



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE AGREGADO EN LA
DENSIDAD SECA MÁXIMA Y CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMO EN SUELOS
GRANULARES MEDIANTE EL ENSAYO PROCTOR MODIFICADO EN LA CIUDAD
DE QUITO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

título de Ingenieros Civiles

AUTORES: Jefferson Matheo Quinchimba Rodríguez
Alisson Monserrate Yánez Vinocunga
TUTOR: Juan Pablo Tarambís Rodríguez

Quito – Ecuador

2024

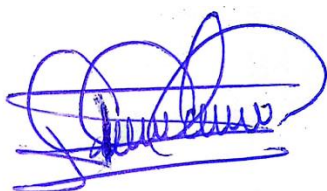
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Jefferson Matheo Quinchimba Rodríguez con documento de identificación N° 1727370262 y Alisson Monserrate Yánez Vinocunga con documento de identificación N° 1752468049; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 26 de septiembre del 2024

Atentamente,



Jefferson Matheo Quinchimba Rodríguez
1727370262



Alisson Monserrate Yánez Vinocunga
1752468049

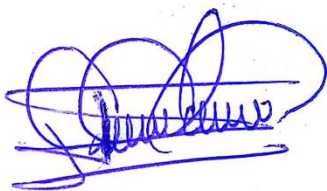
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Jefferson Matheo Quinchimba Rodríguez con documento de identificación N° 1727370262 y Alisson Monserrate Yánez Vinocunga con documento de identificación N° 1752468049; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto de Investigación: “Evaluación de la influencia del tamaño de agregado en la densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo en suelos granulares mediante el ensayo Proctor modificado en la ciudad de Quito”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 26 de septiembre del 2024

Atentamente,



Jefferson Matheo Quinchimba Rodríguez
1727370262



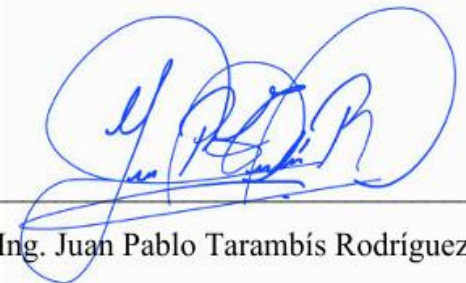
Alisson Monserrate Yánez Vinocunga
1752468049

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Juan Pablo Tarambís Rodríguez con documento de identificación N° 1715336879, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE AGREGADO EN LA DENSIDAD SECA MÁXIMA Y CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMO EN SUELOS GRANULARES MEDIANTE EL ENSAYO PROCTOR MODIFICADO EN LA CIUDAD DE QUITO, realizado por Jefferson Matheo Quinchimba Rodríguez con documento de identificación N° 1727370262 y Alisson Monserrate Yáñez Vinocunga con documento de identificación N° 1752468049, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto de Investigación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 26 de septiembre del 2024

Atentamente,



Ing. Juan Pablo Tarambís Rodríguez MSc.
1715336879

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE AGREGADO EN LA DENSIDAD SECA MÁXIMA Y CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMO EN SUELOS GRANULARES MEDIANTE EL ENSAYO PROCTOR MODIFICADO EN LA CIUDAD DE QUITO

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF AGGREGATE SIZE ON THE MAXIMUM DRY DENSITY AND OPTIMAL MOISTURE CONTENT IN GRANULAR SOILS USING THE MODIFIED PROCTOR TEST IN THE CITY OF QUITO

Jefferson Quinchimba - Rodríguez¹, Alisson Yáñez - Vinocunga², Juan Tarambis - Rodríguez³

Resumen

Durante el desarrollo de esta investigación se ha trabajado de una manera integral tomando en cuenta la forma teórica y práctica para determinar la influencia del tamaño de agregado en la densidad seca máxima en suelos granulares para comprender como cambiando el porcentaje de agregado grueso puede mejorar las propiedades mecánicas dando paso al incremento del grado de compactación, determinando por medio del ensayo Proctor Modificado definiendo la humedad óptima. Este estudio promueve mejoras en la construcción mediante la optimización de las propiedades del suelo, beneficiando a la comunidad constructora al proporcionar datos clave para el diseño y ejecución de proyectos. Al comprender como el tamaño de agregado afecta la densidad y humedad del suelo, se pueden implementar prácticas más eficientes y sostenibles en construcción.

Palabras Clave: Densidad Seca Máxima, Humedad Óptima, Compactación, Proctor Modificado, Agregado pétreo.

Abstract

During the development of this research, work has been done in a comprehensive manner considering the theoretical and practical way to determine the influence of aggregate size on the maximum dry density in granular soils to understand how changing the percentage of coarse aggregate can improve the properties. mechanics giving way to increasing the degree of compaction, determining through the Modified Proctor test defining the optimal humidity. This study promotes construction improvements by optimizing soil properties, benefiting the construction community by providing key data for project design and execution. By understanding how aggregate size affects soil density and moisture, more efficient and sustainable construction practices can be implemented.

Keywords: Maximum Dry Density, Optimal Humidity, Compaction, Modified Proctor, Stone Aggregate.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador.

² Estudiante de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador.

³ Docente de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador.

Autor para correspondencia: jquinchimbar@est.ups.edu.ec; ayanezv1@est.ups.edu.ec

1 Introducción

En la ciudad de Quito se han identificado problemas significativos con la calidad del suelo, lo que supone una dificultad añadida para proyectos de construcción, infraestructura, ámbito de ingeniería civil en general. Este estudio tiene como objetivo abordar estos desafíos con el propósito de mejorar la compactación que está ligada a la densidad seca máxima de cinco suelos granulares ubicados en distintos lugares de la ciudad de Quito.

Los resultados obtenidos no solo serán de beneficio para la comunidad de constructores, sino también para profesionales en campo como la geotecnia proporcionando información importante y de gran interés sobre el porcentaje y el tamaño del agregado óptimo. Este estudio se centra en demostrar qué tamaño y porcentaje de agregado son los adecuados para obtener la máxima densidad seca, lo que permitirá una mayor eficiencia al momento de mejorar el suelo, estos datos ayudarán a fomentar las prácticas sostenibles en la construcción y permitirán una mejor ejecución de proyectos, incrementando la capacidad del suelo para abordar los mismos, a partir del ensayo Proctor modificado que se expondrá a lo largo de este artículo.

En la tabla 1 se puede apreciar los sitios escogidos para los ensayos dedicados a este artículo.

Tabla 1. Sitios ubicados en la ciudad de Quito para los ensayos pertinentes

N de Muestra	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Lugar	Sur de Quito	Cutuglagua	San Fernando de Guamaní	Valle de Tumbaco	Norte de Quito

2 Materiales y Métodos

2.1 Relaciones fundamentales del suelo

“Las propiedades intrínsecas del suelo (arena, limo, arcilla y materia orgánica) pueden predecir el contenido óptimo de agua y las curvas de compactación Proctor, lo que ayuda en la descomposición de agregado inducida por la labranza ” [1].

