

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



**Estabilización de suelos con fines de pavimentación con cal y
cemento en la superficie de rodadura vía Esquen - Tariachi,
Juliaca – San Román – Puno**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autores:

Oscar David Apaza Jara
Rudy Nail Gutierrez Molina

Asesor:

Mg. Leonel Chahuares Paucar

Juliaca, setiembre de 2026

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Leonel Chahuares Paucar, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON FINES DE PAVIMENTACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LA SUPERFICIE DE RODADURA VÍA ESQUEN - TARIACHI, JULIACA – SAN ROMÁN – PUNO”** de los autores **Oscar David Apaza Jara y Rudy Nail Gutierrez Molina** tiene un índice de similitud de 4% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 21 días del mes de setiembre del año 2026.



Mg. Leonel Chahuares Paucar
Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a 21 día(s) del mes de septiembre del año 2020, siendo las 14:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Dr. Edwin Parillo Escarona, el (la) secretario(a): Mg. Herson Duberly Pani Guini y los demás miembros: Msc. Ecker Mamoni Shomki y el (la) asesor(a) Mgr. Leonel Shahuarec Paucar

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:

"Estabilización de suelos con fines de pavimentación con cal y cemento en la superficie de rodadura vía Esquen - Tariachi, Juliaca - San Ramón - Puno"

del(los) bachiller(es): a) Rudy Nail Gutierrez Molina
b) Oscar David Apaza Jara
c)

conducente a la obtención del título profesional de:

Ingeniero Civil

(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Rudy Nail Gutierrez Molina

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	15	B-	Buena	Muy Buena

Bachiller (b): Oscar David Apaza Jara

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	15	B-	Buena	Muy Buena

Bachiller (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente/a
Asesor/a
Bachiller(a)

Miembro
Bachiller (b)

Secretario/a
Miembro
Bachiller (c)

Índice de Contenido

Abstract	5
Resumen.....	6
1. Introducción	7
2. Materiales y Métodos.....	8
2.1. Materiales	8
2.1.1. Suelo Natural	8
2.1.2. Cal Hidratada (CH)	9
2.1.3. Cemento Portland (CeP)	9
2.1.4. Proporciones de Mezcla	10
2.2. Métodos	10
2.2.1. Muestreo y preparación del suelo	10
2.2.2. Caracterización física del suelo	11
2.2.3. Caracterización mecánica del suelo	12
2.2.4. Preparación de mezclas estabilizadas.....	13
2.2.5. Análisis estadístico.....	14
3. Resultados	14
3.1. Propiedades Iniciales del Suelo	14
3.2. Clasificación SUCS Y AASHTO.....	17
3.3. Proctor Modificado (ASTM D1557).....	18
3.4. Límites de Atterberg en suelos estabilizados.....	20
3.5. Capacidad portante (CBR)	22
3.6. Análisis estadístico.....	26
4. Discusiones	28
4.1. Comportamiento geotécnico inicial y criterio de selección de suelos críticos	28
4.2. Efecto de los estabilizantes sobre la compactación.....	29
4.3. Efecto de los estabilizantes sobre la plasticidad	29
4.4. Efecto de los estabilizantes sobre el CBR y determinación de la dosificación óptima	29
5. Conclusiones.....	30
6. Referencias	31
Anexos	33

Estabilización de suelos con fines de pavimentación con cal y cemento en la superficie de rodadura vía Esquen-Tariachi, Juliaca – San Román – Puno

Soil stabilization for paving purposes with lime and cement on the road surface of the Esquen-Tariachi road, Juliaca – San Román – Puno

Apaza Jara Oscar David *; Gutierrez Molina Rudy Nail *; Leonel Chahuares Paucar*

* Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Juliaca, Perú.

* Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Juliaca, Perú

Abstract

The Esquen-Tariachi road (Juliaca, Puno, 3,824 m a.s.l.) has subgrade clay soils with a free swell exceeding 2% and plasticity indices of 17.71% (C-03-E2) and 16.81% (C-04-E3) determined on samples prepared for the stabilization program. These conditions lead to a loss of bearing capacity under varying moisture conditions and accelerated deterioration of the road surface. The study evaluated the effect of stabilization with hydrated lime (CH), Portland cement type IP (CeP), and a binary mixture (CH+CeP) on the compaction, plasticity, and CBR of the two critical clay strata identified: C-03-E2 (CL, A-7-6) and C-04-E3 (CL, A-7-6). Four test pits were excavated to a depth of 2.00 m according to MTC E-100; Modified Proctor (ASTM D 1557) and CBR (ASTM D 1883) tests were performed with lime dosages of 1–7%, cement dosages of 1–15%, and binary mixtures between 0.5%+0.5% and 5%+5%. In C-03-E2 (natural CBR = 10.5%, PI = 17.71%), the 3% cement produced the highest CBR (29.1% at 100%, +177.1%), with a reduction of the PI to 5.7% at that dosage and low sensitivity to compaction energy. In C-04-E3 (natural CBR = 5.9%, PI = 16.81%), the 7% lime mixture achieved the highest absolute CBR (78.2% at 100%, +1,225.4%), although the 1.5%+1.5% binary mixture offered a CBR of 75.0% with an optimum moisture content of 14.00% and lower sensitivity to compaction, positioning it as the solution with the greatest construction viability. Low doses of lime and cement applied individually in C-04-E3 increased the plasticity index before decreasing it, a behavior that the binary mixture avoided from the first application. All treatments exceeded the minimum CBR of 6% for subgrade (EG-2013); the treatments in C-04-E3 also exceeded the threshold for granular subbase ($\geq 30\%$). The optimal dosage is specific to each geotechnical zone of the corridor, thus ruling out the application of a single stabilizer at a fixed dose across the entire section.

Keywords: hydrated lime, Portland cement, soil stabilization, soil strength, bearing capacity.

Resumen

La vía Esquen-Tariachi (Juliaca, Puno, 3,824 m s.n.m.) presenta suelos arcillosos de subrasante con expansión libre superior al 2% e índices de plasticidad de 17.71% (C-03-E2) y 16.81% (C-04-E3) determinados sobre las muestras preparadas para el programa de estabilización, condiciones que generan pérdida de capacidad portante bajo variación de humedad y deterioro acelerado de la superficie de rodadura. El estudio evaluó el efecto de la estabilización con cal hidratada (CH), cemento Portland tipo IP (CeP) y mezcla binaria (CH+CeP) sobre la compactación, plasticidad y CBR de los dos estratos arcillosos críticos identificados: C-03-E2 (CL, A-7-6(15)) y C-04-E3 (CL, A-7-6(18)). Se ejecutaron cuatro calicatas a 2.00 m de profundidad conforme a MTC E-100; los ensayos de Proctor Modificado (ASTM D 1557) y CBR (ASTM D 1883) se realizaron con dosificaciones de cal al 1–7%, cemento al 1–15%, mezclas binarias entre 0.5%+0.5% y 5%+5%. En C-03-E2 (CBR natural = 10.5%, IP = 17.71%), el cemento al 3% produjo el mayor CBR (29.1% al 100% y 23.9% al 95%, +231.9% respecto al natural al 95%), con reducción del IP hasta 5.7% a esa dosis y baja sensibilidad a la energía de compactación. En C-04-E3 (CBR natural = 5.9%, IP = 16.81%), la cal al 7% alcanzó el mayor CBR absoluto (78.2% al 100% y 65.2% al 95%), aunque la mezcla binaria 1.5%+1.5% ofreció CBR de 75.0% con humedad óptima de 14.00% y menor sensibilidad a la compactación, posicionándola como la solución de mayor viabilidad constructiva. Dosis bajas de cal y cemento aplicados individualmente en C-04-E3 incrementaron el índice de plasticidad antes de reducirlo, comportamiento que la mezcla binaria evitó desde la primera dosificación. Todos los tratamientos superaron el CBR mínimo de 6% para subrasante (EG-2013); los tratamientos en C-04-E3 superaron adicionalmente el umbral de subbase granular ($\geq 30\%$). La dosificación óptima es específica para cada zona geotécnica del corredor, lo que descarta la aplicación de un único estabilizante a dosis fija en todo el tramo.

Palabras clave: cal hidratada, cemento Portland, estabilización de suelos, resistencia de suelos, capacidad portante.

1. Introducción

Las vías no pavimentadas en zonas rurales del altiplano peruano concentran una problemática geotécnica específica: suelos arcillosos de subrasante con alta plasticidad, expansión libre significativa y capacidad portante insuficiente que se deteriora drásticamente bajo variación de humedad. En el corredor vial Esquen-Tariachi, distrito de Juliaca, provincia de San Román, región Puno, esta condición se expresa en CBR naturales de 5.9% y 10.5% en los estratos arcillosos de subrasante, valores que están en el límite o por debajo del mínimo de 6% establecido en el Manual de Carreteras EG-2013, con índices de plasticidad de 17.71% (C-03-E2) y 16.81% (C-04-E3) y expansión libre superior al 2%. A 3,824 m s.n.m., las variaciones estacionales de humedad propias del altiplano -precipitaciones concentradas entre noviembre y marzo, seguidas de meses de estiaje- exacerban la susceptibilidad de estos suelos a la pérdida de resistencia, generando deterioro acelerado de la superficie de rodadura y elevados costos de mantenimiento.

La estabilización con cemento Portland y cal hidratada son los métodos más investigados y publicados para modificar suelos arcillosos subterráneos. La Asociación Nacional de Cal (2004) y Sendilvadivelu et al. (2025) describen los mecanismos de acción de la cal en dos procesos. El primero es la floculación-aglomeración. El segundo y último proceso, que es la reacción pozzolánica, toma varios días a semanas para completarse y resulta en el aumento de la resistencia y endurecimiento del suelo arcilloso. El mecanismo de acción del cemento Portland es la hidratación de sus componentes. Los clinker de cemento Portland contienen fases de C_2S y C_3S , que al hidratarse producen C-S-H, lo que resulta en el endurecimiento del suelo arcilloso. El proceso comienza inmediatamente después de mezclar el cemento con agua. Otras fases del clinker de cemento Portland, como C_5A y C_4A , también pueden participar en el proceso reaccionando con el suelo arcilloso para formar C-A-H y C-S-H, respectivamente. La principal ventaja de usar una mezcla de cemento Portland y cal hidratada es la rapidez de fraguado del suelo mezclado con cemento (del orden de horas), debido al fraguado temprano del cemento, en combinación con el relativamente largo periodo (días a semanas) de fraguado debido a la reacción pozzolánica de la cal. Por lo tanto, la mezcla binaria logra un efecto sinérgico de fraguado y endurecimiento del suelo arcilloso. (Lindh & Lemenkova, 2023).

La evidencia experimental disponible confirma la eficacia de ambos estabilizantes en suelos arcillosos, pero también muestra que la magnitud de la mejora depende de la mineralogía específica del suelo. Kuswaya et al. (2019) reportaron incrementos de CBR desde 3.46% hasta 130% en arcillas de Indonesia con cemento Portland tipo I al 10%; Bucheli-Pérez et al. (2022) obtuvieron resistencia a compresión de 28.09 kg/cm² con 6% de cemento en la Ruta del Cacao (Ecuador) sobre una subrasante con CBR natural de 5.9%, valor idéntico al registrado en C-04-E3 del presente estudio. Para la cal, Ahmed et al. (2024) demostraron incrementos de CBR del 69% con 2.5% SBA + 5% cal en arcillas de Pakistán, y Diniz et al. (2024) confirmaron que la cal calcítica a 5% produce mayor resistencia que a 3% en suelos tropicales de Brasil, aunque con reducción de densidad aparente a dosis superiores al óptimo. Tan et al. (2020), en una revisión sistemática de estabilización química en carreteras, establecen que el cemento es más eficiente en suelos con menor contenido arcilloso, mientras que la cal maximiza su efecto en arcillas plásticas mediante floculación y reacciones puzolánicas: este principio general no ha sido validado experimentalmente para las arcillas del altiplano de Puno, donde las condiciones de altitud, temperatura y mineralogía local pueden producir respuestas distintas a las documentadas en otras regiones.

La brecha que motiva el presente estudio no es la ausencia de evidencia sobre estabilización con cal y cemento en general, sino la falta de datos experimentales que determinen la dosificación óptima de cada estabilizante -aplicado individualmente y en mezcla binaria- para los suelos arcillosos específicos del corredor Esquen-Tariachi. La pregunta técnica central es si el comportamiento documentado en la literatura internacional se reproduce en estos suelos, o si la combinación de alta altitud, mineralogía local y condiciones climáticas del altiplano modifica la relación dosis-

respuesta de forma que justifique dosificaciones diferentes a las de referencia. Los estudios de Albuquerque Filho et al. (2024) en caminos no pavimentados de Brasil y de Wibawa y Maharani (2024) en arcillas expansivas de Indonesia muestran que incluso dosificaciones bajas de cemento (2–3%) pueden producir mejoras sustanciales de CBR, pero también que la sensibilidad del material tratado a la energía de compactación varía significativamente entre suelos, aspecto crítico para la ejecución en zonas rurales con equipamiento limitado.

El presente estudio evaluó el efecto de la cal hidratada, el cemento Portland tipo IP y la mezcla binaria de ambos sobre la compactación, plasticidad y CBR de los estratos arcillosos C-03-E2 y C-04-E3 de la vía Esquen-Tariachi, con dosificaciones de cal entre 1% y 7%, cemento entre 1% y 15%, y mezclas binarias entre 0.5%+0.5% y 5%+5%, siguiendo las normas ASTM D 1557 y ASTM D 1883. Los resultados permiten identificar la dosificación óptima por calicata, cuantificar la diferencia de respuesta entre suelos y evaluar la viabilidad constructiva de cada tratamiento en función de su sensibilidad a la energía de compactación.

2. Materiales y Métodos

2.1. Materiales

2.1.1. Suelo Natural

El material de estudio corresponde al suelo de subrasante extraído de la vía Esquen-Tariachi, distrito de Juliaca, provincia de San Román, región Puno, a 3,824 m s.n.m. Se ejecutaron cuatro calicatas (C-01 a C-04) a 2.00 m de profundidad conforme a la norma MTC E-100, espaciadas según el criterio mínimo de 250 m establecido en el Manual de Carreteras EG-2013. De los cuatro estratos evaluados para subrasante, C-01-E3 (ML, CBR = 15.5%), C-02-E3 (GW, CBR = 37.1%) y C-03-E2 (CL, CBR = 10.5%) cumplen el requisito mínimo de 6% para subrasante establecido en EG-2013. C-01-E3 es limo inorgánico y C-02-E3 es grava bien graduada, ambos sin plasticidad significativa que no presentan expansión libre ni susceptibilidad significativa a la variación de humedad; su inclusión en el programa de ensayos cumple la función de referencia granulométrica del corredor, sin que exista justificación técnica para estabilizarlos. C-03-E2 cumple el mínimo normativo en CBR pero su clasificación como arcilla CL, su expansión libre de 2.47% y su índice de plasticidad de 17.71% exponen al suelo a pérdidas de resistencia bajo variación de humedad estacional, condición que en el altiplano puneño puede llevar el CBR real en servicio por debajo del umbral de diseño. Los ensayos de estabilización en C-03-E2 no responden a una deficiencia estructural en estado natural sino a evaluar la ganancia de rigidez y la reducción de expansividad en una subrasante de calidad intermedia, con miras a extender su vida útil bajo las condiciones climáticas del tramo. C-04-E3, con CBR = 5.9%, es el único estrato que no cumple el requisito mínimo sin tratamiento y cuya estabilización es técnicamente obligatoria antes de cualquier intervención vial. La expansión libre se determinó durante el periodo de saturación del ensayo CBR (ASTM D 1883), con lectura de deformación vertical al cabo de 96 horas de inmersión. Según el criterio del Transportation Research Board (TRB), la expansión libre entre 0% y 2% corresponde a un potencial bajo expansivo; entre 2% y 4%, moderado. Los valores de 2.47% y 2.42% registrados ubican a C-03-E2 y C-04-E3 en el límite inferior del rango moderado, condición que en el altiplano puneño se ve agravada por los ciclos de humedecimiento y secado estacionales, los cuales amplifican la variación volumétrica del suelo bajo tráfico. El estudio no incluyó ensayo de consolidación ni índice de hinchamiento libre independiente (ASTM D 4546), por lo que la caracterización del potencial expansivo se limita a la expansión libre medida durante el CBR, dato suficiente para justificar la necesidad de estabilización, pero no para una clasificación expansiva completa según normas geotécnicas especializadas.



Figura 1. En la ilustración se muestra la arcilla en estado seco extraído de campo la muestra de arcilla triturada y clasificada por el tamiz N° 04.

