

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

La finalidad de este trabajo es analizar experimentalmente una metodología alternativa que suplante el trabajoso proceso de compactación manual en laboratorio. Normalmente usado el método de compactación T-180 que podría no ser tan preciso por lo que es trabajado manualmente y la fuerza de caída del martillo no es la misma en cada golpe.

Los compactadores automáticos permiten una compactación uniforme y correcta de las muestras Próctor y CBR. Tomando en cuenta esta consideración aparecieron métodos de laboratorio que fuesen capaces de tener una mayor precisión al hacer el ensayo de compactación siendo el equipo de laboratorio de compactación automática que es manejado automáticamente. Compacta muestras de suelo eliminando el laborioso método manual. La altura y el peso del martillo son ajustables para adaptarse a los requerimientos de la prueba. Un patrón de golpe automático asegura la compactación óptima para cada capa del suelo. El martillo se desplaza a través del molde y la tabla lo gira al mismo tiempo que la base, la cual es muy estable. El número de golpes por cada capa puede ser establecido al inicio de la prueba a través del contador digital.

Se realizó un estudio investigativo de tipo experimental, para todos los tipos de suelos y una recopilación de tipo teórico de la compactación de Próctor T-180, que generarán resultados propios realizando pruebas de laboratorio que determinan las características de compactación del suelo mediante el ensayo de compactación Próctor T-180 y las características alcanzadas del suelo mediante el ensayo de compactación automático.

Se hace ensayos de compactación de todos los tipos de suelos utilizando el método T-180 y el compactador automático, se comparan ambos resultados obtenidos para poder determinar una ecuación que nos permita determinar la densidad máxima seca, humedad óptima de la compactación Próctor T-180 a partir de la densidad máxima seca, humedad óptima obtenida mediante la compactación automática.

1.2. Fundamentación teórica

1.2.1. Revisión bibliográfica

En general, la compactación se define como el proceso para aumentar la densidad de un material por medios mecánicos, por lo cual la compactación es la densificación del suelo por remoción de aire. El grado de compactación de un suelo se mide en término de su peso específico seco. Cuando se agrega agua al suelo durante la compactación, esta actúa como un agente ablandador de las partículas del suelo, que hace que se deslicen entre si y se muevan a una posición de empaque más denso.

La compactación es el mejoramiento de las propiedades de ingeniería de la masa de suelos, con la finalidad de obtener un suelo de tal manera estructurado que posea y mantenga un comportamiento mecánico adecuado a través de toda la vida útil de la obra. La compactación del suelo aporta a este las siguientes ventajas:

- Aumenta la resistencia y capacidad de carga del suelo.
- Disminuye el esponjamiento y la contracción del suelo.
- Reduce la compresibilidad y disminuye la aptitud para absorber el agua.
- Reduce los asentamientos del terreno.
- Permite reducir y controlar los potenciales de expansión, contracción y expansión por congelamiento.

Para conocer el porcentaje de compactación del suelo en campo es necesario que previamente se haya determinado la densidad seca máxima de éste, por medio de la ejecución de un ensayo o prueba de laboratorio en el que se mantenga una energía constante. Estos ensayos permiten obtener una relación entre el peso seco unitario y el contenido de humedad además conduce a establecer el contenido de humedad con el que se debe compactar el suelo para que se logre alcanzar el peso unitario seco máximo.

1.2.2. Justificación

- **Justificación académica**

Para comprobar la efectividad de un tratamiento de mejora de suelos, como ser la compactación, es necesario comprobar que la mejora conseguida es suficientemente buena como para alcanzar los objetivos marcados por el proyecto. Es de mucha importancia realizar un estudio de la correlación de ensayos de compactación, para distintos suelos debido a los factores citados a continuación.

La necesidad de poder contar con otros tipos de ensayo que presenten resultados confiables cuando se cuenta con poca cantidad de tiempo y muestra para realizar el ensayo de compactación T-180.

- **Justificación técnica**

Hacer un aporte a la investigación, referido a la existencia de nuevas e innovadores ensayos de laboratorio que hoy en día no se encuentran normalizadas en nuestro medio, reduciendo el tiempo de trabajo y aumentando la exactitud del mismo, realizando un mejor ensayo en laboratorio.

- **Justificación económica**

Comparar la diferencia de tiempo que el laboratorista se puede ahorrar utilizando el método de compactación automática en comparación con el método manual Próctor T-180.

- **Justificación Social**

Dar a conocer a la sociedad una forma más rápida de poder obtener los mismos resultados de densidad máxima y humedad óptima que se obtienen en el ensayo de compactación del Próctor T-180 mediante el ensayo de compactación automática.

1.3. Diseño teórico

1.3.1. Planteamiento del problema

1.3.1.1. Situación problemática

Por lo general las técnicas de compactación se aplican a rellenos artificiales, tales como cortinas de presas de tierra, diques, terraplenes para caminos y ferrocarriles, casas, muros, pistas de aterrizaje, bordos de defensa, muelles, pavimentos, etc. Algunas veces es necesario compactar el terreno natural como en el caso de cementaciones en arenas.

En Tarija en algunas zonas en sus primeros estratos se tienen arcillas orgánicas e inorgánicas que al realizar proyectos a veces es necesario compactar este tipo de suelo y al construirse alguna edificación sobre un suelo sin compactar, el suelo por la acción de la carga, se asienta en forma desigual, lo cual ocasionara grietas en la estructura, y en un momento dado la inestabilidad de la construcción, puede generar, disminución de la contracción del suelo, disminución de la permeabilidad, disminución de asentamiento, las mismas pueden incrementar su magnitud de difícil y costosa reparación, e incluso puede provocar el colapso completo de la estructura ocasionando inseguridades a los usuarios, por esta razón es muy importante minimizar estos efectos a través del estudio de alternativas de ensayos de laboratorio que representen mejor los procesos de compactación realizados en campo.

Para lo cual es necesario obtener la densidad máxima y humedad óptima en laboratorio en un tiempo reducido, y con más precisión. En estos casos es necesario contar con un ensayo que requiera menor cantidad de tiempo para obtener la curva de compactación por lo cual se pudo observar que el equipo de compactación automática es un proceso eficaz en el proceso de obtención de estos resultados y suele ser más práctico por el motivo que elimina el laborioso método manual. La altura y el peso del martillo son ajustables para adaptarse a los requerimientos de la prueba. Un patrón de golpe automático asegura la compactación óptima para cada capa de suelo.

1.3.1.2. Problema

¿Cómo evaluar el proceso de la compactación utilizando el Compactador Automático respecto del Próctor Modificado T-180 tradicional?

1.3.2. Objetivos de investigación

1.3.2.1. Objetivo general

Evaluar la compactación de suelos, utilizando el Compactador Automático, considerando el Próctor T-180 tradicional como patrón; con la finalidad, de valorar los resultados y encontrar factores de ajuste, para obtener más confiabilidad en su aplicación.

1.3.2.2. Objetivos específicos

- Establecer las principales características y funcionamiento de los equipos de compactación automática y Próctor T-180.
- Clasificar todos los tipos de suelos según el método AASHTO.
- Realizar los ensayos de compactación utilizando el compactador automático y el Próctor T-180 tradicional.
- Definir la evaluación objetiva de los resultados de la compactación.
- Plasmar la evaluación subjetiva de los procedimientos para la obtención de resultados de compactación por los métodos automático y manual.
- Establecer la confiabilidad pertinente de los resultados.

1.3.3. Hipótesis

Si se realiza una evaluación de los resultados de la compactación por el método compactador automático, entonces será posible valorar los resultados a partir de un patrón de calificación como son los resultados del método Próctor T-180, aplicado a cada tipo de suelo en estudio y con la confiabilidad correspondiente.

1.3.4. Definición de variables independientes y dependientes

Variable independiente

X_1 = Densidad máxima por el método compactador automático.

X_2 = Humedad óptima por el método compactador automático.

Variable dependiente

Y_1 = Densidad máxima por el método Próctor T-180.

Y_2 = Humedad óptima por el método Próctor T-180.

1.3.5. Conceptualización y operacionalización de las variables

Tabla 1.1. Tabla de conceptualización de las variables independientes

Variable Independiente	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor /Acción
X_1 D máx. (compactador automático)	Se refiere a la densidad máxima que se produce con el compactador automático.	Tipos de suelos	Clasificación AASHTO	12 clasificaciones de suelos
			Densidad máx seca (gr/cm^3)	13 compactaciones por suelo
X_2 C.H.O. (compactador automático)	Se refiere al Contenido de Humedad Óptima, que se encuentra con el compactador automático y que genera la D máx.	Tipos de suelos	Porcentaje de humedad (%)	13 compactaciones por suelo

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.2. Tabla de conceptualización de las variables dependientes

Variable Dependiente	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor /Acción
Y ₁ D máx. (T-180)	Se refiere a la densidad máxima que se produce con el compactador manual T-180.	Tipos de Suelos	Clasificación AASHTO	12 clasificaciones de suelos
			Densidad máx seca (gr/cm ³)	13 compactaciones por suelo
Y ₂ C.H.O. (T-180)	Se refiere al Contenido de Humedad Óptima, que se encuentra con el compactador manual T-180 y que genera la D máx.	Tipos de Suelos	Porcentaje de Humedad (%)	13 compactaciones por suelo

Fuente: Elaboración propia.

1.4. Diseño metodológico

1.4.1. Componentes

1.4.1.1. Unidades de estudio y decisión muestral

1.4.1.1.1. Unidades de estudio

- Ensayos de suelos

1.4.1.1.2. Población

- Tipos de ensayos

1.4.1.1.3. Muestra y muestreo

1.4.1.1.3.1. Análisis estadístico

- **Selección de las técnicas de muestreo**

Técnica de muestreo estratificada.

- **Nivel de confianza**

Tabla 1.3. Niveles de confianza

Nivel de confianza (%)	Valor del nivel de confianza “Z” (adimensional)
50	0.574
80	1.280
85	1.444
90	1.640
95	1.960
99	2.680

Fuente: Departamento de estadística. Universidad Carlos III de Madrid.

- **Tamaño de la muestra**

Primera Población

Nivel de Confianza = 95%

$q = 0,5$

$z = 1,96$

$e = 0,05$

$p = 0,5$

Tabla 1.4. Tabla para determinar el tamaño de la muestra

Ensayos	Cantidad	pi	qi	pi*qi	Ni*pi*qi	wi	ni
Caracterización de los suelos							
Granulometría	12	0,5	0,5	0,25	3,00	0,0356	14
Límites de Atterberg	8	0,5	0,5	0,25	2,00	0,0148	9
Hidrómetro	5	0,5	0,5	0,25	1,25	0,0237	6
Compactaciones							
Compactación automática	156	0,5	0,5	0,25	39,00	0,4629	178
Compactación manual	156	0,5	0,5	0,25	39,00	0,4629	178
Sumatoria =	337				84,25	1	384

Fuente: Elaboración propia.

- **Población**

$$N = \frac{z^2 * p * q}{e^2}$$

$$N = \frac{1.96^2 * 0.5 * 0.5}{0.05^2}$$

$$N = 384 \text{ ensayos}$$

- **Muestra**

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n Ni * pi * qi}{N * \frac{e^2}{z^2} + \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^n Ni * pi * qi}$$

$$n = \frac{84.25}{384 * \frac{0.05^2}{1.96^2} + \frac{1}{384} * 84.25}$$

$$n = 180 \text{ ensayos}$$

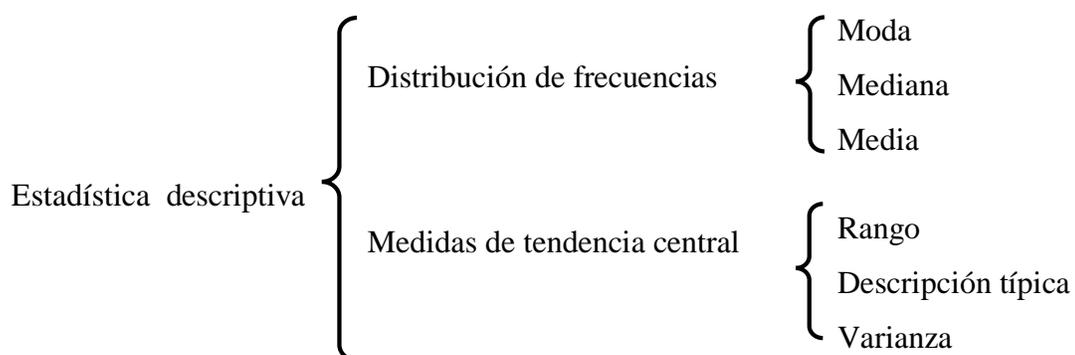
1.4.1.1.3.2. Tratamiento estadístico

Estadística descriptiva e inferencial

Se puede dividir la estadística en dos grandes ramas: la estadística Descriptiva y la estadística Inferencial.

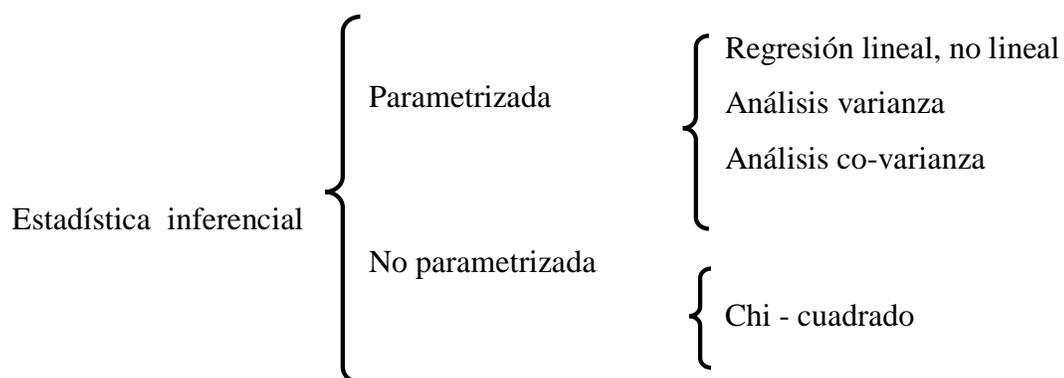
Estadística descriptiva

Son procedimientos empleados para organizar y resumir conjuntos de observaciones en forma cuantitativa. El resumen de ellos puede hacerse mediante tablas, gráficos o valores numéricos. Los conjuntos de datos que contienen observaciones de más de una variable permiten estudiar la relación o asociación que existe entre ellas.



Estadística inferencial

Son métodos empleados para inferir algo acerca de una población basándose en los datos obtenidos a partir de una muestra. Los datos estadísticos son cálculos aritméticos realizados sobre los valores obtenidos en una porción de la población, seleccionada según criterios rigurosos.



En este trabajo se aplicará el tratamiento estadístico descriptivo con distribución de frecuencias.

1.4.2. Métodos y técnicas empleadas

1.4.2.1. Definición

Los métodos a seguir son los siguientes:

- **Compactación T-180.-** Este método establece el procedimiento para determinar la relación entre la humedad y la densidad de un suelo, compactado en un molde normalizado, mediante un pisón de 4,5 Kg. En caída libre, desde la altura de 460 mm, con una energía específica de compactación de $2,67 \text{ J/cm}^3$ ($27,2 \text{ kgf cm/cm}^3$) en suelos que no permiten obtener una curva definida de relación humedad/densidad y que contengan menos de un 12% de partículas menores que 0,8 mm s debe determinar la densidad de acuerdo con el método para determinar la densidad relativa en suelos no cohesivos.
- **Compactación automática.-** Este método establece el procedimiento para determinar la relación entre la humedad y la densidad de un suelo, compactado en un molde normalizado, mediante un el compactador automático de selección de altura de caída de la masa ajustable, para adaptarse a los requerimientos de la prueba con una frecuencia de caída de 30 golpes por minuto, la plataforma rotativa del molde asegura una compactación óptima en todo el molde, tiene una potencia de 900 W aprox. en suelos que no permiten obtener una curva definida de relación humedad/densidad y que contengan menos de un 12% de partículas menores que 0,8 mm s debe determinar la densidad de acuerdo con el método para determinar la densidad relativa en suelos no cohesivos

1.4.2.2. Las técnicas de muestreo

Las técnicas de muestreo utilizadas se consideran no probabilísticas, debido a que el contenido de cada suelo depende de la zona de la de extracción, e incluso dentro de una misma zona se puede encontrar diferentes tipos de constitución de un mismo suelo.

Por lo tanto, las muestras tomadas se basarán en la clasificación del suelo y no en zonas geográficas, o cantos de material.

1.4.2.3. Descripción de los instrumentos para la obtención de datos

- Molde de 6" de diámetro, altura 5 pulg. De forma cilíndrica, pueden estar constituidos por una pieza completa o hendida por una generatriz o bien por dos piezas semicilíndricas ajustables.

El molde debe tener un collar separable de aproximadamente 60mm de altura.

El conjunto de molde y collar debe estar construido de modo que pueda ajustarse firmemente a una placa base. Optativamente puede estar provisto de un dispositivo para extraer las muestras compactadas en el molde.

- Pisón metálico. Tiene una cara circular de 50 +- 0,2 mm de diámetro y una masa de 4.500 +- 10g. Debe estar equipado con una guía titular para controlar la altura de caída de 460 +- 2 mm.

La guía debe tener a lo menos cuatro perforaciones no menores que 10mm ubicadas a 20mm de cada extremo, separadas en 90° entre si y dejar una holgura suficiente para no restringir la libre caída del pisón.

- Balanzas. Una de 10 kg. de capacidad y una precisión de 5 g y otra de 1 Kg. de capacidad y una precisión de 0,1g.
- Horno. De temperatura regulable y circulación de aire.
- Regla de acero. De 300mm de largo y con un ancho biselado.
- Tamices. Tejidos de alambre de abertura cuadrada de 50mm (2"), 19mm ($\frac{3}{4}$ ") y 4,75 (N°4) de abertura nominal.
- Cíncel. Para extraer la muestra compactada.
- Probeta graduada. Una de 500 cm³ de capacidad, graduada a 5 cm³ y otra de 250 cm³ de capacidad, graduada a 2,5 cm³.

- 5 taras
- Recipientes. para colocar los recipientes suelos húmedos para su respectiva compactación.

1.4.2.4. Procedimiento de aplicación

A. Para el ensayo T-180

- 1) Coloque el molde con su collar sobre la base firme, plana y horizontal.
- 2) Llene el molde con una de las fracciones de muestra como sigue:
 - a) Coloque una capa de, material de aproximadamente un quinto de la altura del molde más del collar.
 - b) Compacte la capa con 25 golpes del pistón, uniformemente distribuidos en el molde más el collar.
 - c) Repita 4 veces las operaciones a) y b), escarificando ligeramente las superficies compactadas antes de agregar una nueva capa. Al compactar la última capa debe quedar un pequeño exceso de material por sobre el borde del molde.
- 3) Terminada la compactación, retire el collar y enrase cuidadosamente con la regla al nivel de borde del molde. Tape con material más fino los agujeros superficiales que resulten de la remoción de partículas gruesas en el enrasado.
- 4) Pese el molde con el suelo compactado. Reste la masa del molde para determinar la masa del suelo compactado que llena el molde (m). Registre, aproximado a 1g.
- 5) Determine la densidad húmeda del suelo compactado dividiendo el suelo compactado que llena el molde por la capacidad volumétrica del molde.
 - a) Registre aproximado a 10 Kg/m³
- 6) Retire el material del molde y extraiga dos muestras representativas del suelo compactado. Coloque en recipientes y efectúe dos determinaciones como humedad del suelo compactado.
- 7) Repita las operaciones del 1 al 5 con cada una de las fracciones restantes, hasta que haya un decrecimiento de la densidad húmeda del suelo, con un mínimo de cinco determinaciones. El ensayo se debe efectuar desde la condición más seca a la condición más húmeda.

B. Para la compactación automática

- 1) Coloque el molde con su collar sobre la base firme, plana y horizontal del compactador automático.
- 2) Llene el molde con una de las fracciones de muestra como sigue:
 - a) Coloque una capa de, material de aproximadamente un quinto de la altura del molde más del collar.
 - b) Programar el compactador automático para que compacte la capa con 25 golpes asegurando una compactación uniforme.
 - c) Repita 4 veces las operaciones a) y b), escarificando ligeramente las superficies compactadas antes de agregar una nueva capa. Al compactar la última capa debe quedar un pequeño exceso de material por sobre el borde del molde.
- 3) Terminada la compactación, retire el collar y enrase cuidadosamente con la regla al nivel de borde del molde. Tape con material más fino los agujeros superficiales que resulten de la remoción de partículas gruesas en el enrasado.
- 4) Pese el molde con el suelo compactado. Reste la masa del molde para determinar la masa del suelo compactado que llena el molde (m). Registre, aproximado a 1g.
- 5) Determine la densidad húmeda del suelo compactado dividiendo el suelo compactado que llena el molde por la capacidad volumétrica del molde.
 - a) Registre aproximado a 10 Kg/m³.
- 6) Retire el material del molde y extraiga dos muestras representativas del suelo compactado. Coloque en recipientes y efectúe dos determinaciones como humedad del suelo compactado.
- 7) Repita las operaciones del 1 al 5 con cada una de las fracciones restantes, hasta que haya un decrecimiento de la densidad húmeda del suelo, con un mínimo de cinco determinaciones. El ensayo se debe efectuar desde la condición más seca a la condición más húmeda.

1.4.2.5. Preparación previa para la aplicación

- **Para el T-180**

Densidad Seca

Se calcula la densidad seca del suelo compactado para cada determinación, de acuerdo con la formula siguiente, aproximado a 10 Kg/m^3 .

$$Pd = 10 \text{ ph} / w + 100$$

Donde:

Pd = Densidad seca del suelo compactado (kg/m^3)

Ph = Densidad húmeda del suelo compactado (Kg/m^3)

W = Humedad del suelo compactado (%)

Relación humedad densidad

- a) Construir un gráfico con la densidad seca del suelo compactado en las ordenadas y humedad en las abscisas.
- b) Registre los puntos correspondientes a cada determinación y construya una curva conectando dichos puntos.
- c) Exprese la humedad óptima (w) como la correspondiente al punto máximo de la curva.
- d) Exprese la densidad máxima seca (d max) como al correspondiente a la humedad óptima.

- **Para el automático**

Densidad Seca

Se calcula la densidad seca del suelo compactado para cada determinación, de acuerdo con la formula siguiente, aproximado a 10 Kg/m^3 .

$$Pd = 10 \text{ ph} / w + 100$$

Donde:

P_d = Densidad seca del suelo compactado (kg/m^3)

P_h = Densidad húmeda del suelo compactado (Kg/m^3)

W = Humedad del suelo compactado (%)

Relación humedad densidad

- a) Construir un gráfico con la densidad seca del suelo compactado en las ordenadas y humedad en las abscisas.
- b) Registre los puntos correspondientes a cada determinación y construya una curva conectando dichos puntos.
- c) Expresar la humedad óptima (w) como la correspondiente al punto máximo de la curva.
- d) Expresar la densidad máxima seca (d_{max}) como al correspondiente a la humedad óptima.

1.4.3. Procedimiento para el análisis y la interpretación de la información

1.4.3.1. Tratamiento de los datos (empleo de la estadística)

Una vez obtenidos los resultados se realizará lo siguiente:

- Cálculo de la media de la densidad máxima para cada tipo de suelo.
- Cálculo de la desviación estándar de la densidad máxima seca para cada tipo de suelo.

1.4.4. Alcance de la investigación

El trabajo estará enmarcado dentro del siguiente alcance y limitaciones:

- Los ensayos concernientes a la clasificación de suelo será los establecidos por la AASTHO como ser límites de Atterberg, granulometría, etc.
- La investigación abordará el diseño mediante ensayos de laboratorio, tanto de la compactación de Próctor T-180 como el ensayo usando el compactador automático, ambos para diferentes tipos de suelos el procedimiento de los ensayos estarán basados en las normas (..INV-142) para el procedimiento de compactación T-180.

- Los Suelos a emplear en la elaboración de la compactación será suelos el uso de la conformación de la capa base, subbase y subrazante según la clasificación de suelos de la AASHTO en la cual nos basaremos en la contemplación de los usos para sub rasante- tipos de suelos A-7, A6, A5, A4, A3 Para sub base tipos de suelos- A-4, A-2, A-1 y Base A-2, A-1 En lo que concierne a la información técnica que se requiera de éste, como resultados de ensayos para su clasificación, etc.; estos serán realizados en el laboratorio de suelos de la UAJMS.
- En el procedimiento de laboratorio se realizarán la compactación para cada suelo en cada tipo de ensayo tanto como para el ensayo de Próctor T-180 y compactación automática para poder obtener una mayor cantidad de puntos que nos permitan establecer una correlación más eficaz entre ambos ensayos.
- El estudio propone realizar la compactación haciendo variar el contenido de humedad para la obtención de la curva de compactación en suelos finos en ambos ensayos se utilizarán los mismos porcentajes de humedad, y energía de compactación.

CAPÍTULO II

COMPACTACIÓN DE SUELOS

CAPÍTULO II

COMPACTACIÓN DE SUELOS

2.1. Introducción

En el campo de trabajo, el ingeniero civil constantemente se enfrenta a diversos problemas surgidos por el tipo de suelo con el cual tratará, el suelo es lo que soportará el peso de una estructura, y si este no cumple con ese objetivo, la estructura sufrirá problemas de agrietamiento, hundimientos y otros que también dañaran la obra realizada.

El suelo es el material de construcción más abundante del mundo y en muchas zonas constituye, de hecho, el único material disponible localmente. Cuando el ingeniero emplea el suelo como material de construcción debe seleccionar el tipo adecuado de suelo, así como el método de colocación y, luego, controlar su colocación en obra.

2.2. Compactación

Se denomina compactación de suelos al proceso mecánico por el cual se busca mejorar las características de resistencia compresibilidad y esfuerzo deformación de los mismos por lo general el proceso implica un reducción más o menos rápida de los vacíos, como consecuencia de la cual en el suelo acurren cambios de volumen de importancia fundamentalmente ligados a pérdida de volumen ligados a pérdidas de volumen de aire, pues por lo común no se expulsa agua de los huecos durante el proceso de compactación. No todo el aire sale del suelo, por lo que la condición de un suelo compactado es la de un suelo parcialmente saturado.

El objetivo principal de la compactación es de obtener un suelo de tal manera estructurado que posea y mantenga un comportamiento mecánico adecuado a través de toda la vida útil de la obra. Las propiedades requeridas puedan variar de caso a caso, pero la resistencia, la compresibilidad y una adecuada relación esfuerzo deformación figuran entre aquellas cuyo mejoramiento se busca siempre; es menos frecuente, aunque a veces no menos importante, que también se compacte para obtener unas características

idóneas de permeabilidad y flexibilidad finalmente, suele favorecerse mucho la permanencia de la estructura terrea ante la acción de los agentes erosivos como consecuencia de un proceso de compactación.

De la simple enumeración de los objetivos de la compactación destaca un hecho importante, que debe hacer prever al ingeniero muchas de las dificultades y complejidades que después efectivamente encontrara en estas técnicas. En primer lugar, la compactación resulta ser un proceso de objetivos múltiples y ello proporciona la complicación, pero, en segundo lugar, evidente que muchos de esos objetivos serán contradictorios en muchos problemas concretos, en el sentido de que las acciones que se emprendan para cumplir con uno pudieron perjudicar a algún otro.

Por ejemplo en términos generales ser cierto con frecuencia que una compactación intensa produce material muy resistente, pero sin duda muy susceptible al agrietamiento; en este aspecto el número de ejemplos contrastantes que pudieran ocurrirse es prácticamente ilimitado. Estas posibles contradicciones se complican y amplían aún más si se toma en cuenta que los suelos compactados ha de tener una vida dilatada y que es compromiso obvio que ser conserven sus propiedades en toda su vida; bajo la acción del agua de las cargas soportadas, etc. En estas perspectivas circunstanciales y temporal pueden multiplicarse mucho los ejemplos de contradicciones entre los objetivos del proceso; la alta resistencia, obtenida con compactación muy enérgica, de que antes se habló, puede entrar en contradicción consigo misma, pues un suelo muy compactado podrá en general absorber mucha agua si se da las condiciones propicias y al hacerlo su resistencia podrá descender drásticamente, en tanto que ese mismo suelo inicialmente compactado en forma menos enérgica, con menor resistencia inicial podrá resultar mucho más estable ante el agua, manteniendo en el tiempo una resistencia inicialmente menor que la del otro, pero probablemente suficiente.

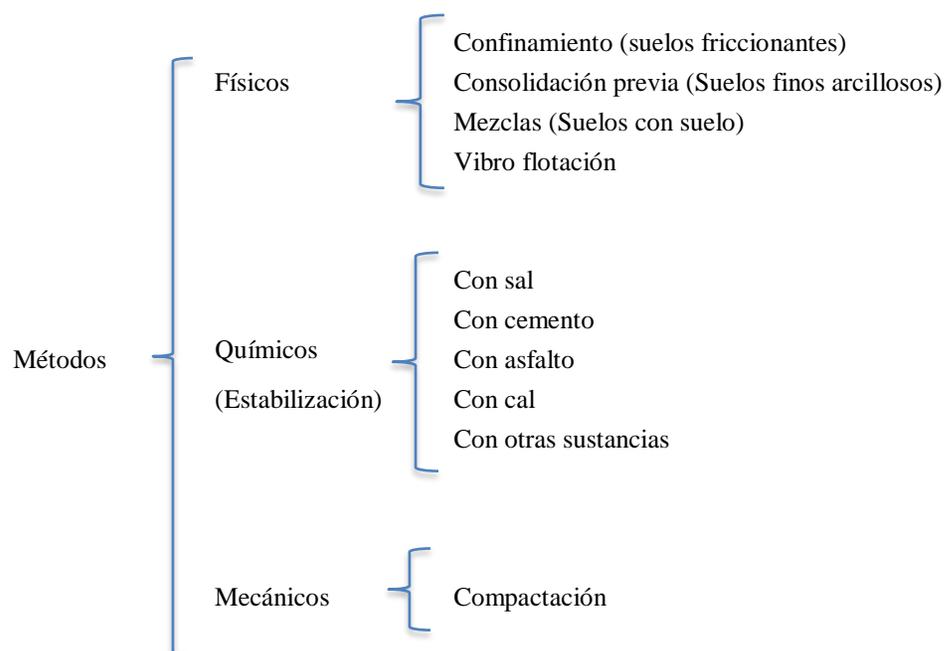
Desde un principio el problema de la compactación de suelos resulta ligado al de control de calidad de los trabajos de campo; en efecto, después de realizar un proceso de compactación siempre es necesaria verificar si con el lograron los fines propuestos.

