



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**SEGUIMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD A LA CONSTRUCCIÓN DE
TERRAPLENES CON SUELOS MARGINALES**

**Autor:
Jan Peter Harloff Argote.**

**Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental.
Medellín, Colombia
2020**



SEGUIMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD A LA CONSTRUCCIÓN DE TERRAPLENES CON
SUELOS MARGINALES.

Jan Peter Harloff Argote.

Informe final de práctica
como requisito para optar al título de:
Ingeniero Civil

Asesores:

Álvaro José Mattos Olivella
Ing. Civil, M. Eng.

Jaime Alberto Riaño Cuellar
Ing. Civil

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia
2020

ÍNDICE GENERAL

1	INDICE DE ILUSTRACIONES Y TABLAS	4
2	RESUMEN	5
3	INTRODUCCIÓN	6
4	GENERALIDADES DEL PROYECTO.....	7
5	OBJETIVOS	10
5.1	Objetivo general.....	10
5.2	Objetivos específicos.....	10
6	MARCO TEÓRICO.....	11
6.1	Compactación de suelos.....	11
6.1.1	Generalidades:.....	11
6.1.2	Teorías de compactación.....	11
6.1.3	Ensayos Proctor.....	12
6.1.4	Factores que afectan la compactación.....	15
6.1.5	Métodos para medir porcentaje de compactación en campo.....	16
6.2	Terraplenes.....	18
6.2.1	Definición.....	18
6.2.2	Partes del terraplén	18
6.2.3	Equipo utilizado en la conformación de terraplenes.....	19
6.3	Marco Normativo:.....	23
7	METODOLOGÍA.....	27
7.1	Recopilación de información técnica y material bibliográfico.....	27
7.2	Reconocimiento de los frentes de trabajo.....	28
7.3	Control de calidad de los terraplenes.....	28
7.4	Ensayos de laboratorio.....	28
7.4.1	Ensayos para caracterizar y clasificar el Material.....	28
7.4.2	Ensayos de compactación.....	31
7.4.3	Chequeo de maquinaria.	32
7.4.4	Formato establecido para las mediciones de campo.	33
7.4.5	Densidades in situ, control porcentaje de compactación.....	35
8	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	37
9	CONCLUSIONES.....	43
10	Bibliografía	44
11	ANEXOS.....	44

1 INDICE DE ILUSTRACIONES Y TABLAS

• Imágenes

1. Identificación del trazado del proyecto.....	8
2. Obtención del material de la construcción de los taludes del proyecto..	9
3. Conformación del terraplén K19+000 – K19+550.....	10
4. Protección del terraplén conformado.....	11
5. Relación Peso unitario vs humedad.....	13
6. Molde y martillo para Proctor estándar.....	14
7. Martillos utilizados en los ensayos Proctor.....	15
8. Ejemplo de la curva peso unitario seco vs contenido de humedad.....	16
9. Diferentes curvas de compactación de acuerdo con el tipo de suelo..	17
10. Efecto de los cambios en la energía de compactación.....	18
11. Esquema del método del cono de arena.....	19
12. Esquema del método del globo de caucho.....	19
13. Densímetro nuclear.....	20
14. Partes del terraplén.....	21
15. Ensayos realizados a una muestra de material.....	31
16. Ensayo de proctor modificado.....	34
17. Curva de compactación.....	35
18. Ensayo del cono de arena en campo.....	38

• Gráficas

1. Densidades tomadas en el tramo 1 UF1.....	42
2. Densidades tomadas en el tramo 2 UF1.	42
3. Densidades tomadas en el tramo 3 UF1.	43
4. Densidades tomadas en el tramo 4 UF1.	44
5. Densidades tomadas en el tramo 5 UF1.	45
6. Densidades tomadas en el tramo 1 UF2.....	45
7. Densidades tomadas en el tramo 2 UF2.....	46
8. Densidades tomadas en el tramo 3 UF2.....	47

• Tablas

1. Tramos en terraplén.	9
2. Equipo de laboratorio utilizado en la conformación de terraplén.....	21
3. Equipo utilizado en la conformación de terraplén.	23
4. Ensayos para el control de calidad.	26
5. Requerimientos mínimos para el material.	28
6. Preoperacional de vibro compactador.	35
7. Formato para control de densidades.....	37
8. Ejemplo de resultados del porcentaje de compactación.	39
9. Ejemplo organización de datos de densidades.....	40

2 RESUMEN

La empresa SP Ingenieros hace parte de la concesión vial "Vías del Nus". En desarrollo de su calidad de constructor optó por la utilización de los materiales existentes a lo largo del trazado geométrico del proyecto para conformar los terraplenes necesarios, haciendo uso de la especificación particular desarrollada por BASA ingenieros y adoptando políticas de desarrollo sostenible disminuyendo el impacto ambiental que tiene el proyecto en la zona.

El control de calidad de la conformación de los terraplenes haciendo uso de materiales marginales, inicia con la clasificación y caracterización de estos probando su viabilidad técnica para su posterior compactación en campo. En este punto se realiza la comprobación del contenido de humedad y el porcentaje de compactación, comparando el peso unitario obtenido a través del ensayo proctor en el laboratorio y el peso unitario obtenido a través del ensayo del cono de arena in situ, para continuar con la liberación de la capa que permite la conformación de la siguiente.

Por lo anterior, se mantuvieron los estándares de calidad colocando el material en la parte adecuada del terraplén de acuerdo con los ensayos de laboratorio realizados y asegurando un porcentaje de compactación mayor al 95 por ciento.

Palabras Clave: *Compactación, Proctor, Densidad, Terraplén.*

ABSTRACT

The company "SP Ingenieros" is part of the road concession "Vías del Nus". In development of its obligations as builder, they opted for the use of the existing materials along the geometric design of the road to form the necessary embankments using the specification developed by "BASA Ingenieros" and adopting the sustainable development policies, reducing the environmental impact in the surrounding areas of the project.

The quality control of the conformation of the embankments using marginal materials begins with the classification and characterization of these kind of soils, testing their technical feasibility for subsequent compaction in the field. At this point, the moisture content and the compaction percentage are verified, comparing the unit weight obtained through the proctor test in the laboratory and the unit weight obtained through the sand cone test in situ.

Therefore, they maintained the quality indices by placing the material in the appropriate part of the embankment in accordance with the laboratory test and ensuring a compaction percentage greater than 95 percent.

Key Words: *Compaction, Proctor, Density, Embankment.*

3 INTRODUCCIÓN

SP Ingenieros S.A.S es una empresa comprometida con la construcción de obras civiles de infraestructura, la cual cuenta con más de 35 años de experiencia en el sector y que en el año 2016 decide ser parte del proyecto de iniciativa privada "Vías del Nus – VINUS" junto a importantes empresas como Mincivil, Construcciones El Cóndor S.A y LATINCO.

La concesión vial VINUS hace parte de "Autopistas para la prosperidad" que tiene como objetivo principal comunicar a la ciudad de Medellín con el puerto de Cartagena con el fin de transportar de manera más rápida y económica los productos que se desean enviar al exterior. De igual manera se favorece la conectividad del departamento de Antioquia con las otras zonas del país facilitando el ingreso de productos de otras regiones por medio de la conexión con el proyecto "Magdalena 2" en el Alto de Dolores y con el proyecto "Rutas del Sol" en el municipio de Puerto Berrio.

La concesión tiene como objetivo realizar el proyecto vial de manera innovadora, sostenible y económicamente eficiente por lo que se decide utilizar los materiales existentes a lo largo del trazado geométrico de la vía adoptando todas las medidas técnicas necesarias para que sea una solución viable y medioambientalmente adecuada.

Los suelos que se encuentran en el proyecto son predominantemente limos arenosos ligeramente plásticos y arcillas limosas (Clasificación S.U.C.S) los cuales no cumplieron con los requisitos de suelos adecuados para terraplenes que se indican en el artículo 220 del INVIAS; por lo tanto la concesión contrata a la empresa Basa Ingenieros con el fin de obtener una especificación técnica particular para el uso de estos suelos en la conformación de terraplenes y a la empresa Freyssinet para el diseño de muros en tierra armada con el mismo material.

Finalmente, la especificación particular permite validar el uso de los materiales provenientes de los cortes que se adelantan para la construcción de la vía y se establecen las condiciones mínimas que deben cumplir estos materiales desde el punto de vista de esfuerzos, deformaciones y estabilidad para garantizar la seguridad de la obra, además de reducir el impacto ambiental al no disponer de ZODMES (Zonas de disposición de materiales de excavación) ni canteras para la explotación de materiales granulares.

4 GENERALIDADES DEL PROYECTO.

El proyecto está vinculado al corredor vial Medellín – Puerto Berrio tiene una longitud aproximada de 64.3 km y se divide en 5 unidades funcionales como se observa en la imagen 1 y como se desglosa a continuación:

Unidad funcional 1: Pradera – Porcecito L = 9,2 Km

Unidad funcional 2: Porcecito – Portal Santiago L = 5,4 km

Unidad funcional 3: Túnel de la Quebra L = 4.4 km

Unidad funcional 4: Portal Limón – Cisneros L = 5,3 km

Unidad funcional 5: Cisneros – Alto de Dolores (empalme Magdalena 2) L = 2.40 km

La empresa SP Ingenieros S.A.S cuenta con las unidades 1 y 2 en las cuales se encuentra poniendo en práctica lo consignado en este documento.

Imagen 1: Identificación del trazado del proyecto Fuente: www.vinus.com.co.

En la Tabla 1 se discriminan los distintos frentes de trabajo en los cuales es necesario conformar terraplenes. Como se observa en la unidad funcional 2, prácticamente todo el trazado se realiza sobre terraplén elevando la estructura del pavimento.

7

Tabla 1. Tramos en terraplén. **Fuente:** Elaboración propia.

UNIDAD FUNCIONAL 1	
Abscisa inicial	Abscisa final
K18+000	K18+050
K18+400	K18+510
K18+995	K19+330
K19+610	K19+950
K19+980	K20+665
UNIDAD FUNCIONAL 2	
Abscisa inicial	Abscisa final
K20+900	K22+600
K22+600	K24+100
K24+100	K25+800

La obtención del material para los terraplenes inicia con la construcción de los taludes en la unidad funcional 1 entre el relleno sanitario de Pradera y Porcesito, corregimiento del municipio de Santo Domingo.

Como se observa en la imagen 2 se empieza a retirar el material el cual será transportado hasta los tramos en los cuales es necesario construir los terraplenes; contando con previa autorización por parte del Ingeniero de Calidad al analizar los resultados de los ensayos de laboratorio (ver tabla 4) a las muestras de suelo obtenidas y que deben cumplir los requisitos de la tabla 5.



Imagen 2. Obtención del material de la construcción de los taludes del proyecto.

Fuente: Dron equipo de Topografía.

En la imagen 3 se puede observar el inicio del terraplén que se conectara con el puente que atraviesa el Río Porce al final de la de la unidad funcional 1 entre el K19+000 y K19+550. Se pueden identificar los distintos trabajos necesarios y que se pueden llevar a cabo simultáneamente para conformar el terraplén, como extender uniformemente el material con ayuda del bulldozer y compactarlo con el vibrocompactador de rodillo.

Es importante que el equipo de topografía realice un control continuo durante este trabajo para que se respeten las cotas indicadas en los planos y no se afecte posteriormente la estructura del pavimento.



Imagen 3. Conformación del terraplén K19+000 – K19+550. **Fuente:** Dron equipo de Topografía.

Finalmente, al tener el terraplén conformado es necesario protegerlo de los agentes climatológicos que puedan afectarlo generando erosión. En la imagen 4 se puede observar el empedrado que se instala en las zonas laterales, de igual manera se inicia la colocación de una capa de afirmado para impedir el arrastre de material. Este tramo correspondiente al K24+300 – K25+000, presenta un avance mayor y se encuentra en la unidad funcional 2 entre el corregimiento de Porcesito y la entrada del Túnel de la Quiebra.



Imagen 4. Protección del terraplén. **Fuente:** Dron equipo de Topografía.

5 OBJETIVOS

5.1 *Objetivo general*

Seguimiento y control de calidad a la construcción de terraplenes con suelos marginales mediante la aplicación de la especificación particular para la concesión “Vías del Nus”.

5.2 *Objetivos específicos*

- Conocer los fundamentos técnicos y teóricos que guían el proceso de la construcción de terraplenes.
- Identificar el manejo y procesos asociados a la maquinaria necesaria para la conformación de terraplenes
- Realizar el seguimiento a las actividades que se realizan en la conformación de terraplenes
- Aplicación de las diferentes normas del capítulo 2, artículo 220 del Instituto Nacional de Vías y de la especificación particular desarrollada por el contratista BASA ingenieros para garantizar la calidad de la estructura del terraplén.
- Recolectar los datos y la diferente información obtenida a través de los ensayos periódicos realizados en el laboratorio o directamente in situ.