2.1.2. Cal Hidratada (CH)

Se empleó cal hidratada industrial compuesta por hidróxido de calcio Ca(OH)_2 , adquirida conforme a NTP 334.125. Su composición incluye CaO entre 65–75%, SiO_2 entre 17–25% y pérdida por ignición entre 20–30% (Laboratorios Analíticos del Sur, Arequipa). El mecanismo de acción en arcillas ocurre en dos etapas secuenciales: floculación-aglomeración inmediata, que reduce el índice de plasticidad al intercambiar iones Ca^{2+} por iones Na^+ y K^+ en la doble capa difusa; y puzolanización diferida, en la que el Ca(OH)_2 reacciona con SiO_2 y Al_2O_3 de la arcilla para formar silicatos cálcicos hidratados (C-S-H) y aluminatos cálcicos hidratados (C-A-H), que incrementan la resistencia a largo plazo (National Lime Association, 2004; Sendilvadivelu et al., 2025).

2.1.3. Cemento Portland (CeP)

Se utilizó cemento Portland tipo IP conforme a NTP 334.009, seleccionado por su disponibilidad regional y su formulación para suelos de granulometría fina. Su composición presenta CaO entre 60–67%, Al_2O_3 entre 3–8% y SiO_2 entre 1–3%. La hidratación del cemento genera una matriz rígida de C-S-H que reduce la porosidad del suelo e incrementa la resistencia a compresión, mecanismo documentado mediante microscopía electrónica de barrido (Zhao & Wong, 2025; SEM Experiment, 2025). La diferencia funcional respecto a la cal reside en la velocidad de reacción: el cemento produce ganancia de resistencia desde las primeras horas de curado, mientras que la cal alcanza su mayor efecto entre 7 y 28 días.

Tabla 1. Comparación de Análisis químico entre Cemento Portland vs Cal Hidratada.

Parámetros Químicos	Símbolo	Cemento Portland	Cal
			hidratada Ca(OH)_2 (%)
Óxido de aluminio	Al_2O_3	3 – 8 %	<1 %
Óxido de calcio	CaO	60–67 %	65–75 %
Óxido de hierro	Fe_2O_3	0.5 – 6 %	<0.5 %
Pérdida por	LOI	13.78 %	20 – 30 %

ignición			
Óxido de magnesio	MgO	0 – 5 %	0.5 – 2 %
Óxido de azufre	SO ₃	<0.1 %	1 – 3 %
Óxido de silicio	SiO ₂	1 – 3 %	17 – 25 %

Fuente. Laboratorios Analíticos del Sur – Arequipa.

2.1.4. Proporciones de Mezcla

Las dosificaciones se definieron en función del rango recomendado por el Manual de Ensayo de Materiales MTC RD N°18-2016 (1%, 3% y 7%) y de antecedentes bibliográficos para arcillas de alta plasticidad. Para C-03-E2 se ensayaron: cal al 1%, 3%, 5% y 7% en Proctor Modificado (dosificación óptima: 1% CH, γ_d máx = 1.69 gr/cm³); cemento al 1%, 3%, 5% y 7% (dosificación óptima: 3% CeP, γ_d máx = 1.68 gr/cm³); y una mezcla binaria de 0.5% CH + 0.5% CeP. Para C-04-E3 se ensayaron: cal al 3%, 5%, 7% y 10% (dosificación óptima: 7% CH, γ_d máx = 1.71 gr/cm³); cemento al 1%, 3%, 5%, 7%, 10% y 15% (dosificación óptima: 3% CeP, γ_d máx = 1.74 gr/cm³); y mezclas binarias de 1.5%, 2.5%, 3.5% y 5% de cada componente. Los ensayos de CBR se ejecutaron únicamente con las dosificaciones que produjeron la mayor densidad seca en Proctor, criterio que concentra el programa en las condiciones de mayor potencial de resistencia.

Tabla 2. Proporción de Mezcla de Cemento y Cal para la obtención de densidad máxima en suelos arcillosos.

Muestra de Suelo	Cemento Portland (CeP)	Cal Hidratada (CH)	Combinación Mixta
C1-E3 (Arena)	0 %	0 %	0 %
C1-E3 (Arena)	0 %	0 %	0 %
C3-E2 (Arcilla)	1 – 3 %	1 – 3 %	1 – 3 %
C4-E3 (Arcilla)	1 – 3 %	3 – 7 %	1 – 3 %

Fuente. Propia.

Tabla 3. Proporción de Mezcla de Cemento y Cal de densidad máxima óptima.

Muestra de Suelo	Cemento Portland (CeP)	Cal hidratada (CH)	Combinación Mixta
C1-E3 (Arena)	0 %	0 %	0 %
C1-E3 (Arena)	0 %	0 %	0 %
C3-E2 (Arcilla)	3 %	1 %	1 %
C4-E3 (Arcilla)	3 %	7 %	3 %

Fuente. Propia.

2.2. Métodos

2.2.1. Muestreo y preparación del suelo

La extracción siguió el procedimiento de muestreo alterado por calicatas según MTC E-100. El suelo extraído fue secado al aire, disgregado manualmente y tamizado por la malla N°4 (4.75 mm) para separar partículas gruesas que interferirían con la homogeneidad de las mezclas. El material retenido en N°4 representó menos del 5% en todas las muestras arcillosas, lo que es consistente con su clasificación CL.



Figura 2. (a) Extracción del suelo, (b) Secado, (c) Desterronado, (d) Tamizado, (e) Almacenado.

2.2.2. Caracterización física del suelo

Se determinó el contenido de humedad natural (ASTM D 2216), la granulometría por tamizado con lavado en malla N°200 (ASTM D 422 / MTC E 107) y los límites de Atterberg (ASTM D 4318 / MTC E 110-111). La clasificación se realizó bajo los sistemas SUCS (ASTM D 2487) y AASHTO (ASTM D 3282). Los resultados de granulometría confirman que C-03-E2 tiene 80.22% de partículas pasantes la malla N°200 y C-04-E3 tiene 85.60%, valores que caracterizan materiales arcillosos de baja permeabilidad y alta susceptibilidad a la variación de humedad. C-01-E3 y C-02-E3 presentan porcentajes pasantes de 64.00% y 3.88% respectivamente, coherentes con su clasificación como materiales granulares de referencia.

Tabla 4. Ensayos de caracterización física del suelo.

Ensayo de laboratorio	Normativa
Exploración de suelo	ASTM D 420
Análisis Granulométrico por Tamizado	(MTC E 107)
Límites de Atterberg	
Límite Líquido	(MTC E 110)
Análisis granulométrico de suelos por tamizado	ASTM D 422
Límites de Atterberg	ASTM D 4318
Sistema Unificado de clasificación de suelos (SUCS)	ASTM D 2487
Sistema de clasificación AASHTO	ASTM D 3282

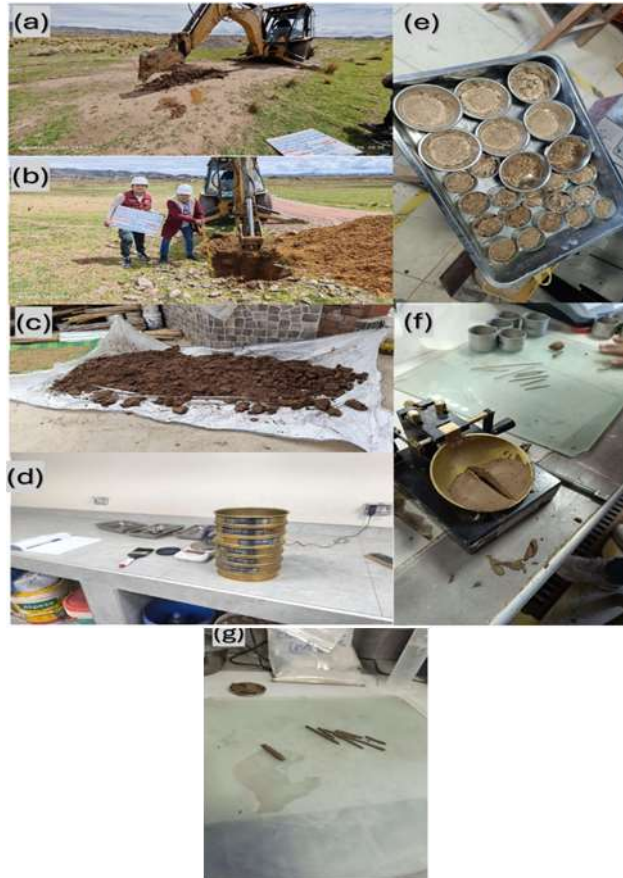


Figura 3. (a) Exploración de suelo, (b) Excavación de calicatas, (c) secado de muestras al aire libre, (d) Granulometría (e) Contenido de Humedad, (f) Límites de atterberg (límite líquido) y (g) Límites de Atterberg (límite plástico).

2.2.3. Caracterización mecánica del suelo

La compactación se determinó mediante Proctor Modificado (ASTM D 1557, Método A), usando molde de 101.6 mm de diámetro, pisón de 4.54 kg (10 lb), altura de caída de 457.2 mm (18 in), 5 capas y 25 golpes por capa, con energía de compactación de 2,700 kN·m/m³. Este mismo nivel de energía se aplicó en la preparación de los especímenes de CBR (ASTM D 1883), garantizando que ambos ensayos sean comparables al trabajar a la misma densidad de referencia. La capacidad portante se evaluó mediante CBR al 100% y 95% de la densidad máxima seca, con saturación obligatoria de 96 horas para simular la condición más desfavorable del suelo en servicio.

Tabla 5. Ensayos de caracterización mecánica del suelo.

Ensayo de laboratorio	Normativa
Proctor Modificado	ASTM D 1557
Capacidad de soporte (California Bearing Ratio – CBR)	ASTM D 1883



Figura 4. Proctor Modificado, CBR, Ensayo de CBR.

2.2.4. Preparación de mezclas estabilizadas

El suelo tamizado por N°4 se mezcló en seco con la dosificación de cal o cemento hasta obtener una distribución visualmente uniforme del estabilizante. Posteriormente se adicionó agua hasta alcanzar la humedad óptima determinada en Proctor para cada mezcla, y se homogenizó durante tres minutos. Las mezclas con cal se compactaron inmediatamente después de la homogenización para evitar el inicio de reacciones puzolánicas previas a la compactación, que modificarían la curva de densificación. Las mezclas con cemento se compactaron dentro de los primeros 30 minutos desde la adición de agua, conforme a ASTM D 1557. Tras la compactación, los especímenes de CBR se sometieron a curado húmedo de 96 horas antes del ensayo de penetración.



Figura 5. (a) Suelo, (b) Tamizado por Malla N° 04, (c) Adición de cal/cemento, (d) Homogenización de Suelo y adición, (e) Adición de agua, (f) Compactación de muestra adicionada, (g) Curado, y (h) Ensayo, penetración de probeta.

2.2.5. Análisis estadístico

Los datos de CBR, γ_d máxima, humedad óptima e índice de plasticidad se procesaron en R versión 4.6.1. Se utilizaron los paquetes: stats (Shapiro-Wilk, Lilliefors, ANOVA, correlación de Pearson y Spearman, regresión lineal), nortest (prueba de Lilliefors), car (prueba de Levene para homogeneidad de varianzas), agricolae (post-hoc Tukey HSD con grupos homogéneos), dunn.test (post-hoc de Dunn con corrección de Bonferroni), psych (asimetría y curtosis), ggplot2 (visualizaciones), corrplot (mapa de calor de correlaciones), officer y flextable (generación del informe en formato Word). Se aplicaron pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk y Lilliefors para determinar el supuesto distribucional de cada variable. La comparación entre grupos no se desarrolló mediante ANOVA ni Kruskal-Wallis porque cada combinación de calicata y tratamiento cuenta con una sola observación en CBR ($n = 1$ por condición), lo que impide estimar la varianza dentro de grupos y hace inválida cualquier prueba de comparación de medias. El análisis estadístico se limitó a las pruebas de distribución (Shapiro-Wilk, Lilliefors) y a la cuantificación de relaciones entre variables mediante correlación de Pearson y Spearman, que son aplicables con el conjunto de observaciones disponible bajo las restricciones declaradas en el párrafo precedente. La relación entre variables geotécnicas se cuantificó mediante matrices de correlación de Pearson y Spearman. Se ajustaron modelos de regresión lineal entre la dosis de estabilizante y el CBR, y entre el índice de plasticidad y el CBR, reportando R^2 , pendiente y p-valor de cada modelo. El tamaño del efecto se estimó mediante η^2 (eta cuadrado). Dado que cada combinación de calicata y tratamiento cuenta con una sola réplica experimental ($n=1$ por condición en CBR), los análisis estadísticos inferenciales deben interpretarse con cautela; su función principal en este trabajo es cuantificar la magnitud de los efectos y las correlaciones entre variables, no establecer inferencias poblacionales con alta potencia estadística.

3. Resultados

3.1. Propiedades Iniciales del Suelo

Se ejecutaron cuatro calicatas a 2.00 m de profundidad mínima conforme al criterio de espaciamiento de 250 m establecido en el Manual de Carreteras EG-2013. El contenido de humedad natural varía entre estratos y calicatas, con valores máximos en C-03 (35.97% en el estrato 01), asociados a la mayor capacidad de retención hídrica de los horizontes arcillosos superficiales, y valores mínimos en C-04 (8.29% en el estrato 01), correspondientes a horizontes de menor plasticidad.

Tabla 6. Contenido de humedad natural por calicata y estrato

	C-01	C-02	C-03	C-04
EST. 01	26.98%	13.12%	35.97%	8.29%
EST. 02	6.00%	11.39%	27.99%	8.98%
EST. 03	18.20%	11.86%	-	28.88%

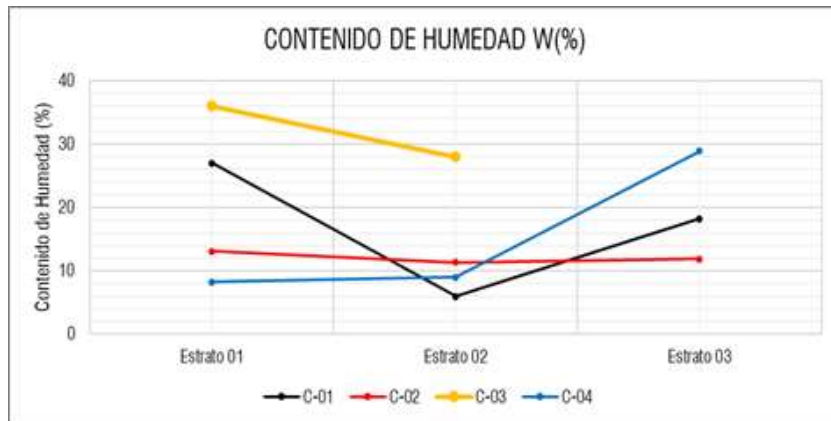


Figura 6. Comparación resultados de contenido de humedad de los puntos de exploración de las C-01, C-2, C-3 y C-4.

El análisis granulométrico mediante lavado por malla N°200 evidenció el comportamiento diferenciado de los cuatro estratos. C-02-E3 registró 3.88% pasante N°200, coherente con su clasificación como grava bien graduada (GW, A-1-a(0)); C-01-E3 registró 64.00%, correspondiente a limo inorgánico (ML, A-4(6)). C-03-E2 y C-04-E3 presentaron 80.22% y 85.60% respectivamente, valores que caracterizan materiales arcillosos de baja permeabilidad y alta susceptibilidad a la variación de humedad estacional.

En la tabla 7 presenta un resumen de resultados de análisis granulométrico por tamizado el %Que pasa del tamiz N°50 y %Que pasa por el tamiz N°200.

Tabla 7. Resultados de análisis granulométrico por calicata (% que pasa por tamiz).

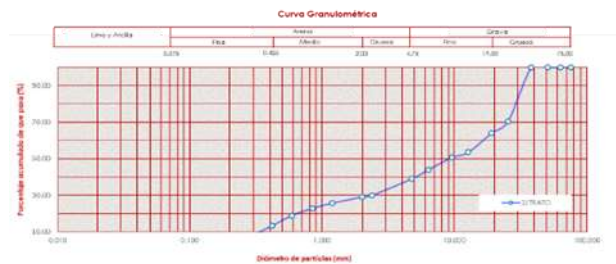
Estrato	Calicata	SUCS	AASHTO	% Pasa N°200
EST. 01	C-01	—	—	79.80
EST. 01	C-02	SM	A-4(1)	8.80
EST. 01	C-03	ML	A-4(7)	69.14
EST. 01	C-04	SP-SC	A-2-6(0)	9.15
EST. 02	C-01	CL	A-4(6)	79.70
EST. 02	C-02	SM	A-4(1)	42.10
EST. 02	C-03	CL	A-7-6(15)	80.22
EST. 02	C-04	—	—	5.80
EST. 03	C-01	ML	A-4(6)	64.00
EST. 03	C-02	GW	A-1-a(0)	3.88
EST. 03	C-04	CL	A-7-6(18)	85.60

Nota al pie: El estrato EST.02 de C-03 (CL, A-7-6(15)) y EST.03 de C-04 (CL, A-7-6(18)) son los estratos seleccionados para el programa de estabilización. C-03 no alcanzó el estrato EST.03 durante la excavación. (—) = estrato no muestreado. Norma: ASTM D 422 / MTC E 107.

