

COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MÁXIMO Y HUMEDAD ÓPTIMA  
EN ENSAYOS PROCTOR MODIFICADO REALIZADOS DE FORMA MANUAL Y  
DE FORMA MECÁNICA PARA LAS ARENAS LIMOSAS DE BAJA  
COMPRESIBILIDAD DE LA UPB

MANUEL ALEJANDRO SALDAÑA OSORIO  
ANDRES JULIAN BLANCO MELO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERIAS  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2015

COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MÁXIMO Y HUMEDAD ÓPTIMA  
EN ENSAYOS PROCTOR MODIFICADO REALIZADOS DE FORMA MANUAL Y  
DE FORMA MECÁNICA PARA LAS ARENAS LIMOSAS DE BAJA  
COMPRESIBILIDAD DE LA UPB

MANUEL ALEJANDRO SALDAÑA OSORIO  
ANDRES JULIAN BLANCO MELO

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero civil.

Director:

Ing. MSc. GERARDO BAUTISTA GARCIA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERIAS  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2015

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bucaramanga, Junio del 2015

## **DEDICATORIA**

Dedicado a mis padres ROQUELINA ESTHER OSORIO SALDAÑA y CARLOS HERNAN SALDAÑA MARTIN y que me apoyaron desde el momento que decidí optar por la ingeniería civil como parte del proceso formativo en mi vida profesional. Porque gracias a ellos tuve la oportunidad de recibir una muy buena educación institucional en la ciudad de Bucaramanga e inculcarme la sencillez y humildad para la construcción del éxito.

Dedicado a mi hermano CARLOS MAURICIO SALDAÑA OSORIO que con su profesión musical ha llenado de orgullo a nuestra familia, dejando en alto en cada presentación el éxito y la perseverancia por cumplir sus sueños. Igualmente a mi hermano LUIS EDUARDO SALDAÑA OSORIO por aportarme de sus conocimientos y así poder contar con su apoyo incondicional.

A la familia SALDAÑA QUIÑONEZ, en especial a mi tía profesora ELSA YISELA por ser parte de mi formación estudiantil jardín infantil. Gracias a ellos que me brindan el afecto, cariño y buen recibimiento en mi lugar de nacimiento Aguachica-Cesar. Así mismo para mi amiga consejera ROCINA CALAO por ser esa persona sencilla y querida que ha sido participe en mi formación personal.

A mi compañero y colega del presente trabajo de grado ANDRES JULIAN BLANCO MELO, que desde un principio de carrera tuve la oportunidad de contar con su apoyo y trabajo en equipo para la elaboración de proyectos realizados durante este ciclo universitario.

**Manuel Alejandro Saldaña Osorio**

Dedicado a...

A Dios.

En primer lugar a Dios por darme la fuerza, la salud, el entendimiento y el empeño para lograr este sueño y logro de ser Ingeniero Civil y que por medio de este trabajo de grado se encuentra más cerca de ser realizado.

A mi madre.

Después de Dios a mi madre CECILIA MELO SAUREZ siendo ella un apoyo incondicional durante toda mi vida y durante este proceso de formación profesional, no tengo palabras para explicar y dar agradecimientos a esta mujer luchadora por cada una de las cosas que me ha brindado para llegar al lugar donde me encuentro hoy.

A mi padre.

A JOSE ALFREDO BLANCO GUEVARA se lo dedico con un profundo sentimiento por acompañarme y apoyarme en mis decisiones, siendo gran gestor de este logro y darme sus sabios consejos para seguir siempre hacia adelante.

A mi hermana.

A ERIKA BLANCO MELO Por brindarme su compañía y sus consejos que ayudaron a tomar decisiones indicadas. Por siempre apoyarme incondicionalmente, confiar en mí y compartir tantos momentos de alegría, espero ser un gran ejemplo para su vida y en nuestras carreras que se relacionan bastante.

A las familias.

Familias BLANCO GUEVARA y MELO SUAREZ por estar presentes en todo momento, por su amabilidad y el cariño siempre me dan y yo les tengo.

A mi compañero.

A MANUEL ALEJANDRO SALDAÑA OSORIO por su compañía durante la carrera universitaria y este trabajo de grado, quien ha sido un gran compañero y amigo incondicional.

**Andrés Julián Blanco Melo**

## **AGRADECIMIENTOS**

En este presente trabajo de grado agradecemos en primera instancia y ante todas las cosas a Dios por darnos la sabiduría y la fe en sí mismos de poder lograr los objetivos y requisitos necesarios durante toda la etapa universitaria que se encuentra cerca de culminar.

Agradecemos a nuestros padres por brindarnos todo su apoyo incondicional en este proyecto y durante todo el ciclo del pregrado.

A la Universidad Pontificia Bolivariana agradecemos la oportunidad de brindarnos una alta educación calificada para nuestra formación profesional y contar con excelentes docentes que nos transmitieron los conocimientos que hoy adquirimos, en especial a la facultad de Ingeniería Civil para cumplir nuestro sueño de ser ingenieros.

Un especial y meritorio agradecimiento a nuestro director de trabajo de grado Ing.MSc. GERARDO BAUTISTA GARCIA por guiarnos y brindarnos sus conocimientos y experiencia los cuales fueron fundamentales para la elaboración de este proyecto.

Los laboratoristas VICENTE PAEZ y RAMIRO DIAZ los cuales por medio de su labor en el laboratorio de geotecnia y pavimentos de la Universidad Pontificia Bolivariana nos guiaron y ayudaron en la ejecución de los ensayos durante el periodo del proyecto.

A los grandes amigos que deja la vida universitaria que han sido parte del aprendizaje de un principio a fin en los proyectos finales de cada curso visto durante la carrera.

## Tabla de Contenido

<b>INTRODUCCION</b> .....	<b>14</b>
<b>1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>15</b>
<b>2 JUSTIFICACION</b> .....	<b>16</b>
<b>3 OBJETIVOS</b> .....	<b>17</b>
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	17
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
<b>4 ANTECEDENTES</b> .....	<b>18</b>
<b>5 ALCANCE</b> .....	<b>19</b>
<b>6 METODOLOGIA</b> .....	<b>20</b>
6.1 REUNIR INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	20
6.2 HALLAR EL TIPO DE MATERIAL DE INVESTIGACIÓN.....	20
6.3 TRABAJO EN LABORATORIO.....	20
6.4 CÁLCULOS.....	20
6.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	20
6.6 INFORME FINAL.....	20
<b>7 MARCO TEORICO</b> .....	<b>22</b>
7.1 PRINCIPALES TIPOS DE SUELOS.....	22
7.1.1 Grava (G).....	22
7.1.2 Arena (S).....	23
7.1.3 Limos (M).....	23
7.1.4 Arcilla (C).....	23
7.1.5 Materia orgánica (O).....	24
7.2 SUELOS ESPECIALES.....	24
7.2.1 Caliche.....	24
7.2.2 Loess.....	24
7.2.3 Diatomita.....	24
7.2.4 Tepetate.....	24
7.3 GRANULOMETRÍA DE LOS SUELOS.....	25
7.3.1 Análisis mecánico por tamices.....	25
7.4 PLASTICIDAD DE LOS SUELOS.....	25
7.4.1 Límites de plasticidad.....	25
7.5 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS.....	26
7.5.1 Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.).....	27
7.5.1.1 Tamaño efectivo y uniformidad.....	27
7.5.1.2 Clasificación de suelos gruesos.....	27
7.5.1.3 Clasificación de suelos finos.....	30
7.6 ENSAYOS DE COMPACTACIÓN.....	32
7.6.1 Ensayo de compactación tipo Proctor modificado.....	33
7.6.1.1 Procedimiento del ensayo Proctor modificado manual.....	34
7.6.1.2 Procedimiento del ensayo Proctor modificado mecánico.....	36
7.6.2 Especificaciones técnicas de la máquina compactadora.....	37

<b>8</b>	<b>RESULTADOS OBTENIDOS .....</b>	<b>40</b>
8.1	RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS .....	40
8.2	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO MANUALES Y MECÁNICOS .....	44
<b>9</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>46</b>
9.1	CLASIFICACIÓN DEL SUELO.....	46
9.2	ENSAYOS DE COMPACTACIÓN .....	48
9.2.1	<i>Cálculo de la energía en los ensayos de compactación .....</i>	<i>48</i>
9.2.1.1	<i>Energía de compactación en los ensayos ejecutados manualmente .....</i>	<i>49</i>
9.2.1.2	<i>Energía de compactación en los ensayos ejecutados mecánicamente .....</i>	<i>50</i>
9.2.2	<i>Relación entre la humedad óptima y la energía de compactación .....</i>	<i>50</i>
9.2.3	<i>Relación entre el peso específico seco máximo y la energía de compactación.....</i>	<i>51</i>
9.2.4	<i>Relaciones halladas entre los parámetros de compactación obtenidos en los ensayos Proctor modificado manuales y mecánicos.....</i>	<i>53</i>
9.2.5	<i>Comparación de las humedades óptimas y pesos específicos secos máximos en los ensayos Proctor modificado realizados de forma manual y de forma mecánica.....</i>	<i>55</i>
9.2.6	<i>Comparación de las humedades óptimas y pesos específicos secos máximos en los ensayos Proctor modificado realizados de forma manual y de forma mecánica ajustados con los coeficientes <math>K_w</math> y <math>K_{\gamma d}</math>.....</i>	<i>56</i>
<b>10</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>58</b>
<b>11</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>61</b>
<b>12</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>62</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S). SUELOS GRUESOS .....	30
Figura 2. Carta de Plasticidad de Casagrande .....	31
Figura 3. Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S).SUELOS FINOS.....	32
Figura 4. Curva de compactación .....	33
Figura 5. Patrón de impactos para la compactación en el molde de 101.6 mm (4").....	35
Figura 6. Patrón de impactos para la compactación en el molde 152.44 mm (6").....	35
Figura 7. Máquina compactadora .....	38
Figura 8. Resultados índice de plasticidad vs límite líquido (Carta de plasticidad de Casagrande)..	47
Figura 9. Sección transversal del martillo de operación mecánica .....	53

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones técnicas de la máquina compactadora.....	38
Tabla 2. Datos máquina.....	38
Tabla 3. Especificaciones técnicas del motor.....	39
Tabla 4. Resultado ensayo de granulometría #1.....	40
Tabla 5. Resultado ensayo de granulometría #2.....	40
Tabla 6. Resultado ensayo de granulometría #3.....	41
Tabla 7. Resultado ensayo límites de Atterberg #1.....	42
Tabla 8. Resultado ensayo límites de Atterberg #2.....	42
Tabla 9. Resultado ensayo límites de Atterberg #3.....	43
Tabla 10. Resultados ensayos de compactación.....	44
Tabla 11. Resultados promedios de granulometría.....	46
Tabla 12. Resultados promedios de los límites líquidos, límites plásticos e índices de plasticidad.....	47
Tabla 13. Datos para el cálculo de la energía del ensayo modificado de compactación de forma manual.....	49
Tabla 14. Datos para el cálculo de la energía del ensayo modificado de compactación de forma mecánica.....	50
Tabla 15. Mediciones de los equipos de trabajo utilizados en los ensayos Proctor modificado.....	52
Tabla 16. Porcentajes de error entre las humedades óptimas y los pesos específicos secos máximos.....	55
Tabla 17. Humedades óptimas y pesos específicos secos máximos ajustados a los coeficientes $K_w$ y $K_{\gamma d}$ .....	56

## LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Curva granulométrica del ensayo #1 .....	40
Gráfica 2. Curva granulométrica del ensayo #2 .....	41
Gráfica 3. Curva granulométrica del ensayo #3 .....	41
Gráfica 4. Curva de fluidez del ensayo #1 .....	42
Gráfica 5. Curva de fluidez del ensayo #2 .....	42
Gráfica 6. Curva de fluidez del ensayo #3 .....	43
Gráfica 7. Curvas granulométricas .....	46
Gráfica 8. Peso unitario seco máximo vs humedad óptima.....	48
Gráfica 9. Humedad óptima vs Energía de compactación .....	51
Gráfica 10. Peso específico seco máximo vs Energía de compactación.....	52

## **RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO**

**TITULO:** COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MÁXIMO Y HUMEDAD ÓPTIMA EN ENSAYOS PROCTOR MODIFICADO REALIZADOS DE FORMA MANUAL Y DE FORMA MECÁNICA PARA LAS ARENAS LIMOSAS DE BAJA COMPRESIBILIDAD DE LA UPB.

**AUTOR(ES):** Manuel Alejandro Saldaña Osorio  
Andrés Julián Blanco Melo

**FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR(A):** Gerardo Bautista García

### **RESUMEN**

El presente proyecto de grado tiene como finalidad establecer las relaciones existentes entre las propiedades físicas de las arenas limosas presentes en la UPB-Seccional Bucaramanga, después de compactarse en ensayos tipo Proctor modificado realizados tanto de forma manual así como también de manera mecánica. En primera instancia se procedió a buscar un sector de la universidad en el cual se encontrara el suelo mencionado.

Una vez ubicado el material se tomaron muestras para realizar los ensayos de granulometría por tamizado con lavado por la malla N°200 y límites de plasticidad y a partir de sus resultados clasificar el suelo. Luego de asegurar que el suelo estudiado pertenece al grupo SM según el sistema unificado de clasificación de los suelos (S.U.C.S) se procedió a realizar 60 ensayos de compactación Proctor modificado, de los cuales 30 fueron ejecutados de forma manual y 30 de manera mecánica. Para obtener la curva de compactación y a partir de ella el peso específico seco máximo y la humedad óptima se usaron humedades del 7%, 11% y 15%.

Con los resultados de los 60 ensayos de compactación se realizó el análisis de los mismos, estableciendo los factores que pueden causar alteraciones y diferencias de las propiedades físicas del suelo estudiado y finalmente se hallaron las constantes que relacionan dichas propiedades de acuerdo a la forma de ejecutar estos ensayos.

**PALABRAS CLAVES:** Arena limosa, Proctor modificado, peso unitario, humedad óptima.

**V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO**

## **GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE**

**TITLE:** COMPARISON OF MAXIMUM DRY UNIT WEIGHT AND OPTIMAL MOISTURE TRIALED IN MODIFIED PROCTOR IN MADE MANUALLY AND MECHANICALLY FOR SILTY SANDS OF LOW COMPRESSIBILITY OF THE UPB.

**AUTHOR(S):** Manuel Alejandro Saldaña Osorio  
Andrés Julián Blanco Melo

**FACULTY:** Faculty of Civil Engineering

**DIRECTOR:** Gerardo Bautista García

### **ABSTRACT**

The current draft degree is intended to establish the relationships existing between the physical properties of the silty sands present in the UPB-Bucaramanga section, after being compacted in modified Proctor testing type carried out manually and mechanically. First of all, a sector of the university was seeked in which this type of soil is present.

