

Estudio de las propiedades mecánicas del suelo de la vía al Casigana, del cantón Ambato

Study of the mechanical properties of the soil on the Casigana road, in the Ambato canton

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo determinar la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo del suelo de la vía al Casigana, en el cantón Ambato, con el fin de establecer las condiciones de compactación que garanticen su estabilidad y capacidad portante para obras viales. Se desarrolló una investigación de enfoque cuantitativo, de tipo descriptivo-aplicativo y diseño experimental transversal, mediante la aplicación del ensayo Proctor modificado conforme a la norma AASHTO T-180, complementado con análisis granulométrico, límites de Atterberg, capacidad portante y ensayo CBR. Los resultados evidenciaron una densidad seca máxima de 1,60 g/cm³ y una humedad óptima de 18,7 %, con un CBR máximo de 92,15 % bajo condiciones de compactación controlada. El suelo se clasificó como arena mal gradada con finos y baja plasticidad, presentando limitaciones de cohesión, pero un notable incremento en resistencia al aplicar procesos adecuados de compactación y estabilización. Estos hallazgos permiten definir criterios técnicos para optimizar la durabilidad y el desempeño estructural de la vía, recomendando especial atención al control de humedad y energía de compactación en campo.

PALABRAS CLAVE: compactación de suelos, mecánica de suelos, capacidad portante.

ABSTRACT

The present study aimed to determine the maximum dry density and optimum moisture content of the soil from the Casigana road, in the canton of Ambato, in order to establish compaction conditions that ensure its stability and bearing capacity for road construction works. A quantitative, descriptive-applied research approach with a cross-sectional experimental design was implemented, applying the Modified Proctor test according to AASHTO T-180 standards, complemented by grain size analysis, Atterberg limits, bearing capacity, and CBR testing. The results showed a maximum dry density of 1.60 g/cm³ and an optimum moisture content of 18.7%, with a maximum CBR value of 92.15% under controlled compaction conditions. The soil was classified as poorly graded sand with fines and low plasticity, presenting cohesion limitations but a significant increase in strength when adequate compaction and stabilization processes were applied. These findings allow the definition of technical criteria to optimize the durability and structural performance of the road, with particular emphasis on moisture control and compaction energy during field implementation.

KEYWORDS: soil compaction, soil mechanics, bearing capacity.

TECNOCIENCIA ACTUAL

Recepción: 02/08/2025

Aceptación: 09/08/2025

Publicación: 31/12/2025

AUTOR/ES

 **Bryon Leonardo López Sánchez**

 **Karen Abigail Pinto Almache**
 **Carlos Sebastián Guaipacha Martínez**

 **Domínguez Villacres Bryan Sebastian**

 **Lenín Francisco Medina Freire**

 **Shirley Lizeth Amores Salazar**

 Byron_leolopez@yahoo.com

 karenpintok966@gmail.com

 sebascalo34@gmail.com

 sebastiandominquez25@yahoo.com

 medinalenin1511@gmail.com

 lissamores2005@gmail.com

 Universidad Tecnológica Indoamérica

 Universidad Tecnológica Indoamérica

 Universidad Tecnológica Indoamérica

 Universidad Tecnológica Indoamérica

 Universidad Tecnológica Indoamérica

 Universidad Tecnológica Indoamérica

 Ambato - Ecuador

 Ambato - Ecuador

 Ambato - Ecuador

 Ambato - Ecuador

 Ambato - Ecuador

 Ambato - Ecuador

CITACIÓN:

López, B. Pinto, K. Huaipacha, C. Domínguez, B. Medina, L. & Amores, S. (2025). Estudio de las propiedades mecánicas del suelo de la vía al Casigana, del cantón Ambato. Revista InnovaSciT. 3 (2). p. 218 - 235.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de obras viales requiere de un profundo conocimiento de las propiedades mecánicas del suelo, dado que su comportamiento influye directamente en la estabilidad y durabilidad de la infraestructura. En el caso de la vía al Casigana, ubicada en el Cantón Ambato, provincia de Tungurahua, se ha identificado la necesidad de realizar estudios geotécnicos que permitan caracterizar adecuadamente los suelos presentes en la zona. Esta vía, de importancia local y regional, atraviesa terrenos de topografía variable y composición heterogénea, lo cual incrementa el riesgo de asentamientos diferenciales, inestabilidad superficial y deterioro prematuro de la calzada.

El problema de investigación parte de la falta de información detallada sobre las propiedades mecánicas del suelo en este sector específico. A pesar de que existen estudios regionales generales, estos no son suficientes para diseñar soluciones de ingeniería precisas y adaptadas a las condiciones particulares de la vía. Esta situación representa un vacío técnico que podría comprometer la calidad estructural de futuras intervenciones viales si no se determinan previamente los parámetros de resistencia, compacidad y capacidad portante del suelo.

La importancia de abordar este tema radica en que el comportamiento del suelo en condiciones de carga directa influye en la vida útil de las obras civiles. Tal como afirman Coduto, Yeung y Kitch (2016), conocer la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo de un suelo es esencial para lograr una compactación eficiente, reduciendo vacíos y aumentando la resistencia al corte. Además, en zonas de clima húmedo como Ambato, la humedad del terreno puede variar de forma significativa, afectando el desempeño de la infraestructura si no se toman medidas adecuadas desde la fase de diseño.

Este estudio se fundamenta en los principios de la mecánica de suelos, particularmente en la teoría de compactación desarrollada por Proctor, que establece la relación entre la energía de compactación aplicada, el contenido de humedad y la densidad seca del suelo. El ensayo Proctor modificado, según la normativa AASHTO T-180 (2017), permite simular en laboratorio las condiciones más exigentes de compactación en obra, proporcionando datos confiables para la toma de decisiones técnicas. Este marco teórico sustenta la interpretación de la curva de compactación como herramienta clave para determinar las condiciones óptimas del suelo.