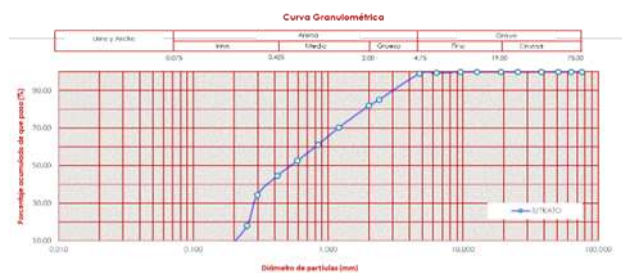
Estrato C1-E3 (ARENA MAL GRADUADA)



Estrato C2-E3 (GRAVA MAL GRADUADA CON ARENA)



Estrato C3-E2 (ARCILLA DE ALTA PLASTICIDAD)



Estrato C4-E3 (ARCILLA DE ALTA PLASTICIDAD)

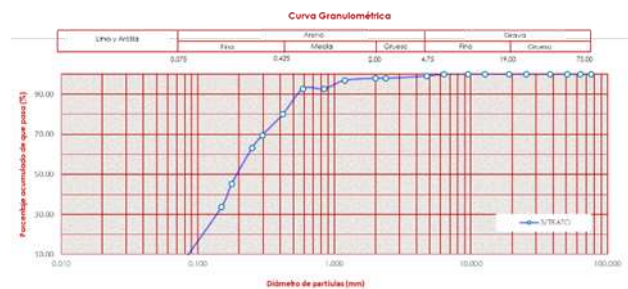


Figura 7. Diagrama de Curva Granulométrica de C1-E3, C2-E3, C3-E2 y C4-E3.

Los ensayos de Límites de Atterberg sobre los estratos de subrasante confirmaron la heterogeneidad plástica del perfil. C-03-E2 registró LL = 42.08%, LP = 24.37% e IP = 17.71% (CL, A-7-6(15)), y C-04-E3 registró LL = 41.20%, LP = 20.64% e IP = 20.56% (CL, A-7-6(18)), ambos en la zona CL de la carta de Casagrande. El estrato E-02 de C-01 presentó LL = 29.05%, LP = 21.95% e IP = 7.10% (CL, A-4(6)); el estrato de subrasante C-01-E3 (ML, A-4(6)) es no plástico. Los estratos con NP corresponden a horizontes sin fracción arcillosa dominante.

Tabla 8. Límites de Atterberg por calicata y estrato (ASTM D 4318)

Estrato	Calicata	SUCS	AASHTO	LL (%)	LP (%)	IP (%)
EST. 01	C-01	—	—	—	—	—
EST. 01	C-02	SM	A-4(1)	NP	NP	NP
EST. 01	C-03	ML	A-4(7)	NP	NP	NP
EST. 01	C-04	SP-SC	A-2-6(0)	30.44	17.38	13.06
EST. 02	C-01	CL	A-4(6)	29.05	21.95	7.10
EST. 02	C-02	SM	A-4(1)	NP	NP	NP
EST. 02	C-03	CL	A-7-6(15)	42.08	24.37	17.71
EST. 02	C-04	—	—	NA	NA	NA
EST. 03	C-01	ML	A-4(6)	NP	NP	NP
EST. 03	C-02	GW	A-1-a(0)	NP	NP	NP

EST. 03 C-04 CL A-7-6(18) 41.20 20.64 20.56

NP = no plástico. NA = no analizado. (—) = estrato no muestreado. Norma: ASTM D 4318.

3.2. Clasificación SUCS Y AASHTO

La clasificación de los cuatro estratos de subrasante (C-01, C-02, C-03 y C-04) se realizó con base en los Límites de Atterberg y la granulometría mediante ASTM D 2487 (SUCS) y ASTM D 3282 (AASHTO). Los estratos con resultado NP no se grafican en la carta de Casagrande por carecer de los parámetros requeridos. Las profundidades reportadas (0.40–0.90 m, 0.90–2.20 m y 2.50–3.00 m) corresponden a los horizontes donde se obtuvieron muestras representativas; los tramos intermedios no muestreados corresponden a material de relleno superficial (0–0.40 m) y zona de transición entre estratos (2.20–2.50 m).



Figura 8. Carta de plasticidad AASHTO

Tabla 9. Resultados de clasificación según SUCS

Estrato	Profundidad (m)	C-01	C-02	C-03	C-04	Nombre del grupo
EST. 01	0.40–0.90	—	SM	ML	SP-SC	Arena limosa / Limo inorgánico / Arena pobremente graduada con arcilla
EST. 02	0.90–2.20	CL	SM	CL	—	Arcilla inorgánica de baja plasticidad / Arena limosa
EST. 03	2.50–3.00	ML	GW	—	CL	Limo inorgánico / Grava bien graduada / Arcilla inorgánica

(—) = estrato no muestreado o sin clasificación en ese punto. Norma: ASTM D 2487.

Tabla 10. Resultados de clasificación según AASHTO

Estrato	Profundidad (m)	C-01	C-02	C-03	C-04	Nombre del grupo
EST. 01	0.40–0.90	—	A-4(1)	A-4(7)	A-2-6(0)	Suelo limoso / Suelo con grava y arena
EST. 02	0.90–2.20	A-4(6)	A-4(1)	A-7-6(15)	—	Suelo limoso / Suelo arcilloso
EST. 03	2.50–3.00	A-4(6)	A-1-a(0)	—	A-7-6(18)	Fragmentos de roca / Suelo arcilloso

(—) = estrato no muestreado. Norma: ASTM D 3282.

Nota al pie para ambas tablas: Los tramos 0–0.40 m y 2.20–2.50 m no se reportan porque corresponden a material de relleno superficial y a una zona de transición entre estratos, respectivamente, que no fueron muestreados como parte del programa de caracterización de subrasante. Los estratos reportados corresponden a las profundidades donde se obtuvieron muestras representativas conforme a MTC E-100.

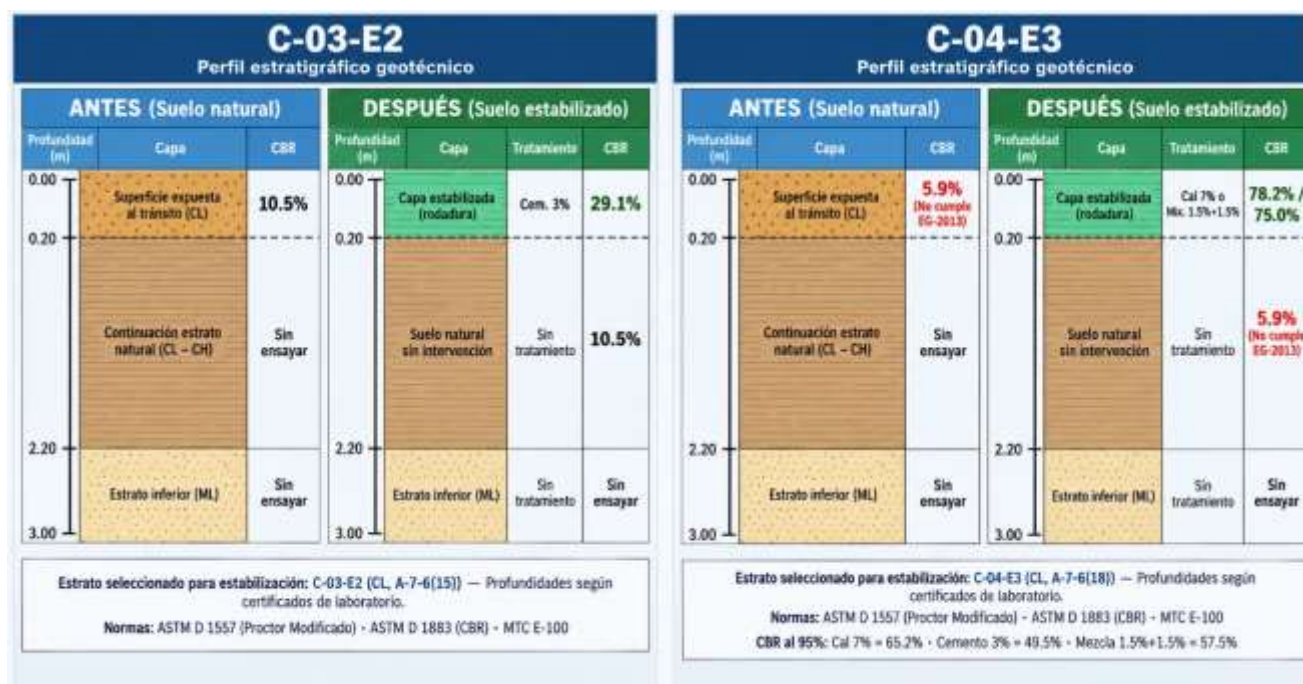


Figura 9. Perfil estratigráfico de C-03-E2 y C-04-E3 antes y después de la estabilización, visto de superficie hacia el fondo.

El perfil estratigráfico de las cuatro calicatas, visto de superficie hacia el fondo, muestra una secuencia consistente en todo el corredor: los primeros 0.90 m presentan materiales variables según la calicata: limo inorgánico (ML, A-4(7)) en C-03 y arena pobremente graduada con arcilla (SP-SC, A-2-6(0)) en C-04. El estrato intermedio (0.90–2.20 m) corresponde a arcilla de baja plasticidad (CL, A-7-6(15)) en C-03, y el estrato de subrasante (2.20–3.00 m) corresponde a arcilla inorgánica (CL, A-7-6(18)) en C-04. Los estratos seleccionados para estabilización - C-03-E2 y C-04-E3 - corresponden a la capa superior expuesta al tránsito, que en un camino no pavimentado funciona simultáneamente como subrasante y como capa de rodadura granular.

La estabilización se aplica in situ: los primeros 20–30 cm del estrato CL se escarifican, se mezclan con el estabilizante y se recompactan, quedando esa capa mejorada como superficie directamente expuesta al tránsito. El suelo por debajo de esa profundidad permanece sin modificación. La Fig. 9 muestra este perfil en sus dos estados - antes y después del mejoramiento - para las calicatas críticas.

3.3. Proctor Modificado (ASTM D1557)

Los ensayos de compactación se ejecutaron sobre material pasante la malla N°4, con Método A (ASTM D 1557): molde de 101.6 mm, pisón de 4.54 kg, altura de caída de 457.2 mm, 5 capas y 25 golpes por capa. Los suelos naturales de las cuatro calicatas muestran la relación inversa esperada entre γ_d máxima y humedad óptima.

Tabla 11. Proctor Modificado de suelos naturales: las cuatro calicatas.

Muestra	γ_d máx (gr/cm ³)	W ópt (%)
C-01-E3 (suelo natural)	1.82	14.10
C-02-E3 (suelo natural)	1.93	11.85
C-03-E2 (suelo natural)	1.67	18.92
C-04-E3 (suelo natural)	1.68	19.20

C-01-E3 y C-02-E3, con γ_d máxima de 1.82 y 1.93 gr/cm³ y humedades óptimas de 14.10% y 11.85%, presentan mayor densificación y menor demanda hídrica. C-03-E2 y C-04-E3 requieren mayor humedad para alcanzar densidades

menores, consecuencia directa de su mayor contenido de arcilla y de la capacidad de absorción de agua de los minerales arcillosos. Esta diferencia de densificación entre calicatas es coherente con los resultados reportados por Wibawa y Maharani (2024) para arcillas de Bali, donde los suelos con mayor IP presentaron consistentemente menores γ_d máximas y mayores humedades óptimas que los suelos granulares de referencia.

Para C-03-E2, tanto la cal al 1% como el cemento al 1% produjeron la mayor γ_d registrada en el programa (1.69 gr/cm³, +1.2% respecto al natural de 1.67 gr/cm³). La selección de la cal al 1% como dosificación óptima de compactación para este estabilizante responde a que dosis superiores de cal redujeron progresivamente la γ_d (al 3%: 1.61 gr/cm³; al 5%: 1.59 gr/cm³; al 10%: 1.61 gr/cm³), mientras que el cemento mantuvo γ_d estable o en ligero incremento hasta el 5% (1.70 gr/cm³). El empate en γ_d máxima entre cal al 1% y cemento al 1% indica que a dosis bajas ambos estabilizantes modifican la estructura de compactación de C-03-E2 con igual intensidad; la divergencia aparece a dosis superiores, donde los mecanismos de floculación de la cal y de hidratación del cemento producen efectos opuestos sobre la densificación. Dosis superiores la redujeron progresivamente: al 3%, γ_d = 1.61 gr/cm³ (−3.6%); al 5%, γ_d = 1.59 gr/cm³ (−4.8%); al 10%, γ_d = 1.61 gr/cm³ (−3.6%). El cemento mostró comportamiento distinto: al 3% la densidad fue 1.68 gr/cm³ y al 5% alcanzó 1.70 gr/cm³ (+1.8%), sin la caída observada con la cal. La mezcla 0.5% + 0.5% produjo 1.68 gr/cm³.

Para C-04-E3, el cemento al 3% alcanzó la mayor γ_d (1.74 gr/cm³, +3.57%). La mezcla 3.5% + 3.5% igualó ese valor. La cal al 7% produjo 1.71 gr/cm³ (+1.79%). Dosis altas de cemento invirtieron la tendencia: al 10%, γ_d cayó a 1.61 gr/cm³ (−4.17%) y al 15% a 1.66 gr/cm³ (−1.19%). La mezcla binaria 1.5%+1.5% produjo la mayor γ_d del programa para mezclas binarias de C-04-E3 (1.77 gr/cm³, +5.4% respecto al natural) y redujo la humedad óptima de 19.20% a 14.00%, una caída de 5.2 puntos porcentuales que indica menor demanda de agua para la compactación en campo. Mugambi et al. (2024) reportaron una reducción equivalente de 6.3% en la humedad óptima con LC3 al 5% en arcillas expansivas de Kenia, resultado análogo al observado en C-04-E3. La reducción de γ_d con cal a dosis superiores al óptimo se explica por la floculación de partículas arcillosas inducida por el Ca²⁺, que genera agregados de mayor tamaño y menor densidad aparente, fenómeno documentado también por Diniz et al. (2024) en suelos tropicales de Brasil donde la cal calcítica a dosis superiores al óptimo redujo la densidad aparente por formación de agregados floculados.

Tabla 12. Proctor Modificado para C-03-E2

Tratamiento	Dosis (%)	γ_d máx (gr/cm ³)	W ópt (%)	$\Delta\gamma_d$ vs natural (%)
Suelo natural	-	1.67	18.92	-
Solo Cal	1	1.69	19.04	+1.2
Solo Cal	3	1.61	20.70	−3.6
Solo Cal	5	1.59	21.63	−4.8
Solo Cal	10	1.61	22.65	−3.6
Solo Cemento	1	1.69	17.68	+1.2
Solo Cemento	3	1.68	19.25	+0.6
Solo Cemento	5	1.70	19.60	+1.8
Cal + Cemento	0.5+0.5	1.68	20.07	+0.6
Cal + Cemento	1.5+1.5	1.62	21.30	−3.0
Cal + Cemento	2.5+2.5	1.61	20.68	−3.6

Tabla 13. Proctor Modificado para C-04-E3: todas las dosificaciones ensayadas (mezclas binarias de 1.5%+1.5% a 5%+5%).

Tratamiento	Dosis (%)	γ_d máx (gr/cm ³)	W ópt (%)	$\Delta\gamma_d$ vs natural (%)
Suelo natural	—	1.68	19.20	—
Solo Cal	3	1.67	21.24	-0.6
Solo Cal	5	1.68	21.45	0.0
Solo Cal	7	1.71	16.93	+1.8
Solo Cal	10	1.67	17.45	-0.6
Solo Cemento	1	1.72	18.05	+2.4
Solo Cemento	3	1.74	17.40	+3.6
Solo Cemento	5	1.72	17.05	+2.4
Solo Cemento	10	1.61	22.40	-4.2
Solo Cemento	15	1.66	19.70	-1.2
Cal + Cemento	1.5+1.5	1.77	14.00	+5.4
Cal + Cemento	2.5+2.5	1.68	18.45	0.0
Cal + Cemento	3.5+3.5	1.74	19.95	+3.6
Cal + Cemento	5+5	1.69	21.25	+0.6

Norma: ASTM D 1557, Método A. Fuente: certificados de laboratorio.