Por lo tanto, se tendrá las relaciones fundamentales (Relaciones volumétricas y relaciones Gravimétricas) mostradas en la tabla 2 de los cinco suelos ubicados en la ciudad de Quito para tener un análisis preciso y detallado de los cuales posteriormente serán analizados para obtener una conclusión que aportara a la comunidad en la construcción.

En la figura 1 se aprecia el modelo bifásico y trifásico que permite una mejor comprensión para las relaciones fundamentales a obtener.



Figura 1. Modelos bifásico y trifásico del suelo.

En la figura 2 se aprecia el modelo trifásico con sus respectivos componentes de las relaciones fundamentales a obtener.

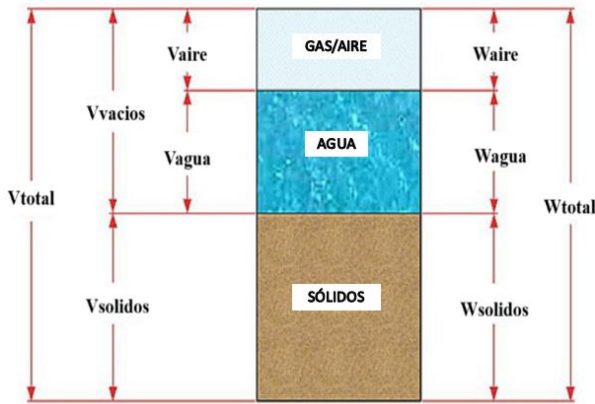


Figura 2. Modelo trifásico del suelo con sus componentes.

A continuación, en la tabla 2 se destaca las relaciones fundamentales con sus respectivas ecuaciones

Tabla 2. Relaciones fundamentales con su respectiva ecuación

Relación	Ecuación	Descripción
Relaciones volumétricas		
Porosidad (n)	$n = \frac{V_v}{V_t}$	Relación entre el volumen de vacíos y el volumen total.
Índice de vacíos (e)	$e = \frac{V_v}{V_s}$	Relación entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos.
Grado de saturación (S_r)	$S_r = \frac{V_w}{V_v}$	Proporción del volumen de vacíos que está ocupada por agua.
Relaciones Gravimétricas		
Contenido de Humedad (ω)	$\omega = \frac{W_w}{W_s}$	Relación entre el peso del agua y el peso de sólidos.
Densidad natural (ρ)	$\rho = \frac{W_t}{V_t}$	Densidad del suelo, incluyendo el contenido del agua.
Densidad seca (ρ_d)	$\rho_d = \frac{W_s}{V_t}$	Densidad del suelo, considerando sólo los sólidos.
Densidad saturada (ρ_{sat})	$\rho_{sat} = \frac{W_s + W_w}{V_t}$	Densidad del suelo, cuando todos los vacíos están llenos de agua.
Gravedad específica (G_s)	$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$	Relación entre la densidad de los sólidos y la densidad del agua.

2.1.1 Porosidad

La porosidad es una propiedad fundamental del suelo que afecta su capacidad de retener y transmitir agua y aire, en la ingeniería civil, la porosidad es crucial y muy importante para determinar las propiedades como resistencia, durabilidad y velocidad de filtración de los suelos. Suelos con alta porosidad tienden a ser más ligeros, pero menos resistentes.

“Existen vínculos mecánicos entre las propiedades químicas del suelo, la formación de agregados y la porosidad del suelo, siendo los agregados hidroestables más afectados que los agregados tamizados en seco” [2].

En la tabla 3 se puede observar los valores de la porosidad de las cinco muestras de suelo para entender el comportamiento del suelo.

Tabla 3. Porosidad de las muestras de suelo.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Porosidad (n)	0.4737	0.4200	0.5300	0.4652	0.4682

2.1.2 Índice de vacíos

El índice de vacíos o relación de vacíos se refiere a la misma propiedad del suelo, esta proporciona información sobre la densidad y compactación del suelo se puede decir que un índice de vacíos más alto indica un suelo menos compacto con más espacios vacíos, mientras que un índice de vacíos más bajo indica un suelo más compacto con menos espacios vacíos.

“El índice de vacíos de aire en el suelo puede evaluar eficazmente la compactación del suelo sin requerir pruebas de laboratorio, pero no evalúa directamente el contenido de agua” [3]. Aunque no proporciona una medida directa del contenido de agua como anteriormente se expuso, se puede

complementar con más información para la gestión de las aplicaciones en este artículo.

En la tabla 4 se puede observar los valores del índice de vacíos de las cinco muestras de suelo.

Tabla 4. Índice de vacíos de las muestras de suelo.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Relación de vacíos (e)	0.900	0.7192	1.1277	0.8732	0.8970

2.1.3 Grado de Saturación

El grado de saturación es un parámetro que indica la proporción del volumen de vacíos del suelo que está ocupado por agua, generalmente se expresa como un porcentaje, el grado de saturación puede estar desde 0% cuando el suelo está completamente seco y 100% cuando todos los vacíos están llenos de agua, en otras palabras, está completamente saturado.

“La relación mejorada para el grado de saturación en suelos no saturados incorpora cambios en la relación de vacíos y puede representar cambios irreversibles y cambios causados por el corte” [4]. Esta visión sugiere que el método de compactación no solo considera la densidad del suelo, también el grado de saturación y como este puede cambiar debido a diversas condiciones.

En la tabla 5 se puede observar los valores del grado de saturación de las cinco muestras de suelo.

Tabla 5. Grado de saturación de las muestras de suelo.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Grado de saturación % (S)	90.08	72.16	89.39	79.58	82.52

2.1.4 Contenido de Agua (humedad)

El contenido de agua o humedad del suelo es la cantidad de agua presente en el suelo que afecta en gran medida las propiedades y el

comportamiento de los suelos porque incide directamente en la capacidad de carga, la estabilidad del suelo compactado entre otras propiedades.

“El contenido de humedad en la compactación afecta significativamente el comportamiento mecánico de los suelos, aumentando la deformación permanente a medida que aumenta el contenido de humedad en el lado húmedo de la curva de compactación”. [5] En este contexto posteriormente se hablará de la humedad óptima para tener una densidad seca máxima y en consecuencia mejorar la compactación en suelos granulares.

En la tabla 6 se puede observar los valores de la humedad natural de las cinco muestras de suelo.

Tabla 6. Humedad natural de las muestras de suelo.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Humedad natural % (H)	30.5125	19.6659	38.1735	26.0101	28.1031

2.1.5 Densidad natural (húmeda) del suelo

La densidad natural, también conocida como densidad húmeda se define como la masa total del suelo (incluye la masa de los sólidos y la masa del agua) dividida por el volumen total del suelo, esta influye en la capacidad de carga del suelo, los suelos más densos pueden soportar mayores cargas, lo cual es muy importante para la industria de la construcción.

