelo duro/blando) - Modelo de Meyerhof &amp; Hanna, 1978 (DAS)</b>						Arcilla dura/arcilla blanda
$q_1$ [t/m <sup>2</sup> ]	14,49	14,49	14,49	14,49	14,49	14,49
$q_2$ [t/m <sup>2</sup> ]	9,30	9,30	9,30	9,30	9,30	9,30
$q_2/q_1$ (según tipos de suelo)	0,642	0,642	0,642	0,642	0,642	0,642
$K_s$	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05
$c_a$ [t/m <sup>2</sup> ]	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73
$c_2Nc_2^*=c_2Nc_2\zeta_{cs2}$	9,49	9,49	9,49	9,49	9,49	9,49
$\gamma_1(Df+H) Nq_2\zeta_{qs2}$	8,86	8,86	8,86	8,86	8,86	8,86
$0.5\gamma_2BN\gamma_2\zeta_{\gamma s}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

$q_b$ [t/m <sup>2</sup> ]	18,35	18,35	18,35	18,35	18,35	18,35
$q_u$ Arcilla dura/arcilla blanda [t/m <sup>2</sup> ]	18,04	15,98	14,87	14,17	13,70	13,35
$q_t$ [t/m <sup>2</sup> ] caso general	18,40	17,84	17,55	17,36	17,24	17,14
$\sigma_{bu}$ capa [t/m <sup>2</sup> ]	<b>18,04</b>	<b>15,98</b>	<b>14,87</b>	<b>14,17</b>	<b>13,70</b>	<b>13,35</b>
<b>CAPACIDAD PORTANTE DEFINITIVA</b>						
B (m)	3,50	5,00	6,50	8,00	9,50	11,00
$\sigma_{bu}$	<b>18,04</b>	<b>15,98</b>	<b>14,87</b>	<b>14,17</b>	<b>13,70</b>	<b>13,35</b>
$\sigma_{bs}$ (kPa)	68,55	60,71	56,50	53,86	52,06	50,74

La tabla 13 evidencia todos los cálculos numéricos que se debieron realizar para determinar la capacidad portante del suelo en condiciones NO drenadas de acuerdo con la literatura de la geotécnica y con los autores anteriormente mencionados. Esta tabla al igual que la tabla 12 contienen los mismos datos de entrada, solo que su resultado cambia debido al cambio de condición del suelo a NO drenado, de esta forma el planteamiento es similar solo se ajustan las fórmulas de los factores de corrección para que funcionen en esta condición de suelo. El resto de los parámetros de geometría y casos de evaluación son iguales a lo que se explicó en el apartado anterior.

### **Cálculo de asentamientos elásticos**

En este apartado están los cálculos que se realizaron para determinar el asentamiento elástico que sufre inmediatamente el suelo al recibir la nueva carga. En este análisis, como en los dos anteriores, se calculó el efecto que produce el cambio de geometría en el asentamiento, así pues, en la siguiente tabla se evidencia la respuesta que tiene el suelo para los tres casos de análisis planteados con sus diferentes bases propuestas. Se usó la teoría de Boussinesq para determinar el

asentamiento elástico y el asentamiento elástico rígido en el centro de la estructura. El resultado es el siguiente:

Tabla 14: Análisis de asentamientos elásticos (Autoría propia)

<b>ASENTAMIENTO ELASTICO EN EL CENTRO DE LA CIMENTACIÓN</b>						
	<b>GEOMETRÍA DE LA CIMENTACIÓN (m) - CIMIENTO RECTANGULAR</b>					
	<b>Ancho propuesto para un carril</b>			<b>Ancho propuesto para dos carriles</b>		
Carga neta aplicada sobre la cimentación, $q_0$ [kPa]	12,00	14,04	16,78	12,33	14,60	17,56
B (m)	3,50	5,00	6,50	8,00	9,50	11,00
L (m)	35,00	50,00	65,00	80,00	95,00	110,00
$\alpha$	4	4	4	4	4	4
$m'$	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
$n'$	2,86	2,00	1,54	1,25	1,05	0,91
$Df/B$	0,286	0,200	0,154	0,125	0,105	0,091
B/L	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$B'$	1,75	2,5	3,25	4	4,75	5,5
F1	0,358	0,259	0,195	0,151	0,120	0,097
F2	0,147	0,145	0,139	0,133	0,126	0,120
$I_s$	0,4425	0,3418	0,2746	0,2270	0,1918	0,1650
$I_f$	1	1	1	1	1	1
<b>ASENTAMIENTO ELASTICO DEFINITVO</b>						
Se (CENTRO) (cm)	2,324	3,000	3,746	2,800	3,327	4,786
Se (rígida) (CENTRO) (cm)	2,161	2,790	3,484	2,604	3,094	4,451

La tabla 14 es el compilado de resultados de asentamientos elásticos que se evidenciarían en el centro de la estructura por efecto de la carga aplicada y con la geometría correspondiente usando la teoría de Boussinesq, los parámetros de entrada en este caso es la carga por efecto de la superestructura de la vía férrea y teniendo en cuenta los pesos de las características que

componen la super estructura; balasto, subbalasto, durmientes, rieles y la propia carga del tren en su máxima capacidad. Además de las dimensiones de la geometría del terraplén ya explicadas anteriormente. Para este análisis se desprecian cargas por efecto de la lluvia o del viento o algún otro tipo de carga que no se fuese expresada para este trabajo, debido a que no se consideran representativas por las condiciones de drenaje que tienen las vías férreas.

### **Representación gráfica del terreno con método de elementos finitos**

A manera de representar gráficamente los valores encontrados en los laboratorios y en los resultados de los cálculos numéricos en Excel, se decidió que era pertinente utilizar herramientas computacionales que pudiesen modelar la situación y que asimismo se pudiese contrastar los valores con otro método. Este otro método consiste en la implementación de dos softwares (Phase 2 y Settle 3D) que funcionan con métodos de elementos finitos que mediante el uso de ecuaciones diferenciables más avanzadas permiten tener un resultado seguro, siempre y cuando los valores de entrada estén correctos.

Con base en lo anterior se utilizó el software Phase 2 para realizar la modelación de los estratos deducidos en el capítulo 5 con sus características y del terraplén propuesto con sus diferentes variaciones, seguido de esto se le asignó la carga correspondiente al caso de la estructura, para que así pudiese el software interpretar automáticamente los datos y proyectar los resultados requeridos para que fuesen comparados con los resultados numéricos de Excel.

Con el mismo principio de funcionamiento del programa Phase 2, se utilizó el software Settle 3D, sin embargo, este software se usó con el único fin de poder determinar asentamientos por consolidación primaria. La razón de que no se hiciesen cálculos para contrastar la información radica en la carencia de información proveniente de los ensayos de laboratorios. Como solo se

contaba con un laboratorio de consolidación solo se pudo obtener información de un estrato de suelo, para lo cual se tomó la decisión que los asentamientos por consolidación primaria solo serían modelados para tener una perspectiva de cómo se comportaría el suelo, sin embargo, no representan información concluyente, la información es de carácter informativa mas no con el fin de ultimar información con respecto a lo encontrado en el software, puesto que el análisis que se hizo solo es perteneciente al estrato más blando para que tuviese representación en este trabajo.

En este apartado solo se expondrán las representaciones gráficas de todos los modelos propuestos de los dos softwares utilizados, con su respectiva explicación sobre lo que se evidencia en las imágenes, sin embargo y como se mencionó anteriormente, se utilizará el siguiente apartado para hacer un análisis más profundo que incluye la explicación de los resultados tanto numéricos en Excel como los encontrados con los softwares. De esta forma los resultados fueron los siguientes:

## Representación gráfica de los modelos en Phase 2

Figura 22: Asentamiento elástico un carril base 3.5m altura 0.5m (Autoría propia)

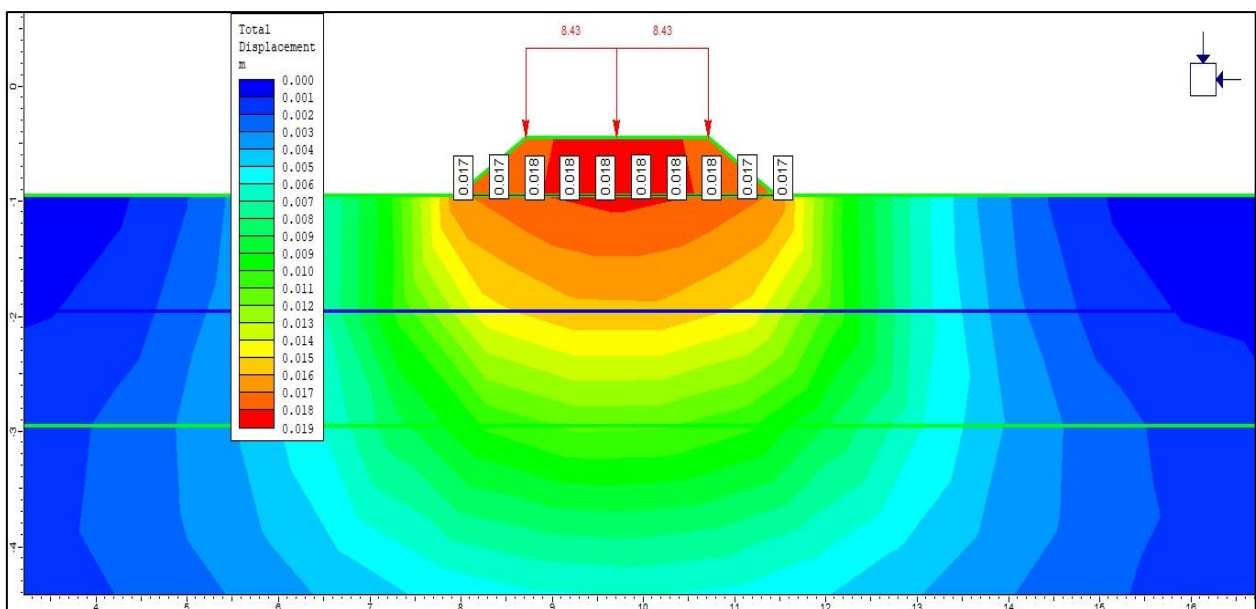


Figura 23: Sigma Z un carril base 3.5m altura 0.5m (Autoría propia)

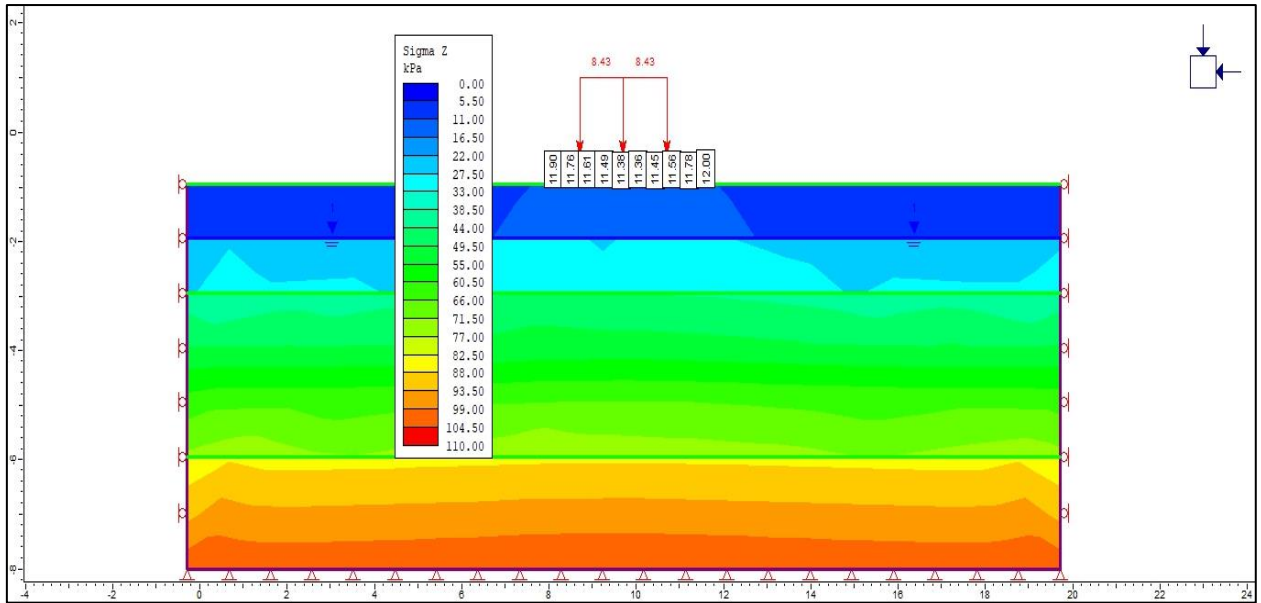


Figura 24: Asentamiento elástico un carril base 5.0m altura 1.0m (Autoría propia)

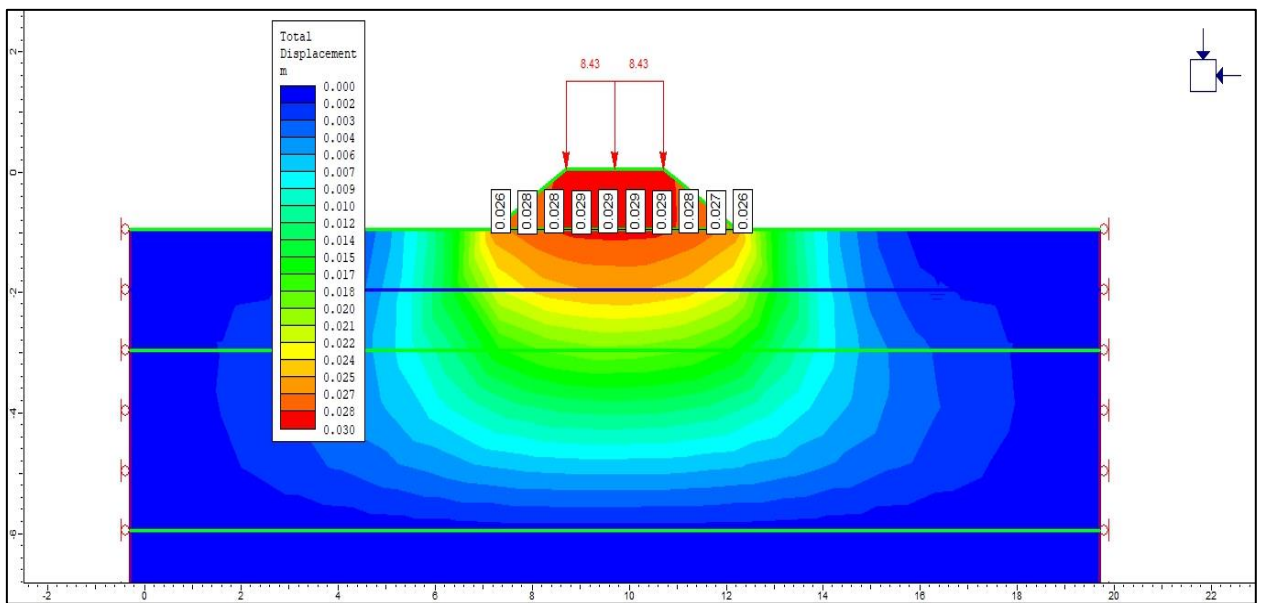


Figura 25: Sigma Z un carril base 5.0m altura 1.0m (Autoría propia)