Once, the material was located, some samples were taken to carry out the testing of grain size by sieving with wash for the mesh N°200 and limits of plasticity and from its results to classify the soil. After assuring that the soil belongs to SM group according to the unified classification soil system (S.U.C.S.) 60 Proctor modified compaction were executed, in which 30 were made manually and 30 mechanically. Moistures of 7%, 11% and 15% were used to obtain the compaction curve. From this point, the specific maximum dry weight with optimal moisturing was gotten.

With the results of the 60 compaction testing the analysis took place. From this, the factors that can cause alterations and differences in the physical properties of the studied soil were established. The constants that relate these properties according to the form to execute these tests were found.

**KEYWORDS:** Sand silty, Modified Proctor, Unit Weight, optimum moisture.

**V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK**

## INTRODUCCION

En algunos proyectos de ingeniería civil es necesario realizar rellenos, estos necesariamente deberán compactarse con el fin de disminuir la relación de vacíos, aumentar la densidad y la resistencia y de esta forma reducir también los asentamientos cuando se apliquen las cargas de servicio.

Uno de los ensayos más comúnmente utilizados para determinar la humedad con la cual deben compactarse los rellenos (humedad óptima) y el peso específico seco máximo que se puede lograr para cada tipo de suelo es el Proctor modificado. En la década de los años 30 Ralph Proctor estableció un procedimiento para determinar estos parámetros, al cual se le denominó ensayo "Proctor estándar", una década después el ensayo fue modificado debido a la aparición de equipos de compactación que transmitían a los rellenos compactados una mayor energía de compactación, hoy en día esta prueba es conocida como el ensayo "Proctor modificado".

Debido a que la ejecución del ensayo Proctor modificado cuando se hace de forma manual demanda un mayor esfuerzo físico por parte del operador con respecto a la ejecución mecánica del mismo, el presente trabajo de grado tiene como fin establecer las relaciones entre las propiedades físicas obtenidas en estos ensayos y reducir la probabilidad de accidentes ya que en las pruebas manuales esta es mayor.

Todos los ensayos requeridos en este trabajo de grado se realizaron de acuerdo con lo establecido en las normas y especificaciones generales del Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVIAS) del año 2012.

## 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El ensayo “ Proctor modificado” se diseñó principalmente para determinar el peso unitario seco máximo y la humedad óptima de compactación para el tipo de suelo que se vaya a someter a este ensayo, para el caso de este trabajo de grado será un suelo clasificado como arenas limosas (SM), y ésta determinación de resultados se realiza simulando las condiciones con las cuales los suelos son compactados en campo, para ello se debe aplicar una energía modificada de compactación aproximada de 2700 kN-m/m<sup>3</sup> ( 56 000 lbf-pie/pie<sup>3</sup> ), el cual teóricamente es obtenido usando un molde de 6" de diámetro, con una capacidad de 2124 ± 25 cm<sup>3</sup>, posteriormente es necesario que el martillo metálico tenga una masa de 10 ± 0,02 lb y de diámetro 2.000 ± 0.005" y este deberá controlar la altura de la caída de golpe desde una altura libre de 18.00 ± 0.05". La compactación se realizará en 5 capas y a cada una se le aplicaran 56 golpes.

La ejecución del “ensayo Proctor modificado” genera un esfuerzo físico al operador el cual puede ser reducido utilizando una máquina compactadora; sin embargo, se han encontrado resultados variables obtenidos en tesis anteriores llevadas a cabo en la Universidad Pontificia Bolivariana-Seccional Bucaramanga; Además del esfuerzo físico que el ensayo Proctor modificado realizado de forma manual genera al operador, se desea establecer las diferencias en los resultados del peso unitario seco máximo y la humedad óptima, obtenida en los dos ensayos.

Los ensayos de compactación tipo Proctor modificado realizados manualmente y mecánicamente, pueden ser estudiados estableciendo una relación entre ellos para el mismo tipo de suelo a utilizar, en este caso arenas limosas (SM).

## 2 JUSTIFICACION

La facultad de ingeniería civil de la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga adquirió en el año 2010 un equipo de compactación mecánica, sin embargo, este equipo ha sido utilizado en varios tipos de suelo y en los resultados de los parámetros de compactación se han reflejado algunas diferencias con aquellos ensayos obtenidos manualmente.

En este proyecto de grado se van a establecer las relaciones entre los parámetros de compactación en los ensayos de Proctor modificado que serán realizados manualmente y mecánicamente, buscando las causas que conducen a estas diferencias.

Cuando se desea obtener el peso unitario seco máximo y la humedad óptima del ensayo modificado de compactación realizado manualmente, se genera un esfuerzo físico al laboratorista, el cual podría evitarse si en la ejecución de estos ensayos se utiliza la máquina compactadora.

Los resultados del presente trabajo de grado servirán para crear una base de datos, la cual será útil cuando se requiera realizar rellenos con las arenas limosas (SM) presentes en la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga en futuras obras.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo general**

Establecer la relación entre los parámetros de compactación obtenidos en el ensayo Proctor modificado realizados en forma manual y en forma mecánica para las arenas limosas de la Universidad Pontificia Bolivariana-Seccional Bucaramanga.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- Obtener en las instalaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana-Seccional Bucaramanga un suelo perteneciente al grupo de arenas limosas (SM) del sistema unificado de clasificación de suelos.
- Realizar los ensayos de granulometría por mallas con lavado por el tamiz Nº 200 y los ensayos de límites de plasticidad con el fin de verificar que las muestras de suelo utilizadas correspondan al grupo de las arenas limosas (SM) según el sistema unificado de clasificación de suelos.
- Ejecutar ensayos de compactación tipo Proctor modificado de forma manual con el fin de obtener el peso unitario seco máximo y la humedad óptima en arenas limosas (SM).
- Realizar ensayos de compactación tipo Proctor modificado de forma mecánica con el fin de obtener el peso unitario seco máximo y la humedad óptima para el tipo de suelo estudiado.
- Establecer la relación entre las humedades óptimas obtenidas en ensayos de compactación tipo Proctor modificado realizados de forma manual y de forma mecánica en arenas limosas (SM).
- Establecer la relación entre los pesos unitarios secos máximos obtenidos en ensayos de compactación tipo Proctor modificado realizados de forma manual y de forma mecánica en arenas limosas (SM).

#### 4 ANTECEDENTES

En el año 2003 en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga se desarrolló un proyecto de grado por el estudiante Néstor Giovanni Rueda titulado "CALIBRACION DE EQUIPOS Y ANÁLISIS DE MÉTODOS ALTERNOS PARA DETERMINACIÓN DE HUMEDAD, COMPACTACIÓN Y LÍMITE DE CONTRACCIÓN EN DIFERENTES TIPOS DE SUELO". Dicho proyecto mostró de forma sistemática la forma de realizar los ensayos de humedad natural, límite de contracción, densidad de campo y peso unitario-humedad en diferentes tipos de suelo. Para los ensayos de peso unitario-humedad se emplearon los métodos tradicionales de Proctor estándar y Proctor modificado, y como método alterno la prueba de Harvard miniatura. Sin embargo, con el fin de determinar la confiabilidad de cada uno de los métodos en los diferentes tipos de suelos estudiados, se hizo una comparación de los resultados obtenidos.

En el año 2014 las estudiantes Angélica María Camargo Gómez y Mayra Alejandra Rangel Flórez presentaron un proyecto de grado titulado "COMPARACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO Y HUMEDAD ÓPTIMA EN LOS ENSAYOS DE COMPACTACIÓN PARA LAS ARENAS LIMOSAS DE LA UPB SECCIONAL BUCARAMANGA". Este trabajo tuvo como objetivo la comparación del peso específico seco máximo y la humedad optima en los ensayos de compactación Proctor estándar, Proctor modificado y Harvard miniatura. Así mismo se calcularon los coeficientes de correlación entre dichos ensayos y se establecieron las causas y diferencias de los mismos.

En el año 2015 los estudiantes Edinson José Arias Maldonado y Maira Alejandra Vergara Jaimes desarrollaron como trabajo de grado "COMPARACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO Y HUMEDAD ÓPTIMA EN ENSAYOS PROCTOR MODIFICADO REALIZADOS DE FORMA MANUAL Y DE FORMA MECÁNICA PARA LAS ARCILLAS INORGÁNICAS DE BAJA COMPRESIBILIDAD DE LA UPB". Dicho trabajo se estableció la relación del peso específico seco máximo y la humedad óptima de las arcillas inorgánicas de la UPB en ensayos Proctor modificado ejecutados de forma manual, como también de manera mecánica. Además se analizó la variación de los mismos respecto a la energía de compactación aplicada en cada prueba (manual y mecánica), encontrado así las causas y diferencias entre ellos.

## 5 ALCANCE

A partir de este proyecto de grado se pretende establecer las diferencias en los resultados de los parámetros de compactación realizados tanto de forma manual y de forma mecánica para las arenas limosas (SM) de baja compresibilidad de la Universidad Pontificia Bolivariana-Seccional Bucaramanga.

Producto del desarrollo de este trabajo se obtuvo un coeficiente que relaciona las humedades óptimas de compactación obtenidas en ensayos tipo Proctor modificado realizados de forma manual y mecánica.

También se obtuvo un coeficiente que relaciona a los pesos unitarios secos máximos obtenidos en ensayos tipo Proctor modificado realizados manualmente y mecánicamente.

Así mismo se calcularon las energías de compactación usadas en cada tipo de ensayos de acuerdo con los equipos empleados, debido a que se hallaron algunas diferencias en los resultados de los parámetros físicos obtenidos en ensayos de compactación ejecutados tanto de forma manual así como de forma mecánica, se establecieron las posibles causas.

## **6 METODOLOGIA**

### **6.1 Reunir información bibliográfica**

Con el fin de tener claro los fundamentos teóricos y prácticos que sirvieron de base para el desarrollo del presente trabajo de grado se hicieron consultas en libros, bases de datos y las normas que en Colombia rigen los procesos adecuados para su ejecución.

### **6.2 Hallar el tipo de material de investigación**

Se procedió a buscar e identificar un tipo de material que estuviera de acuerdo a lo estipulado en los objetivos de proyecto de grado. El material fue tomado en el sector de parqueos para estudiantes del campus de la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga.

### **6.3 Trabajo en laboratorio**

El trabajo fue dividido en dos partes. En la primera parte se realizó la clasificación del material escogido, mediante tres ensayos de granulometría y tres ensayos de límites de Atterberg.

En la segunda parte se realizaron los ensayos de compactación tipo Proctor modificado de los cuales 30 fueron realizados en forma manual y los otros 30 ensayos de manera mecánica con la ayuda de la máquina de compactación.

### **6.4 Cálculos**

Por medio de los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos Proctor modificado realizados en el laboratorio, se procedió a determinar las humedades óptimas del suelo y los pesos unitarios secos máximos del mismo.

### **6.5 Análisis de resultados**

Se hizo un análisis de los resultados obtenidos en cada tipo de ensayo con el fin de establecer diferencias entre ellos y además se establecieron las posibles causas de estas diferencias.

### **6.6 Informe final**

Una vez analizados los resultados e interpretados los mismos, se pudieron hacer conclusiones con respecto a tendencias, comportamientos y diferencias evidenciados en el presente trabajo de grado.

Así mismo también se redactaron una serie de recomendaciones que ayudarán a la ejecución de futuros trabajos similares y a mejorar las condiciones de ejecución de los ensayos de compactación.

## 7 MARCO TEORICO

La falta de un planteamiento racional de los problemas en proyectos de construcción en obras que se requiera un estudio de suelos se debe a la poca comprensión de la compleja naturaleza y el comportamiento de los mismos. Los grandes avances en el estudio de los suelos ha conducido a un mejor conocimiento de su naturaleza y a métodos racionales en la construcción.<sup>1</sup>

En la ingeniería civil se define suelo como aquel material que se encuentra por encima del manto rocoso; Sin embargo, la mecánica de suelos suele definirse como la aplicación de los principios de la mecánica y la hidráulica a los problemas que relacionan el suelo como material estructural e involucra los factores de comportamiento y cargas de servicio que dicho suelo pueda resistir.

La mecánica de suelos presenta las herramientas necesarias para evaluar las propiedades como permeabilidad, compresibilidad, las deformaciones producidas por fuerzas aplicadas al suelo y también para medir las fuerzas que causan esas deformaciones.<sup>2</sup>

### 7.1 Principales tipos de suelos<sup>3</sup>

Los suelos principalmente se dividen en dos grupos: los suelos inorgánicos, que son aquellos que se deben a la descomposición de las rocas (propiedades químicas y propiedades físicas), y los suelos cuyo origen es principalmente orgánico. Si en los suelos inorgánicos las rocas permanecen en el sitio donde se formó, da origen a un suelo residual. En caso contrario, forman un suelo transportado, cualquiera que haya sido el agente transportador como puede ser por gravedad, lluvias e incluso los vientos. Los suelos orgánicos se forman casi siempre *in situ*.

En ingeniería civil los suelos se describen con los nombres más comunes de identificarlos, como se muestra a continuación.

#### 7.1.1 Grava (G)

Las gravas son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y que tienen más de dos milímetros de diámetro, o se encuentran presentes entre los tamices No.4

---

<sup>1</sup> George B. Sowers. Introducción a la mecánica de suelos. EDITORIAL LIMUSA S.A 1994. p. 23.

<sup>2</sup> Mecánica de suelos. Universidad del Cauca. p. 1.

y 3 pulgadas. Las gravas sufren desgaste en sus aristas cuando estas son acarreadas por el agua.

La grava es fácil de compactar cuando está bien escalonada, y es poco afectada por la humedad. Cuando se emplea para la superficie de carreteras, debe usarse suficiente grava fina para consolidar en el sitio las partículas más grandes.<sup>4</sup>

### **7.1.2 Arena (S)**

La arena es el nombre que se le da a los materiales de granos finos procedentes de la denudación de las rocas y cuyas partículas varían entre 2 mm y 0.05 mm de diámetro. La arena suele encontrarse junto con la grava en un mismo depósito.

Se clasifica de acuerdo con su gradación, como gruesa, mediana o fina, y de gradación pobre o buena. Arena de buena gradación es ideal para hormigones y es un buen material de fundación.<sup>5</sup>

### **7.1.3 Limos (M)**

Los limos son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, pudiendo ser limo inorgánico como el producido en canteras, o limo orgánico como el que suele encontrarse en los ríos, siendo este último caso de características plásticas. El diámetro de las partículas de los limos está comprendido entre 0.05 mm y 0.005 mm.