Nota: Para la dosificación Cal+Cemento 1.5%+1.5%, el certificado registra dos ensayos: M-01 (γ_d = 1.75 gr/cm³, W ópt = 16.30%) y M-02 (γ_d = 1.77 gr/cm³, W ópt = 14.00%). Se reporta M-02 por corresponder al espécimen seleccionado para el ensayo CBR.

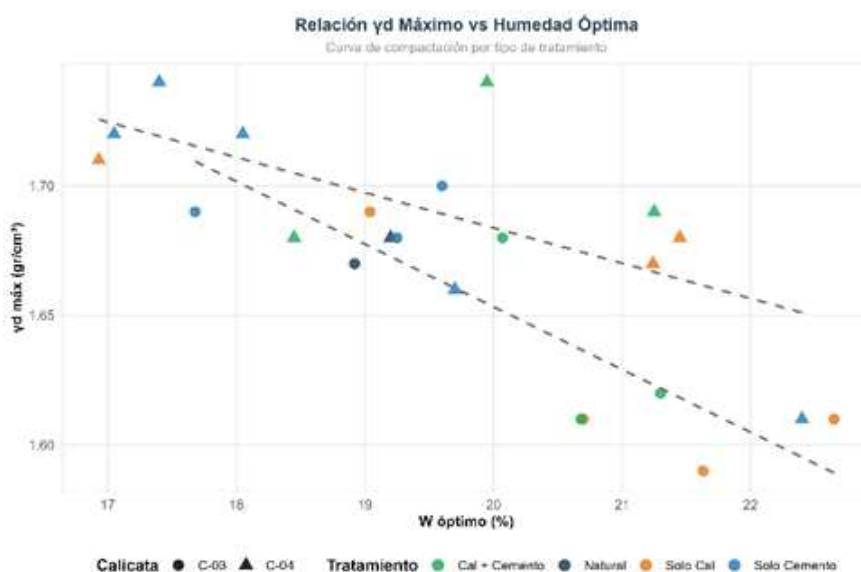


Figura 10. γ_d Máximo vs W Óptimo.

3.4. Límites de Atterberg en suelos estabilizados

En C-03-E2 (IP natural = 17.71%), todos los tratamientos redujeron el IP con relación proporcional a la dosis. La cal al 7% produjo la mayor reducción (IP = 12.79%, -27.8%), seguida por la mezcla 3.5% + 3.5% (IP = 13.36%, -24.6%) y el cemento al 7% (IP = 13.93%, -21.3%). A dosis bajas la reducción fue modesta: cal al 3% redujo el IP solo 3.8% y cemento al 3% un 5.7%, lo que indica que en C-03-E2 se requieren dosis superiores al 3% para producir modificación plástica técnicamente significativa.

En C-04-E3 (IP natural = 16.81%) el comportamiento fue cualitativamente distinto. La cal al 3% y 5% incrementó el IP respecto al natural (+16.8% y +9.7% respectivamente); solo al 7% lo redujo (IP = 14.51%, -13.7%). El cemento mostró el mismo patrón: al 3% y 5% el IP aumentó (+11.3% y +9.8%), y recién al 7% comenzó a descender (IP = 16.03%, -4.6%). La mezcla binaria fue la excepción: desde 1.5% + 1.5% redujo el IP (16.59%, -1.3%), y al 3.5% + 3.5% alcanzó la mayor reducción para esta calicata (IP = 13.48%, -19.8%). Ahmed et al. (2024) documentaron un fenómeno análogo con ceniza de bagazo y cal en arcillas de Pakistán: la ceniza sola al 7.5% aumentó el IP en 42%, mientras que la combinación con cal lo redujo, demostrando que la sinergia entre componentes determina la dirección del cambio plástico. Lindh y Lemenkova (2023) confirmaron que las mezclas multicomponente de cal y cemento generan efectos sinérgicos superiores a los estabilizantes individuales, resultado consistente con el mejor desempeño de la mezcla binaria sobre cal o cemento solos en C-04-E3 a dosis equivalentes.

El aumento inicial del IP en C-04-E3 con dosis bajas de cal y cemento es un comportamiento documentado en arcillas de alta plasticidad. Tan et al. (2020) establecen que la cal requiere una concentración mínima de Ca^{2+} para desencadenar el intercambio catiónico que reduce la doble capa difusa de las partículas arcillosas; por debajo de ese umbral, el agua incorporada en el proceso de mezcla puede elevar temporalmente el límite líquido antes de que la floculación se complete. La mezcla binaria evita este efecto porque la acción conjunta del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -floculación inmediata- y del C_3S del cemento -hidratación rápida- actúa simultáneamente desde la primera dosificación.

Tabla 14. Variación del IP con la dosis de estabilizante para C-03-E2 y C-04-E3.

Calicata	Tratamiento	Dosis total (%)	IP natural (%)	IP tratado (%)	Variación IP (%)
C-03	Cal + Cemento	2.5+2.5	17.71	15.17	-14.3
C-03	Cal + Cemento	3.5+3.5	17.71	13.36	-24.6
C-03	Solo Cal	3	17.71	17.04	-3.8
C-03	Solo Cal	5	17.71	15.26	-13.8
C-03	Solo Cal	7	17.71	12.79	-27.8
C-03	Solo Cemento	3	17.71	16.70	-5.7
C-03	Solo Cemento	5	17.71	15.11	-14.7
C-03	Solo Cemento	7	17.71	13.93	-21.3
C-04	Cal + Cemento	1.5+1.5	16.81	16.59	-1.3
C-04	Cal + Cemento	2.5+2.5	16.81	14.51	-13.7
C-04	Cal + Cemento	3.5+3.5	16.81	13.48	-19.8
C-04	Solo Cal	3	16.81	19.64	+16.8
C-04	Solo Cal	5	16.81	18.44	+9.7
C-04	Solo Cal	7	16.81	14.51	-13.7
C-04	Solo Cemento	3	16.81	18.71	+11.3
C-04	Solo Cemento	5	16.81	18.45	+9.8
C-04	Solo Cemento	7	16.81	16.03	-4.6

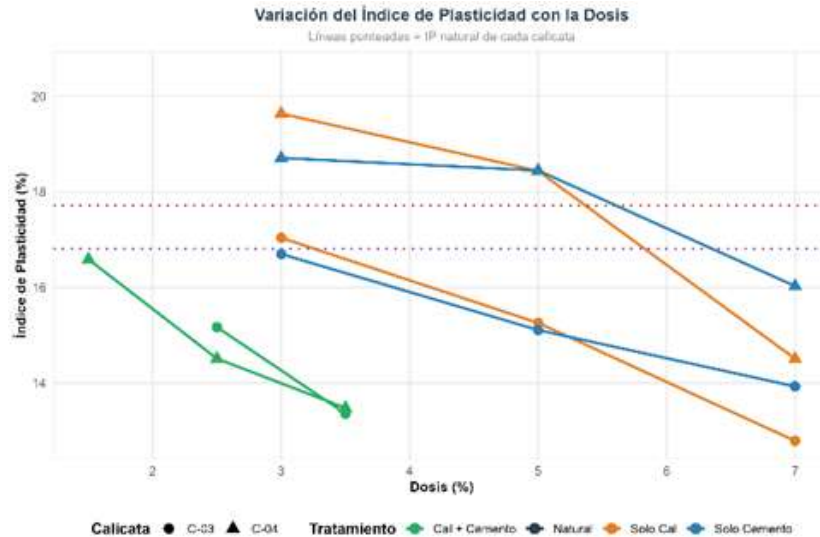


Figura 11. Variación del IP con la Dosis.

3.5. Capacidad portante (CBR)

Los ensayos de CBR se ejecutaron sobre las dosificaciones que produjeron la mayor γ_d en Proctor. Este criterio responde a la norma ASTM D 1883, que establece que el espécimen de CBR debe prepararse a la densidad máxima y humedad óptima determinadas en Proctor Modificado, garantizando que el CBR medido corresponde a la condición de mayor densificación alcanzable con cada estabilizante. Se priorizó γ_d máxima sobre IP como criterio de selección porque el CBR es un ensayo de resistencia mecánica directamente dependiente de la densidad de compactación: a igual dosificación, el espécimen compactado a la γ_d máxima produce el CBR más alto y reproducible, que es el valor relevante para el diseño de la capa estructural. Esta decisión implica una limitación reconocida: no se verificó si dosificaciones con menor γ_d pero mayor reducción de IP producirían CBR similares o superiores. Los datos de la Tabla 14 muestran, por ejemplo, que la cal al 7% en C-03-E2 reduce el IP 27.8% (IP = 12.79%) pero no fue ensayada en CBR porque su γ_d (no registrada para esa dosis en el programa de Proctor) no fue la óptima de compactación. Explorar la relación entre reducción de IP y CBR a dosis no coincidentes con la γ_d máxima constituye una línea de investigación pendiente para estudios futuros con mayor número de réplicas experimentales. Los suelos de referencia C-01-E3 y C-02-E3 presentaron CBR natural de 15.5% y 37.1% respectivamente. El valor de C-02-E3 corresponde al promedio de dos ensayos registrados en el certificado: Ensayo 1 (CBR 100% = 39.9%, CBR 95% = 39.0%) y Ensayo 2 (CBR 100% = 34.3%, CBR 95% = 32.7%), cuyo promedio resulta en 37.1% al 100% y 35.9% al 95%, valores que superan el umbral mínimo para subrasante sin requerir tratamiento.

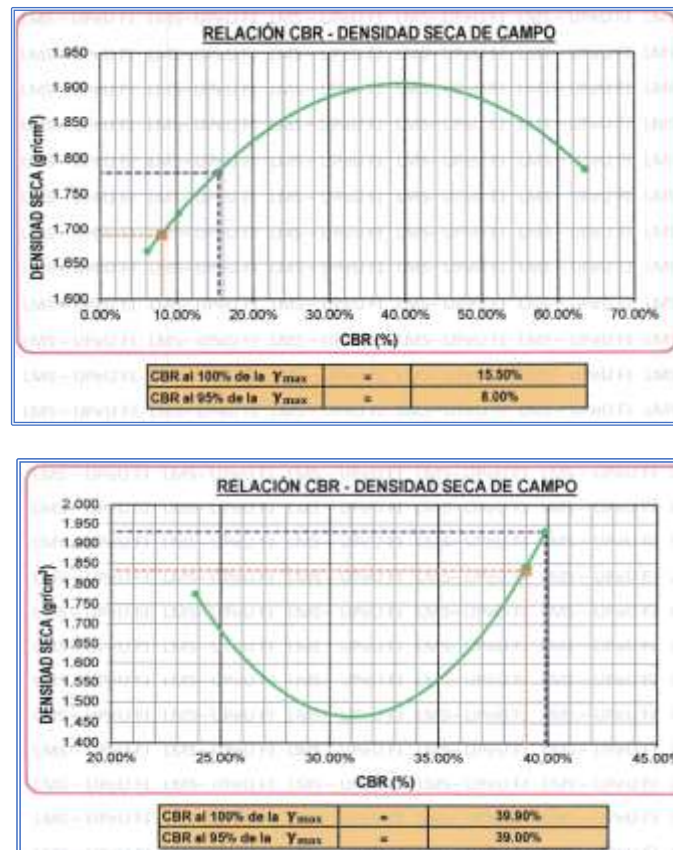


Figura 12. Caracterización de CBR de muestra C1-E3 y Caracterización de CBR de muestra C2-E3

En C-03-E2, cuyo CBR natural fue de 10.5% al 100% y 7.2% al 95%, el cemento al 3% produjo los mayores valores: CBR = 29.1% al 100% y 23.9% al 95%, con incremento de 177.1% y factor de mejora de 2.77. La mezcla 0.5% + 0.5% obtuvo CBR = 27.8% al 100% y 20.3% al 95% (+164.8%, factor 2.65). La cal al 1% alcanzó CBR = 25.2% al 100% y 20.9% al 95% (+140.0%, factor 2.40). Los tres tratamientos superan el mínimo de 6% para subrasante y el de 20% para subrasante mejorada según EG-2013. La diferencia entre CBR al 100% y CBR al 95% en C-03-E2 fue de 5.2 puntos en cemento, 7.5 en mezcla y 4.3 en cal, lo que indica baja sensibilidad a la variación de energía de compactación.

En C-04-E3, con CBR natural de 5.9%, la magnitud de la mejora fue sustancialmente mayor por el bajo valor de partida. La cal al 7% produjo CBR = 78.2% al 100% y 65.2% al 95% (+1,225.4%, factor 13.25). La mezcla 1.5% + 1.5% obtuvo CBR = 75.0% al 100% y 57.5% al 95% (+1,171.2%, factor 12.71). El cemento al 3% alcanzó CBR = 74.2% al 100% y 49.5% al 95% (+1,157.6%, factor 12.58). Los tres tratamientos sitúan el material en la categoría de subbase granular (CBR $\geq 30\%$) e incluso base granular mejorada (CBR $\geq 60\%$) según EG-2013. La diferencia entre CBR al 100% y CBR al 95% fue marcadamente mayor en C-04-E3 que en C-03-E2. Con cemento al 3%, el CBR cae de 74.2% a 49.5% al pasar del 100% al 95% de compactación, una pérdida de 24.7 puntos que representa el 33.3% de la capacidad portante obtenida en laboratorio. Dicho de otra forma: si en campo no se alcanza el 100% de la MDS, se pierde aproximadamente un tercio del CBR del suelo estabilizado con cemento. La cal al 7% y la mezcla binaria muestran pérdidas menores -13.0 y 17.5 puntos respectivamente- pero igualmente significativas. Esta sensibilidad al grado de compactación tiene una implicancia directa para la ejecución en obra: el cemento al 3% en C-04-E3, pese a ser el tratamiento con mayor CBR al 100%, es el menos tolerante a la variabilidad de compactación en campo. En una vía rural del altiplano donde el equipo de compactación disponible y el control de densidad in situ son limitados, esa característica es un riesgo real que el diseño debe anticipar. Por eso la mezcla binaria 1.5%+1.5% resulta más viable constructivamente: con CBR al 95% de 57.5% y pérdida de 17.5 puntos, ofrece un margen de tolerancia mayor sin sacrificar la clasificación de base

granular mejorada según EG-2013.

La comparación con la literatura internacional permite contextualizar la magnitud de estas mejoras. Kuswaya et al. (2019) reportaron incrementos de CBR desde 3.46% hasta 130% en arcillas de Palembang con cemento Portland tipo I al 10%, valor que en términos de factor de mejora (37.6×) supera al registrado en C-04-E3 con cemento al 3% (12.58×), diferencia atribuible a la mayor dosificación y al tipo de arcilla ensayado. Bucheli-Pérez et al. (2022) obtuvieron resistencia a compresión simple de 28.09 kg/cm² con 6% de cemento en la Ruta del Cacao, con CBR natural de subrasante de 5.9% idéntico al de C-04-E3, lo que hace esta comparación particularmente relevante: con solo 3% de cemento, C-04-E3 alcanzó CBR = 74.2%, superando ampliamente el umbral de subbase. Albuquerque Filho et al. (2024) documentaron incrementos de CBR del 109% con 2% de cemento en caminos no pavimentados de Brasil, valor inferior a los incrementos de 140–177% registrados en C-03-E2 con dosificaciones superiores, lo que confirma la relación dosis-respuesta en suelos arcillosos estabilizados con cemento. Para la cal, Sendilvadelu et al. (2025) reportaron que las reacciones puzolánicas de la cal forman C-S-H y C-A-H que incrementan la resistencia progresivamente, mecanismo que explica el alto CBR de 78.2% obtenido en C-04-E3 con cal al 7%: este suelo, con IP = 20.56% de campo dispone de mayor superficie arcillosa reactiva que C-03-E2, lo que potencia la puzolanización y explica por qué en C-04-E3 la cal supera al cemento mientras que en C-03-E2 el cemento es marginalmente superior. Tan et al. (2020) establecen precisamente este principio: el cemento es más eficiente en suelos con menor contenido arcilloso, mientras que la cal maximiza su efecto en arcillas plásticas mediante floculación y reacciones puzolánicas prolongadas.

Tabla 15. Clasificación estructural de los tratamientos según umbrales de CBR del Manual de Carreteras EG-2013.