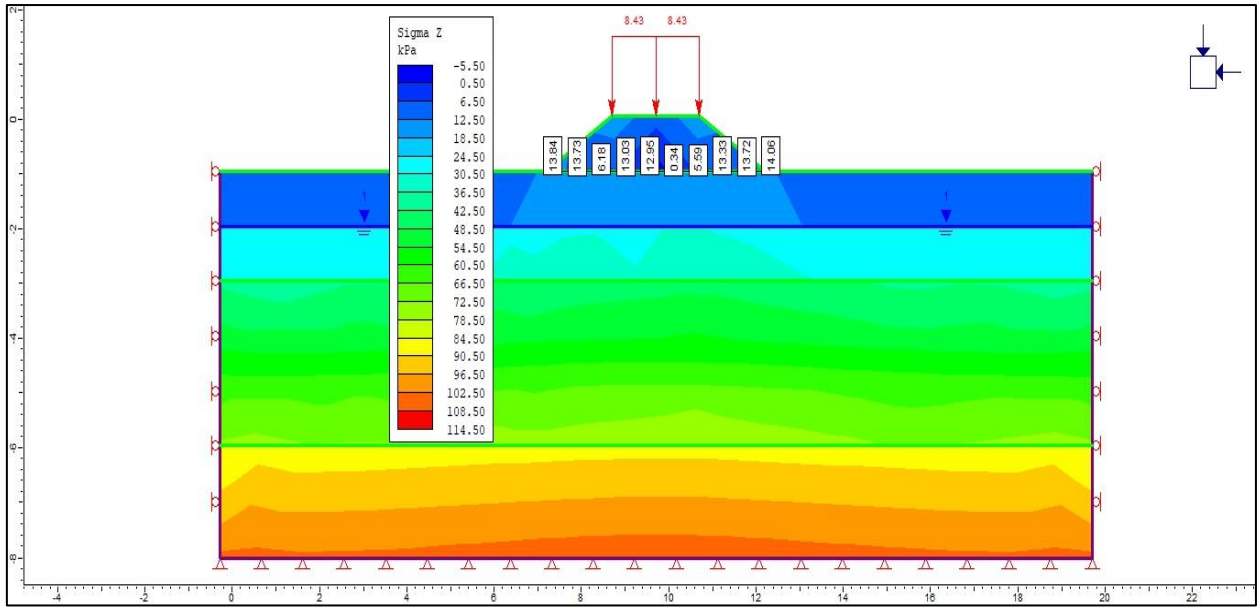


Figura 26: Asentamiento elástico un carril base 6.5m altura 1.5m (Autoría propia)

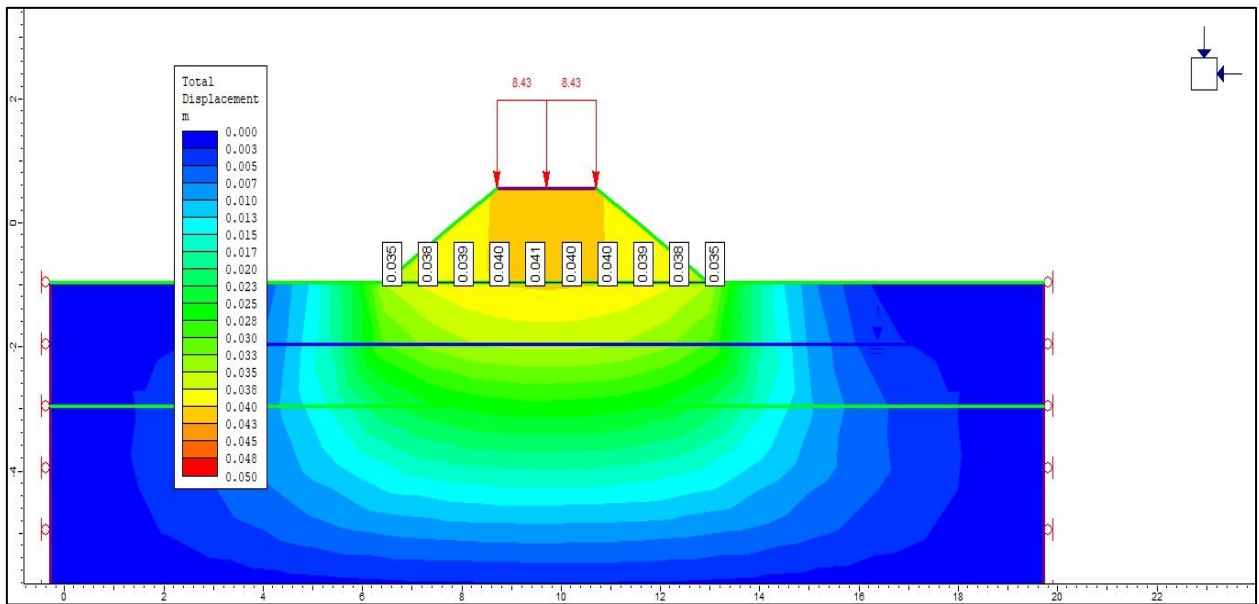


Figura 27: Sigma Z un carril base 6.5m altura 1.5m (Autoría propia)

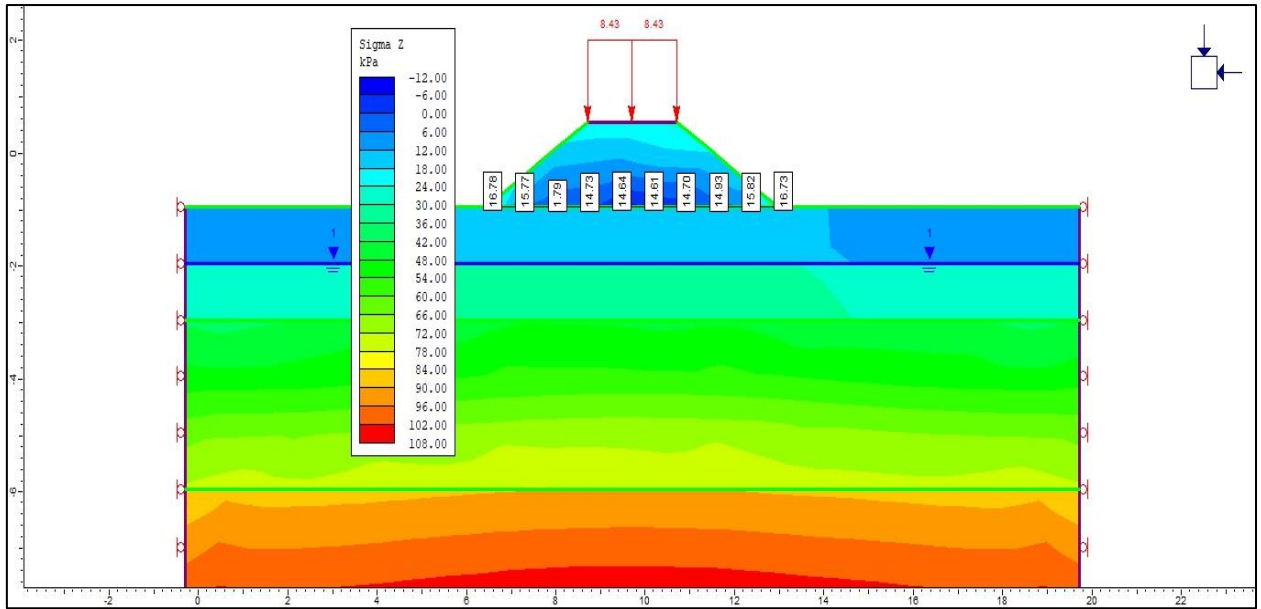


Figura 28: Asentamiento elástico dos carriles base 8.0m altura 0.5m (Autoría propia)

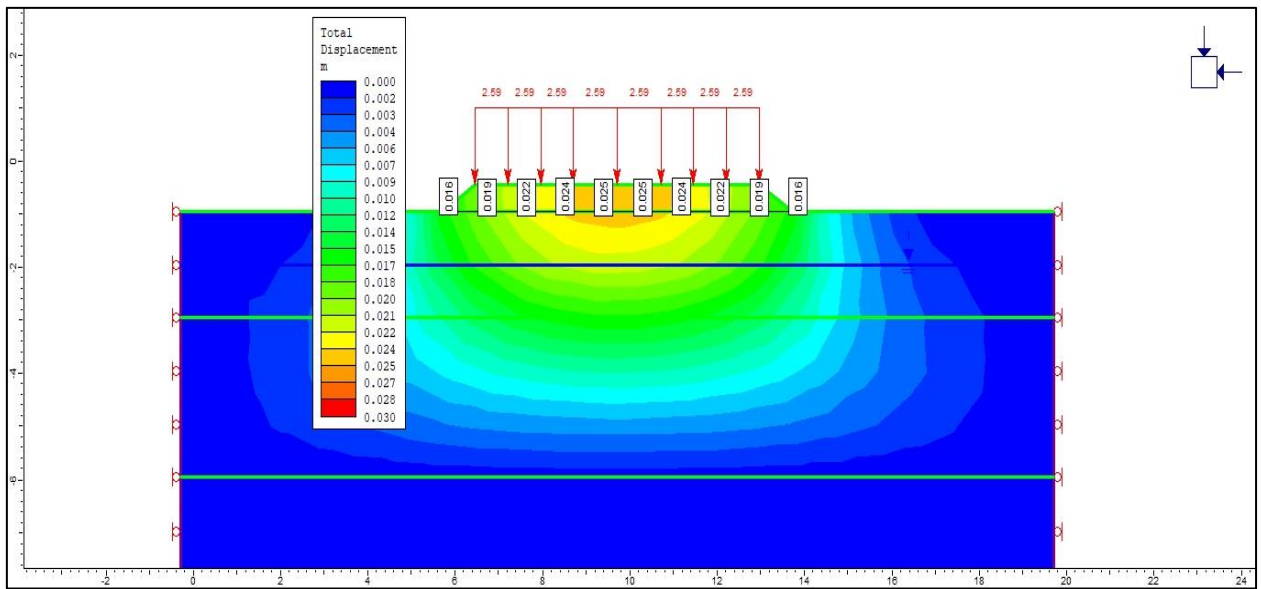


Figura 29: Sigma Z dos carriles base 8.0m altura 0.5m (Autoría propia)

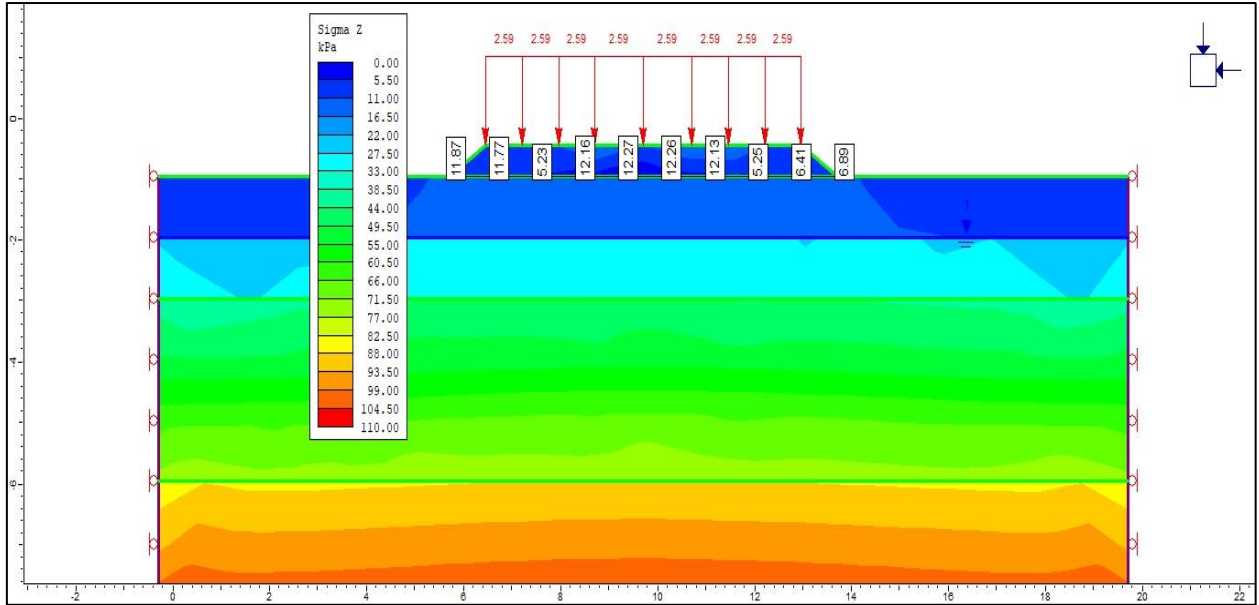


Figura 30: Asentamiento elástico dos carriles base 9.5m altura 1.0m (Autoría propia)