6 MARCO TEÓRICO.

6.1 Compactación de suelos.

6.1.1 Generalidades:

La compactación del suelo es necesaria para densificar el suelo por medio de la remoción de aire incrementando el peso unitario y es uno de los métodos más económicos para mejorar las características de los suelos (Budhu, 2011). Es necesario que actúe el agua para permitir un movimiento suave entre las partículas del suelo, pero sin llegar al exceso, como se observa en la imagen 5 al tener un contenido de humedad mayor a w_2 , la cual es la humedad óptima, se reduce el peso unitario.

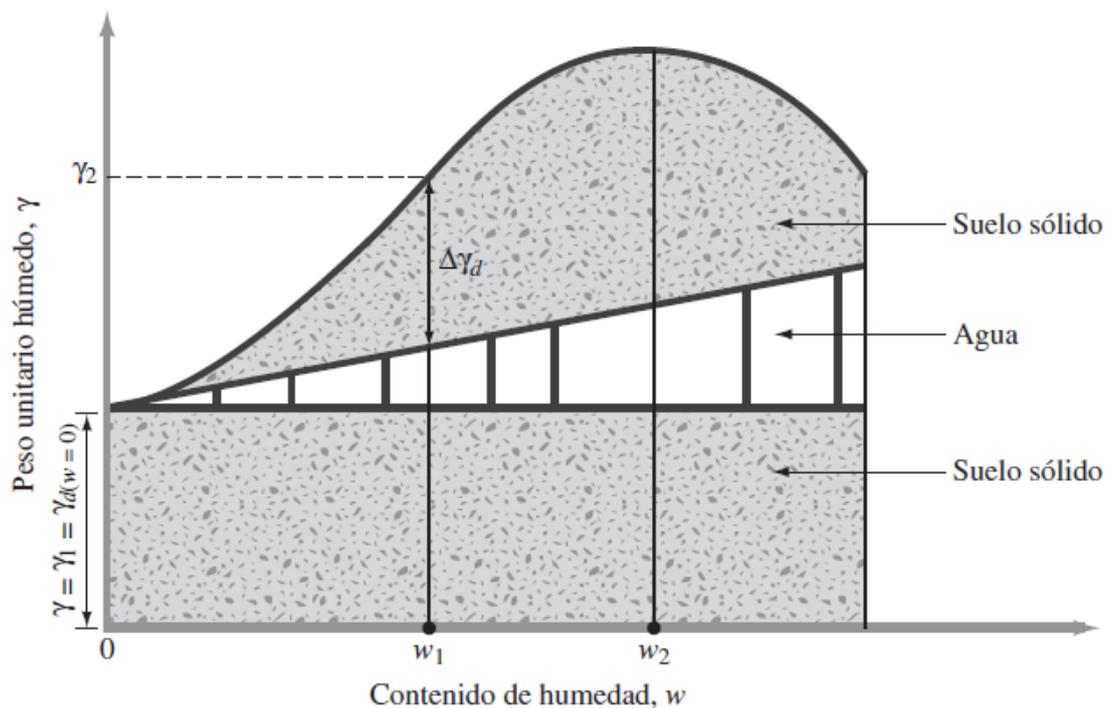


Imagen 5. Relación Peso unitario vs humedad Fuente: (Das, 2013)

6.1.2 Teorías de compactación.

6.1.2.1 Teoría de Proctor (1933):

Al compactar un suelo relativamente seco se crea una mayor fricción que se opone a las fuerzas de compactación, al añadir cierta cantidad de agua se genera mayor lubricación con lo que las partículas de suelo se reorganizarán con mayor facilidad y aumente de esta manera la densidad del suelo.

A partir de esto desarrolló dos procedimientos para el control de calidad de la compactación de un terreno, estos son Proctor estándar y proctor modificado los cuales se diferencian en la cantidad de energía utilizada en el proceso.

6.1.2.2 Teoría de Hogentogler (1936)

Propuso que en el proceso de humectación de una muestra de suelo cuando es compactado intervienen 4 fases las cuales son hidratación, lubricación, expulsión y saturación. La hidratación se da cuando el agua entra en el suelo y por la tensión superficial se adhiere a las partículas de este creando una película alrededor de ellas. Al tener esta película se facilita el reacomodamiento de las partículas y esto se presenta en la fase de lubricación. Al finalizar con este paso se da la expulsión, fase en la cual se inicia la reducción de los vacíos llenos de aire y el agua empieza a ocupar su lugar hasta llegar a la fase de saturación. En este punto se obtiene la densidad máxima y la cantidad de humedad óptima. (Revolorio, 2013)

6.1.2.3 Teoría de Hilf (1956)

Utilizo la teoría de presión de poros en suelos para determinar el porcentaje de compactación, ya que los suelos secos al no tener una película de agua que actúe como lubricante son difíciles de compactar. De esta manera se desarrolló el método rápido para conocer el porcentaje de compactación del suelo sin tener que conocer la cantidad del contenido de humedad. (Sánchez, 2008)

6.1.3 Ensayos Proctor

La teoría establecida por Proctor en 1933 se estandarizó por varias normas con el fin de ser usada, por ejemplo, en las normas americanas ASTM D-698 para proctor estándar y la ASTM D-1557 para proctor modificado. En el caso de la normativa colombiana se tienen las normas INV E-141 para proctor estándar y INV E-142 para proctor modificado.

6.1.3.1 Proctor estándar

En esta prueba se compacta una muestra de suelo la cual se mezcla con diferentes cantidades de suelo y que luego es compactada en 3 capas iguales dando 25 golpes con un martillo que pesa 24.4 N; todo esto en un molde de 101.6 mm de diámetro y un volumen de 943.3 cm³ como se observa en la imagen 6. Este procedimiento debe repetirse hasta poder crear una curva que relacione las distintas humedades con los respectivos pesos unitarios secos con el fin de determinar la humedad óptima y el peso unitario seco máximo. (INVIAS, 2013)

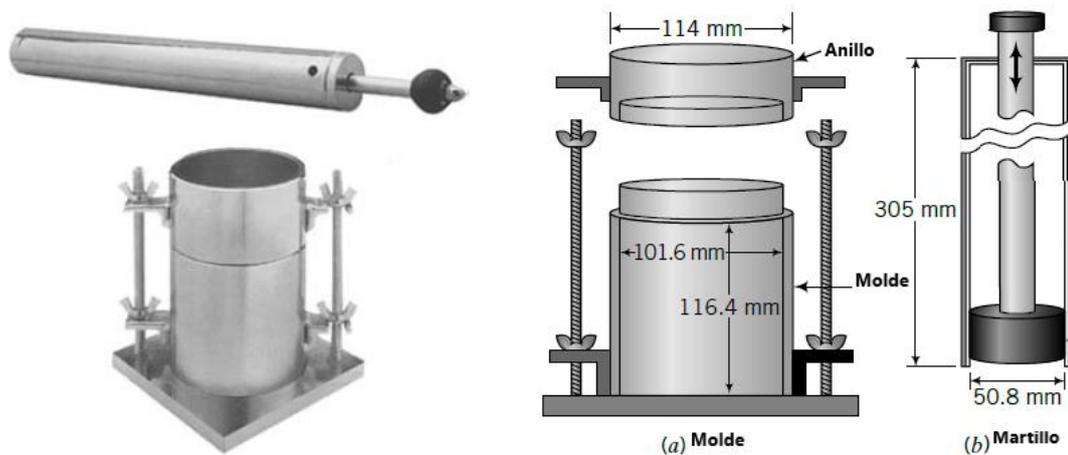


Imagen 6. Molde y martillo para Proctor estándar. **Fuente:** (Budhu, 2011)

6.1.3.2 Proctor modificado

Se diferencia del proctor estándar ya que utiliza un martillo más pesado, de 44.5 N y la muestra de suelo se compacta en 5 capas con 25 golpes en cada una. Debido a que el esfuerzo de compactación aumenta, también lo hace el peso unitario seco máximo, pero se disminuye el contenido óptimo de humedad al reducir la cantidad de vacíos. (INVIAS, 2013)

En la imagen 7 se puede observar la diferencia entre los 2 martillos utilizados, a la izquierda se encuentra el martillo del proctor estándar y en la derecha se encuentra el martillo del proctor modificado.

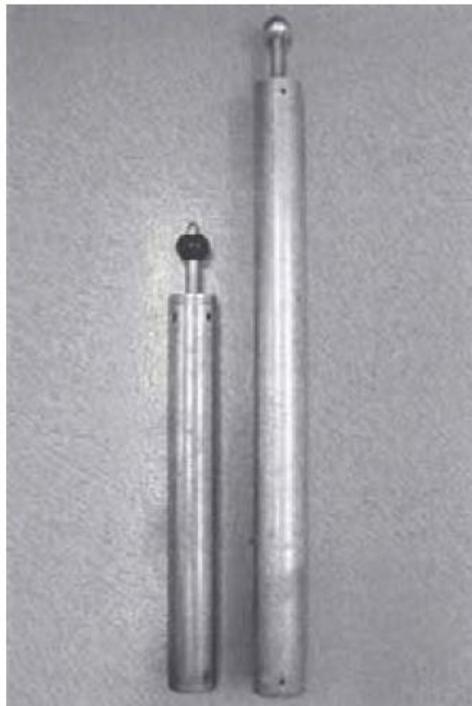


Imagen 7. Martillos utilizados en los ensayos Proctor. **Fuente.** (Das, 2013)

En cada una de las pruebas realizadas se debe calcular el peso unitario húmedo de compactación con la ecuación 1 y el peso unitario seco por medio de la ecuación 2, conociendo previamente el contenido de humedad en el laboratorio.

$$\gamma = \frac{W}{V_{molde}} \quad (1)$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w(\%)}{100}} \quad (2)$$

Donde:

γ : Peso unitario húmedo.

W: Peso del suelo compactado en el molde.

V_{molde} : Volumen del molde.

γ_d : Peso unitario seco.

w (%): Porcentaje de contenido de humedad.

Los valores de γ_d determinados con su respectivo contenido de humedad permiten trazar la curva que se observa en la imagen 8, en la cual se identificara el pico que denotara el peso unitario máximo y la humedad óptima de compactación asociada.

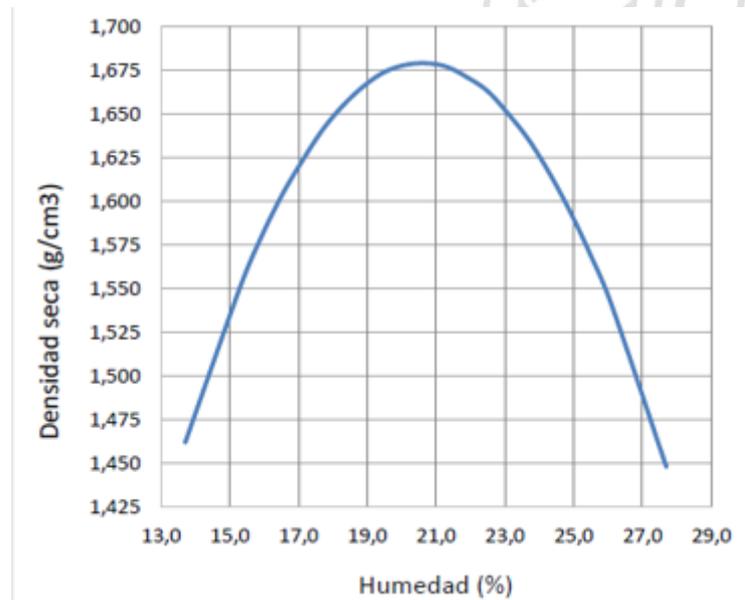


Imagen 8. Ejemplo de la curva peso unitario seco vs contenido de humedad

Fuente. Laboratorio, Obra Vinus.