“La densidad natural influye significativamente en las propiedades de retención de agua de los suelos granulares, y se pueden utilizar técnicas para lograr una densidad óptima para suelos granulares” [6], el artículo citado aporta un preámbulo de las hipótesis que se tiene para realizar este artículo científico y posteriormente proporcionar una base sólida para mejorar la práctica y los métodos constructivos.

En la tabla 7 se puede observar los valores de la densidad natural de las cinco muestras de suelo.

Tabla 7. Densidad de partículas de las muestras de suelo.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Densidad natural (g/cm ³)	1.8215	1.8388	1.7184	1.7907	1.7846

2.1.6 Densidad seca del suelo

La densidad seca del suelo se refiere a la masa de sólidos del suelo por unidad de volumen cuando toda el agua ha sido eliminada del suelo, esta es importante para determinar la calidad de compactación en campo como en laboratorio.

“La densidad seca influye significativamente en el comportamiento del agua en el suelo, incluidas las tasas de saturación y desaturación, los valores de entrada y expulsión de aire”. [7]. En este ensayo de laboratorio, se ha considerado la densidad seca del suelo para llevar a cabo la prueba de compactación, además para posteriormente incrementar el contenido de agua con el objetivo de mejorar la eficiencia del proceso de compactación.

En la tabla 8 se puede observar los valores de la densidad seca de partículas de las cinco muestras de suelo.

Tabla 8. Densidad seca de partículas de las muestras de suelo.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Densidad seca (g/cm ³)	1.3956	1.5366	1.2437	1.4211	1.3931

2.1.7 Densidad Saturada del suelo

La densidad saturada proporciona un límite superior teórico del contenido de agua en un suelo, conocer la densidad saturada ayuda a evitar la sobre saturación del suelo, lo que podría afectar directamente la eficacia de la compactación que busca aumentar la densidad del suelo, disminuyendo vacíos y expulsando aire no obstante compactar el suelo hasta la densidad saturada no siempre es deseable ya que el exceso de agua puede reducir la capacidad portante del suelo en consecuencia aumentar la susceptibilidad al asentamiento y deslizamiento.

“La compactación aumenta la densidad aparente del suelo y disminuye la porosidad reduciendo la permeabilidad”. [8]

La densidad saturada del suelo es un parámetro crucial en la geotecnia, describe el estado del suelo cuando está completamente saturado. En el contexto de compactación conocer la densidad saturada para ajustar adecuadamente el contenido de agua en el suelo a ensayar y lograr una compactación eficiente garantizando estabilidad y resistencia del suelo compactado.

En la tabla 9 se puede observar los valores de la densidad saturada de partículas de las cinco muestras de suelo.

Tabla 9. Densidad saturada de partículas de las muestras de suelo.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Densidad Saturada (g/cm ³)	1.8721	1.9546	1.7728	1.8887	1.8646

2.1.8 Gravedad Específica del suelo

La gravedad específica es necesaria para calcular la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo para tener una compactación efectiva, suelos con mayor

gravidad específica generalmente tiene una mayor densidad seca máxima, lo que se puede compactar a una densidad más alta con la misma cantidad de energía de compactación, se utiliza para calcular las relaciones volumétricas y gravimétricas para entender como el suelo responde a la compactación, en otras palabras suelos con mayor gravedad específica tiende a tener menos vacíos y una mayor densidad como se habló anteriormente.

“La incertidumbre ampliada de los resultados de las mediciones para la gravedad específica de las muestras de suelos es de 0.005 en las condiciones de prueba propuestas, principalmente debido al pesaje y la falta de homogeneidad”. [9]

La gravedad específica es un parámetro fundamental en la geotecnia, y la incertidumbre ampliada como se citó anteriormente es de ± 0.005 , en las mediciones destaca la necesidad de un control cuidadoso en las pruebas de laboratorio para así asegurar la precisión en estos resultados, es fundamental para obtener datos fiables y ajustados a la realidad.

Tabla 10. Gravedad Especifica de las muestras de suelo.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Gravedad Especifica (Gs)	2.6570	2.6418	2.6462	2.6619	2.6427

En la tabla 10 se puede observar los valores de la gravedad específica de las cinco muestras de suelo.

2.2 Clasificación SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)

2.2.1 Granulometría

La granulometría, es el sistema más utilizado en la ingeniería para clasificar los suelos, tiene

como principal objetivo dividir en cinco tipos principales: Gravas (G), Arenas (S), Arcillas (C), Limos (M) y Orgánicos (O). [11]

Al utilizar este método se verifica si se categorizó como suelos granulares o cohesivos, además, comprueba el tipo de tamaño de las partículas de los suelos, ya que este puede influenciar en la densidad del material. [11]

La figura 3 indica un ejemplo de curva granulométrica.

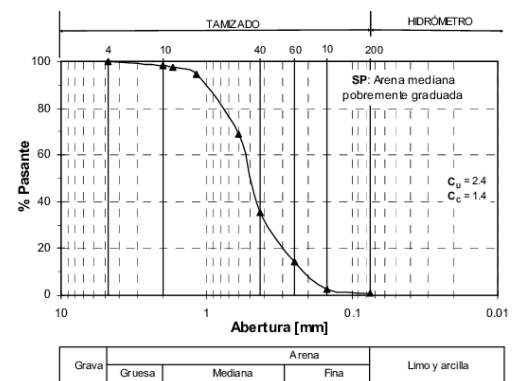


Figura 3. Curva Granulométrica

Al realizar la Granulometría, las muestras arrojaron los siguientes resultados:

Parámetros para verificar el tipo de suelo:

$C_u \geq 6$ o $1 \leq C_c \leq 3$ para arenas bien graduadas y $C_u \geq 4$ o $1 \leq C_c \leq 3$ para gravas bien graduadas.

	Mue stra 1		Mue stra 2		Mue stra 3		Mue stra 4		Mue stra 5	
C u y C c	Cu	Cc	Cu	Cc	Cu	Cc	Cu	Cc	Cu	Cc
	22.61	0.08	17.11	0.07	15.93	0.07	6.10	0.42	1.12	1.03
	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✗
Tipo	S P		S P		S P		S P		S P	

Tabla 11. Resultados de Granulometría

Definición:

S: Arena y P: Pobremente graduada.

Cu: Coeficiente de Uniformidad

Cc: Coeficiente de Curvatura

La tabla 11 indica los tipos de suelos, que se han ensayado, para entender el comportamiento del suelo compactado.

2.2.2 Límites de Atterberg

También se emplean los “límites de consistencia del suelo (Límite Plástico y Límite Líquido), para poder obtener el Índice de Plasticidad y trabajar con la carta de Plasticidad” [12]

Esto lleva a cuatro categorías: Arcilla de baja CL), Arcilla de alta plasticidad (CH), Limo de baja plasticidad (ML), Limo o arcilla orgánico de plasticidad baja (OL), Limo de alta plasticidad (MH), Arcilla o limo orgánica de alta plasticidad (OH). [12]

Al implementar este ensayo, se comprueba el tipo de consistencia de los suelos, ya que dicha consistencia puede facilitar la relatividad con la cual se puede deformar un suelo, también ayuda a clasificar el suelo con ayuda del índice de plasticidad. [12]

Al realizar los Límites de Atterberg, las muestras arrojaron los siguientes resultados:

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
LL	40.53	34.16	49.82	24.88	26.21
LP	27.32	25.34	37.07	22.69	22.33
IP	13.21	8.82	12.75	2.19	3.88

Tabla 12. Resultados de Límites de Atterberg

La tabla 12 indica los Límites de Atterberg, de los suelos ensayados para entender el comportamiento del suelo.