Como quiera que las vías terrestres suelen construirse a contrato por parte de empresas especializadas, la verificación antes citada resulta ligada a problemas de pago, legales, etc. Esta multiplicidad de los problemas de compactación de suelos, que tantas veces lo hace trascender de la esfera meramente técnica, se requiere un tiempo de ejecución demasiado largo para controlar un proceso de compactación que avance de manera normal. Por otra parte ciertas experiencias, realizadas en los primeros años de la aplicación de las técnicas modernas de compactación, indicaron que existe una correlación que en aquella época se juzgó muy confiable (pero a la cual posteriormente se encontraron algunas desviaciones significativas) entre las propiedades fundamentales arriba enumeradas y el peso volumétrico seco a que llega el material compactado de manera que pueda decirse que a mayor peso volumétrico seco se alcanza una situación más favorable en el suelo compactado. Debido a que la prueba de peso volumétrico es fácil y sencilla de realizar se hizo costumbre controlar la compactación determinado el peso volumétrico seco de los materiales compactados.

Como posterioridad a estas épocas, ha sido explosivo el desarrollo de equipos de compactación y se han investigado bastante las propiedades de los suelos compactados y las técnicas de campo y de laboratorio; de todo ello habrá un breve testimonio en páginas subsecuentes de este capítulo.

En rigor, la compactación es uno de los varios medios de que hoy se dispone para mejorar la construcción de un suelo que haya de usarse en construcción; es, además, uno de los más eficientes y de aplicación universal. La tabla 2.1, que se presenta a continuación permite situar a la compactación dentro del conjunto de métodos de mejoramiento de suelos que hoy pueden aplicarse.

Gráfico 2.1. Métodos de mejoramiento de suelos



Fuente: Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo

Por lo general, las técnicas de compactación se aplican a rellenos artificiales, tales como cortinas para presas de tierra, diques, terraplenes para caminos y ferrocarriles, bordos de defensa, muelles, pavimentos, etc. En ocasiones se hace necesario compactar el terreno natural, como en el caso de las cimentaciones sobre arenas sueltas. Así, la compactación de suelos es, ante todo un problema constructivo, de campo.

La eficiencia de cualquier proceso de compactación depende de varios factores y para poder analizar la influencia particular de cada uno se requiere disponer de procedimientos estandarizados que reproduzcan los procesos de compactación de campo en el laboratorio, en forma representativa (hasta donde ello sea posible). De esta manera, pasan a primer plano de interés las pruebas de compactación de laboratorio y los estudios que es este han de hacerse en torno a tales procesos. Comoquiera que los procesos de campo involucran costos altos, en general los estudios para proyecto habrán de hacerse con base en el trabajo de laboratorio; esta afirmación no la invalida el hecho de que en la técnica actual se haga un uso cada vez más extenso de terraplenes de

prueba, en que se investigan modelos a escala natural para obtener normas de proyecto. Los estudios de compactación en laboratorio también desempeñan un papel muy importante en el control de calidad de los trabajos.

Así pues, los procesos de compactación han de estudiarse con referencia a las técnicas de campo y a todo conjunto de técnicas de laboratorio; pero además de los puntos de vista anteriores existe un tercero, relativamente descuidado hasta épocas recientes y el que se refiere a la investigación de las propiedades que es posible obtener en los suelos compactados. Este tercer punto de vista, convenientemente relacionado con los otros dos, completará el cuadro en la forma que el ingeniero requiera para establecer un criterio adecuado.

En este capítulo, los tres puntos de vista del problema de compactación se analizan en forma relativamente separada, para descartar criterios del modo más diferenciado que sea posible.

2.3. Variables que afectan el proceso de compactación de los suelos

Como es natural, un suelo se puede compactar de varias maneras, y en cada caso se obtendrá un resultado diferente; por otra parte, una misma forma de compactación dará resultados distintos si se aplica a diversos suelos; por último, si una misma forma de compactación se aplica a un suelo determinado, podrán lograrse resultados muy diferentes si de un caso a otro se varían ciertas condiciones de las prevalecientes en dicho suelo.

Las afirmaciones anteriores justifican las conclusiones, obvia para quienquiera que tenga cualquier grado de familiaridad con estos problemas, de que los resultados de un proceso de compactación dependen de varios factores, unos que atañen al tipo de suelo, otros relativos al método de compactación que se emplee y, por último, varios más que se refieren a determinadas circunstancias que en ese momento pudieran prevalecer en el suelo con que se trabaja. Estos factores suelen denominarse las “variable” que rigen el proceso de compactación. Las principales de estas se reseñan a continuación.

2.3.1. La naturaleza del suelo

Es claro que la clase de suelo con que se trabaja influye de manera decisiva en el proceso de compactación; de hecho, a lo largo de este capítulo habrán de diferenciarse las técnicas que se empleen y los resultados que se obtengan precisamente con base en el tipo de suelo.

Prevalece aun la distinción usual entre suelos finos y gruesos o entre suelos arcillosos y fricciantes, pero en el análisis de los procesos de compactación es muy común que tal distinción se detalle bastante más, tipificando los suelos de acuerdo con las normas establecidas en el capítulo 2.

2.3.2. El método de compactación

En laboratorio resulta bastante fácil clasificar los métodos de compactación en uso en tres tipos bien diferenciados: la compactación por impactos, por amasado y por aplicación de carga estática. A reserva de detallar algo más estos métodos, baste por el momento la afirmación de que producen resultados diferentes tanto en la estructuración que adquiere el suelo como, en consecuencia, en las propiedades del material que se compacta. Además, ya se comienza a utilizar algunos dispositivos de laboratorio para compactar por vibración, si bien su uso está menos extendido que el de los otros tres métodos.

Resulta bastante difícil diferenciar de un modo análogo los métodos de compactación de campo. Es común describir estos con base en el equipo mecánico que se emplee en el proceso, y así se habla de la compactación con rodillo liso, con rodillo neumático, con equipo vibratorio, etc. Se supone que los métodos de laboratorio reproducen las condiciones del proceso de campo, pero en muchos casos no es fácil establecer una correspondencia clara entre el tren de trabajo de campo y las pruebas de laboratorio, en el sentido de contar con que estas últimas reproduzcan en forma suficientemente representativa todas las condiciones del suelo compactado en el campo.

2.3.3. La energía específica de compactación

Se entiende por energía específica de compactación la que se entrega al suelo por unidad de volumen, durante el proceso mecánico de que se trate.

Es muy fácil evaluar la energía específica en una prueba de laboratorio en que se compacta al suelo por impactos dados con un pisón; de hecho, resulta claro que para tal caso queda dada por la expresión:

$$E_e = \frac{N * n * w * h}{V}$$

Dónde:

E_e = Energía específica.

N = Número de golpes del pisón compactador por cada una de las capas en que se acomoda el suelo en el molde de compactación.

n = Número de capas que se disponen hasta llenar el molde.

W = Peso del pisón compactador.

h = Altura de caída del pisón al aplicar los impactos al suelo.

V = Volumen total del molde de compactación igual al volumen total del suelo compactado.

En las pruebas de laboratorio en que se compacta el suelo con la aplicación de presión estática, en principio la energía específica se puede evaluar de manera análoga en términos del tamaño del molde el número de capas que se dispone el suelo, la presión que se aplique a cada capa y el tiempo de aplicación. Sin embargo, en este caso la evaluación no resulta ya tan sencilla y la energía específica se ve afectada por la deformabilidad del suelo y por el tiempo de aplicación de la presión.

En el caso de las pruebas en que se realiza la compactación por amasado es aún más compleja la evaluación de la energía específica, pues cada capa de suelo dentro del molde se compacta mediante un cierto número de aplicaciones de carga con un pisón que produce presiones que varían gradualmente desde cero hasta un valor máximo, y luego se invierte el proceso en la descarga. La energía de compactación no se puede

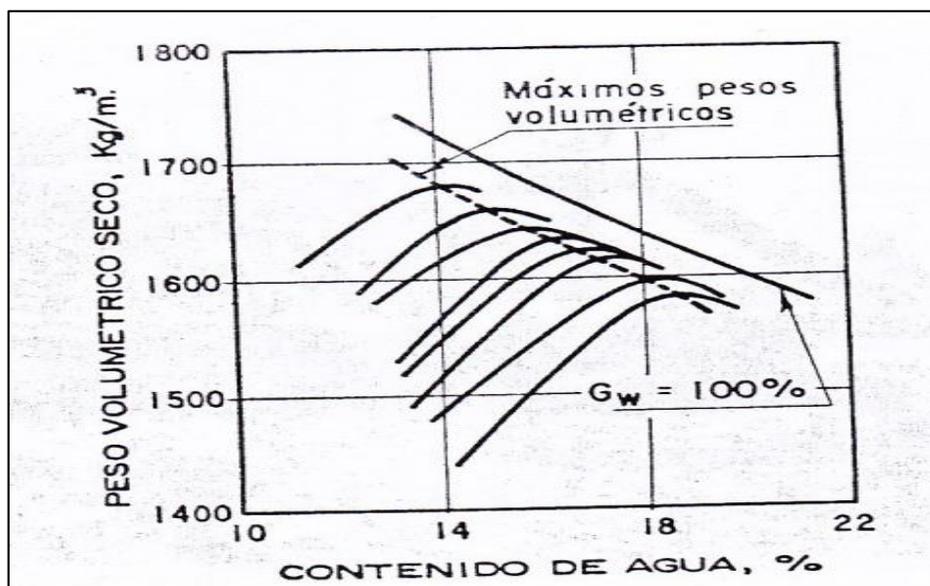
cuantificar de un modo sencillo pero puede hacerse variar a voluntad si se introducen cambios en la presión de apisonado, en el número de capas, en el número de aplicaciones del pisón por capa, en el área de pisón o en el tamaño del molde.

El concepto de energía específica conserva su pleno valor fundamental cuando se relaciona con procedimientos de compactación de campo. En el caso del uso de rodillos depende principalmente de la presión y el área de contacto entre el rodillo y el suelo, del espesor de la capa que se compacte y del número de pasadas del equipo.

Tampoco es sencillo evaluar la energía de compactación en términos absolutos en un caso dado, pero si varían los factores mencionados es posible hacerla cambiar, con lo que se obtienen términos de comparación entre dos trenes de trabajo diferentes.

En páginas subsiguientes de este capítulo se podrá ver la gran influencia de la energía de compactación en los resultados que se logran. Puede decirse que la energía específica de compactación es una de las variables que mayor influencia ejercen en el proceso de compactación de un suelo dado, con un procedimiento determinado.

Figura 2.1. Diagrama cualitativo de Y_d vs w para diversas energías de compactación



Fuente: Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo

La Fig. 2.1 ilustra cualitativamente el efecto de la energía de compactación y del contenido de agua del suelo en un proceso de compactación de campo con rodillo pata de cabra, si bien la forma de tales curvas, obtenidas para energías de compactación creciente, es general para cualquier tipo de rodillo o compactador. Con el uso de un mismo equipo, todo incremento en la energía de compactación hace que aumente el peso volumétrico seco máximo y disminuya el contenido de agua óptimo.

2.3.4. El contenido de agua del suelo

Ya en los primeros estudios de Próctor se puso de manifiesto que el contenido de agua del suelo que se compacta es otra variable fundamental del proceso. Próctor observó que con contenidos crecientes de agua, a partir de valores bajos, se obtenían más altos pesos específicos secos para el material compactado, si se usa la misma energía de compactación; pero observó también que esta tendencia no se mantiene indefinidamente, ya que cuando la humedad pasa cierto valor, disminuyen los pesos específicos secos logrados. Es decir, Próctor puso de manifiesto que para un suelo dado y usando determinado procedimiento de compactación, existe un contenido de agua de compactación, llamado el óptimo, que produce el máximo peso volumétrico seco que es de dable obtener con ese procedimiento de compactación.

En relación a un proceso de compactación de campo, dicho contenido de agua es óptimo para el equipo y energía correspondiente.

Lo anterior puede explicarse en términos generales si se toma en cuenta que en los suelos finos arcillosos, a bajos contenidos de agua, esta se encuentra en forma capilar, produciendo compresiones entre las partículas constituyentes del suelo las cuales tienden a formar grumos difícilmente desintegrables, que dificultan la compactación.

El aumento en contenido de agua disminuye la tensión capilar y, por lo tanto, el aglutinamiento de sus grumos, lo que hace que aumente la eficiencia de la energía de compactación. Empero, si el contenido de agua es tal que hay exceso de agua libre, al

grado de casi llenar los vacíos del suelo, se impide una buena compactación puesto que el agua no puede desplazarse instantáneamente a resultados del efecto mecánico que se esté aplicando. Esto es más cierto en los suelos más finos. El contenido de agua del suelo es otra de las variables fundamentales del proceso de compactación.

2.3.5. La escala de humedades al efectuar la compactación

Este aspecto afecta sobre todo a las pruebas de compactación que se realizan en laboratorio, en las que es común presentar resultados con base en gráficas $Y_d - w$ (peso volumétrico seco vs. humedad). Estas curvas son diferentes si las pruebas se efectúan a partir de un suelo relativamente seco al que se va agregando agua o si se parte de un suelo húmedo, que se va secando según avanza la prueba. Las investigaciones experimentales comprueban que en el primer caso se obtienen pesos específicos secos mayores que en el segundo, para un mismo suelo y con los mismos contenidos de agua; este afecto parece ser particularmente notable en los suelos finos plásticos con contenidos de agua inferiores al óptimo. La aplicación del fenómeno podría ser que cuando el suelo está seco y se le agrega agua, esta tiende a quedar en la periferia de los grumos, con propensión a penetrar en ellos solo después de algún tiempo; por otra parte, cuando el agua se evapora al irse secando un suelo húmedo superficial de los grumos se hace menor que la interna. Se tienen entonces condiciones diferentes en los grumos del suelo con un mismo contenido de humedad; en el primer caso, en que se agregó agua, la presión capilar entre los grumos es menor por el proceso de agua, en comparación con el segundo caso, en que la evaporación hace que los meniscos se desarrollen más. Por lo tanto, en el primer caso será menor la ligazón entre los grumos y una misma energía de compactación será más eficiente para compactar el suelo que en el segundo caso.

Naturalmente que los razonamientos anteriores se ven influidos por el tiempo que se deje pasar entre la incorporación del agua y el momento en que se aplica la energía de compactación, pues si el lapso es largo, se permite la incorporación uniforme del agua a lo grumos del suelo, con la consecuente disminución de su humedad superficial y el aumento de las presiones capilares. El contenido de sales también influye, así como la naturaleza de la arcilla.

En los laboratorios es común que se proceda a partir de un suelo relativamente seco; se incorporara agua según avanza la prueba y se deja pasar el tiempo suficiente tras la incorporación para permitir la distribución uniforme del agua.

2.3.6. El contenido de agua original del suelo

Se refiere este concepto al contenido natural de agua que el suelo poseía antes de añadirle o quitarle humedad para compactarlo, en busca del contenido óptimo o cualquier otro con que se hubiere decidido realizar la compactación.

En los procesos de campo el contenido de agua original no solo ejerce gran influencia en la respuesta del suelo al equipo de compactación, sino que también gobierna en gran parte el comportamiento ulterior de la masa compactada. Aunque por lo general solo pueden lograrse cambios relativamente pequeños al humedecer o secar el suelo extendido en la obra, es muy aconsejable buscar siempre condiciones de humedad natural que no se aparten mucho de la óptima para el proceso de compactación que vaya a usarse.

En los procesos de laboratorio el contenido natural de agua del suelo tiene especial influencia en las compactaciones que se logren con una cierta energía, a humedades menores que la óptima, sobre todo cuando se procede a compactar el suelo inmediatamente después de la incorporación del agua. Este fenómeno se comprende si se toma en cuenta la explicación que se ofrece en el punto 5 anterior, pues en un suelo originalmente bastante seco, el agua que se añada producirá mayor diferencia inmediata entre las condiciones de humedad interna y externa de los grumos que en otro que originalmente hubiese estado más húmedo; por ello, es de esperar que los pesos volumétricos secos que se obtengan sean mayores cuando los contenidos originales de agua del suelo sean menores.

2.3.7. La recompactación

En muchos laboratorios es práctica común usar la misma muestra de suelo para la obtención de puntos sucesivos de las pruebas de compactación; ello implica la continuada recompactación del mismo suelo. Se ha visto que esta práctica es

inconveniente en lo absoluto, toda vez que la experimentación ha demostrado, sin género de duda, que si se trabaja con suelos recompactados los pesos volumétricos que se obtienen son mayores que los que se logran con muestras vírgenes en igualdad de circunstancias, de modo que con suelos recompactados la prueba puede llegar a dejar de ser representativa.

Al parecer, una explicación sencilla de este efecto radica en la deformación volumétrica de tipo plástico que causan sucesivas compactaciones.

2.3.8. La temperatura

La temperatura ejerce un importante efecto en los procesos de compactación de campo, en primer lugar, por efectos de evaporación de agua incorporada al suelo o de condensación de la humedad ambiente en el mismo. Además, puede llegar a ejercer algún efecto en la consistencia y manejabilidad de los suelos con que se trabaja.

2.3.9. Otras variables

Además de las mencionadas, existe un conjunto de variables que efectúan a las pruebas de compactación de laboratorio y campo, tales como el número y espesor de las capas en que se dispone o se tiende el suelo, el número de pasadas del equipo de compactación sobre cada punto o el número de golpes del pisón compactador encada capa, etc. Todos estos factores y su efecto se detallaran al describir los procesos de compactación de campo o las diferentes pruebas de laboratorio.

En todo proceso de compactación existe una eficiencia con la que la energía se aplica; su papel es fundamental, pero su cuantificación muy difícil.

2.4. La curva de compactación

Como ya hemos visto, de acuerdo con la historia los procesos de compactación comenzaron a desarrollarse en el campo, como técnicas de construcción.

Fue hasta que se trató de estudiar de un modo más riguroso los efectos de tales técnicas y de establecer procedimientos de control de calidad y verificación de resultados en el campo cuando nacieron las pruebas de compactación de laboratorio, al principio solo con base en la original desarrollada por Próctor, y después con base en toda una serie de

pruebas, variantes más o menos cercanas a la primera, que se desarrollaron por el afán de ir logrando en el laboratorio mayor acercamiento a los procesos de campo, que paralelamente se ampliaron con toda una serie de equipos nuevos producidos por una tecnología cada vez más conocedora y exigente.

Como ya se dijo, Próctor visualizó la correlación entre los resultados de un proceso de compactación y el aumento del peso volumétrico seco del material compactado, y estableció la costumbre, que aún hoy se sigue, de juzgar los resultados de un procesos de compactación con base en la variación de peso volumétrico seco que se logre; también comprendió el fundamental papel que desempeña el contenido de agua del suelo en la compactación que de él se obtiene, con un cierto procedimiento. Juntando estos dos aspectos, que considero básicos, estableció la costumbre, que también ha subsistido hasta la actualidad, de representar la marcha de un proceso de compactación por medio de una gráfica en la que se haga ver el cambio de peso volumétrico seco al compactar el suelo con diversos contenidos de agua, utilizando varias muestras del mismo suelo, cada una de las cuales proporciona un punto de la curva.

Comoquiera que diferentes procesos de compactación producen al mismo suelo compactaciones distintas, un mismo suelo podrá tener diversas curvas de compactación, correspondiente a los diferentes modos de compactarlo que puedan usarse, sea en el campo o laboratorio.

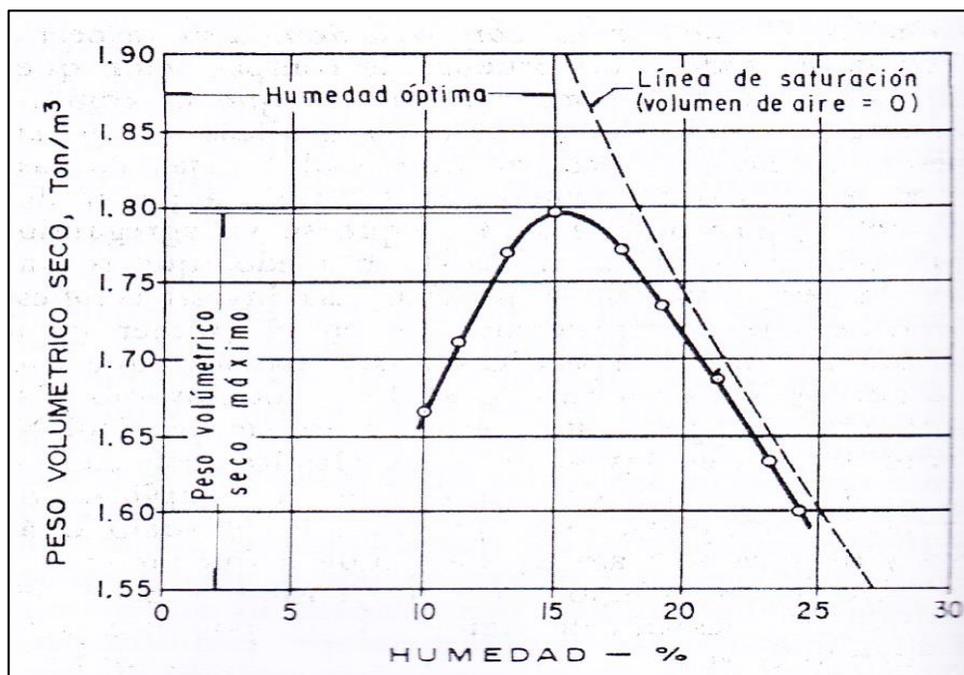
Una representación tal como la anterior ($Y_d - w$) recibe por antonomasia el nombre de curva de compactación, pero no constituye el único medio gráfico de representar los resultados de un proceso de compactación; simplemente es el modo más usual de representación de los que hoy se utilizan, aunque podría haber otros; de hecho, en páginas subsecuentes de este capítulo se utilizaran algunas otras formas gráficas para representar o analizar algunas condiciones de interés en los procesos de compactación.

Sea cual fuere el procedimiento de compactación que se siga, la forma de la curva de compactación será parecida a la que se muestra en la Fig. 2.1.

La curva muestra un máximo absoluto, alguna vez acompañado de otro secundario, de menor valor.

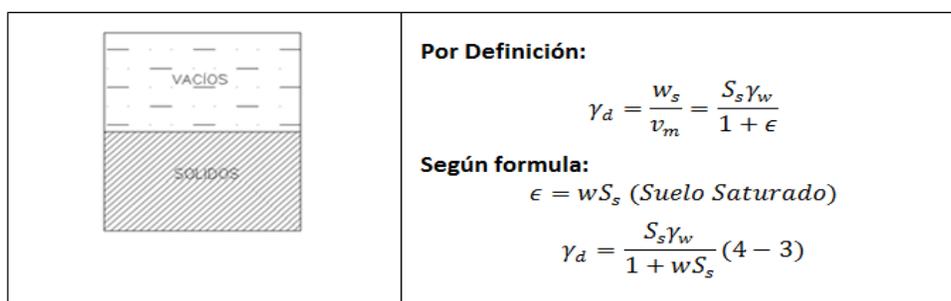
El peso volumétrico seco correspondiente al máximo absoluto recibe el nombre de peso volumétrico seco máximo; la humedad con la que tal máximo se consigue se denomina humedad óptima y representa el contenido de agua con el cual el procedimiento de Compactación que se esté usando produce la máxima eficiencia, por lo menos si esta se juzga por el peso volumétrico seco que se logre.

Figura 2.2. Curva de compactación típica



Fuente: Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo

Figura 2.3. Esquema de un suelo saturado y deducción de la formula



Fuente: Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo

La Fig. 2.2 puede construirse, ya sea en laboratorio o en el campo, a partir de parejas de valores $Y_d - w$, los cuales se pueden obtener, como ya se dijo, si se aplica el procedimiento de compactación de que se trate a diversos especímenes del mismo suelo con diferentes contenidos de agua. La curva $Y_d - w$, puede entonces dibujarse a partir de los valores anteriores aplicando la fórmula:

$$Y_d = \frac{Y_m}{1 + w}$$

Cuya obtención es mediante al aplicar las definiciones de Y_d y w . También aparece en la figura Fig. 2.2 la curva correspondiente al 100% de saturación del suelo en cada caso. Como ya se dijo, la condición de un suelo compactado en circunstancias normales es la de un suelo no saturado, razón por la cual la curva de compactación se desarrolla por debajo de la curva de saturación; si se comparan las dos es posible saber cual tendría que ser el contenido de agua que saturase a una muestra que se compactara a determinado peso volumétrico. La curva de saturación se puede obtener si se calculan los pesos volumétricos secos que corresponderán al mismo al mismo suelo supuesto, saturado con el contenido de agua correspondiente a una cierta abscisa de la curva, aplicándola fórmula:

$$Y_d = \frac{S_s}{1 + w * S_s} Y_w$$

Que corresponde a suelos saturados y cuya obtención es sencilla a partir del esquema que se representa en la Fig. 2.3.

Como se verá, muchas de las curvas de compactación que se obtienen en el laboratorio se realizan en pruebas en que el espécimen se compacta por capas dentro del molde y por medio del golpe aplicado con un pisón estándar, con una energía también prefijada. Cuando una prueba de tal naturaleza (prueba dinámica) se realiza en una arena sin contenido de partículas de arcilla, la curva de compactación adquiere la forma que aparece en la Fig. 2.1.

En rigor esta forma es típica de las pruebas dinámicas que se aplican a materiales suficientemente permeables como para que no se desarrollen presiones de poro en el interior del suelo durante el proceso de compactación. La explicación de la forma pudiera ser como sigue: Cuando el contenido de agua de arena aumenta un poco, se desarrolla fuerzas capilares entre los granos, que dificultan su acomodo y la eficiencia de la compactación baja; con más agua esas fuerzas desaparecen y el proceso se hace más eficiente. Una curva como la Fig. 2.1 no define en forma clara ni el peso volumétrico seco máximo ni la humedad optima; pero, por otra parte y desde un punto de vista práctico, que es el único en que tienen vigencia los conceptos anteriores, el asunto no tiene demasiada importancia, pues existen otras pruebas de laboratorio aplicables a arenas limpias o a mezclas de arenas y gravas sin finos en que estos materiales exhiben curvas en la forma usual; además, tales pruebas son satisfactorias desde el punto de vista de la representatividad de los procesos de campo que se usan tales materiales (pruebas de compactación con vibración).

2.5. Suelo

El término “suelo”, tiene varias interpretaciones, la cual varía de acuerdo con los intereses que se tenga sobre él. Nos enfocaremos en el área de la Ingeniería Civil.

Para la ingeniería Civil el término “suelo” se define como, sedimentos no consolidados de partículas sólidas, fruto de la alteración de las rocas, o suelos transportados por agentes como el agua, hielo o viento con contribución de la gravedad como fuerza direccional selectiva, y que pueden tener materia orgánica. El suelo es un cuerpo natural heterogéneo.

2.5.1. Formación de los suelos

El suelo puede formarse y evolucionar a partir de la mayor parte de los materiales rocosos, siempre que permanezcan en una determinada posición el tiempo suficiente para permitir las anteriores etapas. Se pueden diferenciar:

Suelos autóctonos, formados a partir de la alteración de la roca que tienen debajo.

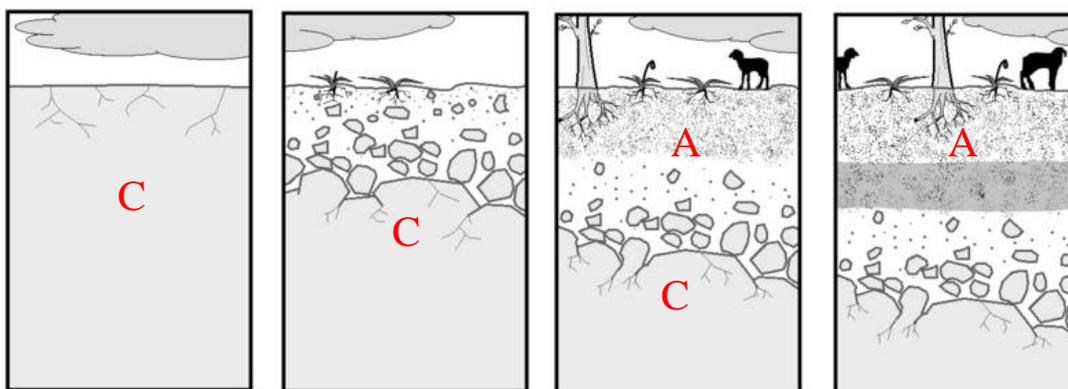
Suelos alóctonos, formados con materiales provenientes de lugares separados. Son principalmente suelos de fondos de valle cuya matriz mineral procede de la erosión de las laderas.

La formación del suelo es un proceso en el que las rocas se dividen en partículas menores mezclándose con materia orgánica en descomposición. El lecho rocoso empieza a deshacerse por los ciclos de hielo-deshielo, por la lluvia y por otras fuerzas del entorno:

- El lecho de roca madre se descompone cada vez en partículas menores.
- Los organismos de la zona contribuyen a la formación del suelo desintegrándolo cuando viven en él y añadiendo materia orgánica tras su muerte. Al desarrollarse el suelo, se forman capas llamadas horizontes.

El horizonte A, más próximo a la superficie, suele ser más rico en materia orgánica, mientras que el horizonte C contiene más minerales y sigue pareciéndose a la roca madre. Con el tiempo, el suelo puede llegar a sustentar una cobertura gruesa de vegetación reciclando sus recursos de forma efectiva.

Figura 2.4. Formación de los suelos



Fuente: Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo

Cuando el suelo es maduro suele contener un horizonte B, donde se almacenan los minerales lixiviados.

Los agentes que intervienen en la generación de los suelos son dos:

La desintegración mecánica, se refiere a la intemperización de las rocas por agentes físicos, tales como cambios periódicos de temperatura, acción de la congelación del agua en las grietas de las rocas, agentes de organismos, plantas, etc. Por estos fenómenos las rocas llegan a formar arenas, o cuando mucho limos y solo en casos especiales arcillas.

Por descomposición química, se entiende, la acción de agentes que atacan las rocas modificando su constitución mineralógica o química. El principal agente es el agua y los mecanismos de ataque más importantes son la oxidación y la hidratación. Estos mecanismos generalmente producen arcilla como último producto de desintegración.