A pesar de que los ensayos de proctor son ampliamente usados, tienen las siguientes limitaciones y dificultades:

- Presencia de partículas mayores de 19 mm: Para los suelos que contienen un 30 % de partículas con tamaño mayor a 19 mm no existe norma para determinar las condiciones de compactación

- Degradación: La degradación de partículas se presenta típicamente cuando se compacta un material granular residual y representa un problema ya que genera un aumento en el peso unitario seco máximo en el laboratorio que no representa las condiciones dadas en campo. Esto dificulta el control del grado de compactación ya que es difícil que el terreno alcance el peso unitario seco máximo.
- Gradación discontinua: Aquellos suelos que contienen bastantes partículas grandes y pocas pequeñas son un problema ya que generan un mayor volumen de vacíos, disminuyendo el peso unitario seco máximo. Si este gran volumen de vacíos se llena de agua disminuirá la capacidad portante al tener un menor esfuerzo efectivo producto del aumento de la presión de poros. (INVIAS, 2013)

6.1.4 Factores que afectan la compactación.

6.1.4.1 Tipo de suelo

De acuerdo con los estudios de Lee y Suedkamp se distinguen 4 tipos de curvas de compactación influenciadas por el tipo de suelo, debido a su granulometría, la forma de las partículas y presencia de finos. Un ejemplo de ello se puede observar en la imagen 9.

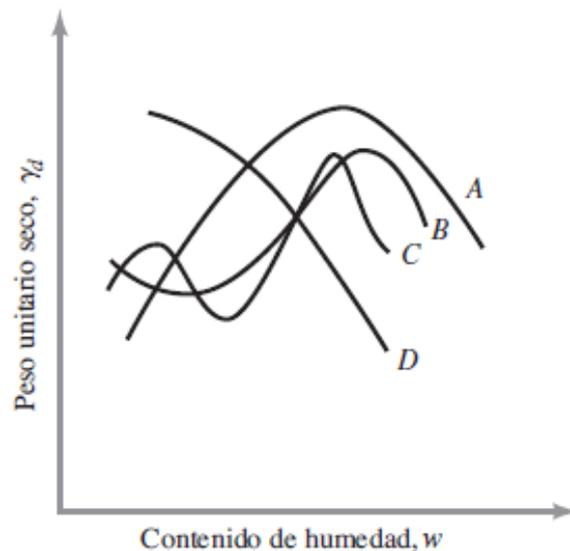


Imagen 9. Diferentes curvas de compactación de acuerdo con el tipo de suelo. **Fuente.** (Das, 2013)

Por ejemplo, para la gráfica tipo A, de un solo pico se pueden tener suelos limo arenosos, el tipo B y C de doble pico se pueden dar al tener arenas bien gradadas. Y el tipo D se puede obtener al hacer los ensayos de proctor con arenas mal gradadas.

6.1.4.2 Energía de compactación

Al comparar el ensayo de proctor estándar y el proctor modificado se dejó claro que su diferencia se centra en la energía de compactación usada generando un aumento en el peso unitario seco máximo y una disminución de la humedad óptima.

En la imagen 10 se puede observar como la línea punteada indica la disminución de la humedad y de igual manera el aumento en el peso unitario seco a medida que se aplica una mayor cantidad de golpes por capa.

Es importante conocer la energía de compactación con el fin de disminuir la degradación de las partículas de suelo en el laboratorio y evitar obtener un peso unitario aparente que no es representativo (INVIAS, 2013) (Das, 2013)

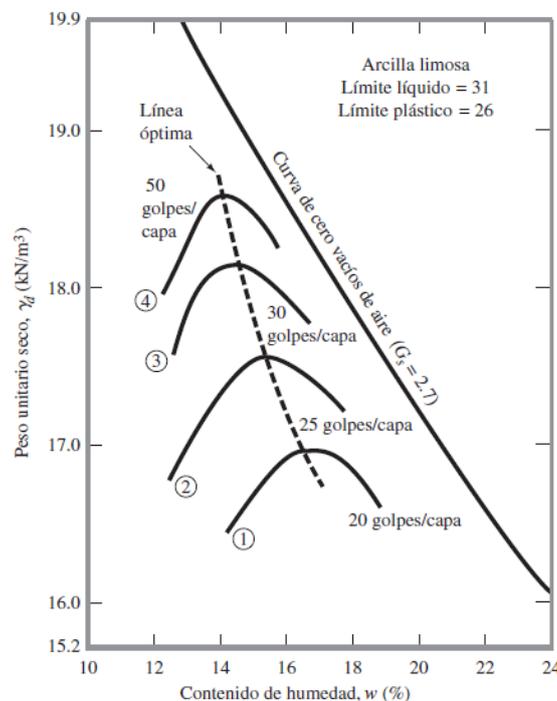


Imagen 10. Efecto de los cambios en la energía de compactación. **Fuente.** (Das, 2013)

6.1.5 Métodos para medir porcentaje de compactación en campo.

6.1.5.1 Método del cono de arena (INV E-161)

Es un método simple en el cual se excava manualmente un hueco el cual es llenado con arena la cual debe ser limpia seca y tener densidad y gradación uniformes (arena de Ottawa). El frasco con la arena debe ser pesado antes y después del procedimiento, así mismo se necesita el peso del material extraído del hueco con su humedad natural para realizar todos los cálculos de acuerdo con las fórmulas que se observan en la tabla 7. Este método no se puede aplicar si existen cantidades apreciables de material con tamaño mayor de 38

mm o materiales granulares sueltos que se pueden desmoronar y vuelven a llenar el hueco.

De igual manera se debe limitar su uso si en el suelo se presentan vacíos en los cuales puede penetrar la arena y afectar los resultados, y se debe tener cuidado con suelos orgánicos, saturados o muy plásticos que se pueden deformar al hacer el hueco.

Finalmente, en la imagen 11 se observa el esquema del método. (INVIAS, 2013)

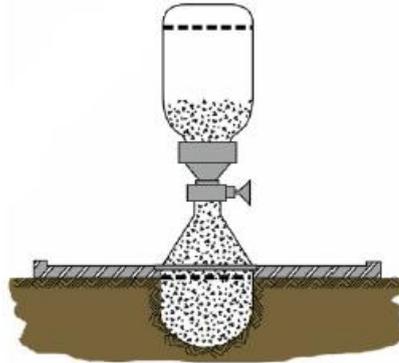


Imagen 11. Esquema del método del cono de arena **Fuente:** (INVIAS, 2013)

6.1.5.2 Método del balón de caucho (INV E-162)

En este método se determina el volumen excavado de un hueco, el cual será llenado con un líquido atrapado en el balón de caucho flexible al aplicar presión. El método no se puede aplicar si se encuentra presencia de mucha roca o material grueso y se debe comprobar in situ si el suelo no se deforma bajo las presiones del ensayo.

En la imagen 12 se observa el aparato utilizado en este método. (INVIAS, 2013)

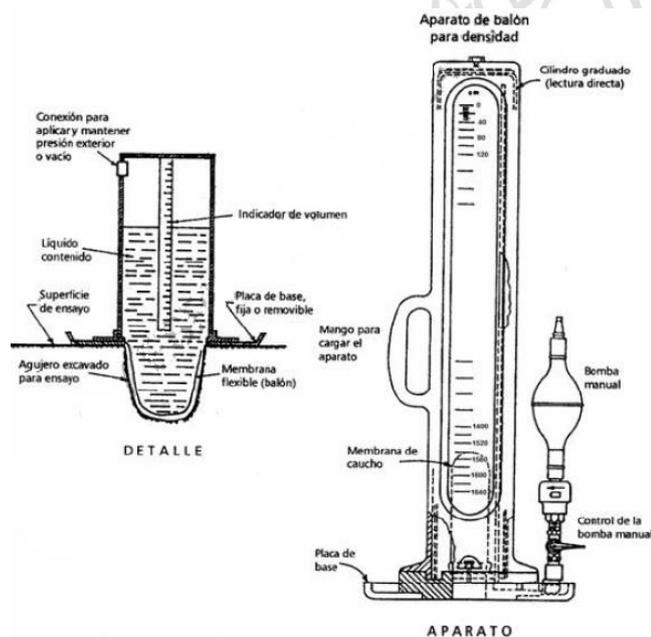


Imagen 12. Esquema del método del globo de caucho. **Fuente:** (INVIAS, 2013)

6.1.5.3 Densímetro nuclear (INV E-164)

Se toma la densidad en el terreno por medio de transmisión directa y retrodispersión, el primero mediante la lectura de las ondas que viajan a través del suelo emitidas desde una varilla que se introduce en el suelo y la segunda mediante emisión y recepción teniendo una fuente y un detector de las ondas en superficie. En la imagen 13 se observa el funcionamiento de los 2 procedimientos del método. (INVIAS, 2013)

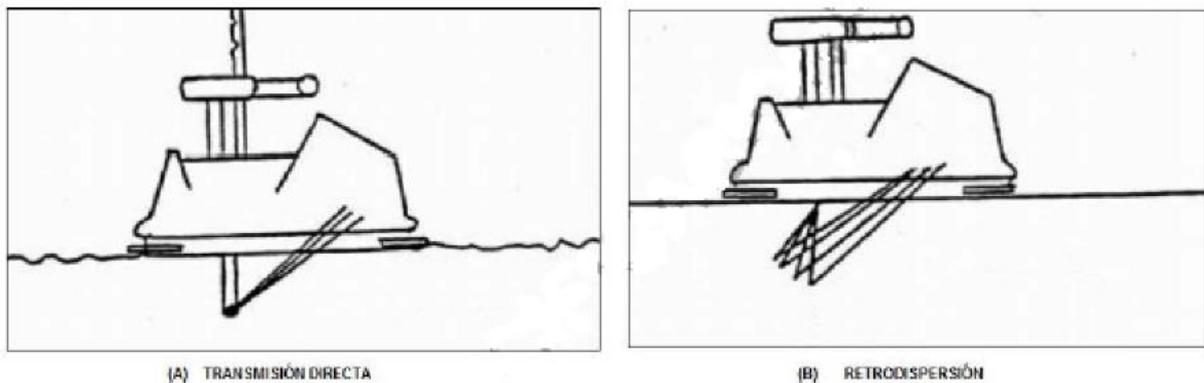


Imagen 13. Densímetro nuclear. **Fuente.** (INVIAS, 2013)

6.2 Terraplenes

Las teorías de compactación de suelos son usadas en la ingeniería civil para la conformación de estructuras como los terraplenes que servirán como cimiento para la estructura del pavimento. Se busca mejorar las capacidades de cada capa para que resistan las cargas de servicio alcanzando el peso unitario máximo con un porcentaje de humedad óptimo obtenidos a través del ensayo de proctor teniendo en cuenta el tipo de suelo y la energía utilizada.

6.2.1 Definición

Tierra con que se rellena un terreno con el fin de levantar su nivel y formar un plano de apoyo necesario para llevar a cabo otra obra (INVIAS, Capítulo 2-Explanaciones. 1-8, 2013)

6.2.2 Partes del terraplén

las partes del terraplén son las siguientes. (ver imagen 14)

- **Cimiento:** Es la parte inferior del terraplén que va sobre la subrasante luego de terminar con las labores de desmonte y limpieza. Es el suelo de soporte de la estructura del terraplén.
- **Núcleo:** Parte intermedia del terraplén entre el cimiento y la corona.
- **Corona:** Capa generalmente de 0.30 cm que se ubica en la parte superior del terraplén y sobre la cual se iniciara la construcción de la estructura del pavimento. (INVIAS, 2013)

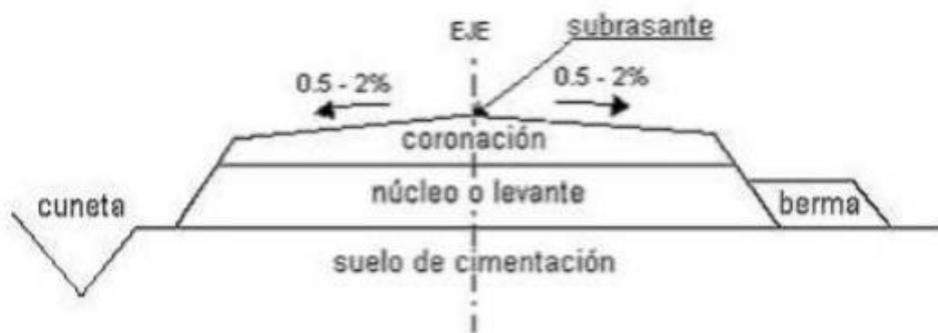


Imagen 14. Partes del terraplén. **Fuente:** (Revolorio, 2013)

6.2.3 Equipo utilizado en la conformación de terraplenes

A continuación, en la tabla 2 se encuentran los equipos utilizados en el laboratorio para realizar los ensayos consignados en la tabla 4 para posteriormente conformar los terraplenes con ayuda de los equipos que se encuentran en la tabla 3

Tabla 2. Equipo de laboratorio utilizado en la conformación de terraplenes.
Fuente. Elaboración propia

Equipo de laboratorio utilizado en la conformación de terraplenes		
Nombre	Descripción	Imagen.
Equipo para la toma de Densidades (Cono de arena)	Con este equipo se verifica la densidad de cada capa la cual se compara con la obtenida por medio del ensayo de Proctor.	
Humedómetro analógico.	Equipo necesario para conocer el contenido de humedad de los distintos suelos tratados.	