2.3 Compactación

2.3.1 Proctor Modificado

“El Proctor Modificado aplica una energía mayor (aproximadamente 4,5 veces la del Proctor Normal), esta diferencia es fundamental, ya que refleja las diversas condiciones que el suelo podría encontrar en la

realidad, desde compactación ligera hasta condiciones más extremas” [13]. Además, tiene las siguientes características: pistón de 10 lbs, $h = 18''$, $N = 25$ golpes, y compactando en 5 capas, con moldes de $\phi = 4''$ y $\phi = 6''$ (esto varía según el material pasante del tamiz #4 y $\frac{3}{4}$). A continuación, se muestra la tabla de Especificaciones del Proctor Modificado:

Tabla 13. Especificaciones de la prueba Proctor Modificado.[13]

Elemento	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 martillo	44. N	44. N	44.5 N
Altura de caída del martillo	457.2 mm	457.2 mm	457.2 mm
Número de golpes de martillo	25	25	56
Número de capas de Compactación	5	5	5
Energía de compactación	2696 kN- m/m ³	2696 kN- m/m ³	2696 kN- m/m ³
Suelo utilizado	Porción que pasa el tamiz núm. 4 (4.75 mm). Puede ser utilizada si 20% o menos del peso de material es retenido en el tamiz núm. 4	Porción que pasa el tamiz de 9.5 mm. Puede ser utilizada si el suelo retenido en el tamiz núm. 4 es más de 20% y 20% o menos del peso retenido en el tamiz de 9.5 mm.	Porción que pasa el tamiz de 19 mm. Puede ser utilizada si más de 20% del material es retenido en el tamiz de 9.5 mm y menos de 30% del peso es retenido en el tamiz de 19 mm.

La tabla 13 indica las especificaciones para realizar el ensayo de compactación (Proctor Modificado).

En esta investigación, el ensayo sirve para evaluar la influencia del tamaño de agregado en la compactación de suelos granulares, mediante la curva de compactación del suelo, que es la derivación del Proctor Modificado, ya que muestra la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca del suelo. Además, dentro de estas curvas se puede identificar la rama seca y húmeda del ensayo la cual nos dará mejores o peores propiedades en el suelo según el punto de compactación en el que esté el material. [14]

Tabla 14. Especificaciones según las propiedades del suelo

Propiedades	Rama Seca	Rama Húmeda
Resistencia al corte	Alta	Baja
Compresibilidad	Baja	Alta
Permeabilidad	Alta	Baja
Presión de poros	Baja	Alta
Cambios de volumen por saturación (arcillas)	Alta	Baja

La tabla 14 indica las propiedades del suelo según el tipo y rama de cada muestra.

A continuación, la Figura 4. muestra las curvas de compactación de las cinco muestras de suelo en condiciones naturales.

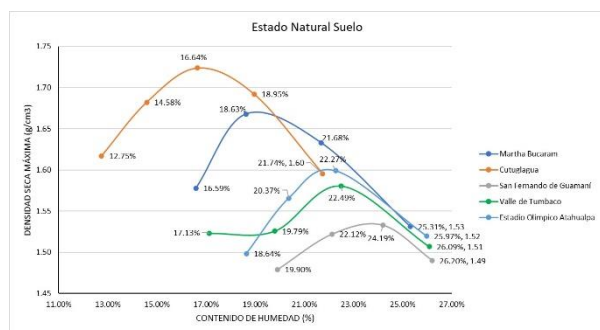


Figura 4. Curvas de Compactación de los cinco sitios ensayados con Proctor Modificado

2.3.2 Humedad Óptima

El efecto de la humedad es lubricar los granos del suelo y permite deslizarse los unos sobre los otros más fácilmente, además “la resistencia de un suelo también depende de la cantidad de agua que contiene, por lo cual cierta humedad permite el movimiento de las partículas del suelo y su compactación” [15]

La cantidad óptima de agua permite la mejor compactación para una energía dada, por lo tanto, mediante una energía de compactación y una humedad fija, se puede medir la densidad seca del suelo. [15]

Independientemente de la determinación de la humedad óptima, las curvas Proctor permiten obtener deducciones interesantes: [15]

En la Figura 5. Se puede deducir lo siguiente:

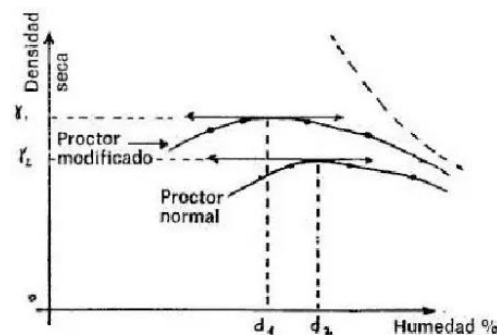


Figura 5. Curva de compactación Proctor Normal – Proctor Estándar [15]

Si la curva esta achatada, esto quiere decir que el suelo es considerado poco sensible al agua, ya que tiene una variación bastante grande de la humedad influye poco sobre la densidad seca (suelo fácil de compactar y estable), por lo contrario, si la curva tiene una forma afinada se ve inmediatamente que una pequeña variación de humedad tiene gran influencia sobre la densidad seca (suelo sensible al agua, difícil de compactar y posiblemente un material arcilloso). [15]

2.3.3 Compactación

La compactación expresa un porcentaje respecto al ensayo Proctor, es decir, alcanza una máxima densidad, la cual mejora las propiedades resistentes de los suelos. [16]

También produce un incremento en la densidad del material, produciendo importantes beneficios y que coincide como, menciona G. López Maldonado [17]:

Aumenta la resistencia al corte, ya que produce mayor unión entre las partículas, obteniendo así una mayor resistencia en conjunto con el agregado pétreo.

Disminuye la permeabilidad, por lo cual se dificulta la penetración de agua en el material, la presencia de agua en materiales granulares puede provocar deterioro tanto por el arrastre de partículas como por las posibles variaciones volumétricas ante la presencia de heladas.

Reduce la compresibilidad, es decir, el número de huecos presentes en el suelo, por la presencia del agua podría acumularse en los vacíos del suelo.

Impide el hundimiento del suelo, al realizarse una mala compactación se pueden producir asentamientos diferenciales, o hundimientos localizados en el firme, provocando a largo plazo, la aparición de patologías. (p. 2)

Por lo tanto, se usará la compactación para verificar la teoría de mejorar las propiedades del suelo, implementando en la muestra agregado pétreo de los siguientes diámetros: 4.75 mm, 9.53 mm y 12.70 mm, en diferentes proporciones.