### **7.1.4 Arcilla (C)**

Partículas sólidas con diámetro menor de 0.005 mm y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. Químicamente en un silicato de alúmina hidratado, aunque en no pocas ocasiones contiene silicatos de hierro o de magnesio hidratados.

La dureza de la arcilla puede variar desde rígida a mediana, blanda o extremadamente blanda dependiendo del contenido de la humedad. Son propiedades inherentes de las arcillas: su baja resistencia a la deformación, alta

---

<sup>3</sup> CRESPO VILLALAZ. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. EDITORIAL LIMUSA 2006. p 21-22.

<sup>4</sup> Escuela de ingenieros militares. Manual de laboratorio de suelos. EDITORIAL MARGABY LIDA Bogotá 1989. p. 19.

<sup>5</sup> Escuela de ingenieros militares. Manual de laboratorio de suelos. EDITORIAL MARGABY LIDA Bogotá 1989. p. 20.

compresibilidad y gran extensión o contracción de cambios del contenido de humedad. Las arcillas húmedas son imposibles de compactar.<sup>6</sup>

### **7.1.5 Materia orgánica (O)**

La materia orgánica de que contienen los suelos consiste en su mayoría de vegetación descompuesta como la hulla. Suelos tales como los limos y arcillas orgánicas contienen diferentes cantidades de material vegetal finamente dividido.

Todos los suelos orgánicos de turba y los inorgánicos plásticos no son buenos para rasante debido a su alta compresibilidad y baja resistencia a la deformación. En general, no se utilizan nunca como materiales para obras de ingeniería.<sup>7</sup>

## **7.2 Suelos especiales<sup>8</sup>**

### **7.2.1 Caliche**

El término caliche se aplica a ciertos estratos de suelo cuyos granos se encuentran cementados por carbonos calcáreos. Parece ser que para la formación de los caliches es necesario un clima semiárido.

### **7.2.2 Loess**

Los loess son sedimentos eólicos uniformes y cohesivos. Esa cohesión que poseen es debida a un cementante del tipo calcáreo y cuyo color es generalmente castaño claro. El diámetro de las partículas está comprendido entre 0.01 mm y 0.05 mm. Los loess tienden a colapsarse, aunque reduce dicha tendencia al incrementársele su peso volumétrico.

### **7.2.3 Diatomita**

Las diatomitas son depósitos de polvo silíceo, generalmente de color blanco, compuesto total o parcialmente por residuos de diatomeas. Las diatomeas son unicelulares microscópicas de origen marino o de agua dulce.

### **7.2.4 Tepetate**

---

<sup>6</sup> Escuela de ingenieros militares. Manual de laboratorio de suelos. EDITORIAL MARGABY LIDA Bogotá 1989. p. 21.

<sup>7</sup> Escuela de ingenieros militares. Manual de laboratorio de suelos. EDITORIAL MARGABY LIDA Bogotá 1989. p. 21.

<sup>8</sup> CRESPO VILLALAZ. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. EDITORIAL LIMUSA 2006. p 25-26.

El tepetate es un material pulverulento, de color café claro o café oscuro, compuesto de arcilla, limo y arena en proporciones variables, con un cementante que puede ser la misma arcilla o el carbonato de calcio. Según sea el componente predominante el tepetate puede ser arcilloso, limoso, arenoso, arcillo-limoso si es que predomina la arcilla, arena-limoso si predomina la arena, y así sucesivamente.

### **7.3 Granulometría de los suelos**

Se entiende por granulometría a la división o agrupación de un suelo en diferentes irraciones según el tamaño de sus partículas. Su propósito es determinar los diferentes tamaños de las partículas que constituyen un suelo, y fijar porcentajes con relación al peso total del mismo.<sup>9</sup>

#### **7.3.1 Análisis mecánico por tamices**

El análisis mecánico por tamices se usa para obtener las fracciones correspondientes a los tamaños mayores del suelo. La muestra de suelo se hace pasar a través de unos tamices de aberturas descendentes hasta la malla N°200 (0.074 mm); El material retenido en cada malla se pesa y el porcentaje que representa respecto al peso total de la muestra se suma a los porcentajes retenidos en todas las mallas de mayor tamaño. Así puede tenerse un punto de la curva granulométrica correspondiente a cada abertura.

Si se quisiera conocer la distribución por tamaños mayores al tamiz N°200, se requiere entonces un análisis fundamentado en otros principios, tal es el método del hidrómetro y del densímetro, que se basan en la velocidad de sedimentación de las partículas de acuerdo con su tamaño.<sup>10</sup>

### **7.4 Plasticidad de los suelos**

La plasticidad de los suelos puede definirse como la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas sin variación volumétrica y sin desmoronarse ni agrietarse.<sup>11</sup>

#### **7.4.1 Límites de plasticidad**

---

<sup>9</sup> CRESPO VILLALAZ. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. EDITORIAL LIMUSA 2006. p 42.

<sup>10</sup> JUÁREZ BADILLO, Eulalio. Mecánica de Suelos: Fundamentos de la mecánica de los suelos, Tomo 1. Editorial Limusa, 2005. p 102-103.

<sup>11</sup> JUÁREZ BADILLO, Eulalio. Mecánica de Suelos: Fundamentos de la mecánica de los suelos, Tomo 1. Editorial Limusa, 2005. p 127.

La frontera convencional entre los estados semilíquido y plástico fue llamada por Atterberg *límite líquido*. Definido como el contenido de agua (W%) en el cual un suelo dejaría de comportarse como un fluido viscoso para hacerlo plásticamente.

La frontera convencional entre los estados plásticos y semisólido fue llamada por Atterberg *límite plástico* y definida también como el contenido de agua (W%) en el cual el suelo abandona su comportamiento plástico y empieza a comportarse como un sólido.<sup>12</sup>

La determinación del límite líquido interviene en varios sistemas de clasificación de suelos, dado que contribuye en la caracterización de la fracción fina de los suelos. Como resumen del método de determinación del ensayo de límites líquidos de los suelos, consta de procesar la muestra de suelo para remover cualquier porción retenida en el tamiz N°40. El límite líquido se determina mediante tanteos, en los cuales una porción de la muestra se esparce sobre una cazuela de bronce lo cual se divide en dos partes con un ranurador, permitiendo que esas dos partes fluyan como resultado de los golpes recibidos por la caída repetida de la cazuela sobre una base.<sup>13</sup>

## 7.5 Clasificación de los suelos

Un sistema de clasificación de los suelos es un ordenamiento de los diferentes suelos en grupos que tienen propiedades similares. Tiene como propósito de brindar una comodidad para estimar las propiedades mecánicas de un suelo por comparación con suelos de la misma clase cuyas propiedades se conocen. Los grupos o clases de suelo se basan en aquellas propiedades que son más importantes de acuerdo con el carácter particular de la obra de ingeniería para la cual se ha desarrollado la clasificación.

La clasificación de suelos puede determinarse por medio de las especificaciones tales como la AASHTO o el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), a través de los ensayos granulométricos y límites líquidos de los suelos que se ejecutan en el laboratorio. El resultado obtenido de dichos ensayos permite identificar el tipo de suelo y ver las propiedades mecánicas que este presenta para el uso ingenieril, ya sea para una carretera, cimentación, entre otras obras de infraestructura.<sup>14</sup>

---

<sup>12</sup> GUAYACAN REINA, Luis Emilio. Mecánica de suelos, Universidad del Quindío: Instituto de educación abierta y a distancia. Armenia 1985. p 55.

<sup>13</sup> Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras, INVIAS 2012, Sección 100, INV E -125-13. p 208-209.

<sup>14</sup> George B. Sowers. Introducción a la mecánica de suelos. EDITORIAL LIMUSA S.A 1994. p 101.

### 7.5.1 Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.)

El sistema unificado de Clasificación de suelos es una consecuencia del sistema de clasificación para aeropistas (AC), desarrollado por Arthur Casagrande como una modificación más general propuesto en 1942. Los suelos se dividen primeramente en dos clases: de *granos gruesos* y de *granos finos*.

#### 7.5.1.1 Tamaño efectivo y uniformidad<sup>15</sup>

Se define el tamaño efectivo de los granos como el tamaño correspondiente al 10 % en la curva granulométrica acumulativa y se designa por  $D_{10}$ . Otros tamaños que son útiles incluyen la mediana,  $D_{50}$ , el cuartil más fino,  $D_{25}$  y  $D_{15}$ .

La uniformidad del suelo se puede definir como un índice de *coeficiente de uniformidad* ( $C_u$ ), así mismo, el suelo también es definido por un coeficiente de curvatura, por lo tanto estas relaciones son:

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1) \quad C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}} \quad (2)$$

Dónde:

- $D_{10}$  = Tamaño en mm tal que el 10% de una muestra de suelo es menor que ese tamaño.
- $D_{30}$  = Tamaño en mm tal que el 30% de una muestra de suelo es menor que ese tamaño.
- $D_{60}$  = Tamaño en mm tal que el 60% de una muestra de suelo es menor que ese tamaño.

#### 7.5.1.2 Clasificación de suelos gruesos<sup>16</sup>

Un suelo se considera grueso cuando más de la mitad del material queda retenido en el tamiz No 200 (Retenido  $N_0 200 > 50\%$ ). Un suelo grueso puede ser grava o arena. Es grava cuando más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4, y es arena cuando más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la

---

<sup>15</sup> George B. Sowers. Introducción a la mecánica de suelos. EDITORIAL LIMUSA S.A 1994. p. 42-43

<sup>16</sup> Clasificación Uniforme de suelos para propósitos de ingeniería (Sistema de Clasificación Unificada de Suelos). Norma ASTM D2487 -00.

malla No. 4. Si el % pasa No 200 sea < 5% el material es limpio, si es >12 % es un suelo con finos y si está entre 5 % y 12 % es un suelo de frontera.

En caso de que el % pasa No 200 sea < 5% el material es un suelo limpio tanto las gravas como las arenas tienen dos posibles clasificaciones cada una:

GW = Grava bien gradada

GP = Grava mal gradada.

SW = Arena bien gradada

SP = Arena mal gradada.

En caso de que el % pasa No 200 sea > 12% es un suelo con finos tanto las gravas como las arenas tienen dos posibles clasificaciones cada una:

GM = Gravas limosas.

GC = Gravas arcillosas.

SM = Arenas limosas.

SC = Arenas arcillosas.

En los casos de frontera se requiere símbolos dobles:

GW-GC = Gravas arcillosas bien graduadas.

GW-GM = Gravas limosas bien graduadas.

SW-SC = Arenas arcillosas bien graduadas.

SW-SM = Arenas limosas bien graduadas.

GP-GC = Gravas arcillosas mal graduadas.

GP-GM = Gravas limosas mal graduadas.

SP-SC = Arenas arcillosas mal graduadas.

SP-SM = Arenas limosas mal graduadas.

Sin embargo, para la clasificación de cada uno de estos suelos gruesos por el método del sistema unificado (SUCS) requiere unos criterios que se deben cumplir con base de los laboratorios de granulometría y límites de Atterberg, los cuales son los siguientes:

GW = Coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) mayor de 4. Coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) entre 1 y 3.

GP = No satisfacen todos los requisitos de graduación para GW.

SW = Coeficiente de uniformidad (Cu) mayor de 6. Coeficiente de curvatura (Cc) entre 1 y 3.

SP = No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW.

GM = Límites de Atterberg abajo de la "línea A" con índice de plasticidad menor que 4.

GC = Límites de Atterberg arriba de la "línea A" con índice de plasticidad mayor que 7.

SM = Límites de Atterberg abajo de la "línea A" con índice de plasticidad menor que 4.

SC = Límites de Atterberg arriba de la "línea A" con índice de plasticidad mayor que 7.

GW-GC = Coeficiente de uniformidad (Cu) mayor de 4. Coeficiente de curvatura (Cc) entre 1 y 3. Límites de Atterberg arriba de la línea A, con un índice de plasticidad mayor a 7.

GW-GM = Coeficiente de uniformidad (Cu) mayor de 4. Coeficiente de curvatura (Cc) entre 1 y 3. Límites de Atterberg abajo de la "línea A" con índice de plasticidad menor a 4.

SW-SC = Coeficiente de uniformidad (Cu) mayor de 6. Coeficiente de curvatura (Cc) entre 1 y 3. Límites de Atterberg arriba de la "línea A" con índice de plasticidad mayor que 7.

SW-SM = Coeficiente de uniformidad (Cu) mayor de 6. Coeficiente de curvatura (Cc) entre 1 y 3. Límites de Atterberg abajo de la "línea A" con índice de plasticidad menor que 4.

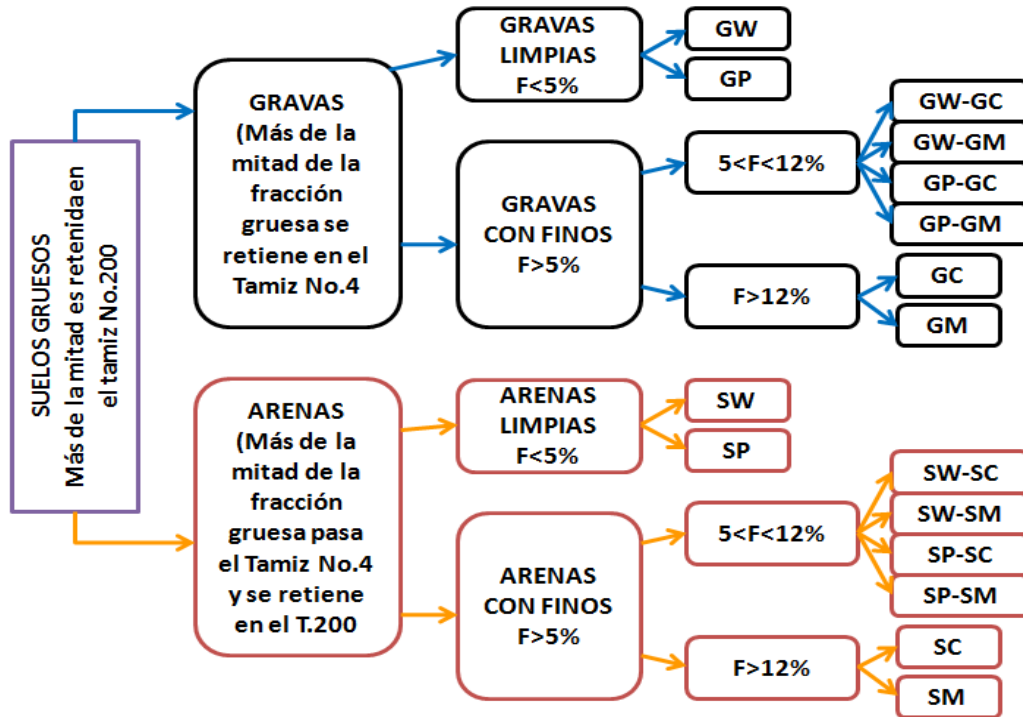
GP-GC = No satisfacen todos los requisitos de graduación. Límites de Atterberg arriba de la "línea A" con índice de plasticidad mayor que 7.