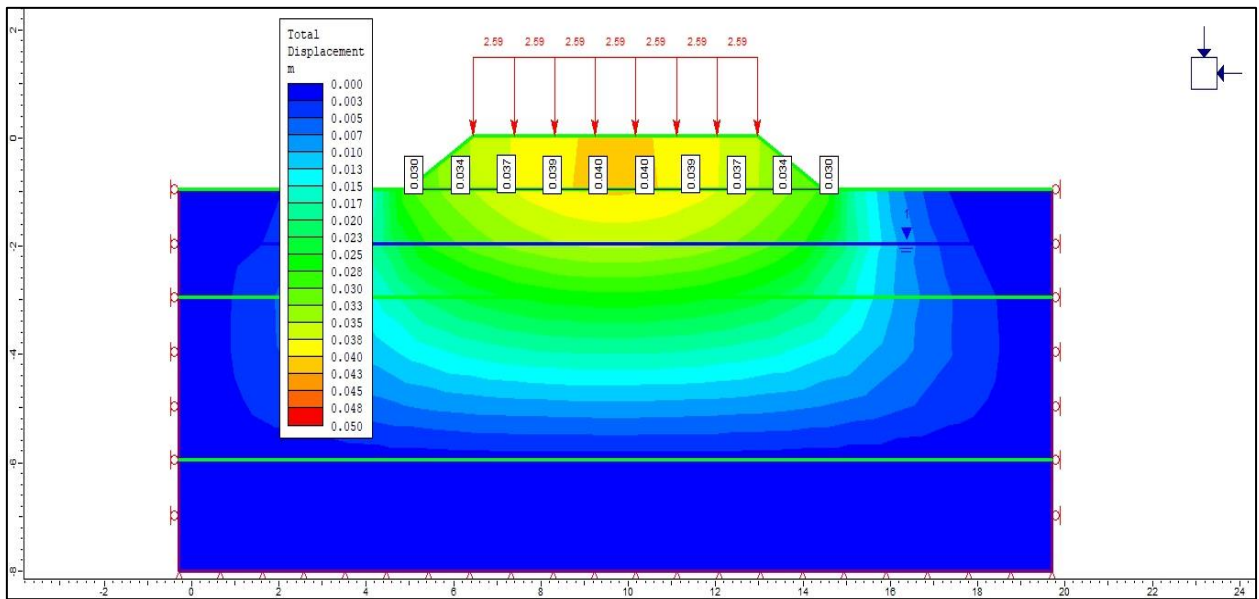


Figura 31: Sigma Z dos carriles base 9.5m altura 1.0m (Autoría propia)

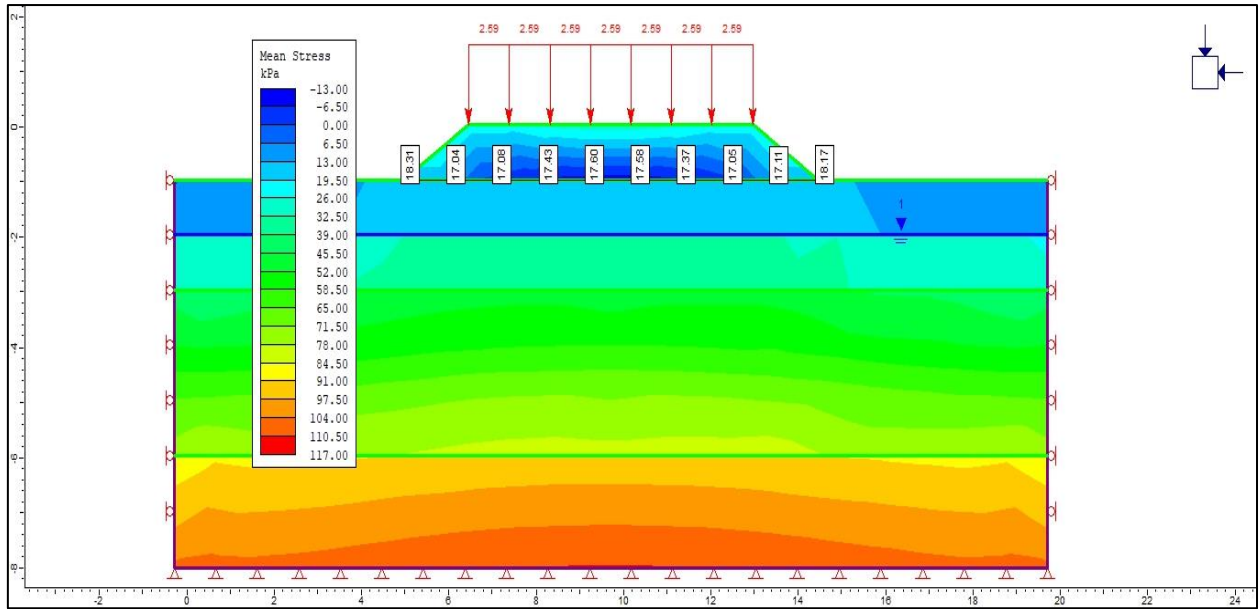


Figura 32: Asentamiento elástico dos carriles base 11.0m altura 1.5m (Autoría propia)

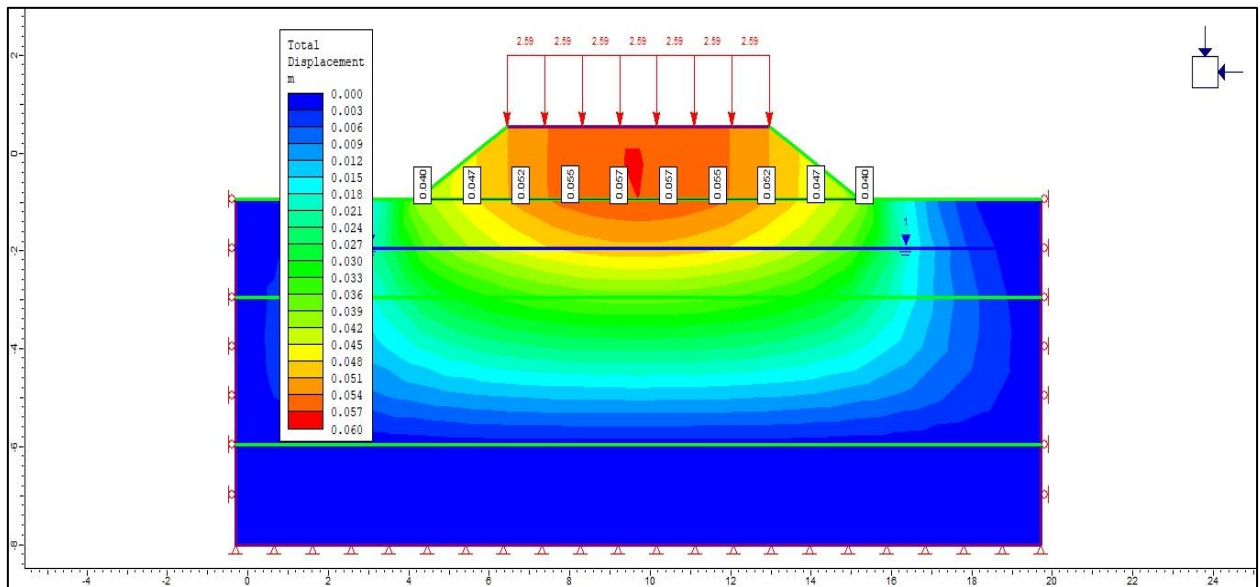
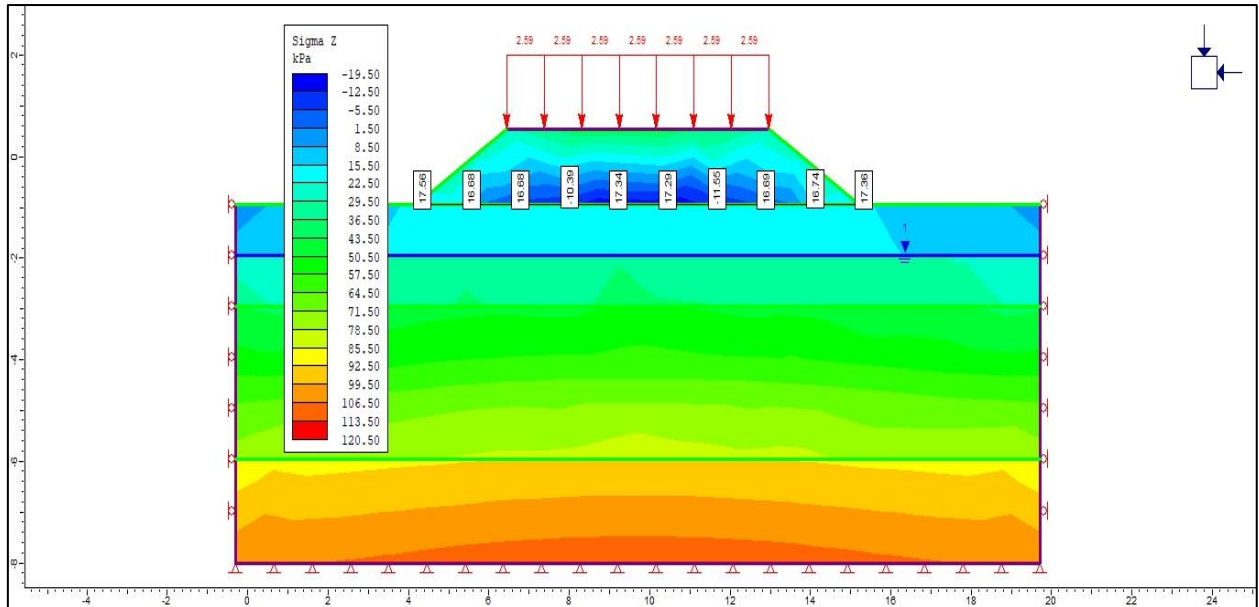


Figura 33: Sigma Z dos carriles base 11.0m altura 1.5m (Autoría propia)



Lo que se evidencia en las figuras 22,24,26,28,30 y 32 son los pantallazos de los modelos que se realizaron en el software Phase 2, en las imágenes se ven unas líneas longitudinales de color verde claro que representan la separación de la estratigrafía, se ve una línea azul oscura que representa el nivel freático y en superficie el diseño del terraplén con sus diferentes geometrías, tanto para la alternativa de un carril como para la de dos carriles. Se evidencia que en cada figura está representada la variación de las alturas y las bases del terraplén, además de la carga que le corresponde a cada caso. Por otra parte, y haciendo alusión al propósito de utilizar este software, radicaba en representar esquemáticamente el comportamiento del suelo en una escala cromatológica que indicara como iba a ser el asentamiento inmediato para las diferentes geometrías, las seis figuras se evidencian los valores del asentamiento en el contacto del terreno con el terraplén y también como las capas inferiores se asientan de igual forma hasta los cuatro metros de profundidad. Por último, se observa una escala en los ejes X y Y para la fácil lectura de los valores correspondientes a las dimensiones del terreno e infraestructura.

Por otro lado, están las figuras 23,25,27,29,31 y 33 que representan el mismo terreno de las figuras anteriores, solo que en este caso se evidencia el esfuerzo en Z que resulta ser por efecto de las cargas. En estas imágenes se encuentra una referencia numérica a la altura del contacto del terraplén con el suelo, esta referencia numérica es la transmisión de las cargas por efecto de la superestructura e infraestructura al terreno. Con esta representación se está verificando la carga máxima que está en contacto el terraplén con el suelo y la cual nos sirve para identificar, con el análisis numérico realizado en Excel, que la capacidad portante sea la adecuada para la carga solicitada.

### Representación gráfica de los modelos en Settle 3D

*Figura 34: Asentamiento por consolidación primaria a 20 años un carril base 3.5m altura 0.5m (Autoría propia)*

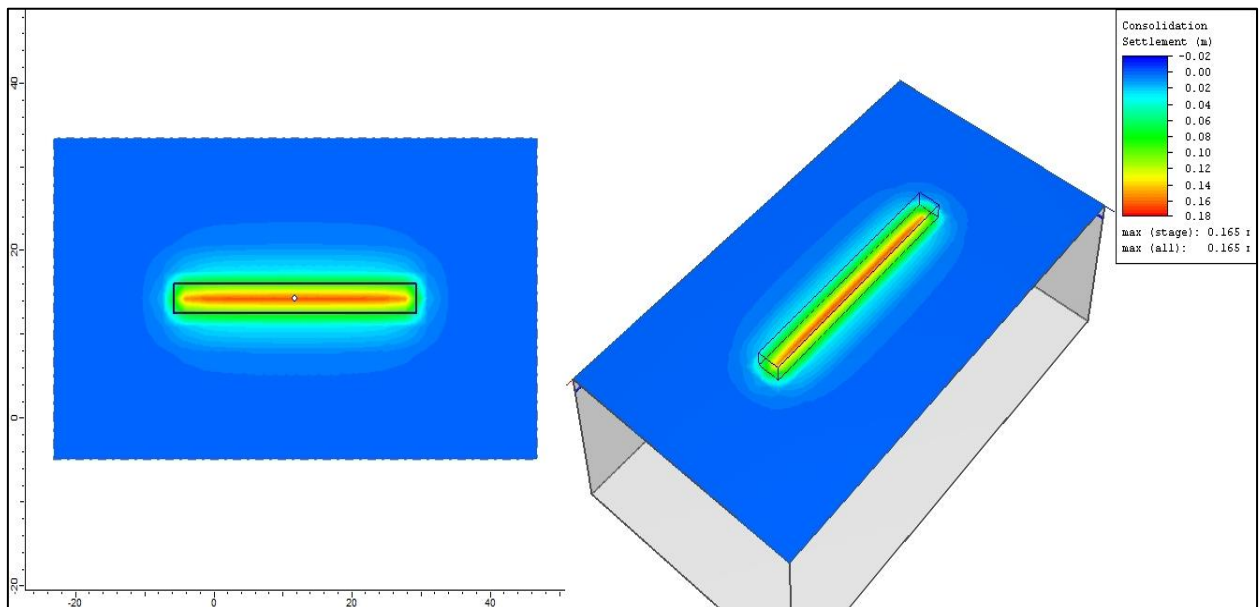


Figura 35: Asentamiento por consolidación primaria a 20 años un carril base 5.0m altura 1.0m (Autoría propia)