Investigaciones previas como las de Das y Sobhan (2018) han demostrado que la energía de compactación influye de forma significativa en la capacidad portante del suelo, especialmente en suelos de origen volcánico como los encontrados en la sierra ecuatoriana. Por su parte, Sivakugan et al. (2014) destacan que cada suelo presenta un punto óptimo de humedad en el cual se maximiza su densidad sin llegar a la saturación. A partir de estas referencias, el presente estudio busca aplicar dichos fundamentos a la realidad específica de la vía al Casigana, aportando una caracterización empírica que no ha sido documentada

anteriormente.

En cuanto al contexto físico y geotécnico, la vía al Casigana se localiza en una zona de transición entre áreas urbanas y rurales, con suelos compuestos por materiales aluviales, volcánicos y de relleno. Esta heterogeneidad representa un desafío para los ingenieros encargados del diseño y mantenimiento vial. Además, la actividad agrícola circundante y las condiciones de escorrentía contribuyen al deterioro progresivo del terreno, haciendo indispensable un estudio detallado que permita establecer parámetros confiables para futuras obras de estabilización y pavimentación.

El objetivo general de esta investigación es determinar la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo del suelo de la vía al Casigana, mediante el ensayo de compactación Proctor modificado, con el propósito de establecer las condiciones óptimas de compactación que aseguren la estabilidad, resistencia y durabilidad del suelo en intervenciones de obra civil. Como objetivos específicos, se plantea: (1) analizar el impacto de la energía de compactación sobre la densidad seca del suelo y su relación con la humedad óptima, y (2) interpretar la curva de compactación para evaluar el comportamiento del suelo frente a diferentes niveles de humedad y carga. Este trabajo aspira a generar un aporte técnico significativo para el cantón Ambato, orientando a los profesionales de la construcción y la planificación territorial en la correcta interpretación de los parámetros geotécnicos fundamentales. Con los resultados obtenidos se busca fortalecer las bases técnicas de los proyectos viales locales, garantizar la durabilidad de las obras y optimizar el uso de los recursos públicos en las inversiones de infraestructura, alineándose con los principios de sostenibilidad y eficiencia en la ingeniería civil contemporánea.

MÉTODOS MATERIALES

Este estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, ya que se orientó a la recolección, análisis e interpretación de datos numéricos relacionados con las propiedades físicas y mecánicas del suelo. El tipo de investigación fue descriptivo-aplicativo, al buscar identificar los valores de densidad seca máxima y humedad óptima mediante ensayos normalizados y aplicar dichos resultados a la mejora técnica de la compactación en un tramo vial específico. El diseño metodológico fue experimental de tipo transversal, puesto que se intervino sobre muestras de suelo en condiciones controladas de laboratorio, en un momento determinado, para evaluar el comportamiento del material ante distintas condiciones de humedad y energía de compactación (Hernández-Sampieri et al., 2021). La población de estudio estuvo representada por los suelos de la vía al Casigana, ubicada en el cantón Ambato, provincia de Tungurahua. La selección de los puntos de muestreo se realizó de forma no probabilística por conveniencia técnica, considerando zonas con mayor tránsito vehicular y visiblemente afectadas por problemas de compactación. Las muestras fueron extraídas mediante métodos manuales en superficie y subsuelo, trasladadas en condiciones adecuadas

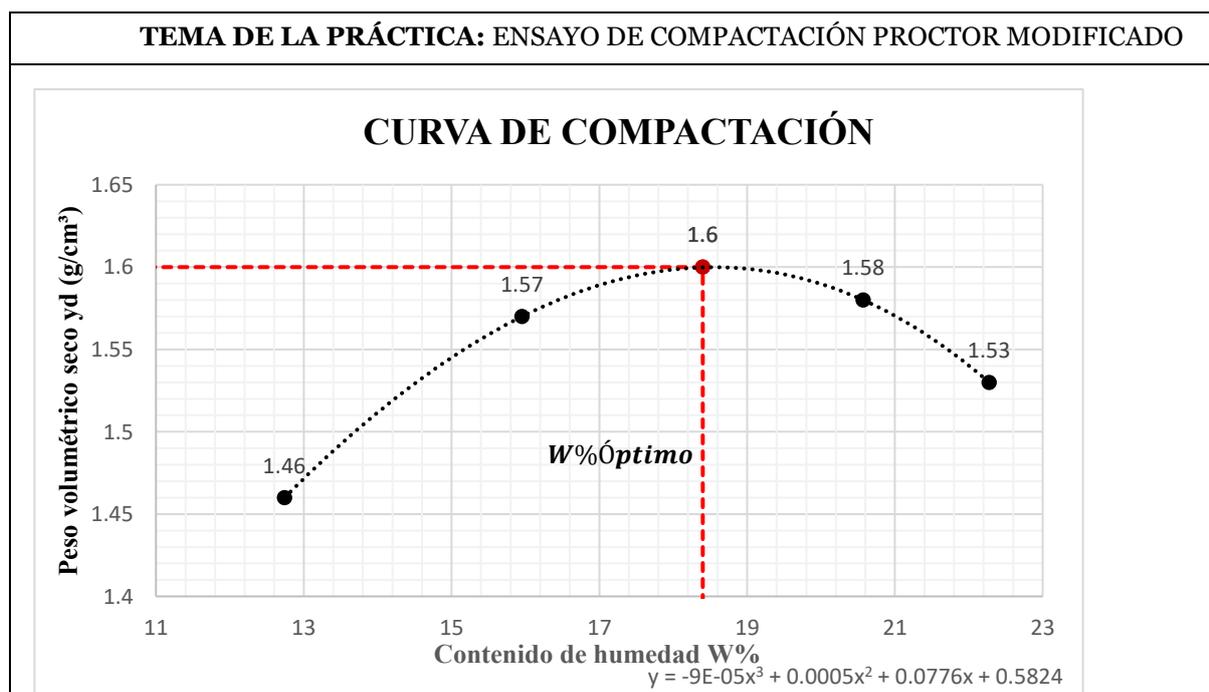
al laboratorio, y posteriormente sometidas a análisis físico-mecánicos según lo establece la norma AASHTO T-180 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2017), correspondiente al ensayo Proctor modificado.