2.3.4 Agregados Pétreos

Son materiales sólidos inertes que se emplean como elementos activos, se usan para la fabricación de productos resistentes, mediante la mezcla con materiales aglomerantes o con ligantes asfálticos. Tienen propiedades en conjunto como distribución de la redondez o desgaste, porque esto influye sobre el rozamiento entre los elementos del agregado. [18]

Se utilizaron agregados pétreos de los diámetros anteriormente mencionados en los porcentajes del 10%, 20% y 30%, para evaluar algunos aspectos relacionados con su buen desempeño, es decir, verificar si mejora la calidad o propiedades mecánicas del suelo, porque los agregados tienen ciertas características especiales como:

Resistencia al desgaste (se incrementa la resistencia del material), resistencia al pulimiento (resiste al deslizamiento), adhesividad y resistencia al desplazamiento (aumenta algunos factores físicos como: viscosidad, tensión, etc.), alterabilidad (produce a una reacción química que conglomerar o liga al material), resistencia al desprendimiento (pierde adherencia), entre otras características. [18]

Ayuda con la optimización en el empleo del material granular, es decir, mejora el grado de compactación, resistencia, manejabilidad y durabilidad al ser empleado en la muestra ensayada, por lo tanto, cumple con la hipótesis planteada en la fase del plan de investigación.

3 Resultados y Discusión

A continuación, se presenta la comparación de la densidad seca máxima con agregado al 10, 20 y 30% con el suelo natural para posteriormente concluir con la hipótesis y saber qué tamaño y porcentaje de agregado debemos utilizar para obtener un mejoramiento adecuado de suelo y efectivo.

3.1.1 Muestra 1

En la figura 6 se observa las curvas de compactación adicionando el agregado del Tamiz #4 comparando con la curva de compactación del suelo natural.

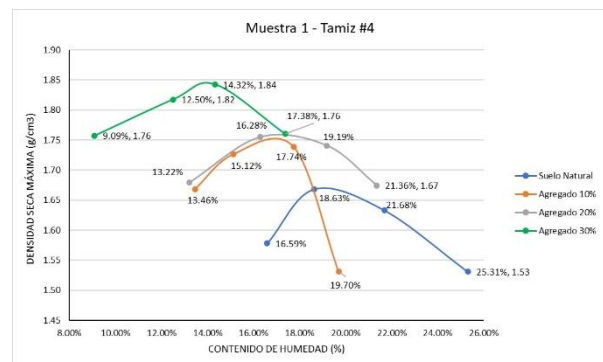


Figura 6. Curvas de comparación de Tamiz 4 del suelo Muestra 1

Se expone que adicionando al suelo de la muestra 1 el 30% de agregado grueso que su tamaño máximo nominal es retenido por el tamiz #4, se aumenta la densidad seca máxima con un menor contenido de humedad a comparación de la adición del 10 y 20%.

En la figura 7 se presenta las curvas de compactación adicionando el agregado del Tamiz N3/8 comparando con la curva de compactación del suelo natural.

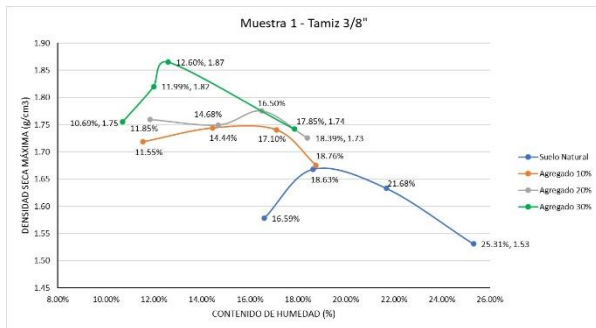


Figura 7. Curvas de comparación de Tamiz 3/8'' del suelo Muestra 1

Se verifica que adicionando al suelo de la muestra 1 el 30% de agregado grueso que su tamaño máximo nominal es retenido por el tamiz 3/8'', se aumenta la densidad seca máxima con un menor contenido de humedad a comparación de la adición del 10 y 20% obteniendo una curva de compactación más alta a diferencia de las demás.

En la figura 8 se señala las curvas de compactación adicionando el agregado del Tamiz 1/2'' comparando con la curva de compactación del suelo natural.

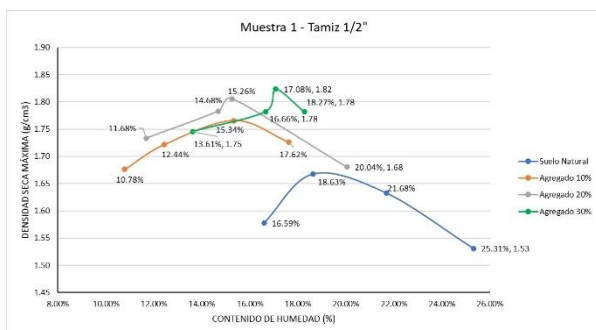


Figura 8. Curvas de comparación de Tamiz 1/2'' del suelo Muestra 1

Se evidencia que adicionando al suelo de la muestra 1 el 30% de agregado grueso que su tamaño máximo nominal es retenido por el tamiz 1/2'', se aumenta la densidad seca máxima con un menor contenido de humedad a comparación de la adición del 10% obteniendo una curva de compactación más alta a diferencia de las demás teniendo en cuenta que la curva de compactación de agregado al 20%

se acerca a la curva de mayor densidad seca máxima.

3.1.2 Muestra 2

En la figura 9 se puede observar las curvas de compactación adicionando el agregado del Tamiz #4 comparando con la curva de compactación del suelo natural.

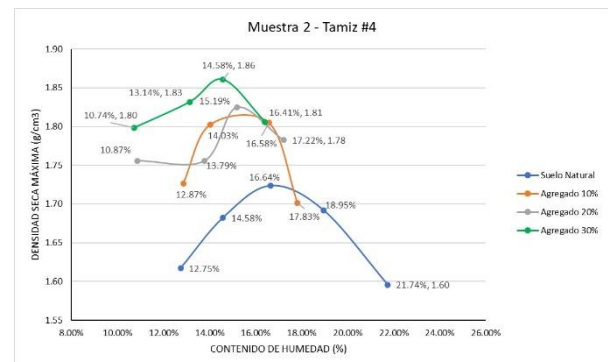


Figura 9. Curvas de comparación de Tamiz #4 del suelo Muestra 2

Se constata que adicionando al suelo de la muestra 2 el 30% de agregado grueso que su tamaño máximo nominal es retenido por el tamiz #4, se aumenta la densidad seca máxima con un menor contenido de humedad a comparación de la adición del 10 y 20% que las curvas de compactación son similares, no obstante, obteniendo una curva de compactación más alta a diferencia de las demás.

En la figura 10 se puede observar las curvas de compactación adicionando el agregado del Tamiz 3/8'' comparando con la curva de compactación del suelo natural.