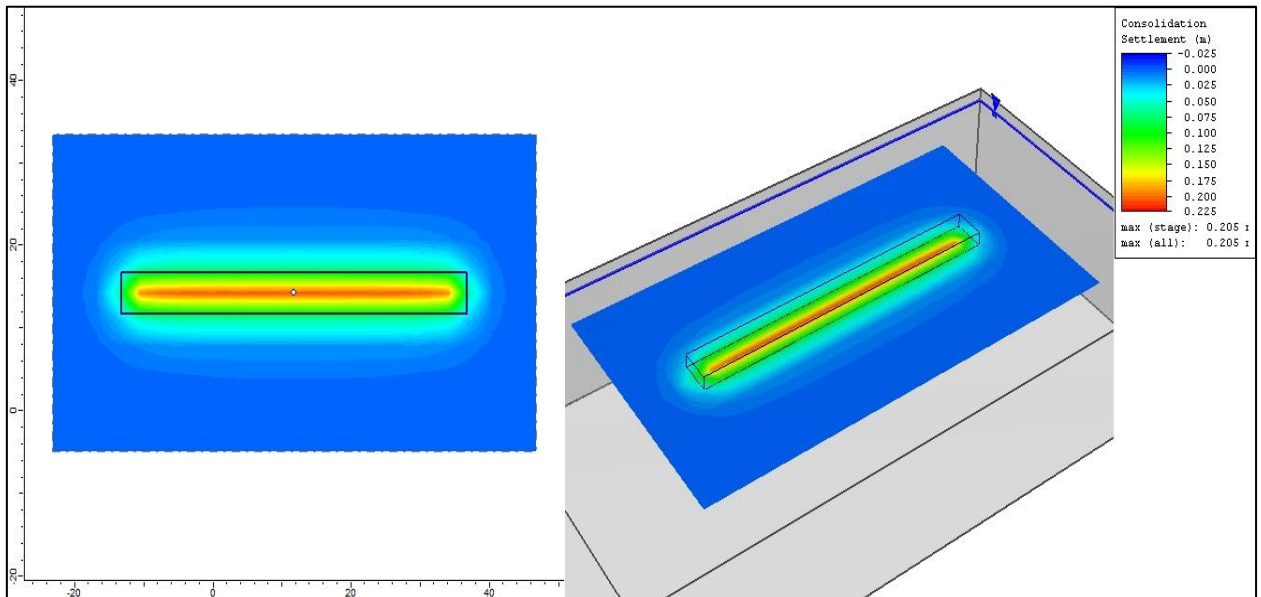


Figura 36: Asentamiento por consolidación primaria a 20 años un carril base 6.5m altura 1.5m (Autoría propia)

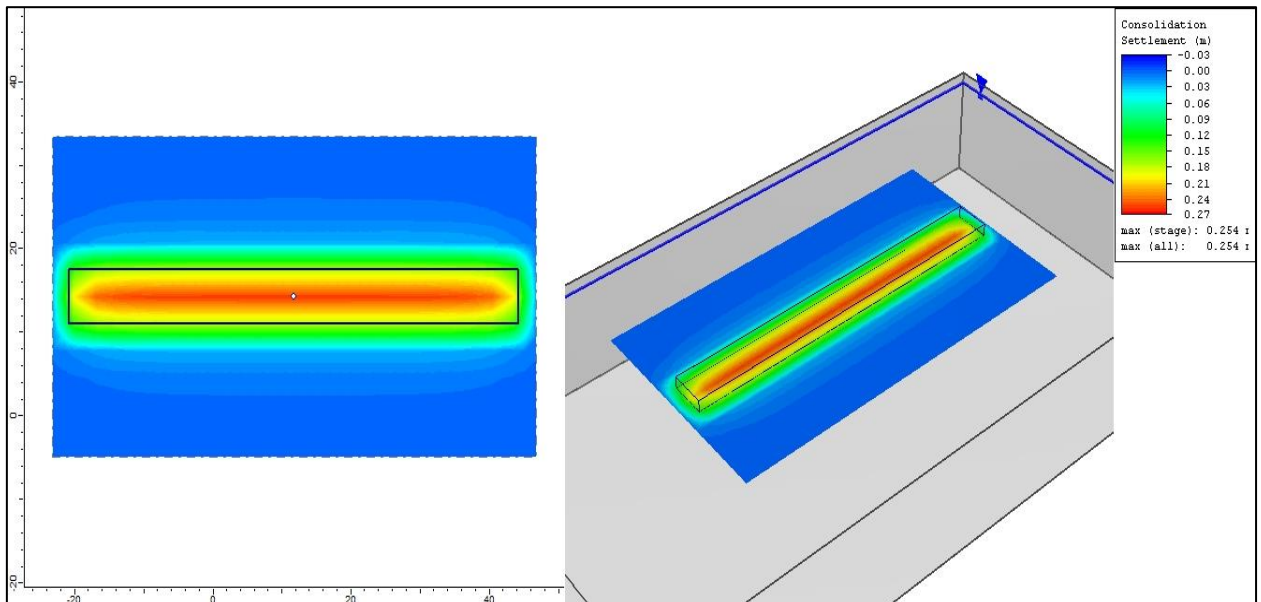


Figura 37: Asentamiento por consolidación primaria a 20 años dos carriles base 8.0m altura 0.5m (Autoría propia)

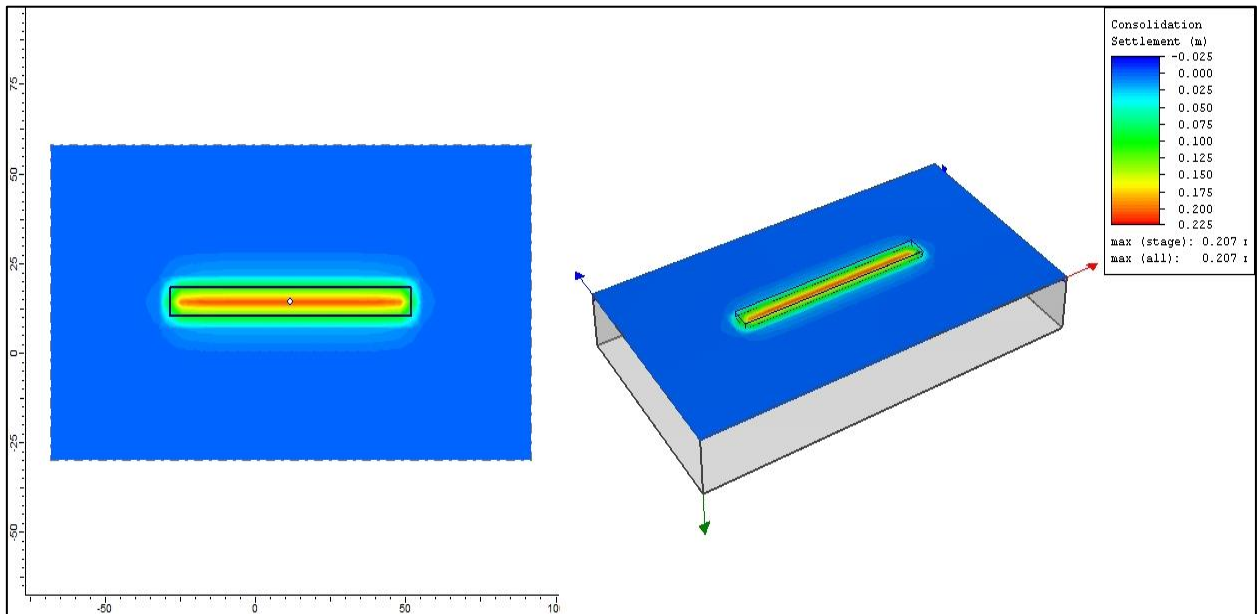


Figura 38: Asentamiento por consolidación primaria a 20 años dos carriles base 9.5m altura 1.0m (Autoría propia)

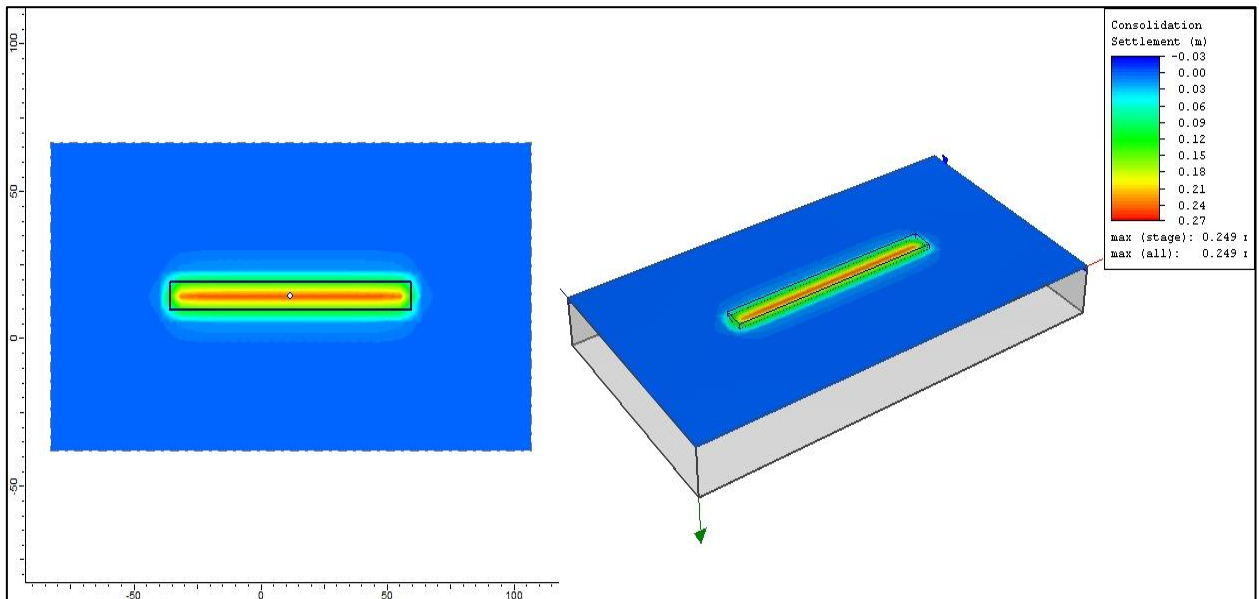
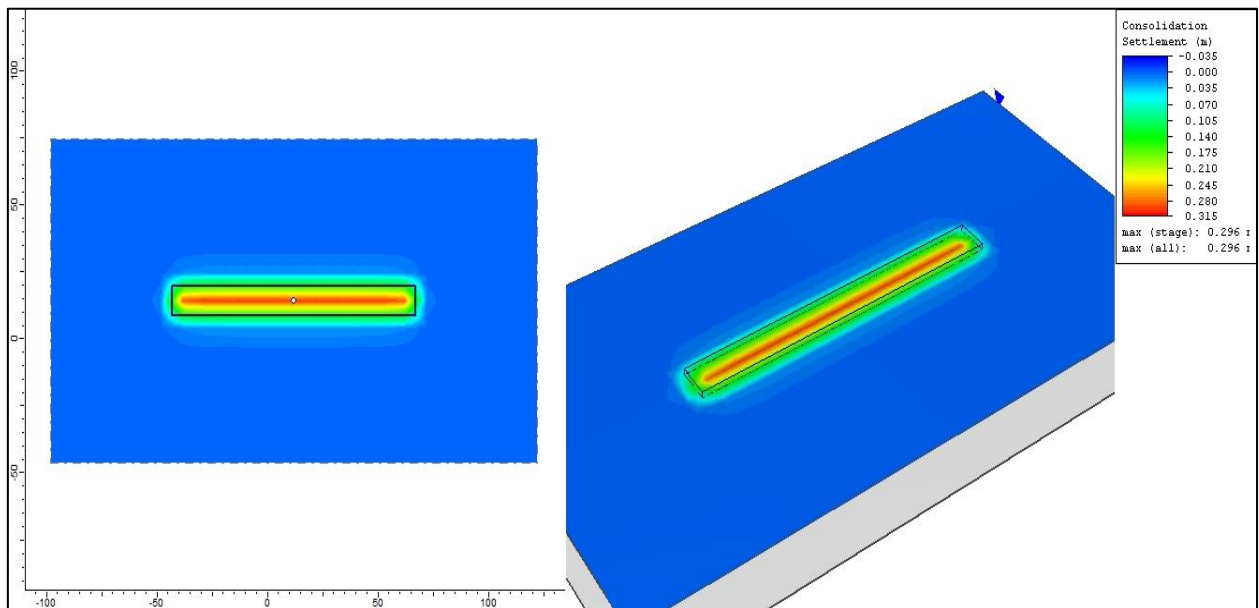


Figura 39: Asentamiento por consolidación primaria a 20 años dos carriles base 11.0m altura 1.5m (Autoría propia)



En las figuras 34,35,36,37,38 y 39 son los pantallazos extraídos del software de modelación Settle 3D que al igual que Phase 2 es un programa que permite hacer análisis del comportamiento mecánico del suelo. En este caso este programa se utilizó para verificar cual sería el asentamiento por consolidación primaria del terreno, teniendo en cuenta las características del estrato de suelo al cual se le fue aplicada el ensayo de laboratorio de consolidación, en este punto es importante volver aclarar que este análisis no representa información concluyente, puesto que solo se está analizando un estrato de suelo el cual se considera por ser el más blando, además que los informes de laboratorio solo hacen un análisis de consolidación. Sin embargo, sirve como referencia para futuros estudios, así pues, se usaron más herramientas de Settle 3D ya que este programa permite estimar el valor de asentamiento por consolidación primaria a 20 años y muestra una tendencia de cómo se va comportando el

suelo en este periodo. Al igual que los otros apartados este análisis se profundizará en el apartado de análisis de la información recolectada.

### **Análisis de resultados**

En este último apartado, de este capítulo, se destinó para realizar el análisis de resultados de todo lo anterior expuesto, esto con el fin de concentrar la atención en un solo apartado que diese a profundidad todo el análisis requerido de esta sección del trabajo. De esta forma a lo largo de este apartado se realizará el análisis de resultados, detallado, de las capacidades portantes en condiciones drenadas y no drenadas, los asentamientos tanto elásticos como de consolidación primaria y un conjunto de graficas y tablas que se extrajeron de los modelos de elementos finitos que permiten profundizar en la explicación de lo que se obtuvo y que posteriormente servirá para determinar cual de las propuestas presentadas es más viable.

En cuanto al análisis de lo encontrado en las anteriores tablas y gráficos, se realizó para siete alternativas, la primera alternativa es con el animo de corroborar si el suelo que se encuentra actualmente cumplía con los parámetros de diseño y con la geometría necesaria, esto teniendo en cuenta que actualmente solo transitan locomotoras diésel GE UB-10 destinadas para carga y tránsito de personas, por otra parte se encontró en una medición, en el terreno, que la geometría del actual terraplén se asimilaba a la geometría propuesta de la tercera alternativa por lo que su análisis sería idéntico. Por otro lado, las seis alternativas restantes corresponden a la variación de la geometría del terraplén de las dos propuestas de tránsito que se plantearon en principio; en una sola dirección y bidireccional.