Para el desarrollo del ensayo se emplearon instrumentos y equipos calibrados como balanza electrónica, estufa de secado, moldes cilíndricos estándar, pisón mecánico de 4,54 kg, probetas metálicas y herramientas auxiliares de compactación. El procedimiento consistió en preparar las muestras con distintos niveles de humedad, compactarlas en cinco capas dentro del molde con energía estándar de impacto, y determinar para cada condición el peso y volumen, con el fin de calcular la densidad seca. Con estos datos, se construyó la curva de compactación y se identificaron los valores de humedad óptima y densidad seca máxima, claves para el diseño y control de obras civiles en suelos locales (Coduto, Yeung & Kitch, 2016).

En lo referente a las consideraciones éticas, se garantizaron buenas prácticas de manejo ambiental durante la recolección y tratamiento de muestras. No se involucró población humana, por lo que no fue necesario aplicar criterios de inclusión ni consentimiento informado. La investigación se limitó a un tramo específico de la vía al Casigana debido a restricciones de tiempo y presupuesto, lo cual representa una limitación metodológica. No obstante, los resultados son representativos de las condiciones geotécnicas predominantes en dicho sector y pueden ser replicables en estudios similares en el contexto regional (Das & Sobhan, 2018).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Gráfico 1. Ensayo de compactación Proctor modificado



Nota: La máxima densidad alcanzada según la gráfica corresponde a 1.6g/cm^3 , la cual corresponde a un contenido óptimo de humedad del 18.4%

El gráfico presentado corresponde a una curva de compactación, utilizada comúnmente en estudios geotécnicos para determinar la relación entre el contenido de humedad (W%) y el peso volumétrico seco (γ_d) de un suelo. Este tipo de gráfico permite identificar el contenido óptimo de humedad y la densidad máxima seca, parámetros esenciales para diseñar bases y subbases en obras viales, como en el caso del estudio de la vía al Casigana, cantón Ambato.

A partir del gráfico, se observa que la densidad seca máxima alcanzada es de 1.60g/cm^3 , la cual se logra con un contenido de humedad óptimo de aproximadamente 18.7%. Esto se evidencia en el punto más alto de la curva, que está claramente marcado con una línea punteada roja, lo cual indica el mejor punto de compactación posible para ese tipo de suelo. Superado este punto, el aumento de humedad provoca una disminución en la densidad seca debido a la saturación de los vacíos del suelo, afectando la compactación efectiva.

Los puntos experimentales representados indican un aumento progresivo de la densidad con la humedad hasta alcanzar el valor máximo, seguido de una disminución leve. Esta forma parabólica es típica de suelos granulares o arcillosos, y la curva se ajusta mediante una función polinómica de tercer grado, también visible en el gráfico, lo que permite una mejor estimación de los valores intermedios entre los datos medidos.

Este análisis es fundamental para el diseño de estructuras viales, ya que garantiza una compactación adecuada del suelo, evitando futuros asentamientos diferenciales o fallos estructurales. En el contexto del cantón Ambato, donde existen zonas con alta actividad sísmica y condiciones topográficas complejas, conocer las propiedades mecánicas del suelo mediante esta curva es clave para asegurar la durabilidad y seguridad de las vías.

Tabla 1. Registro de datos del ensayo estabilización de suelo.

TEMA DE LA PRÁCTICA: DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO ADMISIBLE			
CONTENIDO DE HUEMDAD			
Recipiente numero		1	2
Peso muestra húmeda + recipiente	$(W_m + W_r)$	170.9	170.9
Peso muestra seca + recipiente	$(W_s + W_r)$	152.7	152.2
Peso recipiente	W_r	48	48
Peso agua	W_w	18.2	18.7
peso muestra seca	W_s	104.7	104.2
contenido de humedad	W%	17.38	17.95
promedio	$W\%$	17.665	

El análisis del contenido de humedad es fundamental para determinar las propiedades mecánicas del suelo, especialmente cuando se busca establecer su esfuerzo admisible. En esta práctica, se analizaron dos muestras tomadas de la vía al Casigana, en el cantón Ambato. A partir de los datos obtenidos, se observó que el peso del agua (W_w) fue de 18.2 g y 18.7 g respectivamente, mientras que los pesos de las muestras secas (W_s) fueron 104.7 g y 104.2 g. Con estos valores, se calculó el contenido de humedad de cada muestra, obteniendo porcentajes de 17.38% y 17.95%, lo que resulta en un promedio de humedad del 17.665%. Este valor indica una presencia moderada de humedad en el suelo, lo cual puede influir significativamente en su comportamiento mecánico, ya que una humedad excesiva puede reducir la resistencia del suelo al corte y afectar negativamente su capacidad de carga, mientras que un contenido equilibrado como el hallado sugiere una condición relativamente estable para propósitos de evaluación de esfuerzo admisible.