2.5.2. Composición de los suelos

Los componentes del suelo se pueden dividir en sólidos, líquidos y gaseosos.

Sólidos

Este conjunto de componentes representa lo que podría denominarse el esqueleto mineral del suelo. Y entre estos, componentes sólidos, del suelo destacan:

- Silicatos, tanto residuales o no completamente meteorizados, (micas, feldespatos, y fundamentalmente cuarzo).
- Como productos no plenamente formados, singularmente los minerales de arcilla, (caolinita, illita, etc.).
- Óxidos e hidróxidos de Fe (hematites, limonita, goethita) y de Al (gibbsita, boehmita), liberados por el mismo procedimiento que las arcillas.
- Clastos y granos poliminerale como materiales residuales de la alteración mecánica y química incompleta de la roca originaria.
- Otros diversos compuestos minerales cuya presencia o ausencia y abundancia condicionan el tipo de suelo y su evolución.

- ✓ Carbonatos (calcita, dolomita).
 - ✓ Sulfatos (aljez).
 - ✓ Cloruros y nitratos.
- Sólidos de naturaleza orgánica o complejos órgano-minerales, la materia orgánica muerta existente sobre la superficie, el humus o mantillo:
 - Humus joven o bruto formado por restos distinguibles de hojas, ramas y restos de animales.
 - Humus elaborado formado por sustancias orgánicas resultantes de la total descomposición del humus bruto, de un color negro, con mezcla de derivados nitrogenados (amoníaco, nitratos), hidrocarburos, celulosa, etc. Según el tipo de reacción ácido-base que predomine en el suelo, éste puede ser ácido, neutro o alcalino, lo que viene determinado también por la roca madre y condiciona estrechamente las especies vegetales que pueden vivir sobre el mismo.

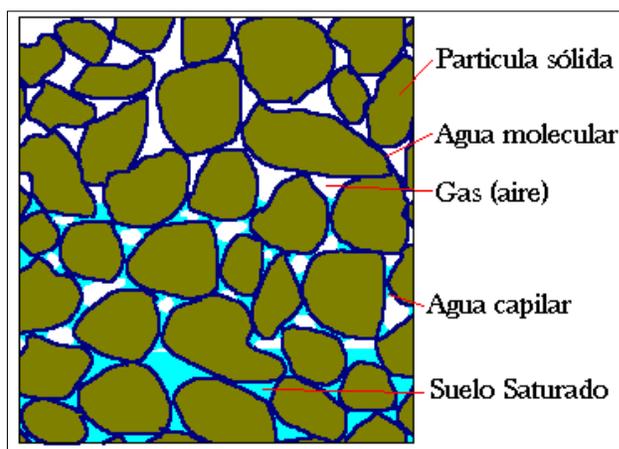
Líquidos

Esta fracción está formada por una disolución acuosa de las sales y los iones más comunes como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- ,... así como por una amplia serie de sustancias orgánicas. La importancia de esta fase líquida en el suelo estriba en que éste es el vehículo de las sustancias químicas en el seno del sistema.

El agua en el suelo puede estar relacionada en tres formas diferentes con el esqueleto sólido:

- La primera, está constituida por una película muy delgada, en la que la fuerza dominante que une el agua a la partícula sólida es de carácter molecular, y tan sólida que esta agua solamente puede eliminarse del suelo en hornos de alta temperatura. Esta parte del agua no es aprovechable por el sistema radicular de las plantas.

Figura 2.5. Composición de los suelos



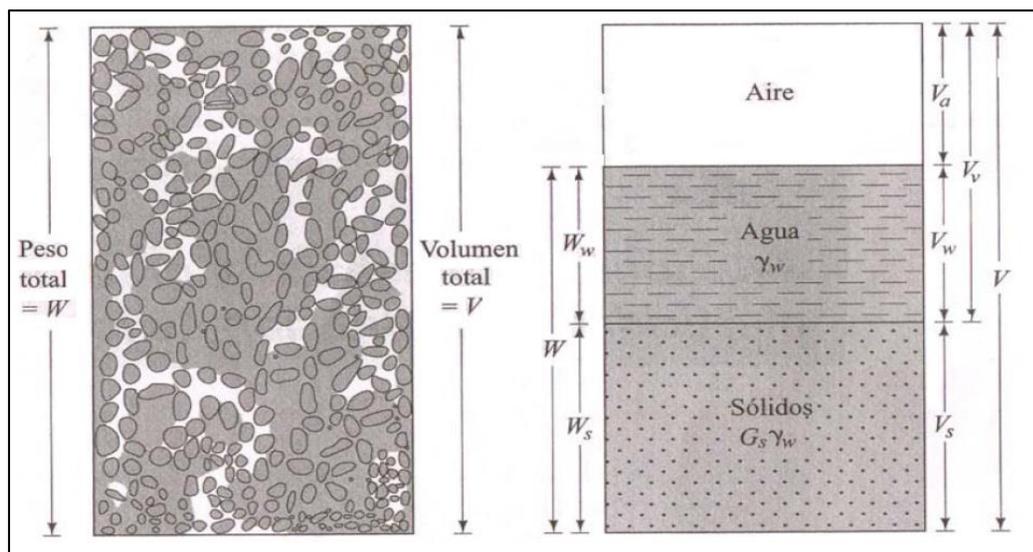
Fuente: <http://www.suelos/civileks.com>

- La segunda es retenida entre las partículas por las fuerzas capilares, las cuales, en función de la textura pueden ser mayores que la fuerza de la gravedad. Esta porción del agua no percola, pero puede ser utilizada por las plantas.
- Finalmente, el agua que excede al agua capilar, que en ocasiones puede llenar todos los espacios intersticiales en las capas superiores del suelo, con el tiempo percola y va a alimentar los acuíferos más profundos. Cuando todos los espacios intersticiales están llenos de agua, el suelo se dice saturado.

Gases

La fracción de gases está constituida fundamentalmente por los gases atmosféricos y tiene gran variabilidad en su composición, por el consumo de O_2 , y la producción de CO_2 dióxido de carbono. El primero siempre menos abundante que en el aire libre y el segundo más, como consecuencia del metabolismo respiratorio de los seres vivos del suelo, incluidas las raíces y los hongos. Otros gases comunes en suelos con mal drenaje son el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O).

Figura 2.6. Distribución de la estructura del suelo



En estado natural (izq.) y la representación de las tres fases del suelo (Der.)

Fuente: Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo

2.5.3. Tipos de suelos

De acuerdo con el origen de sus elementos, los suelos se dividen en dos amplios grupos: Suelos cuyo origen se debe a la descomposición física y/o química de las rocas, o sea los suelos inorgánicos, y suelos cuyo origen es principalmente orgánico.

Suelos Orgánicos, Estos se forman casi siempre in situ. Muchas veces la cantidad de materia orgánica, ya sea en forma de humus o de materia no descompuesta, o en un estado de descomposición, es tan alta con relación a la cantidad de suelo inorgánico que las propiedades que pudieran derivar de la porción mineral quedan eliminadas. Esto es muy común en las zonas pantanosas, en las cuales los restos de vegetación acuática llegan a formar verdaderos depósitos de gran espesor, conocidos con el nombre genérico de turbas. Se caracterizan por su color negro o café oscuro, por su poco peso cuando están secos y su gran compresibilidad y porosidad. La turba es el primer paso de la conversión de la materia vegetal en carbón.

Suelos inorgánicos, son el producto del intemperismo de las rocas permanece en el sitio donde se formó originalmente reciben el nombre de suelos residuales; en contraste

algunos de esos productos intemperizados pueden ser movidos del lugar de su formación dando origen a los suelos transportados.

Suelos residuales, estos suelos aparecen particularmente cuando los procesos químicos del intemperismo (que involucra diversos procesos naturales que resultan de la acción individual o combinada de factores tales como el viento, lluvia, heladas y cambios de temperatura), predominan sobre los físicos, lo que sucede en los terrenos llanos de las áreas tropicales. La composición de estos suelos es muy variable, con una gran diversidad tanto de tipos de minerales como de tamaños de partículas. En los climas calientes, el intemperismo puede eliminar algunos minerales, dejando otros más resistentes en depósitos concentrados.

En la siguiente tabla se muestra una lista del proceso de transformación que sufren algunos minerales componentes del granito:

Tabla 2.1. Intemperización del granito

Minerales existentes en las Rocas	Probables minerales Derivados	Posibles Suelos Resultantes
Cuarzo	Cuarzo	Arena
Muscovita	Muscovita	Arena Micácea
Mica Biotita	Clorita o Vermiculita+ Soluciones de Carbonato Mg	Arcilla oscura
Feldespatos Ortoclasa	Ilita o Caolinita + Soluciones de carbonato de K	Arcilla Clara
Feldespatos Plagioclasa	Montmorillonita + Solución de Carbonato de Na O Ca	Arcilla expansiva, Barro Calizo / Arcilla o Magra

Fuente: Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo

Suelos Transportados, son aquellos suelos que por medio de agentes físicos son redepositados en otros lugares, generando así los suelos sobreyacentes a otros estratos sin relación directa con ellos. Según el agente de transporte se subdividen en las siguientes categorías:

- Aluviales o fluviales: Son depositados por agua en movimiento, produciendo el arrastre de minerales de gran tamaño que se van depositando en forma graduada a lo largo de su curso, correspondiendo los materiales muy finamente granulados, a causa de las grandes presiones desarrolladas y de la abrasión producida por el movimiento de las masas de hielo.
- Glaciales; depositados por la acción glacial, estos están formados por suelos heterogéneos, que van desde grandes bloques, hasta materiales muy finamente granulados, a causa de las grandes presiones desarrolladas y de la abrasión producida por el movimiento de las masas de hielo.
- Eólicos; depositados por la acción del viento, el cual puede arrastrar partículas cuyo tamaño puede variar desde limos hasta arenas gruesas, dos tipos de suelos se pueden destacar dentro de esta categoría: El loess que es un depósito constituido por una mezcla uniforme de arenas finas y limos. Los Médano, son aglomeraciones de arena suelta arrastrada por el viento y que se vio detenida por algún obstáculo natural de la superficie del terreno.

Dentro del Área de la Ingeniería Civil, los nombres que son generalmente más usados son los siguientes:

Gravas

Estas son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y que tienen más de 4.75 milímetros de diámetro. Dado que el origen, cuando son acarreadas por las aguas las gravas sufren desgaste en sus aristas y son, por lo tanto, redondeadas. Como material suelto suele encontrarse en lechos, en los márgenes y en los conos de la deyección de los ríos y en muchos otros lugares a los cuales las gravas han sido, retransportadas.

Arenas

La arena es el nombre que se le da a los materiales de granos finos procedentes de la desfragmentación de las rocas o de su trituración artificial y cuyas partículas varían entre 4.75 y 0.075 milímetros, el origen y la existencia de las arenas es análoga a la de las gravas: las dos suelen encontrarse juntas en el mismo depósito. La arena de río contiene muy a menudo proporciones relativamente grandes de grava y arcilla.

Limos

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 en este último caso de características plásticas. El diámetro de sus partículas está comprendido entre 0.075 mm y 0.002 milímetros, su color varía desde gris claro a muy oscuro. La permeabilidad de los limos orgánicos es muy baja y su compresibilidad muy alta.

Arcillas

Se da el nombre de arcilla a las partículas sólidas con diámetro menor a 0.002 mm, son suelos que poseen cohesión, es decir, la propiedad de atracción intermolecular lo que hace que su masa tenga la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua.

2.6. Suelos expansivos

Un suelo expansivo puede definirse, como un tipo de suelo que se hincha y contrae causando daños, frecuentemente presenta un contenido coloidal alto, con valores de límite líquido, altos índices de plasticidad y de actividad.

Los suelos expansivos se caracterizan por estar constituidos de materiales finos sedimentarios heterogéneos. Existen zonas en donde los suelos son de alta plasticidad, muy expansivos, del orden de 35 % en volumen. Estos suelos se caracterizan por su comportamiento mecánico: contracción de la arcilla por secado, expansión de la arcilla al humedecerse, desarrollo de presiones cuando la arcilla se confina y no puede expandirse, disminución de la resistencia al corte y de la capacidad de soporte al

expandirse. Entre las consecuencias de construir en estas áreas están, entre otras, la aparición de fisuras verticales que nacen en la parte superior de las paredes, y van de arriba hacia abajo. Son más abiertas arriba que abajo y, generalmente o llegan a la línea de cimientos.

Por ello es muy importante antes de comenzar una construcción, hacer un buen estudio de suelos para conocer si existen o no este tipo de suelos.

La permeabilidad es muy baja salvo cuando el suelo esta fisurado y seco y el agua puede circular por las grietas abiertas.

2.6.1. La expansión de los suelos

La expansión de los suelos estará, en consecuencia, directamente relacionada con las propiedades microestructurales de las partículas arcillosas. Tendrá especial influencia la existencia en ellas de cargas electroestáticas netas, así como la magnitud de su superficie específica (forma aplanada, tamaño, etc.) o su capacidad de cambio catiónico, siendo estos tres factores directamente proporcionales al potencial de expansión que se pueda presentar.

2.6.2. Origen de los suelos expansivos

La expansión de un suelo se podrá consecuentemente asociar con la presencia de partículas arcillosas que puedan provocar esta expansión. Habitualmente se consideran tres minerales arcillosos, montmorillonita, illita y caolinita, que por su abundancia respecto a otros se pueden considerar básicos a efectos de estudiar este fenómeno.

La montmorillonita, es mucho más expansiva que la illita o la caolinita y está presente en prácticamente todos los suelos expansivos. Así lo confirman, por ejemplo, Collins et al. (1973) o Frydman y Samocha (1984) cuando describen los terrenos expansivos en Israel.

Uno de los factores que ocasionan los movimientos diferenciales de algunas cimentaciones, es el alto potencial expansivo que presentan los suelos arcillosos con un alto contenido de partículas finas, cuyo material predominante es la montmorillonita.

Este mineral generalmente se forma en las regiones donde se presentan malas condiciones de drenaje. Su efecto fundamental, es ocasionar en el suelo grandes cambios volumétricos, debido a que su volumen disminuye o aumenta con el cambio de humedad.

En ocasiones, sin embargo, es la illita, a su vez más expansiva que la caolinita, la que produce los hinchamientos. En la illita y la caolinita la expansión puede ser apreciable si las partículas son suficientemente pequeñas (del orden de décimas de micra), siendo poco significativos en otros casos (Mitchell, 1973).

Arnol (1984) o Schreiner (1987), citado por Josa (1988), exponen el origen de los minerales arcillosos expansivos en la naturaleza, centrándose fundamentalmente en los tres indicados anteriormente. En general la fuente de estos minerales es una amplia gama de rocas ígneas básicas incluyendo rocas volcánicas y lavas entre las que las más frecuentes son los basaltos, si bien en algún caso ha sido el granito el que se ha citado como origen. Aunque la montmorillonita y la caolinita pueden ser producidas a partir de las mismas rocas, la primera necesita un medio más alcalino como factor imprescindible y se genera habitualmente en zonas áridas con poco drenaje y en consecuencia con alta concentración de cationes y minerales.

La caolinita, por el contrario, se produce con pH más bajos y en zonas más drenadas y con menores concentraciones. Por esta razón la montmorillonita abundan más en valles y zonas deprimidas y la caolinita en lugares con mayores pendientes. La illita, por su parte, precisa para su formación de un pH ligeramente alcalino.

De acuerdo con este origen los suelos expansivos podrán ser residuales procedentes de rocas ígneas aunque procesos de transporte puedan modificarlos de su situación inicial ya sea antes o después de su degradación. En ambos casos ambientes fluviales o en aguas subterráneas, ricas en calcio, tenderán a producir arcillas con alta proporción de este elemento como ion de cambio, mientras que en ambientes marinos será el sodio el predominante.

2.6.3. Problema de los suelos expansivos

El problema que presentan los suelos expansivos es muy crítico, ya que no solamente quiebra las carreteras, sino que también raja casas, construcciones de todo tipo y pavimentos urbanos, en fin, son muchos los daños que ocasionan este tipo de suelo.

Figura 2.7. Problemas de los suelos expansivos



Fuente: <http://www.suelos/civileks.com>

Lo trágico de estos suelos, es que si no se toman las previsiones necesarias, una vez que el pavimento se deforma, el problema es irreversible, no hay forma de conservación ni mantenimiento, porque no se trata al problema de raíz. Desde su primer momento se debe proyectar que el suelo tenga un buen drenaje, y que el peso del paquete estructural del pavimento sea superior a la presión de expansión.

La incidencia del comportamiento de los materiales expansivos en los daños experimentados por las estructuras no fue identificada por los especialistas en el estudio de suelos y fundaciones como una de las causas fundamentales de esos daños, prácticamente hasta fines de 1930.

El tema ha interesado en forma creciente a los especialistas en suelos y construcciones. Estos suelos con arcillas expansivas están presentes en todas partes del mundo, cabe mencionar que en Estados Unidos según estudios realizados prueban que el daño causado a la propiedad por los suelos expansivos, resultan en un costo de billones de

dólares, más que el daño causado por temblores, huracanes y otros problemas de causa natural.

En Bolivia existen depósitos de suelos arcillosos expansivos sobre los cuales es necesario construir cualquier tipo de obra. A estos depósitos se los denomina activos por su gran capacidad de absorción de agua, lo cual genera grandes cambios volumétricos.

Esto produce en las estructuras un rápido deterioro, debido principalmente a la incapacidad de absorber tales deformaciones, generándose un sobre costo en reparación y mantenimiento.

Desde este punto de vista es necesario realizar unos análisis de los esfuerzos y deformación inducidos por los cambios de humedad en este tipo de suelo, ya que por los cambios de humedad se puede inducir expansión, contracción, generación de presiones de expansión si el movimiento es restringido y disminución de la resistencia al esfuerzo cortante y de la capacidad de carga.

2.6.4. Movimiento de los suelos expansivos

El comportamiento de los suelos expansivos en respuesta al cambio en su contenido de humedad puede ser de contracción o de expansión, tanto horizontalmente como verticalmente, siendo este último el que causa mayor daño en el diseño del terraplén.

Por sus características, los movimientos se los puede clasificar como deformaciones a largo plazo y estacionales. Se denominan deformaciones a largo plazo a aquellas que van evolucionando lentamente a medida que pasa el tiempo y son generalmente originadas por los efectos que la nueva construcción que altera el régimen constante de humedad del suelo. Movimientos estacionales se denominan a aquellos producidos por el cambio de humedad del suelo al cambiar el clima de un periodo de sequedad a un periodo lluvioso y viceversa, produciendo deformaciones periódicas en el suelo por lo que hay una redistribución constante de los esfuerzos en el diseño del terraplén y son relativamente más dañinos que los movimiento irreversibles.

La combinación de estos movimientos produce una gran variedad de patrones en la forma que adoptara la superficie del terreno, a pesar de que se producen generalmente en forma errática, adquieren configuraciones características que se presentan

- **En forma de domo.-** Se caracterizan por un incremento del volumen del suelo hacia la parte central del terraplén.
- **En forma cíclica.-** Cuando se alternan movimientos debidos a expansión y contracción del suelo por cambios de estaciones secas a húmedas, causando que la humedad del perímetro del terraplén cambie periódicamente.

2.6.5. Mecanismos que generan cambio volumétrico

La expansión es el resultado de cambios en el sistema agua – suelo, que distorsionan el equilibrio interno de esfuerzos. Los factores que influyen en el potencial de expansión o contracción del suelo pueden ser considerados en tres grupos:

- Las características del suelo, que influyen la naturaleza básica del campo de fuerzas interno.
- Los factores ambientales que influyen los cambios que pueden ocurrir en el sistema de interno.
- El estado de esfuerzos, que restringe el movimiento.

En la siguiente tabla se observan los principales factores que influyen en el potencial contracto – expansivo de suelos, entendiéndose aquí expansión como el hinchamiento o aumento de volumen con la humedad y contracción como la reducción de volumen.

Tabla 2.2. Factores que influyen en el potencial de expansión y contracción

Factor	Descripción
Mineralogía de la arcilla	Los minerales de arcilla que son la causa de los cambios de humedad son, las mormorillonitas y las versiculitas, frecuentemente no son expansivas, pero pueden causar cambios de volumen si sus partículas son extremadamente finas
Química del agua del suelo	Se presenta menor expansión para elevada concentración de cationes e incremento en la valencia de los cationes

Succión del suelo	La succión del suelo es una variable dependiente del estado de esfuerzos efectivos, representado por la presión de poros negativa en suelos no saturados. La succión del suelo se relaciona con la gravedad, la saturación, forma y tamaño de poros, tensión superficial y con las características químicas y eléctricas de las partículas de suelo y agua
Plasticidad	En general los suelos que exhiben un comportamiento plástico dentro de un amplio rango de humedades y tienen líquido alto, tienen gran potencial de expansión y contracción. La plasticidad es un indicador del potencial de expansión
Fabrica y estructura del suelo	Arcillas de estructura flocculenta tienden a ser más expansivas que las de estructura dispersa. Partículas cementadas reducen la expansión. La fábrica y la estructura son alteradas por compactación a altos contenidos de humedad o remoldeo. Se ha determinado que la compactación por amasado crea estructura dispersa con menor potencial de expansión que los suelos compactados estáticamente a bajas humedades
Peso Unitario Seco	Usualmente los altos pesos unitarios indican un espacio interparticular cerrado, con elevadas fuerzas de repulsión entre partículas y gran potencial de expansión.
Condición de humedad inicial	Un suelo expansivo tiene alta succión o afinidad por el agua, cuando está en estado seco y baja cuando está en estado húmedo. Contrariamente, un suelo húmedo pierde agua más rápidamente al exponerlo a secado y se contrae más que uno que este inicialmente seco.
Variaciones de humedad	Cambios de humedad en la zona activa, cerca de la superficie, generan la expansión del suelo.
clima	La cantidad y variación de precipitación y evapotranspiración determinan la variación de humedad con la profundidad y la fluctuación de humedades en cada estación.
Agua subterránea	El nivel freático poco profundo mantiene húmedo el suelo en la zona activa.
Drenaje y cursos de aguas superficiales	Encharcamientos, escapes en redes de drenaje, pueden incrementar la humedad del suelo.
Vegetación	Árboles, arbustos, reducen la humedad del suelo a través de la transpiración y causan en el suelo diferenciales de humedad con la variación de vegetación.
permeabilidad	Suelos con altas permeabilidades, particularmente debido a fisuras y fracturas en el perfil de la masa de suelo producen una rápida migración de agua y promueven rápidos cambios de expansión.
temperatura	Incrementos de temperatura causan diferenciales en la humedad entre el suelo bajo las construcciones y pavimento, con aquel que no se encuentra cubierto.
Condiciones de esfuerzos (historia de esfuerzos)	Un suelo sobreconsolidado es más expansivo, que el mismo suelo con la misma relación de vacíos, pero normalmente consolidado. La presión de expansión puede incrementarse en una arcilla compactada al transcurrir grandes periodos de tiempo, pero la cantidad de expansión no se ve afectada con el tiempo.
Cargas	La magnitud de la sobrecarga determina la cantidad de cambio de volumen que puede ocurrir, para un contenido de humedad y densidad dadas. Las cargas externas aplicadas, ayudan a balancear las fuerzas de repulsión interparticular reduciendo la expansión.
Perfil del suelo	Los espesores y ubicación de las capas potencialmente expansivas dentro del perfil estratigráfico, influyen en el potencial expansivo. Los grandes movimientos se presentan solo en aquellos estratos con arcillas expansivas ubicadas dentro de la zona activa.

Fuente: Barreño & Rodríguez (1999)

2.6.6. Cómo identificar un suelo potencialmente expansivo

Las formas principales de identificación de un suelo potencialmente expansivo son:

- a) Identificación Mineralógica
- b) Determinación de ciertas propiedades básicas de los suelos
- c) Métodos indirectos de determinación del potencial expansivo del suelo
- d) Medidas directas de la expansión del suelo

a) Identificación mineralógica

- Difracción por rayos X
- Análisis Térmico Diferencial
- Análisis de absorción de colorantes
- Análisis químicos
- Análisis por microscopio electrónico

Los tres grupos más importantes en que se clasifican los minerales arcillosos son: illita, caolinita y montmorillonita, compuestos por hidroaluminosilicatos. Los ensayos mineralógicos tienden a detectar la presencia de montmorillonita, que es el mineral preponderantemente expansivo.

La presencia de cargas eléctricas negativas en la superficie de los minerales arcillosos, así como la capacidad de intercambio catiónico resultan fundamentales para la magnitud de la expansión.

Los ensayos de identificación mineralógica resultan muy usados en trabajos de investigación científica, pero resultan poco prácticos y antieconómicos para la práctica usual en ingeniería, dado que se requiere equipamiento y personal especializado. Es por este motivo que no se extiende en su desarrollo.

b) Determinación de ciertas propiedades básicas de los suelos

A través de la medida de ciertas propiedades básicas y sencillas de los suelos se puede determinar el grado del potencial expansivo del suelo.

Las propiedades a determinar son:

- Límite líquido y Límite Plástico
- Límite de contracción
- Contenido de coloides
- Expansión libre del suelo

Estos métodos tienen la ventaja de su fácil realización y de equipamiento disponible en todos los laboratorios. La desventaja es que no se cuantifica la expansión, sino que cualitativamente se establecen categorías de grados del potencial expansivo.

- **Límite Líquido y Límite Plástico**

Investigadores como Seed, Woodward y Lundgren demostraron que las características plásticas de los suelos pueden ser usados como un indicador primario de la características expansivas de las arcillas.

Es natural pensar en una relación como la antes mencionada ya que ambas dependen en la cantidad de agua que una arcilla absorbe.

La relación entre las características plásticas y el hinchamiento de los suelos puede establecerse como indica la siguiente tabla.

Tabla 2.3. Determinación de suelo expansivo

Grado de potencial expansivo	Índice plástico
Bajo	0 - 15
Medio	10 - 35
Alto	20 - 55
Muy alto	> 35

Fuente: Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo

Si bien es cierto que todos los suelos altamente expansivos tienen plasticidades altas, no es cierto que los suelos con elevada plasticidad sean necesariamente expansivos.

- **Contenido de Coloides**

Dentro de los materiales que tiene un tamaño inferior a 74 micras están los limos y las arcillas. Desde el punto de vista del tamaño se considera arcillas aquellos materiales que tienen un tamaño inferior a 2 micras (0.002 mm), siendo necesario para su determinación la realización de un ensayo hidrométrico.

La magnitud de la expansión que experimenta una arcilla está vinculada con la cantidad de partículas de tamaño arcilla presente en el suelo.

Se ha establecido una relación del tipo:

$$S = K * C^x$$

Dónde:

S = Hinchamiento potencial, expresado como % del hinchamiento de una muestra compactada a la humedad óptima y al P.U.S.M. según Proctor Estándar.

C = Porcentaje de fracción arcilla (partículas menores a 0.002 mm).

x = Exponente que depende del tipo de arcilla

k = Coeficiente que depende del tipo de arcilla.

x y k, que indican el tipo de partículas coloidales presentes se determinan a través de ensayos difracción por rayos X.

- **Determinación de la expansión libre**

Este ensayo consiste en colocar en una probeta normalmente cilíndrica un volumen conocido de suelo “seco” y sumergirlo en agua sin aplicación de sobrecarga alguna, mientras se mide la expansión. La diferencia entre el volumen final e inicial, expresado como un porcentaje del volumen inicial es la expansión libre.

Esta medida de la expansión se realiza en condiciones muy desfavorables, ya que se hace en condiciones de ninguna sobrecarga y hoy en día se utilizan métodos más adecuados a tales efectos. Experimentos realizados por Holtz indican que una arcilla como la bentonita comercial puede tener en este ensayo expansión del orden de 1200 a 2000 %. Holtz sugiere que las expansiones medidas en este ensayo por encima del 100

% pueden causar daños significativos a la estructura, mientras que suelos que alcanzan una expansión por debajo del 50 %, rara vez experimentan cambios de volúmenes apreciables bajo la aplicación de cargas estructurales, aun cuando estas sean provenientes de estructuras livianas.

c) Métodos indirectos de determinación del potencial expansivo del suelo

Estos métodos consisten en predecir el potencial expansivo del suelo de una forma cualitativa, en base a medidas directas de la expansión del suelo sobre muestras remoldeadas compactadas en condiciones prefijadas de humedad y densidad.

Los métodos más utilizados son el de “Ladd y Lambe” auspiciado por la Federal Housing Administration y el método de “PVC” o método de la medida del cambio volumétrico.

d) Medidas directas de la expansión del suelo

Estos métodos consisten en medir la expansión del suelo al saturarlo bajo diferentes condiciones de carga, graficándose las variaciones de hinchamiento para diferentes presiones aplicadas.

Es universalmente aceptado que los dos parámetros que definen el potencial de hinchamiento son:

- **Presión de hinchamiento (P_s).** Definida como la presión aplicada en laboratorio sobre una muestra de suelo expansivo para que, una vez en contacto con agua, la probeta mantenga constante su volumen inicial, es decir que la variación de volumen sea nula.
- **Hinchamiento libre (H_c).** Definido como el % de la elevación máxima para presión nula en relación a la longitud inicial de la probeta.

Si bien estos métodos constituyen el procedimiento más adecuado para predecir la expansión del suelo, además de las dificultades señaladas, tienen el inconveniente de requerir un equipamiento bastante completo (celdas de cargas, pesas, etc.), no disponibles en los laboratorios de uso común en ingeniería.

2.6.7. Exploración de los suelos expansivos

Se recomienda realizar un reconocimiento previo de la zona donde se pretende realizar la construcción del terraplén en subrasante expansivas, para obtener información para el diseño y buen funcionamiento.

En esta inspección también es muy útil y necesario recabar información de los antecedentes del terreno tales como la presencia anterior de bosques o zonas de vegetación espesa, estanques, lagunas, depresiones, antiguos recorridos de agua, canales de riego, etc. Las zonas boscosas o con mucha vegetación tienden a disminuir la humedad del suelo, por lo tanto en las áreas donde efectuaron talas o desmontes se incrementa el contenido de humedad del suelo.

Las zonas donde había estanque o depresiones suelen ser rellenados con material sedimentario, probablemente arcillas expansivas.

2.6.7.1. Exploración superficial

Para el reconocimiento visual se deberá prestar mucha atención a los siguientes factores.