Con esto explicado y con la aproximación que se hizo anteriormente lo que se analizó en cuanto a capacidad portante en condiciones drenadas y no drenadas del terreno en cuestión fue:

- ✓ Teniendo en cuenta la tabla 12, la capacidad portante en condiciones drenadas va inversamente proporcional con la geometría del terraplén, es decir, a medida que el terraplén aumenta su base la capacidad portante va disminuyendo, lo anterior se evidencio en las siete alternativas. Se identificó que el terraplén con 3.5m de base tenía una capacidad portante de 35.29 kPa, que corresponde al de más capacidad y que el terraplén de 11m tenía una capacidad portante de 23.82 kPa siendo el menos portante.
- ✓ En la tabla 12 y 13 y de acuerdo con los valores encontrados, se evidencia que el terreno esta más propenso a sufrir una falla por punzonamiento, esto siempre y cuando no se respeten las geometrías descritas en las tablas. Sin embargo, el terreno destinado para el tránsito del tren es de 13 m de ancho, por lo que se infiere que el suelo en condiciones drenadas o no drenadas es apto para cimentar un terraplén hasta de 13 metros de ancho.
- ✓ Teniendo en cuenta la tabla 13, la capacidad portante del suelo en condiciones no drenadas demuestra tener una mejor aceptación en cuanto capacidad portante, el suelo es más resistente al variar la geometría del terraplén respecto a lo que se evidencia en el análisis de condiciones drenadas. A esto se le puede atribuir que el nivel freático este a 2 metros y que las características propias del suelo este permitiendo una mejor capacidad de respuesta en condiciones no drenadas.
- ✓ En cuanto a la capacidad portante en condiciones no drenadas el suelo muestra un rango partiendo desde la base más pequeña de 3.5 metros una capacidad portante de 68.55 kPa y su base más grande 11.0 metros una capacidad portante de 50.74 kPa, lo

que demuestra que la actual estructura es adecuada tanto para lo que hay como para lo que se espera haya en un futuro.

- ✓ Como la geometría es igual en condiciones drenadas y no drenadas, se puede decir que en ambas condiciones el suelo está en condiciones muy favorables de resistir esfuerzos no superiores a los 23.82 kPa teniendo en cuenta que el suelo no tiene ninguno mejoramiento o refuerzo en sus cimientos.
- ✓ Por último y de acuerdo con lo anterior el terreno es apto para soportar cualquiera de las geometrías descritas y es apto para que sigan transitando trenes de 50 toneladas de carga por vagón.

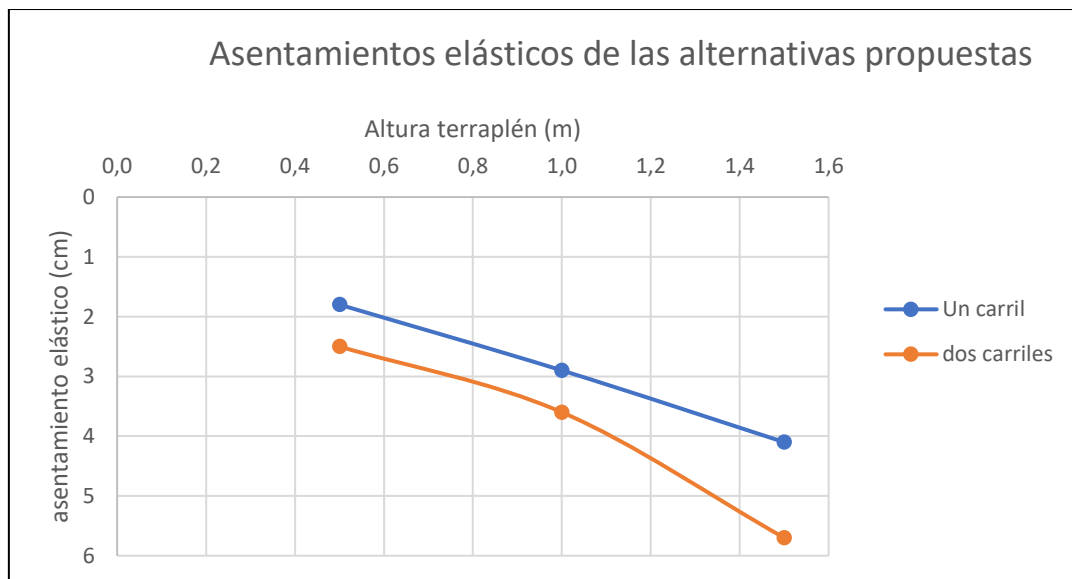
En cuanto al tema de análisis de asentamientos respecta y como se dijo anteriormente, se realizó el análisis para asentamientos elásticos y por consolidación primaria. Como se expuso en los apartados anteriores se realizó el análisis numérico y por modelación, los resultados muestran un margen de diferencia bajo no superior a 1 cm, lo que se puede interpretar que las deducciones que se realizaron son concluyentes con lo que se espera pase en el terreno. Así pues, el análisis de asentamientos elásticos y por consolidación primaria se encontró que:

- ✓ En primera instancia y de acuerdo con los valores de la tabla 14 se encuentra que los asentamientos inmediatos que sufre la estructura una vez se realizó el proyecto van desde los 2.3 cm a los 4.8 cm, esto teniendo en cuenta la variación de la geometría y las diferentes cargas que están actuando en cuanto a volumen de material. De acuerdo con la UIC, los asentamientos por efecto del terreno no pueden superar los 8 cm siempre y cuando sean lineales y no haya una variación en asentamientos superior a

los 0.2 mm. Por lo que este terreno sufre asentamientos por dentro del rango internacional estipulado.

- ✓ Los asentamientos elásticos según Phase 2 van desde los 1.8 cm hasta los 5.7cm, siguen estando dentro del rango admisible. Se cree que la variación de los asentamientos no es mayor a 1cm con respecto a los análisis numéricos, debido a que estos programas usan ecuaciones diferenciables más avanzadas, lo que deja este margen de error, sin embargo, no es considerable y se puede afirmar que tanto el valor numérico como los valores que muestra el modelo son concluyentes y son confiables en el diseño.

*Figura 40: Grafico de asentamientos elásticos vs altura de terraplén (Autoría propia)*



- ✓ De acuerdo con la figura 40 se puede evidenciar que los asentamientos elásticos según el programa Phase 2 van variando de una forma casi que lineal de acuerdo a la variación de la altura del terraplén, por lo que se considera que las alturas definidas son las que concuerda con el asentamiento máximo de 6cm, por lo que una variación

en la altura podría ocasionar un asentamiento inmediato mayor que no cumple con los requerimientos técnicos indicados en la norma UIC.

- ✓ En cuanto a los asentamientos por consolidación primaria en la figura 41 y 42 se puede ver reflejada la tendencia del asentamiento a 20 años, que es el tiempo de vida útil antes de un mejoramiento del terreno, se evidencia que aproximadamente después de los 20 años el suelo se empieza a estabilizar y se refleja que sería aproximadamente su máximo asentamiento por consolidación primaria.

Figura 41: Grafico de asentamiento por consolidación primaria vs tiempo (Autoría propia)

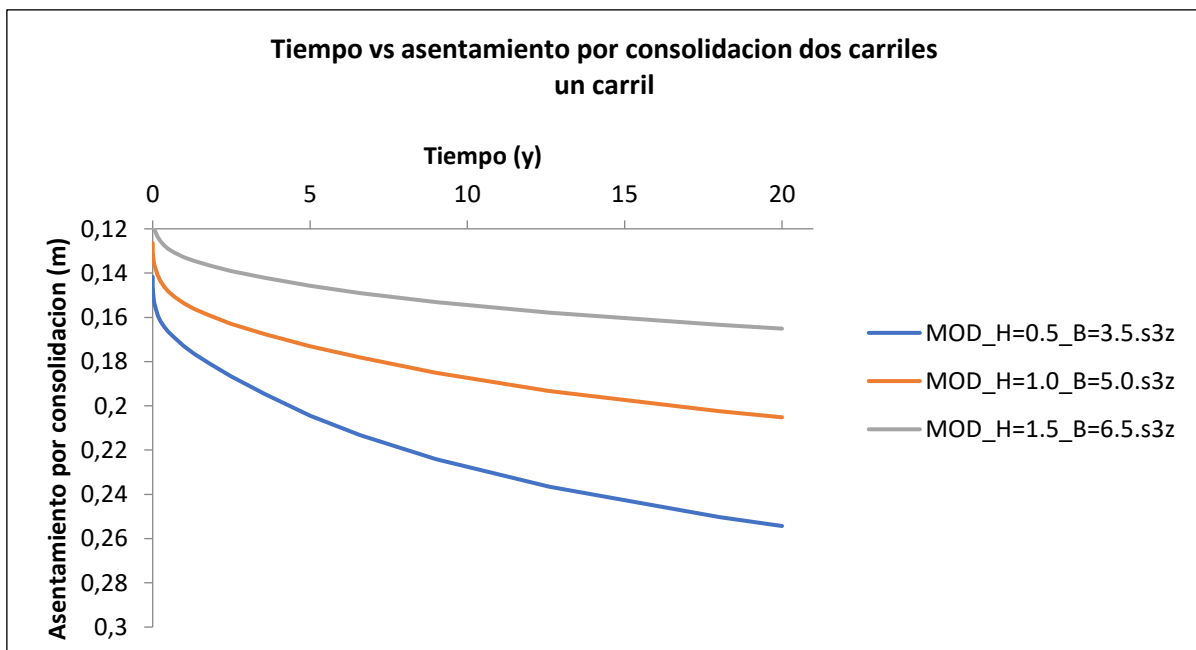
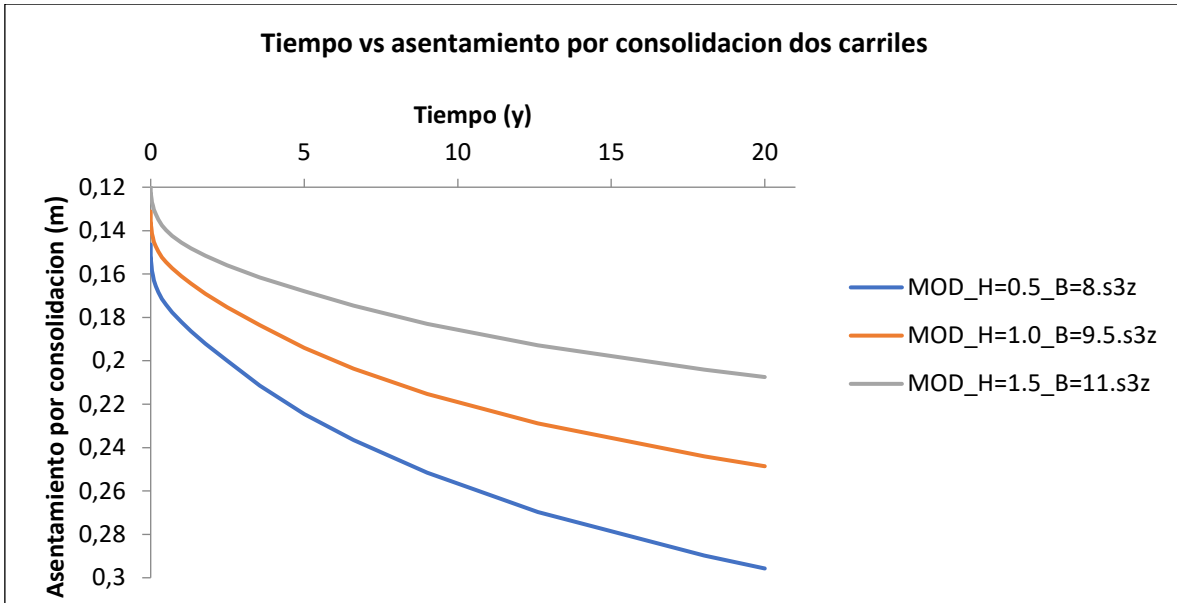


Figura 42: Grafico de asentamiento por consolidación primaria vs tiempo (Autoría propia)



- ✓ De los tres anteriores gráficos se pudo identificar que con respecto a lo establecido en la norma UIC el terreno tendría un asentamiento total conforme a lo que solicita la norma, por lo que cualquiera de las alternativas el terreno sería apto para soportar las cargas.
- ✓ Por último y de acuerdo con lo expresado en los anteriores párrafos se cree adecuado que los mejores resultados para el diseño serían los arrojados por los modelos de elementos finitos, ya que su precisión es más elevada en cuanto los procesos matemáticos respecta. Se evidencia que los cálculos numéricos están en un margen de error inferior a 1 cm por lo que se asume que los resultados están bien analizados, sin embargo, por confiabilidad del proyecto se deduce la siguiente tabla como los resultados finales del análisis mecánico y de respuesta del suelo.

Tabla 15: Síntesis del análisis mecánico y de respuesta del suelo (Autoría propia)

	Terraplén			Suelo	
ALTERNATIVAS DE ANALISIS	Base (m)	Altura (m)	Carga actuante Sigma Z (kPa)	Asentamiento elástico (cm)	Asentamiento por consolidación primaria (cm)
Línea férrea actual condiciones 2020 Un carril	5,0	1,0	14,04	2,9	20,5
	Terraplén			Suelo	
ALTERNATIVAS DE ANALISIS	Base (m)	Altura (m)	Carga actuante Sigma Z (kPa)	Asentamiento elástico (cm)	Asentamiento por consolidación primaria (cm)
Propuesta de diseño 1, MOD_H=0.5 B=3.5 Un carril	3,5	0,5	12,00	1,8	16,5
Propuesta de diseño 2, MOD_H=1.0 B=5.0 Un carril	5,0	1,0	14,04	2,9	20,5
Propuesta de diseño 3, MOD_H=1.5 B=6.5 Un carril	6,5	1,5	16,78	4,1	25,4
	Terraplén			Suelo	
ALTERNATIVAS DE ANALISIS	Base (m)	Altura (m)	Carga actuante Sigma Z (kPa)	Asentamiento elástico (cm)	Asentamiento por consolidación primaria (cm)
Propuesta de diseño 4, MOD_H=0.5 B=8.0 Dos carriles	8,0	0,5	12,33	2,5	20,7
Propuesta de diseño 5, MOD_H=1.0 B=9.5 Dos carriles	9,5	1,0	14,60	3,6	24,9
Propuesta de diseño 6, MOD_H=1.5 B=11.0 Dos carriles	11,0	1,5	17,56	5,7	29,6

Drenado		No Drenado	
Capacidad portante admisible (kPa)	Chequeo	Capacidad portante admisible (kPa)	Chequeo
31,52	SUELO APTO	60,71	SUELO APTO
Drenado		No Drenado	
Capacidad portante admisible (kPa)	Comprobación	Capacidad portante admisible (kPa)	Comprobación
35,29	SUELO APTO	68,55	SUELO APTO
31,52	SUELO APTO	60,71	SUELO APTO
28,86	SUELO APTO	56,50	SUELO APTO
Drenado		No Drenado	
Capacidad portante admisible (kPa)	Comprobación	Capacidad portante admisible (kPa)	Comprobación
26,82	SUELO APTO	53,86	SUELO APTO
25,18	SUELO APTO	52,06	SUELO APTO
23,82	SUELO APTO	50,74	SUELO APTO

Finalmente, la tabla 15 es la síntesis de la información expuesta a lo largo del capítulo 7, en esta tabla se encuentran todos los resultados sintetizados de acuerdo a su confiabilidad para este proyecto. Como los valores ya fueron rectificadas con dos métodos, se encontró conveniente que los resultados que están dentro de la tabla fuesen extraídos de la información de los modelos de elementos finitos, de esta forma la tabla está estructurada para mostrar las siete alternativas analizadas con sus geometrías, sus cargas actuantes, sus asentamientos elásticos y por consolidación primaria, su capacidad portante en condiciones drenadas y no drenadas, además de su nomenclatura para diferenciar cada propuesta.