Tabla 2. Determinación del esfuerzo admisible

TEMA DE LA PRÁCTICA: DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO ADMISIBLE					
Tipo de suelo	Limo arenoso ML				
Material utilizado	Cal				
Porcentaje añadido %	5%				
Factor de seguridad	3				
Volúmenes					
Bloque	Largo [cm]	Ancho [cm]	Altura [cm]	Área [cm ²]	Volumen [cm ³]
1	29.1	14.2	10	413.22	4132.20
2	29.1	14.2	9.5	413.22	3925.59
3	29.3	14	9.5	410.2	3896.90
4	29.2	14.3	9	417.56	3758.04
5	29.3	14.1	10	413.13	4131.30
Densidad húmeda de los bloques					
Bloque	Peso de tabla [gr]	Peso muestra Hum +Tabla [gr]	Peso bloque Húmedo [gr]	Densidad húmeda [gr/cm ³]	
1	195.5	5580	5384.5	1.30	
2	195.5	5740	5544.5	1.41	

3	195.5	5760	5564.5	1.42
4	195.5	5680	5484.5	1.46
5	195.5	6020	5824.5	1.41
Densidad seca de los bloques				
Bloque	Peso de tabla [gr]	Peso muestra Sec+Tabla [gr]	Peso bloque Seco [gr]	Densidad seca [gr/cm ³]
1	195.5	5362.5	5167	1.25
2	195.5	5498.5	5303	1.35
3	195.5	5229	5033.5	1.28
4	195.5	5231	5035.5	1.34
5	195.5	5537.5	5342	1.29
Cálculo de esfuerzos				
Bloque	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo admisible (kg/cm ²)	Promedio Esfuerzo Admisible (kg/cm ²)
1	842.29	2.04	0.679	0.788
2	1110.47	2.69	0.896	
3	1182.87	2.86	0.954	1.020
4	1400.07	3.35	1.118	
5	1223.66	2.96	0.987	

En el desarrollo del estudio de las propiedades mecánicas del suelo de la vía al Casigana, se llevaron a cabo diversos ensayos de caracterización geotécnica, iniciando con la excavación de un pozo a cielo abierto de 1 m x 1 m y 6 m de profundidad, realizado manualmente con pico y pala. Este método permitió obtener muestras representativas del perfil del suelo en estado natural, utilizando un cilindro metálico compactado por impacto controlado. El material extraído fue cuidadosamente almacenado y etiquetado para posteriores ensayos de laboratorio. Entre estos, se efectuó la determinación del contenido de humedad mediante secado en horno a 105 °C – 110 °C por 24 horas, y la gravedad específica con el uso del picnómetro, siguiendo un protocolo riguroso para eliminar el aire atrapado y asegurar la precisión de los valores, en conformidad con la normativa ASTM D854 (ASTM, 2014).

Asimismo, se realizaron ensayos de granulometría mediante el método del cuarteo, lavado con tamiz #200 y tamizado mecánico, para determinar la distribución del tamaño de las partículas y clasificar el suelo según el sistema SUCS. Complementariamente, se llevaron a cabo las pruebas de los límites de Atterberg —límite líquido y límite plástico— empleando la copa de Casagrande y la técnica del rollito, respectivamente. Estos ensayos permitieron

identificar el rango de plasticidad del suelo y su comportamiento ante cambios de humedad. Toda esta información fue fundamental para establecer los parámetros básicos de compresibilidad y cohesión del suelo, los cuales influyen directamente en su comportamiento estructural y su respuesta ante esfuerzos de carga en proyectos de infraestructura vial.

Tabla 3. Determinación del contenido de humedad

TEMA DE LA PRÁCTICA: DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD				
Recipiente número			1	2
Peso muestra húmeda + recipiente	$(Wm + Wr)$	gr	47.6	49
Peso muestra seca + recipiente	$Ws + Wr)$	gr	42.5	44.2
Peso recipiente	Wr	gr	17.8	18.5
Peso agua	Ww	gr	5.1	4.8
Peso muestra seca	Ws	gr	24.7	25.7
Contenido de humedad	$W\%$	%	20.6	18.6
promedio	$W\%$	%	5	8
DATOS DEL CILINDRO				
Diámetro		cm	10.9	
Altura		cm	15.5	
Volumen		cm ³	1446.35	
Peso del cilindro		gr	838.9	
Peso del cilindro + masa del suelo		gr	2870.1	
Masa del suelo (Wm)		gr	2031.2	
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD HÚMEDA				
$ym = Wm/Vm$		g/cm^3	1.404	
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD SECA				
$yd = ym/(1 + w)$		g/cm^3	1.173	

En la práctica de laboratorio enfocada en la determinación del contenido de humedad y del esfuerzo admisible, se emplearon dos muestras de suelo, analizando sus pesos en estado húmedo y seco, así como el peso del recipiente que las contenía. Se determinó que los contenidos de humedad fueron de 20.65% y 18.68%, con un promedio de 19.67%, lo que permite conocer el grado de saturación del suelo en condiciones reales. A partir de estos datos, se calculó la densidad húmeda del suelo, obteniendo un valor de 1.404 g/cm³, utilizando un cilindro de volumen 1446.35 cm³ y una masa total de 2031.2 g de suelo húmedo. Finalmente, se halló la densidad seca, fundamental para el análisis de resistencia del terreno, resultando en 1.173 g/cm³, mediante la fórmula correspondiente que considera el contenido de humedad. Estos parámetros son esenciales para el diseño de cimentaciones, ya que permiten evaluar la

capacidad portante del suelo y establecer condiciones seguras para futuras construcciones.

Tabla 4. Determinación de la gravedad Específica

TEMA DE LA PRACTICA: DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA		
MUESTRA NÚMERO	GRUPO 1	
Picnómetro	Germany	
Recipiente número	1A	
Temperatura del agua y el suelo en °C	°C	20
Peso recipiente + suelo seco ($W_r + W_s$)	gr	182
Peso recipiente recipiente (W_r)	gr	132
Peso suelo seco (W_s)	gr	50
Peso picnómetro + agua (W_{bw})	gr	693
$W_s + W_{bw}$	gr	743
Peso del picnómetro+agua+suelo (W_{bws})	gr	721.9
Deslizamiento del agua ($W_s + W_{bw}$) – W_{bws}	gr	21.1
Factor de corrección por temperatura (k)	al adimension	0.998
Gravedad específica (G_s)	al adimension	2.36

Con base en los datos obtenidos durante la práctica de Determinación de la Gravedad Específica del suelo, se utilizó el método del picnómetro a una temperatura controlada de 20 °C. La masa del suelo seco utilizada fue de 50 gramos, y al emplear el picnómetro con agua se identificó un deslizamiento de agua equivalente a 21.1 gramos. Estos valores permitieron calcular la gravedad específica (G_s) del suelo mediante la fórmula correspondiente, considerando el factor de corrección por temperatura ($k = 0.998$) para ajustar la densidad del agua. El resultado obtenido fue un valor de 2.36, lo cual indica que el suelo analizado presenta una gravedad específica típica de suelos minerales inorgánicos, lo que es fundamental para el análisis geotécnico y para la determinación de otras propiedades físicas como la densidad seca y húmeda. Este parámetro es crucial en proyectos de ingeniería civil, ya que influye en la estabilidad de estructuras y en la estimación de la capacidad de carga del terreno.