Calicata	Tratamiento	Dosis	CBR 100% (%)	CBR 95% (%)	Δ 100%– 95%	CBR nat. 95% (%)	Incremento 95% (%)	Factor mejora 95%
C-01	Suelo natural	-	15.5	8.0	7.5	-	-	-
C-02	Suelo natural	-	37.1	35.9	1.2	-	-	-
C-03	Suelo natural	-	10.5	7.2	3.3	-	-	-
C-03	Solo Cal	1%	25.2	20.9	4.3	7.2	+190.3	2.90
C-03	Solo Cemento	3%	29.1	23.9	5.2	7.2	+231.9	3.32
C-03	Cal + Cemento	0.5%+0.5%	27.8	20.3	7.5	7.2	+181.9	2.82
C-04	Suelo natural	-	5.9	-	-	-	-	-
C-04	Solo Cal	7%	78.2	65.2	13.0	_*	_*	_*
C-04	Solo Cemento	3%	74.2	49.5	24.7	_*	_*	_*
C-04	Cal + Cemento	1.5%+1.5%	75.0	57.5	17.5	_*	_*	_*

Nota: (*) El CBR al 95% del suelo natural de C-04-E3 no fue determinado en el programa experimental, lo que impide calcular el incremento porcentual y el factor de mejora al 95% para esa calicata. Para referencia comparativa, el CBR al 100% del natural es 5.9%; los CBR al 95% de los tratamientos (65.2%, 49.5% y 57.5%) superan ampliamente ese valor de referencia. El CBR al 95% es el parámetro de diseño de subrasante en el método MTC (Manual de Carreteras, Diseño de Pavimentos).

La confrontación de los resultados con los parámetros de la norma EG-2013 permite clasificar cada tratamiento según su aptitud estructural. El suelo natural de C-04-E3 (CBR = 5.9%) no cumple con el requisito mínimo de 6% para subrasante y requiere tratamiento obligatorio antes de cualquier intervención vial. El suelo natural de C-03-E2 (CBR = 10.5%) supera el mínimo de subrasante pero no alcanza el umbral de subrasante mejorado (CBR ≥ 20%), categoría que sí alcanzan los tres tratamientos evaluados: cal al 1% (25.2%), cemento al 3% (29.1%) y mezcla binaria 0.5%+0.5% (27.8%). En C-04-E3, los tres tratamientos superan el umbral de subbase granular (CBR ≥ 30%) y los tratamientos con cal al 7% (78.2%) y mezcla binaria 1.5%+1.5% (75.0%) superan adicionalmente el umbral de base granular mejorada (CBR ≥ 60%), lo que implica que el material estabilizado podría reducir los espesores de las capas granulares superiores en el diseño del paquete estructural. La Tabla siguiente sintetiza esta clasificación normativa.

Tabla 16. Resumen de resultados de CBR con CeP y CH de diferentes dosificaciones.

Calicata	Tratamiento	CBR 95% (%)	CBR 100% ref. (%)	Clasificación EG-2013
C-03	Suelo natural	7.2	10.5	Subrasante (cumple $\geq 6\%$)
C-03	Solo Cal 1%	20.9	25.2	Subrasante mejorada (cumple $\geq 20\%$)
C-03	Solo Cemento 3%	23.9	29.1	Subrasante mejorada (cumple $\geq 20\%$)
C-03	Cal + Cemento 0.5%+0.5%	20.3	27.8	Subrasante mejorada (cumple $\geq 20\%$)
C-04	Suelo natural	-*	5.9	No apta (CBR 100% $< 6\%$)
C-04	Solo Cal 7%	65.2	78.2	Base granular mejorada (cumple $\geq 60\%$)
C-04	Solo Cemento 3%	49.5	74.2	Subbase granular (cumple $\geq 30\%$)
C-04	Cal + Cemento 1.5%+1.5%	57.5	75.0	Subbase granular (cumple $\geq 30\%$)

Nota: Con CBR al 95%, el cemento al 3% y la mezcla 1.5%+1.5% en C-04-E3 bajan de categoría respecto a lo reportado con CBR al 100%: alcanzan subbase granular ($\geq 30\%$) pero no base granular mejorada ($\geq 60\%$). Solo la cal al 7% mantiene la categoría de base granular mejorada ($65.2\% \geq 60\%$) al usar el CBR de diseño. Esto refuerza la selección de la cal al 7% como tratamiento óptimo en C-04-E3 desde la perspectiva del diseño MTC, y no la modifica.

La necesidad de estabilización se justifica mecánicamente a partir de la relación entre el CBR natural y la capacidad de soporte mínima requerida por el tráfico proyectado. El método AASHTO 93, referenciado en el Manual de Carreteras MTC para diseño de pavimentos flexibles, establece que el módulo resiliente de diseño (M_r) de la subrasante se estima a partir del CBR mediante la expresión $M_r (\text{psi}) = 2,555 \times \text{CBR}^{0.64}$ (Mostafa et al., 2024). Aplicando esta expresión a los datos del estudio con el CBR al 95% -parámetro de diseño de subrasante según el Manual de Carreteras MTC- los valores de M_r resultan: C-03-E2 natural (CBR 95% = 7.2%) produce $M_r = 8,430$ psi; con cemento al 3% (CBR 95% = 23.9%) sube a 18,761 psi, incremento de 2.23 veces. Para C-04-E3, el CBR al 95% del suelo natural no fue determinado en el estudio, por lo que el M_r natural no puede calcularse con la misma base; como referencia, el CBR al 100% natural (5.9%) produce $M_r = 7,014$ psi. Con cal al 7% (CBR 95% = 65.2%), el M_r estimado sube a 35,141 psi. El margen de seguridad geotécnica relativa -razón entre el CBR al 95% del suelo tratado y el CBR mínimo normativo de 6%- alcanza 3.98 en C-03-E2 con cemento al 3% ($23.9\% / 6\%$) y 10.87 en C-04-E3 con cal al 7% ($65.2\% / 6\%$). Ambos valores se calculan sobre el CBR al 95% conforme al criterio de diseño MTC. La limitación de extrapolación de la fórmula AASHTO 93 a CBR altos señalada anteriormente se mantiene vigente para el tratamiento con cal al 7% en C-04-E3.

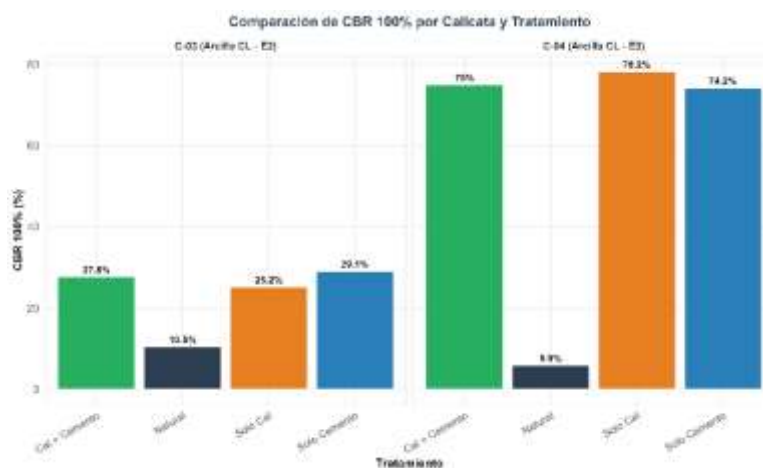


Figura 13. Comparación de CBR 100% por calicata y tratamiento.

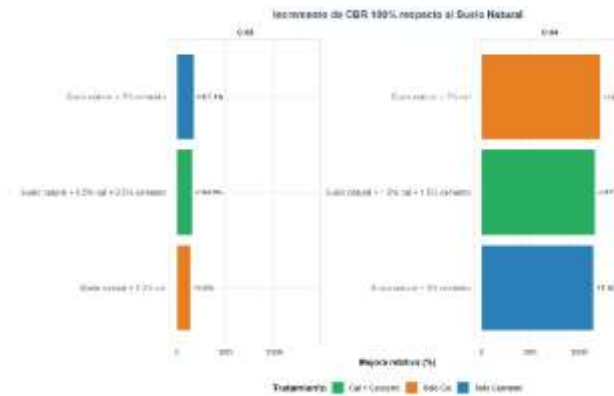


Figura 14. Incremento porcentual del CBR respecto al suelo natural

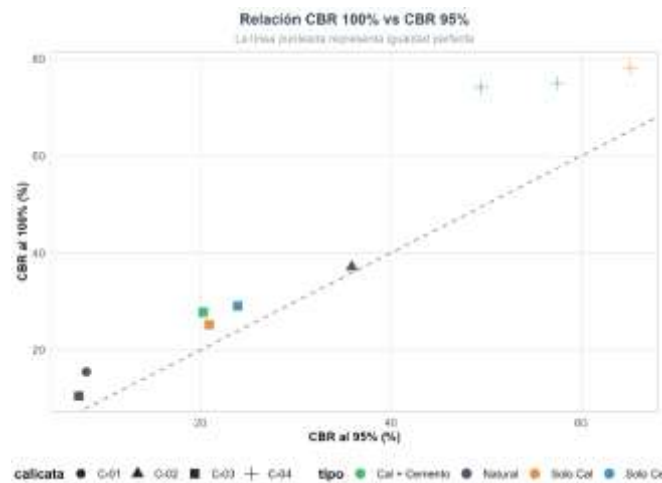


Figura 15. CBR 100% vs CBR 95%

3.6. Análisis estadístico

El análisis estadístico se aplicó sobre el conjunto completo de observaciones del programa experimental. Cada observación corresponde a una combinación única de calicata, estrato y tratamiento con una dosificación específica; no son réplicas independientes de una misma condición sino valores de respuesta a variaciones controladas de los factores experimentales (tipo de estabilizante y dosis). El n reportado en las Tablas 17 y 18 representa el número de combinaciones tratamiento-dosis con dato disponible para cada variable: $n = 10$ para CBR 100% (cuatro suelos naturales más seis tratamientos con dosificación óptima), $n = 26$ para y_d máxima (todas las dosificaciones ensayadas en Proctor) y $n = 9$ a 11 para IP por calicata (todas las dosificaciones de Límites de Atterberg). Las pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk, Lilliefors) describen la distribución de los valores de respuesta dentro del propio experimento, no la normalidad de una muestra aleatoria de una población. Las correlaciones de Pearson cuantifican la relación entre variables a lo largo del gradiente experimental de dosis y tratamientos, no entre réplicas de una condición fija. Los p-valores derivados de estas pruebas no representan inferencia poblacional y no deben interpretarse como probabilidades de generalización a otros suelos o condiciones: su función en este trabajo es describir la estructura de relación entre variables dentro del conjunto de datos generado por el programa experimental. Con esta aclaración, la prueba de Shapiro-Wilk sobre los valores de CBR 100% ($W = 0.850$, $p = 0.059$) indica distribución limítrofe, atribuible a la separación entre el grupo de valores bajos (suelos naturales: 5.9%–37.1%) y el grupo de valores altos (C-04-E3 tratado: 74.2%–78.2%), que configura una distribución bimodal no captada con certeza por la prueba dado el tamaño del conjunto de datos. La y_d máxima ($W = 0.855$, $p = 0.002$) y la humedad óptima ($W = 0.904$, $p = 0.019$) rechazan la normalidad, lo que justifica el uso complementario de pruebas no paramétricas. El IP en C-03-E2 ($W = 0.952$, $p = 0.709$) y C-04-E3 ($W = 0.933$, $p = 0.437$) sigue distribución normal en ambos casos.

Tabla 17. Pruebas de normalidad Shapiro-Wilk y Lilliefors.

Variable	n	W (S-W)	p (S-W)	D (Lilliefors)	p (Lilliefors)	Asimetría	Curtosis	¿Normal?
CBR 100%	10	0.850	0.059	0.224	0.167	0.63	-1.33	Limítrofe
CBR 95%	9	0.918	0.375	0.205	0.336	0.43	-1.28	Sí
γd máx (gr/cm ³)	26	0.855	0.002	0.162	0.077	1.59	4.46	No
W óptimo (%)	26	0.904	0.019	0.133	0.276	-1.33	2.41	No
IP C-03	9	0.952	0.709	0.160	0.732	0.04	-1.13	Sí
IP C-04	11	0.933	0.437	0.200	0.251	-0.05	-1.49	Sí

Tres relaciones de interés se han encontrado en la matriz de correlación de Pearson. En primer lugar, se ha encontrado una correlación del 100% entre CBR e IP de -0.785. A medida que IP disminuye con la adición de estabilizadores, la capacidad de carga de la muestra aumenta. La siguiente relación, -0.755, indica que a medida que aumenta el potencial de expansión del suelo, la CBR natural del suelo disminuye. La última, y más fuerte, relación, -0.977, es entre la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad de la muestra compactada por Proctor. Se verifica la relación esperada de la curva de compactación de Proctor. Cabe señalar que la correlación entre el 95% de CBR y IP no se incluyó en la tabla principal debido a que fue artificialmente perfecta ($r = -1.00$) durante el análisis. También debe señalarse que la correlación perfecta fue resultado de la estructura de dependencia del diseño experimental, no de una relación independiente. También es válido suponer que las muestras, con una dosis de Estabilizador mayor, tendrían un 95% de CBR mayor y un IP menor. Esto generó una colinealidad que aumentó artificialmente la correlación. Esta relación no debe usarse para realizar ningún tipo de predicción. También se señaló que, en suelos limosos y ligeramente cementados con cemento y cal, un incremento en el CBR dio lugar a un incremento en el Módulo Resiliente del suelo con una regresión de 0.75, según Mostafa et al. (2024). Esto también valida el uso de CBR para determinar el comportamiento mecánico de los suelos en ausencia de una prueba de Módulo Resiliente. estudio.

Tabla 18. Matriz de correlación de Pearson.

	CBR 100%	CBR 95%	γd máx	W óptimo	Expansión	LL	LP	IP
CBR 100%	1.000	0.978	-0.150	0.080	-0.755	-0.578	0.660	-0.785
CBR 95%	0.978	1.000	-0.561	0.581	-0.521	0.179	0.970	(véase nota)
γd máx	-0.150	-0.561	1.000	-0.977	-0.899	-0.938	0.088	-0.298
W óptimo	0.080	0.581	-0.977	1.000	0.948	0.934	-0.723	0.854
Expansión	-0.755	-0.521	-0.899	0.948	1.000	-	-	-
LL	-0.578	0.179	-0.938	0.934	-	1.000	-0.096	0.339
LP	0.660	0.970	0.088	-0.723	-	-0.096	1.000	-0.968
IP	-0.785	(véase nota)	-0.298	0.854	-	0.339	-0.968	1.000

(véase nota): correlación omitida del análisis inferencial por dependencia estructural (ver texto)

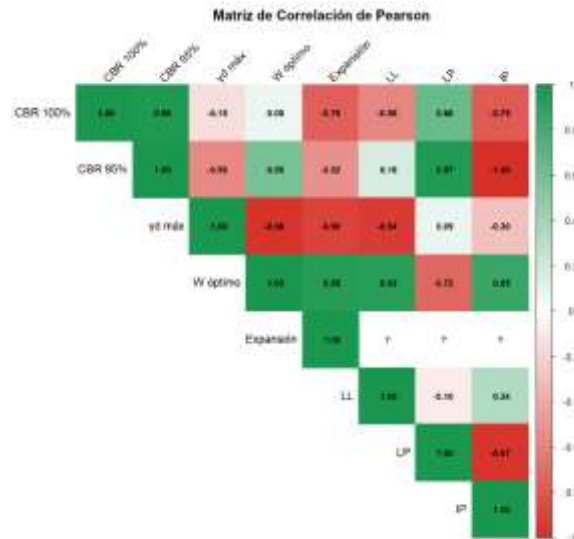


Figura 16. Mapa de calor de la Matriz de Correlación de Pearson.

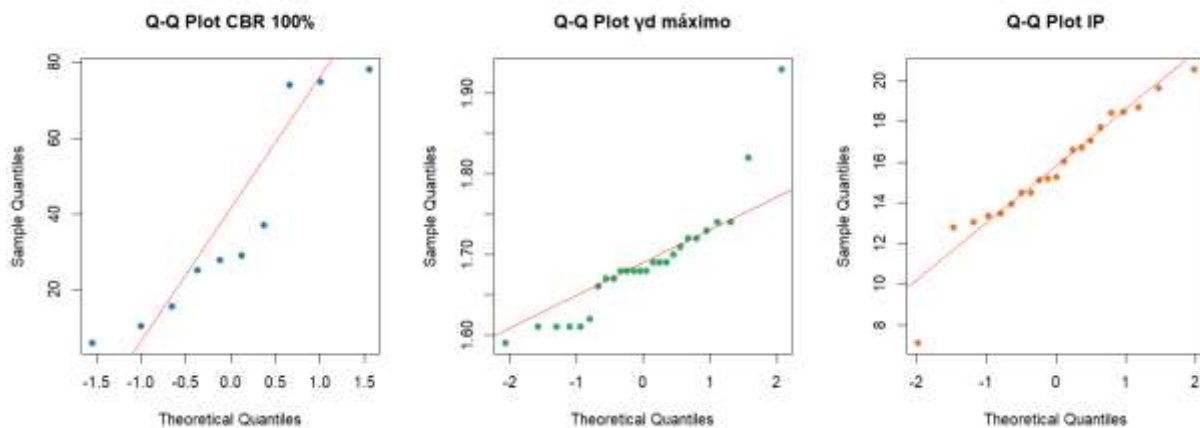


Figura 17. Q-Q Plot de normalidad para CBR 100%, yd máximo e IP.