<p>Horno.</p>	<p>Equipo de mucha utilidad ya que permite secar las muestras de suelos con el fin de conocer la humedad. También puede ser utilizado a altas temperaturas para determinar el contenido de materia orgánica que se encuentra en un suelo.</p>	
<p>Serie de tamices.</p>	<p>Mallas especializadas para realizar el análisis granulométrico del suelo. Cada tamiz tiene un tamaño de malla específico para retener cierta cantidad de material.</p>	
<p>Tamizadora.</p>	<p>Equipo que agiliza el tamizaje de las muestras de suelo. Además, permite hacer un análisis más preciso ya que se disminuye la posibilidad de perder material.</p>	

Casagrande.	Equipo necesario para obtener el límite líquido según la norma INV E-125. Cuenta con una manivela que genera golpes controlados que permiten el desplazamiento del suelo en el cuenco de cobre.	
Balanzas.	El uso de distintas balanzas es esencial, dependiendo del tamaño de la muestra con la que se va a trabajar y la precisión necesaria para el cálculo de los distintos resultados.	

Tabla 3. Equipo utilizado en la conformación de terraplenes. **Fuente.** Elaboración propia

Equipo utilizado en la conformación de terraplenes.		
Nombre	Descripción	Imagen.
Compactador tipo canguro.	Equipo utilizado sobre áreas pequeñas, por ejemplo, lugares donde se instalaron ciertos tipos de filtros o estructuras hidráulicas como alcantarillas. Genera impactos consecutivos apisonando uniformemente el suelo a tratar. Es ampliamente usado ya que es útil en cualquier tipo de suelo, además es económico y liviano.	

Plato vibrador.	Cumple una función parecida al compactador tipo canguro, pero se recomienda usarlo sobre suelos granulares.	
Vibro compactador de rodillo.	Equipo utilizado para compactar el material del terraplén y obtener la densidad especificada. Es adecuado para la compactación de suelos arenosos y arcillosos si no se utiliza el vibrado. Los rodillos vibratorios son más usados en los suelos granulares. La posibilidad de generar vibrado solo cuando se desee hace que esta máquina sea muy versátil y que se pueda utilizar en cualquier tipo de suelo. (Das, 2013)	
Compactador Pate Cabra.	Equipo utilizado para compactar el material del terraplén y obtener la densidad especificada. Es más utilizada en suelos arcillosos compactando en 2 fases, la primera presión y la segunda amasado, gracias a las distintas elevaciones que tiene en el rodillo. (Das, 2013)	
Volqueta	Equipo utilizado para transportar el material desde los taludes de donde es extraído a los lugares donde se conforma el terraplén. Comúnmente se utilizan volquetas con capacidad de 7 m ³ con 2 ejes traseros.	

Retroexcavadora	Es un equipo utilizado para retirar el material de los diferentes taludes y depositarlo en las volquetas para su posterior transporte. En este proyecto se utilizan valdes de 1 y 1.2 m ³ .	
Motoniveladora	Es una máquina utilizada para distribuir el material uniformemente de acuerdo con las especificaciones específicas del proyecto, manteniendo un nivel específico y generando la pendiente necesaria con ayuda de la hoja angular que es muy útil para dar una buena terminación superficial. También es una máquina muy versátil ya que puede perfilar pequeños taludes y cuenta con un escarificador en la parte trasera para penetrar en suelos sumamente duros.	
Bulldozer	Este equipo es utilizado en trabajos de excavación para la obtención de material o para adecuar el terreno que se va a tratar y también permite realizar trabajos de empuje en los cuales distribuye el material uniformemente para la conformación de las capas del terraplén.	

6.3 Marco Normativo:

Debido a que el material proveniente de los cortes no cumple con los requisitos del artículo 220-13 del INVIAS se inicia una búsqueda de normas internacionales en las cuales se pueda hacer uso de estos suelos para la conformación de terraplenes y se encuentra que la Asociación Mundial de la

Carretera (PIARC-AIPCR) viene impulsando el uso de este tipo de suelos en la nueva política de desarrollo sostenible. (Ministerio de Fomento, 2002)

De esta manera se encuentran especificaciones para materiales con características similares a los encontrados en los cortes en la normativa española que modifico el artículo 330 (terraplenes PG-3 2002) para permitir el empleo de materiales no convencionales, de igual manera lo realizó el DOT department of transport en el estado de Iowa en 1999 y en el estado de Indiana en el año 2009. (DOT, 2015)(White, 1999)

Es así como se permite usar este tipo de materiales de manera adecuada en el proyecto, apoyándose en el numeral 220.2.1, los materiales “deberán cumplir con los requisitos establecidos en los documentos técnicos del proyecto. Si los documentos no establecen estos requisitos, se utilizarán los indicados en la tabla 220-1” por lo tanto los materiales usados en los terraplenes tendrán que cumplir con lo expuesto en la especificación particular. (INVIAS, 2013)

En la tabla 4 se encuentra los distintos ensayos necesarios y la descripción de cada uno de ellos.

Tabla 4. Ensayos para el control de calidad. **Fuente:** (INVIAS, 2013)

Ensayo	Normas INVIAS	Descripción de la Norma
Límites de Atterberg.	INV E-125 INV E-126	INV E-125: Permite determinar el límite líquido de los suelos con ayuda de la maquina casa grande, partiendo una porción de suelo en dos partes y permitiendo su unión a un número de golpes. INV E-126: Permite determinar el límite plástico e índice de plasticidad, al hacer rollitos de suelo de 3 mm de espesor sin que este presente agrietamiento. El índice de plasticidad se define como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.
Humedad Natural.	INV E-122 INV E-135	INV E-122: Se coloca la muestra de suelo en el horno a 110 °C durante 12 horas hasta que la muestra se seca. El porcentaje se determina con la diferencia de pesos antes y después de estar en el horno. INV E-135: Determinación del porcentaje de humedad colocando la masa de suelo en un horno microondas en varios intervalos hasta

		lograr una masa constante que denota que la muestra está seca.
Granulometría.	INV E-123	Determinación de la distribución de los tamaños de las partículas presentes en una muestra de suelo por medio de una serie de tamices. Se puede determinar el tamaño máximo.
Contenido de materia orgánica.	INV E-121	Se determina el contenido de materia orgánica por medio de la pérdida por ignición. Se coloca una muestra con una masa entre 10 y 40 gramos en un horno a 445 °C durante 6 horas y se determina el porcentaje de materia orgánica con la diferencia de pesos antes y después de la ignición.
CBR de laboratorio.	INV E-148	Este método se utiliza para determinar el CBR de una muestra compactada, para evaluar la resistencia potencial de los materiales del terraplén.
Sales solubles.	INV E-158	Permite determinar el contenido de sales en los suelos mediante disolución de estas en agua destilada.
Densidad máxima seca.	INV E-141 INV E-142	INV E-141: Proctor estándar mediante el cual se determina la relación entre la humedad y el peso unitario seco, con un molde de 15.3 cm y un martillo de 24.5 N
Humedad Óptima.	INV E-141 INV E-142	INV E-142: Proctor modificado mediante el cual se determina la relación entre la humedad y el peso unitario seco, con un molde de 15.3 cm y un martillo de 44.5 N
Gravedad Específica.	INV E-128	Se obtiene la gravedad específica de suelos que pasan por el tamiz de 4.75 mm con ayuda del picnómetro en el cual se prepara una lechada de suelo, se extrae el aire atrapado en esta y se llena el picnómetro con agua desaireada, finalmente se toma la masa del picnómetro más el agua y el suelo para calcular la gravedad específica.

Los materiales para la conformación de los terraplenes deberán cumplir con los requisitos mínimos establecidos en la tabla 5 de acuerdo con la especificación particular.

Tabla 5. Requerimientos mínimos para el material **Fuente:** (IN BASA,I .
Concesión Vías del Nus. (2019)

Característica	Norma de Ensayo INVIAS	Material tipo 1	Material tipo 2	Material tipo 3
		Corona y Cimiento	Cimiento y Núcleo	Núcleo
Tamaño máximo, mm	E-123	75	100	75
Porcentaje que pasa el tamiz N°10 en masa, máximo.	E-123	80	80	NA
Porcentaje que pasa el tamiz N°200 en masa, máximo.	E-123	25	35	60
Contenido de materia orgánica, máximo (%)	E-121	1	3	7
Límite Líquido máximo	E-125	30	40	55
Índice de Plasticidad máxima	E-126	10	15	25
CBR de laboratorio mínimo (%)	E-148	10	5	3
Expansión en prueba CBR máximo (%)	E-148	0	2	2
Índice de colapso máximo (%)	E-157	2	2	2
Contenido de sales solubles, máximo (%)	E-158	0.2	0.2	NA

Para el proyecto se determinará el peso unitario máximo seco y la humedad óptima del material mediante el ensayo de proctor modificado (INV E-142, INV E-141) con una pequeña variación; se debe realizar empleando 5 humedades diferentes para determinar la influencia de la variación de la humedad en el resultado final por la dificultad que representa humectar o secar el material en campo hasta llevarlo exactamente a la humedad óptima. (INVIAS, 2013)

La humedad de compactación no deberá estar en un rango de menos dos por ciento y de más uno por ciento y cada capa de material deberá tener un

grado de compactación mayor al 95% determinando este valor por medio del ensayo del cono de arena tomando una densidad cada 150 metros por calzada. (INV-E161).

La compactación se deberá realizar con capas de un espesor máximo de 30 centímetros, inicialmente se necesita una altura mínima de 120 centímetros de cimiento del terraplén usando el material 1 que se indica en la tabla 5. Luego se coloca el núcleo del terraplén usando el material tipo 2 y por último se coloca la corona que tendrá un espesor mínimo de 60 centímetros con material tipo 1

El control de calidad del terraplén inicia en campo teniendo en cuenta y poniendo en práctica bajo la supervisión adecuada los siguientes aspectos:

- La limpieza de la zona eliminando tierra vegetal o cualquier rastro de raíces u otros elementos que perjudiquen la eficacia del procedimiento.
- Es recomendable iniciar la compactación por los bordes con el fin de crear zonas de confinamiento que ayuda a que la capa se densifique.
- Compactar lo más pronto posible cada capa para evitar la evaporación del agua en el material.
- Cada capa debe tener una superficie uniforme sin deformaciones e irregularidades a la vista conservando las pendientes solicitadas en los planos del diseño geométrico.
- Con el fin de proteger el terraplén de los efectos de las aguas superficiales se debe construir la capa de material siguiente inmediatamente siendo esta la primera capa de subbase. (Office of Geotechnical Engineering, 2008)

También se debe asegurar el cumplimiento de las especificaciones en el laboratorio por medio de los ensayos que se encuentran en la tabla 4. Estos ensayos deben realizarse por cada 2500 metros cúbicos de material utilizado o por jornada laborada.

7 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos planteados en el presente informe de práctica se ha seguido la siguiente metodología con el fin de hacer el control de calidad adecuado para el suelo utilizado.

7.1 Recopilación de información técnica y material bibliográfico.

El estudio ha iniciado con una revisión bibliográfica existente sobre la compactación de suelos, sus diferentes teorías y las mejoras resultantes en estos, teniendo en cuenta los diferentes factores que pueden afectar este proceso lo cual fue consignado en el

marco teórico de este documento. Además, se realizó una revisión detallada sobre el contexto en el que se hicieron los trabajos y las características del material usado que se determinaron por medio de lo especificado en el marco normativo de la especificación particular desarrollada por el consultor BASA-Ingenieros para la concesión "Vías del Nus" cuyo objetivo fue desarrollar una especificación técnica particular que permitiera el uso de material residual que se obtiene de los diferentes taludes que se adelantan a lo largo del trazado. Esto se realiza en concordancia con lo establecido por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2013) (BASA, I. Concesión Vías del Nus, 2019)

7.2 Reconocimiento de los frentes de trabajo

Se realizaron recorridos las primeras 2 semanas de investigación con el fin de determinar cada uno de los tramos en los cuales se estaban conformando o se conformarían terraplenes (ver tabla1). De igual manera, se determinó la cadena de obtención, distribución y posterior cuidado del material que conforma el terraplén (ver imagen 2 ,3 y 4) proceso que se ejecuta simultáneamente y de la mano con los ensayos de laboratorio que clasifican el material y determinan su comportamiento al ser compactados.