Tabla 1. Determinación de la granulometría

TEMA DE LA PRÁCTICA: DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA					
No. TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	%RETENIDO	%RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
#4	5	0	0	0	100
#10	2	1	0.12	0.12	99.88
#40	0.42	23	2.75	2.87	97.13
#100	0.148	113.4	13.57	16.44	83.56
#200	0.074	264.8	31.69	48.13	51.87
FUENTE		433.4	51.87	100	0
TOTAL		835.6	100		
PESO CUARTEO ANTES DEL LAVADO				840	
PESO CUARTEO DESPUES DEL LAVADO				835.6 g	
ERROR <1%				0.52%	
TAMAÑO NOMINAL MÁXIMO				No.40	
COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD		DE GRAVA		2.32	
Cu>4					
Cu>6 ARENA					
COEFICIENTE DE CURVATURA		DE BIEN GRADUADO		0.84	
1<CC.<3					

Con base en los datos de la práctica de determinación de la granulometría, se realizó el análisis utilizando tamices normalizados con aberturas que van desde el tamiz #4 (5 mm) hasta el tamiz #200 (0.074 mm). El peso total de la muestra después del lavado fue de 835.6 g, con un error del 0.52 % en relación con el peso inicial (840 g), lo cual se encuentra dentro del rango aceptable (<1%). El tamaño nominal máximo determinado fue el del tamiz No. 40, lo que indica que la mayoría del material está compuesto por partículas finas. El análisis del coeficiente de uniformidad (Cu = 2.32) sugiere que se trata de un material poco uniforme, ya que no supera el valor mínimo requerido para arena (Cu > 6). Asimismo, el coeficiente de curvatura (Cc = 0.84) está fuera del rango de 1 < Cc < 3, lo cual indica que el material no está bien graduado, es decir, no presenta una distribución balanceada de partículas de diferentes tamaños. En conjunto, los resultados del análisis granulométrico permiten clasificar al suelo como arena mal graduada, lo cual implica que puede presentar baja capacidad de compactación y estabilidad, siendo esta información crucial en decisiones de diseño y construcción en ingeniería civil y geotécnica.

Tabla 2. Determinación del Limite Liquido

TEMA DE LA PRÁCTICA: DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO												
RECIPIENTE NÚMERO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Peso muestra Hum+rec (Wm + Wr)	30.7	27	27.8	28.5	26.5	26.5	30.5	26.1	25.5	24.8	24.2	23.7

Peso muestra Sec+rec ($W_s + W_r$)	27.5	25.2	26.3	26.3	25.2	25.4	28.6	24.5	24.2	23.8	23.2	22.3
Peso Recipiente (W_r)	18.7	18.8	18.7	18.8	18.7	18.4	18.5	18.7	18.5	18.7	18.5	18.4
Peso agua (W_w)	3.2	1.8	1.5	2.2	1.3	1.1	1.9	1.6	1.3	1	1	1.4
Peso Muestra seca (W_s)	8.8	6.4	7.6	7.5	6.5	7	10.1	5.8	5.7	5.1	4.7	3.9
Contenido de humedad ($W\%$)	36.36	28.13	19.74	31	20	15.71	18.81	27.59	22.81	19.61	21.28	35.9
Contenido de humedad promedio	32.25		25.37		17.855		23.2		21.21		28.59	
Numero de golpes	4		8		12		19		28		30	

El experimento de determinación del límite líquido mediante el método de golpes evidenció una relación inversa entre el contenido de humedad y el número de golpes necesarios para cerrar la ranura en la copa de Casagrande. A medida que aumentó el número de golpes, se observó una disminución progresiva del contenido de humedad, como se refleja en los valores promedios de 32.25 % con 4 golpes, 25.37 % con 8 golpes, hasta 17.85 % con 12 golpes, confirmando la tendencia esperada según los principios de la mecánica de suelos. Esta relación permitió construir la curva de fluidez y, a partir de ella, estimar el contenido de humedad correspondiente a 25 golpes, que representa el límite líquido (LL) del suelo analizado. El comportamiento de los datos fue consistente con los estándares del ensayo, permitiendo identificar el LL con precisión y brindando información fundamental para clasificar el tipo de suelo y predecir su respuesta ante cambios de humedad, lo cual es crucial en aplicaciones geotécnicas.

Tabla 5. Determinación del límite plástico

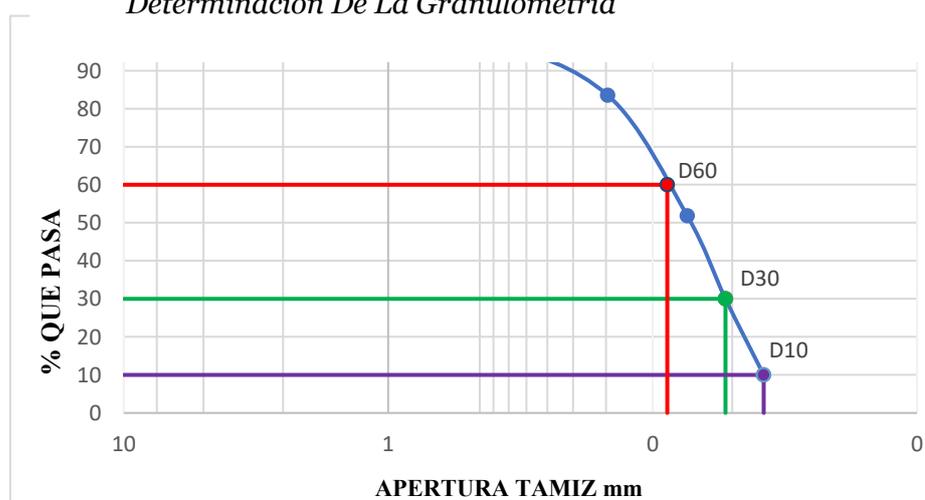
TEMA DE PRÁCTICA: DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO						
RECIPIENTE NÚMERO	1	2	3	4	5	6
Peso muestra Hum+rec ($W_m + W_r$)	8.6	9.2	8.5	8.4	8.9	8.5
Peso muestra Sec+rec ($W_s + W_r$)	8.4	8.9	8.3	8.1	8.5	8.3