GP-GM = No satisfacen todos los requisitos de graduación. Límites de Atterberg abajo de la "línea A" con índice de plasticidad menor que 4.

SP-SC = No satisfacen todos los requisitos de graduación. Límites de Atterberg arriba de la "línea A" con índice de plasticidad mayor que 7.

SP-SM = No satisfacen todos los requisitos de graduación. Límites de Atterberg abajo de la "línea A" con índice de plasticidad menor que 4.

Figura 1. Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S). SUELOS GRUESOS



Fuente. Autor

### 7.5.1.3 Clasificación de suelos finos<sup>17</sup>

Con el fin de clasificar los suelos finos es necesario correlacionar las propiedades de los suelos con límites de Atterberg lo cual se logra con la carta de plasticidad de Casagrande.

La carta de plasticidad de Casagrande se elabora graficando en las abscisas el valor del límite líquido del suelo y en las ordenadas el índice de plasticidad. Esta carta tiene dos líneas importantes para clasificar los suelos y ellas son la línea A cuya ecuación es:

$$IP(\text{línea A}) = 0.73 * (LL - 20) \quad (3)$$

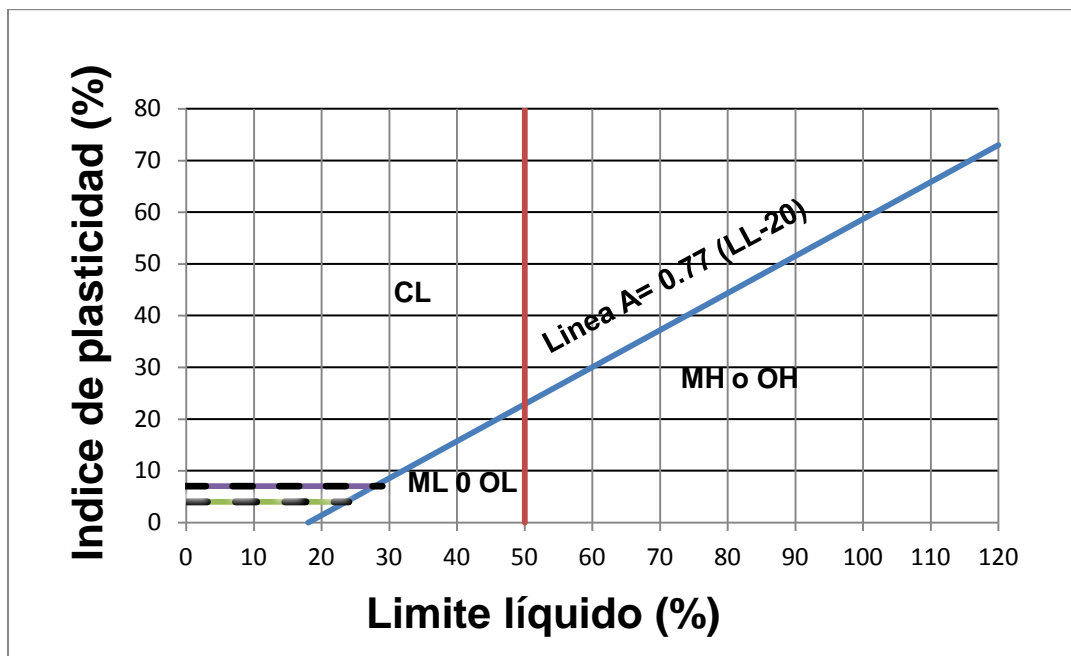
<sup>17</sup> Mecánica de suelos, Universidad del Cauca. p 86-88.

La línea B es una línea vertical trazada en el punto  $LL = 50\%$ . La línea A divide los suelos de la siguiente manera: Los suelos que caen por encima de la línea A son los limos (M), ó los suelos orgánicos (O).

La línea B divide los suelos en dos grupos; los que están a la izquierda de B que son los suelos de BAJA COMPRESIBILIDAD (L) y los que están a la derecha de B que son los de ALTA COMPRESIBILIDAD (H).

Según lo anterior los suelos finos por encima de la línea A pueden ser: CL o CH. Por debajo de la línea A pueden ser: ML u OL, MH u OH. Por otro lado, en la carta de plasticidad de Casagrande hay una zona donde se consideran los suelos de frontera, que son aquellos que presentan un IP entre 4 y 7 y límite líquido mayor de 10 y arriba de la línea A; Los suelos que caen dentro de esta zona se clasifican con doble símbolo como CL-ML o sea suelos limos-arcillosos.

Figura 2. Carta de Plasticidad de Casagrande



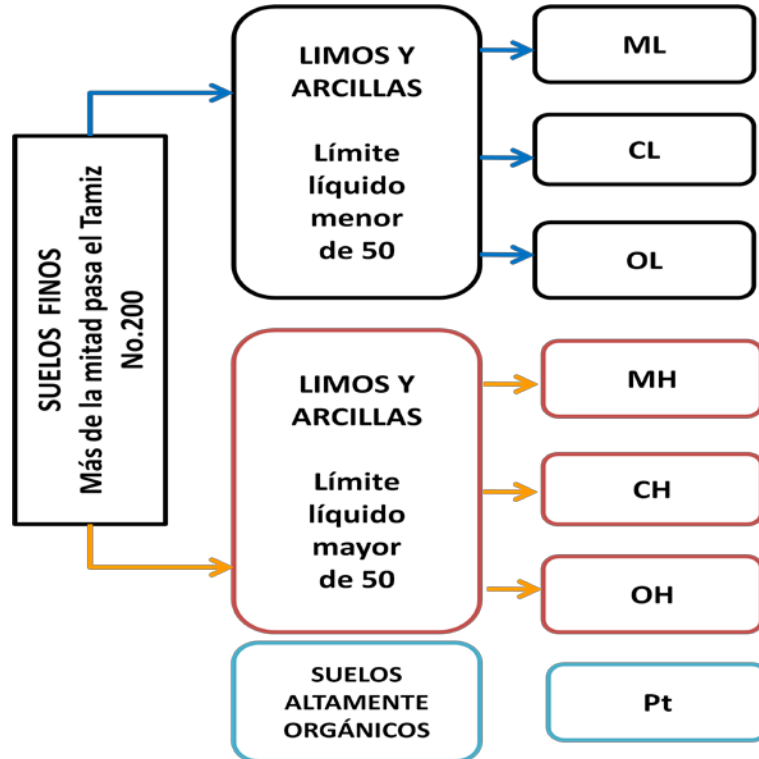
Fuente. Autor

Se considera un suelo fino cuando más de la mitad pasa por el tamiz No. 200; los suelos finos requieren dichos parámetros.

Para limos y arcillas con límite líquido menor que 50%, son los suelos clasificados como ML, CL y OL. Así mismo, para limos y arcillas con límite líquido mayor de 50% son suelos clasificados como MH, CH y OH.

Para suelos donde el límite líquido entre el 300 % y 500 % se consideran suelos altamente orgánicos (Pt).

Figura 3. Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.).SUELOS FINOS



Fuente. Autor.

## 7.6 Ensayos de compactación

Los suelos y mezclas de suelo-agregado usados como rellenos en obras de ingeniería se compactan a cierto nivel, con el fin de lograr un comportamiento satisfactorio en términos de su resistencia al corte, su comprensibilidad o su permeabilidad. Así mismo, los suelos de fundación se compactan a menudo para mejorar sus propiedades de ingeniería.

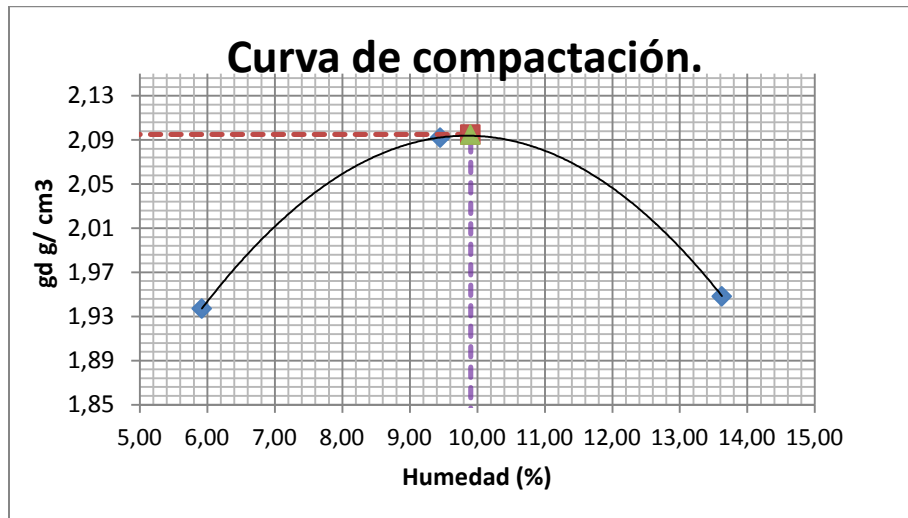
Durante el diseño de una obra de ingeniería, algunos ensayos requieren la preparación de muestras de prueba con determinada humedad y con un peso unitario establecido. Constituye una práctica común determinar primero la humedad óptima y el peso unitario seco máximo a través de un ensayo de compactación.

Posteriormente, se elaboran los especímenes de ensayo para el diseño específico, empleando humedades por encima o por debajo de la óptima y pesos

unitarios secos expresados como un porcentaje del máximo. La selección de estas humedades y estos pesos unitarios se debe basar en la experiencia del profesional, o de lo contrario, conviene hacer una investigación dentro de un rango de valores, para establecer el porcentaje de compactación apropiado.<sup>18</sup>

Proctor encontró que aplicando a un suelo cierta energía para compactarla, el peso volumétrico obtenido varía con el contenido de humedad según una curva, en la cual se puede observar la existencia de un grado de humedad con el cual se obtiene el peso volumétrico máximo para ese suelo y esa energía de compactación. a la abscisa y ordenada en ese punto se les denomina *humedad óptima* y *peso volumétrico seco máximo*, respectivamente.<sup>19</sup>

Figura 4. Curva de compactación



Fuente. Autor

### 7.6.1 Ensayo de compactación tipo Proctor modificado

Antes de la iniciación del ensayo Proctor modificado, se requieren de varios equipos tales como: moldes de 4 o 6 pulgadas, un martillo metálico que puede ser de operación manual u operación mecánica, un extractor de muestras, balanza, horno, regla metálica, tamices 3/4" 3/8" y No. 4, herramientas misceláneas y recipientes.

<sup>18</sup> Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras, INVIAS 2012, Sección 100, INV E -142-13, p 367.

<sup>19</sup> CRESPO VILLALAZ, Carlos. Mecánica de suelos y cimentaciones, Quinta edición. Editorial Limusa, 2004. p 99.

Posteriormente, una breve síntesis del resumen de este tipo de ensayo Proctor modificado, es tomar una muestra de suelo con una humedad de moldeo seleccionada, se coloca en cinco capas dentro de un molde, sometiendo cada capa de 25 o 56 golpes de un martillo de 44.48 N ( $10 \pm 0,02$  lbf) que cae desde una altura de 475.2 mm ( $18.00 \pm 0.05$ "), produciendo una energía de compactación aproximada de 2700 kN-m/m<sup>3</sup> (56 000 lbf-pie/pie<sup>3</sup>). Se determina el peso unitario seco resultante. El procedimiento se repite con un número suficiente de humedades de moldeo, para establecer una curva que relaciones a éstas con los respectivos pesos unitarios secos obtenidos. Esta curva se llama curva de compactación y su vértice determina la humedad óptima y el peso unitario seco máximo, para el ensayo normal de compactación.<sup>20</sup>

#### **7.6.1.1 Procedimiento del ensayo Proctor modificado manual<sup>21</sup>**

1. Se prepara la muestra de ensayo el cual va ser procesada por el tamiz 4.75 mm (No.4), de 9.5 mm (3/8") o de 19.00 mm (3/4") dependiendo del método (A, B o C) que se requiera usar como lo indica la norma INV E 142-13.
2. Se seleccionan sub-muestras más o menos de 2,3 Kg cuando se usen los métodos A o B, o unos 5,9 Kg para el método C. Posteriormente se mezcla con agua hasta formar una pasta homogénea; no se debe mojar mucho el material para el primer punto de la curva de compactación. (Importante tener en cuenta el tiempo de curado mínimo requerido para el tipo de suelo, luego de tener las sub-muestras húmedas)
3. Se determina y se registra la masa del molde de compactación manual más la placa base sin el collar de extensión.
4. El suelo se debe compactar más o menos en 5 capas iguales. Antes de la compactación, se coloca aproximadamente una quinta parte de la sub-muestra en estado suelto dentro del molde y se reparte para que dé lugar a una capa uniforme.
5. Cada capa de compactación se compacta con 25 golpes cuando está en el molde de 101.6 mm (4") y con 56 golpes cuando está en el molde de 152.4 mm (6"), usando el martillo metálico de operación manual.

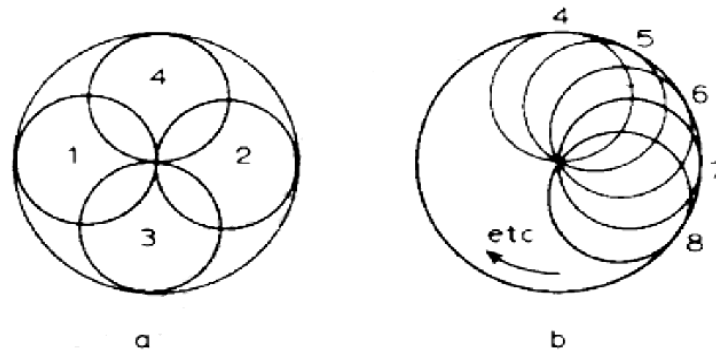
---

<sup>20</sup> Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras, INVIAS 2012, Sección 100, INV E -142-13, p 366-367.