- La presencia de árboles o vegetación espesa que hayan sido talados recientemente o serán talados para la construcción, generaran inestabilidad en la humedad del terreno.
- La presencia de zonas pantanosas o de estanques en las inmediaciones son sinónimo de presencia de suelos altamente plásticos con tendencia a hincharse. Además de estos factores, el tipo de inspección que se realizara depende en gran medida de si la zona esta urbanizada o no.

2.6.8. Determinación del potencial de expansión

El potencial de expansión de un suelo puede determinarse mediante los límites de Atterberg y la succión natural del suelo, Usando estas propiedades índices y con la ayuda de la Tabla No. 2.4, se puede determinar cualitativamente el potencial expansivo del suelo.

Tabla 2.4. Tabla del grado de expansión

Grado de Expansión	LL %	IP %	τ nat (Ton/pie²)
Elevado	>60	>35	>4
Marginal	50 - 60	25 - 35	1.5 - 4
Bajo	<50	<25	<1.5

Fuente: Determinación de suelos expansivos I.N.V. E – 132

Tabla 2.5. Tabla del grado de potencial expansivo

Grado de potencial expansivo	Índice plástico
Bajo	0 - 15
Medio	10 - 35
Alto	20 - 55
Muy alto	>35

Fuente: Ings. Julio Patrone y José Enrique Prefum.

Puede también definirse el Potencial de cambio volumétrico (PCV), a partir del Índice de Plasticidad y del Límite de Contracción, de acuerdo con los valores de la Tabla No. 10 según Holts y Gibs (1956).

Tabla 2.6. Potencial de cambio volumétrico

PCV	IP		Límite de contracción
	Zona seca	Zona húmeda	
Bajo	0 - 15	0 - 30	>12
Moderado	15 - 30	30 - 50	10 - 12
Alto	>30	>50	<10

Fuente: Ings. Julio Patrone y José Enrique Prefum.

2.7. Análisis mecánico de los suelos

El análisis mecánico del suelo es la determinación del rango del tamaño de partículas presentes en un suelo, expresado como un porcentaje de peso seco total. Se usan generalmente dos métodos para encontrar la distribución del tamaño de las partículas del suelo.

Tenemos el análisis por cribado, para tamaños de partículas mayores de 0.075 mm de diámetro, y el análisis por hidrómetro, que se utiliza para partículas menores a 0.075 mm de diámetro.

2.8. Compactación de suelos

En la construcción de terraplenes para carreteras, presas de tierra y muchas otras estructuras de ingeniería, los suelos deben ser compactados para incrementar sus pesos específicos. La compactación incrementa las características de resistencia de los suelos, aumentando así la capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellas. La compactación disminuye también la cantidad de asentamientos indeseables de las estructuras e incrementa la estabilidad de los taludes de los terraplenes. Los rodillos de ruedas lisas, los rodillos patas de cabra, los rodillos con neumáticos de hule y los rodillos vibratorios son usados generalmente en el campo para la compactación de los suelos.

2.8.1. Principios generales de compactación

Para que la carretera ofrezca al usuario unas condiciones de rodadura adecuadas y de carácter permanente, debe ser construida de forma que alcance estabilidad volumétrica y resistencia frente a las acciones:

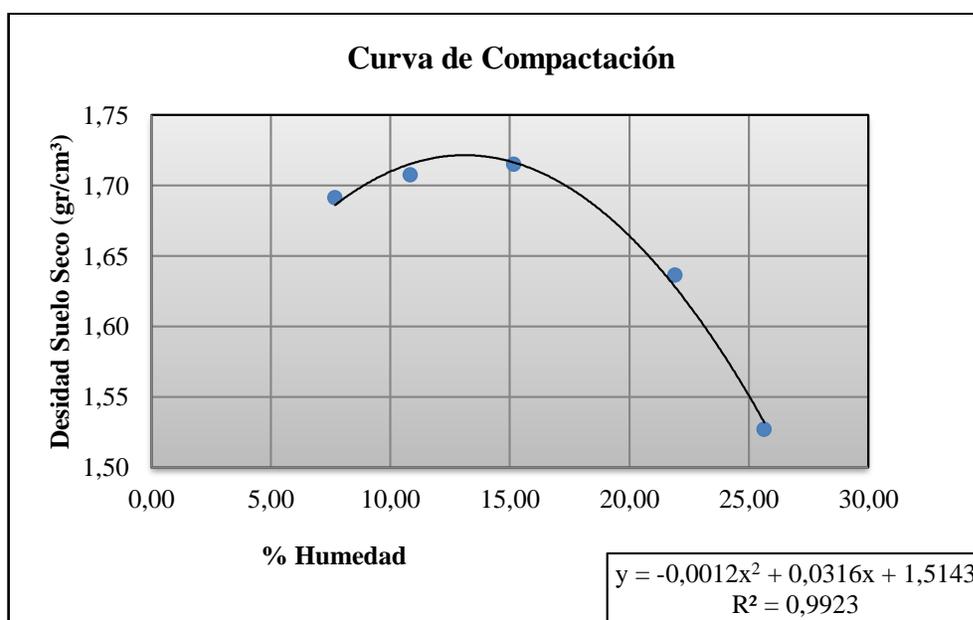
- Las cargas de tráfico
- Peso propio del firme
- El agua infiltrada provocada por la variación de la humedad a lo largo del tiempo.

Para lograr la estabilidad volumétrica se adopta de forma generalizada, debido a su reducido costo y gran efectividad, “la compactación”, que se constituye en un tratamiento eficaz que mejora los suelos para que resistan las solicitaciones indicadas anteriormente, con deformaciones permanentemente admisibles.

Cuando el suelo va a usarse como material de terraplén o de subrasante en la construcción de carreteras, es esencial que el material se coloque en capas uniformes y se compacte hasta una alta densidad. La compactación adecuada del suelo va a reducir hasta un mínimo el asentamiento y cambios volumétricos subsecuentes amplificando con ello la resistencia del terraplén o de la subrasante.

La resistencia del suelo compactado se relaciona directamente con la densidad máxima en seco que se alcanza mediante la compactación. La relación entre la densidad en seco y el contenido de humedad, para prácticamente todos los suelos, adopta la forma mostrada en la siguiente figura:

Figura 2.8. Curva de compactación



Fuente: Elaboración propia

Puede verse en esta relación, que para un esfuerzo de compactación dado, la densidad en seco que se alcanza es baja para contenidos de humedad bajos. La densidad en seco aumenta al aumentar el contenido de humedad óptimo. Un incremento adicional del contenido de humedad conduce a una disminución de la densidad en seco alcanzada. Este fenómeno se debe al efecto de la humedad en las partículas de suelo. Para un

contenido de humedad bajo, las partículas de suelo no están lubricadas, y la fricción entre partículas adyacentes evita la densificación de las partículas.

A medida que aumenta el contenido de humedad, se desarrolla una película de agua más grande sobre las partículas, haciendo que el suelo se haga más plástico y que sea más fácil para las partículas moverse y densificarse. Sin embargo, cuando se alcanza el contenido de humedad óptimo, se obtiene el máximo grado práctico de saturación.

El grado de saturación para el contenido de humedad óptimo no puede incrementarse con la compactación adicional debido a la presencia de aire atrapado en los espacios vacíos y alrededor de las partículas. Por lo que con la adición de mayor humedad resulta en que los vacíos se saturen con agua, sin que le acompañe una reducción del aire. Las partículas del suelo son separadas y se produce una reducción de la densidad en seco.

2.8.2. Contenido de humedad

La determinación del contenido de humedad óptimo de cualquier suelo, que se va usar como material para terraplén o subrasante, es necesario antes comenzar cualquier trabajo de campo. Actualmente la mayoría de las dependencias de carreteras usan pruebas dinámicas o de impacto para determinar el contenido de humedad óptimo y la densidad en seco máxima. En cada una de estas pruebas, las muestras de suelo que van a ensayarse se compactan por capas hasta llenar un molde tamaño específico.

2.8.3. Energía de compactación

El esfuerzo o energía de compactación se obtiene dejando caer un martillo, de peso y de dimensiones conocidos, desde una altura conocida, un número específico de veces para cada capa, el número de capas y el volumen del molde también son datos que se conocen.

$$E = \frac{\left(\begin{array}{c} \text{numero de golpes} \\ \text{por capa} \end{array} \right) * \left(\begin{array}{c} \text{numero} \\ \text{de capas} \end{array} \right) * \left(\begin{array}{c} \text{peso} \\ \text{del} \\ \text{martillo} \end{array} \right) * \left(\begin{array}{c} \text{altura} \\ \text{caida} \\ \text{del martillo} \end{array} \right)}{\text{Volumen del molde}}$$

Dónde:

E = Energía de compactación por volumen unitario

Entonces se obtiene el contenido de humedad del material compactado y se determina la densidad en seco a partir del peso medido del suelo compactado y del volumen conocido del molde. Luego el suelo es extraído o se obtiene otra muestra del mismo suelo. Posteriormente se aumenta el contenido de humedad y se repite la prueba. El proceso se repite hasta que se observa la reducción de la densidad, generalmente se requiere un mínimo de cuatro o cinco ensayos individuales de compactación. Después se traza una gráfica de la densidad en seco contra el contenido de humedad óptimo. Los dos tipos de ensayos que se usan comúnmente son la prueba estándar AASHTO designada como T-99, y la prueba modificada AASHTO designada como T-180.

2.8.4. Prueba de próctor modificado

Con el desarrollo de rodillos pesados de compactación, la prueba de Próctor estándar fue modificada para representar mejor las condiciones en campo. A esto se la llamo prueba de Próctor modificada (Prueba T-180 de AASHTO). Para llevar a cabo la prueba de Próctor modificada se usa el mismo molde con un volumen de 943 cm³, como en el caso de prueba Próctor estándar. Sin embargo, el suelo es compactado en cinco capas por un pistón que pesa 10 libras. La caída del martillo es de 18 pulgadas (457,2 mm). El número de golpes del martillo por capa es de 25 como en el caso de la prueba Próctor estándar. El equipo de compactación utilizado en la prueba Próctor Modificada para el método "A" es T-180 de la norma AASHTO.

CAPÍTULO III

DETERMINACIÓN DE LA

COMPACTACIÓN

AUTOMÁTICA Y LA

COMPACTACIÓN T-180

CAPÍTULO III

DETERMINACIÓN DE LA COMPACTACIÓN AUTOMÁTICA Y COMPACTACIÓN T-180

3.1. Ubicación geográfica del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la capital del departamento de Tarija-Bolivia, provincia Cercado, la misma desarrollada a orillas del Guadalquivir, se encuentra emplazada en la parte central del departamento de Tarija, como podemos ver en la siguiente figura.

**Figura 3.1. Ubicación del área de estudio en la provincia Cercado del
Departamento de Tarija**



Fuente: Atlas Geográfico.

3.2. Ubicación del banco de material

El banco de préstamo de material se encuentra ubicada en la comunidad de Turumayo en la capital del departamento de Tarija - Bolivia, provincia Cercado, la misma desarrollada a orillas del Guadalquivir.

a) Suelos granulares

Figura 3.2. Banco de material del suelo grueso



Fuente: Elaboración propia

b) Suelos finos

Figura 3.3. Banco de material del suelo fino



Fuente: Elaboración propia

3.3. Extracción de muestras del banco de material

a) Suelos granulares

Las muestras de suelos a utilizarse para el estudio del proyecto se las obtuvo del banco de la comunidad de Turumayo, ubicada en el departamento de Tarija provincia Cercado.

Figura 3.4. Extracción del material del banco



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.5. Extracción del material del banco



Fuente: Elaboración propia

b) Suelos finos**Figura 3.6. Extracción del material del banco**

Fuente: Elaboración propia

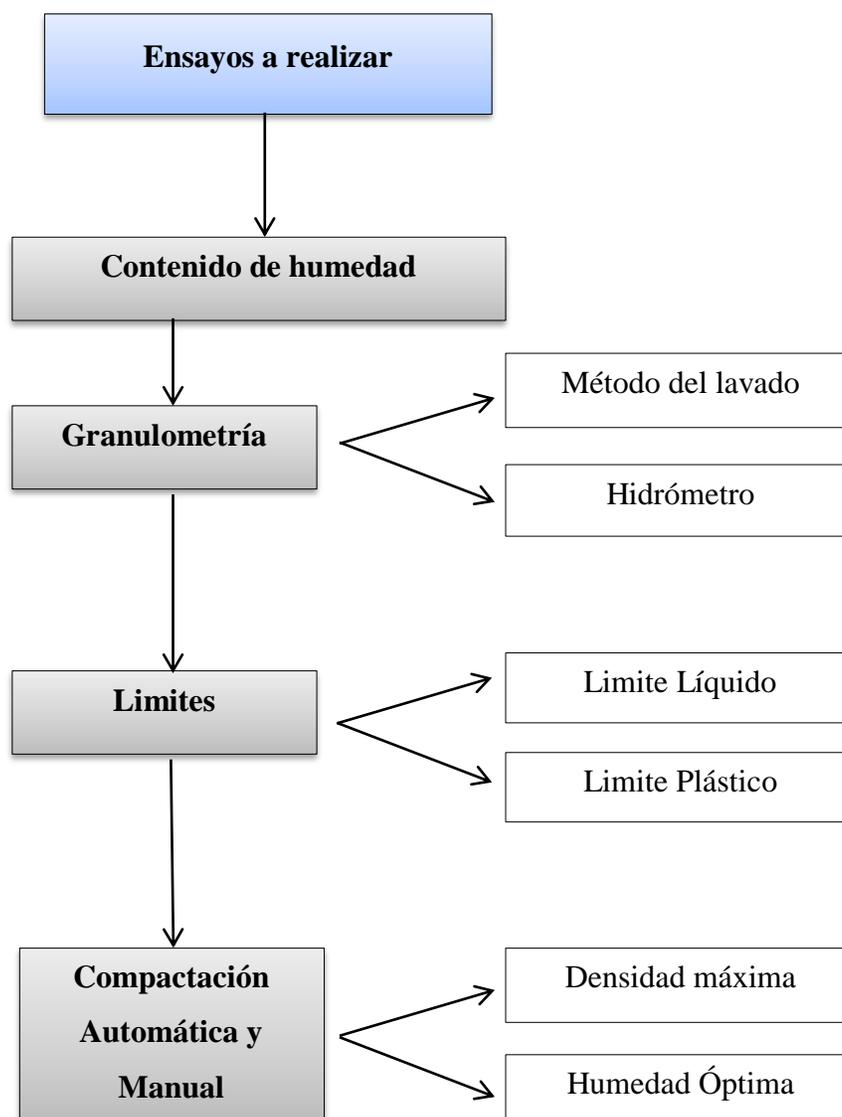
Figura 3.7. Extracción del material del banco

Fuente: Elaboración propia

3.4. Criterios aplicados a la compactación automática y manual

El estudio de los materiales se realiza de acuerdo con los ensayos mostrados en el siguiente esquema, las normas y parámetros establecidos en el laboratorio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Gráfico 3.1. Ensayos a realizar



Fuente: Elaboración propia

3.4.1. Caracterización de muestras de banco de suelos granulares y finos

Para caracterizar el material de banco y determinar sus propiedades físico-mecánicas de la muestra extraída, es necesario realizar diferentes ensayos de laboratorio, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3.1. Ensayos a realizar para la clasificar la muestra de banco

Propiedad analizada	Tipo de ensayo o prueba	Norma o especificación
Granulometría	Método del cribado	ASTM D1140-56
Plasticidad	Ensayo de límite líquido	ASTM D423-66
	Ensayo de límite plástico e IP	ASTM D424-59
Clasificación	-	Según el sistema AASHTO

Fuente: Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo

- **Granulometría**

Dentro del análisis de los suelos, se encuentra el de la granulometría, que no es más que obtener la distribución porcentual de los tamaños de partículas que conforma un suelo. Esto se realiza con ayuda de un juego de mallas, que tienen un tamaño graduado establecido por las normas ASTM y A.A.S.H.T.O. en donde se obtienen los pesos retenidos para luego realizar posteriores cálculos y la curva granulométrica. El factor fundamental de estos ensayos será el de obtener la curva granulométrica, de cada una de las muestras en estudio dibujadas en escala logarítmica.

Análisis por cribado

Este análisis por cribado consiste en sacudir la muestra de suelo a través de un conjunto de tamices que tienen diferentes aberturas progresivamente más pequeñas, los números de las mallas estándar con sus tamaños de aberturas son las siguientes.

Tabla 3.2. Tamaños de las mallas según la norma A.S.T.M

Tamiz	Abertura (mm)
2"	50.8
1 ½"	38.10
1"	25.4
¾"	19
½"	12.5
3/8"	9.5
N°4	4.75
N°10	2
N°40	0.0425
N°200	0.075

Fuente: Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo

Primero debemos secar el suelo al horno y luego todos los grumos se disgregan en partículas pequeñas, antes de ser pesados por las mallas, pasamos luego a colocar los tamices con la muestra en el vibrador, después de que este periodo termine se determina la masa del suelo retenido en cada malla.

Cuando tenemos suelos cohesivos, resulta difícil disgregar los grumos en partículas individuales. En tal caso se mezcla con agua para formar una lechada que luego se lava a través de las mallas. Las porciones retenidas en cada malla se recolectan por separado y se secan en horno antes de que la amasa retenida en cada malla sea determinada.

Figura 3.8. Juego de tamices y vibrador para el análisis por cribado



Fuente: <http://www.suelos-ensayos/civileks.com>

Análisis hidrométrico

Este método está basado en el principio de la sedimentación de granos de suelo y agua, cuyo tamaño de las partículas es menor a 0.075 mm de diámetro, cuando un espécimen de suelo se dispersa en agua, las partículas se asientan a diferentes velocidades, dependiendo de sus formas, tamaños y pesos, por simplicidad, se supone que todas las partículas de suelo son esferas y que la velocidad de las partículas se expresa por la ley de Stokes, según la cual:

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\mu} D^2$$

Dónde:

v = Velocidad

ρ_s = Densidad de las partículas de suelo.

ρ_w = Densidad del agua.

D = Diámetro de las partículas del suelo.

Dado que la densidad del agua es igual a 1 gr/cm³ podemos decir que:

$$D(mm) = K * \sqrt{\frac{L (cm)}{t (min)}}$$

Dónde:

$$K = \sqrt{\frac{30 \mu}{(G_s - 1)}}$$

Donde el valor de K está en función de μ y G_s , que son dependientes de la temperatura de prueba.

En el laboratorio, esta prueba se conduce en una probeta de sedimentación con muestra secada al horno de aproximadamente 80 gramos. La probeta está marcada para un volumen de 1000 ml, como agente dispersador se usa generalmente sulfato de sodio. El volumen de la suspensión de suelo dispersado se lleva hasta los 1000 ml añadiendo agua destilada.

Cuando se coloca el hidrómetro en la suspensión de suelo (figura N°9) en el tiempo t, medido desde el principio de la sedimentación, mide la densidad de los sólidos a una profundidad L. la densidad de sólidos es una función de la cantidad de partículas de suelo presentes por volumen unitario de suspensión en esa profundidad. En un tiempo t, las partículas de suelo en suspensión a una profundidad L tendrán un diámetro menor que D, calculado, las partículas grandes se abran asentado más allá de la zona de medición.

Los hidrómetros están diseñados para dar la cantidad de suelo, en gramos, aun en suspensión. Ya conocidos la cantidad de peso en suspensión, L y t, podemos calcular el porcentaje de suelo más fino que un cierto diámetro. Note que L es una profundidad medida desde la superficie del agua hasta el centro de gravedad del bulbo del hidrómetro donde se mide la densidad en suspensión.

Figura 3.9. Hidrómetro

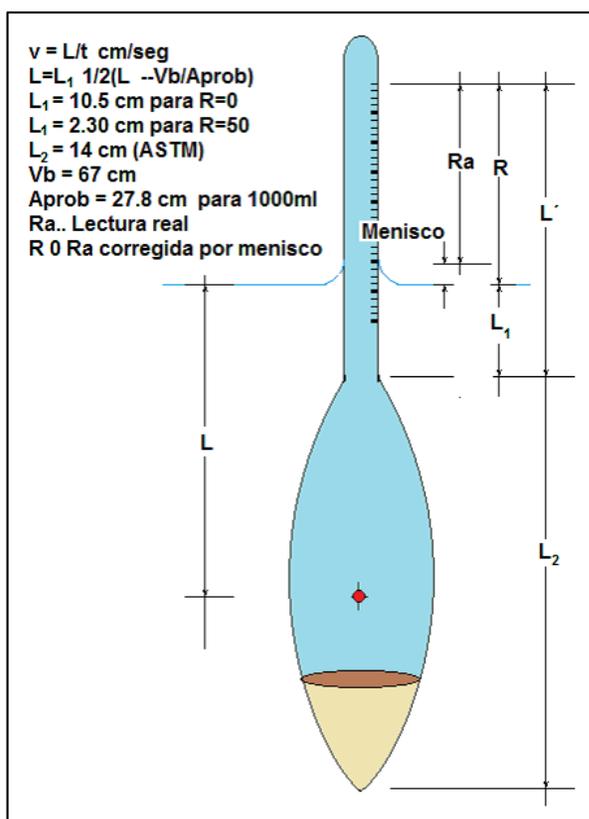
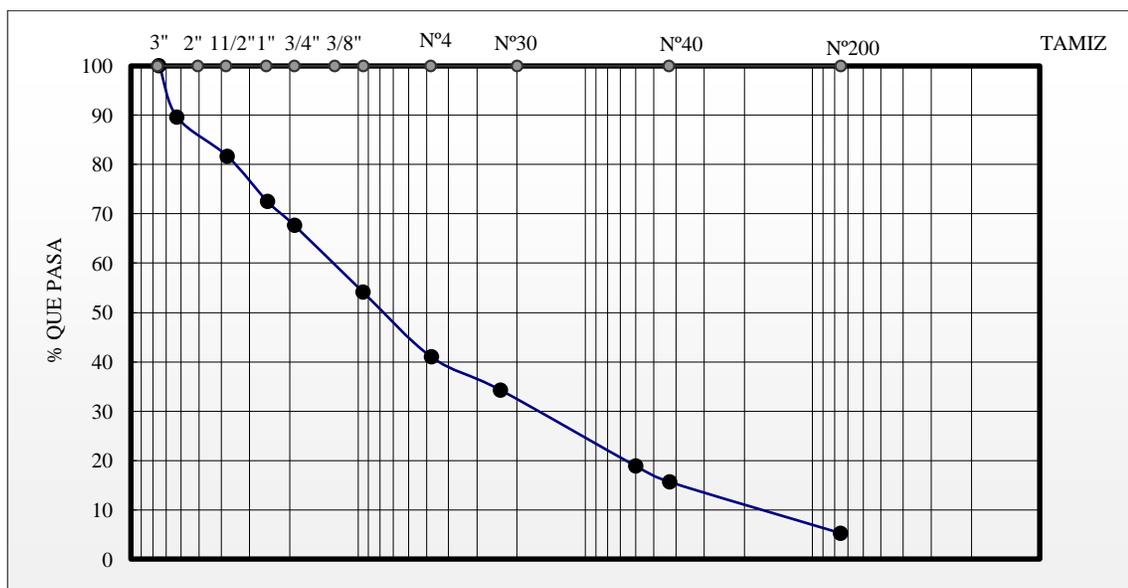
Fuente: <http://www.suelos-ensayos/civileks.com>

Gráfico 3.2. Curva granulométrica que presenta el material de banco



Fuente: Elaboración propia

- **Límites de Atterberg**

Los límites de consistencia de un suelo, están representados por contenidos de humedad. Los principales se conocen con los nombres de: límite líquido, límite plástico y límite de retracción.

Límite líquido

“Límite líquido es el contenido de humedad que corresponde al límite arbitrario entre los estados de consistencia líquido y plástico de un suelo”.

El límite líquido se define por la humedad cuando con 25 golpes ligeros contra una placa de goma dura de una vasija especial, se cierra el surco de sección trapecial que se había abierto en la masa húmeda de suelo colocada en dicha vasija.

El límite líquido de un suelo da una idea de su resistencia al corte cuando tiene un determinado contenido de humedad. Un suelo cuyo contenido de humedad sea aproximadamente igual o mayor a su límite líquido, tendrá una resistencia al corte prácticamente nulo.

Los materiales granulares (arena, limo) tienen límites líquidos bajos (25% a 35% aproximadamente), y las arcillas, límites líquidos altos (mayores del 40%).

Límite plástico

Por plasticidad se entiende la propiedad que tiene el suelo de deformarse sin romperse. El límite plástico (L_p), es el contenido de humedad que tiene un suelo en el momento de pasar del estado plástico al semi-sólido. Se ha convenido en que esta humedad sea la que permita amasar un suelo, a mano, en cilindros de 3 milímetros de diámetro, aproximadamente, sin que presente signo de ruptura.

El límite plástico se define por la humedad del suelo amasado cuando empieza a separarse y desmoronarse al enrollarse a mano para formar bastoncillos de 3 mm de diámetro.

El límite plástico, L_p está definido como el contenido de humedad que tiene un suelo, cuando empieza a resquebrajarse al amasarlo en cilindros de 3 mm de diámetro aproximadamente.

Las arenas no tienen plasticidad. Los limos la tienen, pero muy poca; en cambio, las arcillas, y sobre todo aquellas ricas en materia coloidal, son muy plásticas.

Índice de plasticidad

Se ha generalizado mucho el uso del índice de plasticidad (I_p), que no es sino el valor numérico de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, o sea:

$$I_p = L_l - L_p$$

Un índice de plasticidad elevado, indica mayor plasticidad. Cuando un material no tiene plasticidad (arena por ejemplo), se considera el índice de plasticidad como cero y se indica: $I_p = NP$ (no plástico).

Figura 3.10. Límite líquido



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11. Límite plástico



Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Clasificación de los suelos método AASHTO

Ha sido en Estados Unidos donde se han desarrollado la mayor parte de clasificaciones empíricas de suelos. Una de las más populares en carreteras es la empleada por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), y que fue originalmente desarrollada por los ilustres geotécnicos Terzaghi y Hogentogler para el Bureau of Public Roads Norteamericano.

Un enfoque general, se basa en que esta clasificación toma de mano la granulometría y la plasticidad de un suelo como las características principales para poder definir asociaciones que obedecen a rangos empíricos de clasificación.

En esta clasificación los suelos se dividen en siete grupos, de acuerdo a la composición granulométrica, el límite líquido y el índice de plasticidad de un suelo. El índice de grupo es más una evaluación de cada grupo, que se calcula mediante una fórmula empírica.

- **Material granular con el 35% o menos del total que pasa el tamiz N°200**

Grupo A-1: Son mezclas bien graduadas, compuestas por piedra, grava, arena y poco o casi nada de material fino, (denominado material ligante).

Subgrupo A-1-a: Es bien graduado, predomina la piedra y grava, casi no tiene ligante.

Subgrupo A-1-b: Es bien graduado, predomina las arenas gruesas, casi no tiene ligante.

Estos materiales generalmente se encuentran en ríos y quebradas.

Grupo A-2: Contiene menos del 35% del material fino.

Subgrupo A-2-4 y A-2-5: El contenido de material fino es menor o igual al 35%, la fracción que pasa el tamiz N° 40, se comporta igual a los grupos A – 4 y A –5 respectivamente.

Son gravas y arenas gruesas, que contienen limo y arcilla en cantidades reducidas cuya plasticidad es baja, pero que excede al grupo A-1, también incluye la arena fina con limos no plásticos que se describirán en el grupo A-3.

Subgrupo A-2-6 y A-2-7: la única diferencia de los anteriores, es que la fracción que pasa el tamiz N°40, que se comporta en plasticidad igual a los grupos A-5 y A-7.

Grupo A-3: Son arenas finas conteniendo limos no plásticos, algunas veces pueden contener poca grava y arena gruesa.

- **Material limo arcilloso, más del 35% del total pasa el tamiz N°200**

Grupo A-4: Son suelos limosos, poco o nada plásticos, puede contener más de un 75% del material que pasa el tamiz N°200.

Grupo A-5: Son similares al anterior, pero contiene un material micáceo, que hace que el límite líquido a veces sean elevados, además de aparecer una propiedad elástica rara en los suelos.

Grupo A-6: predomina la arcilla, más del 75% del material pasa el tamiz N°200, este suelo suele contener pequeños porcentajes de arena fina y limo cuyas características son absorbidas por el gran porcentaje de arcilla.

Grupo A-7: Se parecen mucho al grupo A-6. Pero estos tienen propiedades elásticas, además del límite líquido casi siempre es elevado.

Subgrupo A-7-5: Sus índices de plasticidad no son muy altos con respecto a sus límites líquidos.

Subgrupo A-7-6: Sus índices de plasticidad son muy elevados con respecto a sus límites líquidos, además presentan grandes cambios de volumen entre sus estados secos y húmedos.

Para una mejor comprensión se presenta la siguiente tabla para la clasificación AASHTO.

Tabla 3.3. Clasificación según AASHTO

CLASIFICACIÓN AASHTO											
Clasificación general	Materiales granulares (igual o menor al 35 % pasa el tamiz nro. 200)							Materiales limo- arcillosos (más del 35% pasa el tamiz nro. 200)			
Grupos	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Sub grupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
% pasa el tamiz											
N° 10	50 máx										
N° 40	30 máx.	50 máx.	51 máx.								
N° 200	15 máx.	25 máx	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características del material que pasa el tamiz N° 40											
Límite Líquido			NO PLÁSTICO	40 máx	41 min.	40 máx	41 min.	40 máx	41 min.	40 máx	41 min.
Índice de Plasticidad	6 máx	6 máx		10 máx	10 máx	11 min.	11 min.	10 máx	10 máx	11 min.	11 min.
Índice de grupo	0	0	0	0	0	4 máx	4 máx	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Tipos de material	Fragmentos de grava y arena		Arena Fina	Grava, arena limosas y arcillosas				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
Terreno de fundación	Excelente a Bueno					Regular a Deficiente					

Fuente: Norma AASHTO

- **Índice de grupo**

Es un factor de evaluación, que se determina la calidad del suelo a través de características similares en grupos de suelos, el índice de grupo es muy importante en el diseño de espesores, inclusive un método lleva el mismo nombre.