Peso Recipiente (W_r)	7.2	7.3	7.2	7.2	7.2	7.3
Peso agua (W_w)	0.2	0.3	0.2	0.3	0.4	0.2
Peso Muestra seca (W_s)	1.2	1.6	1.1	0.9	1.3	1
Contenido de humedad ($W\%$)	16.67	18.75	18.18	33.33	30.77	20
Contenido de humedad promedio	22.95					
Límite líquido	23.00					
Índice plástico	0.05					

La práctica de determinación del límite plástico consistió en calcular el contenido de humedad de varias muestras de suelo después de haber sido moldeadas en forma de hilos hasta alcanzar un diámetro crítico de 3 mm antes de desmoronarse. Los resultados mostraron variaciones en el contenido de humedad entre 16.67 % y 33.33 %, con un valor promedio de 22.95 %, que se considera el límite plástico (LP) del suelo analizado. Comparado con el límite líquido (LL) previamente obtenido de 23.00 %, el índice plástico (IP) resultó ser de apenas 0.05, indicando una diferencia mínima entre ambos límites. Este bajo IP sugiere que el suelo posee escasa plasticidad, lo que puede estar asociado a una baja presencia de finos (arcillas y limos), afectando su comportamiento mecánico, especialmente su capacidad de deformación sin fracturarse. Este dato es relevante para clasificar el suelo y evaluar su idoneidad en obras de ingeniería civil, ya que un IP tan bajo podría indicar un material más susceptible a agrietamientos y con limitada cohesión en estado húmedo.

Gráfico 2.

Determinación De La Granulometría

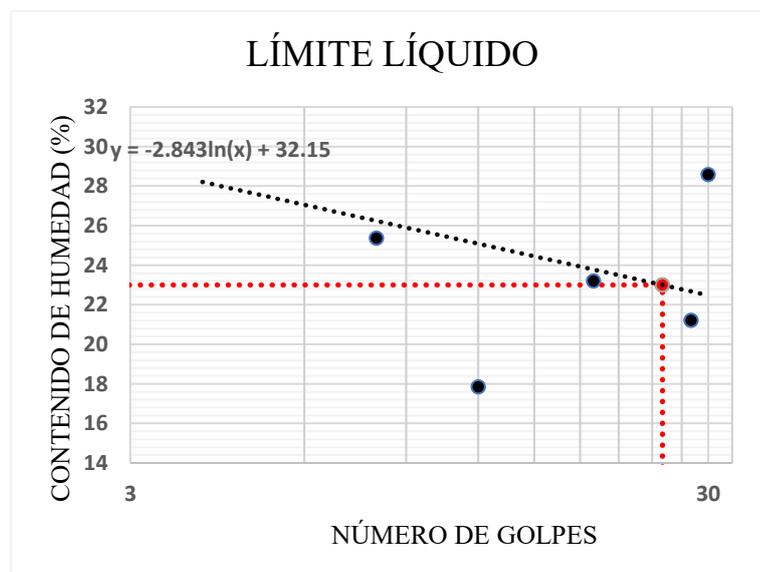


El gráfico presentado corresponde a una curva granulométrica, instrumento esencial en la mecánica de suelos para determinar la distribución de tamaños de las partículas. En él se

observan los valores característicos D₁₀, D₃₀ y D₆₀, que permiten calcular parámetros como el coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de curvatura (Cc). Visualmente, el D₆₀ se aproxima a 0,4 mm, el D₃₀ a 0,2 mm y el D₁₀ a 0,08 mm, lo que indica la presencia predominante de arenas finas y medias, con una pendiente pronunciada entre los tres valores, lo cual evidencia una gradación limitada. Esta configuración sugiere que el suelo podría ser clasificado, según SUCS, como arena mal gradada o arena con finos, condicionado a la confirmación mediante límites de Atterberg. Desde un enfoque práctico, la pendiente marcada de la curva refleja un material con menor diversidad de tamaños, lo que implica baja compacidad natural y potencial alta permeabilidad, características útiles para sistemas de drenaje, pero que requieren precaución si se emplea en cimentaciones o capas de soporte. El análisis revela que el suelo no presenta una gradación ideal para empaques estables, siendo susceptible a segregación bajo cargas o vibraciones. Aun así, los datos obtenidos son consistentes y el ensayo de tamizado se realizó correctamente, quedando listo para el cálculo de Cu y Cc que precisará su clasificación geotécnica definitiva.

Gráfico 3.