Con esta tabla expuesta se puede empezar hacer una aproximación inicial a lo que sería una conclusión de este trabajo, ya que se evidenció en los análisis que de las siete alternativas propuestas las siete cumplen con los requerimientos expresados por las normas internacionales, la capacidad portante del suelo es suficiente para soportar la infraestructura y superestructura de la vía férrea y que las dimensiones del terraplén son aptas para emplazar una vía férrea de uno o dos carriles. Por último, en el capítulo siguiente se tomará una postura sobre cuál de las alternativas es más viable frente a las otras y la que es mejor para su construcción y elaboración posterior.

## **Capítulo 8: Análisis de la viabilidad geotécnica de las alternativas propuestas**

En capítulos anteriores ya se realizó todo el análisis respectivo que se requieren para hablar de una prefactibilidad geotécnica para la implementación de un tren superficial destinado para pasajeros y carga. Sin embargo, este capítulo está destinado para identificar la viabilidad que tendría lo propuesto anteriormente para su futura implementación. Por lo tanto, en este capítulo se encontrará información asociada a la posible implementación de lo propuesto en temas geotécnicos, posibles implicaciones geotécnicas con respecto a fallas y por último cuál de las seis alternativas propuestas es más efectiva. Esto con la intención de aterrizar la información y poder seleccionar una alternativa que esté sujeta a los requerimientos en tema de transporte en la ciudad de Bogotá.

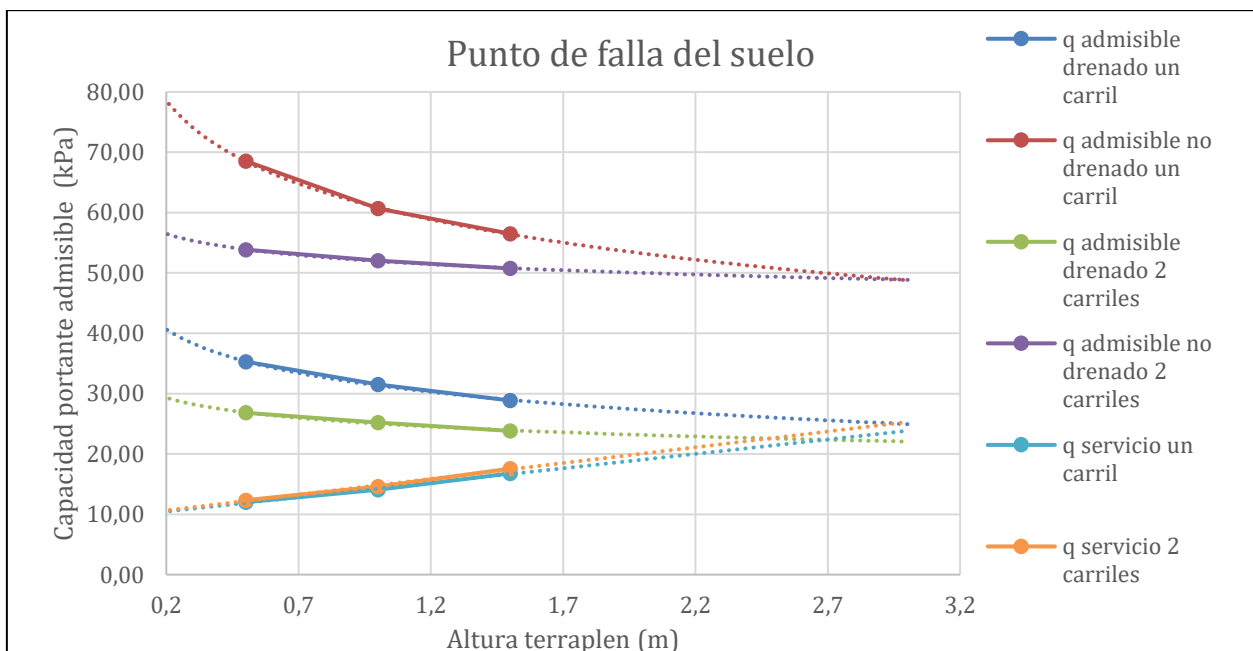
En primera instancia es pertinente realizar un análisis final sobre lo que se encontró en el capítulo 7, puesto que como se observó en el final del capítulo se realizó una síntesis de lo recolectado a lo largo del capítulo, que se evidenció en la tabla 15. En esta tabla se encuentran las características mecánicas y de respuesta del suelo con sus respectivos chequeos con base a la literatura de la geotecnia, dentro de estos chequeos están los de capacidad portante en condiciones drenadas y no drenadas que en parte tienen gran peso para la elaboración de la vía férrea, pues estos son los que determinan si el suelo es apto para recibir estas cargas o no. Con lo anterior descrito y como se puede observar en la tabla 15 las seis alternativas propuestas con sus variaciones geométricas y sus cargas respectivas demostraron ser aptas para el terreno, a lo que se puede traducir como que todas las alternativas son geotécnicamente viables, suponiendo que los parámetros de entrada están sujetos a verificación en el propio terreno. Sin embargo, con estas

suposiciones el terreno soportaría una nueva estructura con nuevas cargas y poder continuar con estudios más profundos que determinen el diseño más acertado para la vía férrea.

Adicionalmente es importante resaltar que estas seis alternativas son teniendo en cuenta las características de solo uno tramo de la línea férrea de la Sabana y que las condiciones pueden variar a lo largo del terreno, sin embargo estas alternativas tiene una geometría en común que es fácilmente replicable a lo largo de todo el tramo, puesto que según (MARÍN, 2013) a lo largo de todo tramo férreo el ancho mínimo de la calzada es de 13 metros, lo que lo hace viable en los 24km restante aproximadamente.

Por otro lado, esta las implicaciones que resultarían si al momento de ejecutar la obra no se cumpliese con las recomendaciones dadas, para lo cual se creyó necesario mostrar cual sería la altura de falla para las diferentes alternativas con respecto a su capacidad portante. Siendo esto un factor de falla se realizó la siguiente gráfica:

Figura 43: Punto de falla por capacidad portante (Autoría propia)



En la figura 43 lo que se observa es la tendencia de la capacidad portante del suelo cuando se varia su altura, ya que la altura se considera como un factor que al variar pueda generar falla por capacidad portante, no se considera el ancho porque es un factor limitado en el sentido que la calzada del terreno en su mínimo ancho es de 13 metros y si se supera interferiría con la malla vial. Así pues, en el grafico se representa la tendencia de las alternativas de acuerdo a sus capacidades portantes en condiciones drenadas y no drenadas, con esto se puede observar que cuando se tiene en cuenta que el suelo se encuentra en condiciones drenadas la altura del terraplén no puede superar los 2.5 metros en ninguno de los dos casos (uno o dos carriles), ya que se observa que aproximadamente a esta altura el suelo fallaría por capacidad portante siempre y cuando no se varié la carga por efecto del tren.

Todo lo anterior es analizable siempre y cuando se tenga en cuenta que, según la norma internacional UIC, la vida útil de un terraplén es de 20 a 30 años aproximadamente antes de que el suelo y el terraplén requieran un mejoramiento o un mantenimiento.

Con todo lo anteriormente dicho se puede conjeturar que con las solicitudes que demanda el espacio para el tránsito del tren y los requerimientos de transporte en la ciudad de Bogotá, la alternativa más viable, eficiente y con el comportamiento mecánico y de respuesta del suelo más apto, en cuanto al diseño del terraplén, sería la alternativa de modelo número 4; que corresponde a un terraplén con una altura de 0.5 m y base de 8 m. Se considera que esta alternativa es más apropiada porque:

1. Es un terraplén con espacio suficiente para el tránsito de dos trenes, que permite el flujo continuo de los trenes que van desde su inicio hasta su final.

2. El terraplén demuestra que sus propiedades son las suficientes para que el suelo soporte las cargas provenientes de la infraestructura y superestructura y ofrezca una brecha de error para cualquier variación imprevista en su carga.
3. Por su geometría los materiales destinados para la construcción del terraplén serían menores puesto que el volumen es menor frente al de las alternativas 5 y 6, lo que se traduce en menor inversión económica y de tiempo de ejecución.
4. En cuanto asentamientos, el suelo tiene mejor respuesta frente a la carga impartida por este terraplén y sus cargas superior tanto para asentamientos elásticos como para los de consolidación primaria.

Con lo anterior dicho se puede asegurar que la opción escogida es la más eficiente y eficaz para su elaboración y duración en su periodo de vida útil, además es importante recalcar que la opción escogida no requiere de algún mejoramiento especial en el terreno y que por las características de la superestructura hay valores que se pueden disminuir por las propiedades del balasto y subbalasto que disipan cargas. Por lo demás explicado se puede asegurar que sería la condición más viable geotécnicamente. En cuanto a construcción sería la más económica y rápida de elaborar, cumpliendo con las especificaciones requeridas por las normas nacionales e internacionales.

## **Capítulo 9: Análisis de la viabilidad económica del proyecto**

Con el fin de darle un propósito completo a la prefactibilidad del proyecto se consideró necesario realizar un estimado en el precio total del proyecto. De esta manera el capítulo 9 tiene como objetivo hacer un análisis de la viabilidad económica que tendría el proyecto partiendo de un supuesto, cabe resaltar que esta viabilidad es un primer acercamiento a lo que en verdad podría costar el proyecto, para lo cual se usa como referencia la literatura de ingeniería de costos y construcciones para obtener una estimación de lo que se espera puede llegar a costar la construcción. Adicionalmente este capítulo tiene otro propósito y es comparar los precios de proyectos que se están realizando en Bogotá los cuales sirven como eje de referencia para indicar la factibilidad económica y el orden de magnitud de lo que se espera sea destinado para una futura línea ferra en el terreno del tren de la Sabana.

En primera instancia es pertinente realizar un contexto sobre los planes de desarrollo que se vienen elaborando en la ciudad de Bogotá en materia de movilidad. En el año 2020 la ciudad viene realizando grandes inversiones para el mejoramiento de los sistemas de transporte, se habla de por lo menos tres inversiones sustanciales para la movilidad de Bogotá, entre estas hay dos proyectos férreos que consisten en implementar sistemas de transporte públicos para pasajeros que puedan conectar diferentes localidades e inclusive municipios aledaños, el primero y más importante son los 23.9km de viaducto que se empezaran a construir en el año 2021 correspondiente a la primera línea de metro de Bogotá, adicionalmente está el proyecto denominado RegioTram occidente que tiene como objetivo comunicar los municipios cercanos a Bogotá ubicados al occidente con el interior de la ciudad mediante un sistema férreo de tipo tren

tram. Por otra parte, se contempla la nueva troncal de Transmilenio ubicada en la av. 68, que haría parte de todo el sistema de troncales que actualmente hay en la ciudad.

De acuerdo con plan de Desarrollo Económico, Social, Ambiental y de Obras Públicas del Distrito Capital 2020 – 2024 (PDD), estos tres proyectos hacen parte del mejoramiento de la movilidad en Bogotá, existe varios proyectos con gran importancia, sin embargo, estos tres sirve como referencia en materia de costos, ya que cada uno de ellos tiene una cifra económica que ha sido destinada para su elaboración y que se encuentra en los registros públicos para consulta.

En materia de presupuesto es importante conocer los recursos que se tienen destinados para la elaboración de todos los proyectos de movilidad que se tienen contemplados. Con base a lo que se encuentra en el documento del PDD organizado por la actual alcaldesa de Bogotá Dr. Claudia López, se encuentra estipulado en un apartado el presupuesto aproximado de lo que se tiene contemplado para el desarrollo de obras públicas de movilidad en Bogotá, en este documento se habla que son más de 34 billones de pesos colombianos destinados a cumplir con el propósito de hacer Bogotá un modelo de movilidad, multimodal, incluyente y sostenible. Que en síntesis este presupuesto va destinado para el desarrollo de nuevas alternativas de transporte como lo son los sistemas férreos, troncales, cables aéreos, etc. Entre estas alternativas está destinado una parte a lo que hace referencia este proyecto y es implementar un sistema de transporte masivo férreo en la actual línea de la Sabana llamado RegioTram norte que piensa comunicar la ciudad con los municipios al norte.

Con la anterior contextualización se puede empezar hablar del objetivo principal de este capítulo que es hacer una estimado del costo que tendría completamente el proyecto, en este punto se puede utilizar como referencia lo que se tiene pensando a futuro dentro del PDD de

realizar RegioTram norte, que consiste en un sistema de transporte férreo con características similares a las de RegioTram occidente. De acuerdo con un artículo publicado en la revista web del tiempo lo que se sabe del proyecto es que RegioTram norte tendría aproximadamente 48 km de recorrido, circularía por la zona de estudio de este proyecto y cumpliría con las mismas características de RegioTram occidente.

Teniendo en cuenta que las características son similares se procedió hacer un análisis del presupuesto del proyecto completo, de acuerdo con el autor (Varela Alonso, 2009) existen cinco tipos de presupuestos que se pueden realizar para un proyecto: de orden y magnitud, paramétricos, por componentes, por ensambles y por precios unitarios, cada uno tiene una precisión diferente y una información detallada que brindar. En este caso y por las características de lo que se quiere hacer en este capítulo se decidió que era pertinente hacer un presupuesto de tipo orden y magnitud que es un estimado conceptual teniendo en cuenta proyectos con particularidades similares, este tipo de presupuestos tienen una precisión del 65% y no son puntuales en su información, pero si son para hacer aproximaciones con base en otros proyectos (Varela Alonso, 2009). Para lo cual se van a tener en cuenta se van a tener cuatro proyectos de movilidad donde tres son de tipo férreo y uno que es tipo troncal.