<sup>21</sup> Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras, INVIAS 2012, Sección 100, INV E -142-13, p 374-380

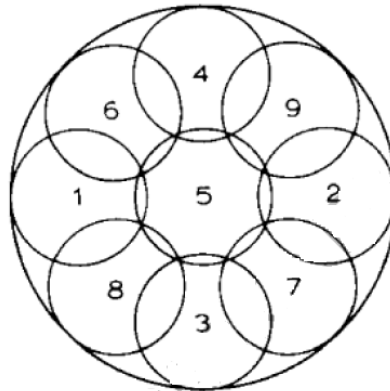
6. Al utilizar el martillo de operación manual con masa de 44.48 N ( $10 \pm 0,02$  lbf) y diámetro de  $50.8 \pm 0.13$  mm ( $2.000 \pm 0.005$ " ) se debe mantener verticalmente con firmeza, con una tolerancia de  $5^\circ$  y se dejará caer a una altura libre de  $18.00 \pm 0.05$ ". Los golpes se deben aplicar con una velocidad uniforme de 25 por minuto y cubriendo toda la superficie de la capa. Se debe de compactar las capas dependiendo del molde; si es de 101.6 mm (4") utilizando los patrones de impacto a y b (Figura 6), y si es de 152.4 mm (6") utilizando el patrón de impactos de la figura 7 .

Figura 5. Patrón de impactos para la compactación en el molde de 101.6 mm (4")<sup>22</sup>



Fuente. INV E 142-13

Figura 6. Patrón de impactos para la compactación en el molde 152.44 mm (6")<sup>23</sup>



Fuente. INV E 142-13

7. Terminada la última capa de compactación, se remueve el collar de extensión y se enrasa con un cuchillo para remover el exceso en la parte superior del molde compactado. Los pequeños orificios o vacíos que

<sup>22</sup> INV E 142-13. p 378.

<sup>23</sup> INV E 142-13. p 379.

queden en el molde, son previamente rellenas con el material desbastado de la muestra. En caso de quitar el collar de extensión, y la última capa no sobrepase la altura del molde se debe realizar nuevamente el proceso de compactación.

8. Se determina y se anota la masa del molde de compactación manual con la probeta compactada.
9. Se extrae del molde la probeta compactada. Se obtiene una muestra de ella para determinar la humedad, se deberá tomar una muestra representativa de las tres capas o tomar totalmente la muestra siempre y cuando esta sea desmenuzada para facilitar el secado.
10. Se realizan los pasos del 2 al 9 pero con un porcentaje de humedad diferente en cada sub-muestra, con el fin de asegurar que hay datos a ambos lados de la humedad óptima, que permitan la elaboración de la curva de compactación. Si no se encuentra la tendencia esperada, será necesario compactar una o más probetas adicionales con otros contenidos de humedad, para así graficar dicha curva parabólica de compactación.

#### **7.6.1.2 Procedimiento del ensayo Proctor modificado mecánico**

1. Se prepara la muestra de ensayo el cual va ser procesada por el tamiz 19.00 mm (3/4") método C, ya que en el equipo de compactación mecánica solo se puede utilizar moldes de 152.4 mm (6").
2. Se repite el paso 2 como se indica en el procedimiento del ensayo Proctor modificado manual, teniendo en cuenta que se realizará para sub-muestras de más o menos 5,9 Kg como lo determina el método C.
3. Se determina y se registra la masa del molde de compactación mecánica más la placa base sin el collar de extensión.
4. Se repite el paso 4 como se indica en el procedimiento del ensayo Proctor modificado manual.
5. Cada capa de compactación se compacta con 56 golpes en el molde de 152.4 mm (6"), usando el martillo metálico de operación mecánica.
6. Al utilizar el martillo de operación mecánica en los moldes de 152.4 mm (6") se realizará con cara de sector circular con radio igual a  $73.7 \pm 0.5$  mm

( $2.90 \pm 0.02$ " ), deberá operarse de manera que el vértice del sector circular quede posicionado en el centro de la muestra de ensayo. Las capas deberán ser compactadas como lo indica la figura 6-b.

7. Se repite el paso 7 como se indica en el procedimiento del ensayo Proctor modificado manual.
8. Se determina y se anota la masa del molde de compactación mecánica con la probeta compactada.
9. Se repiten los pasos del 9 al 10 como se indica en el procedimiento del ensayo Proctor modificado manual.

### **7.6.2 Especificaciones técnicas de la máquina compactadora**

La máquina compactadora mecánica compacta la muestra y luego gira el molde en el momento justo después del golpe, manteniendo el número de golpes del martillo asignados por el operador y con la cantidad que es asignada por la norma, procediendo a detenerse en el instante que los alcanza.

Para el método estándar es utilizado un martillo con un peso 5,5 libras (2,5Kg) y una altura de caída de 12" (305mm) y para el método modificado un martillo de 10 libras (4,5Kg) y altura de caída de 18" (457mm). Para esta tesis de grado el método de compactación a ejecutar es el de tipo Proctor modificado. A continuación serán enseñados datos y especificaciones de la maquina compactadora.

**Figura 7. Máquina compactadora**



Fuente. Autor

**Tabla 1. Especificaciones técnicas de la máquina compactadora**

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
MODELO	H4169
SERIAL N°	M100-209112420
CAPACIDAD	10LPS X 18IN
CICLOS	50/60
VOLTIOS	120
FASE	1

Fuente. Autor

**Tabla 2. Datos máquina**

DATOS DE LA MAQUINA	
PESO MARTILLO	4,53Kg
DIMENSIONES	56 "H x 16-1 / 2" W x 30 "D (1422 x 419 x 762 mm)
ALTURA DE OPERACIÓN	18" (457mm)
NORMATIVA	ASTM D558, D559, D560, D698, D1557; AASHTO T99, T134, T135, T180.

Fuente. Autor

**Tabla 3. Especificaciones técnicas del motor**

ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL MOTOR							
CAT. NO	VL11303						
SPEC.	34F551X716						
HP	.5						
VOLTIOS	115/230						
AMPS	7/3.5						
R.P.M	3450						
FRAME	56C	HZ	60	PH	1		
SER.F.	1.25	CODE	L	DES	N	CLASS	B
NEMA NOM. EFF.	66%	P.F	72%				
RATING	40C AMB-CONT						
CC		USABLE AT 208V	4.1 A				
BEARINGS	DE	6203		ODE	6203		
ENCL.	OPEN	SN	W1104251961				
	SFA 8/4						

Fuente. Autor

## 8 RESULTADOS OBTENIDOS

### 8.1 Resultados de Clasificación de suelos

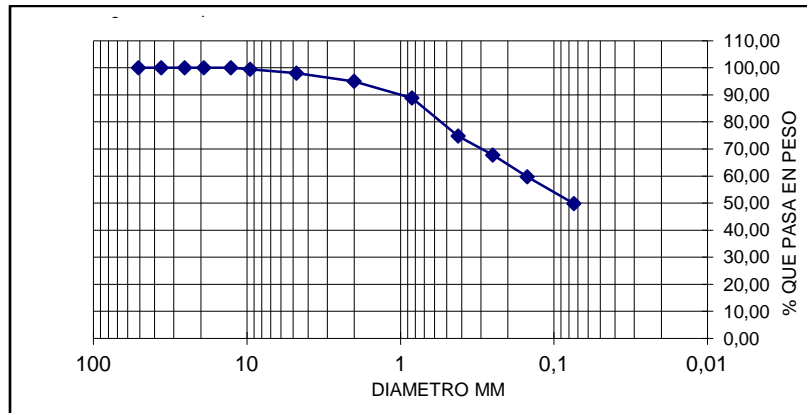
Con base de los ensayos de granulometría realizados en las instalaciones del edificio K salón 104 (Laboratorio de suelos) de la Universidad Pontificia Bolivariana-Seccional Bucaramanga estos fueron los resultados obtenidos:

**Tabla 4. Resultado ensayo de granulometría #1**

% GRAVAS	% ARENAS	% FINOS
2,01	48,19	49,81

Fuente. Autor

**Gráfica 1. Curva granulométrica del ensayo #1**



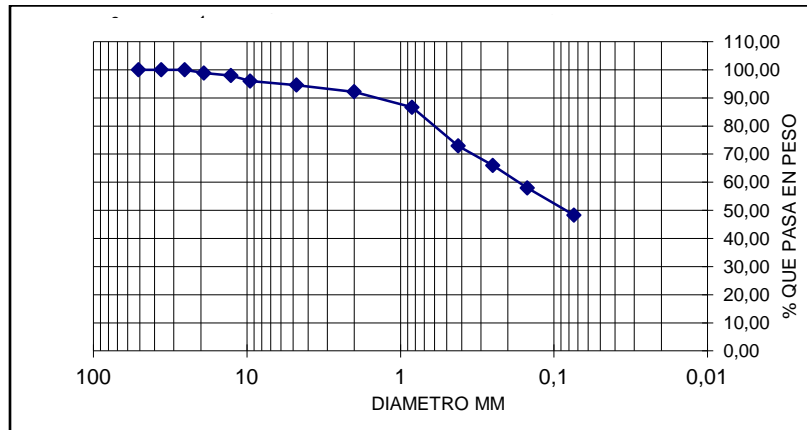
Fuente. Autor

**Tabla 5. Resultado ensayo de granulometría #2**

% GRAVAS	% ARENAS	% FINOS
5,43	46,30	48,27

Fuente. Autor

**Gráfica 2. Curva granulométrica del ensayo #2**



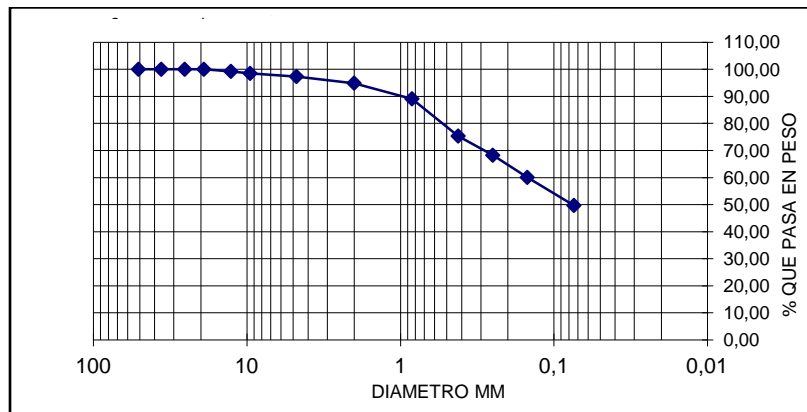
Fuente. Autor

**Tabla 6. Resultado ensayo de granulometría #3.**

% GRAVAS	% ARENAS	% FINOS
2,66	47,66	49,68

Fuente. Autor

**Gráfica 3. Curva granulométrica del ensayo #3**



Fuente. Autor

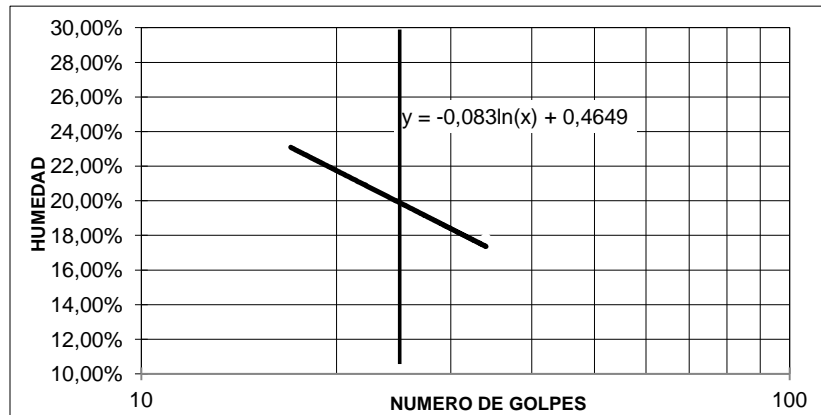
Con base de los ensayos de límites de Atterberg realizados en las instalaciones del edificio K salón 104 (Laboratorio de suelos) de la Universidad Pontificia Bolivariana-Seccional Bucaramanga estos fueron los resultados obtenidos:

**Tabla 7. Resultado ensayo límites de Atterberg #1**

LIMITE LIQUIDO %	LIMITE PLASTICO %	IND. DE PLASTICIDAD
20	20	0

Fuente. Autor

**Gráfica 4. Curva de fluidez del ensayo #1**



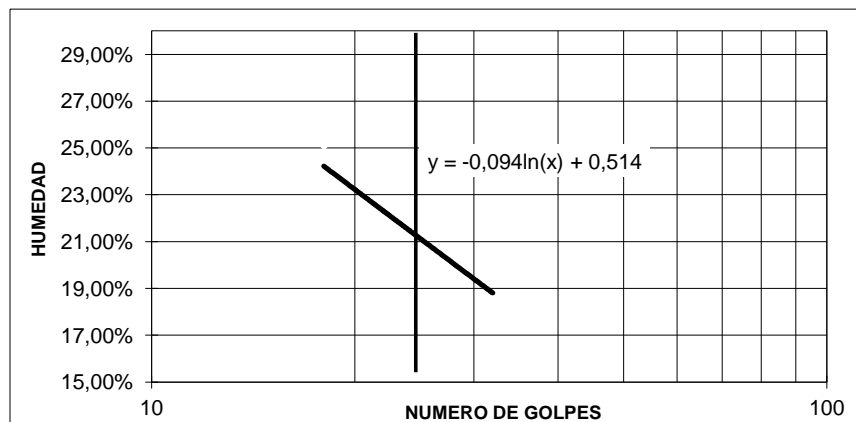
Fuente. Autor

**Tabla 8. Resultado ensayo límites de Atterberg #2**

LIMITE LIQUIDO %	LIMITE PLASTICO %	IND. DE PLASTICIDAD
21	19	2

Fuente. Autor

**Gráfica 5. Curva de fluidez del ensayo #2**



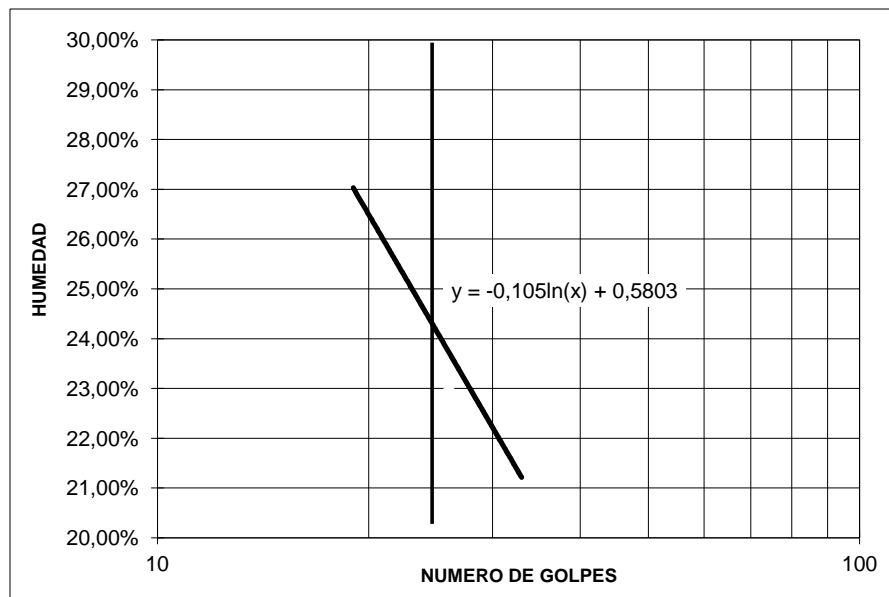
Fuente. Autor

**Tabla 9. Resultado ensayo límites de Atterberg #3**

LIMITE LIQUIDO %	LIMITE PLASTICO %	IND. DE PLASTICIDAD
24	21	3

Fuente. Autor

**Gráfica 6. Curva de fluidez del ensayo #3**



Fuente. Autor

Según los resultados de los ensayos de granulometría y con base de la figura 3, el tipo de suelo es perteneciente a un suelo arenoso con alto porcentaje de finos. Como se puede observar, los resultados de finos en los ensayos de granulometría son del 49,81 %, 48,27 % y 49,68 %.