La siguiente formula determina el índice de grupo:

$$IG = (0.2 * a) + (0.005 * a * c) + (0.01 * b * d)$$

Dónde:

a = % que pasa tamiz N°200 – 35% (Si % N°200 > 75, se anota 75, si es < 35, se anota 0)

b = % que pasa tamiz N°200 – 15% (Si % N°200 > 55, se anota 55, si es < 15, se anota 0)

c = Límite líquido – 40% (Si LL > 60, se anota 60, si es < 40, se anota 0)

d = Índice de plasticidad – 10% (Si IP > 30, se anota 30, si es < 10, se anota 0)

Considerando que cualquier factor pudiese salir negativo, este se asume con el valor de cero. Los máximos valores de índice de grupo se encuentran en la tabla de clasificación.

A continuación, se presenta la clasificación del material de banco de acuerdo a los dos sistemas de clasificación mencionados en párrafos anteriores y en base a los datos de granulometría obtenida en el laboratorio:

Tabla 3.4. Clasificación y descripción del material de banco

Tipo de suelo	Descripción
A-1-a(0)	Grava
A-1-b(0)	Grava
A-2-4(0)	Grava con arena
A-2-5(0)	Grava con arena
A-2-6(0)	Arena gruesa
A-2-7(0)	Arena gruesa
A-3(0)	Arena fina
A-4(0)	Limo con arena fina
A-5(0)	Limo con poco arcilla
A-6(0)	Arcilla con limo
A-7(0)	Arcilla plástica

Fuente: Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo

3.4.3. Criterios para la compactación de los suelos

Los suelos están formados por partículas de tamaño y forma variada y que entre éstas existen espacios intergranulares llamados vacíos, que se hallan llenos de aire, agua o ambos a la vez. Cuando una masa de suelo se encuentra en estado suelto ocupa mayor volumen, porque tiene mayor número de vacíos. En cambio, cuando comprimimos esta masa de tierra, se hace más compacta y observamos un decrecimiento de su volumen total, a causa de la disminución de volumen de vacíos. Esta operación de comprimir una masa de tierra se llama compactación. Es decir que al compactar una masa de suelo se obtienen las siguientes ventajas:

- Disminución de asentamientos futuros.
- Incremento de la resistencia al corte.
- Disminución de la permeabilidad.

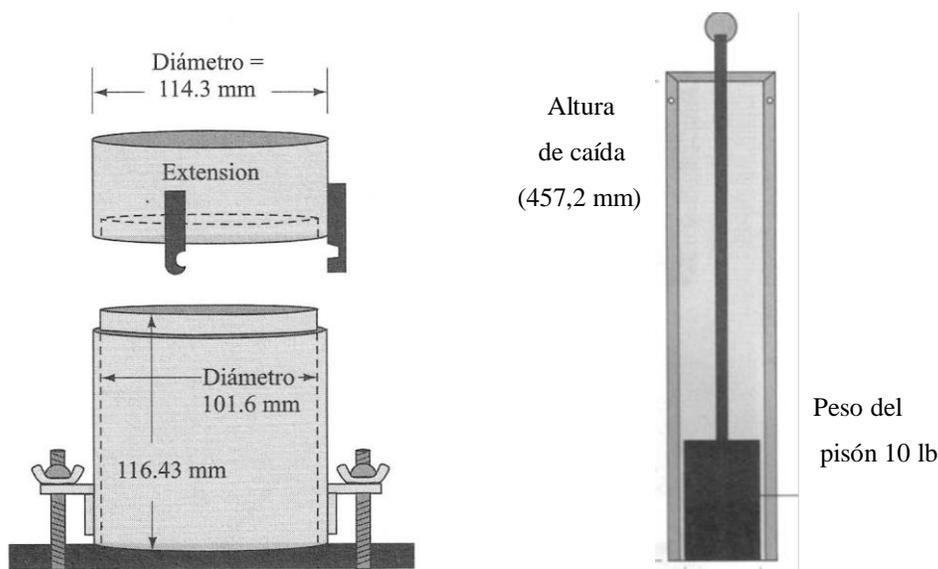
A fin de que el material alcance al compactársele la mayor densidad posible, éste debe de tener una humedad adecuada en el momento de la compactación. Esta humedad se llama “humedad óptima” y la densidad obtenida se conoce con el nombre de “densidad máxima”.

Estos dos parámetros son obtenidos a través de la curva de compactación, la cual se obtiene mediante un ensayo de laboratorio, conocido como Próctor modificado T-180, esta curva se la puede formar relacionando las densidades obtenidas con variados contenidos de humedad.

3.4.3.1. Molde de compactación próctor modificado T-180

Para realizar las compactaciones, tanto con el compactador automático como con el Compactador Próctor T-180, se hará uso de un solo tipo molde, este molde corresponde al ensayo de compactación Próctor modificado T-180, como se ve en la siguiente figura:

Figura 3.12. Equipo para la prueba de Próctor T-180



Fuente: Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo

Debido a que con el cambio del martillo de compactación se incrementa la energía o esfuerzo e compactación por volumen unitario de suelo, la prueba Próctor modificada resulta en un incremento del peso específico seco máximo del suelo. El incremento del peso específico seco máximo es acompañado por un decremento del contenido de agua óptimo.

En lo anterior, las especificaciones dadas para las pruebas Próctor adoptadas por AASHTO respecto al volumen del molde ($943,3 \text{ cm}^3$) y el número de golpes (25 golpes por capa), son generalmente las adoptadas para los suelos grano fino que pasan la malla N. 4. Sin embargo bajo cada designación de prueba, tres métodos sugeridos diferentes reflejan el tamaño del molde, el número de golpes por capa y el tamaño máximo de partículas en un suelo usado para la prueba. En la Tabla 12. Se da un resumen de los resultados utilizados para la prueba del Próctor T-180.

**Tabla 3.5. Especificaciones para la prueba de Próctor T-180
AASHTO y D-1557 de la ASTM**

Concepto	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	101,6 mm	101,6 mm	152,4 mm
Volumen del molde	943,3 cm ³	943,3 cm ³	2124 cm ³
Peso del pistón	44,5 N	44,5 N	44,5 N
Altura de caída del pisón	457,2 mm	457,2 mm	457,2 mm
Número de golpes del pison por capa del suelo	25	25	56
Número de capas de compactación	5	5	5
Energía de compactación	2696 KN.m /m ³	2697 KN.m /m ³	2698 KN.m /m ³
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla No. 4 (4,57 mm) Se usa si 20% o menos por peso de material es retenido en la malla No.4	Porción que pasa la malla de 9,5 mm. Se usa el suelo retenido en la malla No. 4 es más del 20%, y 20% o menos por peso es retenido en la malla de 9,5 mm.	Porción que pasa la malla de 19 mm. Se usa si más del 20% por peso de material es retenido en la malla de 9,5 mm y menos de 30% por peso es retenido en la malla de 19 mm.

Fuente: Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo

3.5. Resultados de la compactación manual Próctor modificado T-180

Figura 3.13. Ensayo de compactado manual



Fuente: Elaboración propia

A continuación, podemos observar los resultados de los ensayos de compactación manual realizados en el laboratorio de la carrera para ambas muestras de suelo:

Tabla 3.6. Resultados de ensayo de compactación manual, muestra 1

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-1-a (0)	1	2,200	7,310
	2	2,194	6,430
	3	2,202	7,398
	4	2,193	7,420
	5	2,203	7,313
	6	2,145	7,389
	7	2,245	7,270
	8	2,238	7,418
	9	2,122	7,289
	10	2,109	7,378
	11	2,111	7,270
	12	2,211	7,422
	13	2,200	7,211

Fuente: Elaboración propia**Tabla 3.7. Resultados de ensayo de compactación manual, muestra 2**

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-1-b(0)	1	2,080	7,790
	2	2,074	7,757
	3	2,079	7,569
	4	2,075	7,616
	5	2,082	7,615
	6	2,055	7,988
	7	2,077	7,873
	8	2,099	7,679
	9	2,071	7,872
	10	2,101	7,822
	11	2,067	7,921
	12	2,088	7,599
	13	2,075	7,961

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8. Resultados de ensayo de compactación manual, muestra 3

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-2-4(0)	1	2,050	8,134
	2	2,061	8,670
	3	2,057	8,433
	4	2,058	8,650
	5	2,024	8,128
	6	2,068	9,345
	7	2,011	8,945
	8	2,071	9,627
	9	2,057	9,522
	10	2,051	9,122
	11	2,064	8,900
	12	2,045	8,899
	13	2,049	8,122

Fuente: Elaboración propia**Tabla 3.9. Resultados de ensayo de compactación manual, muestra 4**

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-2-5(0)	1	2,050	8,433
	2	2,055	8,649
	3	2,055	8,422
	4	2,057	8,683
	5	2,049	9,159
	6	2,034	8,944
	7	2,044	8,897
	8	2,039	8,672
	9	2,033	8,784
	10	2,041	8,671
	11	2,047	8,936
	12	2,029	8,647
	13	2,022	8,787

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.10. Resultados de ensayo de compactación manual, muestra 5

Muestra	Numero de ensayo	Densidad Máxima (gr/cm ³)	Humedad Óptima (%)
A-2-6(1)	1	2,001	10,820
	2	2,003	10,405
	3	2,003	10,867
	4	2,001	11,014
	5	2,004	11,000
	6	2,008	10,933
	7	2,010	10,963
	8	2,012	11,001
	9	2,015	10,561
	10	2,005	10,698
	11	2,002	10,734
	12	2,021	10,874
	13	2,017	10,961

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.11. Resultados de ensayo de compactación manual, muestra 6

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-2-7(1)	1	2,001	10,770
	2	1,997	10,763
	3	2,000	10,808
	4	1,999	10,788
	5	2,006	10,794
	6	1,985	10,733
	7	1,991	10,754
	8	1,987	10,761
	9	1,982	10,769
	10	1,988	10,783
	11	2,005	10,803
	12	2,003	10,801
	13	1,979	10,795

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.12. Resultados de ensayo de compactación manual, muestra 7

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-3(0)	1	1,768	12,250
	2	1,781	11,900
	3	1,767	12,386
	4	1,796	12,207
	5	1,761	11,182
	6	1,736	11,256
	7	1,794	12,134
	8	1,731	11,978
	9	1,832	11,956
	10	1,832	11,344
	11	1,722	12,567
	12	1,794	11,865
	13	1,893	11,798

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.13. Resultados de ensayo de compactación manual, muestra 8

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-4(2)	1	1,968	12,616
	2	1,963	12,051
	3	1,964	14,952
	4	1,962	12,605
	5	1,972	12,094
	6	1,912	13,567
	7	1,945	13,732
	8	1,944	12,463
	9	1,988	14,755
	10	1,923	14,785
	11	1,962	13,478
	12	1,965	12,988
	13	1,928	13,677

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.14. Resultados de ensayo de compactación manual, muestra 9

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-5(12)	1	1,926	12,536
	2	1,928	12,957
	3	1,953	12,344
	4	1,926	12,713
	5	1,931	13,115
	6	1,879	12,012
	7	1,823	12,566
	8	1,877	12,955
	9	1,899	13,933
	10	1,895	13,566
	11	1,846	13,688
	12	1,893	12,788
	13	1,849	12,944

Fuente: Elaboración propia**Tabla 3.15. Resultados de ensayo de compactación manual, muestra 10**

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-6(11)	1	1,800	17,800
	2	1,830	15,290
	3	1,798	17,194
	4	1,823	15,802
	5	1,796	17,197
	6	1,847	16,866
	7	1,834	15,899
	8	1,784	15,923
	9	1,754	17,122
	10	1,753	17,167
	11	1,845	16,744
	12	1,822	15,927
	13	1,788	15,897

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.16. Resultados de ensayo de compactación manual, muestra 11

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-7-5(18)	1	1,819	16,823
	2	1,793	18,062
	3	1,791	18,250
	4	1,822	16,823
	5	1,782	18,016
	6	1,773	18,446
	7	1,826	18,644
	8	1,811	18,733
	9	1,799	17,776
	10	1,866	16,988
	11	1,739	16,968
	12	1,812	17,792
	13	1,892	18,563

Fuente: Elaboración propia**Tabla 3.17. Resultados de ensayo de compactación manual, muestra 12**

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-7-6(19)	1	1,780	16,537
	2	1,701	19,612
	3	1,766	18,119
	4	1,720	16,767
	5	1,764	19,660
	6	1,743	17,873
	7	1,787	18,876
	8	1,768	18,793
	9	1,761	16,983
	10	1,704	19,073
	11	1,713	17,854
	12	1,727	19,471
	13	1,769	18,865

Fuente: Elaboración propia

3.6. Resultados de los suelos por compactación automática

Figura 3.14. Compactador automático



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.15. Manejo del compactador automático



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.16. Montaje de muestra en el compactador automático

Fuente: Elaboración propia

A continuación, podemos observar los resultados de los ensayos de compactación automática realizados en el laboratorio de la carrera para ambas muestras de suelo:

Tabla 3.18. Resultados de ensayo de compactación automática, muestra 1

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-1-a(0)	1	2,135	6,010
	2	2,143	7,160
	3	2,189	6,627
	4	2,151	7,145
	5	2,186	6,717
	6	2,117	6,982
	7	2,103	6,784
	8	2,105	7,058
	9	2,097	7,131
	10	2,110	6,875
	11	2,092	6,361
	12	2,115	6,427
	13	2,101	6,178

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.19. Resultados de ensayo de compactación automática, muestra 2

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-1-b(0)	1	2,078	7,662
	2	2,074	7,757
	3	2,079	7,569
	4	2,075	7,616
	5	2,081	7,634
	6	2,066	7,680
	7	2,071	7,693
	8	2,063	7,612
	9	2,059	7,589
	10	2,055	7,751
	11	2,070	7,589
	12	2,061	7,763
	13	2,063	7,734

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.20. Resultados de ensayo de compactación automática, muestra 3

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-2-4(0)	1	2,047	8,398
	2	2,048	8,132
	3	2,047	8,453
	4	2,042	8,194
	5	2,046	8,413
	6	2,049	8,324
	7	2,041	8,421
	8	2,035	8,321
	9	2,037	8,295
	10	2,045	8,327
	11	2,043	8,311
	12	2,033	8,129
	13	2,042	8,236

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.21. Resultados de ensayo de compactación automática, muestra 4

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-2-5(0)	1	2,017	8,192
	2	2,042	8,252
	3	2,037	8,068
	4	2,042	8,483
	5	2,044	8,402
	6	2,012	8,268
	7	2,021	8,198
	8	2,015	8,345
	9	2,004	8,398
	10	2,023	8,404
	11	2,002	8,361
	12	2,009	8,321
	13	2,019	8,236

Fuente: Elaboración propia**Tabla 3.22. Resultados de ensayo de compactación automática, muestra 5**

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-2-6(1)	1	2,000	10,696
	2	1,983	10,600
	3	1,995	10,295
	4	1,994	10,948
	5	1,996	11,010
	6	1,984	10,734
	7	1,989	10,823
	8	1,987	10,973
	9	1,980	10,653
	10	1,991	10,542
	11	1,985	10,633
	12	1,998	10,359
	13	1,982	10,778

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.23. Resultados de ensayo de compactación automática, muestra 6

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-2-7(1)	1	1,991	10,969
	2	1,990	10,407
	3	1,992	10,863
	4	1,993	10,321
	5	1,991	10,940
	6	1,975	10,583
	7	1,981	10,684
	8	1,975	10,632
	9	1,983	10,562
	10	1,970	10,672
	11	1,976	10,450
	12	1,978	10,679
	13	1,961	10,534

Fuente: Elaboración propia**Tabla 3.24. Resultados de ensayo de compactación automática, muestra 7**

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-3(0)	1	1,656	11,793
	2	1,684	11,633
	3	1,647	12,756
	4	1,690	12,700
	5	1,666	11,866
	6	1,674	11,983
	7	1,681	11,849
	8	1,667	11,843
	9	1,660	12,453
	10	1,654	12,158
	11	1,689	12,562
	12	1,682	11,899
	13	1,659	11,894

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.25. Resultados de ensayo de compactación automática, muestra 8

Muestra	Numero de ensayo	Densidad Máxima (gr/cm ³)	Humedad Óptima (%)
A-4(2)	1	1,913	14,132
	2	1,915	12,438
	3	1,919	12,643
	4	1,920	12,122
	5	1,912	14,236
	6	1,901	14,134
	7	1,905	14,232
	8	1,900	14,187
	9	1,910	12,341
	10	1,899	14,198
	11	1,982	12,543
	12	1,903	12,982
	13	1,907	13,821

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.26. Resultados de ensayo de compactación automática, muestra 9

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-5(12)	1	1,910	14,093
	2	1,919	12,785
	3	1,907	14,250
	4	1,918	12,421
	5	1,911	14,121
	6	1,853	14,249
	7	1,822	14,239
	8	1,901	14,452
	9	1,842	14,433
	10	1,877	14,362
	11	1,811	14,371
	12	1,862	13,738
	13	1,889	13,389

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.27. Resultados de ensayo de compactación automática, muestra 10

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-6(11)	1	1,745	16,190
	2	1,750	18,590
	3	1,749	16,300
	4	1,754	16,438
	5	1,743	15,750
	6	1,699	17,453
	7	1,732	17,741
	8	1,715	18,122
	9	1,702	16,943
	10	1,713	17,389
	11	1,709	18,963
	12	1,698	17,893
	13	1,712	16,745

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.28. Resultados de ensayo de compactación automática, muestra 11

Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-7-5(18)	1	1,722	17,455
	2	1,730	17,649
	3	1,659	19,630
	4	1,724	19,303
	5	1,720	17,751
	6	1,732	18,783
	7	1,705	18,593
	8	1,732	19,312
	9	1,737	19,127
	10	1,734	18,522
	11	1,682	18,921
	12	1,697	19,012
	13	1,701	17,874

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.29 Resultados de ensayo de compactación automática, muestra 12

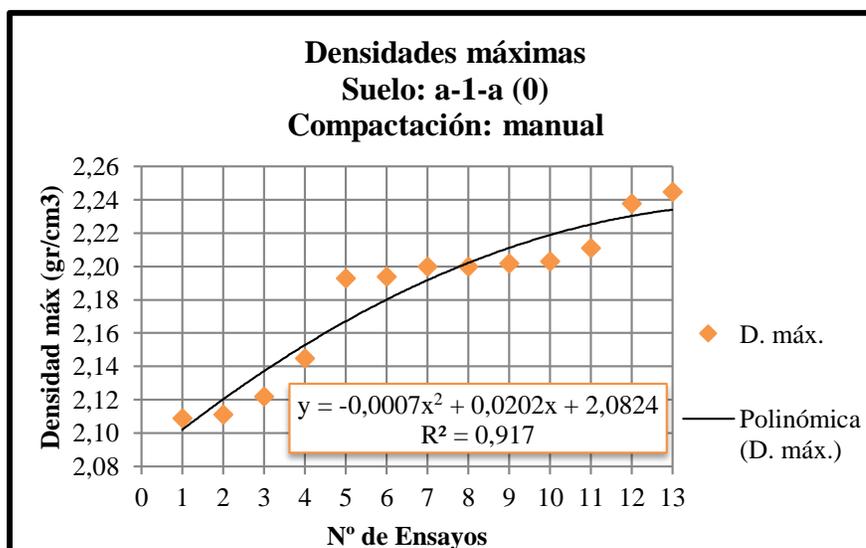
Muestra	Numero de ensayo	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
A-7-6(19)	1	1,694	20,026
	2	1,674	19,075
	3	1,614	17,115
	4	1,620	18,386
	5	1,671	17,250
	6	1,686	19,015
	7	1,602	19,822
	8	1,654	18,734
	9	1,674	17,946
	10	1,689	18,836
	11	1,642	18,481
	12	1,632	19,349
	13	1,684	18,682

Fuente: Elaboración propia

3.7. Comportamiento de los resultados

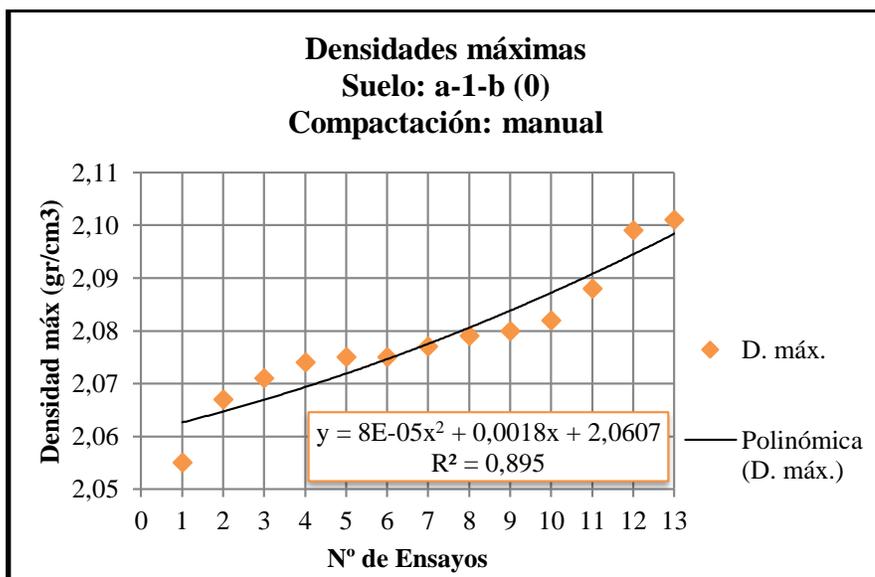
3.7.1. Curvas de tendencia de resultados de la compactación manual

Gráfico 3.3. Tendencia de las densidades máximas – compactación manual 1



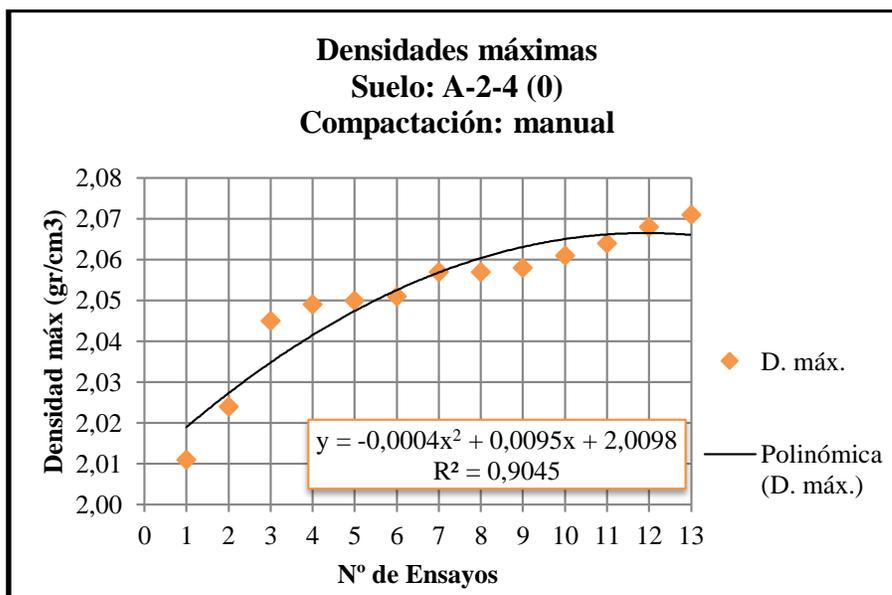
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.4. Tendencia de las densidades máximas – compactación manual 2



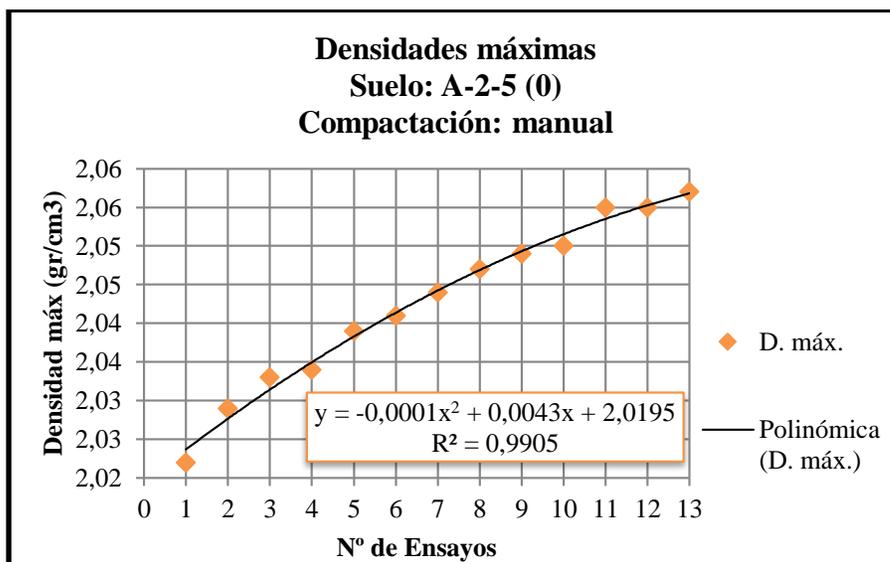
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.5. Tendencia de las densidades máximas – compactación manual 3



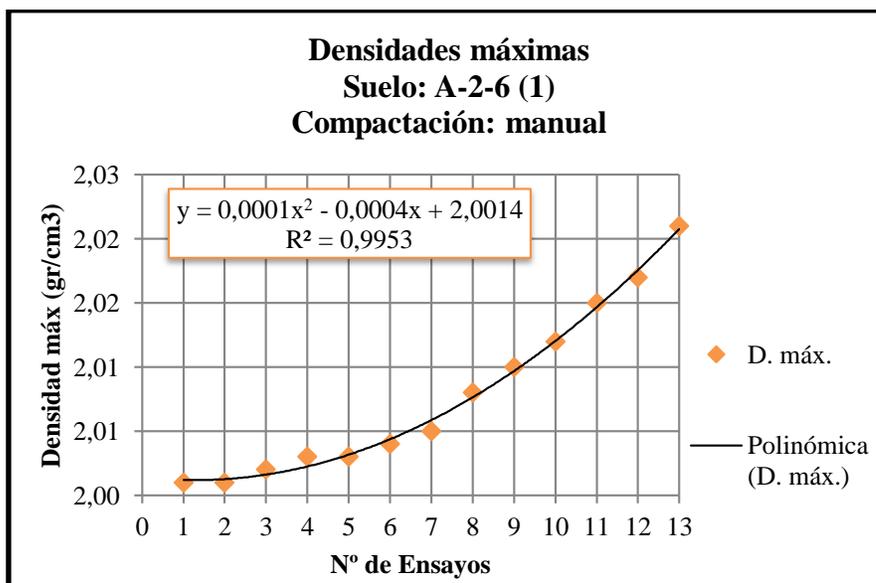
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.6. Tendencia de las densidades máximas – compactación manual 4



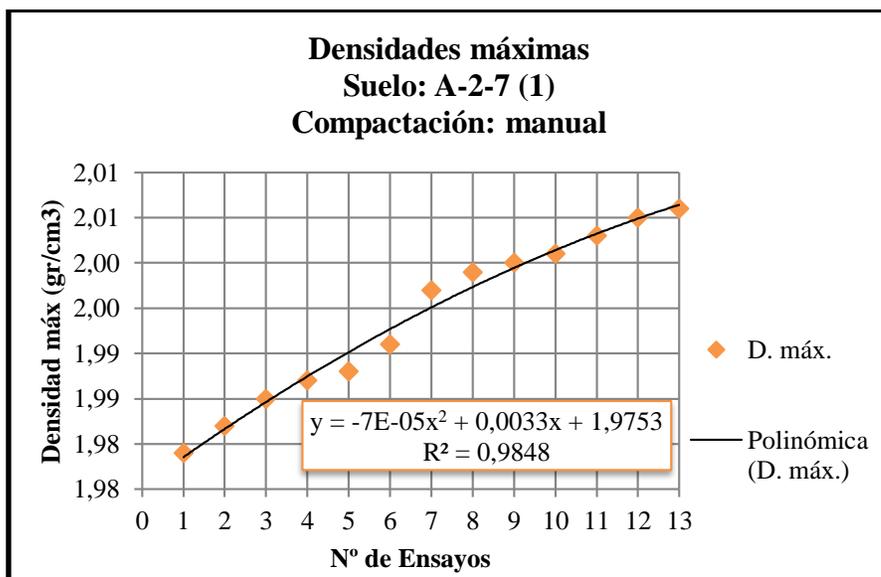
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.7. Tendencia de las densidades máximas – compactación manual 5



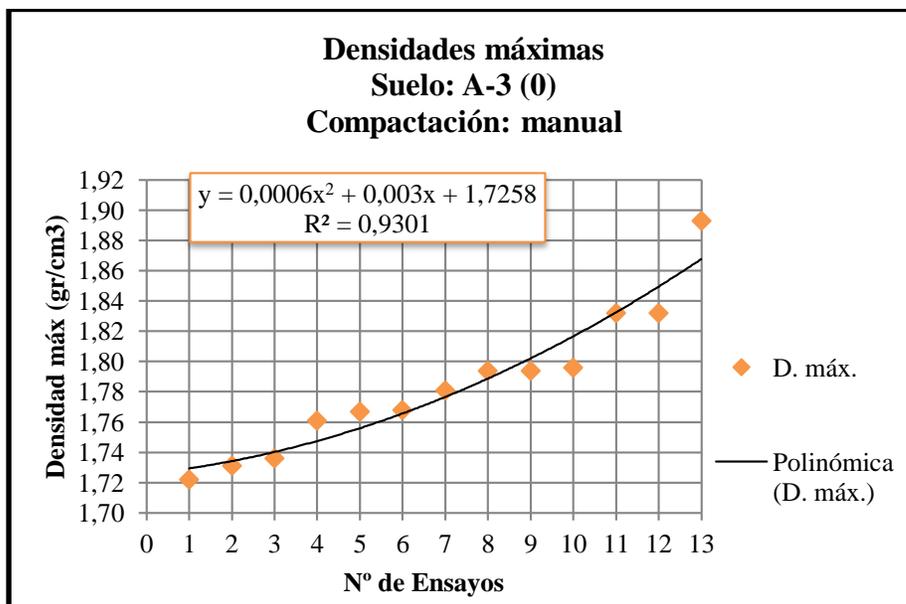
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.8. Tendencia de las densidades máximas – compactación manual 6