4. Discusiones

4.1. Comportamiento geotécnico inicial y criterio de selección de suelos críticos

La diferencia de IP entre C-03-E2 (17.71%) y C-04-E3 (16.81%) es aparentemente pequeña, pero determina la respuesta diferencial a los estabilizantes documentada en las Tablas 12 a 15. Un IP más alto implica mayor contenido de minerales arcillosos con superficie específica activa disponible para reacciones de intercambio catiónico, lo que potencia la puzolanización de la cal pero no modifica sustancialmente el mecanismo de hidratación del cemento, que actúa a partir de sus propias fases mineralógicas. Esta diferencia mecánica explica por qué el orden de eficacia de los estabilizantes se invierte entre calicatas, resultado coherente con el principio establecido por Tan et al. (2020). El CBR natural de C-04-E3 (5.9%) no cumple el mínimo normativo de 6% (EG-2013), lo que hace obligatoria su estabilización antes de cualquier intervención vial; C-03-E2 (10.5%) cumple el mínimo, pero su expansión libre de 2.47% justifica el tratamiento preventivo dado el contexto climático del altiplano.

4.2. Efecto de los estabilizantes sobre la compactación

Los resultados de la Tabla 12 muestran que cal y cemento modifican la curva de compactación de C-03-E2 mediante mecanismos opuestos a dosis altas: la cal reduce la γ_d máxima por encima del 1% (floculación que genera agregados de mayor volumen y menor densidad aparente), mientras que el cemento la mantiene o incrementa hasta el 5% (hidratación que forma una matriz rígida que compensa la expansión floculada). Este comportamiento diferencial, documentado también por Diniz et al. (2024) en suelos tropicales, tiene implicancia directa en campo: usar cal a dosis superiores al 1% en C-03-E2 produciría menor densificación que el suelo natural, lo que reduciría el CBR real respecto al de laboratorio. En C-04-E3 (Tabla 13), la reducción de humedad óptima de 5.2 puntos porcentuales con la mezcla binaria 1.5%+1.5% es el resultado más relevante para la construcción en el altiplano, donde la alta evapotranspiración y las precipitaciones estacionales dificultan el control de humedad en campo; el mecanismo que produce esta reducción -floculación inmediata del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ combinada con hidratación rápida del C_3S del cemento- fue reportado de forma análoga por Mugambi et al. (2024) con LC3 al 5% en arcillas expansivas de Kenia.

4.3. Efecto de los estabilizantes sobre la plasticidad

El hallazgo más original del estudio es el aumento temporal del IP en C-04-E3 con dosis bajas de cal y cemento individuales (Tabla 14, Fig. 11): cal al 3% aumenta el IP en +16.8% y cemento al 3% en +11.3%, mientras que la mezcla binaria desde 1.5%+1.5% lo reduce en -1.3%. La explicación reside en el umbral de concentración de Ca^{2+} necesario para activar el intercambio catiónico: por debajo de ese umbral, el agua incorporada en la mezcla eleva temporalmente el límite líquido antes de que la floculación se complete (Tan et al., 2020). La mezcla binaria supera ese umbral desde la primera dosificación porque actúa por dos mecanismos simultáneos, resultado análogo al documentado por Ahmed et al. (2024) y confirmado teóricamente por Lindh y Lemenkova (2023). La implicancia constructiva es concreta: aplicar cal o cemento solos al 3% en C-04-E3 durante la obra empeoraría temporalmente la plasticidad del suelo, riesgo que la mezcla binaria elimina. La correlación $r = -0.785$ entre CBR 100% e IP (Tabla 18) confirma que la reducción de plasticidad es uno de los mecanismos que explica el incremento de capacidad portante, sin que pueda atribuírsele causalidad exclusiva dada la naturaleza exploratoria del análisis estadístico.

4.4. Efecto de los estabilizantes sobre el CBR y determinación de la dosificación óptima

Los resultados al 95% de compactación -el parámetro de diseño MTC- muestran con más claridad que al 100% por qué cada estabilizante funciona mejor en un suelo distinto. En C-04-E3, la cal al 7% produce $\text{CBR}_{95\%} = 65.2\%$ mientras que el cemento al 3% produce 49.5%. La diferencia de 15.7 puntos entre ambos tratamientos, a igual nivel de compactación, responde a dos factores que actúan en la misma dirección: primero, C-04-E3 tiene $\text{IP} = 16.81\%$ sobre muestra de estabilización y 20.51% en campo, lo que indica mayor contenido de minerales arcillosos con superficie reactiva disponible para las reacciones de puzolanización; la cal aprovecha esa superficie para formar C-S-H y C-A-H a partir de la sílice y alúmina de la propia arcilla, generando resistencia que persiste tras el ciclo de saturación del CBR. El cemento, en cambio, forma C-S-H a partir de sus propias fases (C_3S y C_2S), sin depender de la arcilla del suelo, lo que limita su efecto cuando la compactación no es perfecta: la pérdida de 24.7 puntos entre CBR al 100% y al 95% con cemento en C-04-E3 muestra que la matriz cementante es muy sensible a la densidad alcanzada, mientras que la cal, con pérdida de solo 13.0 puntos, es menos dependiente de ese parámetro porque sus productos de reacción se distribuyen de forma más homogénea en la matriz arcillosa. En C-03-E2 el resultado se invierte: el cemento al 3% produce $\text{CBR}_{95\%} = 23.9\%$ frente a 20.9% de la cal al 1%. Aquí la diferencia es más estrecha -3 puntos- y la explicación es distinta. C-03-E2 tiene menor IP (17.71%) y el estrato evaluado para CBR no necesariamente tiene la misma composición mineralógica que el de C-04-E3, lo que reduce la superficie arcillosa disponible para la puzolanización de la cal. Con menos arcilla reactiva, el mecanismo de hidratación directa del cemento -que no depende de la mineralogía del suelo- resulta marginalmente más eficiente. A ello se suma que la cal en C-03-E2 se ensayó solo al 1%, dosificación que produce floculación pero probablemente no alcanza la concentración mínima de Ca^{2+} para completar las reacciones puzolánicas en el plazo del

curado empleado (96 horas de saturación). No se ensayó cal al 3% o superior en CBR para C-03-E2 porque esas dosis producen menor γ_d máxima en Proctor, lo que excluye esas dosificaciones del criterio de selección adoptado; esa limitación impide saber si la cal a mayor dosis habría superado al cemento en esa calicata, como ocurre en C-04-E3.

5. Conclusiones

- Sobre la caracterización inicial del suelo: C-01-E3 (ML, A-4(6), CBR = 15.5%) y C-02-E3 (GW, A-1-a(0), CBR = 37.1%) no requieren estabilización para subrasante según EG-2013. C-03-E2 (CL, A-7-6, CBR = 10.5%, IP = 17.71%, expansión = 2.47%) y C-04-E3 (CL, A-7-6, CBR = 5.9%, IP = 20.56% en campo / 16.81% sobre muestra de estabilización, expansión = 2.42%) son los suelos críticos del corredor; C-04-E3 no cumple el requisito mínimo de CBR sin tratamiento y C-03-E2, aunque supera el umbral, presenta expansión libre y plasticidad que comprometen su desempeño bajo variación de humedad.
- Sobre el efecto en la compactación: La cal redujo la γ_d máxima de C-03-E2 a dosis superiores al 1% (mínimo -4.8% al 5%), mientras que el cemento la mantuvo estable o incrementó levemente hasta el 5%. En C-04-E3, el cemento al 3% produjo la mayor γ_d (+3.57%), pero a 10% y 15% la redujo (-4.17% y -1.19%), lo que establece un límite superior práctico de dosificación para este suelo. La mezcla binaria 1.5% + 1.5% en C-04-E3 redujo la humedad óptima 5.2 puntos porcentuales, resultado favorable para la compactación en campo bajo las condiciones climáticas del altiplano puneño.
- Sobre el efecto en la plasticidad: En C-03-E2 todos los tratamientos redujeron el IP desde la primera dosificación, con reducción máxima de 27.8% con cal al 7%. En C-04-E3, cal y cemento solos incrementaron el IP a dosis bajas (3% y 5%) y solo lo redujeron al 7%; la mezcla binaria redujo el IP desde 1.5% + 1.5% con reducción máxima de 19.8% al 3.5% + 3.5%. Este comportamiento diferencial confirma que en suelos con IP > 16% la aplicación de un solo estabilizante a dosis bajas puede incrementar temporalmente la plasticidad antes de reducirla, lo que constituye un riesgo técnico si la dosificación de campo queda por debajo del umbral crítico.
- Sobre la capacidad portante (CBR) y la dosificación óptima: En C-03-E2, el cemento al 3% produjo el mayor CBR (29.1% al 100%, +177.1%), con baja sensibilidad a la compactación. En C-04-E3, la cal al 7% alcanzó el mayor CBR absoluto (78.2% al 100%, +1,225.4%), pero la mezcla binaria 1.5% + 1.5% ofrece CBR de 75.0% con menor sensibilidad a la energía de compactación y la humedad óptima más baja del programa (14.00%), lo que la posiciona como la solución de mayor viabilidad constructiva para ese suelo. Todos los tratamientos evaluados superan el CBR mínimo de 6% para subrasante y el de 20% para subrasante mejorada según EG-2013; los tratamientos en C-04-E3 superan adicionalmente el umbral de subbase granular ($\geq 30\%$) y el de base granular mejorada ($\geq 60\%$).
- Sobre la diferencia de respuesta entre suelos: El cemento fue marginalmente superior en C-03-E2 y la cal fue superior en C-04-E3, inversión de orden explicable por la mayor superficie arcillosa reactiva de C-04-E3 (IP = 16.81% sobre muestra de estabilización) que potencia las reacciones puzolánicas de la cal. Este resultado contradice la práctica de aplicar un único estabilizante a dosis fija en todo el corredor vial: los datos muestran que la dosificación óptima es específica para cada zona geotécnica, lo que requiere caracterización diferenciada del suelo antes de la ejecución.
- Limitación principal del estudio: Cada combinación de calicata y tratamiento cuenta con una sola réplica experimental en los ensayos de CBR. Los análisis estadísticos presentados tienen valor descriptivo para cuantificar correlaciones y magnitudes de efecto, pero no permiten inferencias poblacionales con alta potencia estadística. La validación en tramo experimental bajo tráfico real es el paso siguiente necesario para transferir estos resultados al diseño constructivo, tal como recomiendan Pokkunuri et al. (2023) tras su estudio de campo en el Vadodara Expressway Bypass y Roshan et al. (2022) al demostrar que el comportamiento bajo ciclos húmedo-seco de campo difiere del comportamiento en laboratorio en suelos con menos del 9% de cemento.

6. Referencias

- Ahmed, A., El-Emam, M., Ahmad, N., & Attom, M. (2024).** Stabilization of pavement subgrade clay soil using sugarcane ash and lime. *Geosciences*, 14(6), 151. <https://doi.org/10.3390/geosciences14060151>
- Albuquerque Filho, L. H., Casagrande, M. D. T., Almeida, M. S. S., Costa, W. G. S., & Santana, P. R. L. (2024).** Mechanical performance and life cycle assessment of soil stabilization solutions for unpaved roads from Northeast Brazil. *Sustainability*, 16(22), 9850. <https://doi.org/10.3390/su16229850>
- ASTM International. (n.d.). D422:** Standard test method for particle-size analysis of soils. ASTM International.
- ASTM International. (n.d.). D1557:** Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort. ASTM International.
- ASTM International. (n.d.). D1883:** Standard test method for California bearing ratio (CBR) of laboratory-compacted soils. ASTM International.
- ASTM International. (n.d.). D2216:** Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. ASTM International.
- ASTM International. (n.d.). D2487:** Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International.
- ASTM International. (n.d.). D3282:** Standard practice for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. ASTM International.
- ASTM International. (n.d.). D4318:** Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM International.
- Bucheli-Pérez, D., Sarmiento-Segovia, H., García-Troncoso, N., & Flores-Rada, J. (2022).** Stabilised base with soil-cement for unpaved roads "Ruta del Cacao" (Guayas, Ecuador). *Proceedings of the 7th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering, ICSECT 110*. <https://doi.org/10.11159/icsect22.110>
- Diniz, B. C., Fedrigo, W., Kleinert, T. R., Batista, G. S., Núñez, W. P., Correa, B. M., & Brito, L. A. T. (2024).** Lime stabilization of tropical soil for resilient pavements: Mechanical, microscopic, and mineralogical characteristics. *Materials*, 17(19), 4720. <https://doi.org/10.3390/ma17194720>
- Ifediniru, C., & Ekeocha, N. E. (2022).** Performance of cement-stabilized weak subgrade for highway embankment construction in Southeast Nigeria. *International Journal of Geo-Engineering*, 13(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s40703-021-00166-z>
- Kuswaya, W., Marsiano, W., Syafalni, S., & Jonbi. (2019).** Jambi and Palembang clay soil stabilization for pavement matrix in road construction by using Portland cement type I. *MATEC Web of Conferences*, 276, 05005. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201927605005>
- Lindh, P., & Lemenkova, P. (2023).** Laboratory experiments on soil stabilization to enhance strength parameters for road pavement. *Transport and Telecommunication*, 24(1), 73–82. <https://doi.org/10.2478/ttj-2023-0008>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013).** Manual de carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013. MTC. <https://www.mtc.gob.pe>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016).** Manual de ensayo de materiales (RD N° 18-2016). MTC. <https://www.mtc.gob.pe>
- Mostafa, A. E. A., Eisa, M., & Ibrahim, M. F. (2024).** Effect of stabilizing subgrade layer using various additives on the flexible pavement design. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9, 147. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01430-8>
- Mugambi, L. M., Mujombi, S., Mutai, V., Toeri, J. R., Marangu, J. M., & Valentini, L. (2024).** Potential of limestone calcined clay cement (LC3) in soil stabilization for application in roads and pavements construction. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03706. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03706>
- National Lime Association. (2004).** Manual de estabilización de suelo tratado con cal (Boletín 326). National Lime Association.
- Pokkunuri, G. R., Sinha, R. K., & Verma, A. K. (2023).** Field studies on expansive soil stabilization with nanomaterials and

lime for flexible pavement. *Sustainability*, 15(21), 15291. <https://doi.org/10.3390/su152115291>

Roshan, M. J., Rashid, A. S. B. A., Hezmi, M. A. B., Nejabi, M. N., Jusoh, S. N. B., Tamassoki, S., & Razali, R. (2022). Evaluation of cement stabilised residual soil on macro- and micro-scale for road construction. *Journal of Engineering and Applied Science*, 69, 109. <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00165-6>

SEM Experiment. (2025). Micro-mechanism of strength for cement-treated soil based on the SEM experiment: Qualitative and quantitative analysis. *Buildings*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/buildings15132370>

Sendilvadelu, A., Dhandapani, B., Vijayasimhan, S., & Pauldurai Kalaiselvi, S. P. (2025). Sustainable stabilization of clay soil using lime and *Oryza sativa*-waste-derived dried solid digestate. *Sustainability*, 17(18). <https://doi.org/10.3390/su17188447>

Tan, E. H., Zahran, E. M. M., & Tan, S. J. (2020). A review of chemical stabilisation in road construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 943, 012005. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/943/1/012005>

Wibawa, I. M. S., & Maharani, S. E. (2024). Improvement of clay soils using cement as a road pavement sub grade (Case study: Kuta–Tanah Lot Road). *Civil and Environmental Engineering*, 20(1), 124–136. <https://doi.org/10.2478/cee-2024-0011>

Zhao, K., & Wong, L. N. Y. (2025). A review of cement-soil in engineering geological applications: Mixing mechanisms, mechanical behavior, and constitutive models. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 84(12), 637. <https://doi.org/10.1007/s10064-025-04659-4>.