Según los resultados de los ensayos de límites de Atterberg y con base de la figura 4 se puede observar que graficando los puntos de límite líquido con respecto al índice de plasticidad, quedan debajo de la línea A y correspondiente a una zona de limos.

## 8.2 Resultados de los ensayos de compactación Proctor modificado manuales y mecánicos

Una vez realizados los ensayos de clasificación se procedió a ejecutar 30 ensayos de compactación tipo Proctor modificado de forma manual y 30 ensayos de forma mecánica. Los resultados de estos 60 ensayos se muestran a continuación:

**Tabla 10. Resultados ensayos de compactación**

PROCTOR MANUAL			PROCTOR MECÁNICO		
Proctor	w óptima (%)	$\gamma_d$ máx. (g/cm <sup>3</sup> )	Proctor	w óptima (%)	$\gamma_d$ máx. (g/cm <sup>3</sup> )
1	10,00	2,080	1	10,70	2,042
2	9,90	2,095	2	10,20	2,028
3	10,30	2,045	3	10,70	2,062
4	9,70	2,030	4	10,00	2,050
5	9,95	2,035	5	11,45	2,053
6	10,00	2,035	6	11,02	2,086
7	9,70	2,005	7	10,76	2,070
8	9,99	2,005	8	10,60	2,073
9	10,00	2,032	9	10,70	2,053
10	9,90	2,020	10	10,35	2,118
11	10,00	2,003	11	11,13	2,026
12	10,00	2,013	12	11,13	2,071
13	10,00	2,023	13	10,58	2,065
14	9,80	2,036	14	11,00	2,074
15	10,56	2,016	15	10,56	2,048
16	10,15	2,045	16	11,25	2,070
17	9,55	2,033	17	10,65	2,031
18	9,95	2,053	18	10,80	2,064
19	10,10	2,046	19	10,50	2,049
20	9,98	2,045	20	10,60	2,063
21	10,13	2,050	21	10,65	2,058
22	10,03	2,027	22	10,50	2,061
23	9,35	2,019	23	10,30	2,052
24	10,00	2,037	24	10,60	2,072
25	10,38	2,016	25	10,61	2,058
26	10,30	2,045	26	10,40	2,055
27	10,40	2,009	27	10,34	2,066
28	10,00	2,029	28	10,05	2,088
29	10,43	2,010	29	10,00	2,057
30	10,45	2,013	30	10,35	2,060
<b>PROM</b>	10,03	2,032	<b>PROM</b>	10,62	2,061

DESVEST	0,267	0,021	DESVEST	0,355	0,018
C.V	2,66	1,04	C.V	3,35	0,88

MAX	10,56
MIN	9,35

MAX	11,45
MIN	10,00

Fuente. Autor

En la tabla 10 se pueden apreciar tanto las humedades óptimas así como también los pesos específicos secos máximos obtenidos en los 60 ensayos realizados.

En los ensayos manuales se observa una humedad óptima promedio del 10,03 % presentando una desviación estándar del 0,267% y un coeficiente de variación del 2,66%. Esta tabla también muestra que la humedad óptima mínima obtenida fue de 9,35% y la máxima de 10,56%. Para los pesos específicos secos máximos se observa un promedio del 2,032 g/cm<sup>3</sup>, con una desviación del 0,021 g/cm<sup>3</sup> y un coeficiente de variación de 1,04%.

En los ensayos mecánicos se observa una humedad óptima promedio del 10,62% presentando una desviación estándar del 0,355% y un coeficiente de variación del 3,35%. Esta tabla también muestra que la humedad óptima mínima obtenida fue de 10,00% y la máxima de 11,45%. Para los pesos específicos secos máximos se observa un promedio del 2,061 g/cm<sup>3</sup>, con una desviación del 0,018 g/cm<sup>3</sup> y un coeficiente de variación de 0,88%.

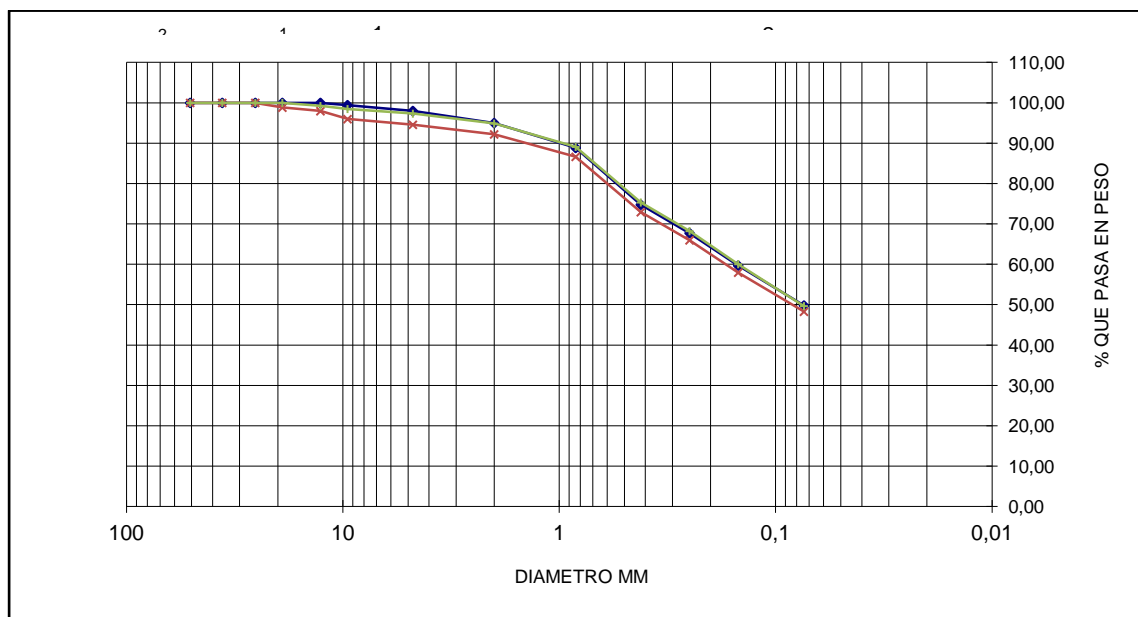
## 9 ANALISIS DE RESULTADOS

### 9.1 Clasificación del suelo

Luego de haber presentado los resultados de los ensayos de granulometría y límites de Atterberg, a continuación se realiza el análisis requerido para clasificar al suelo por medio del sistema unificado (S.U.C.S).

La gráfica 7 muestra las 3 curvas granulométricas obtenidas para los 3 ensayos realizados y la tabla 11 muestra los porcentajes de gravas, arenas y finos obtenidos en dichos ensayos así como también el promedio de estos.

Gráfica 7. Curvas granulométricas



Fuente. Autor

Tabla 11. Resultados promedios de granulometría

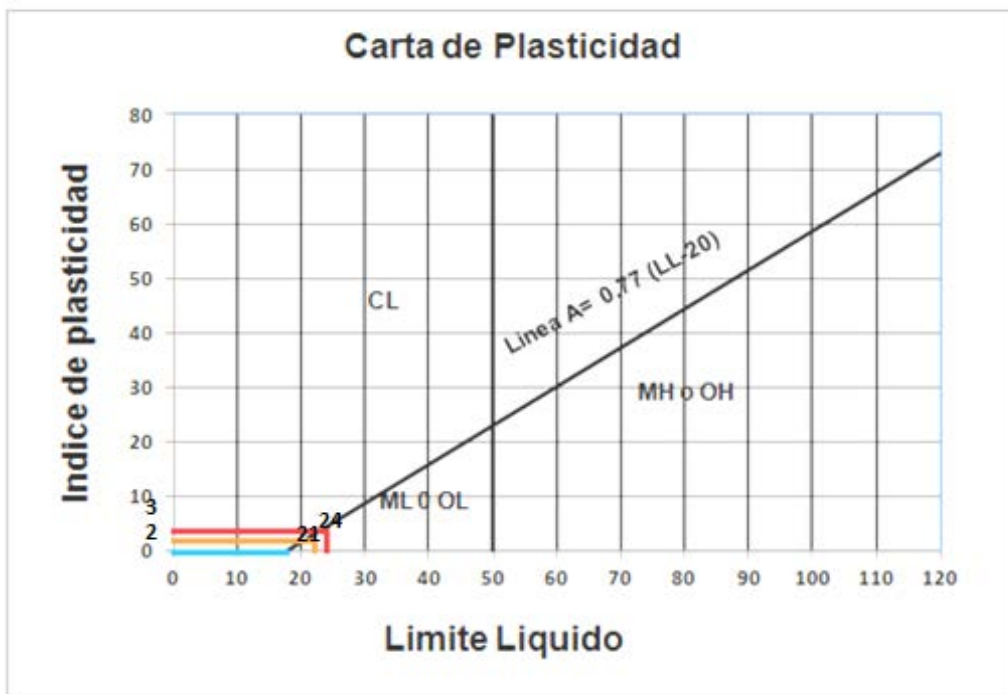
ENSAYO	GRAVAS (%)	ARENAS (%)	FINOS (%)
1	2.01	48.19	49.81
2	5.43	46.30	48.27
3	2.66	47.66	49.67
PROM	3.37	47.38	49.25

Fuente. Autor

En la tabla 11 se puede apreciar que el porcentaje de gruesos del suelo estudiado (gravas y arenas) es del 50,75%, es decir dicho suelo es grueso. Una vez definido este suelo como grueso se procede a mirar si el mismo corresponde a una grava o una arena, en este caso existe un mayor porcentaje de arenas (47,38%), por lo tanto el suelo es una arena. Como el porcentaje de finos es superior al 12% (49,25%), estos afectan la resistencia y permeabilidad de la fracción gruesa por lo tanto es necesario determinar la plasticidad de los mismos.

La figura 9 muestra la carta de plasticidad de Casagrande y la tabla 12 presenta el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad obtenidos en los 3 ensayos realizados así como también los promedios.

Figura 8. Resultados índice de plasticidad vs límite líquido (Carta de plasticidad de Casagrande)



Fuente. Autor

Tabla 12. Resultados promedios de los límites líquidos, límites plásticos e índices de plasticidad

ENSAYO	LL (%)	LP (%)	IP (%)
1	20	20	0
2	21	19	2
3	24	21	3
PROM	21.67	20	1.67

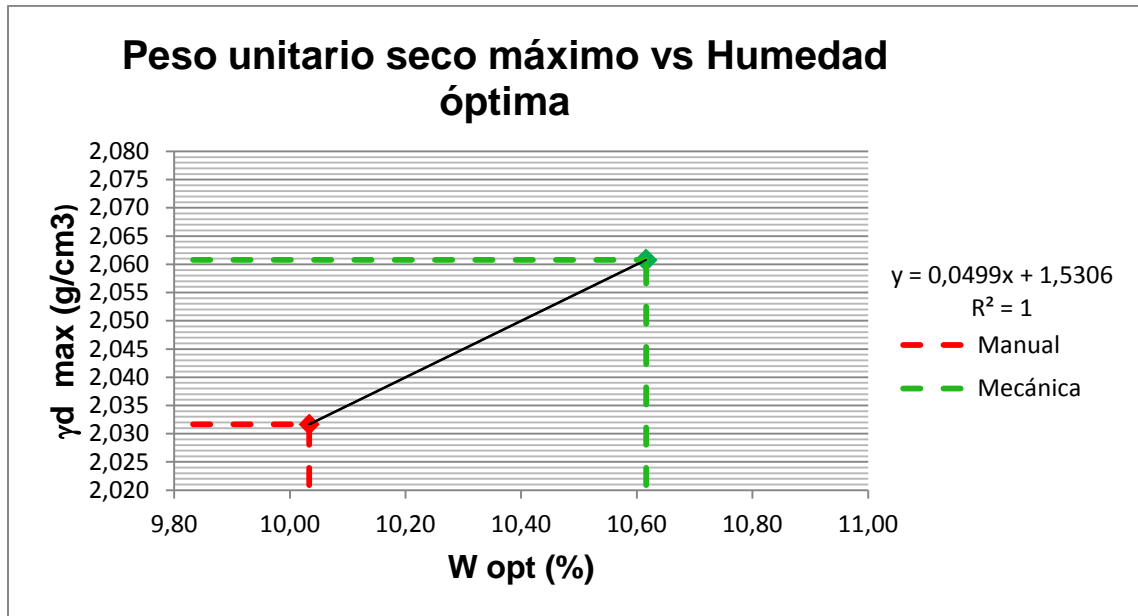
Fuente. Autor

Según la figura 9 y la tabla 12 los límites de Atterberg ubican al suelo por debajo de la línea A, ya que el índice de plasticidad promedio es del 1,67 % y el límite líquido promedio del 21,67 %. Lo anterior permite concluir que la fracción del material estudiado que pasa por la malla N°40 es de naturaleza limosa, por lo tanto según el sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S) el suelo corresponde a una arena limosa (SM).

## 9.2 Ensayos de compactación

Una vez finalizados los 60 ensayos de compactación realizados de forma manual y mecánica, se procedió a establecer la relación existente entre el peso específico seco máximo y la humedad óptima para estos dos tipos de ensayo tal como se muestra en la gráfica 8.