Los cuatro tipos de proyectos son: RegioTram Occidente, Primera línea metro de Bogotá, Troncal Av. 68 de Transmilenio de Bogotá y el tranvía Ayacucho Medellín. Estos cuatro proyectos tienen el denominador común de ser proyectos que su infraestructura es destinada a la movilidad con parámetros de construcción similares y procesos constructivos que hasta cierto punto son similares. Por lo cual entrarían dentro de los parámetros conceptuales para realizar el

presupuesto de orden y magnitud teniendo en cuenta el precio por km que cada uno de estos proyectos equivale. Para lo cual se realizó la siguiente tabla para sintetizar la información:

*Tabla 16: Presupuestos de proyectos similares (Autoría propia)*

<b>Proyecto</b>	<b>Distancia total del proyecto (km)</b>	<b>Precio total del proyecto</b>	<b>Precio aprox por Km del proyecto</b>
RegioTram occidente Bogotá	44,7	\$ 1.500.000.000.000	\$ 33.557.046.980
Primera línea metro de Bogotá	23,96	\$ 19.500.000.000.000	\$ 813.856.427.379
Troncal Av. 68 de Transmilenio Bogotá	17	\$ 2.000.000.000.000	\$ 117.647.058.824
Tranvía Ayacucho Medellín	4	\$ 700.000.000.000	\$ 175.000.000.000

<b>Proyecto de referencia</b>	<b>Distancia total del proyecto (km)</b>	<b>Precio aprox por Km (promedio)</b>	<b>Precio total del proyecto</b>
RegioTram norte (65% de precisión)	48	\$ 285.015.133.296	\$ 13.680.726.398.188
RegioTram norte (100% de precisión)	48	\$ 438.484.820.455	\$ 21.047.271.381.828

En la tabla 16 se encuentra listada la información que se mencionó en el párrafo anterior, los cuatro proyectos que representan el presupuesto de orden y magnitud con sus respectivas distancias, precios totales y precios por km, estas cifras son las que se encuentran en la página web del tiempo (El tiempo, 2020). Como esto es un presupuesto que utiliza una referencia de medición para hacer una estimación, en este caso se utilizó la unidad de medida por kilómetro para usar un eje referencial que fuese unitario. Así pues, solo se realizó la división del precio de cada proyecto y se dividió por cada km construido para que así se pudiese sacar un promedio de los valores unitarios y así poder tener lo que se presume es correspondiente a un km de construcción del RegioTram norte, Adicionalmente se hizo la multiplicación por lo que se conoce de distancia de construcción del proyecto y con eso poder estimar el valor del

presupuesto por orden y magnitud y finalmente aproximarlos a una cifra correspondiente a lo que sería el valor por el 100%.

Del análisis anterior y teniendo en cuenta lo que dice la teoría de (Varela Alonso, 2009), el valor total que resulto es aproximadamente 13.6 billones de pesos, teniendo en cuenta que este valor corresponde a 65% de precisión, si este valor se redondeara al 100% tendría un costo de 21 billones aproximadamente, por lo que hay un margen entre estos dos números que puede corresponder al precio real si se construyeran los 48 km de RegioTram norte. Lo que se entiende por esto es que si estos 48km se llevaran a cabo se estaría hablando que el precio es similar a la de la primera línea de metro de Bogotá, pero con la diferencia que es el doble de lo construido, además en cuanto a referencias similares se podría decir que el valor tendería a ser más cercano al costo por kilómetro del RegioTram occidente o el tranvía de Ayacucho, que a la final son proyectos con las mismas características.

Por lo anterior se podría estar concluyendo que dentro del presupuesto que tiene dispuesta la ciudad de Bogotá para el desarrollo de proyectos para movilidad, se estaría cumpliendo con los costos presupuestados, claro está asumiendo que el valor llegue a ser menor a los 13.6 billones de pesos colombianos. Con esto se podría decir que en materia económica el proyecto tendría una alta viabilidad frente a otros proyectos que se están realizando en este momento y que Bogotá junto al gobierno de Colombia estarían en capacidad económica de solventar la construcción de un tren que aliviaría la carga de transporte por lo menos en 48km de recorrido.

## **Capítulo 10: Análisis de la viabilidad legal del proyecto**

Dentro del marco normativo que requiere para realizar un proyecto de construcción en cualquier parte del mundo se requiere conocer de ante mano el análisis de la viabilidad legal que puede influir en cualquier proyecto. Por esto se creyó pertinente realizar un análisis de la viabilidad jurídica que pudiese involucrar este proyecto en una escala general, asumiendo que la escala general es todo el trazado que se está usando como referencia que es el propuesto para realizar el proyecto de RegioTram norte. Se habla de una viabilidad legal cuando hay varios factores que constituyen la legalidad del trazo, específicamente a la hora de verificar la propiedad de los terrenos donde se tiene pensado emplazar el proyecto o que por otra parte no se esté infringiendo alguna ley que prohíba el desarrollo de los trenes en este caso para la ciudad de Bogotá.

En este capítulo se encontrará aspectos como: a quien le corresponden los terrenos donde circula actualmente el tren de la Sabana, que entidades regulan y supervisan esta línea férrea, como es el proceso para que exista la interconectividad departamental y las complicaciones políticas que tendría implementar este sistema de transporte. Acompañado de esto se realizaron dos entrevistas a dos profesionales expertos en la materia que dieron su opinión sobre la viabilidad legal del proyecto y sus posturas frente a lo que sería la realización de este proyecto, teniendo en cuenta que puede haber una implicación de orden público con los sindicatos de transportadores de pasajeros y carga.

Este capítulo se pensó para que fuese desarrollado por la opinión de expertos en el tema como se dijo anteriormente. Para lo cual se buscó que los profesionales a entrevistar tuviesen las competencias necesarias para dar respuesta a todos los objetivos de este capítulo. Así pues, los

dos profesionales que aportaron su conocimiento para este proyecto son: la profesional Ana Maria Zambrano Duque quien es la líder de investigación de equipo férreo y proyectos carreteros revertidos en la agencia nacional de infraestructura (ANI), cuya experiencia proviene de sus 12 años al servicio de la formulación e implementación de políticas y proyectos para el sector transporte, infraestructura y logística. Junto a la opinión de la profesional Zambrano está el profesional entrevistado Dr. Alexander Reyes Moreno docente de ingeniería en Logística y Operaciones y líder de investigación de la facultad de Ciencias y Tecnologías en la universidad Santo Tomás, con más de 12 años de experiencia en temas de transporte, movilidad y seguridad vial. Estos dos profesionales colaboraron respondiendo unas preguntas que tenían como objetivo darle desarrollo y sustento a la viabilidad legal del proyecto, puesto que su experiencia es suficiente para dar argumentos frente al tema férreo colombiano respecta.

La opinión de la profesional Zambrano concerniente a los temas de: la propiedad de los terrenos de la línea férrea de la Sabana, las agencias de inspección y vigilancia de las vías férreas en Colombia, el proceso para que exista la interconectividad departamental y las complicaciones políticas que tendría implementar este sistema de transporte es la siguiente:

La propiedad de los corredores férreos nacionales es del Instituto Nacional de Vías. La ANI es la entidad encargada de la vigilancia de los corredores férreos en Colombia, además de las concesiones que estén a cargo de los corredores regulados. No se necesita ningún permiso, necesitan presentar un proyecto a la Agencia Nacional de infraestructura bajo la figura de Asociación Público-Privada. Adjunto la circular 017 del 2013 que indica el proceso de cómo hacerlo. En los años anteriores a la adjudicación del proyecto regio tram norte, a la Agencia Nacional de Infraestructura no se cursó ni se presentó ninguna solicitud para el desarrollo. A

principios del gobierno local del alcalde de Peñaloza se replanteo la geometría y distribución del espacio de la línea férrea desde el centro comercial Gran estación hasta la estación la Caro y se determinó que el espacio era suficiente para el tránsito bidireccional de trenes. Las complicaciones políticas deberían ser nulas puesto que la vía férrea es un Corredor Férreo Nacional por lo tanto ya tiene el uso público. La circular indicada establece los requisitos para la presentación de un proyecto ante la ANI en cumplimiento de lo establecido en la Ley 1082 de 2015, sugerimos una revisión de la regulación antes citada (Zambrano Duque, Entrevista sobre la viabilidad legal del proyecto RegioTram norte, 2020).

Fin de la entrevista.

Por otra parte, se le realizaron al Dr. Reyes preguntas sobre como es el nuevo comienzo de las líneas férreas en el país, los trenes deberían llevar carga o solo pasajeros, como intervienen los nuevos trenes en el sistema de transporte actual y como se piensa que sea la movilidad de acá al futuro, así pues, las respuestas fueron las siguientes:

El gobierno nacional firmó unos convenios y también a finales de la administración de Santos, con el Reino Unido y la ONU para que en este decenio se restableciera la conectividad de las líneas férreas a nivel nacional, para darle cumplimiento a lo pactado con los países bajo que se encuentran también dentro de esos acuerdos. De ahí la gobernación de Cundinamarca tomo la iniciativa de hacer una interconectividad directa, pero que en la administración anterior de Peñaloza no se quería porque había una resistencia de parte de ellos porque él quería extender Transmilenio hasta los municipios circunvecinos que son 11, pero se decidió que fuese mejor RegioTram y por temas

políticos la presidencia hace parte del asunto porque hace parte del desarrollo del país (Reyes Moreno, Viabilidad legal del proyecto RegioTram Norte, 2020).

En mi opinión los trenes que transiten tanto al interior como a las afueras de la ciudad deben llevar carga, hace parte del desarrollo que se debe tener el país, tanto en materia ambiental como de movilidad, por lo que es mejor llevar 2 o 3 vagones con carga y no 8 o 9 camiones, sin embargo, en la década de los 40 y los 50 los sindicatos de transportadores de carga se opusieron a esta medida porque se les negaba el derecho al trabajo (Reyes Moreno, Viabilidad legal del proyecto RegioTram Norte, 2020).

Es importante seguir abordando temas de transporte sostenibles diferentes al sistema actual de Transmilenio y SITP se busca mitigar los impactos que este tipo de transportes generan y más ahora que la ciudad se empieza a expandir y cada vez son más las personas que residen a las afueras y trabajan al interior de Bogotá por lo que se necesitan sistemas de transporte más rápidos que desplacen grandes distancias que sea cómodos y seguros pero sobre todo que sea amigables con el medio ambiente (Reyes Moreno, Viabilidad legal del proyecto RegioTram Norte, 2020).

El desarrollo a 30 años va ser totalmente diferente al de ahora, será una época donde en el transporte masivo prime la velocidad y no la comodidad, se tiene que seguir el mismo protocolo de 85% personas de pie y 15% personas sentadas, con eso se garantiza el desplazamiento de más personas en menores tiempos, pero hay que tener en cuenta en mejorar la movilidad de la ciudad (Reyes Moreno, Viabilidad legal del proyecto RegioTram Norte, 2020).

Fin de la entrevista.

De acuerdo con lo opinión de los dos expertos se puede resumir que para fortuna de los colombianos tanto los gobiernos departamentales como el gobierno de la presidencia están poniendo en marcha proyectos para que en un futuro se puedan estar restableciendo las vías férreas en Colombia, además se cuenta con la participación del Reino Unido y Países Bajos para los temas de colaboración en diseños y estudios de factibilidad, que generan más confianza a la hora de implementar este tipo de obras. En cuanto a Bogotá desde que se posesiono la alcaldesa Claudia López se muestra un interés notable en desarrollar más proyectos de infraestructura vial férrea, lo que se traduce en un mejoramiento de la movilidad de la ciudad.

En síntesis de lo anterior y a manera de culminar este capítulo, se encuentra que la viabilidad legal de este proyecto va en caminata hacia dos razones, la primera es que tanto el gobierno presidencial y los gobiernos departamentales estén de acuerdo con la implementación de más vías férreas en Bogotá, que la ANI, el INVIAS y el ministerio de transporte permitan el uso de las vías férreas de la Sabana para implementar el nuevo sistema férreo y que la inspección y vigilancia esté regulada por las entidades públicas del estado. La segunda razón sería más de orden público y es que haya mediación con los sindicatos de transportadores ya se de carga o de transporte de pasajeros, porque sin duda llegará un momento donde existan problemas porque estos grupos de presión se encuentran en escasas de trabajo por el servicio de transporte que presten estas líneas férreas.

## **Capítulo 11: Contextualización final del propósito último del proyecto**

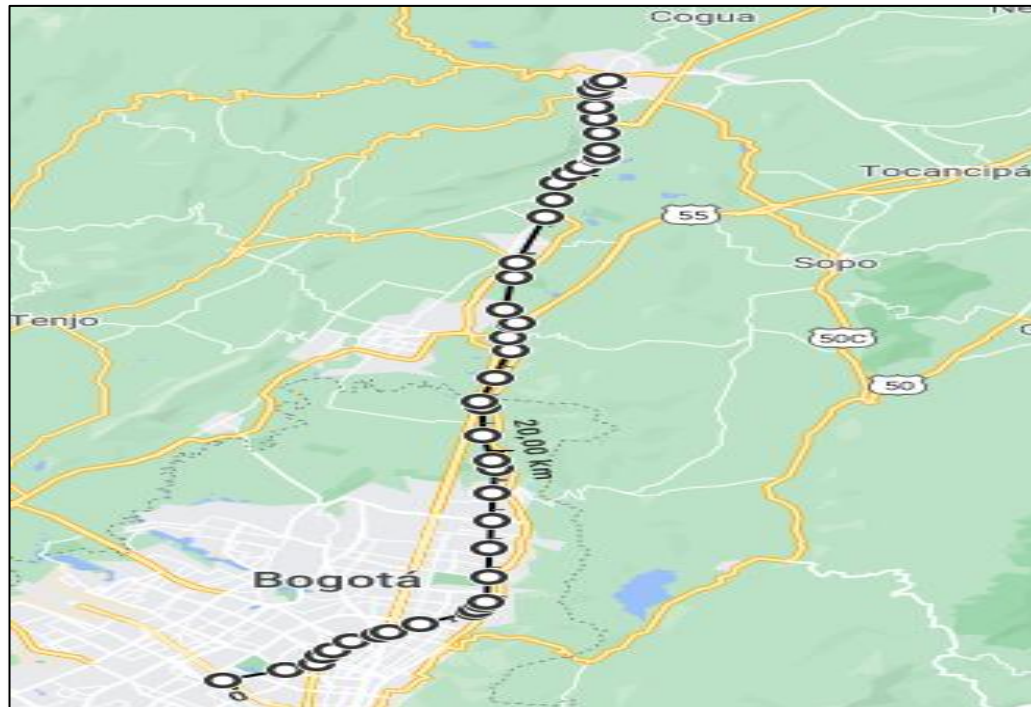
Este último capítulo se destinó para ser el capítulo de cierre de este trabajo, así que el propósito de este capítulo es hacer una contextualización de lo que sería si RegioTram norte si se hiciese realidad, además tiene la intención de cerrar el trabajo haciendo una invitación para que se sigan explorando este tipo de ramas de la ingeniería civil como lo es la construcción y diseño de líneas férreas. Adicionalmente se espera que lo que se explica en este capítulo sirva de motivación para seguir analizando la posibilidad de implementar vías férreas en todo el territorio colombiano y así poder estar a la vanguardia de los países que la cuenta con vías férreas en todo el territorio de sus países.