Anexos

Anexo 1. Evidencia de Sumisión



Acuse de recibo del envío

Desde Omar Zegarra Marmanillo |Assistant Editor <ric.ing@uc.cl>

Fecha Dom 16/08/2026 9:38

Para rudy.gutierrez <rudy.gutierrez@upeu.edu.pe>

Rudy Nail Gutierrez Molina:

Gracias por enviar el manuscrito "Estabilización de suelos con fines de pavimentación con cal y cemento en la superficie de rodadura vía Esquen-Tariachi, Juliaca – San Román – Puno" a Revista Ingeniería de Construcción. Con el sistema de gestión de publicaciones en línea que utilizamos podrá seguir el progreso a través del proceso editorial tras iniciar sesión en el sitio web de la publicación:

URL del manuscrito: <https://revistaingenieriaconstruccion.uc.cl/index.php/ric/authorDashboard/submission/108316>

Nombre de usuario/a: rudygm05

Si tiene alguna duda puede ponerse en contacto conmigo. Gracias por elegir esta editorial para mostrar su trabajo.

Omar Zegarra Marmanillo

Assistant Editor

Revista Ingeniería de Construcción <https://revistaingenieriaconstruccion.uc.cl/index.php/ric>

Anexo 2. Copia de Resolución de Sustentación



"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

RESOLUCIÓN N° 1202-2026/UPeU-FIA-CF

Lima, Ñaña, 02 de septiembre de 2026

VISTO:

El expediente de los (las) bachilleres **Rudy Nail Gutierrez Molina** identificado(a) con código universitario N° 201710556 y **Oscar David Apaza Jara** identificado(a) con código universitario N° 201712333, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO:

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la sustentación de la tesis en formato artículo;

Que el Comité Dictaminador ha emitido su dictamen aprobando el informe de tesis titulado "Estabilización de suelos con fines de pavimentación con cal y cemento en la superficie de rodadura vía Esquen-Tariachi, Juliaca – San Román – Puno", presentado por los (las) bachilleres **Rudy Nail Gutierrez Molina y Oscar David Apaza Jara** reuniendo de esta manera las condiciones previas para la declaratoria de expedito para la programación de la sustentación;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 02 de septiembre de 2026, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

Artículo 1. – DECLARAR EXPEDITO a los (las) bachilleres **Rudy Nail Gutierrez Molina y Oscar David Apaza Jara**, para que sustenten la tesis en formato artículo "Estabilización de suelos con fines de pavimentación con cal y cemento en la superficie de rodadura vía Esquen-Tariachi, Juliaca – San Román – Puno", conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Civil, el 21 de septiembre, a las 14:00 horas, en la modalidad presencial, en el Salón de Actos Wellesley Muir.

Artículo 2. – DESIGNAR EL JURADO DE SUSTENTACIÓN, encargado de gestionar la sustentación respectiva, el mismo que queda constituido por los siguientes miembros:

Presidente: Dr. Edwin Parillo Escarsena
Secretario: Mg. Herson Duberly Pari Cusi

Asesor: Mg. Leonel Chahuare Paucar
Vocal: MSc. Ecler Mamani Chambi

Artículo 3. – DISPONER que la presente Resolución sea registrada, comunicada a las instancias correspondientes y archivada conforme a ley.

Regístrese, comuníquese y archívese.



Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA

Cc:
Interesado
Jurado (2)
Secretaría General
Archivo



Mg. Sc. Gina Marita Tito Tolentino
SECRETARIA ACADÉMICA

Anexo 3. Certificados de Laboratorio

 UNIVERSIDAD PERUNA UNIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS																																																																																																																			
PROYECTO DE TESIS	: "Estabilización de suelos con fines de pavimentación con Cal y Cemento en la superficie de rodadura Vía Esquen-Tariachi, Juliaca - San Román - Puno"																																																																																																																		
TESISTAS	: Bach. Rudy Nail Gutierrez Molina y Bach. Oscar David Apaza Jara																																																																																																																		
Procedencia de la muestra	: Vía vecinal Esquen-Tariachi, Juliaca - San Román - Puno																																																																																																																		
Descripción de la muestra	: Suelo natural C-01																																																																																																																		
Fecha de ejec. de ensayo	: 12/09/2025																																																																																																																		
ENSAJO: CALIFORNIA BEARING RATIO NORMA ASTM - D 1883 Nro de Muestra : M-01 Nro de estrato : E-03 Densidad Seca de campo : 1.78 gr/cm³ Humedad de Campo : 14.10% Área del Pistón : 19.35 cm² Expansión Máxima : 0.00 %																																																																																																																			
<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th>DESCRIPCIÓN</th> <th colspan="6">CONTROL DE DENSIDAD</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Nro de Ensayo</td> <td colspan="2">01</td> <td colspan="2">02</td> <td colspan="2">03</td> </tr> <tr> <td>Número de Golpes por Capa</td> <td colspan="2">12</td> <td colspan="2">25</td> <td colspan="2">56</td> </tr> <tr> <td>Nro de Molde</td> <td colspan="2">M-005</td> <td colspan="2">M-004</td> <td colspan="2">M-006</td> </tr> <tr> <td>Peso de Molde (gr)</td> <td colspan="2">7731.50</td> <td colspan="2">7595.00</td> <td colspan="2">7559.50</td> </tr> <tr> <td>Volumen de Molde (cm³)</td> <td colspan="2">2136.53</td> <td colspan="2">2128.29</td> <td colspan="2">2122.44</td> </tr> <tr> <td>Condición de la Muestra</td> <td>No Saturado</td> <td>Saturado</td> <td>No Saturado</td> <td>Saturado</td> <td>No Saturado</td> <td>Saturado</td> </tr> <tr> <td>Peso de Material + Molde (gr)</td> <td>11821.00</td> <td>11884.00</td> <td>11779.00</td> <td>11902.00</td> <td>11880.00</td> <td>11992.00</td> </tr> <tr> <td>Peso de Material (gr)</td> <td>4089.50</td> <td>4152.50</td> <td>4184.00</td> <td>4307.00</td> <td>4320.50</td> <td>4432.50</td> </tr> <tr> <td>Peso Volumétrico Húmedo (gr/cm³)</td> <td>1.91</td> <td>1.94</td> <td>1.97</td> <td>2.02</td> <td>2.04</td> <td>2.09</td> </tr> </tbody> </table>		DESCRIPCIÓN	CONTROL DE DENSIDAD						Nro de Ensayo	01		02		03		Número de Golpes por Capa	12		25		56		Nro de Molde	M-005		M-004		M-006		Peso de Molde (gr)	7731.50		7595.00		7559.50		Volumen de Molde (cm ³)	2136.53		2128.29		2122.44		Condición de la Muestra	No Saturado	Saturado	No Saturado	Saturado	No Saturado	Saturado	Peso de Material + Molde (gr)	11821.00	11884.00	11779.00	11902.00	11880.00	11992.00	Peso de Material (gr)	4089.50	4152.50	4184.00	4307.00	4320.50	4432.50	Peso Volumétrico Húmedo (gr/cm ³)	1.91	1.94	1.97	2.02	2.04	2.09																																												
DESCRIPCIÓN	CONTROL DE DENSIDAD																																																																																																																		
Nro de Ensayo	01		02		03																																																																																																														
Número de Golpes por Capa	12		25		56																																																																																																														
Nro de Molde	M-005		M-004		M-006																																																																																																														
Peso de Molde (gr)	7731.50		7595.00		7559.50																																																																																																														
Volumen de Molde (cm ³)	2136.53		2128.29		2122.44																																																																																																														
Condición de la Muestra	No Saturado	Saturado	No Saturado	Saturado	No Saturado	Saturado																																																																																																													
Peso de Material + Molde (gr)	11821.00	11884.00	11779.00	11902.00	11880.00	11992.00																																																																																																													
Peso de Material (gr)	4089.50	4152.50	4184.00	4307.00	4320.50	4432.50																																																																																																													
Peso Volumétrico Húmedo (gr/cm ³)	1.91	1.94	1.97	2.02	2.04	2.09																																																																																																													
<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th>DESCRIPCIÓN</th> <th colspan="6">CONTROL DE LA HUMEDAD</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Nro de Tara</td> <td>T-001</td> <td>T-002</td> <td>T-003</td> <td>T-004</td> <td>T-005</td> <td>T-006</td> </tr> <tr> <td>Peso de Tara (gr)</td> <td>15.95</td> <td>13.53</td> <td>16.52</td> <td>13.91</td> <td>16.73</td> <td>13.49</td> </tr> <tr> <td>Peso de Tara + Suelo Húmedo (gr)</td> <td>63.01</td> <td>64.25</td> <td>58.32</td> <td>59.60</td> <td>51.40</td> <td>52.39</td> </tr> <tr> <td>Peso de Tara + Suelo Seco (gr)</td> <td>57.20</td> <td>57.46</td> <td>53.15</td> <td>53.94</td> <td>47.10</td> <td>47.80</td> </tr> <tr> <td>Peso del Agua (gr)</td> <td>5.81</td> <td>6.79</td> <td>5.17</td> <td>5.66</td> <td>4.30</td> <td>4.79</td> </tr> <tr> <td>Peso del Suelo Seco (gr)</td> <td>41.25</td> <td>43.93</td> <td>36.63</td> <td>40.03</td> <td>30.37</td> <td>34.11</td> </tr> <tr> <td>Contenido de Humedad (%)</td> <td>14.08%</td> <td>15.46%</td> <td>14.11%</td> <td>14.14%</td> <td>14.16%</td> <td>14.04%</td> </tr> <tr> <td>Contenido de Humedad Promedio (%)</td> <td colspan="2">14.77%</td> <td colspan="2">14.13%</td> <td colspan="2">14.10%</td> </tr> <tr> <td>Peso Volumétrico Seco (gr/cm³)</td> <td colspan="2">1.87</td> <td colspan="2">1.72</td> <td colspan="2">1.78</td> </tr> </tbody> </table>		DESCRIPCIÓN	CONTROL DE LA HUMEDAD						Nro de Tara	T-001	T-002	T-003	T-004	T-005	T-006	Peso de Tara (gr)	15.95	13.53	16.52	13.91	16.73	13.49	Peso de Tara + Suelo Húmedo (gr)	63.01	64.25	58.32	59.60	51.40	52.39	Peso de Tara + Suelo Seco (gr)	57.20	57.46	53.15	53.94	47.10	47.80	Peso del Agua (gr)	5.81	6.79	5.17	5.66	4.30	4.79	Peso del Suelo Seco (gr)	41.25	43.93	36.63	40.03	30.37	34.11	Contenido de Humedad (%)	14.08%	15.46%	14.11%	14.14%	14.16%	14.04%	Contenido de Humedad Promedio (%)	14.77%		14.13%		14.10%		Peso Volumétrico Seco (gr/cm ³)	1.87		1.72		1.78																																													
DESCRIPCIÓN	CONTROL DE LA HUMEDAD																																																																																																																		
Nro de Tara	T-001	T-002	T-003	T-004	T-005	T-006																																																																																																													
Peso de Tara (gr)	15.95	13.53	16.52	13.91	16.73	13.49																																																																																																													
Peso de Tara + Suelo Húmedo (gr)	63.01	64.25	58.32	59.60	51.40	52.39																																																																																																													
Peso de Tara + Suelo Seco (gr)	57.20	57.46	53.15	53.94	47.10	47.80																																																																																																													
Peso del Agua (gr)	5.81	6.79	5.17	5.66	4.30	4.79																																																																																																													
Peso del Suelo Seco (gr)	41.25	43.93	36.63	40.03	30.37	34.11																																																																																																													
Contenido de Humedad (%)	14.08%	15.46%	14.11%	14.14%	14.16%	14.04%																																																																																																													
Contenido de Humedad Promedio (%)	14.77%		14.13%		14.10%																																																																																																														
Peso Volumétrico Seco (gr/cm ³)	1.87		1.72		1.78																																																																																																														
<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th>DESCRIPCIÓN</th> <th colspan="6">CONTROL DE LA EXPANSIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Altura de la Muestra (mm)</td> <td colspan="2">117.3</td> <td colspan="2">116.8</td> <td colspan="2">116.2</td> </tr> <tr> <td>Fecha</td> <td>Hora</td> <td>Tiempo</td> <td>Lectura (")</td> <td>Expansión (%)</td> <td>Lectura (")</td> <td>Expansión (%)</td> </tr> <tr> <td>12/09/2025</td> <td>9:30 a. m.</td> <td></td> <td>0.010</td> <td>0.00</td> <td>0.065</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>16/09/2025</td> <td>9:40 a. m.</td> <td>4 Días</td> <td>0.010</td> <td>0.00</td> <td>0.065</td> <td>0.00</td> </tr> </tbody> </table>		DESCRIPCIÓN	CONTROL DE LA EXPANSIÓN						Altura de la Muestra (mm)	117.3		116.8		116.2		Fecha	Hora	Tiempo	Lectura (")	Expansión (%)	Lectura (")	Expansión (%)	12/09/2025	9:30 a. m.		0.010	0.00	0.065	0.00	16/09/2025	9:40 a. m.	4 Días	0.010	0.00	0.065	0.00																																																																															
DESCRIPCIÓN	CONTROL DE LA EXPANSIÓN																																																																																																																		
Altura de la Muestra (mm)	117.3		116.8		116.2																																																																																																														
Fecha	Hora	Tiempo	Lectura (")	Expansión (%)	Lectura (")	Expansión (%)																																																																																																													
12/09/2025	9:30 a. m.		0.010	0.00	0.065	0.00																																																																																																													
16/09/2025	9:40 a. m.	4 Días	0.010	0.00	0.065	0.00																																																																																																													
<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th colspan="3">DESCRIPCIÓN</th> <th colspan="6">CONTROL DE LA PENETRACIÓN</th> </tr> <tr> <th rowspan="2">Penetración (mm)</th> <th rowspan="2">Tiempo (min)</th> <th rowspan="2">Carga Estática</th> <th colspan="2">M-005</th> <th colspan="2">M-004</th> <th colspan="2">M-006</th> </tr> <tr> <th>Lectura (Kg)</th> <th>Esfuerzo (kg/cm²)</th> <th>Lectura (kg)</th> <th>Esfuerzo (kg/cm²)</th> <th>Lectura (kg)</th> <th>Esfuerzo (kg/cm²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.00</td> <td>00:00</td> <td></td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>0.64</td> <td>00:30</td> <td></td> <td>53.23</td> <td>2.75</td> <td>59.55</td> <td>3.08</td> <td>156.12</td> <td>8.07</td> </tr> <tr> <td>1.27</td> <td>01:00</td> <td></td> <td>70.46</td> <td>3.64</td> <td>81.88</td> <td>4.23</td> <td>356.39</td> <td>18.42</td> </tr> <tr> <td>1.91</td> <td>01:30</td> <td></td> <td>77.60</td> <td>4.01</td> <td>112.17</td> <td>5.80</td> <td>644.14</td> <td>33.29</td> </tr> <tr> <td>2.54</td> <td>02:00</td> <td>70.31</td> <td>83.21</td> <td>4.30</td> <td>139.09</td> <td>7.19</td> <td>884.30</td> <td>44.67</td> </tr> <tr> <td>3.20</td> <td>02:30</td> <td></td> <td>99.22</td> <td>5.13</td> <td>185.79</td> <td>9.80</td> <td>1049.17</td> <td>54.22</td> </tr> <tr> <td>3.81</td> <td>03:00</td> <td></td> <td>137.66</td> <td>7.11</td> <td>256.19</td> <td>13.34</td> <td>1235.37</td> <td>63.84</td> </tr> <tr> <td>5.08</td> <td>04:00</td> <td>105.46</td> <td>185.79</td> <td>9.60</td> <td>419.40</td> <td>21.67</td> <td>1565.75</td> <td>80.92</td> </tr> <tr> <td>7.62</td> <td>06:00</td> <td></td> <td>220.97</td> <td>11.42</td> <td>566.55</td> <td>29.28</td> <td>2036.75</td> <td>105.26</td> </tr> <tr> <td>10.16</td> <td>08:00</td> <td></td> <td>254.72</td> <td>13.16</td> <td>709.20</td> <td>36.65</td> <td>2267.71</td> <td>117.19</td> </tr> </tbody> </table>		DESCRIPCIÓN			CONTROL DE LA PENETRACIÓN						Penetración (mm)	Tiempo (min)	Carga Estática	M-005		M-004		M-006		Lectura (Kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Lectura (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Lectura (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	0.00	00:00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64	00:30		53.23	2.75	59.55	3.08	156.12	8.07	1.27	01:00		70.46	3.64	81.88	4.23	356.39	18.42	1.91	01:30		77.60	4.01	112.17	5.80	644.14	33.29	2.54	02:00	70.31	83.21	4.30	139.09	7.19	884.30	44.67	3.20	02:30		99.22	5.13	185.79	9.80	1049.17	54.22	3.81	03:00		137.66	7.11	256.19	13.34	1235.37	63.84	5.08	04:00	105.46	185.79	9.60	419.40	21.67	1565.75	80.92	7.62	06:00		220.97	11.42	566.55	29.28	2036.75	105.26	10.16	08:00		254.72	13.16	709.20	36.65	2267.71	117.19
DESCRIPCIÓN			CONTROL DE LA PENETRACIÓN																																																																																																																
Penetración (mm)	Tiempo (min)	Carga Estática	M-005		M-004		M-006																																																																																																												
			Lectura (Kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Lectura (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Lectura (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)																																																																																																											
0.00	00:00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																											
0.64	00:30		53.23	2.75	59.55	3.08	156.12	8.07																																																																																																											
1.27	01:00		70.46	3.64	81.88	4.23	356.39	18.42																																																																																																											
1.91	01:30		77.60	4.01	112.17	5.80	644.14	33.29																																																																																																											
2.54	02:00	70.31	83.21	4.30	139.09	7.19	884.30	44.67																																																																																																											
3.20	02:30		99.22	5.13	185.79	9.80	1049.17	54.22																																																																																																											
3.81	03:00		137.66	7.11	256.19	13.34	1235.37	63.84																																																																																																											
5.08	04:00	105.46	185.79	9.60	419.40	21.67	1565.75	80.92																																																																																																											
7.62	06:00		220.97	11.42	566.55	29.28	2036.75	105.26																																																																																																											
10.16	08:00		254.72	13.16	709.20	36.65	2267.71	117.19																																																																																																											