7.3 Control de calidad de los terraplenes.

Las muestras fueron tomadas únicamente en las unidades funcionales 1 y 2 cuya ejecución y responsabilidad recae sobre SP Ingenieros S.A.S por lo tanto los ensayos de estas fueron realizados únicamente en su laboratorio acondicionado para la concesión "Vías del Nus".

La muestra de suelo se obtuvo directamente de los cortes de los taludes y fue colocada en bolsas ziploc cerradas herméticamente para conservar la humedad natural y permitir la distribución uniforme de la misma en toda la muestra mientras esta es transportada y posteriormente tratada.

7.4 Ensayos de laboratorio

7.4.1 Ensayos para caracterizar y clasificar el Material.

El control de calidad se inició con la caracterización del material por medio de los ensayos consignados en la tabla 4 y con la posterior clasificación de este según los distintos parámetros expuestos en la tabla 5. De esta manera se decidió a qué parte del terraplén se destina el material según sus características.

En la imagen 15 se puede observar un ejemplo en el cual se consignaron los resultados para un suelo proveniente del corte de uno de los taludes en la abscisa K18+000, en el que se encontró una arena limosa que debido a el resultado de límite líquido e

Índice de plasticidad puede ser utilizado como material tipo 2 y tipo 3 destinado únicamente a ser parte del núcleo del terraplén.

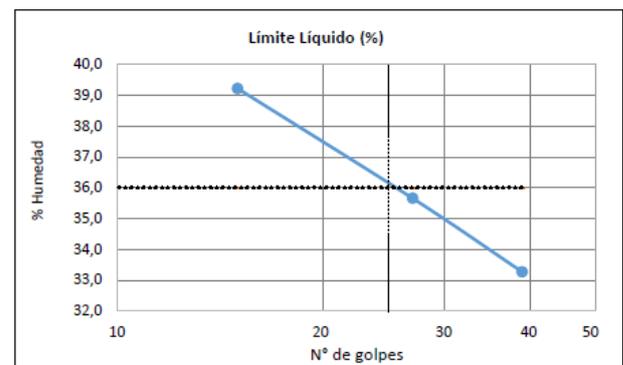
LÍMITE LÍQUIDO			
No DE GOLPES	15	27	39
Vidrio No	10	5	13
Peso 1 (g)	32,97	39,36	36,85
Peso 2 (g)	27,89	33,18	31,44
Peso 3 (g)	14,94	15,85	15,18
% de humedad	39,23	35,66	33,27

LÍMITE PLÁSTICO		
1	2	3
11	4	7
26,08	25,79	25,96
23,56	23,23	23,37
14,01	13,23	13,64
26,39	25,60	26,61

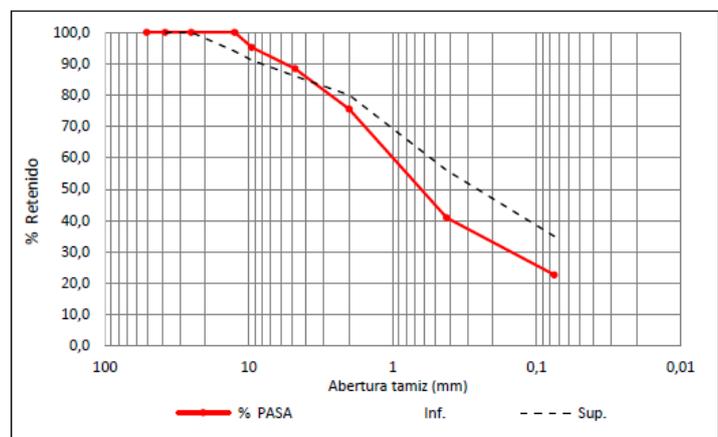
HUMEDAD NATURAL	
Peso muestra húm (g)	1.451,7
Peso muestra seca (g)	1.221,8
Peso platón (g)	249,0

CLASIFICACIONES DEL SUELO

Índice de grupo	0
AASHTO	A-2-4
USCS	SM



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO							
TAMICES		P1(g)=		484,0		Espec. Para tipo 1	
		P2(g)=		374,5		% PASA	
No	mm	Peso Ret. (g)	% Ret. Indiv.	% Ret. Acum.	% PASA	Inf.	Sup.
2"	51	0	0,0	0,0	100,0		
1,5"	38	0	0,0	0,0	100,0		
1"	25	0	0,0	0,0	100,0		
1/2"	12,5	0,0	0,0	0,0	100,0		
3/8"	9,5	23,2	4,8	4,8	95,2		
Nº4	4,75	32,9	6,8	11,6	88,4		
Nº10	2,00	62,5	12,9	24,5	75,5	0	80
Nº40	0,42	167,6	34,6	59,1	40,9		
Nº200	0,075	88,3	18,2	77,3	22,7	0	35



CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA POR IGNICIÓN					
MUESTRA Nº	PESO CRISOL / PLATO + SUELO SECO antes (g)	PESO CRISOL / PLATO + SUELO SECO después (g)	PESO CRISOL / PLATO (g)	% MATERIA ORGÁNICA	% DIFERENCIA DE RESULTADOS
1	163,50	163,45	37,00	0,04	
2	193,70	193,65	37,40	0,03	0,01% Cumple

RESULTADOS	REQUISITO	CUMPLE	
Límite líquido	36	< 30/40/55	SI Tipos 2-3
Límite plástico	26	N.A.	N.A.
Índ. plasticidad	10	< 10/15/25	SI Tipos 2-3
Hum. natural	23,6%	N.A.	N.A.

RESULTADOS	REQUISITO	CUMPLE	
Tam. Máximo (mm)	12,5	< 75/100	SI
% Pasa tamiz Nº10	75,5	< 80/N.A.	SI
% Pasa tamiz Nº200	22,7	< 25/35/60	SI
% Materia Orgánica	0,04	< 1/3/7	SI

Imagen 15. Caracterización y clasificación del material. **Fuente:** Laboratorio obra VINUS.

En la tabla 6 se encuentra un ejemplo de cómo se recopiló la información de manera organizada para permitir hacer una clasificación más rápida y sencilla del material utilizado.

Tabla 6. Recopilación de resultados de ensayos de laboratorio. **Fuente.** Elaboración propia.

Fecha	Origen	Característica	Unidad	Norma ensayo	Resultado	Criterio	Cumple	Registro.
21/01/2020	Zona Préstamo K21+320	Determinación Tamaño Máximo.	mm	INV E-123	4.8	< 75 / 100 / 150	SI	20-01-21_12X_220_866
21/01/2020	Zona Préstamo K21+320	Porcentaje pasa tamiz N° 10	%	INV E-123	97.7	< 80 / 80 / -	SI TIPO 3	20-01-21_12X_220_866
21/01/2020	Zona Préstamo K21+320	Porcentaje pasa tamiz N°200	%	INV E-123	30.4	< 25 / 35 / 60	SI TIPOS 2 Y 3	20-01-21_12X_220_866
21/01/2020	Zona Préstamo K21+320	LL	%	INV E-125	33	< 30 / 40 / 55	SI TIPOS 2 Y 3	20-01-21_12X_220_866
21/01/2020	Zona Préstamo K21+320	IP	%	INV E-126	5	< 10 / 15 / -	SI	20-01-21_12X_220_866
21/01/2020	Zona Préstamo K21+320	Contenido de Materia Orgánica	%	INV E-121	0.18	< 0,0 / 1,0 / 1,0	SI TIPOS 2 Y 3	20-01-21_12X_220_866
21/01/2020	Corte K18+000	Determinación Tamaño Máximo.	mm	INV E-123	12.5	< 75 / 100 / 150	SI	20-01-21_12X_220_867
21/01/2020	Corte K18+000	Porcentaje pasa tamiz N° 10	%	INV E-123	75.5	< 80 / 80 / -	SI	20-01-21_12X_220_867
21/01/2020	Corte K18+000	Porcentaje pasa tamiz N° 200	%	INV E-123	22.7	< 25 / 35 / 60	SI	20-01-21_12X_220_867
21/01/2020	Corte K18+000	LL	%	INV E-125	36	< 30 / 40 / 55	SI TIPOS 2 Y 3	20-01-21_12X_220_867
21/01/2020	Corte K18+000	IP	%	INV E-126	10	< 10 / 15 / -	SI TIPOS 2 Y 3	20-01-21_12X_220_867
21/01/2020	Corte K18+000	Contenido de Materia Orgánica.	%	INV E-121	0.04	< 0,0 / 1,0 / 1,0	SI	20-01-21_12X_220_867

Cabe resaltar que cada uno de los ensayos se realizó de acuerdo con los protocolos y procedimientos propuesto por el Instituto Nacional de Vías en cada una de las normas de ensayo que se encuentran en el marco normativo de este documento (ver tabla 4)

Luego de conocer las características del material y el destino de este, se procede a evaluar su capacidad por medio de los ensayos dinámicos de proctor.

7.4.2 Ensayos de compactación

Cada muestra se analizó en el laboratorio por medio de ensayos de compactación dinámica, los cuales son proctor normal y proctor modificado.

En este caso solo se realizó el ensayo de proctor modificado siguiendo lo descrito anteriormente en el marco teórico y normativo de este documento.

El objetivo de este ensayo es poder determinar la densidad máxima con una humedad óptima a través de las curvas representativas de compactación en la cual se establecen las diferentes condiciones del suelo frente a distintos porcentajes de humedad.

Al tener muestras que conservaron la humedad natural se tiene un punto de inicio para el primer ensayo de proctor que se realizó, el cual representa uno de los 5 puntos con los cuales se construyó la curva de compactación. Para el siguiente ensayo se disminuyó el contenido de humedad en un 3 por ciento con el fin de determinar los cambios en el valor del peso unitario ante una humedad diferente. Si este aumenta quiere decir que se está acercando al porcentaje óptimo de humedad y peso unitario máximo, en este caso se disminuye nuevamente el porcentaje de humedad con el fin de observar si la tendencia se mantiene en alza y se debe repetir el proceso o si disminuye encontrando el pico entre estos dos valores de porcentaje de humedad. Por otro lado, si el peso unitario disminuye ante la primera disminución de humedad quiere decir que el porcentaje óptimo de humedad se encuentra por encima del valor ensayado y se realiza un análisis similar solo que con humedades cada vez superiores.

Determinación No.	1	2	3	4	5
Humedad deseada %	15	18	21	24	27
Humedad natural de la muestra %	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8
Agua adicional C.C.	186	276	366	456	546
Molde No	1	1	1	1	1
Peso del molde+ Suelo compactado(gms)	3869	4015	4125	4073	4025
Peso del molde (gms)	2240	2240	2240	2240	2240
Peso del Suelo Compactado (gms)	1629	1775	1885	1833	1785
Peso de la muestra seca (gms)	1420	1512	1568	1485	1409
Volumen del molde cm ³	934	934	934	935	934
Densidad Seca de la muestra gms/cm ³	1,521	1,619	1,679	1,589	1,509
Densidad Seca de la muestra Lb/pié ³	94,9	101,1	104,8	99,2	94,2
CALCULO DE HUMEDADES					
Peso Tara (Pt) (gms)	182,0	200,0	249,0	248,0	201,0
Peso humedo+ Peso Tara (gms)	475,5	518,3	688,8	704,0	625,3
Peso Seco+ Peso tara (gms)	437,9	471,1	614,8	617,5	536,0
Peso seco (gms)	255,9	271,1	365,8	369,5	335,0
Humedad (%)	14,7	17,4	20,2	23,4	26,7

Imagen 16. Datos Ensayo de proctor. **Fuente:** Laboratorio, Obra Vinus.