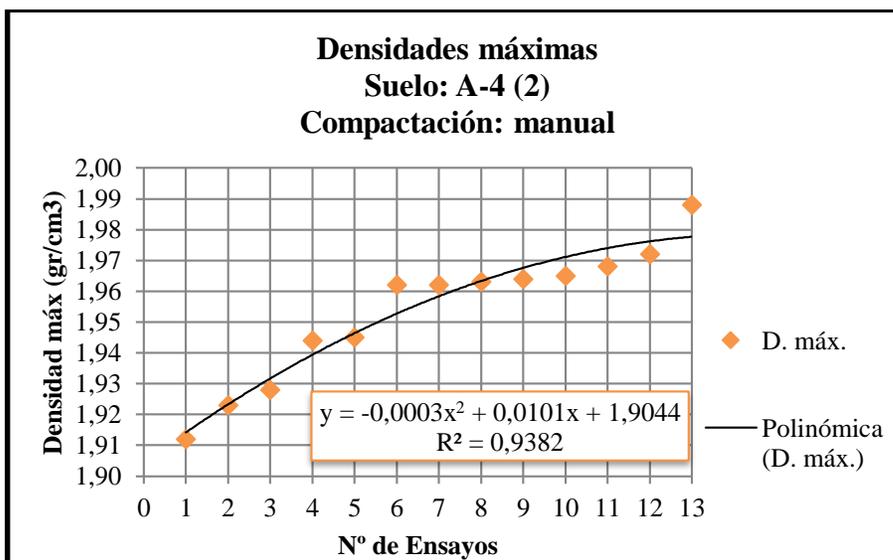
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.9. Tendencia de las densidades máximas – compactación manual 7



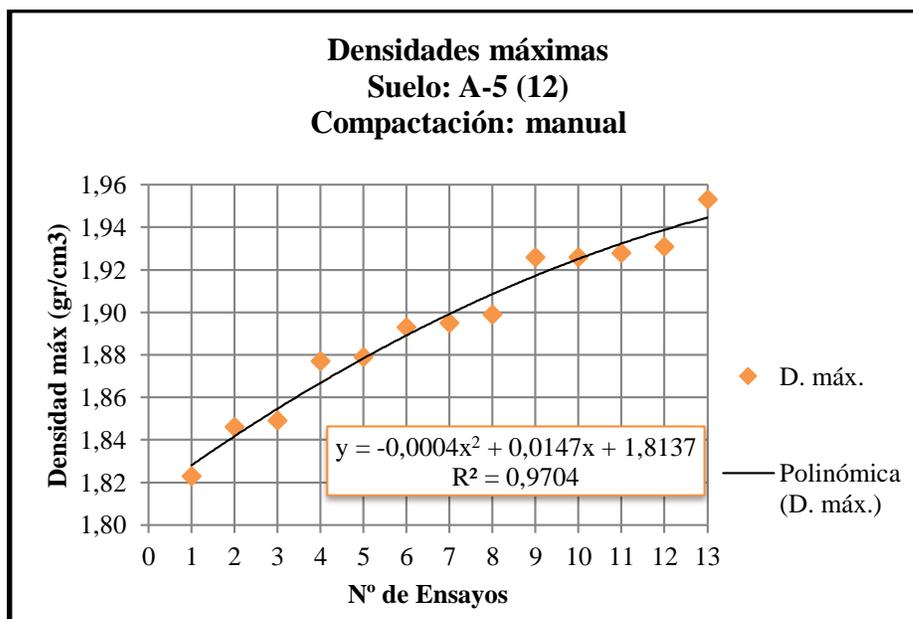
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.10. Tendencia de las densidades máximas – compactación manual 8



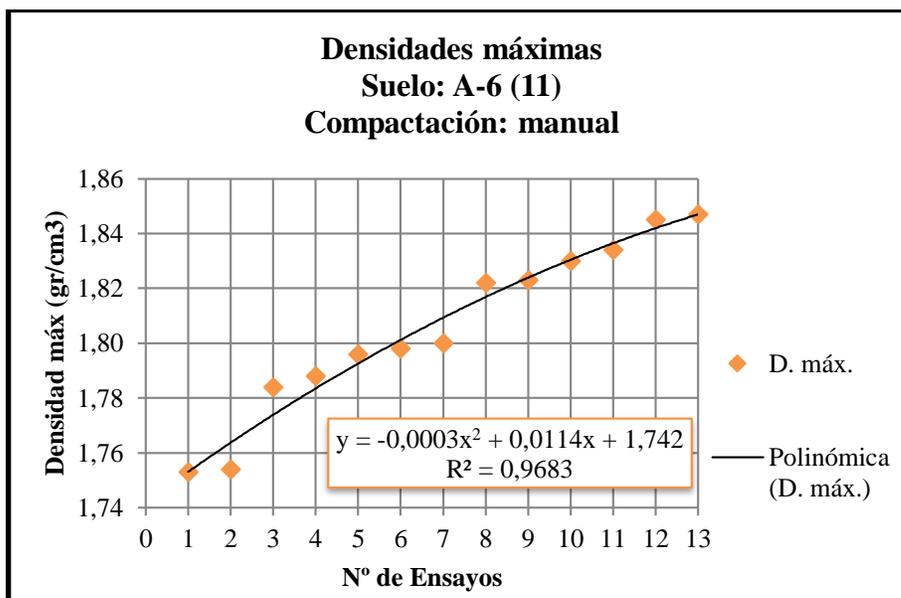
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.11. Tendencia de las densidades máximas – compactación manual 9



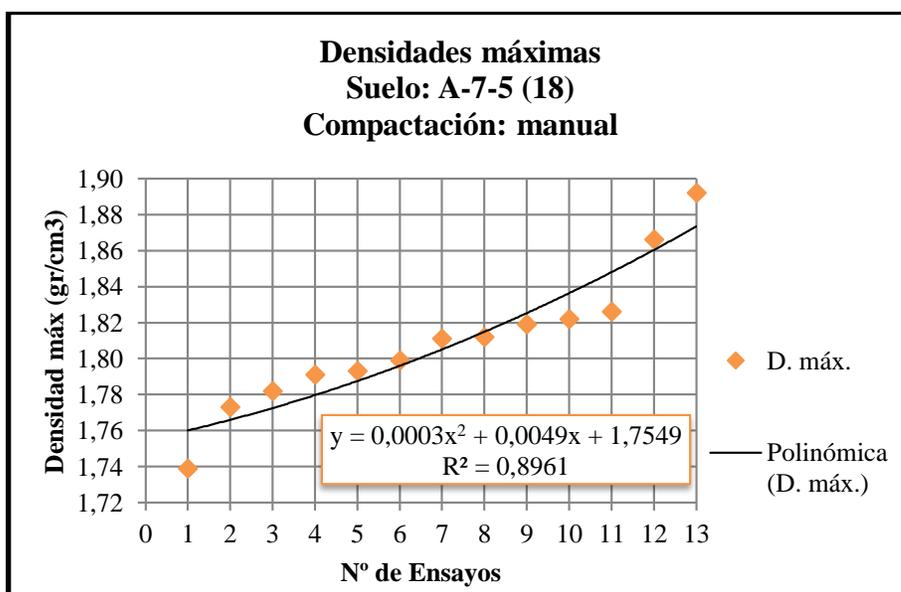
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.12. Tendencia de las densidades máximas – compactación manual 10



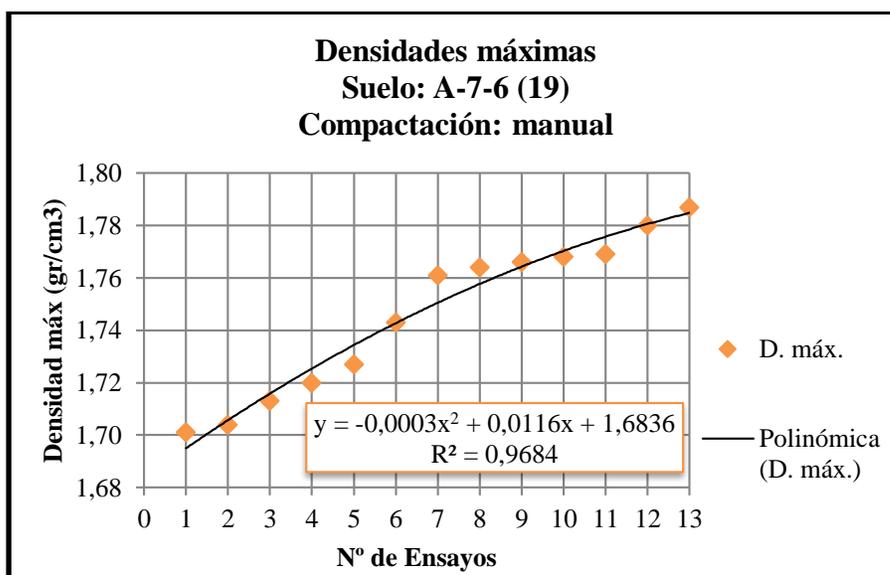
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.13. Tendencia de las densidades máximas – compactación manual 11



Fuente: Elaboración propia

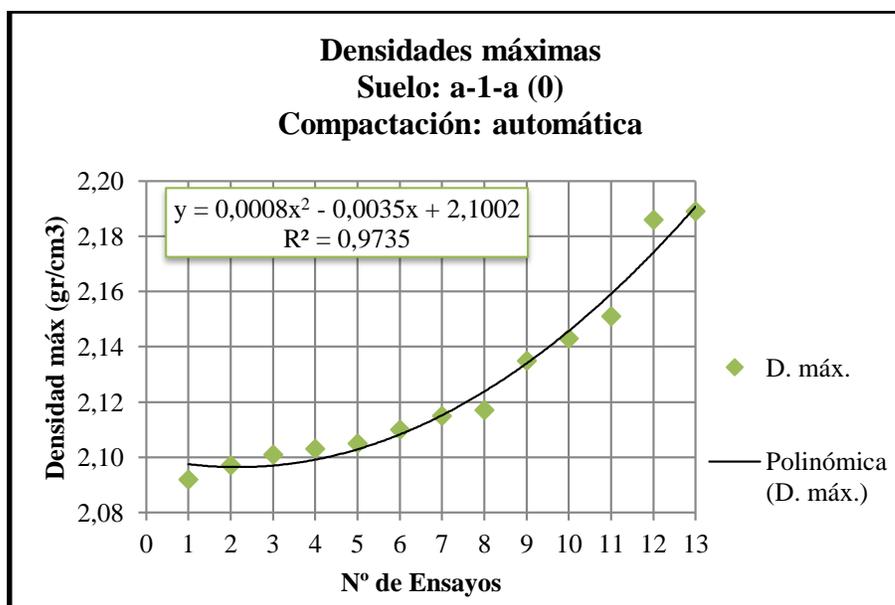
Gráfico 3.14. Tendencia de las densidades máximas – compactación manual 12



Fuente: Elaboración propia

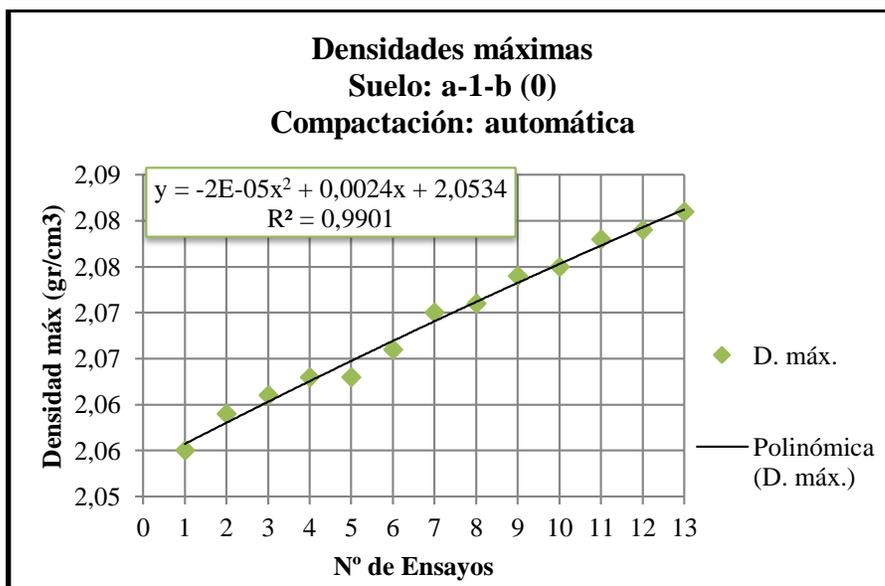
3.7.2. Curvas de tendencia de resultados de la compactación automática

Gráfico 3.15. Tendencia de las densidades máximas – compactación automática 1



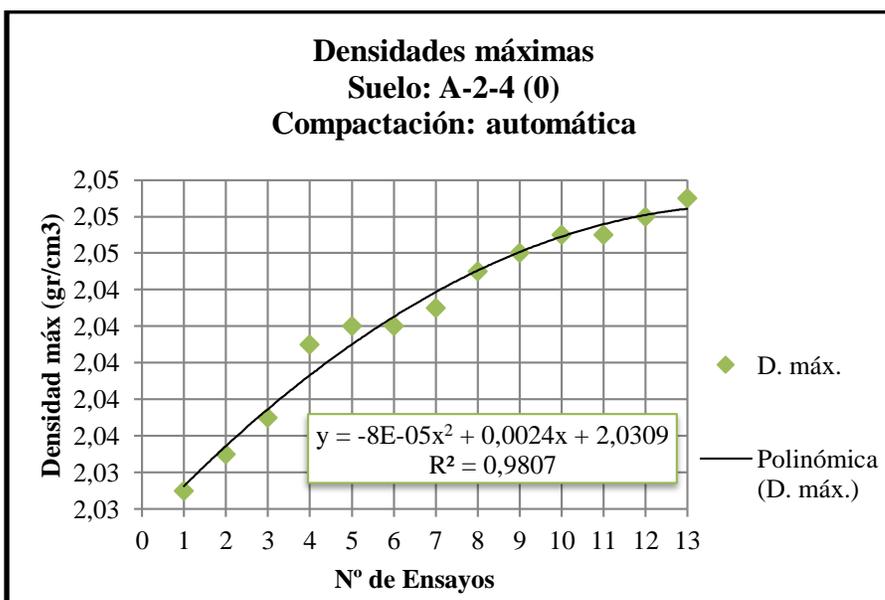
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.16. Tendencia de las densidades máximas – compactación automática 2



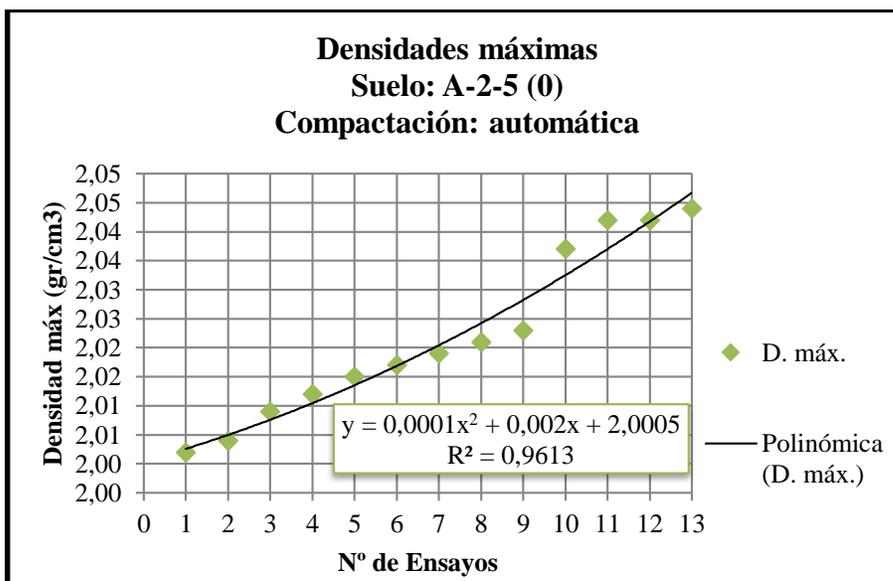
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.17. Tendencia de las densidades máximas – compactación automática 3



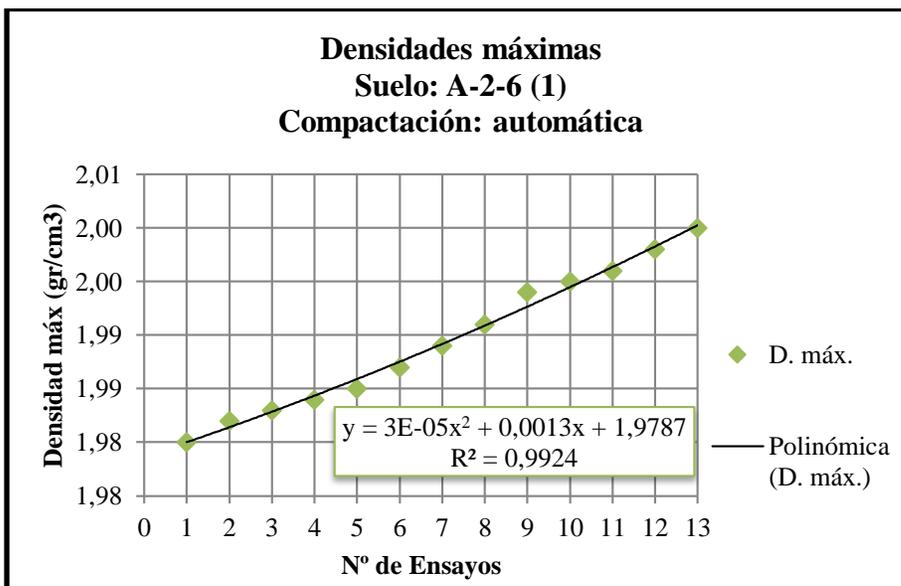
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.18. Tendencia de las densidades máximas – compactación automática 4



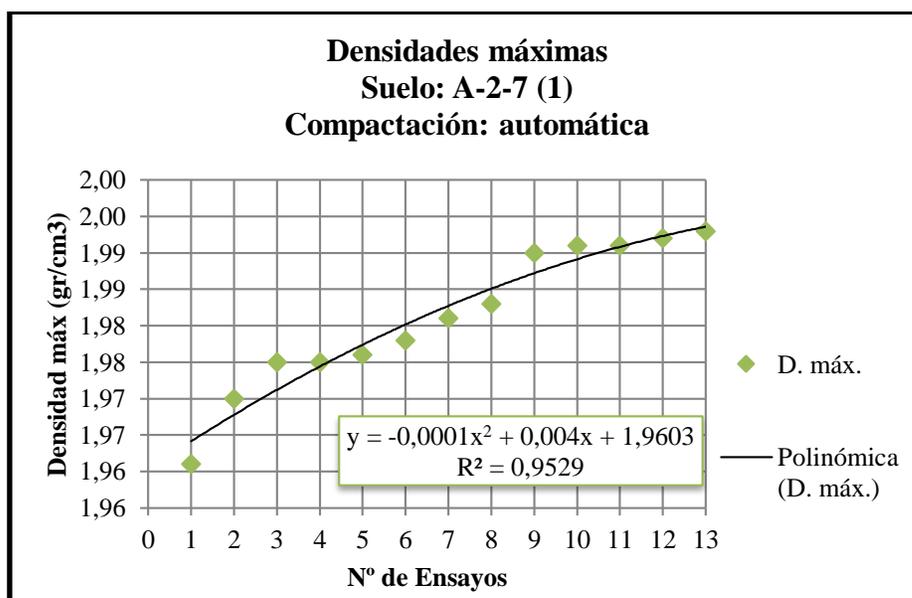
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.19. Tendencia de las densidades máximas – compactación automática 5



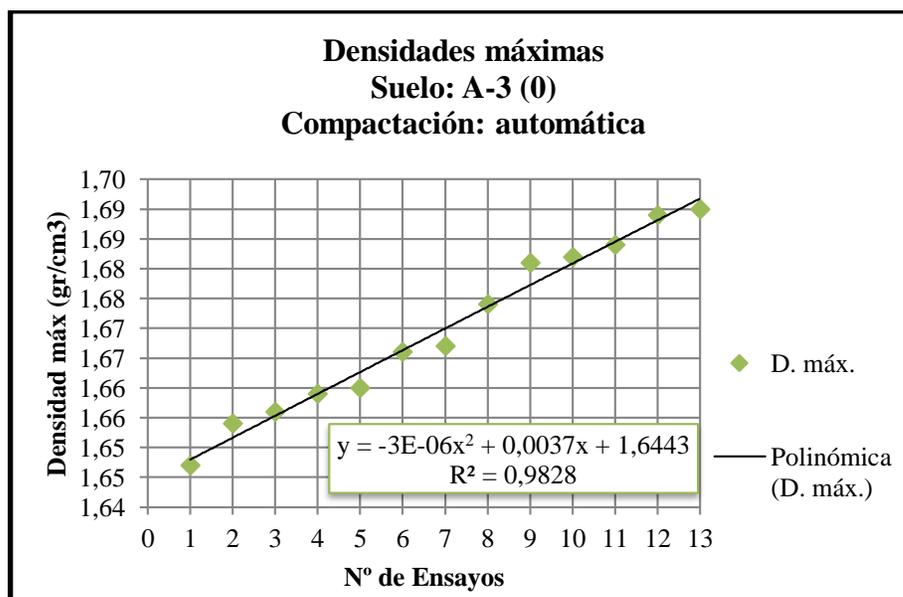
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.20. Tendencia de las densidades máximas – compactación automática 6



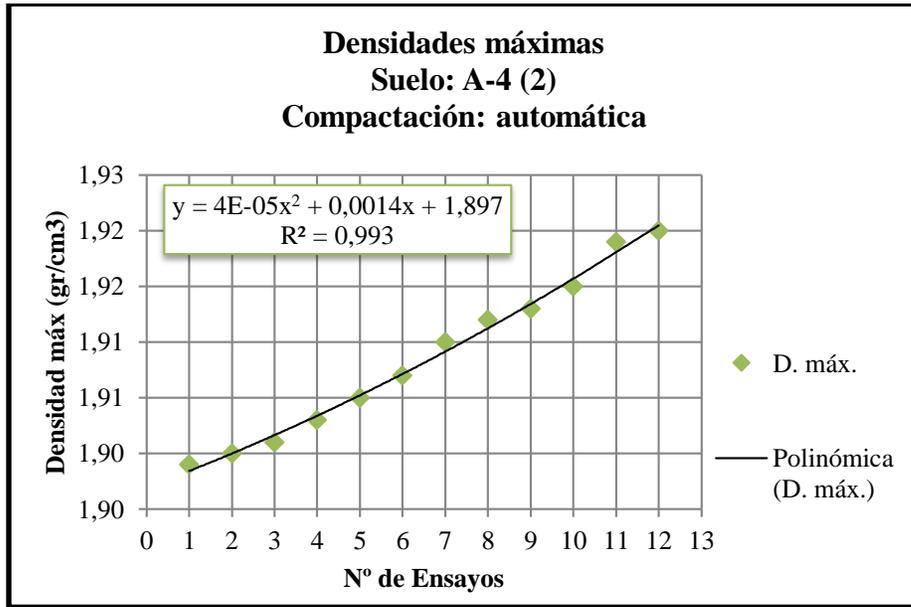
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.21. Tendencia de las densidades máximas – compactación automática 7



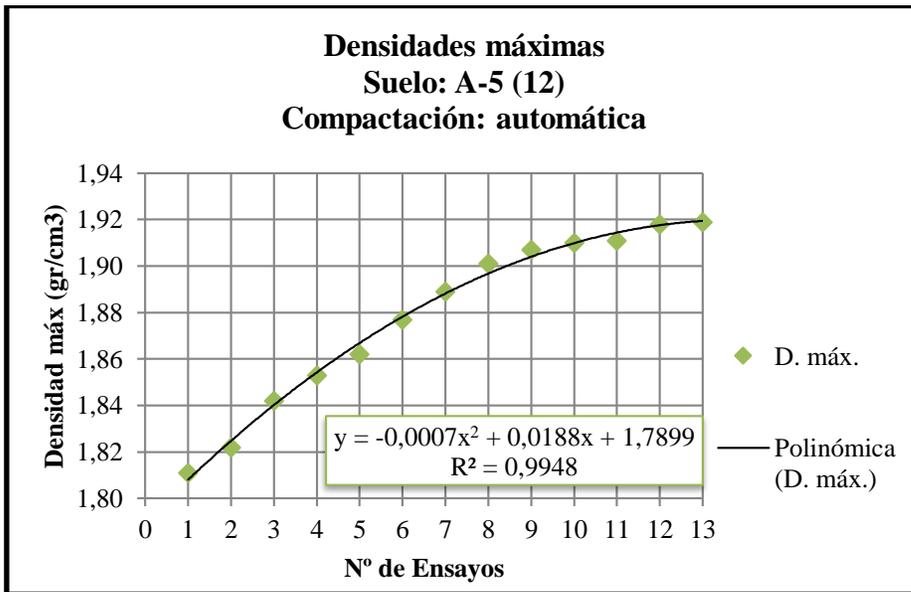
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.22. Tendencia de las densidades máximas – compactación automática 8



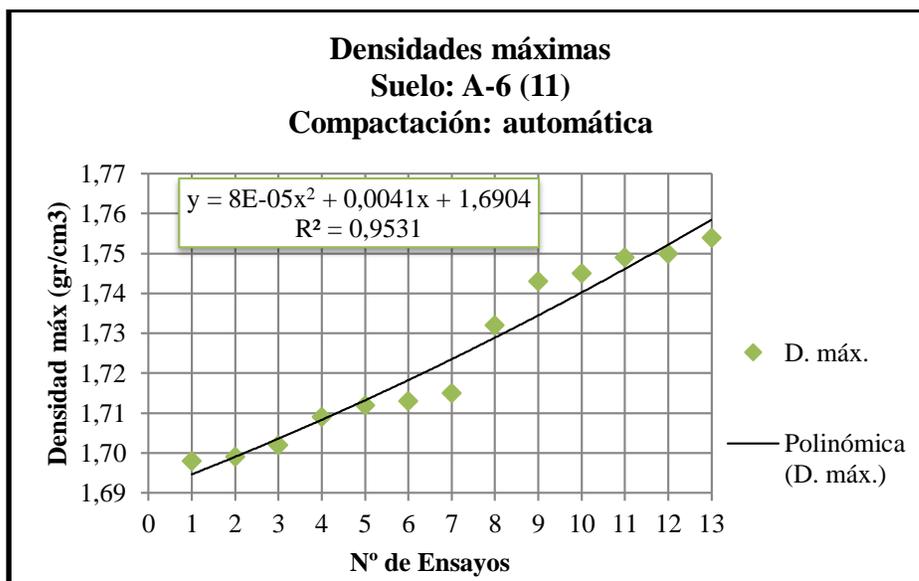
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.23. Tendencia de las densidades máximas – compactación automática 9



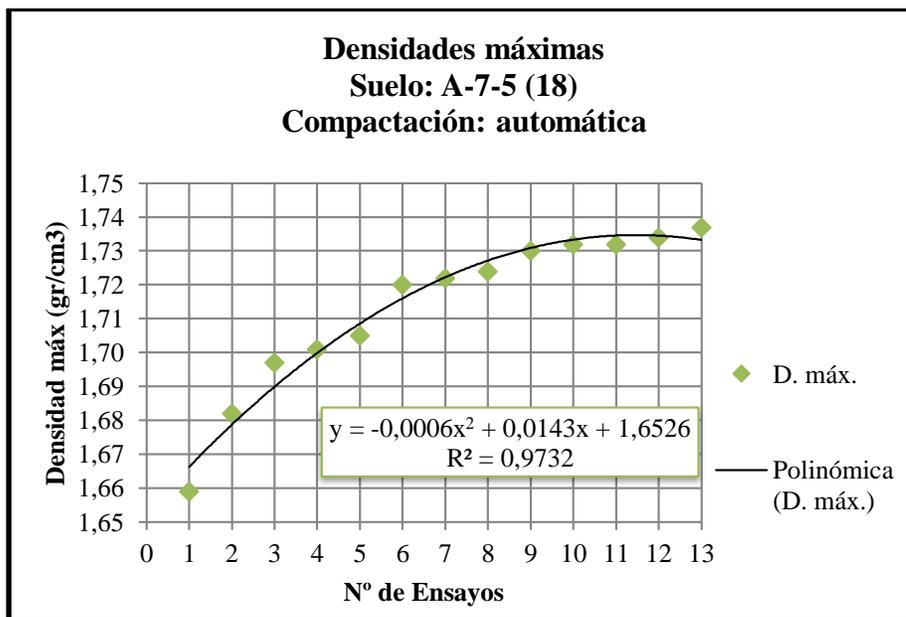
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.24. Tendencia de las densidades máximas – compactación automática 10



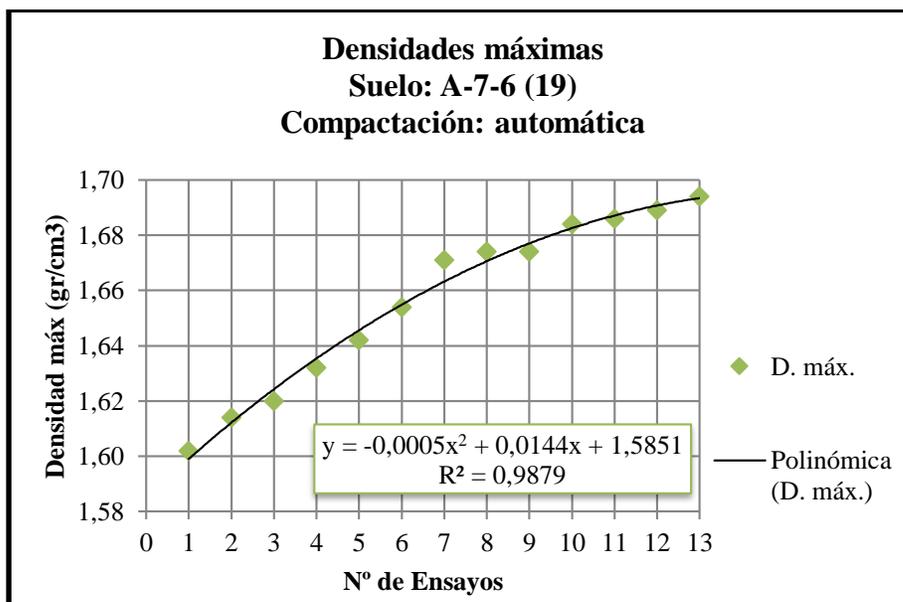
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.25. Tendencia de las densidades máximas – compactación automática 11



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.26. Tendencia de las densidades máximas – compactación automática 12



Fuente: Elaboración propia

3.8. Tratamiento estadístico

El tratamiento estadístico se aplica a cada tipo de suelos según la AASHTO, son 12 muestras de suelos, cada una con diferente clasificación, y de cada tipo de suelo se realizaron 13 muestras de compactación, tanto con el martillo manual, como con el martillo automático.