Determinación del límite líquido



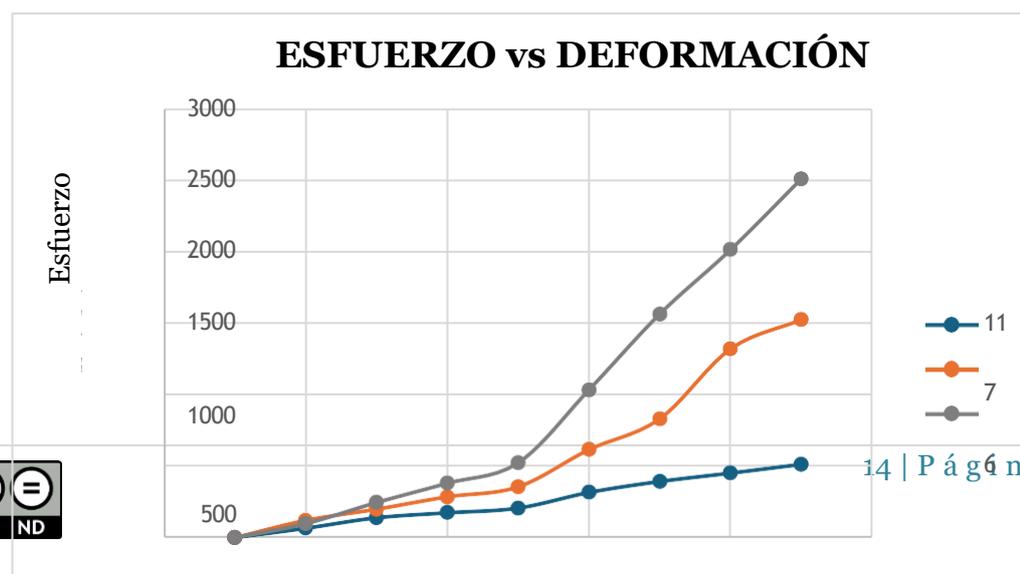
Este gráfico representa el ensayo del Límite Líquido de un suelo, parte fundamental en la determinación de su clasificación y comportamiento plástico. El eje horizontal muestra el número de golpes en la copa de Casagrande y el vertical indica el contenido de humedad (%). Los puntos azules corresponden a datos experimentales, mientras que la línea punteada negra refleja la ecuación de regresión logarítmica ajustada: $y = -2,843 \ln(x) + 32,15$. El cruce de la línea de tendencia con el valor de 25 golpes (referencia estándar) permite obtener el límite líquido, que en este caso se aproxima al 23 %, como se marca con líneas rojas en la gráfica.

Desde un enfoque ingenieril, un límite líquido del orden de 23 % indica que el suelo tiene baja plasticidad y que, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), podría tratarse de una arena limosa o limo de baja compresibilidad, siempre que el índice plástico se confirme con el ensayo de límite plástico. Este valor sugiere que el material, al pasar de estado plástico a líquido, no requiere altos contenidos de humedad, lo que puede influir en su comportamiento volumétrico frente a variaciones de humedad en obra, siendo menos susceptible a expansiones significativas pero más sensible a pérdida de cohesión bajo saturación.

Tabla 6: Cálculos de contenido de humedad y peso unitario seco

ENSAYO DE CARGA-PENETRACIÓN						
Máquina de compresión simple	Área Pistón		3	Velocidad Carga		0,05
Nº MOLDE	A		B		C	
Nº GOLPES POR CAPA	11		27		56	
Penetración (plg)	dial	Presión (lb/plg ²)	dial	Presión (lb/plg ²)	dial	Presión (lb/plg ²)
0,000	0	0	0	0	0	0
0,025	196,3	65,433	360,8	120,267	293,6	97,867
0,050	415,8	138,600	595,6	198,533	735,3	245,100
0,075	519,9	173,300	855,3	285,100	1139,2	379,733
0,100	618,2	206,067	1063,6	354,533	1566,3	522,100
0,200	946,8	315,600	1843	614,333	3095,6	1031,867
0,300	1176	392,000	2488,4	829,467	4686,3	1562,100
0,400	1352,1	450,700	3955,2	1318,400	6033,4	2011,133
0,500	1535,3	511,767	4567,5	1522,500	7518,6	2506,200
Nº MOLDE	Presión (lb/plg ²)	CBR 0,1 plg	Densidad seca	Presión (lb/plg ²)	CBR 0,15 plg	Densidad seca
A	206,067	20,607	1,487	315,600	47,340	1,487
B	354,533	35,453	1,530	614,333	92,150	1,530
C	522,100	52,210	1,650	1031,867	154,780	1,650
Densidad seca máxima	1,654					
DSM	%CBR 0,1 plg		%CBR 0,2 plg	%CBR MAYOR		
95%	1,571	52,210	154,780	154,780		

Diagrama 4: Gráfica de esfuerzo deformación



El gráfico presentado corresponde al ensayo CBR (% California Bearing Ratio), que evalúa la capacidad de soporte de un suelo en función de su densidad seca para dos condiciones de penetración: 0,1” y 0,15”. La tendencia observada en ambas curvas (azul para 0,1” y naranja para 0,15”) es ascendente, lo que evidencia que, a mayor densidad seca, el valor del CBR aumenta, reflejando una mejora significativa en la resistencia al esfuerzo de penetración. En la densidad seca de aproximadamente 1,56 g/cm³, señalada por la línea roja vertical, se registran valores de CBR cercanos a 35,45 % para la penetración de 0,1” y 92,15 % para la de 0,15”. Estos resultados indican un material con alta capacidad portante, especialmente notable en el segundo caso, que supera ampliamente el umbral de calidad para capas de subbase y base en pavimentos. Desde la perspectiva de diseño vial, esta relación densidad–CBR confirma que una compactación óptima es determinante para maximizar el desempeño estructural del suelo, reduciendo la deformación bajo carga repetida y prolongando la vida útil del pavimento.

DISCUSIÓN

La interpretación conjunta de los ensayos realizados en el suelo de la vía al Casigana revela un panorama técnico coherente y respaldado por parámetros medidos con rigor. Los valores obtenidos en la curva de compactación, con una densidad seca máxima de 1,60 g/cm³ y un contenido de humedad óptimo cercano al 18,7 %, establecen una base clara para definir las condiciones de campo que maximicen la capacidad portante. En paralelo, la determinación del esfuerzo admisible arrojó valores promedio cercanos a 0,90 kg/cm², lo que, junto con los resultados del CBR, evidencia que el suelo, aunque naturalmente presenta ciertas limitaciones granulométricas y de plasticidad, puede alcanzar niveles satisfactorios de desempeño estructural si se somete a un proceso de estabilización y compactación controlado.