*Las muestras fueron extraídas y puestas en laboratorio por los testistas, debidamente etiquetadas y acompañadas de sus respectivas descripciones

**Los ensayos fueron realizados por los testistas, siguiendo los procedimientos establecidos en el laboratorio y las normativas vigentes. Los resultados han sido procesados por el jefe de laboratorio para su correspondiente certificación


 Ing. Yessy Apaza Pinto
 JEFE DE LABORATORIO DE
 MECÁNICA DE SUELOS





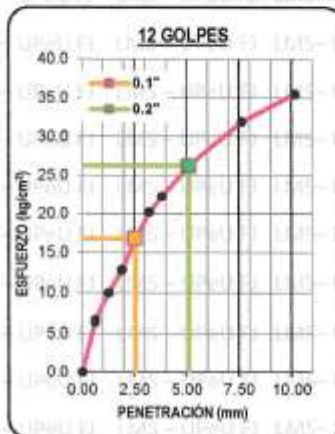
UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

PROYECTO DE TESIS	: "Estabilización de suelos con fines de pavimentación con Cal y Cemento en la superficie de rodadura Vía Esquen-Tariachi, Juliaca - San Román - Puno"
TESISTAS	: Bach. Rudy Nail Gutierrez Molina y Bach. Oscar David Apaza Jara
Procedencia del material	: Vía vecinal Esquen-Tariachi, Juliaca - San Román - Puno
Descripción de la muestra	: Suelo natural C-02
Fecha de ejec. de ensayo	: 23/09/2025

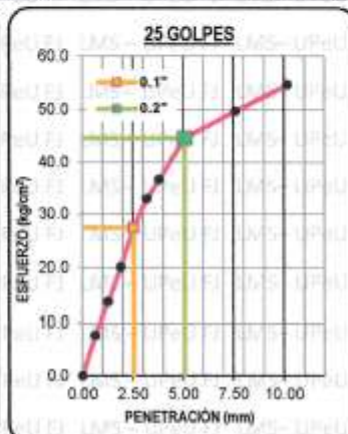
ENSAYO:	Nro de Muestra	: M-01
	Nro de estrato	: E-03
	Densidad Seca de Campo	: 1.93 gr/cm ³
	Humedad de campo	: 11.85%
	Área del Pistón	: 19.35 cm ²
	Expansión Máxima	:

CALIFORNIA BEARING RATIO

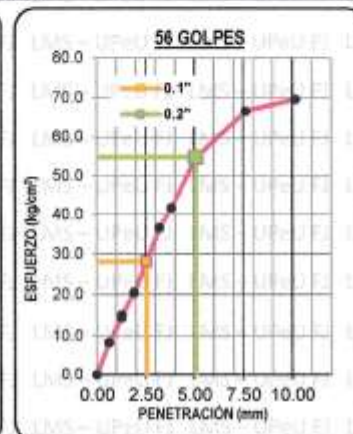
NORMA ASTM - D 1883



CBR 0.1": 23.84%
CBR 0.2": 24.89%

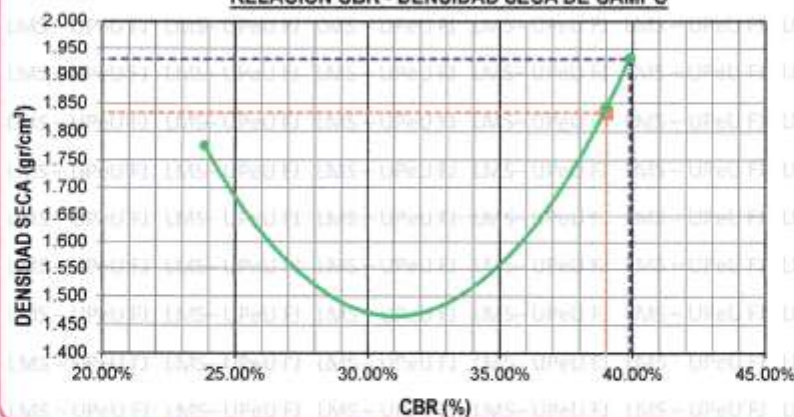


CBR 0.1": 39.02%
CBR 0.2": 42.27%



CBR 0.1": 39.90%
CBR 0.2": 51.94%

RELACIÓN CBR - DENSIDAD SECA DE CAMPO



CBR al 100% de la γ_{max}	=	39.90%
CBR al 95% de la γ_{max}	=	39.00%

*Las muestras fueron extraídas y puestas en laboratorio por los testistas, debidamente etiquetadas y acompañadas de sus respectivas descripciones.

**Los ensayos fueron realizados por los testistas, siguiendo los procedimientos establecidos en el laboratorio y las normativas vigentes. Los resultados han sido procesados por el jefe de laboratorio para su correspondiente certificación.

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
EP. INGENIERÍA CIVIL
Ing. Yacchia Apaza Panto
JEFE DE LABORATORIO DE
MECÁNICA DE SUELOS





UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

PROYECTO DE TESIS	: "Estabilización de suelos con fines de pavimentación con Cal y Cemento en la superficie de rodadura Vía Esquen-Tariachi, Juliaca - San Román - Puno"
SOLICITANTE	: Bach. Rudy Nali Gutierrez Molina y Bach. Oscar David Apaza Jara
Procedencia de muestra	: Vía vecinal Esquen-Tariachi, Juliaca - San Román - Puno
Descripción de muestra	: Suelo natural + 3% cal (Calicata 03)
Fecha de ejec. de ensayo	: 03/04/2025

ENSAYO: COMPACTACIÓN DE SUELOS ASTM D 1557 ,MTC E 115	Nro de Muestra	: M-01
	Nro de estrato	: E-02
	Método de Compactación	: Método "A"
	Nro de capas	: 05 capas
	Material utilizado	: Pasante el tamiz N°4 : Proctor Modificado

DESCRIPCIÓN	CONTROL DE DENSIDAD			
Volumen del Molde	cm ³	934.45	934.45	934.45
Peso del Molde	gr.	3896.00	3896.00	3896.00
Peso Suelo Humedo + Molde	gr.	5617.50	5675.50	5717.50
Peso del Suelo Humedo	gr.	1721.50	1779.50	1821.50
Densidad del Suelo Humedo	gr/cm ³	1.84	1.90	1.95

DESCRIPCIÓN	CONTROL DE HUMEDAD								
Capsula No	No	T-013	T-039	T-389	T-280	T-009	T-029	T-027	T-003
Suelo Humedo + Capsula	gr.	56.06	55.80	53.00	53.91	56.72	60.79	56.66	56.42
Peso del Suelo Seco + Capsula	gr.	48.92	49.63	46.23	47.11	49.43	53.41	48.91	48.67
Peso del Agua	gr.	6.14	6.17	6.77	6.80	7.29	7.38	7.75	7.75
Peso de la Capsula	gr.	16.04	15.80	13.00	13.91	16.71	20.78	16.65	16.40
Peso del Suelo Seco	gr.	33.88	33.83	33.23	33.20	32.72	32.63	32.26	32.27
% de Humedad	%	18.12%	18.24%	20.37%	20.48%	22.28%	22.62%	24.02%	24.02%
Promedio de Humedad	%	18.18%			20.43%			22.45%	
Densidad del Suelo Seco	gr/cm ³	1.559			1.581			1.592	

RELACIÓN HUMEDAD - DENSIDAD SECA



MAXIMA DENSIDAD SECA	: 1.59 gr/cm ³
ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD	: 22.10%

*Las muestras fueron extraídas y puestas en laboratorio por los testistas, debidamente etiquetadas y acompañadas de sus respectivas descripciones.

**Los ensayos fueron realizados por los testistas, siguiendo los procedimientos establecidos en el laboratorio. Los resultados han sido procesados para su correspondiente certificación.

Ing. Yessenia Apaza Pinto
JEFE DE LABORATORIO DE
MECÁNICA DE SUELOS





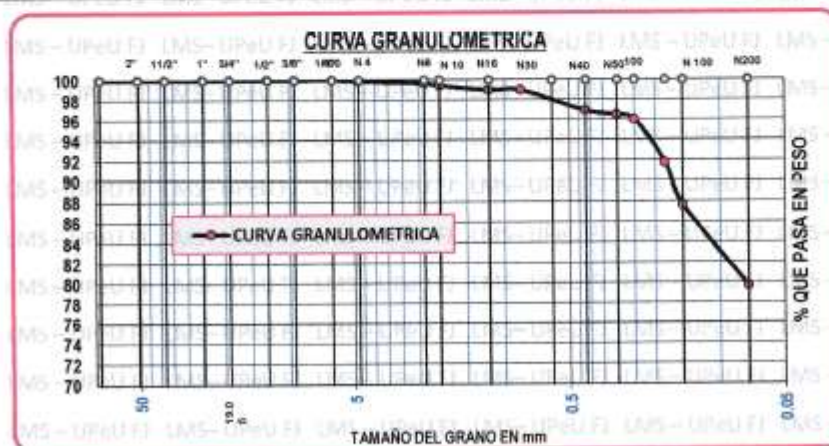
UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

TÍTULO DE TESIS	: "Estabilización de suelos con fines de pavimentación con Cal y Cemento en la superficie de rodadura Via Esquen-Tariachi, Juliaca - San Román - Puno"
SOLICITANTE	: Bach. Rudy Nail Gutierrez Molina y Bach. Oscar David Apaza Jara
Procedencia de muestra	: Vía vecinal Esquen-Tariachi, Juliaca - San Román - Puno
Descripción de muestra	: Suelo natural C-01
Fecha de ejec. de ensayo	: 21/02/2025

ENSAYO:	Nro de Muestra : M-01
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	N° colicata / N° estrato : C01/E02
NORMA ASTM - D 422	Clasificación SUCS : CL
	Clasificación AASHTO : A-4 (6)
	Estado de la Muestra : Alterada

TAMICES ASTM	ABERTURA (mm)	Peso Retenido (gr)	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% que pasa
3"	76.2	0.00	0.00	0.00	100.0
2"	50.8	0.00	0.00	0.00	100.0
1 1/2"	38.1	0.00	0.00	0.00	100.0
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.0
3/4"	19.05	0.00	0.00	0.00	100.0
1/2"	12.7	0.00	0.00	0.00	100.0
3/8"	9.53	0.00	0.00	0.00	100.0
1/4"	6.35	0.00	0.00	0.00	100.0
No4	4.75	0.50	0.11	0.11	99.9
No8	2.36	1.00	0.23	0.34	99.7
No10	2.00	1.00	0.23	0.57	99.4
No16	1.18	2.00	0.45	1.02	99.0
No30	0.60	6.00	1.36	2.39	97.6
No40	0.42	3.00	0.68	3.07	96.9
No 50	0.30	2.00	0.45	3.52	96.5
No60	0.25	2.00	0.45	3.98	96.0
No80	0.18	19.00	4.32	8.30	91.7
No100	0.15	18.00	4.09	12.39	87.6
No200	0.07	35.00	7.95	20.34	79.7
BASE		350.50	79.66	100.00	0.00
TOTAL		440.00			

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	
Peso Inicial	: 440.0 gr.
Peso Lavado	: 89.5 gr.
Peso Perdido	: 350.5 gr.
LÍMITES DE CONSISTENCIA	
Límite Líquido	: 29.05%
Límite Plástico	: 21.95%
IP	: 7.10%
CARACT. GRANULOMÉTRICAS	
D10	= NP
D30	= NP
D60	= NP
CU	= NP
CC	= NP



*Las muestras fueron extraídas y puestas en laboratorio por los testistas, debidamente etiquetadas y acompañadas de sus respectivas descripciones.

**Los ensayos fueron realizados por los testistas, siguiendo los procedimientos establecidos en el laboratorio. Los resultados han sido procesados para su correspondiente certificación.

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
EP. INGENIERÍA CIVIL
Ing. Yesenia Apaza Pinto
JEFE DE LABORATORIO DE
MECÁNICA DE SUELOS



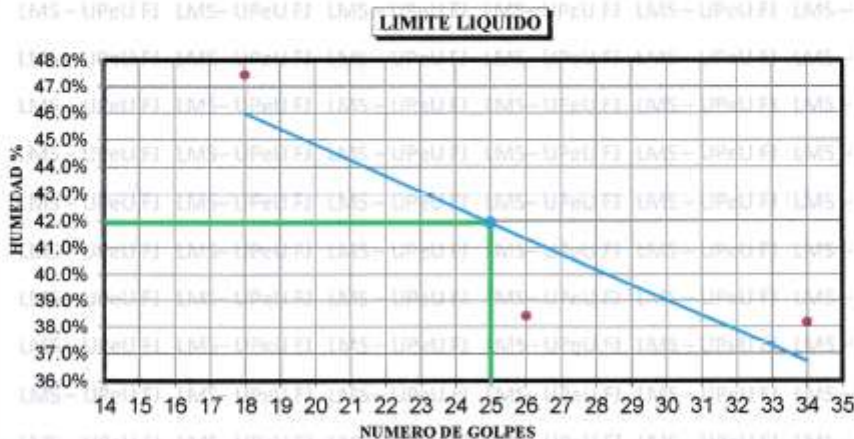


UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

TÍTULO DE TESIS	: "Estabilización de suelos con fines de pavimentación con Cal y Cemento en la superficie de rodadura Vía Esquen-Tariachi, Juliaca - San Román - Puno"
SOLICITANTES	: Bach. Rudy Nail Gutierrez Molina y Bach. Oscar David Apaza Jara
Procedencia de muestra	: Vía vecinal Esquen-Tariachi, Juliaca - San Román - Puno
Descripción de muestra	: Suelo natural + 3% cal (Calicata 03)
Fecha de ejec. de ensayo	: 05/12/2025

ENSAYO:	Nro de Calicata	: C-03
LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO NORMA ASTM - D 4318	Nro de estrato	: E-02
	Clasificación SUCS	: --
	Clasificación AASHTO	: --
	Estado de la Muestra	: Alterada

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
Nro de ensayo	01	02	03	01	02
Numero de Capsula	T-34	T-12	T-35	T-026	T-021
Peso de Capsula + Suelo Humedo (gr)	42.48	43.47	44.17	13.76	13.09
Peso de Capsula + Suelo Seco (gr)	37.92	37.91	38.30	12.66	12.25
Peso del Agua (gr)	4.54	5.56	5.87	1.1	0.84
Peso de Capsula (gr)	26.03	23.44	25.93	8.21	8.90
Peso de Suelo Seco (gr)	11.89	14.47	12.37	4.45	3.35
Contenido de Humedad (%)	38.18%	38.42%	47.45%	24.72%	25.07%
Numero de Golpes	34	26	18	24.90%	



Límite Líquido : 41.93% Límite Plástico : 24.90% Índice de Plasticidad : 17.04%

*Las muestras fueron extraídas y puestas en laboratorio por los tesisistas, debidamente etiquetadas y acompañadas de sus respectivas descripciones.

**Los ensayos fueron realizados por los tesisistas, siguiendo los procedimientos establecidos en el laboratorio. Los resultados han sido procesados para su correspondiente certificación.

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
EP. INGENIERÍA CIVIL
Ing. Yessy Apaza Pinto
JEFE DE LABORATORIO DE
MECÁNICA DE SUELOS