3.8.1. Compactación manual Próctor T-180

El tratamiento estadístico se aplica a las densidades, que fueron ordenadas de menor a mayor con su respectivo contenido de humedad óptimo.

Tabla 3.30. Tratamiento estadístico por suelo – compactación manual 1

Compactación:	Manual	Suelo:	A-1-a (0)
----------------------	--------	---------------	-----------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
Nº de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	2,109	7,378
2	2,111	7,270
3	2,122	7,289
4	2,145	7,389
5	2,193	7,420
6	2,194	6,430
7	2,200	7,310
8	2,200	7,211
9	2,202	7,398
10	2,203	7,313
11	2,211	7,422
12	2,238	7,418
13	2,245	7,270

	N	=	13
Nº de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud "ΔX" =	0,0340	=	0,034
	"ΔX/2"	=	0,0170

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
2,092	2,126	2,109	3
2,126	2,160	2,143	1
2,160	2,194	2,177	2
2,194	2,228	2,211	5
2,228	2,262	2,245	2
Total =			13
La Media "Xmed" =			2,1822
Desviación Estándar "S" =			0,0497

D. máx media =	2,18	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	7,41	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.31. Tratamiento estadístico por suelo – compactación manual 2

Compactación:	Manual	Suelo:	A-1-b (0)
----------------------	--------	---------------	-----------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
Nº de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	2,055	7,988
2	2,067	7,921
3	2,071	7,872
4	2,074	7,757
5	2,075	7,616
6	2,075	7,961
7	2,077	7,873
8	2,079	7,569
9	2,080	7,790
10	2,082	7,615
11	2,088	7,599
12	2,099	7,679
13	2,101	7,822

	N	=	13
Nº de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud "ΔX" =	0,0115	=	0,012
	"ΔX/2"	=	0,0060

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
2,092	2,061	2,055	1
2,126	2,073	2,067	2
2,160	2,085	2,079	7
2,194	2,097	2,091	1
2,228	2,109	2,103	2
Total =			13
La Media "Xmed" =			2,0799
Desviación Estándar "S" =			0,0134

D. máx media =	2,08	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	7,77	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.32. Tratamiento estadístico por suelo – compactación manual 3

Compactación:	Manual	Suelo:	A-2-4 (0)
----------------------	--------	---------------	-----------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
Nº de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm ³)	Humedad Óptima (%)
1	2,011	8,945
2	2,024	8,128
3	2,045	8,899
4	2,049	8,122
5	2,050	8,134
6	2,051	9,122
7	2,057	8,433
8	2,057	9,522
9	2,058	8,650
10	2,061	8,670
11	2,064	8,900
12	2,068	9,345
13	2,071	9,627

	N	=	13
Nº de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud "ΔX" =	0,0150	=	0,015
	"ΔX/2"	=	0,0075

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
2,004	2,019	2,011	1
2,019	2,034	2,026	1
2,034	2,049	2,041	2
2,049	2,064	2,056	6
2,064	2,079	2,071	3
Total =			13
La Media "Xmed" =			2,0514
Desviación Estándar "S" =			0,0177

D. máx media =	2,05	gr/cm ³
C.H.O. para D.máx media =	9,08	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.33. Tratamiento estadístico por suelo – compactación manual 4

Compactación:	Manual	Suelo:	A-2-5 (0)
----------------------	--------	---------------	-----------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
Nº de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	2,022	8,787
2	2,029	8,647
3	2,033	8,784
4	2,034	8,944
5	2,039	8,672
6	2,041	8,671
7	2,044	8,897
8	2,047	8,936
9	2,049	9,159
10	2,050	8,433
11	2,055	8,649
12	2,055	8,422
13	2,057	8,683

	N	=	13
Nº de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud "ΔX" =	0,0088	=	0,009
	"ΔX/2"	=	0,0045

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
2,018	2,027	2,022	1
2,027	2,036	2,031	3
2,036	2,045	2,040	3
2,045	2,054	2,049	3
2,054	2,063	2,058	3
Total =			13
La Media "Xmed" =			2,0428
Desviación Estándar "S" =			0,0118

D. máx media =	2,04	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	8,80	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.34. Tratamiento estadístico por suelo – compactación manual 5

Compactación:	Manual	Suelo:	A-2-6 (1)
----------------------	--------	---------------	-----------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
N° de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	2,001	10,820
2	2,001	11,014
3	2,002	10,734
4	2,003	10,405
5	2,003	10,867
6	2,004	11,000
7	2,005	10,698
8	2,008	10,933
9	2,010	10,963
10	2,012	11,001
11	2,015	10,561
12	2,017	10,961
13	2,021	10,874

	N	=	13
N° de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud "ΔX" =	0,0050	=	0,005
	"ΔX/2"	=	0,0025

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
1,999	2,004	2,001	5
2,004	2,009	2,006	3
2,009	2,014	2,011	2
2,014	2,019	2,016	2
2,019	2,024	2,021	1
Total =			13
La Media "Xmed" =			2,0075
Desviación Estándar "S" =			0,0069

D. máx media =	2,01	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	10,90	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.35. Tratamiento estadístico por suelo – compactación manual 6

Compactación:	Manual	Suelo:	A-2-7 (1)
----------------------	--------	---------------	-----------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
Nº de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	1,979	10,795
2	1,982	10,769
3	1,985	10,733
4	1,987	10,761
5	1,988	10,783
6	1,991	10,754
7	1,997	10,763
8	1,999	10,788
9	2,000	10,808
10	2,001	10,770
11	2,003	10,801
12	2,005	10,803
13	2,006	10,794

	N	=	13
Nº de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud " ΔX " =	0,0067	=	0,007
	" $\Delta X/2$ "	=	0,0035

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
1,976	1,983	1,979	2
1,983	1,990	1,986	3
1,990	1,997	1,993	2
1,997	2,004	2,000	4
2,004	2,011	2,007	2
Total =			13
La Media "Xmed" =			1,9935
Desviación Estándar "S" =			0,0097

D. máx media =	1,99	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	10,76	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.36. Tratamiento estadístico por suelo – compactación manual 7

Compactación:	Manual	Suelo:	A-3 (0)
----------------------	--------	---------------	---------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
Nº de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	1,722	12,567
2	1,731	11,978
3	1,736	11,256
4	1,761	11,182
5	1,767	12,386
6	1,768	12,250
7	1,781	11,900
8	1,794	12,134
9	1,794	11,865
10	1,796	12,207
11	1,832	11,956
12	1,832	11,344
13	1,893	11,798

	N	=	13
Nº de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud " ΔX " =	0,0428	=	0,043
	" $\Delta X/2$ "	=	0,0215

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
1,701	1,744	1,722	3
1,744	1,787	1,765	4
1,787	1,830	1,808	3
1,830	1,873	1,851	2
1,873	1,916	1,894	1
Total =			13
La Media "Xmed" =			1,7882
Desviación Estándar "S" =			0,0544

D. máx media =	1,79	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	12,03	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.37. Tratamiento estadístico por suelo – compactación manual 8

Compactación:	Manual	Suelo:	A-4 (2)
----------------------	--------	---------------	---------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
Nº de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	1,912	13,567
2	1,923	14,785
3	1,928	13,677
4	1,944	12,463
5	1,945	13,732
6	1,962	12,605
7	1,962	13,478
8	1,963	12,051
9	1,964	14,952
10	1,965	12,988
11	1,968	12,616
12	1,972	12,094
13	1,988	14,755

	N	=	13
Nº de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud " ΔX " =	0,0190	=	0,019
	" $\Delta X/2$ "	=	0,0095

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
1,903	1,922	1,912	1
1,922	1,941	1,931	2
1,941	1,960	1,950	2
1,960	1,979	1,969	7
1,979	1,998	1,988	1
Total =			13
La Media "Xmed" =			1,9573
Desviación Estándar "S" =			0,0213

D. máx media =	1,96	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	12,92	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.38. Tratamiento estadístico por suelo – compactación manual 9

Compactación:	Manual	Suelo:	A-5 (12)
----------------------	--------	---------------	----------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
N° de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	1,823	12,566
2	1,846	13,688
3	1,849	12,944
4	1,877	12,955
5	1,879	12,012
6	1,893	12,788
7	1,895	13,566
8	1,899	13,933
9	1,926	12,536
10	1,926	12,713
11	1,928	12,957
12	1,931	13,115
13	1,953	12,344

	N	=	13
N° de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud " ΔX " =	0,0325	=	0,033
	" $\Delta X/2$ "	=	0,0165

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
1,807	1,840	1,823	1
1,840	1,873	1,856	2
1,873	1,906	1,889	5
1,906	1,939	1,922	4
1,939	1,972	1,955	1
Total =			13
La Media "Xmed" =			1,8941
Desviación Estándar "S" =			0,0353

D. máx media =	1,89	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	13,21	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.39. Tratamiento estadístico por suelo – compactación manual 10

Compactación:	Manual	Suelo:	A-6 (11)
----------------------	--------	---------------	----------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
Nº de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	1,753	17,167
2	1,754	17,122
3	1,784	15,923
4	1,788	15,897
5	1,796	17,197
6	1,798	17,194
7	1,800	17,800
8	1,822	15,927
9	1,823	15,802
10	1,830	15,290
11	1,834	15,899
12	1,845	16,744
13	1,847	16,866

	N	=	13
Nº de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud " ΔX " =	0,0235	=	0,024
	" $\Delta X/2$ "	=	0,0120

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
1,741	1,765	1,753	2
1,765	1,789	1,777	2
1,789	1,813	1,801	3
1,813	1,837	1,825	4
1,837	1,861	1,849	2
Total =			13
La Media "Xmed" =			1,8047
Desviación Estándar "S" =			0,0323

D. máx media =	1,80	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	17,40	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.40. Tratamiento estadístico por suelo – compactación manual 11

Compactación:	Manual	Suelo:	A-7-5 (18)
----------------------	--------	---------------	------------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
Nº de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	1,739	16,968
2	1,773	18,446
3	1,782	18,016
4	1,791	18,250
5	1,793	18,062
6	1,799	17,776
7	1,811	18,733
8	1,812	17,792
9	1,819	16,823
10	1,822	16,823
11	1,826	18,644
12	1,866	16,988
13	1,892	18,563

	N	=	13
Nº de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud " ΔX " =	0,0383	=	0,039
	" $\Delta X/2$ "	=	0,0195

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
1,720	1,759	1,739	1
1,759	1,798	1,778	4
1,798	1,837	1,817	6
1,837	1,876	1,856	1
1,876	1,915	1,895	1
Total =			13
La Media "Xmed" =			1,8080
Desviación Estándar "S" =			0,0395

D. máx media =	1,81	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	18,49	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.41. Tratamiento estadístico por suelo – compactación manual 12

Compactación:	Manual	Suelo:	A-7-6 (19)
----------------------	--------	---------------	------------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
Nº de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	1,701	19,612
2	1,704	19,073
3	1,713	17,854
4	1,720	16,767
5	1,727	19,471
6	1,743	17,873
7	1,761	16,983
8	1,764	19,660
9	1,766	18,119
10	1,768	18,793
11	1,769	18,865
12	1,780	16,537
13	1,787	18,876

	N	=	13
Nº de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud "ΔX" =	0,0215	=	0,022
	"ΔX/2"	=	0,0110

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
1,690	1,712	1,701	2
1,712	1,734	1,723	3
1,734	1,756	1,745	1
1,756	1,778	1,767	5
1,778	1,800	1,789	2
Total =			13
La Media "Xmed" =			1,7484
Desviación Estándar "S" =			0,0309

D. máx media =	1,75	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	17,61	%

Fuente: Elaboración propia

3.8.2. Compactación automática

Tabla 3.42. Tratamiento estadístico por suelo – compactación automática 1

Compactación:	Automática	Suelo:	A-1-a (0)
----------------------	------------	---------------	-----------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
Nº de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	2,092	6,361
2	2,097	7,131
3	2,101	6,178
4	2,103	6,784
5	2,105	7,058
6	2,110	6,875
7	2,115	6,427
8	2,117	6,982
9	2,135	6,010
10	2,143	7,160
11	2,151	7,145
12	2,186	6,717
13	2,189	6,627

	N	=	13
Nº de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud " ΔX " =	0,0243	=	0,025
	" $\Delta X/2$ "	=	0,0125

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
2,080	2,105	2,092	4
2,105	2,130	2,117	4
2,130	2,155	2,142	3
2,155	2,180	2,167	0
2,180	2,205	2,192	2
Total =			13
La Media "Xmed" =			2,1266
Desviación Estándar "S" =			0,0347

D. máx media =	2,13	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	6,46	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.43. Tratamiento estadístico por suelo – compactación automática 2

Compactación:	Automática	Suelo:	A-1-b (0)
----------------------	------------	---------------	-----------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
N° de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	2,055	7,751
2	2,059	7,589
3	2,061	7,763
4	2,063	7,612
5	2,063	7,734
6	2,066	7,680
7	2,070	7,589
8	2,071	7,693
9	2,074	7,757
10	2,075	7,616
11	2,078	7,662
12	2,079	7,569
13	2,081	7,634

	N	=	13
N° de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud "ΔX" =	0,0065	=	0,007
	"ΔX/2"	=	0,0035

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
2,052	2,059	2,055	2
2,059	2,066	2,062	4
2,066	2,073	2,069	2
2,073	2,080	2,076	4
2,080	2,087	2,083	1
Total =			13
La Media "Xmed" =			2,0679
Desviación Estándar "S" =			0,0090

D. máx media =	2,07	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	7,64	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.44. Tratamiento estadístico por suelo – compactación automática 3

Compactación:	Automática	Suelo:	A-2-4 (0)
----------------------	------------	---------------	-----------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
Nº de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm ³)	Humedad Óptima (%)
1	2,033	8,129
2	2,035	8,321
3	2,037	8,295
4	2,041	8,421
5	2,042	8,194
6	2,042	8,236
7	2,043	8,311
8	2,045	8,327
9	2,046	8,413
10	2,047	8,398
11	2,047	8,453
12	2,048	8,132
13	2,049	8,324

	N	=	13
Nº de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud "ΔX" =	0,0040	=	0,004
	"ΔX/2"	=	0,0020

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
2,031	2,035	2,033	2
2,035	2,039	2,037	1
2,039	2,043	2,041	4
2,043	2,047	2,045	4
2,047	2,051	2,049	2
Total =			13
La Media "Xmed" =			2,0419
Desviación Estándar "S" =			0,0052

D. máx media =	2,04	gr/cm ³
C.H.O. para D.máx media =	8,21	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.45. Tratamiento estadístico por suelo – compactación automática 4

Compactación:	Automática	Suelo:	A-2-5 (0)
----------------------	------------	---------------	-----------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
N° de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	2,002	8,361
2	2,004	8,398
3	2,009	8,321
4	2,012	8,268
5	2,015	8,345
6	2,017	8,192
7	2,019	8,236
8	2,021	8,198
9	2,023	8,404
10	2,037	8,068
11	2,042	8,252
12	2,042	8,483
13	2,044	8,402

	N	=	13
N° de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud " ΔX " =	0,0105	=	0,011
	" $\Delta X/2$ "	=	0,0055

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
1,997	2,008	2,002	2
2,008	2,019	2,013	5
2,019	2,030	2,024	2
2,030	2,041	2,035	1
2,041	2,052	2,046	3
Total =			13
La Media "Xmed" =			2,0223
Desviación Estándar "S" =			0,0161

D. máx media =	2,02	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	8,33	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.46. Tratamiento estadístico por suelo – compactación automática 5

Compactación:	Automática	Suelo:	A-2-6 (1)
----------------------	------------	---------------	-----------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
Nº de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	1,980	10,653
2	1,982	10,778
3	1,983	10,600
4	1,984	10,734
5	1,985	10,633
6	1,987	10,973
7	1,989	10,823
8	1,991	10,542
9	1,994	10,948
10	1,995	10,295
11	1,996	11,010
12	1,998	10,359
13	2,000	10,696

	N	=	13
Nº de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud " ΔX " =	0,0050	=	0,005
	" $\Delta X/2$ "	=	0,0025

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
1,978	1,983	1,980	3
1,983	1,988	1,985	3
1,988	1,993	1,990	2
1,993	1,998	1,995	4
1,998	2,003	2,000	1
Total =			13
La Media "Xmed" =			1,9888
Desviación Estándar "S" =			0,0068

D. máx media =	1,99	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	10,83	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.47. Tratamiento estadístico por suelo – compactación automática 6

Compactación:	Automática	Suelo:	A-2-7 (1)
----------------------	------------	---------------	-----------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
Nº de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	1,961	10,534
2	1,970	10,672
3	1,975	10,583
4	1,975	10,632
5	1,976	10,450
6	1,978	10,679
7	1,981	10,684
8	1,983	10,562
9	1,990	10,407
10	1,991	10,969
11	1,991	10,940
12	1,992	10,863
13	1,993	10,321

	N	=	13
Nº de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud " ΔX " =	0,0080	=	0,009
	" $\Delta X/2$ "	=	0,0045

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
1,957	1,966	1,961	1
1,966	1,975	1,970	3
1,975	1,984	1,979	4
1,984	1,993	1,988	4
1,993	2,002	1,997	1
Total =			13
La Media "Xmed" =			1,9797
Desviación Estándar "S" =			0,0100

D. máx media =	1,98	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	10,68	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.48. Tratamiento estadístico por suelo – compactación automática 7

Compactación:	Automática	Suelo:	A-3 (0)
----------------------	------------	---------------	---------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
Nº de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	1,647	12,756
2	1,654	12,158
3	1,656	11,793
4	1,659	11,894
5	1,660	12,453
6	1,666	11,866
7	1,667	11,843
8	1,674	11,983
9	1,681	11,849
10	1,682	11,899
11	1,684	11,633
12	1,689	12,562
13	1,690	12,700

	N	=	13
Nº de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud " ΔX " =	0,0108	=	0,011
	" $\Delta X/2$ "	=	0,0055

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
1,642	1,653	1,647	1
1,653	1,664	1,658	4
1,664	1,675	1,669	3
1,675	1,686	1,680	3
1,686	1,697	1,691	2
Total =			13
La Media "Xmed" =			1,6698
Desviación Estándar "S" =			0,0138

D. máx media =	1,67	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	11,90	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.49. Tratamiento estadístico por suelo – compactación automática 8

Compactación:	Automática	Suelo:	A-4 (2)
----------------------	------------	---------------	---------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
Nº de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	1,899	14,198
2	1,900	14,187
3	1,901	14,134
4	1,903	12,982
5	1,905	14,232
6	1,907	13,821
7	1,910	12,341
8	1,912	14,236
9	1,913	14,132
10	1,915	12,438
11	1,919	12,643
12	1,920	12,122
13	1,982	12,543

	N	=	13
Nº de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud " ΔX " =	0,0208	=	0,021
	" $\Delta X/2$ "	=	0,0105

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
1,889	1,910	1,899	6
1,910	1,931	1,920	6
1,931	1,952	1,941	0
1,952	1,973	1,962	0
1,973	1,994	1,983	1
Total =			13
La Media "Xmed" =			1,9152
Desviación Estándar "S" =			0,0229

D. máx media =	1,92	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	12,45	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.50. Tratamiento estadístico por suelo – compactación automática 9

Compactación:	Automática	Suelo:	A-5 (12)
----------------------	------------	---------------	----------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
Nº de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	1,811	14,371
2	1,822	14,239
3	1,842	14,433
4	1,853	14,249
5	1,862	13,738
6	1,877	14,362
7	1,889	13,389
8	1,901	14,452
9	1,907	14,250
10	1,910	14,093
11	1,911	14,121
12	1,918	12,421
13	1,919	12,785

	N	=	13
Nº de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud " ΔX " =	0,0270	=	0,027
	" $\Delta X/2$ "	=	0,0135

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
1,798	1,825	1,811	2
1,825	1,852	1,838	1
1,852	1,879	1,865	3
1,879	1,906	1,892	2
1,906	1,933	1,919	5
Total =			13
La Media "Xmed" =			1,8795
Desviación Estándar "S" =			0,0407

D. máx media =	1,88	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	14,16	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.51. Tratamiento estadístico por suelo – compactación automática 10

Compactación:	Automática	Suelo:	A-6 (11)
----------------------	------------	---------------	----------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
N° de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	1,698	17,893
2	1,699	17,453
3	1,702	16,943
4	1,709	18,963
5	1,712	16,745
6	1,713	17,389
7	1,715	18,122
8	1,732	17,741
9	1,743	15,750
10	1,745	16,190
11	1,749	16,300
12	1,750	18,590
13	1,754	16,438

	N	=	13
N° de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud "ΔX" =	0,0140	=	0,014
	"ΔX/2"	=	0,0070

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
1,691	1,705	1,698	3
1,705	1,719	1,712	4
1,719	1,733	1,726	1
1,733	1,747	1,740	2
1,747	1,761	1,754	3
Total =			13
La Media "Xmed" =			1,7238
Desviación Estándar "S" =			0,0220

D. máx media =	1,72	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	17,92	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.52. Tratamiento estadístico por suelo – compactación automática 11

Compactación:	Automática	Suelo:	A-7-5 (18)
----------------------	------------	---------------	------------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
Nº de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	1,659	19,630
2	1,682	18,921
3	1,697	19,012
4	1,701	17,874
5	1,705	18,593
6	1,720	17,751
7	1,722	17,455
8	1,724	19,303
9	1,730	17,649
10	1,732	18,783
11	1,732	19,312
12	1,734	18,522
13	1,737	19,127

	N	=	13
Nº de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud " ΔX " =	0,0195	=	0,020
	" $\Delta X/2$ "	=	0,0100

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
1,649	1,669	1,659	1
1,669	1,689	1,679	1
1,689	1,709	1,699	3
1,709	1,729	1,719	3
1,729	1,749	1,739	5
Total =			13
La Media "Xmed" =			1,7144
Desviación Estándar "S" =			0,0260

D. máx media =	1,71	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	18,07	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.53. Tratamiento estadístico por suelo – compactación automática 12

Compactación:	Automática	Suelo:	A-7-6 (19)
----------------------	------------	---------------	------------

"D.máx" ordenada de menor a mayor con su respectivo "C.H.O."		
Nº de Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
1	1,602	19,822
2	1,614	17,115
3	1,620	18,386
4	1,632	19,349
5	1,642	18,481
6	1,654	18,734
7	1,671	17,250
8	1,674	19,075
9	1,674	17,946
10	1,684	18,682
11	1,686	19,015
12	1,689	18,836
13	1,694	20,026

	N	=	13
Nº de Intervalo de clase "k" =	4,41	=	5
Amplitud " ΔX " =	0,0230	=	0,023
	" $\Delta X/2$ "	=	0,0115

Tabla de distribución de densidades máximas (D. máx)			
Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta
Mínimo	Máximo		
1,591	1,614	1,602	2
1,614	1,637	1,625	2
1,637	1,660	1,648	2
1,660	1,683	1,671	3
1,683	1,706	1,694	4
Total =			13
La Media "Xmed" =			1,6568
Desviación Estándar "S" =			0,0345

D. máx media =	1,66	gr/cm³
C.H.O. para D.máx media =	18,49	%

Fuente: Elaboración propia

3.9. Cuadro resumen de resultados

Tabla 3.54. Tabla resumen de resultados después del tratamiento estadístico

N°	Tipo de suelo	Compactación manual		Compactación automática	
		Densidad Máxima (gr/cm ³)	Humedad Óptima (%)	Densidad Máxima (gr/cm ³)	Humedad Óptima (%)
1	A-1-a (0)	2,18	7,41	2,13	6,46
2	A-1-b (0)	2,08	7,77	2,07	7,64
3	A-2-4 (0)	2,05	9,08	2,04	8,21
4	A-2-5 (0)	2,04	8,80	2,02	8,33
5	A-2-6 (1)	2,01	10,90	1,99	10,83
6	A-2-7 (1)	1,99	10,76	1,98	10,68
7	A-3 (0)	1,79	12,03	1,67	11,90
8	A-4 (2)	1,96	12,92	1,92	12,45
9	A-5 (12)	1,89	13,21	1,88	14,16
10	A-6 (11)	1,80	17,40	1,72	17,92
11	A-7-5 (18)	1,81	18,49	1,71	18,07
12	A-7-6 (19)	1,75	17,61	1,66	18,49

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Comparación de resultados finales de los suelos por compactación manual Próctor T-180 y compactación automática

Una vez culminado todos los cálculos y el tratamiento estadístico correspondiente a los resultados de los dos métodos que son, compactación manual Próctor T-180 y compactación automática, de los suelos clasificados por el método AASHTO, se realizó una comparación de los mismos lo cual se puede ver en la tabla 4.1.

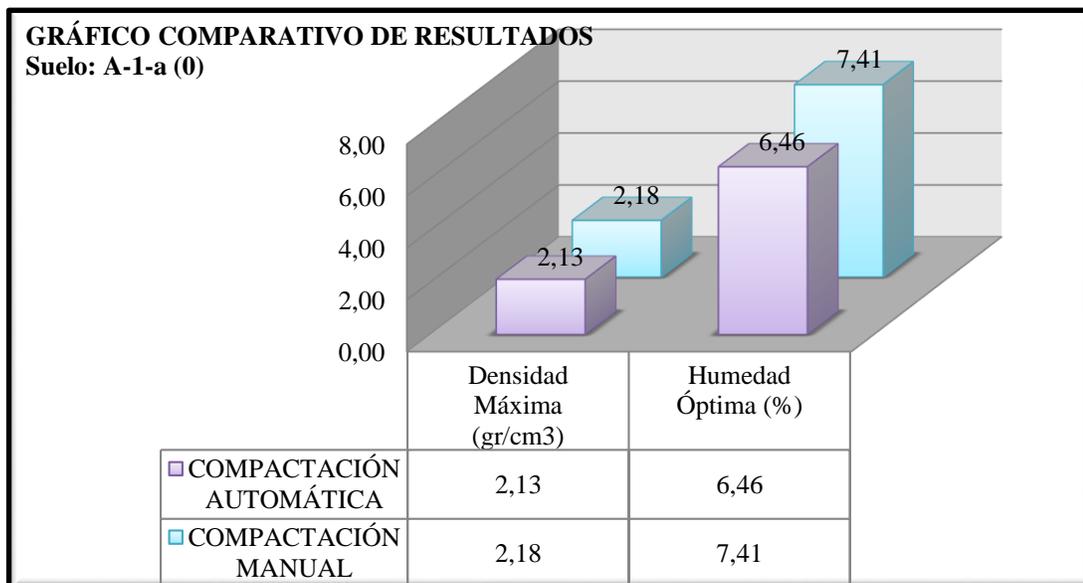
Tabla 4.1. Tabla resumen de resultados finales

N°	Tipo de suelo	Compactación manual		Compactación automática	
		Densidad Máxima (gr/cm ³)	Humedad Óptima (%)	Densidad Máxima (gr/cm ³)	Humedad Óptima (%)
1	A-1-a (0)	2,18	7,41	2,13	6,46
2	A-1-b (0)	2,08	7,77	2,07	7,64
3	A-2-4 (0)	2,05	9,08	2,04	8,21
4	A-2-5 (0)	2,04	8,80	2,02	8,33
5	A-2-6 (1)	2,01	10,90	1,99	10,83
6	A-2-7 (1)	1,99	10,76	1,98	10,68
7	A-3 (0)	1,79	12,03	1,67	11,90
8	A-4 (2)	1,96	12,92	1,92	12,45
9	A-5 (12)	1,89	13,21	1,88	14,16
10	A-6 (11)	1,80	17,40	1,72	17,92
11	A-7-5 (18)	1,81	18,49	1,71	18,07
12	A-7-6 (19)	1,75	17,61	1,66	18,49

Fuente: Elaboración propia

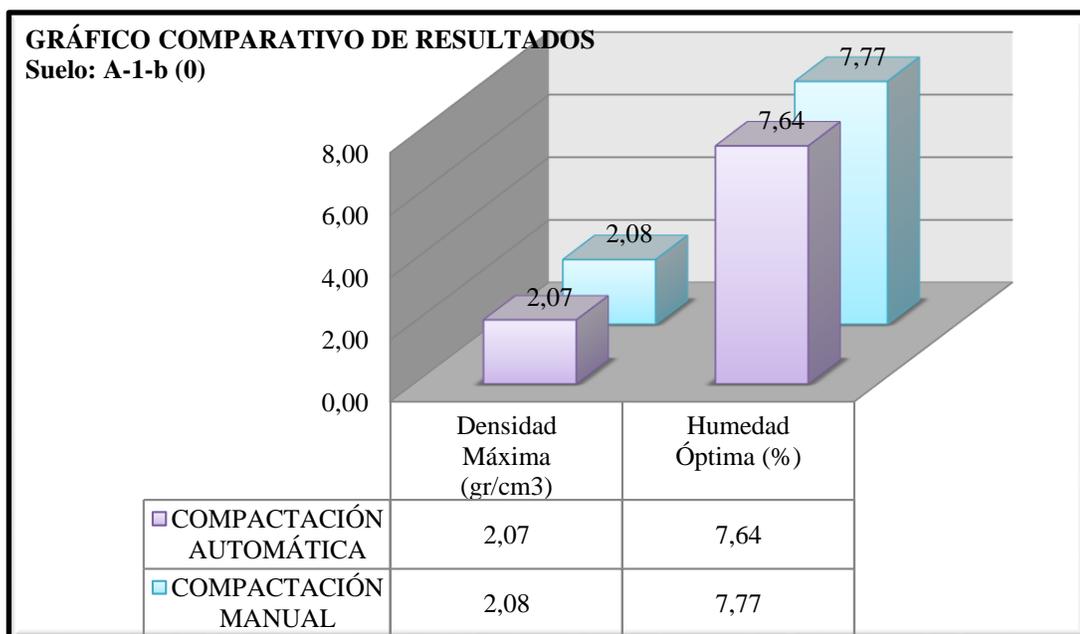
4.2. Gráficos comparativos de resultados finales según el tipo de suelo