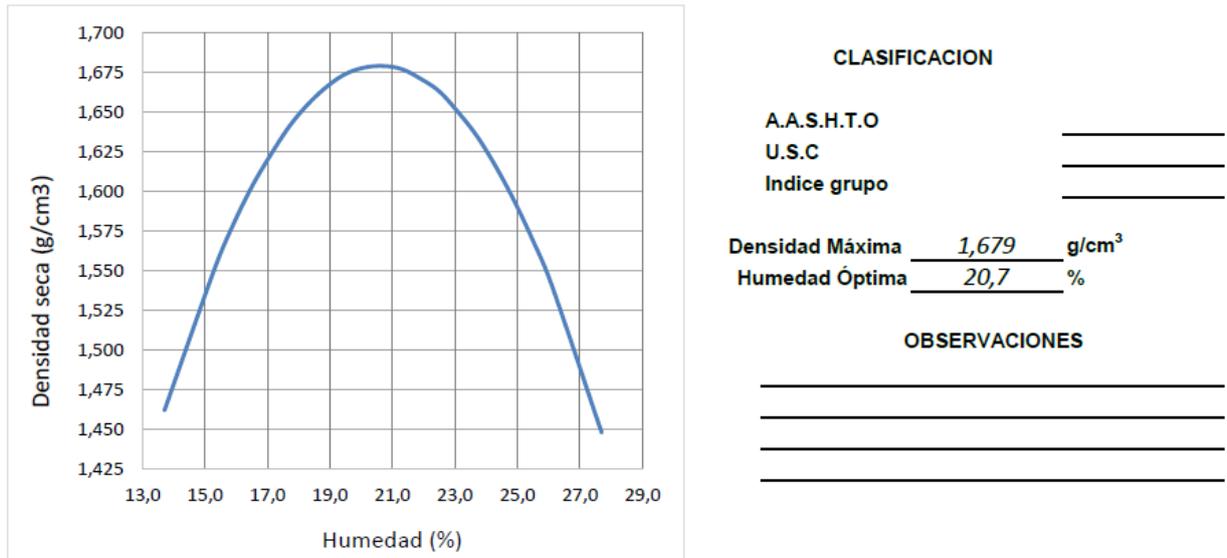


Imagen 17. Curva de compactación. **Fuente:** Laboratorio, Obra Vinus.

Los resultados de los ensayos de laboratorio especificados en la tabla 4 bajo las condiciones solicitadas en la tabla 5 y los resultados del ensayo de proctor modificado se encuentran en el anexo 2 el cual corresponde a la entrega del departamento de calidad entre el 15 de enero y el 15 de febrero de 2020.

7.4.3 Chequeo de maquinaria.

Al conocer las características del material y clasificarlo para su uso se procede con la conformación de las capas del terraplén. En este punto se tuvo en cuenta otro aspecto importante para garantizar un acabado uniforme y este es el estado de funcionamiento de los equipos, por lo tanto, con ayuda del área SST (Salud y seguridad en el trabajo) se llenaron los preoperacionales específicos para cada tipo de maquinaria.

En la tabla 6 se identifican cada uno de los chequeos diarios que se realizaron, por ejemplo, a un vibro compactador antes de iniciar cualquier labor en campo. De esta manera se garantizó la misma frecuencia de vibrado y el estado de los rodillos para tener un acabado uniforme que cumple con las cotas de diseño a lo largo del trazado.

Tabla 6. Preoperacional de vibro compactador **Fuente:** Área SST VINUS.

INSPECCIÓN PREOPERACIONAL - VIBROCOMPACTADOR									
SISTEMA	ITEM	LUN	MAR	MIE	JUE	VIE	SAB	DOM	
Motor	Aseo y limpieza								
	Estado de las correas (Tensión)								
	Estado de poleas y tensores								
	Control de humo de escape								
	Estado de soportes (Vibraciones)								
	Niveles de fluidos								
	Estado de los filtros								
	Estado de mangueras								
Eléctrico	Estado de abrazaderas								
	Estado de conectores								
	Encendido y apagado del equipo								
	Luces delanteras y traseras								
	Stops y direccionales								
	Pito y alarma de reversa								
	Caja de fusibles								
Frenos	Estado de batería								
	Alojamiento de baterías								
	Operación del freno de parqueo								
Latonería y Pintura	Estado del actuador del freno de parqueo								
	Estado general de latas del equipo								
	Estado general de pintura								
	Letreros e indicaciones reflectivas								
Tren de fuerza	Placa e identificadores del equipo								
	Estado de ejes, cardanes y crucetas								
	Mandos de avance								
	Soportes y flejes								
	Diferenciales - Transmisión (Ruidos anormales)								
Dirección Llantas	Estado de servotransmisión								
	Volante de dirección								
	Operación de bomba de dirección								
	Cardanes y crucetas de dirección								
Cabina	Estado de Llantas								
	Aseo y limpieza								
	Control elementos sueltos en la cabina								
	iluminación interna								
	Cinturón de seguridad en todos los puestos								
	Vidrios completos								
	Retrovisor central								
	Retrovisores laterales								
	Limpiaparabrisas								
Salidas de emergencia visibles									
Hidráulico	Estado general de la carrocería								
	Bomba hidráulica (Ruidos anormales)								
	Control de fugas en los bancos de válvulas								
	Cilindros								
Implementos	Estado general de mangueras hidráulicas.								
	Tambor de vibración								
Otros	Ajuste de bujes y pasadores								
	Kit ambiental								
	Botiquín								
	Estado de carga del extintor								

Al hacer el chequeo de la maquinaria se procede con la conformación de cada capa del terraplén, y se continuó con el chequeo de las densidades in situ y el porcentaje de compactación

7.4.4 Formato establecido para las mediciones de campo.

Antes de hacer el chequeo de las densidades in situ para conocer el porcentaje de compactación se creó el formato para llevar un control ordenado de cada una de las capas colocadas en campo.

En cada formato se consignaron de manera ordenada las abscisas en las que se extiende el material, de la misma manera la capa asociada y los distintos datos necesarios para el cálculo del porcentaje de compactación, que siempre debe ser superior al 95 por ciento del valor obtenido por medio del proctor modificado. El formato utilizado para calcular el porcentaje de compactación por medio del método del cono de arena (INV-E-161) se puede observar en la tabla 7, en esta se diferencia la franja azul para darle importancia a la capa que se compacta y así tener un control del avance, también se tienen las franjas blancas que son los datos que se obtienen en campo y las franjas amarillas en las cuales se necesitan hacer cálculos con las fórmulas descritas en la misma tabla. Cada ensayo se debe realizar en forma de zigzag para abarcar todo el ancho de la calzada así que se define LD como el lado derecho, LI como el lado izquierdo y el eje en el centro de la calzada.

Tabla 7. Formato para control de densidades. **Fuente:** Elaboración Propia.

Fecha				20-may-20	20-may-20	20-may-20	20-may-20
Ensayo No				1	2	3	4
Ítem	Propiedades	Und	Fórmula	LD	LI	EJE	LD
A	Abscisa						
B	Cota o capa						
1	Peso frasco + arena inicial	g					
2	Peso frasco + arena final	g					
3	Peso arena total usada	g	(1)-(2)				
4	Constante del cono	g	Constante				
5	Peso de la arena en el hueco	g	(3)-(4)				
6	Densidad de la arena	g/cm³	Constante				
7	Volumen del hueco	cm³	(5) / (6)				
8	Peso del material extraído húmedo	g					
9	Humedad	%					
10	Peso del material extraído seco	g	(8) / (1+(9/100))				
11	Densidad seca	g/cm³	(10) / (7)				
12	% de compactación	%	(11/proctor) *100				
13	Especificación	%	Proctor mod.	95.0	95.0	95.0	95.0

7.4.5 Densidades in situ, control porcentaje de compactación.

Finalmente se debe realizar el control en campo del porcentaje de compactación por medio del ensayo del cono de arena (INV E - 161) cuyos datos se consignan en la tabla 7 y se comparan con el resultado de proctor modificado obtenido en el laboratorio (ver imagen 16 y 17).

En la imagen 18 se puede observar el equipo al igual que en la tabla 21, así como parte del procedimiento en el cual se está retirando el material necesario para los cálculos.



Imagen 18. Ensayo del cono de arena en campo. **Fuente:** Elaboración propia.

Tras tomar los pesos necesarios para realizar el cálculo del porcentaje de compactación, se consignan como en la tabla 8, el cual es un ejemplo real tomado in situ comparado con el resultado de proctor modificado realizado a una muestra de suelo cuyos resultados arrojaron una densidad máxima de 1.679 g/cm^3 con una humedad óptima de 20.1 % (ver imagen 16 y 17). De acuerdo con las teorías de compactación el agua se utiliza como un lubricante que permite el movimiento de las partículas, por esto, en este caso se tiene un contenido alto de humedad debido a la presencia de material fino que tiene en conjunto una mayor área superficial por cubrir. A pesar de esto el suelo alcanza una buena densidad máxima e incluso es necesario el uso de cincel y mazo como se ve en la imagen 18 para poder realizar el ensayo de cono de arena.

Para completar los datos necesarios para llenar el formulario se necesita la humedad de cada zona en la cual se realiza el ensayo. Para ello se utiliza el Humedómetro analógico que se observa en la tabla 2. Esto es importante para saber si la humedad

de la capa se encuentra cercana al porcentaje óptimo de humedad que arrojó el ensayo de proctor.

Es importante recalcar que la cantidad de ensayos realizados que aumenta la confiabilidad de los resultados, al 24 de enero como se ve en la tabla 8 se tenían 2242 realizando mínimo 4 por capa para poder liberarla.

Tabla 8. Ejemplo de resultados del porcentaje de compactación. **Fuente:** Elaboración propia.

Fecha				24-ene-20	24-ene-20	24-ene-20	24-ene-20
Ensayo No				2239	2240	2241	2242
Ítem	Propiedades	Und	Fórmula	LD	LI	EJE	LD
A	Abscisa			K25+500	K25+510	K25+520	K25+530
B	Cota o capa			12	12	12	12
1	Peso frasco + arena inicial	g		5990	5960	5925	5912
2	Peso frasco + arena final	g		2250	2085	2155	2126
3	Peso arena total usada	g	(1)-(2)	3740	3875	3770	3786
4	Constante del cono	g	Constante	1545	1545	1545	1545
5	Peso de la arena en el hueco	g	(3)-(4)	2195	2330	2225	2241
6	Densidad de la arena	g/cm³	Constante	1.37	1.37	1.37	1.37
7	Volumen del hueco	cm³	(5) / (6)	1602	1701	1624	1636
8	Peso del material extraído húmedo	g		2995	3235	3070	3035
9	Humedad	%		16.0	16.1	16.2	16.0
10	Peso del material extraído seco	g	(8) / (1+(9/100))	2582	2786	2642	2616
11	Densidad seca	g/cm³	(10) / (7)	1.612	1.638	1.627	1.599
12	% de compactación	%	(11/proctor) *100	96.0	97.6	96.9	95.3
13	Especificación	%	Proctor mod.	95.0	95.0	95.0	95.0

Para analizar los resultados de una manera más ordenada se cuenta con una lista en la cual se consignaron en orden cada uno de los resultados obtenidos en los formatos, la misma se encuentra en el anexo 1. Una pequeña muestra del libro de Excel puede ser observados en la tabla 9 y además se encuentran en esta los resultados de la tabla 8, con el fin de identificar mejor lo que se trata de ejemplificar.

Tabla 9. Ejemplo organización de datos de densidades **Fuente:** Elaboración propia.

Fecha	Material	Espec. Técnica	ρ Máx. (g/cm ³)	Abscisa	Capas teóricas	Capa	Lado	% Compact.	CUMPLE ($\rho \geq \rho_{\text{diseño}}$)
24/01/2020	Terraplén núcleo	ART. 220-13	1.680	K25+500	20	12	der	95.9	SI
24/01/2020	Terraplén núcleo	ART. 220-13	1.680	K25+510	20	12	izq.	97.5	SI
24/01/2020	Terraplén núcleo	ART. 220-13	1.680	K25+520	20	12	eje	96.8	SI
24/01/2020	Terraplén núcleo	ART. 220-13	1.680	K25+530	20	12	der	95.2	SI
25/01/2020	Terraplén núcleo	ART. 220-13	1.680	K25+500	20	13	der	98.1	SI
25/01/2020	Terraplén núcleo	ART. 220-13	1.680	K25+510	20	13	izq.	101.6	SI
25/01/2020	Terraplén núcleo	ART. 220-13	1.680	K25+520	20	13	eje	100.7	SI
25/01/2020	Terraplén núcleo	ART. 220-13	1.680	K25+530	20	13	der	99.2	SI

8 RESULTADOS Y ANÁLISIS.

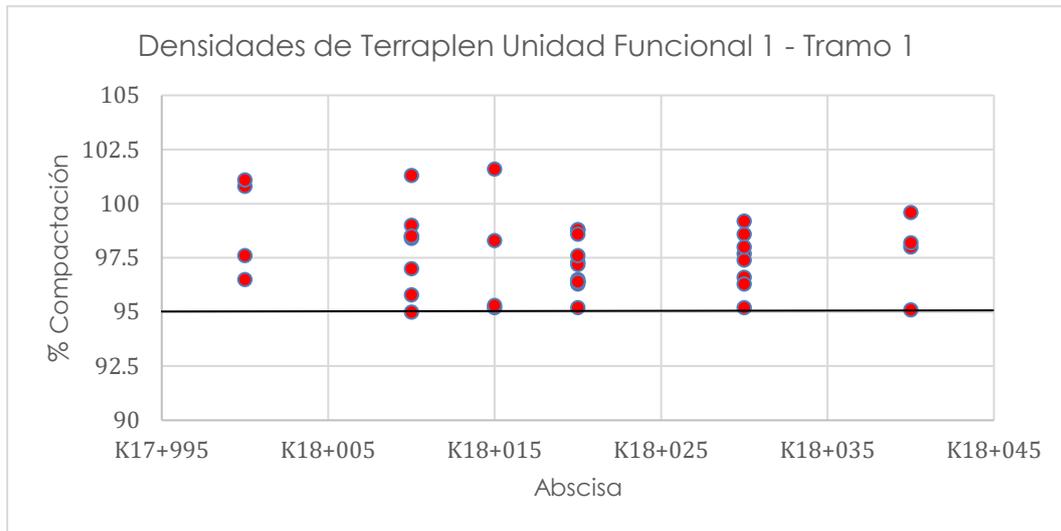
De la lista completa que ejemplifica la tabla 9 se tomaron cada uno de los resultados asociados a una abscisa específica en donde se tomó el ensayo. Con estos datos se construyeron las gráficas presentadas a continuación con el fin de observar la distribución de los distintos porcentajes de compactación

En cada una de las gráficas se identifica el mínimo porcentaje de compactación necesario que es del 95 %.