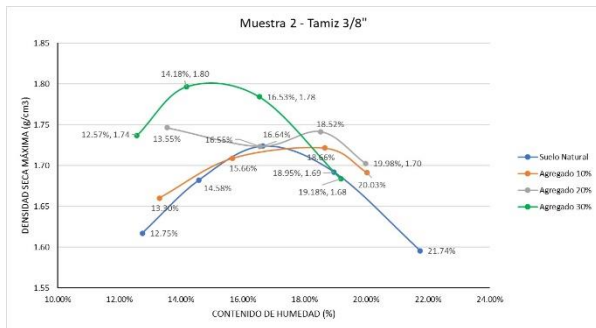


Figura 10. Curvas de comparación de Tamiz 3/8'' del suelo Muestra 2

Se corrobora que adicionando al suelo de la muestra 2 el 30% de agregado grueso que su tamaño máximo nominal es retenido por el tamiz 3/8'', se aumenta la densidad seca máxima con un menor contenido de humedad a comparación de la adición del 10 y 20% obteniendo una curva de compactación más alta a diferencia de las demás, sin embargo, se hace énfasis en la similitud de las curvas de compactación para el suelo natural, el agregado al 10 y 20%.

En la figura 11 se puede observar las curvas de compactación adicionando el agregado del Tamiz 1/2'' comparando con la curva de compactación del suelo natural.

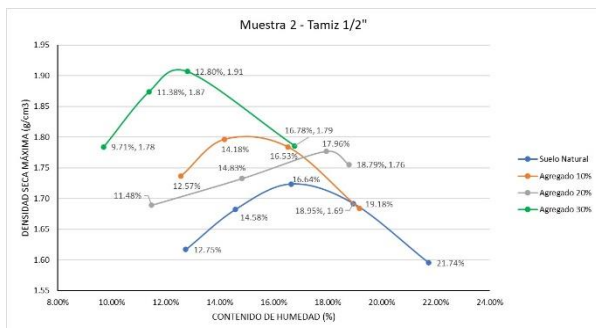


Figura 11. Curvas de comparación de Tamiz 1/2'' del suelo Muestra 2

Se expone que adicionando al suelo de la muestra 3 el 30% de agregado grueso que su tamaño máximo nominal es retenido por el tamiz 1/2'', se aumenta la densidad seca máxima con un menor contenido de humedad a comparación de la adición del 10 y 20%

obteniendo una curva de compactación más alta a diferencia de las demás, también se observa una significativa mejora en dicha curva de compactación.

3.1.3 Muestra 3

En la figura 12 se presenta las curvas de compactación adicionando el agregado del Tamiz #4 comparando con la curva de compactación del suelo natural.

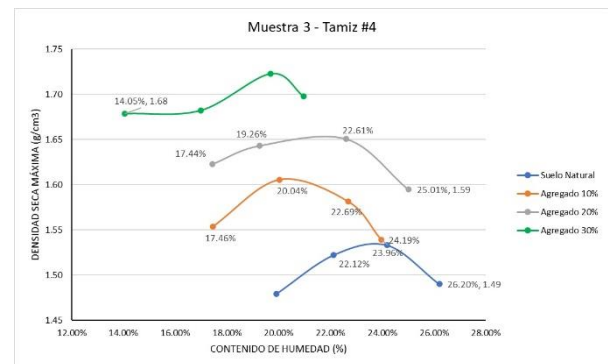


Figura 12. Curvas de comparación de Tamiz #4 del suelo Muestra 3

Se comprueba que adicionando al suelo de la muestra 3 el 30% de agregado grueso que su tamaño máximo nominal es retenido por el tamiz #4, se aumenta la densidad seca máxima con un menor contenido de humedad a comparación de la adición del 10 y 20% obteniendo una curva de compactación más alta a diferencia de las demás, tomando en cuenta el aumento de la densidad seca máxima en cada porcentaje de agregado.

En la figura 13 se expone las curvas de compactación adicionando el agregado del Tamiz 3/8'' comparando con la curva de compactación del suelo natural.

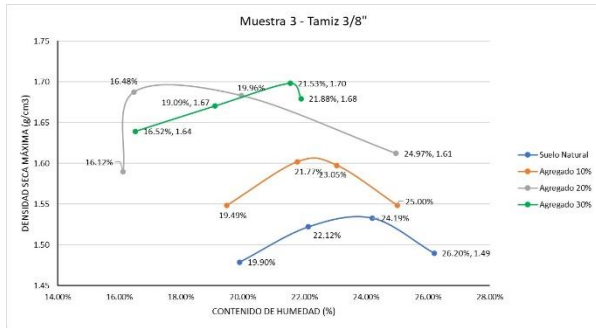


Figura 13. Curvas de comparación de Tamiz 3/8'' del suelo Muestra 3

Se verifica que adicionando al suelo de la muestra 3 el 30% de agregado grueso que su tamaño máximo nominal es retenido por el tamiz 3/8'', se aumenta la densidad seca máxima con un menor contenido de humedad tomando en cuenta la diferencia con la adición de agregado al 20% que son muy similares a comparación de la adición de agregado al 10% y la curva de compactación del suelo natural.

En la figura 14 se observa las curvas de compactación adicionando el agregado del Tamiz 1/2'' comparando con la curva de compactación del suelo natural.

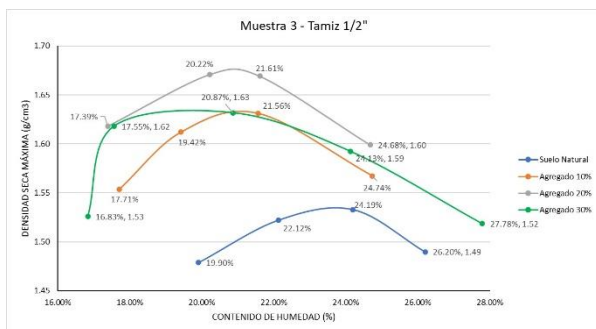


Figura 14. Curvas de comparación de Tamiz 1/2'' del suelo Muestra 3

Se evidencia que adicionando al suelo de la muestra 3 el 20% de agregado grueso que su tamaño máximo nominal es retenido por el tamiz 1/2'', se aumenta la densidad seca máxima con un menor contenido de humedad a comparación de la adición del 10 y 30% obteniendo una curva de compactación más alta a diferencia de las demás.

3.1.4 Muestra 4

Se puede observar en la figura 15 las curvas de compactación del Tamiz #4 en un 10%, 20% y 30% de agregado, al comparar con la curva de compactación en estado natural, se deduce que la hipótesis planteada en esta investigación es acertada.

Es decir, al agregar un porcentaje de agregado el suelo mejora sus propiedades mecánicas y resistencia. Se puede evidenciar que al adicionar un 30% de agregado el suelo alcanza su densidad seca máxima.