Gráfico 4.1. Tabla comparativa de resultados por suelo, muestra 1



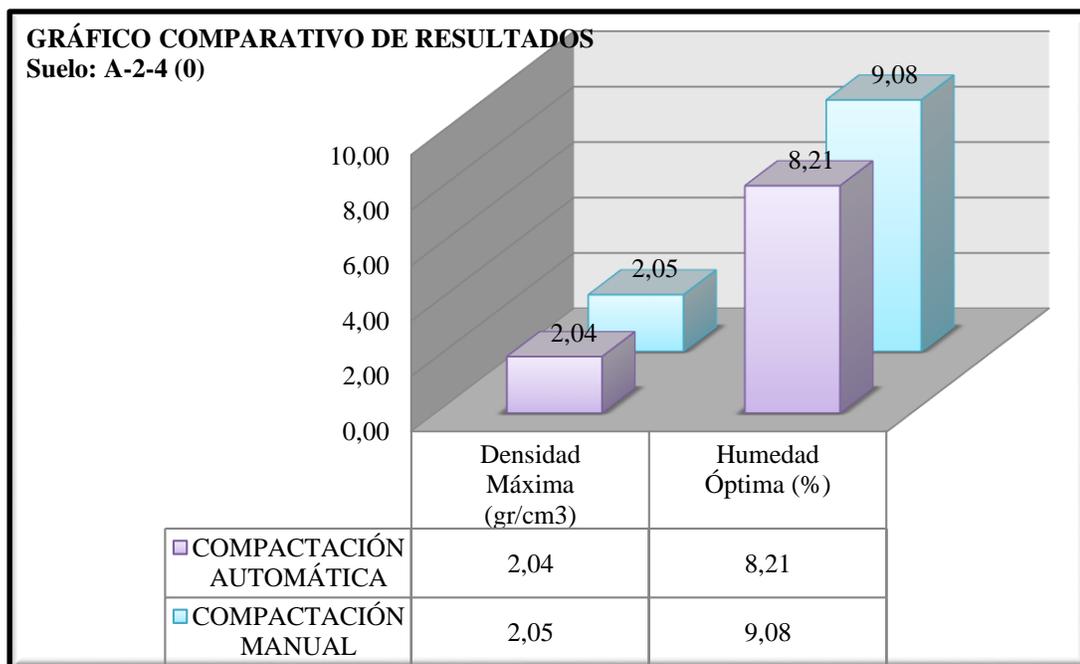
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2. Tabla comparativa de resultados por suelo, muestra 2



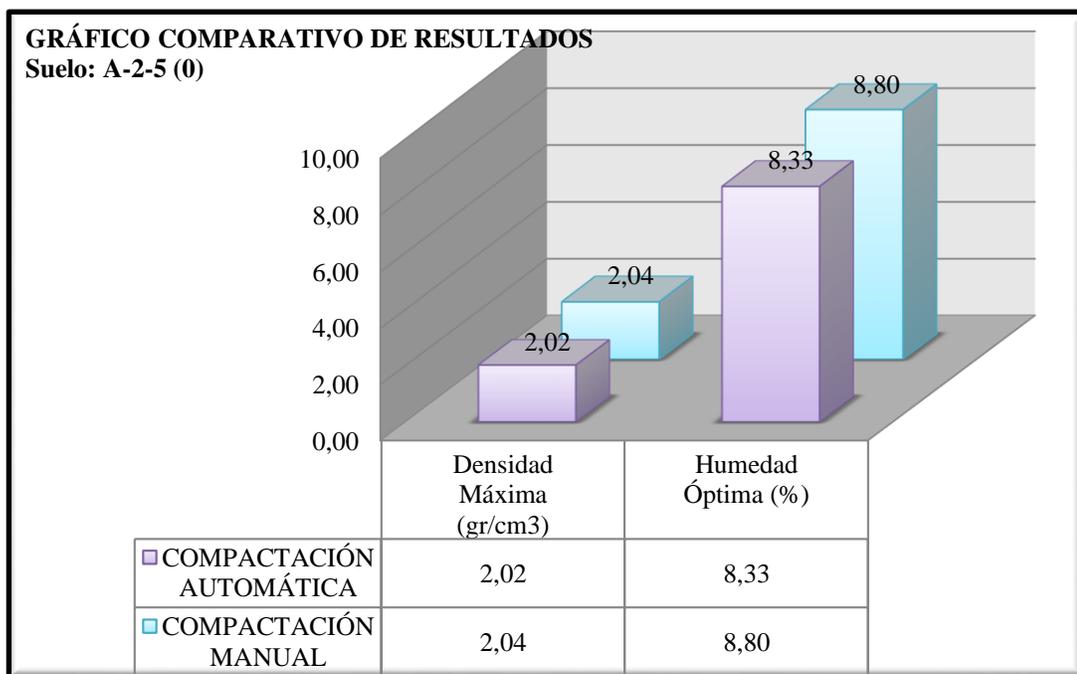
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.3. Tabla comparativa de resultados por suelo, muestra 3



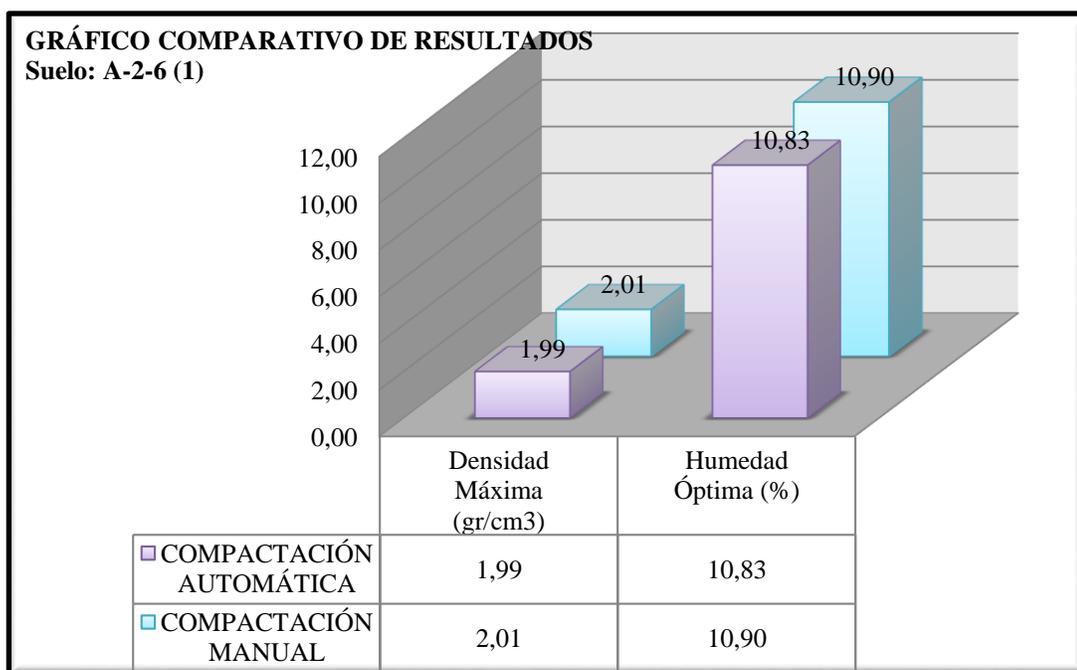
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.4. Tabla comparativa de resultados por suelo, muestra 4



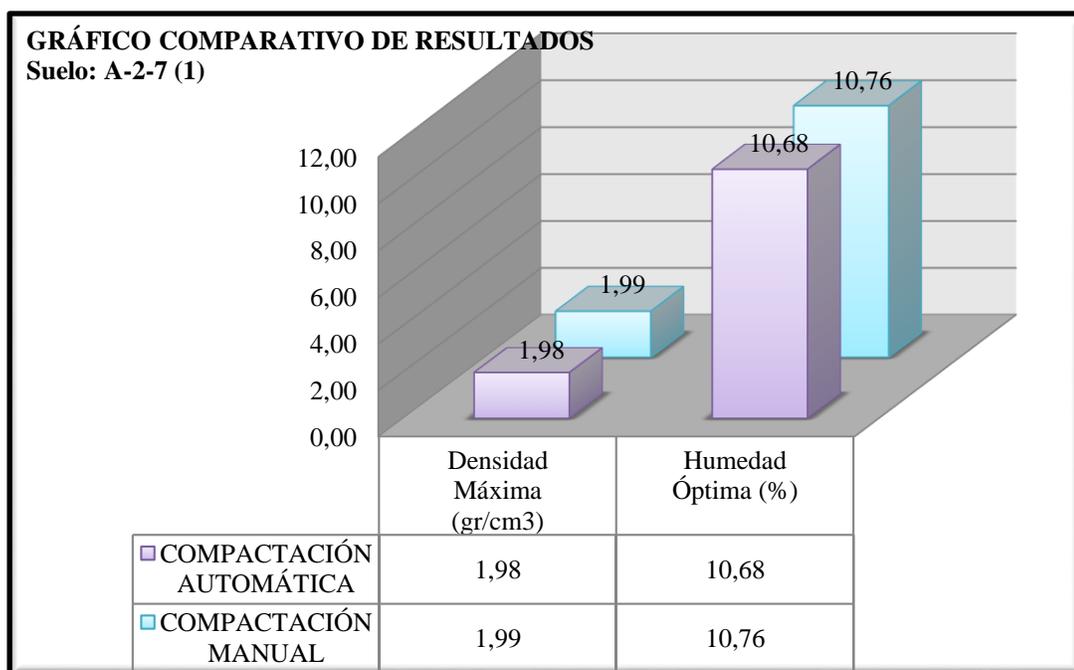
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.5. Tabla comparativa de resultados por suelo, muestra 5



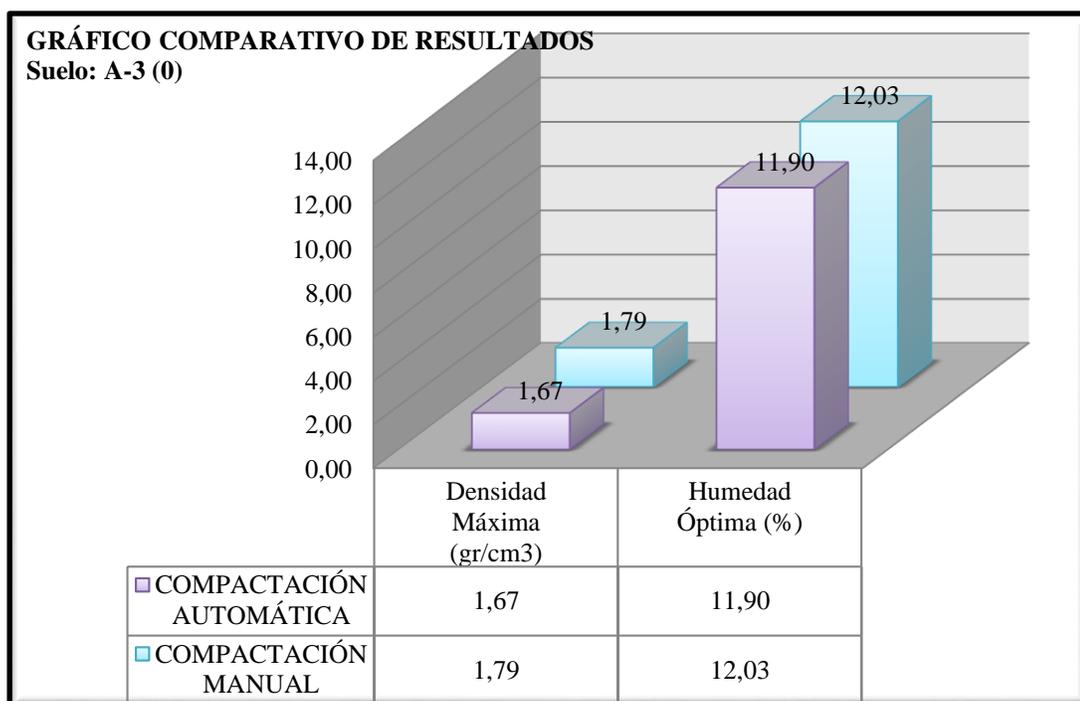
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.6. Tabla comparativa de resultados por suelo, muestra 6



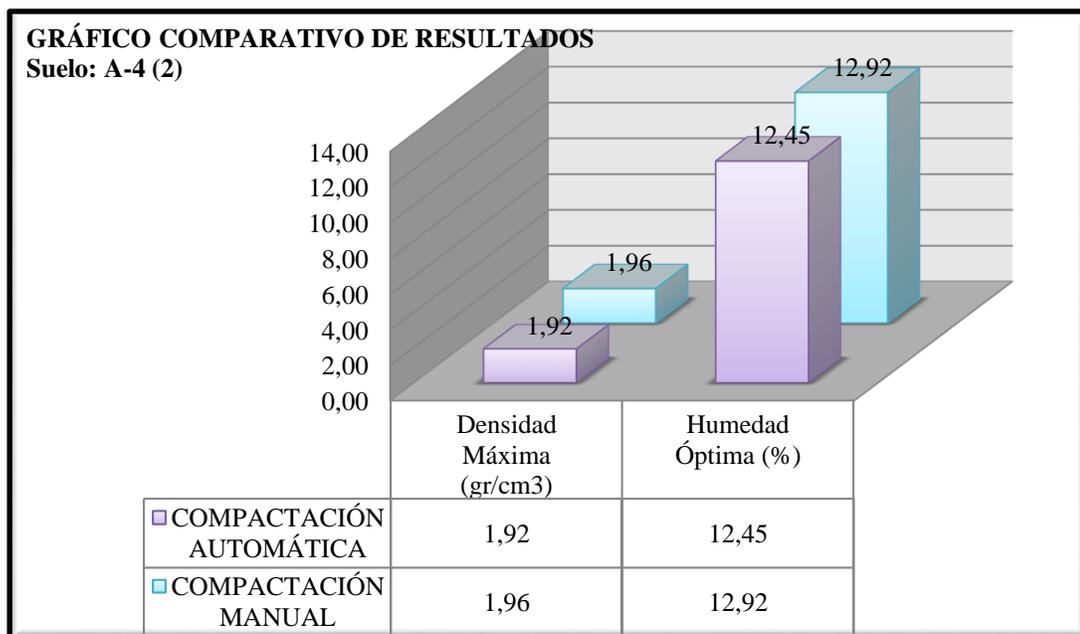
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.7. Tabla comparativa de resultados por suelo, muestra 7



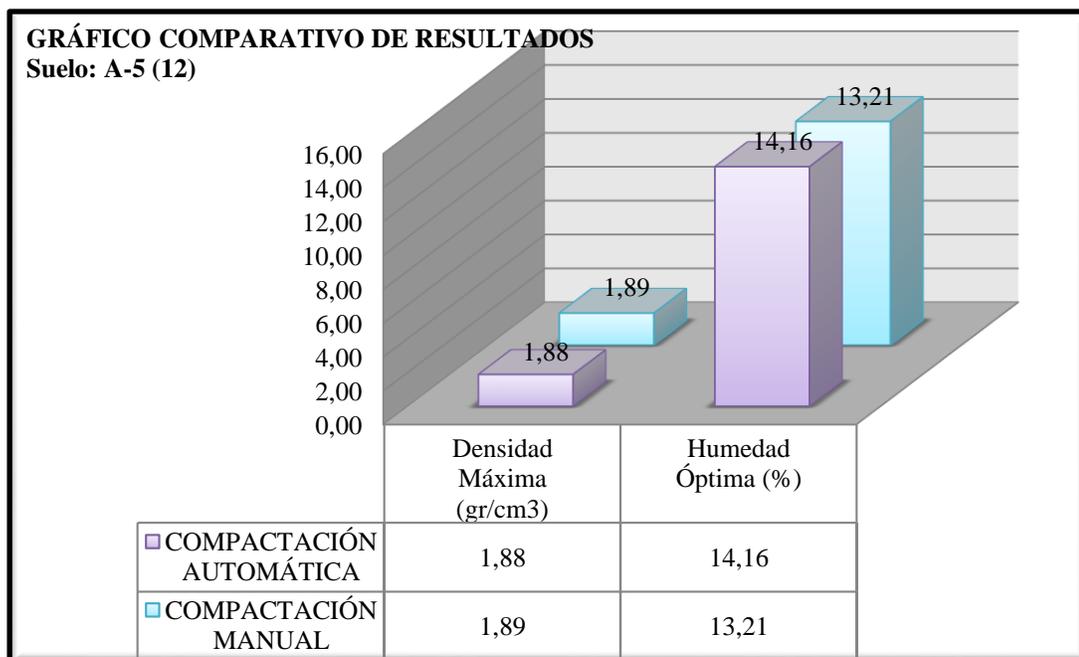
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.8. Tabla comparativa de resultados por suelo, muestra 8



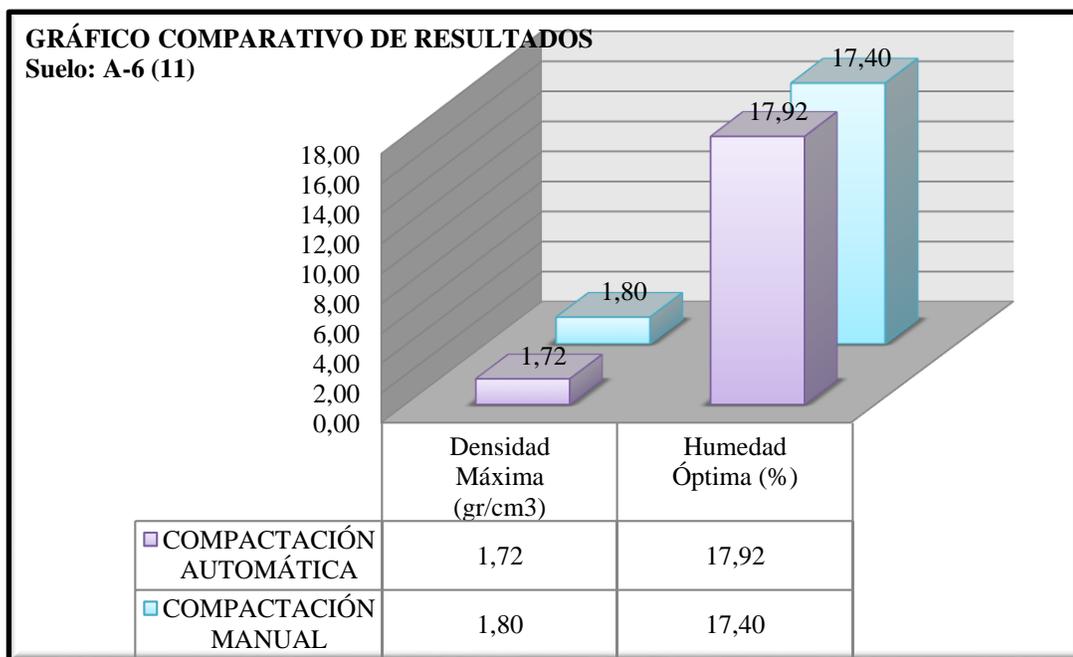
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.9. Tabla comparativa de resultados por suelo, muestra 9



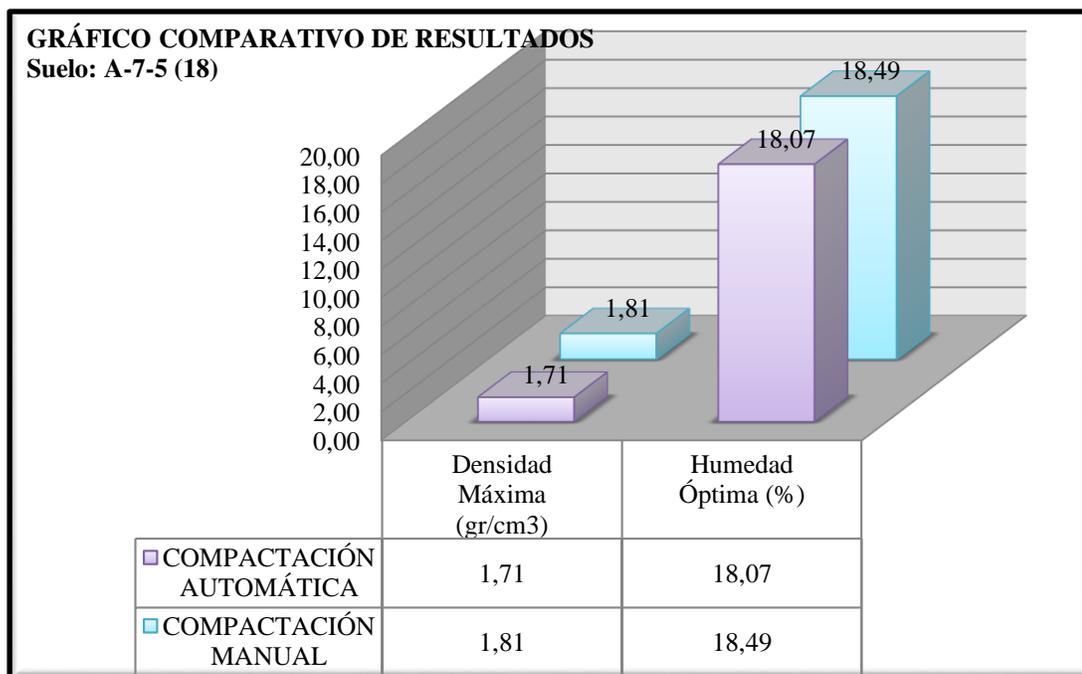
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.10. Tabla comparativa de resultados por suelo, muestra 10



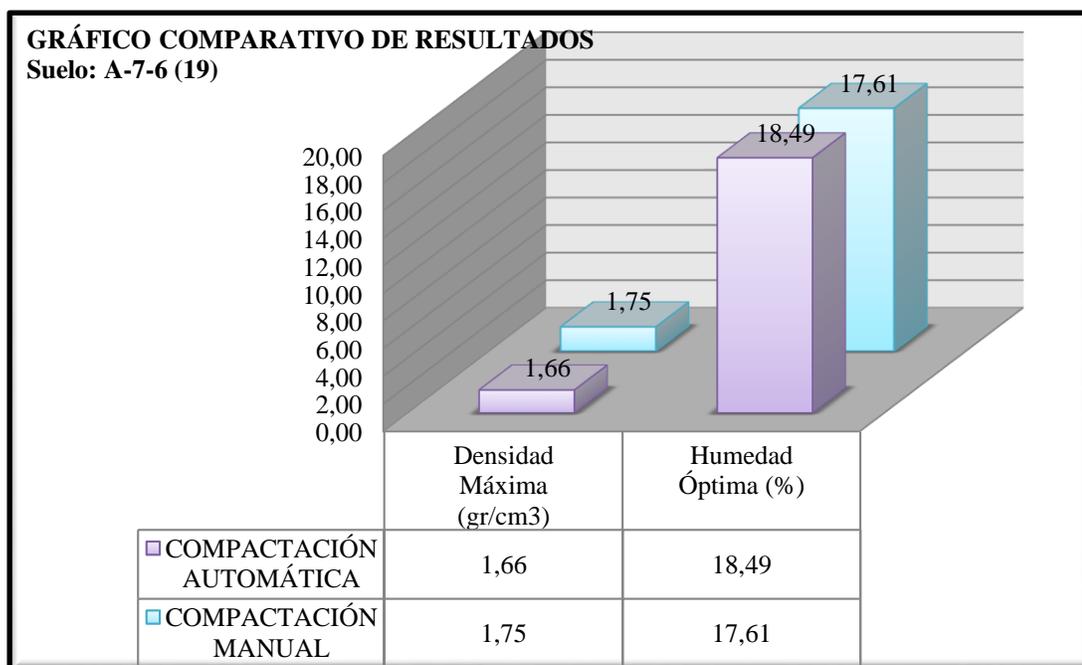
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.11. Tabla comparativa de resultados por suelo, muestra 11



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.12. Tabla comparativa de resultados por suelo, muestra 12



Fuente: Elaboración propia

4.3. Evaluación de resultados

4.3.1. Evaluación objetiva

En los gráficos anteriores se puede observar claramente la diferencia de resultados de densidades máximas y humedades óptimas, tanto para la compactación manual como para la compactación automática.

Donde se observa que los resultados de densidades máximas, es menor en la Compactación Automática respecto a la Compactación Manual, de todos los tipos de suelos.

Sin embargo, las humedades óptimas no tiene el mismo comportamiento ya que se observa que para las compactaciones automáticas comparadas con las compactaciones manuales, las humedades óptimas en los suelos granulares son menores y en los suelos finos son mayores, esto se debe a que el contenido de humedad aumenta a medida que el suelo vaya siendo más fino, ya que necesita mayor cantidad de agua para cubrir la superficie de cada partícula.

4.3.2. Evaluación subjetiva

Esta diferencia de resultados se debe, a que el martillo del compactador automático, no compacta uniformemente en todo el molde, es decir tiene un movimiento de compactación circular hacia los bordes, dejando de lado la parte central del molde.

En cambio, con la compactación manual se tiene un mejor control visual del área de compactado, que según la mano calificada del laboratorista, se tiene mayor probabilidad de compactación uniforme en todo el molde.

4.4. Cuadro de calificación según evaluación

Tabla 4.2. Coeficientes de corrección según el tipo de compactación

N°	TIPO DE SUELO	Patrón de calificación		Coeficiente de corrección	
		Compactación manual		Compactación automática	
		Densidad Máxima (gr/cm ³)	Humedad Óptima (%)	Densidad Máxima (gr/cm ³)	Humedad Óptima (%)
1	A-1-a (0)	1	1	0,97	0,87
2	A-1-b (0)	1	1	0,99	0,98
3	A-2-4 (0)	1	1	1,00	0,90
4	A-2-5 (0)	1	1	0,99	0,95
5	A-2-6 (1)	1	1	0,99	0,99
6	A-2-7 (1)	1	1	0,99	0,99
7	A-3 (0)	1	1	0,93	0,99
8	A-4 (2)	1	1	0,98	0,96
9	A-5 (12)	1	1	0,99	1,07
10	A-6 (11)	1	1	0,96	1,03
11	A-7-5 (18)	1	1	0,95	0,98
12	A-7-6 (19)	1	1	0,95	1,05

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.2 se propone un cuadro de coeficientes que, a partir del patrón de calificación, como es la Compactación Manual Próctor T-180, se obtiene un coeficiente de corrección para la Compactación Automática, es decir que, para obtener un resultado más exacto del estudio de compactación, es necesario multiplicar el coeficiente de corrección para cada Densidad Máxima Seca y Contenido de Humedad Óptimo que genere una Compactación Automática, según el tipo de suelo. Es así genera la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad Máx}_{\text{MANUAL}} = \text{Coeficiente}_{\text{Densidad Máx}} * \text{Densidad Máx}_{\text{AUTOMÁTICA}}$$

$$\text{Humedad Óptima}_{\text{MANUAL}} = \text{Coeficiente}_{\text{Humedad Óptima}} * \text{Humedad Óptima}_{\text{AUTOMÁTICA}}$$

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

En base a los objetivos planteados, se describen las siguientes conclusiones:

- Teóricamente se establece las principales características y funcionamiento de los equipos de compactación automática y Próctor T-180.
- Se logró identificar los bancos de material para poder obtener los agregados gruesos y finos necesarios para realizar los ensayos, los cuales fueron extraídos de la comunidad de Turumayo y Aranjuez, según la clasificación AASHTO que corresponden los suelos A-1-a(0), A-1-b(0), A-2-4(0), A-2-5(0), A-2-6(1), A-2-7(1), A-3(0), A-4(2), A-5(12), A-6(11), A-7-5(18), A-7-6(19); los mismos que fueron empleados para los ensayos de compactación manual Próctor T-180 tradicional y compactación automática.
- Se determinó a través de los ensayos de compactación, la densidad máxima seca y la humedad óptima de los doce tipos de suelo en estudio, tanto para la compactación automática como para la compactación manual Próctor T-180 tradicional.
- A partir de la comparación, se realizó una evaluación objetiva logrando calificar de los resultados de la compactación automática respecto a un patrón de calificación como es la compactación manual Próctor T-180 tradicional.

- En la evaluación objetiva se describió y calificó el procedimiento para llevar a cabo ambos métodos de compactación, donde se muestra una clara diferencia del mecanismo del compactado.
- Para el tratamiento estadístico, se definió un grado de confiabilidad igual al 95%, ya que es el porcentaje que más se asemeja al número de ensayos realizados en este estudio.
- Se observó la similitud de resultados obtenidos después de compactar un mismo suelo en cuanto a las densidad máxima seca y humedad óptima lo cual indica que el equipo tiene un rendimiento casi constante y no presenta mucha variación por lo que presenta una confiabilidad del equipo para realizar ensayos.
- Como sugerencia, al momento de compactar con el compactador automático, se debe calibrar el compactador, para que compacte la mitad de golpes a los costados del molde y la otra mitad de golpes al centro del molde para que los golpes sean uniformes en todo el molde.
- El tiempo que se tarda en realizar el ensayo de compactación automático es mucho menor que el tiempo que se tarda en realizar el ensayo de compactación manual Próctor T-180, esto nos lleva a que podemos ahorrar tiempo y tener los resultados de densidad máxima y humedad óptima en un lapso más corto, haciendo uso del respectivo coeficiente de corrección propuesto en este trabajo.

5.2. Recomendaciones

Tomando en cuenta los métodos empleados de compactación manual Próctor T-180 y método de compactación automático, se puede mencionar algunas sugerencias que se deben tomar en cuenta para obtener mejores resultados:

- Se debe tener en cuenta que el suelo deberá estar libre de material vegetal, el cuál influye en gran manera en la densidad que debe tener el suelo una vez compactado en obra.
- Se establece que un suelo debe estar bien compactado y resistente, deberá tener una cantidad apropiada de humedad, cuando existe un déficit de humedad el suelo se vuelve vulnerable y no apto para su aplicación en alguna obra, porque puede ser afectado directamente por los agentes atmosféricos.
- Se aconseja que los agregados estén completamente limpios en lo posible para asegurar buenos resultados de densidad máxima y humedad óptima.
- Se recomienda total cuidado en la ejecución de los ensayos de caracterización del material de manera de obtener mejores resultados.
- Al momento de compactar con el compactador automático, se recomienda calibrar el compactador, para que compacte la mitad de golpes a los costados del molde y la otra mitad de golpes al centro del molde para que los golpes sean uniformes en todo el molde.
- Se recomienda tomar en cuenta este trabajo de investigación para los ensayos de laboratorio de suelos sobre todo para el ensayo de compactación como una alternativa más para determinar la densidad seca máxima y humedad óptima real, cuando hagan uso del compactador automático.