Para las 2 unidades funcionales, las gráficas se dividieron según los tramos definidos en la tabla 1 con el fin de observar con mayor claridad los resultados obtenidos en cada zona del trazado geométrico de la vía.

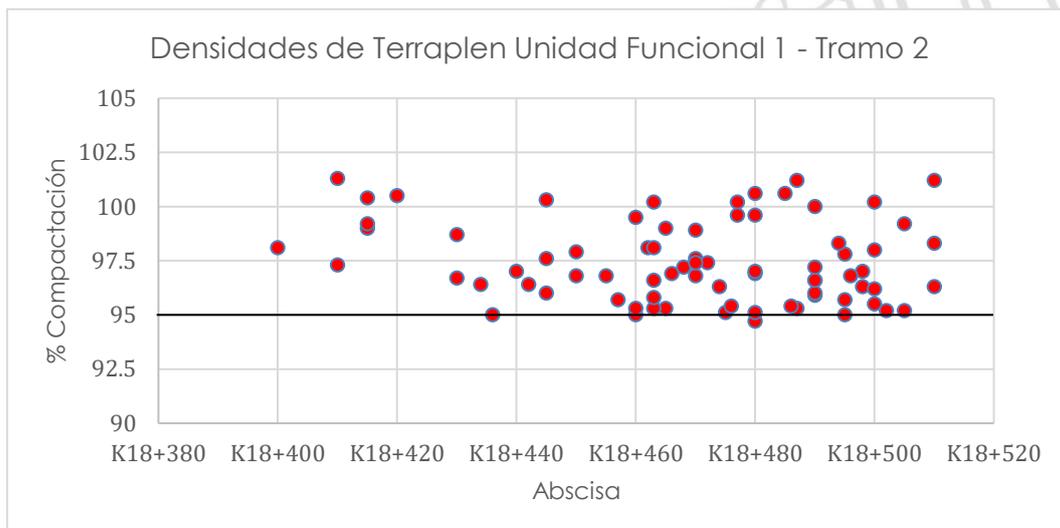
En la gráfica 1 correspondiente al primer tramo trabajado en la unidad funcional 1 no se tiene una concentración tan grande de datos de compactación lo que sugiere una cantidad reducida de capas, pero en realidad en este tramo se deben colocar 25 capas de 30 cm conformando un lleno de 7.5 metros, sin embargo, solo se inicia con la colocación del cimiento del terraplén para dar paso a la maquinaria y al personal necesario para llevar a cabo las diferentes obras en el puente Manzanares (ABS K17+700), como excavación de pilas y construcción de estribos. Cuando estas estructuras se encuentren listas se puede proceder con la conformación del terraplén y del muro de aproximación en tierra armada que se conectará con la losa de aproximación del puente.

Que existan columnas de datos en ciertas abscisas nos indica que los ensayos del cono de arena se realizaron en la misma abscisa, pero variando la cota, ya que se coloca una capa nueva de 30 centímetros de material.



Gráfica 1. Densidades tomadas en el tramo 1 UF1.

En el tramo 2 de la unidad funcional 1 se cuenta con un lleno de 6 metros, en total 20 capas las cuales cuentan con una distribución homogénea entre el K18+450 y el K18+550 (ver gráfica 2) denotando una profundidad con una cota constante debido al descapote del terreno. Por otro lado, entre el K18+400 y el K18+450 se tiene una dispersión menor de datos lo que nos indica un cambio en la profundidad, generando una pendiente en el terreno para el ingreso de las volquetas con el material que se distribuyó uniformemente con ayuda del bulldozer y se compactó con ayuda del vibro compactador de rodillo.



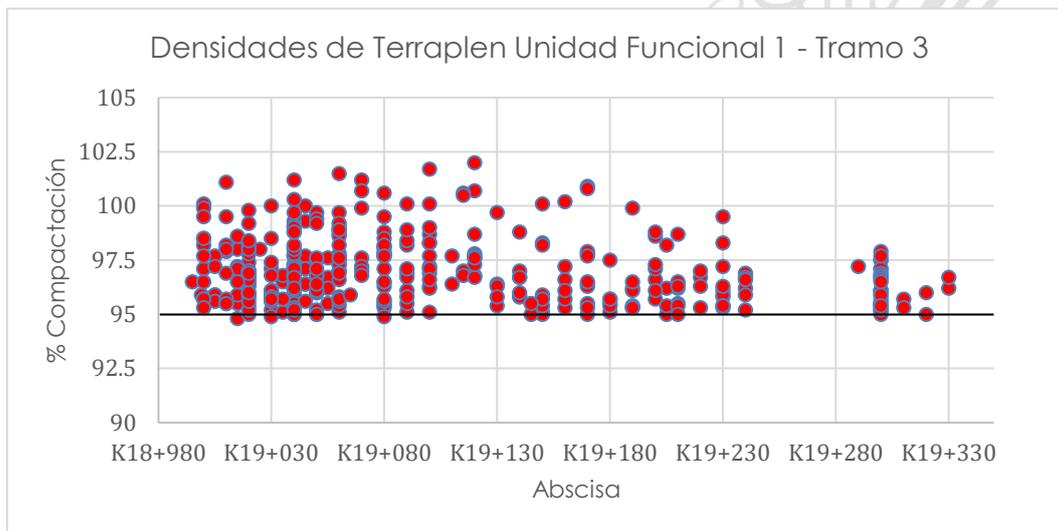
Gráfica 2. Densidades tomadas en el tramo 2 UF1.

El tramo 3 (ver gráfica 3) cuenta con un lleno de grandes magnitudes, 21 metros de profundidad que se lograron llenar luego de compactar 71 capas a lo largo de 400

metros. En este punto no fue económicamente viable construir un puente ya que este terraplén se conecta con el puente Porce de 120 metros que atraviesa el río con el mismo nombre. En total se necesitarían 520 metros de puente lo que fue descartado, por lo tanto, se construyó este gran terraplén.

En la gráfica 3 se observa una mayor concentración cerca a la abscisa K19+040, el punto más bajo en el cual fue necesario construir un box Culvert de 3x3 metros para permitir el paso del agua de escorrentía directa.

Al finalizar el tramo 3 se encuentra una discontinuidad en los datos por la adecuación de la zona de trabajo para la excavación de las pilas del puente Porce en el K19+280. Más allá de esta abscisa no se continúa con la conformación de terraplén dado que en el K19+230 se iniciará a conformar la elevación hacia la losa de aproximación del mismo puente.

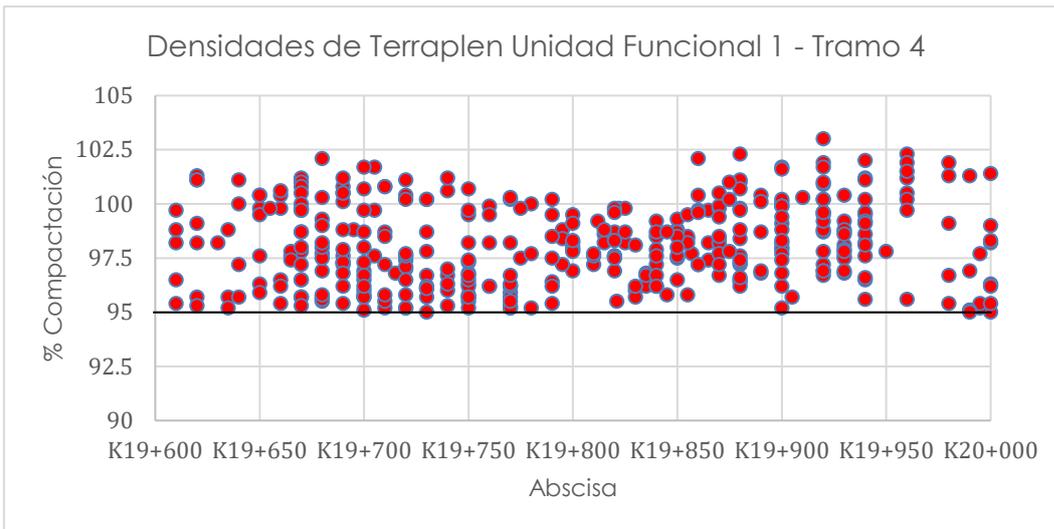


Gráfica 3. Densidades tomadas en el tramo 3 UF1.

El tramo 4 se encuentra en la otra margen del río Porce y cuenta con 33 capas para lograr un terraplén de 10 metros de altura el cual es necesario para conectarse con el puente. Este terraplén puede ser observado en la imagen 3.

En la gráfica 4 se puede observar que este tramo cuenta con una distribución homogénea, ya que el terraplén se crea para elevar la estructura del pavimento sobre la cota de rasante del terreno.

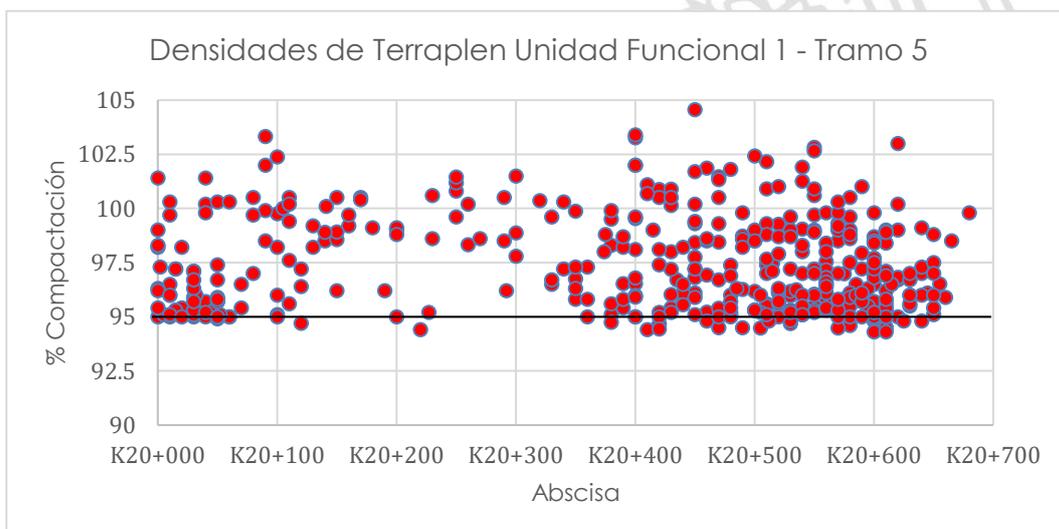
En el K19+830 la construcción de un Box Culvert fue necesaria para evacuar con rapidez el agua de la carpeta asfáltica y de los grandes restaurantes existentes en la zona tal como se puede corroborar en la imagen 3. Por esto, alrededor de esta abscisa se cuenta con una dispersión de datos menor y una columna de datos más baja, inicialmente se imprime una energía menor con el fin de preservar la integridad de la estructura hidráulica existente.



Gráfica 4. Densidades tomadas en el tramo 4 UF1.