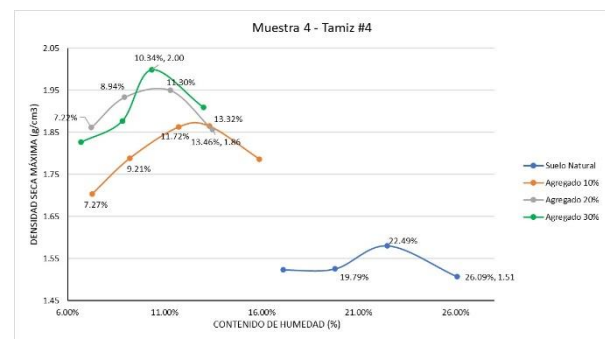


Figura 15. Curvas de comparación de Tamiz #4 del suelo Muestra 4

Se muestra en la figura 16 las curvas de compactación del Tamiz 3/8'' en un 10%, 20% y 30% de agregado, al comparar con la curva de compactación en estado natural, se puede deducir que la hipótesis planteada es correcta.

Es decir, al agregar un porcentaje de agregado el suelo mejora sus propiedades mecánicas y resistencia. Se evidencia que al adicionar un 30% de agregado el suelo alcanza su densidad seca máxima.

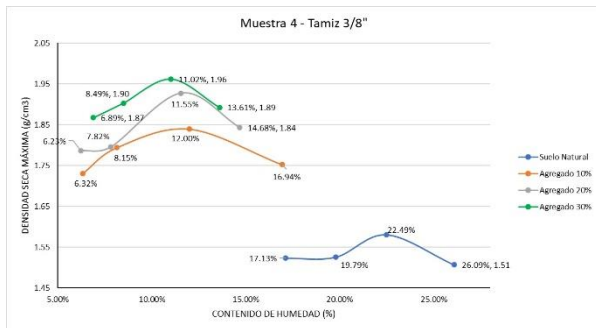


Figura 16. Curvas de comparación de Tamiz 3/8" del suelo Muestra 4

Se puede observar en la figura 17 las curvas de compactación del Tamiz 1/2" en un 10%, 20% y 30% de agregado, al comparar con la curva de compactación en estado natural, se puede deducir que la hipótesis planteada en esta investigación es correcta.

Es decir, al añadir un porcentaje de agregado el suelo mejora sus propiedades mecánicas y resistencia. Se puede evidenciar que al adicionar un 30% de agregado el suelo alcanza su densidad seca máxima.

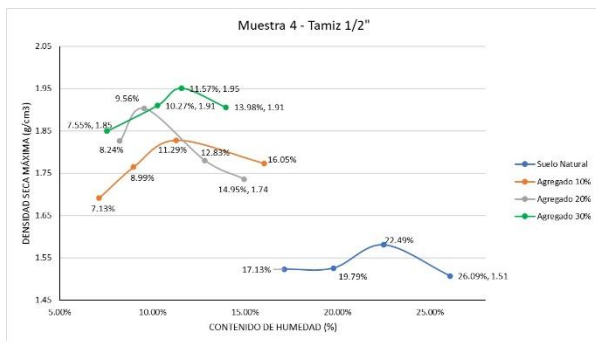


Figura 17. Curvas de comparación de Tamiz 1/2" del suelo Muestra 4

3.1.5 Muestra 5

Se puede constatar en la figura 18 las curvas de compactación del Tamiz N°4 en un 10%, 20% y 30% de agregado, al comparar con la curva de compactación en estado natural, se puede deducir que la hipótesis planteada en esta investigación es acertada.

Es decir, al agregar un porcentaje de agregado el suelo mejora sus propiedades

mecánicas y resistencia. Se puede evidenciar que al adicionar un 30% de agregado el suelo alcanza su densidad seca máxima.

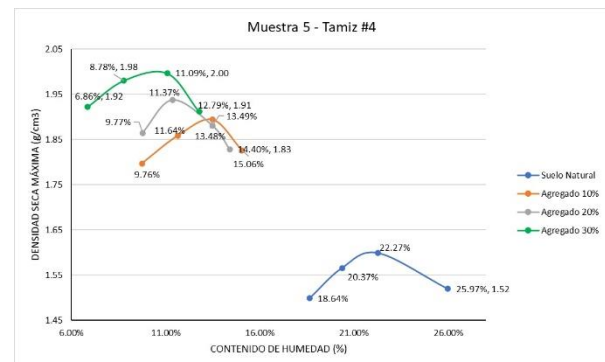


Figura 18. Curvas de comparación de Tamiz #4 del suelo Muestra 5

Se puede observar en la figura 19 las curvas de compactación del Tamiz 3/8" en un 10%, 20% y 30% de agregado, al comparar con la curva de compactación en estado natural, se puede deducir que la hipótesis planteada se cumple.

Es decir, al agregar un porcentaje de agregado el suelo mejora sus propiedades mecánicas y resistencia. Se puede evidenciar que al adicionar un 10% de agregado el suelo alcanza su densidad seca máxima, se puede verificar que el suelo con una pequeña porción de agregado mejora considerablemente.

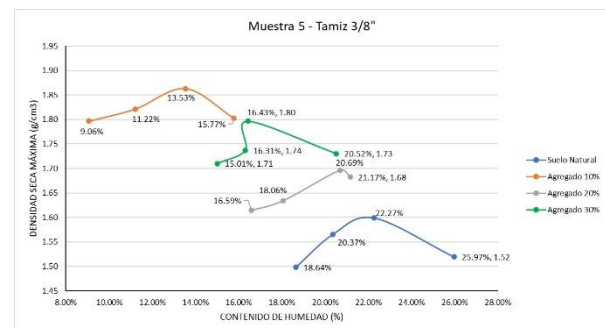


Figura 19. Curvas de comparación de Tamiz 3/8" del suelo Muestra 5

Se indica en la figura 20 las curvas de compactación del Tamiz 1/2" en un 10%, 20% y 30% de agregado, al comparar con la curva

de compactación en estado natural, se puede deducir que la hipótesis planteada en esta investigación es acertada.

Es decir, al agregar un porcentaje de agregado el suelo mejora sus propiedades mecánicas y resistencia. Se puede evidenciar que al adicionar un 30% de agregado el suelo alcanza su densidad seca máxima.

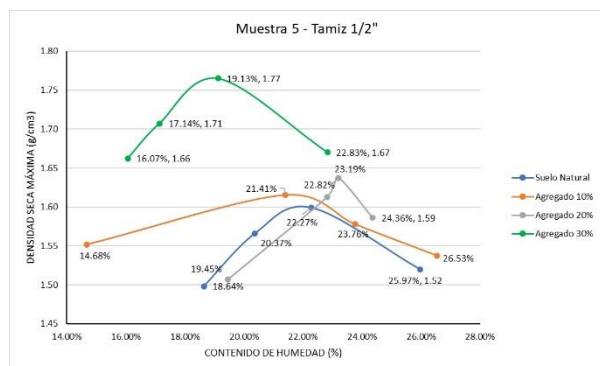


Figura 20. Curvas de comparación de Tamiz 1/2'' del suelo Muestra 5

Se presenta la tabla 15 de resultados obtenidos teniendo en cuenta la mayor eficacia al momento de tener una mayor densidad seca máxima.