Gráfica 8. Peso unitario seco máximo vs humedad óptima



Fuente. Autor

La gráfica 8 muestra que se obtiene una mayor densidad seca en las pruebas mecánicas para las arenas limosas estudiadas, de igual forma se puede apreciar que la humedad óptima mayor también corresponde a los ensayos mecánicos.

### 9.2.1 Cálculo de la energía en los ensayos de compactación

Cuando se realiza un ensayo de compactación, se le suministra una energía al suelo, esta energía se puede calcular en función del número de capas, el número

de golpes por capa, el peso del martillo, la altura de caída de este y el volumen del molde tal como se presenta en la ecuación 4.

$$C_e = \frac{N^\circ \text{ de capas} * N^\circ \text{ de golpes} * W \text{ del martillo (N)} * H \text{ de caída (m)}}{\text{Volumen del molde (cm}^3\text{)} * 10^{-3}} \quad (4)$$

### 9.2.1.1 Energía de compactación en los ensayos ejecutados manualmente

Los ensayos Proctor modificado de forma manual se ejecutaron en el molde de 6" y el respectivo procedimiento tal y como se propone en el método C que describe la norma I.N.V E-142. En la tabla 13 se muestran los datos necesarios para el cálculo de la energía de compactación.

**Tabla 13. Datos para el cálculo de la energía del ensayo modificado de compactación de forma manual**

h molde (cm)	11,56
D molde (cm)	15,21
Peso molde (gr)	6350
Vol. Molde (cm <sup>3</sup> )	2100,42
Peso martillo (Kg)	4,53
Peso martillo (N)	44,42
Altura de caída (m)	0,46
N° Capas	5
Golpes/Capa	56

Fuente. Autor

$$C_e = \frac{5 * 56 * 44,42 * 0,46}{2100,42 * 10^{-3}}$$

$$C_e = 2724,13 \text{ kJ/m}^3$$

Con base de la ecuación 4, la energía de compactación calculada para los ensayos manuales realizados con los equipos de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional-Bucaramanga es de 2724,13 kJ/m<sup>3</sup>.

### 9.2.1.2 Energía de compactación en los ensayos ejecutados mecánicamente

Los ensayos Proctor modificado de forma mecánica se ejecutaron en el molde de 6" y el respectivo procedimiento tal y como se propone en el método C que describe la norma I.N.V E-142. En la tabla 14 se muestran los datos necesarios para el cálculo de la energía de compactación.

**Tabla 14. Datos para el cálculo de la energía del ensayo modificado de compactación de forma mecánica**

h molde (cm)	11,62
D molde (cm)	15,15
Peso molde (gr)	5700
Vol. Molde (cm <sup>3</sup> )	2094,70
Peso martillo (Kg)	4,53
Peso martillo (N)	44,42
Altura de caída (m)	0,46
N° Capas	5
Golpes/Capa	56

Fuente. Autor

$$C_e = \frac{5 * 56 * 44,42 * 0,46}{2094,70 * 10^{-3}}$$

$$C_e = 2731,58 \text{ kJ/m}^3$$

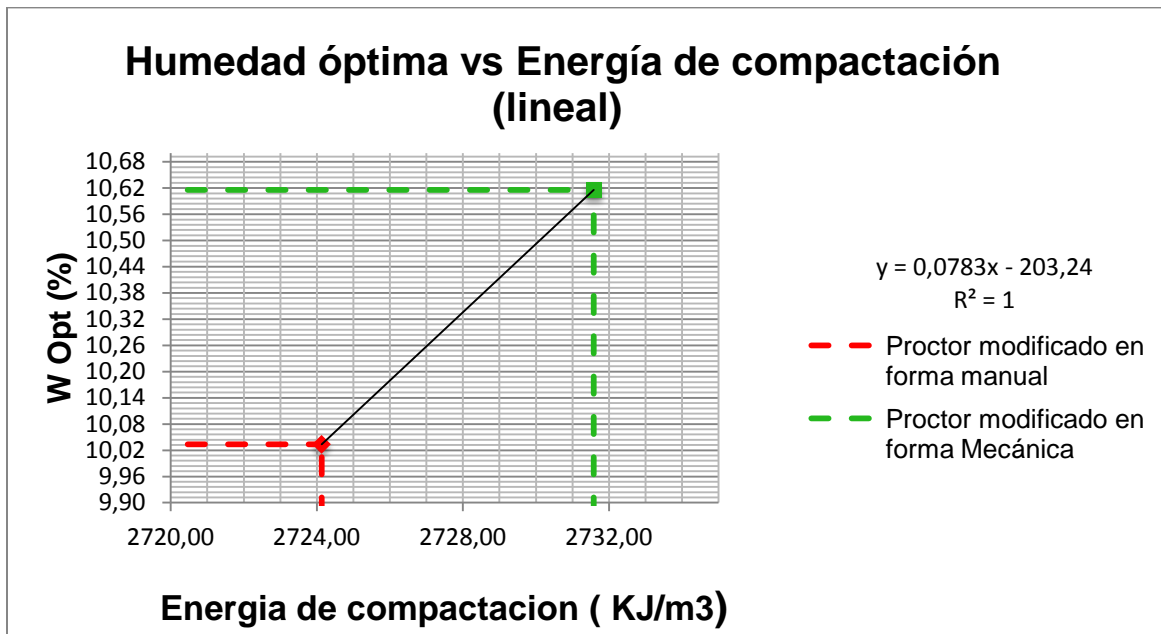
Con base de la ecuación 4, la energía de compactación calculada para los ensayos mecánicos realizados con los equipos de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional-Bucaramanga es de 2731,58 kJ/m<sup>3</sup>.

Según los resultados anteriores se pudo apreciar que se aplicó una mayor energía de compactación en los ensayos mecánicos, resultado coherente con las mayores densidades secas obtenidas en dicho ensayo.

### 9.2.2 Relación entre la humedad óptima y la energía de compactación

A continuación se presenta la variación de la humedad óptima con respecto a la energía de compactación.

Gráfica 9. Humedad óptima vs Energía de compactación



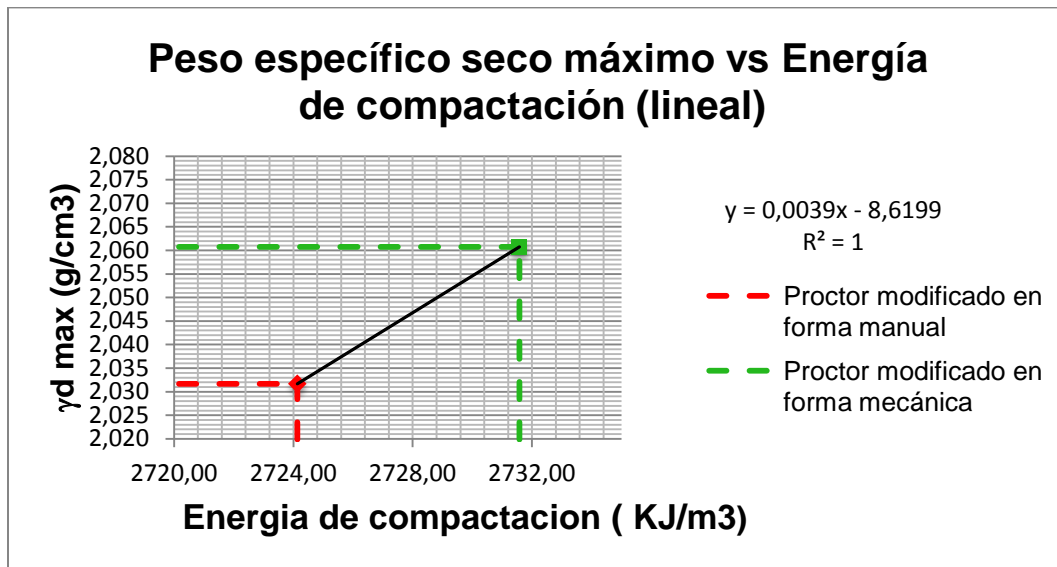
Fuente. Autor

En la gráfica 9 se puede ver que al incrementar la energía de compactación, mayor será la humedad óptima, mostrándose una relación directamente proporcional entre las dos variables presentadas.

### 9.2.3 Relación entre el peso específico seco máximo y la energía de compactación

En la gráfica 10 se puede apreciar la variación del peso específico seco máximo con la energía de compactación suministrada en cada ensayo.

Gráfica 10. Peso específico seco máximo vs Energía de compactación



Fuente. Autor

Cuando la energía de compactación aplicada es mayor, el peso específico seco máximo incrementa proporcionalmente tal y como se muestra en la gráfica 10. Se observa que en los ensayos mecánicos el peso específico seco máximo es superior a los ensayos elaborados de forma manual, y esto se debe a las siguientes razones:

En la ecuación para el cálculo de la energía de compactación claramente se ve que el volumen del molde influye en el valor de la misma. Una de las razones por las cuales la menor energía de compactación obtenida fue en los ensayos manuales radica en el hecho de haber utilizado un molde con mayor volumen en dichos ensayos. Ver tabla 15.

Tabla 15. Mediciones de los equipos de trabajo utilizados en los ensayos Proctor modificado

	DATOS MOLDE 6" (PROCTOR MODIFICADO)		
	NORMA INVIAS	DATOS LABORATORIO (MANUAL)	DATOS LABORATORIO (MECANICO)
Diámetro	152,4 ± 0,7 mm	152,10 mm	151,5 mm
Altura	116,4 ± 0,5 mm	115,60 mm	116,2 mm
Volumen	2124 ± 25 cm³	2100,42 cm³	2094,70 cm³
	DATOS MARTILLO DE OPERACIÓN MANUAL Y OPERACIÓN MECANICA		
	NORMA INVIAS	DATOS LABORATORIO (MANUAL)	DATOS LABORATORIO (MECANICO)
Peso	4,5364 ± 0,009 Kg	4,53 Kg	4,53 Kg
Diámetro	50,8 ± 0,13 mm	50,80 mm	74,7 mm
Radio sector circular	73,7 ± 0,5 mm		

Fuente. Autor

Debido a la forma del martillo utilizado en los ensayos mecánicos, así como también la rotación del mismo hacen que la superficie realmente compactada sea superior a la de los ensayos manuales. Ver figura 10.

**Figura 9. Sección transversal del martillo de operación mecánica**



Fuente. Autor

Se puede notar que en la parte inferior del martillo presenta desgaste, y para la compactación de las humedades trabajadas del 7%, 11% y 15% en el centro del molde, frecuentemente se creaban ciertos desniveles terminados los 56 golpes. Es muy probable que si esta situación se arregla cambiando el martillo se puedan obtener densidades secas aún mayores.

Otra razón por la cual el peso específico seco máximo es menor en los ensayos realizados de forma manual obedece a que cuando el martillo golpea la guía en su parte superior el operador como reacción a dicho golpe tiende a inclinarlo, esta situación reduce la altura de caída, la energía de compactación y el área de suelo compactada. Al no seguir el mismo patrón de compactación de las pruebas mecánicas, terminado el ensayo manual, se puede generar una gran relación de vacíos en diferentes puntos del suelo compactado y esto determina que el peso específico seco máximo sea menor.

#### **9.2.4 Relaciones halladas entre los parámetros de compactación obtenidos en los ensayos Proctor modificado manuales y mecánicos.**

Uno de los objetivos principales del presente trabajo consiste en encontrar las diferencias de los ensayos de compactación tipo Proctor modificado mediante valores cuantificables, partiendo de los resultados de los pesos específicos secos máximos y humedades óptimas obtenidos a partir de los ensayos realizados de

forma manual y los realizados de forma mecánica, a continuación se muestran los cálculos de estas relaciones y se analizan.

- $K\omega$ : RELACIÓN EN LA HUMEDAD ÓPTIMA DE LOS ENSAYOS TIPO PROCTOR MODIFICADO EN FORMA MANUAL Y LOS ENSAYOS EN FORMA MECÁNICA.

$$K\omega = \frac{K\omega_{maxManual}}{K\omega_{maxMecanico}} \quad (5)$$

$$K\omega = \frac{10,03}{10,62}$$

$$K\omega = 0,9451.$$

La relación entre las humedades óptimas obtenidas en las pruebas manuales con respecto a las obtenidas de forma mecánica es de 0,9451. Esta relación se calculó con el fin de estimar la humedad óptima que se obtendría en ensayos manuales a partir de los logrados en los mecánicos.

- $K\gamma_d$ : LA RELACION DEL PESO ESPECÍFICO SECO MAXIMO DE LOS ENSAYOS TIPO PROCTOR MODIFICADO REALIZADO DE MANERA MANUAL Y DE MANERA MECANICA.

$$K\gamma_d = \frac{\gamma_{dmaxManual}}{\gamma_{dmaxMecanico}} \quad (6)$$

$$K\gamma_d = \frac{2,032}{2,061}$$

$$K\gamma_d = 0,9859.$$

La relación entre los pesos específicos secos máximos obtenidos en las pruebas manuales con respecto a las obtenidas de forma mecánica es de 0,9859. Esta relación se calculó con el fin de estimar los pesos específicos secos máximos que se obtendría en ensayos manuales a partir de los logrados en los mecánicos.

### 9.2.5 Comparación de las humedades óptimas y pesos específicos secos máximos en los ensayos Proctor modificado realizados de forma manual y de forma mecánica

La tabla 16 muestra los pesos específicos secos máximos y las humedades óptimas obtenidas en los ensayos de compactación realizados de forma manual y de forma mecánica. Además se presentan los % de error que se obtuvieron en estos parámetros de compactación. Dado que las pruebas manuales son las más usadas, los valores obtenidos en ellas se consideraron como los teóricos.