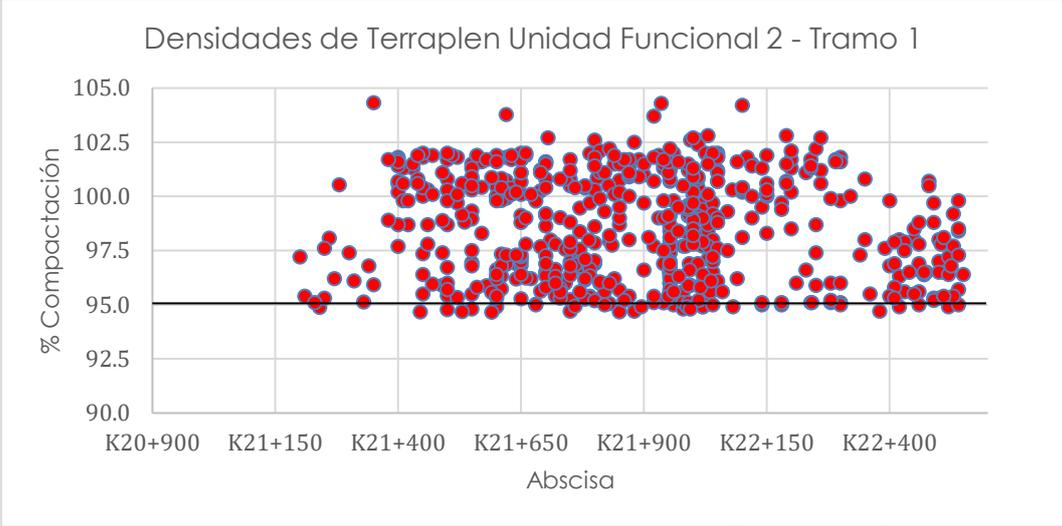
El tramo 5 cuenta con una distribución heterogénea debido a varios factores, inicialmente entre los K20+000 al K20+100 se cuenta con un lleno grande de 5 metros de profundidad en el cual se conformaron 18 capas de material; luego se cuenta con una zona de menor profundidad entre el K20+100 al K20+300 conformando un terraplén de 10 capas de 0.30 cm.

Finalmente, alrededor del K20+500 se encuentran las partidas de Amalfi punto en el cual fue necesario construir una intersección en forma de medio trébol que permite el desplazamiento hacia los municipios de Gómez Plata y Yolombo, de igual manera, se encuentra un retorno hacia el Valle de Aburrá y una salida al corregimiento de Porcesito. Por esta razón, se tiene una concentración tan alta de puntos ya que se debe conformar la calzada principal y cada una de las salidas con su respectiva pendiente.



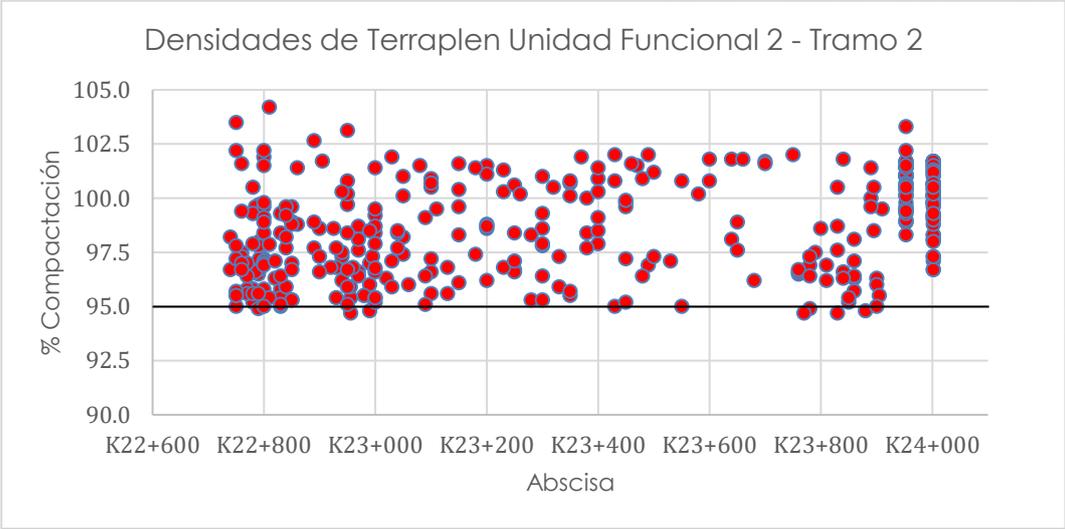
Gráfica 5. Densidades tomadas en el tramo 5 UF1.

La gráfica 6 enseña el tramo 1 de la unidad funcional 2 en la cual se puede observar una gran concentración de puntos entre el K21+500 y el K22+080 que representa la zona media y más profunda del lleno, en el cual se necesitaron compactar 33 capas de material. Por la forma en la que se moldea el relieve se mira una pérdida en la profundidad del lleno y por lo tanto de densidades tomadas entre las abscisas K21+130 al K21+500 y entre el K22+080 y el K22+500.



Gráfica 6. Densidades tomadas en el tramo 1 UF2

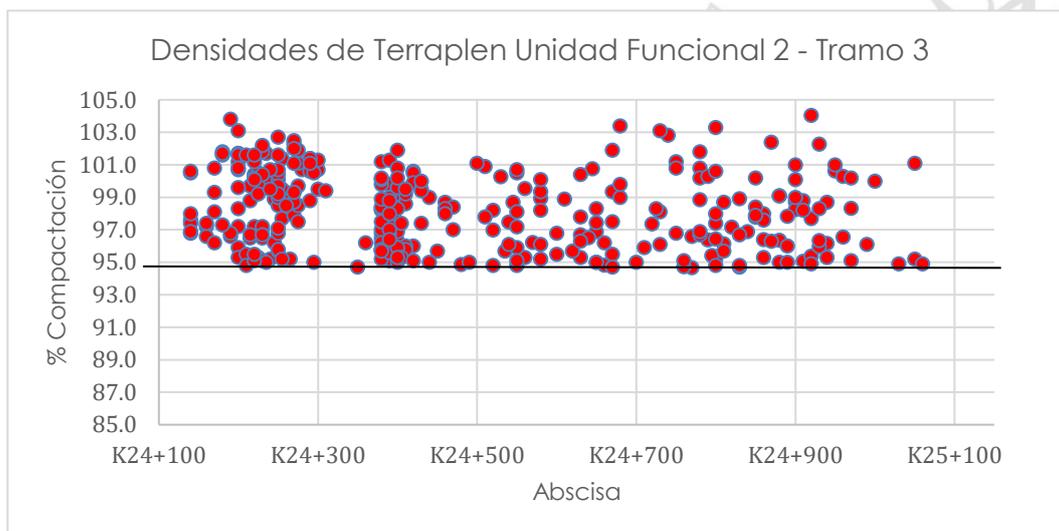
La gráfica 7 describe los diferentes trabajos que se realizan en este tramo del trazado. Entre el K22+800 y el K23+000 se tienen 28 capas que inician la formación de la elevación hacia el Puente la Comba. Esta elevación se encuentra con un box vehicular usado como retorno antes del puente en el K23+650 y es por esto por lo que se observa una menor concentración de puntos porque la mayor parte de la altura la compone esta estructura. Finalmente, cerca al K24+000 se encuentran 2 columnas de datos bien definidas que representan el inicio del puente, una de las líneas en el K23+950 representa la calzada izquierda y la otra en el K24+000 representa la calzada derecha.



Gráfica 7. Densidades tomadas en el tramo 2 UF2

En la gráfica 8 se tiene una mayor concentración entre el K24+100 y el K24+450, en esta zona se tiene un terraplén grande de 50 capas con una altura total de 15 metros, sin embargo, se tiene una discontinuidad en los datos entre el K24+300 y el K24+360 en el cual se realizó un muro armado con pantallas laterales prefabricadas de concreto. En este punto se colocaron 44 capas de material de base por la inestabilidad del terreno en esta zona.

Del K24+500 en adelante se tiene un trazado homogéneo hasta la entrada del túnel de la Quebra que es construido por la empresa Mincivil.



Gráfica 8. Densidades tomadas en el tramo 3 UF2

Cada una de las gráficas cuenta en algún punto con valores por encima del 102 % del porcentaje de compactación con respecto al ensayo de Proctor modificado realizado en el laboratorio, lo cual sugiere que se imprimió más energía al compactar algunas capas de la que era necesaria, generando posiblemente la degradación del material que conlleva a obtener una densidad aparente que no ejemplifica las condiciones reales del comportamiento de este. Este tipo de práctica o comportamiento se debe evitar en la conformación de terraplenes y de las partes inferiores de la estructura asfáltica como lo son subbase y base granular.

En la Gráfica 5 y 6 se pueden observar datos por debajo de la línea del 95 %. Cada uno de estos resultados fueron analizados en el momento por el ingeniero de calidad y la interventoría. Esas capas fueron liberadas con valores inferiores al 95 por ciento ya que hacían parte del núcleo del terraplén a una profundidad a la cual se ven reducidos los esfuerzos significativamente.

En caso contrario, si el resultado es menor al 95% en capas del cimiento o de la corona del terraplén no se procede con la liberación de la capa y es necesario escarificar y

volver a compactar con ayuda del vibro compactador para garantizar la calidad del terraplén y la posterior estructura de pavimento.

Como se puede observar en cada una de las gráficas la mayor parte de los puntos se encuentran sobre la línea del 95 %.

Cada una de las gráficas se debe analizar por separado ya que no cuentan con la misma escala, debido a las distintas longitudes que tiene cada uno de los tramos. Por ejemplo, el gráfico 3 muestra el terraplén más profundo y con mayor cantidad de ensayos realizados, sin embargo, no muestra una saturación grande de puntos.

9 CONCLUSIONES.

- El uso de suelos marginales en la conformación de terraplenes funciona, se obtienen porcentajes de compactación mayores al 95 por ciento del proctor realizado en laboratorio con altas densidades máximas, por lo tanto esta practica puede empezar a usarse con más regularidad en nuestro territorio, por lo menos, para conformar el núcleo del terraplén el cual requiere un material con las menores características permitidas, de esta manera , se empiezan a adoptar políticas de desarrollo sostenible generando el menor impacto posible, evitando el uso de canteras y de zonas de disposición de materiales que provocan cambios negativos en el recurso hídrico cercano aportando una gran cantidad de carga sedimentaria.
- En cada uno de los tramos se puede observar las características del relieve e incluso las estructuras presentes al analizar la distribución espacial de los datos del porcentaje de compactación en las gráficas presentadas, un ejemplo de ello son las zonas con mayor concentración de puntos que corresponde a zonas con de mayor profundidad.
- La energía de compactación influye directamente en la conformación de cada capa del terraplén y el exceso de esta puede provocar problemas al generar degradación en el material usado arrojando porcentajes de compactación mas elevados a los esperados y que no significan necesariamente que la capa tendrá un mejor comportamiento que es exactamente lo que se busca al compactar un material.

10 Bibliografía

- Budhu, M. (2011). *Soil Mechanics and Foundations*. Tucson: John Wiley & Sons, INC.
- Das, B. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Cuarta edición. Mexico D.F: CENGAGE learning.
- Revolorio, F. (2013). *Tesis para optar por el grado de ingeniero civil: "Incidencia de resultados del ensayo proctor por la influencia de clima, humedad, equipo y superficie de base de compactación durante su desarrollo"*. San Carlos: Universidad de San Carlos Guatemala.
- INVIAS. (2013). *Capítulo 2- Explanaciones*. 1–8.
- INVIAS. (2013). Sección 100. *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo Para Materiales de Carreteras, 100(E-172)*, 185–206.
- Ministerio de Fomento. (2002). *Terraplenes, Artículo 330*. 20948–20954. http://www.carreteros.org/normativa/pg3/ordenes/ministeriales/fom1382_2002/330.pdf
- Office of Geotechnical Engineering. (2008). *Design procedures for soil modification or stabilization*. January, 13. <https://doi.org/46219>
- Veatch, J. O. (1926). Classification of Organic Soils. *Soil Science Society of America Journal*, B7(1), 108. <https://doi.org/10.2136/sssaj1926.0361599500b700010022x>
- White, D. J. (1999). *Embankment Quality Phase II Final Report Principal Contributor*. December.
- Reid, P. B. (1993). *Mecánica de suelos* . Bogota : Mc graw Hill.
- DOT, I. (26 de Mayo de 2015). *in.gov*. Obtenido de *in.gov*: <https://www.in.gov/indot/files/Fieldtesting.pdf>
- BASA,I . Concesión Vías del Nus. (2019). *CONFORMACIÓN DE TERRAPLENES ESPECIFICACIÓN TÉCNICA PARTICULAR*.
- Sánchez, A. (2008). *Evaluación del método de HILF para el control de compactación de mezclas de suelos volcánicos del aeropuerto del café*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.

11 ANEXOS

- **ANEXO 1.** Lista maestra de ensayos de densidades. Documento en PDF.
- **ANEXO 2.** Carpeta con resultados de laboratorio a suelos marginales realizados entre el 15 de enero y el 15 de febrero. Documentos en PDF