En cuanto a la granulometría, la clasificación como arena mal gradada o arena con finos, confirmada por el coeficiente de uniformidad ($C_u = 2,32$) y el coeficiente de curvatura ($C_c = 0,84$), pone de manifiesto que el material carece de una distribución de partículas que garantice una alta compacidad natural. Este aspecto se ve reforzado por los límites de Atterberg obtenidos —límite líquido del 23 % y un índice plástico prácticamente nulo (0,05)—, los cuales describen un suelo de muy baja plasticidad y cohesión, condiciones que lo vuelven más susceptible a pérdidas de resistencia bajo saturación. Sin embargo, su baja expansividad y facilidad para el drenaje podrían ser aprovechadas si se combinan con una adecuada estabilización con cal, como la empleada en el ensayo, mejorando la resistencia al corte y la durabilidad de la estructura vial.

El ensayo CBR es particularmente revelador, pues muestra un incremento pronunciado en la capacidad de soporte conforme aumenta la densidad seca, alcanzando un 92,15 % para la

penetración de 0,15” en una densidad de 1,56 g/cm³. Este valor, muy por encima de los umbrales establecidos para capas de subbase y base, confirma que el material responde positivamente a una compactación adecuada, incluso sin modificar su composición granulométrica de base. Esto sugiere que, en obra, priorizar el control estricto del contenido de humedad y la energía de compactación permitirá obtener un suelo con excelente comportamiento estructural, capaz de soportar cargas repetidas sin deformaciones críticas.

En síntesis, el análisis global indica que el suelo estudiado, a pesar de presentar limitaciones naturales en su gradación y cohesión, ofrece un margen de mejora considerable mediante procesos de estabilización y compactación bien planificados. Su baja plasticidad reduce riesgos de deformaciones volumétricas, y los altos valores de CBR alcanzados demuestran que, una vez optimizadas las condiciones de densidad y humedad, el material puede cumplir con los requisitos exigidos para estructuras viales de alta demanda. Este conjunto de evidencias técnicas refuerza la necesidad de un control de calidad continuo en campo y laboratorio, asegurando que las condiciones determinadas en el estudio se reproduzcan fielmente en la construcción, garantizando así la vida útil y seguridad de la infraestructura.

CONCLUSIÓN

A partir de los resultados obtenidos, se establece que el suelo analizado presenta un potencial de uso en obras viales siempre que se apliquen procesos de compactación controlados y, de ser necesario, estabilización con agentes como la cal. La elevada respuesta en el ensayo CBR ante incrementos de densidad seca confirma que la resistencia del material depende en gran medida del control de humedad y energía de compactación, lo que debe ser considerado como criterio técnico prioritario en el diseño y ejecución de la obra.

La baja plasticidad medida, junto con su clasificación granulométrica, plantea un escenario favorable para minimizar riesgos de expansiones o retracciones significativas, pero también advierte que la cohesión natural del suelo es limitada, por lo que la estructura de soporte debe diseñarse contemplando este factor. En términos de desempeño a largo plazo, la gestión de la permeabilidad y la prevención de saturación son aspectos críticos para preservar la capacidad portante observada en laboratorio.

Sin embargo, queda abierta la interrogante sobre el comportamiento del material bajo condiciones dinámicas prolongadas, como la acción combinada de cargas cíclicas y humedad variable a lo largo de las estaciones. Este aspecto, no abordado en el presente estudio, requiere ensayos triaxiales cíclicos y monitoreos en campo que permitan evaluar la pérdida de resistencia con el tiempo. Por lo tanto, se recomienda que futuros trabajos profundicen en el análisis de la durabilidad del suelo estabilizado en condiciones reales de servicio, para validar y afinar las especificaciones de construcción derivadas de este estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (2017). Standard Method of Test for Moisture–Density Relations of Soils Using a 10 lb (4.54 kg) Rammer and an 18 in. (457 mm) Drop (T 180). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ASTM D1557-12, “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)),” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- B. M. Das, Principios de Ingeniería de Cimentaciones, 8.^a ed., Cengage Learning, México, 2018.
- Coduto, D. P., Yeung, M. C., & Kitch, W. A. (2016). Geotechnical Engineering: Principles and Practices (2nd ed.). Pearson.
- Coduto, D. P., Yeung, M. C., & Kitch, W. A. (2016). Geotechnical Engineering: Principles and Practices (2nd ed.). Pearson.
- D. P. Coduto, Geotechnical Engineering: Principles and Practices, 2nd ed., Pearson Education, 2011.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). Principles of Geotechnical Engineering (9th ed.). Cengage Learning.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). Principles of Geotechnical Engineering (9th ed.). Cengage Learning.
- Hernández-Sampieri, R., Mendoza, C., & Fernández-Collado, C. (2021). Metodología de la investigación (7.^a ed.). McGraw-Hill.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), “Norma Técnica Ecuatoriana INEN 847: Suelos. Determinación de la compactación,” Quito, Ecuador, 2008.
- J. E. Bowles, Física de suelos y mecánica de suelos en la ingeniería de cimentaciones, 5.^a ed., McGraw-Hill, México, 2001.
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP), “Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes,” 5.^a ed., Quito, Ecuador, 2015.
- Sivakugan, N., Das, B. M., Shukla, S. K., & Poudyal, D. (2014). Soil Mechanics and Foundations. Oxford University Press.
- T. W. Lambe y R. V. Whitman, Soil Mechanics, John Wiley & Sons, New York, 1969.

CONFLICTO DE INTERÉS:

Los autores declaran que no existen conflicto de interés posibles.

FINANCIAMIENTO

No existió asistencia de financiamiento de parte de pares externos al presente artículo.

NOTA:

El artículo no es producto de una publicación anterior