**Tabla 16. Porcentajes de error entre las humedades óptimas y los pesos específicos secos máximos**

PROCTOR MANUAL			PROCTOR MECÁNICO			%ERROR	%ERROR
Proctor	w óptima (%)	$\gamma_d$ máx. (g/cm <sup>3</sup> )	Proctor	w óptima (%)	$\gamma_d$ máx. (g/cm <sup>3</sup> )	w óptima (%)	$\gamma_d$ máx. (g/cm <sup>3</sup> )
1	10,00	2,080	1	10,70	2,042	7,00	3,800
2	9,90	2,095	2	10,20	2,028	3,03	6,700
3	10,30	2,045	3	10,70	2,062	3,88	1,700
4	9,70	2,030	4	10,00	2,050	3,09	2,000
5	9,95	2,035	5	11,45	2,053	15,08	1,800
6	10,00	2,035	6	11,02	2,086	10,20	5,100
7	9,70	2,005	7	10,76	2,070	10,93	6,500
8	9,99	2,005	8	10,60	2,073	6,11	6,800
9	10,00	2,032	9	10,70	2,053	7,00	2,100
10	9,90	2,020	10	10,35	2,118	4,55	9,800
11	10,00	2,003	11	11,13	2,026	11,30	2,300
12	10,00	2,013	12	11,13	2,071	11,30	5,800
13	10,00	2,023	13	10,58	2,065	5,80	4,200
14	9,80	2,036	14	11,00	2,074	12,24	3,800
15	10,56	2,016	15	10,56	2,048	0,00	3,200
16	10,15	2,045	16	11,25	2,070	10,84	2,500
17	9,55	2,033	17	10,65	2,031	11,52	0,200
18	9,95	2,053	18	10,80	2,064	8,54	1,100
21	10,13	2,050	21	10,65	2,058	5,13	0,800
22	10,03	2,027	22	10,50	2,061	4,69	3,400
23	9,35	2,019	23	10,30	2,052	10,16	3,300
24	10,00	2,037	24	10,60	2,072	6,00	3,500
25	10,38	2,016	25	10,61	2,058	2,22	4,200
26	10,30	2,045	26	10,40	2,055	0,97	1,000
27	10,40	2,009	27	10,34	2,066	0,58	5,700
28	10,00	2,029	28	10,05	2,088	0,50	5,900

<b>29</b>	10,43	2,010	<b>29</b>	10,00	2,057	4,12	4,700
<b>30</b>	10,45	2,013	<b>30</b>	10,35	2,060	0,96	4,700
<b>PROMEDIO</b>	<b>10,03</b>	<b>2,032</b>	<b>PROMEDIO</b>	<b>10,62</b>	<b>2,061</b>	<b>6,26</b>	<b>3,623</b>
Desviación estándar	0,27	0,02	Desviación estándar	0,36	0,02		
Coefficiente de variación	2,66	1,04	Coefficiente de variación	3,35	0,88		

Fuente. Autor

En la tabla 16 se observa los porcentajes de error de las humedades óptimas entre los ensayos Proctor modificado ejecutados de forma manual y de forma mecánica oscilan entre el 0% y el 15,1% para un promedio total del 6,26%. De la misma manera se presentan los resultados entre los pesos específicos secos máximos, que varían entre 0,2% y 9,8% para un promedio de error del 3,623%.

### 9.2.6 Comparación de las humedades óptimas y pesos específicos secos máximos en los ensayos Proctor modificado realizados de forma manual y de forma mecánica ajustados con los coeficientes $K_w$ y $K_{\gamma d}$

En el numeral 9.2.4 se calcularon los coeficientes de corrección  $K_w$  y  $K_{\gamma d}$ , con el fin de obtener la humedad óptima y el peso específico seco máximo correspondientes a ensayos de compactación Proctor modificado manuales a partir de los valores obtenidos en pruebas mecánicas. La tabla 17 muestra los resultados de estos parámetros una vez corregidos con estos coeficientes.

**Tabla 17. Humedades óptimas y pesos específicos secos máximos ajustados a los coeficientes  $K_w$  y  $K_{\gamma d}$**

PROCTOR MANUAL			PROCTOR MECÁNICO		CORREGIDO		% ERROR	
Proctor	w óptima (%)	$\gamma_d$ máx. (g/cm <sup>3</sup> )	w óptima (%)	$\gamma_d$ máx. (g/cm <sup>3</sup> )	w óptima (%)	$\gamma_d$ máx. (g/cm <sup>3</sup> )	w óptima (%)	$\gamma_d$ máx. (g/cm <sup>3</sup> )
<b>1</b>	10,00	2,080	10,70	2,042	10,11	2,013	1,1	3,2
<b>2</b>	9,90	2,095	10,20	2,028	9,64	1,999	2,6	4,6
<b>3</b>	10,30	2,045	10,70	2,062	10,11	2,033	1,8	0,6
<b>4</b>	9,70	2,030	10,00	2,050	9,45	2,021	2,6	0,4
<b>5</b>	9,95	2,035	11,45	2,053	10,82	2,024	8,8	0,5
<b>6</b>	10,00	2,035	11,02	2,086	10,42	2,057	4,2	1,1
<b>7</b>	9,70	2,005	10,76	2,070	10,17	2,041	4,8	1,8
<b>8</b>	9,99	2,005	10,60	2,073	10,02	2,044	0,3	1,9
<b>9</b>	10,00	2,032	10,70	2,053	10,11	2,024	1,1	0,4
<b>10</b>	9,90	2,020	10,35	2,118	9,78	2,088	1,2	3,4

<b>11</b>	10,00	2,003	11,13	2,026	10,52	1,997	5,2	0,3
<b>12</b>	10,00	2,013	11,13	2,071	10,52	2,042	5,2	1,4
<b>13</b>	10,00	2,023	10,58	2,065	10,00	2,036	0,0	0,6
<b>14</b>	9,80	2,036	11,00	2,074	10,40	2,045	6,1	0,4
<b>15</b>	10,56	2,016	10,56	2,048	9,98	2,019	5,5	0,2
<b>16</b>	10,15	2,045	11,25	2,070	10,63	2,041	4,8	0,2
<b>17</b>	9,55	2,033	10,65	2,031	10,07	2,002	5,4	1,5
<b>18</b>	9,95	2,053	10,80	2,064	10,21	2,035	2,6	0,9
<b>21</b>	10,13	2,050	10,65	2,058	10,07	2,029	0,6	1,0
<b>22</b>	10,03	2,027	10,50	2,061	9,92	2,032	1,1	0,2
<b>23</b>	9,35	2,019	10,30	2,052	9,73	2,023	4,1	0,2
<b>24</b>	10,00	2,037	10,60	2,072	10,02	2,043	0,2	0,3
<b>25</b>	10,38	2,016	10,61	2,058	10,03	2,029	3,4	0,6
<b>26</b>	10,30	2,045	10,40	2,055	9,83	2,026	4,6	0,9
<b>27</b>	10,40	2,009	10,34	2,066	9,77	2,037	6,0	1,4
<b>28</b>	10,00	2,029	10,05	2,088	9,50	2,059	5,0	1,5
<b>29</b>	10,43	2,010	10,00	2,057	9,45	2,028	9,4	0,9
<b>30</b>	10,45	2,013	10,35	2,060	9,78	2,031	6,4	0,9
<b>PROMEDIO</b>	<b>10,03</b>	<b>2,032</b>	<b>10,62</b>	<b>2,061</b>	<b>10,03</b>	<b>2,032</b>	<b>3,5</b>	<b>1,1</b>
Desviación estándar	0,27	0,02	0,36	0,02	0,34	0,02		
Coefficiente de variación	2,66	1,04	3,35	0,88	3,35	0,88		

Fuente. Autor

En la tabla 17 se muestran los porcentajes de error de las humedades óptimas ajustadas con el coeficiente  $K_w$ , oscilando entre el 0% y el 9,4% para un error promedio del 3,5%. De la misma manera se presentan los porcentajes de error de los pesos específicos secos máximos ajustados con el coeficiente  $K_{\gamma d}$ , que varían entre 0,2% y 4,6%, para un error promedio del 1,1%.

## 10 CONCLUSIONES

- Con el fin de obtener en las instalaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana-Seccional Bucaramanga un suelo perteneciente al grupo de arenas limosas (SM), se procedió a realizar un apique en la parte baja de los parqueaderos. De este apique se tomaron muestras representativas para realizar los ensayos de clasificación.
- Se realizaron 3 ensayos de granulometría por tamizado con lavado por la malla N°200 y 3 ensayos de límites de Atterberg, encontrándose un suelo arenoso con un alto porcentaje de finos y baja plasticidad perteneciente al grupo SM.
- De los 30 ensayos realizados tipo Proctor modificado de forma manual se encontró que la humedad óptima promedio para las arenas limosas (SM) empleada es del 10,03% y el peso específico seco máximo promedio es 2,032 g/cm<sup>3</sup>.
- De los 30 ensayos realizados tipo Proctor modificado de forma mecánica se encontró que la humedad óptima promedio para las arenas limosas (SM) empleada es del 10,62% y el peso específico seco máximo promedio es 2,061 g/cm<sup>3</sup>.
- Los resultados obtenidos en los 60 ensayos de compactación realizados permiten concluir que en las pruebas en las cuales se aplicó una mayor energía de compactación (mecánicas), se obtuvo un mayor peso específico seco y una mayor humedad óptima, sin embargo los valores promedio de los pesos específicos secos encontrados en los dos tipos de pruebas son similares (2.032 g/cm<sup>3</sup> para los ensayos manuales y 2.061 g/cm<sup>3</sup> para los ensayos mecánicos).
- Con los equipos utilizados suministrados por la Universidad Pontificia Bolivariana en el laboratorio de geotecnia y pavimentos para la ejecución de ensayos Proctor modificado de forma manual y de forma mecánica, se obtuvo una energía de compactación de 2724,13 kJ/m<sup>3</sup> en las pruebas manuales y de 2731,58 kJ/m<sup>3</sup> en las pruebas mecánicas.

- Una de las principales razones que motivaron la ejecución del presente proyecto de grado es establecer relaciones existentes entre los pesos específicos secos máximos y las humedades óptimas en los ensayos Proctor modificados manuales y mecánicos. Todo esto con el fin de poder inferir los valores que se obtendrían en ensayos manuales a partir de los logrados en pruebas mecánicas, ya que como es bien sabido los ensayos manuales demandan un mayor esfuerzo físico por parte del operador. En este orden de ideas se obtuvieron los coeficientes  $K_w$  y  $K_{\gamma d}$  que relacionan las humedades óptimas y los pesos específicos secos máximos respectivamente. El valor de  $K_w$  es 0,9451 y el de  $K_{\gamma d}$  es 0,9859. Esto significa que si se quisiera conocer el valor de la humedad óptima que se obtendría en una prueba manual a partir de la lograda en una prueba mecánica, bastaría con multiplicar esta última por 0,9451. De igual manera si se quisiera conocer el valor del peso específico seco máximo que se obtendría en una manual a partir de la lograda en una prueba mecánica, bastaría con multiplicar esta última por 0,9859. Vale la pena notar que estos resultados solamente son válidos para las arenas limosas con un alto contenido de finos como las estudiadas.
- Al comparar las humedad óptimas de compactación obtenidas en los ensayos manuales y en los ensayos mecánicos se obtuvo un error promedio del 6,3%, sin embargo si los valores de la humedad óptima se corrigen por medio del coeficiente  $K_w$  este error promedio logra reducirse a un 3,5%.
- Al comparar los pesos específicos secos máximos obtenidos en los ensayos manuales y en los ensayos mecánicos se obtuvo un error promedio del 3,62%, sin embargo si los valores de la humedad óptima se corrigen por medio del coeficiente  $K_{\gamma d}$  este error promedio logra reducirse a un 1,1%.
- Los coeficientes  $K_w$  y  $K_{\gamma d}$  se determinaron para establecer las diferencias y posibles causas que hay en la ejecución de los ensayos tipo Proctor modificado de forma manual y de forma mecánica, sin embargo, al no hallar grandes variaciones en los resultados entre las dos formas distintas de realizar estas pruebas, esto motiva el uso de la máquina de compactación y así reducir el esfuerzo físico por parte del laboratorista en el ensayo manual.

- Cuando se realiza el ensayo de compactación de forma mecánica, la altura de caída del martillo y el ángulo de inclinación se mantienen constantes ya que la máquina posee una camisa guía estándar, así mismo la rotación de la placa donde se encuentra acoplado el molde conserva un orden de impactos sobre el material a compactar. Mientras que en los ensayos manuales el operador en algunas ocasiones tiende a inclinar el martillo más de los 5° que la norma sugiere como tolerancia, además a esto el martillo algunas veces no es alzado hasta el punto más alto de la camisa guía debido al desgaste físico que se va presentando durante la ejecución del ensayo; esto trae como consecuencia que en algunos de los puntos compactados sobre la muestra se aumente una relación de vacíos terminada la prueba, variando así el peso específico seco máximo y la humedad óptima de compactación.

## 11 RECOMENDACIONES

- Por medio de la experiencia obtenida en este trabajo de grado y en el tiempo empleado para realizar los ensayos del laboratorio, se observó que la máquina compactadora para Proctor modificado requiere de un mantenimiento frecuente en el motor y sus componentes para un mejor funcionamiento del mismo.
- Necesariamente se debe realizar un cambio de martillo de la máquina compactadora ya que presenta cierto deterioro y desgaste en su sección transversal, por lo tanto afecta el área de compactación y no se puede obtener una densidad seca aún mayor en ciertas zonas de la muestra de suelo.
- Es indispensable contar con más recipientes de almacenamiento de para las muestras, ya que en la norma INVIAS 2012 se especifican los tiempos de curado para cada tipo de suelo y estos deben permanecer por un lapso de tiempo en condiciones naturales que no alteren la humedad requerida para los ensayos tipo Proctor modificado que se procedan a realizar.
- Es importante para un futuro proyecto de grado de características similares, realizar las pruebas de compactación tipo Proctor modificado de forma manual y mecánica en un solo molde de ensayo, pues esto influye de algún modo en la alteración de los resultados de las pruebas. Sin embargo, el molde utilizado para la compactación mecánica se encuentra en malas condiciones.
- Al momento de realizar los ensayos de compactación de forma manual se presenta un mayor número de riesgos que en los ensayos mecánicos, por ende se recomienda usar los utensilios de seguridad (botas, guantes, bata) para evitar cualquier tipo de accidente.
- Por seguridad, los ensayos de compactación tipo Proctor modificado manuales deberán ser realizados por un solo operador ya que si interviene una segunda persona, por ejemplo guiando el martillo, es muy probable que ocurra un accidente de trabajo.

## 12 BIBLIOGRAFIA

CRESPO VILLALAZ. Mecánica de suelos y cimentaciones. 4 ed. México. Editorial Limusa S.A. Págs. 21-22, 25-26, 42, 55, 99.

Escuela de ingenieros militares. MANUAL DE LABORATORIO DE SUELOS. Editorial Margabby Ltda. Bogotá 1989. Págs. 17-21.

Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras, INVIAS 2012, Sección 100. Págs. 208-209, 367, 374-380.

George B. Sowers. INTRODUCCION A LA MECANICA DE SUELOS. Editorial Limusa S.A 1994. Págs. 23, 42-43, 101.

JUÁREZ BADILLO, Eulalio. Mecánica de Suelos: Fundamentos de la mecánica de los suelos, Tomo 1. Editorial Limusa, 2005. Págs. 97, 103, 127.

Norma ASTM D2487 -00. Clasificación Uniforme de suelos para propósitos de ingeniería (Sistema de Clasificación Unificada de Suelos).

Universidad del Cauca. MECANICA DE SUELOS. Págs. 1, 23, 86-88.