Tabla de resultados					
Muestra N	Densidad seca máxima suelo natural	Densidad seca máxima suelo con agregado	Tamaño de Agregado	% de Agregado	% de mejora
1	1.67	1.88	3/8''	30	12.57
2	1.72	1.91	1/2''	30	11.04
3	1.53	1.72	#4	30	12.41
4	1.58	2.0	#4	30	26.58
5	1.6	2.0	#4	30	25

Tabla 15. Tabla de Resumen

La tabla 15 de resumen presenta los resultados del ensayo de compactación de suelos granulares con diferentes tamaños de

agregado y porcentaje. Los resultados muestran claramente una tendencia en la mejora de la densidad seca máxima cuando se adiciona las muestras de suelo natural en un 30%.

El aumento del tamaño del agregado mejora el suelo, es decir, entre más porcentaje de agregado entre el 10% al 30% se incluya en la muestra, se incrementan sus propiedades mecánicas.

En resumen, los resultados indican que la adición de agregado grueso en una proporción significativa, el 30% es necesaria para lograr una compactación óptima del suelo, además el tamaño de agregado no tiene un impacto significativo en la densidad seca máxima, mientras que el porcentaje de agregado sí es crucial para lograr una compactación efectiva.

4 Conclusiones

En el presente estudio se demuestra que, para suelos granulares, la compactación óptima se logra adicionando 30% de agregado grueso al suelo natural que proporciona una mejora significativa del suelo que va desde el 10% de mejora hasta el 30%, este aumento en el contenido de agregado grueso influye en el valor de la humedad óptima, lo que a su vez resulta en una densidad seca máxima superior en comparación con adiciones de 10 y 20% de agregado.

Los suelos granulares mejoraron a comparación del suelo natural, pero para tener una eficiencia mayor se debería optar por la adición de agregado al 30% y tamaño máximo nominal que retenga el tamiz #4, esto proporciona una mejor distribución de partículas dentro de la matriz del suelo.

La distribución de agregado grueso añadido facilita la reducción de espacios vacíos y mejora el entrelazamiento de partículas del suelo, eso dará paso a una mayor estabilidad y soporte para aplicaciones en el ámbito ingenieril geotécnico.

Al determinar la cantidad óptima y tamaño de agregado grueso para lograr una mejor compactación se está mejorando la compactación de suelos granulares, lo cual se ve reflejado en la calidad del trabajo, la reducción de costos y tiempo de construcción, mejorar la estabilidad y seguridad de las obras.

En conclusión, este hallazgo aporta gran conocimiento técnico, valioso para optimizar la compactación de suelos granulares, lo cual se traduce en beneficios económicos, de seguridad y calidad para la industria de la construcción en general, mejorando procesos y proporcionando mayor estabilidad para las estructuras que se construyan sobre suelos compactados.

Referencias

- [1] Wagner, L., Ambe, N. y Ding, D. (1994). Estimación de una curva de densidad Proctor a partir de las propiedades intrínsecas del suelo. *Transacciones de la ASABE* , 37, 1121-1125. <https://doi.org/10.13031/2013.28185> .
- [2] Regelink, I., Stoof, C., Rousseva, S., Weng, L., Lair, G., Krám, P., Nikolaidis, N., Kercheva, M., Banwart, S. y Comans, R. (2015). Vínculos entre la formación de agregados, la porosidad y las propiedades químicas del suelo. *Geoderma* , 247, 24-37. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2015.01.022> .
- [3] Mokwa, R. y Fridleifsson, S. (2007). Evaluación de la compactación del movimiento de tierras mediante cámara de aire del suelo. *Revista Geotécnica Canadiense* , 44, 151-159. <https://doi.org/10.1139/T06-113> .
- [4] Gallipoli, D., Wheeler, S. y Karstunen, M. (2003). Modelización de la variación del grado de saturación en un suelo insaturado deformable. *Geotecnia* , 53, 105-112. <https://doi.org/10.1680/GEOT.53.1.105.37249> .
- [5] Lima, C., Motta, L. y Aragão, F. (2019). Efectos del contenido de humedad de compactación sobre la deformación permanente de suelos sometidos a ensayos de carga triaxial repetidos. *Registro de investigación de transporte* , 2673, 466 - 476. <https://doi.org/10.1177/0361198118825124> .
- [6] Reeve, M., Smith, P., & Thomasson, J. (1973). THE EFFECT OF DENSITY ON WATER RETENTION PROPERTIES OF FIELD SOILS. *European Journal of Soil Science*, 24, 355-367. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2389.1973.TB00771.X>.
- [7] Mirzaii, A. y Yasrobi, S. (2012). Influencia de la densidad seca inicial sobre las características suelo-agua de dos suelos compactados. *Cartas de Geotecnia* , 2, 193-198. <https://doi.org/10.1680/GEOLETT.12.00045> .
- [8] Batey, T. y McKenzie, D. (2006). Compactación del suelo: identificación directamente en campo. *Uso y manejo del suelo* , 22. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2006.00017.x> .
- [9] Jian, C. (2013). Evaluation of Measurement Uncertainty for Specific Gravity Tests of Soil Samples. *Geology and Exploration*.
- [11] H. Egoavil Perea. “Laboratorio 2 granulometría (1)”. SlideShare. Accedido el 27 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://es.slideshare.net/elbertperezquispe/laboratorio-2-granulometria-1>

- [12] Universidad Distrital Francisco José de Caldas. “GUÍA DE LABORATORIO PARA LA DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS”. Inicio | Facultad Tecnológica. Accedido el 27 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://ftecnologica.udistrital.edu.co/laboratorios/civiles/sites/lab-civiles/files/practica/2023-03/Límite%20liquido.pdf>
- [13] “BRAJA DAS.pdf”. SlideShare. Accedido el 27 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://es.slideshare.net/JosSantillanRivera/braja-daspdf>
- [14] A. Gavidia. “¿Qué es el ensayo Proctor? | GIG”. GIG. Accedido el 27 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://ingeotecnica.com/ensayo-proctor>
- [15] R. Alvarado. “Ensayo de Humedad Óptima | PDF | Densidad | La carretera”. Scribd. Accedido el 27 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://es.scribd.com/doc/277184657/Ensayo-de-Humedad-Optima>
- [16] P. Machado. “Método AASTHO Standard T | PDF | Naturaleza | Science”. Scribd. Accedido el 27 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://es.scribd.com/document/460064782/Metodo-AASTHO-Standard-T>
- [17] G. López Maldonado. “Ensayos de compactación en carreteras: Proctor Normal y Modificado”. RiuNet repositorio UPV. Accedido el 27 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/139866/López%20-%20Ensayos%20de%20compactación%20en%20carreteras:%20Proctor%20Normal%20y%20Modificado.pdf?sequence=1>
- [18] A. Padilla Rodríguez. “MATERIALES BÁSICOS”. Página inicial de UPCommons. Accedido el 27 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-13.pdf?sequence=13&isAllowed=y>