De esta forma en este capítulo se explicará lo que se conoce actualmente de RegioTram norte, el posible recorrido que tendrá, los posibles usos de esta nueva alternativa, la importancia de la conectividad con los municipios aledaños al norte de la ciudad, la importancia de este nuevo proyecto, la síntesis de la importancia de las vías férreas en Colombia y la posibilidad de seguir explorando estas alternativas de transporte para conectar los diferentes puntos de importancia del país.

El 30 de abril de 2020 se firmó en Bogotá Colombia el estudio de factibilidad y diseño del sistema para mirar si es viable usar la línea férrea de la Sabana como nuevo espacio para la disposición de trenes para el transporte de pasajeros, a este proyecto lo denominaron RegioTram norte. Según el periódico el tiempo este sistema empezaría en el centro comercial gran estación, ubicado en la calle 26, circularía por la actual vía férrea que pasa por la carrera 30, conectaría con la carrera 9 y llegaría a conectar con los municipios de Chía, Cajicá y terminaría en Zipaquirá al norte de Bogotá. Se espera que este recorrido cubra una ruta de 48km y se emplee el

sistema de doble carril para mejorar el flujo de trenes atravesando la ciudad y conectando con el departamento adyacente como se muestra en la figura 44.

*Figura 44: Ruta de RegioTram norte (Autoría propia)*



Según el informe que elaboró el periódico el tiempo dentro de la ciudad de Bogotá el sistema funcionará para el transporte de pasajeros, sin embargo, la empresa aliada del Reino Unido, empresa que apoya el diseño del tramo, afirma que esta ruta se podría estar alternando con el transporte de carga. Se espera que en los 48km de ruta se estén transportando alrededor de 250.000 pasajeros al día y sirvan principalmente para transportar a los pasajeros que pernoctan en las ciudades al norte de la ciudad que se les denominan dormitorio, esto quiere decir que son poblaciones que viven en estos municipios pero trabajan en la ciudad de Bogotá. (El tiempo, 2020)

Lo anterior es un claro ejemplo de que la ciudad se está expandiendo hacia el norte y por lo tanto el gobierno nacional y departamental están buscando alternativas que sean viables y sostenibles para poder conectar estos municipios con la ciudad, además hay que tener en cuenta un factor fundamental y es el desarrollo que se espera tenga la ciudad a 30 años donde es primordial tener en cuenta que hay que contribuir a un mejor desarrollo en materia de transporte donde se tenga presente el componente de optimización de tiempo durante los desplazamientos, con el fin último de beneficiar a la movilidad de las ciudades.

El pensar que la ciudad de Bogotá en 30 años siga expandiendo sus fronteras hace reflexionar, a todo aquel que viva tanto al interior de la ciudad como a las fueras, en el hecho de que cada vez los desplazamientos serán más largos y que con las alternativas de transporte que hay actualmente se estén quedando insuficientes. Es por esto que hay que empezar a pensar en nuevas alternativas de transporte y que por el momento la que mejor da solución a esto, tanto en materia ambiental como de movilidad, son las vías ferras ya sean elevadas, superficiales o en el mejor de los casos subterráneas. Es en este punto donde la ingeniería civil juega un factor primordial y es el de como comunidad investigar sobre las viabilidades que tendría cada alternativa frente a los requerimientos que vaya exigiendo la sociedad que requiere transportarse a diario.

Por lo anterior se puede decir que este trabajo es un claro ejemplo sobre mirar alternativas y evaluar sus condiciones para empezar a proponer soluciones que mejoren la calidad de vida de los habitantes. En principio, para este trabajo se desconocía la propuesta de RegioTram norte, pero queda como precedente que mirar las alternativas antes de ser expuestas es un ejemplo de cómo se puede salir a proponer a los gobiernos otras alternativas, ya sean trazados nuevos o

recuperar toda la malla férrea que se tenía en Colombia antes de ser olvidada y que para futuros proyectos queda un incontable trazado férreo por evaluar y que al día de hoy se tiene descuidado y que en algunas ciudades está siendo invadido o comido por la naturaleza en un entorno olvidado.

### Conclusiones

- ✓ Dado a que no se contó con un estudio de suelos en la zona de análisis, se determinó con estudios de suelos adyacentes a la zona, que la estratigrafía está compuesta principalmente por un metro de relleno heterogéneo, seguido de dos metros de arcillas limosas con consistencia media, con cambios en la tonalidad por efectos del nivel freático y que representa los estratos más débiles de la estratigrafía, se debería realizar un mejoramiento para aumentar su resistencia y así evitar fallas de base que deterioren la composición del terraplén. Finalmente se encontró que los 22 metros restantes se componían por limos arcillosos de consistencia media-blanda, que, aunque no reciben la mayor parte de la carga disipada son determinantes para que la subrasante del terraplén soporte las alteraciones de carga que pueda llegar a tener la superestructura con el tiempo y las filtraciones de agua sean las indicadas para no tener problemas de aumentos en el nivel freático.
- ✓ En el capítulo 6 se identificó que las cargas actuantes varían dependiendo el servicio que se este presentando, tanto las cargas por efecto de trenes de carga como la de trenes con transporte de pasajeros. Por lo cual, se determinó que la carga promedio que recibiría el terreno por metro lineal, por efectos de la estructura, es de 490 kN/m, asumiendo que los trenes que transitan son trenes tipo tram marca Siemens Piso bajo S70 los cuales cumple con las características internacionales de UIC y que son los mismos que se utilizarán en el proyecto Regio Tram occidente. Delimitando esta carga como la máxima se asegura que no habrá variaciones geométricas en el terreno que puedan resultar en fallas más adelante para la estructura.

- ✓ Siendo la alternativa de diseño 4 la más factible para su implementación, se identificó que las características mecánicas que debe precisar el terreno en cuanto a capacidad portante, asentamiento elástico y asentamiento por consolidación primaria son 26.83 kPa, 2.5cm y 20.7cm respectivamente. Que para efectos de las normativas internacionales están dentro de los rangos aptos para el tránsito seguro de los trenes ya que la UIC contempla asentamientos inmediatos hasta de 6 cm siempre y cuando sean lineales, además de la capacidad portante que resulta siendo superior a la del esfuerzo aplicado por metro cuadrado proveniente de la estructura.
- ✓ El terreno más viable para la elaboración del proyecto tiene que cumplir con las especificaciones descritas en la alternativa 4, propuesta en este proyecto, debido a que sus asentamientos elásticos son de 2.5 cm, inferiores a 6cm que describe la norma, la carga actuante es casi la mitad de la capacidad portante lo que se traduce en que hay un amplio factor de seguridad en el caso de que haya una variación inesperada de cargas y por último cumple con las características descritas para ser apto para el tránsito de trenes de acuerdo con la norma UIC, siempre y cuando se le hagan lo mejoramientos respectivos en los periodos máximos de 5 años.
- ✓ En cuanto a la viabilidad económica del proyecto, se concluye que es altamente viable, teniendo en cuenta que el presupuesto que se elaboró es de orden y magnitud, se estima que el proyecto completo de 48km de vía férrea puede llegar a costar hasta 21.6 billones de pesos, asimismo esta cifra estaría dentro del rango de presupuesto que tienen la alcaldía de Bogotá, (34 billones) proyectados en el plan de Desarrollo Económico, Social, Ambiental y de Obras Públicas del Distrito Capital 2020 – 2024, para asumir los costos de la nueva línea férrea para el transporte de pasajeros.

- ✓ De acuerdo con la información suministrada por los profesionales expertos en la materia, se puede decir que la viabilidad legal del proyecto es altamente factible, debido a que se reducen costos al no tener que hacer compra de terrenos a terceros, no hay impedimentos legales con el distrito siempre y cuando se cumpla con los requisitos de la contratación estatal y por último que no vayan a existir conflictos con los sindicatos de transportadores de carga y de pasajeros. Esto teniendo en cuenta que actualmente ya está en marcha el proyecto de RegioTram norte que es promovido por las alcaldías de Cundinamarca, Bogotá y por la misma presidencia de la república.
- ✓ El análisis de este proyecto deja un gran precedente frente a los lectores, puesto que es una forma de incentivar a las nuevas generaciones para promover la investigación de nuevas alternativas de transporte en el país, debido a que con la poca información que se utilizó para este trabajo da para hacer un panorama general, que, con la información que se encuentra en materia férrea del país, estaría apto para seguir dándole desarrollo a esta alternativa de transporte, no solo en la ciudad de Bogotá sino que también en el resto de país, sumándole información a todo el trazado férreo existente del país que se encuentra olvidado y que puede llegar a ser una fuente de conexión y comunicación al interior de Colombia.

## Referencias

- Alcaldia de Bogota. (16 de 12 de 2010). *Decreto 523 de 2010 microzonificacion sismica de bogota d.c.* Obtenido de Alcaldia mayor de bogota: <http://www.scg.org.co/wp-content/uploads/DECRETO-523-DE-2010-MICROZONIFICACION-BOGOTA.pdf>
- Balanta, M. I. (01 de 12 de 2015). *Proyecciones de poblacion por localidades para bogota 2016 - 2020.* Obtenido de secretaria distrital de planeacion: <http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/boletin69.pdf>
- Bell, P. L. (01 de 04 de 2012). *Banco de la republica.* Obtenido de Repositorio del banco de la republica: <https://repositorio.banrep.gov.co/bitstream/handle/20.500.12134/478/1.%20Geograf%C3%ADa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Budhu, M. (2006). *Soils mechanics and fundatios.* London: John Wright and sons.
- Carmona Álvarez, J. E., & Ruge Cárdenas, J. C. (2015). *Analysis of the existing correlations of* Obtenido de Tecno Lógicas: <http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v18n35/v18n35a09.pdf>
- DANE. (18 de 01 de 2020). *proyecciones anuales de poblacion por sexo para el periodo 2018-2023.* Obtenido de DANE: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>
- El tiempo. (20 de 09 de 2020). *En 15 meses estarían estudios para construir el Regiotram del Norte.* Obtenido de El tiempo: [eltiempo.com/bogota/regiotram-del-norte-estudios-estarian-listos-en-15-meses-538941](http://eltiempo.com/bogota/regiotram-del-norte-estudios-estarian-listos-en-15-meses-538941)

Elena Corredor, V., & Terraza Melo, R. (1 de 04 de 2015). *GEOLOGÍA DE LA PLANCHA 228*.

Obtenido de Servicio geológico colombiano:

<http://recordcenter.sgc.gov.co/B14/23008010024691/documento/pdf/2105246911101000.pdf>

Ferropedia. (01 de 01 de 2017). *Elementos que conforman una via ferrea*. Obtenido de

Ferropedia: <http://ferropedia.es/mediawiki/index.php/Travesia>

IDEAM. (n/a de n/a de 2010). *Atlas climatologico de colombia*. Obtenido de IDEAM:

[http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/cundinamarca\\_texto.pdf](http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/cundinamarca_texto.pdf)

INGEOMINAS. (1 de 06 de 1997). *Mapa geologico de santa fe de bogota*. Obtenido de

Ingeominas: n/a

international union of railways UIC. (02 de 2008). *earthworks and track bed for railway lines*.

Francia: UIC. Obtenido de UIC.

Jolonch, J. (10 de 02 de 2013). *Analisis del transporte masivo y la movilidad en bogota*.

Obtenido de Revista universidad rosario: <file:///C:/Users/Usuario/Downloads/2039-Texto%20del%20art%C3%ADculo-9654-2-10-20131109.pdf>

LET. (01 de 01 de 2020). *Rieles ferroviarios*. Obtenido de LET: <https://let.com.mx/376-2/>

MARÍN, J. G. (10 de 06 de 2013). *ESTUDIO DE TRANSPORTE MASIVO FÉRREO*

*UTILIZANDO EL CORREDOR*. Obtenido de Escual de ingenieria julio garavito:

<https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/130/1/Rios%20Mar%C3%ADn,%20Jos%C3%A9%20Gonzalo%20-%202013.pdf>

Martínez, D. C. (25 de 10 de 2012). *Portal Bogotá*. Obtenido de Portal Bogotá:

<https://web.archive.org/web/20121107143145/http://www.bogota.gov.co/portel/libreria/hp/01.270701.html>

Moller, R. (06 de 12 de 2010). *A critical evaluation of the colombian model of mass or bus rapid transit systems*. Obtenido de Universidad del valle:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291323528002>

Pasotti, P. (9 de 10 de 2015). *Estratigrafía subsuelo de rosario*. Obtenido de Universidad nacional de rosario:

[https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Subsuelo\\_2013\\_1s.pdf](https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Subsuelo_2013_1s.pdf)

Ramirez Palacios, P. C. (1 de diciembre de 2001). *Vias ferreas en Colombia*. Obtenido de Universidad de los Andes:

<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/15350/u234759.pdf?sequence=1>

Rey, F. (08 de 08 de 2020). Entrevista sobre la linea ferrea de la sabana. (A. Del Vecchio, Entrevistador) Bogota, Colombia.

Reyes Moreno, A. (2020). Viabilidad legal del proyecto RegioTram Norte [Grabado por A. Del Vecchio Cristancho]. Bogota, Bogota D.C, Colombia.

Secretaria de movilidad de bogota. (1 de 12 de 2019). *Plan de Desarrollo Económico, Social, Ambiental*. Obtenido de alcaldia de bogota:

<https://www.movilidadbogota.gov.co/web/plan-desarrollo-economico-social-ambiental-2020-2024>

Sivakugan, N., & Das, B. (2010). *Geotechnical engineering*. Ft. Lauderdale: J. Ross publishing.

Inc.

Varela Alonso, L. (2009). *Ingenieria de costos teoria y practica en construccion*. Mexico: Varela ingenieria de costos.

Zambrano Duque, A. M. (2020). Entrevista sobre la viabilidad legal del proyecto RegioTram norte [Grabado por A. Del Vecchio Cristancho]. Bogota, Bogota D.C, Colombia.