

Propiedades físico-mecánicas del afirmado con cal en superficies de rodadura en la provincia de Chota, Cajamarca

Physical and mechanical properties of lime paving on rolling surfaces in the province of Chota, Cajamarca

José Jeiner Muñoz Núñez^{1*}  Luis Miguel Bustamante Silva¹  Cristhian Saúl López Villanueva¹ 

¹Universidad Nacional Autónoma de Chota (UNACH), Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Ciudad Universitaria Colpamatara, 06120, Chota, Cajamarca, Perú

*Autor de correspondencia: [Email: jeinermunoz13@gmail.com]

RESUMEN

Las carreteras no pavimentadas de la provincia de Chota presentan deterioro prematuro debido a materiales de afirmado con propiedades físico-mecánicas deficientes, lo que afecta su durabilidad y funcionalidad. En este sentido, el objetivo en este estudio fue determinar la adición de cal al 2% y 5% en el mejoramiento del material de afirmado utilizado en superficies de rodadura. Se utilizó material extraído de la cantera "La Chuica", donde se tomaron cinco muestras representativas para los ensayos de laboratorio. Se realizaron pruebas de granulometría, límites de consistencia, compactación Proctor, abrasión Los Ángeles y California Bearing Ratio (CBR), comparando el comportamiento del afirmado natural con el modificado con cal.

Los resultados mostraron que el material en estado natural presentaba un límite líquido de 40.2%, índice de plasticidad de 18.04% y un CBR de 25.74%, valores por debajo de lo exigido por la normativa peruana. Al adicionar cal al 2%, el índice de plasticidad se redujo a 12.2% y el CBR aumentó a 30.96%. Con 5% de cal, se obtuvo un índice de plasticidad de 5.6% y un CBR de 40.24%, superando el valor mínimo requerido de 40%.

Se concluye que la adición de cal al 5% mejoró significativamente las propiedades físico-mecánicas del material afirmado, especialmente el índice de plasticidad y el CBR.

Palabras clave: CBR, compactación, plasticidad, límite líquido, suelos.

ABSTRACT

Unpaved roads in the province of Chota exhibit premature deterioration due to granular materials with poor physical and mechanical properties, affecting their durability and functionality. In this context, the objective of this study was to determine the effect of adding 2% and 5% lime on the improvement of granular materials used in unpaved road surfaces. Material was extracted from the "La Chuica" quarry, from which five representative samples were taken for laboratory testing. Grain size distribution, consistency limits, modified Proctor compaction, Los Angeles abrasion, and California Bearing Ratio (CBR) tests

were conducted, comparing the behavior of untreated material with lime-treated samples. The results showed that the untreated material had a liquid limit of 40.2%, a plasticity index of 18.04%, and a CBR of 25.74%, which are below the limits required by Peruvian regulations. By adding 2% lime, the plasticity index decreased to 12.2% and the CBR increased to 30.96%. With 5% lime, a plasticity index dropped 5.6% and a CBR rose to 40.24%, exceeding the minimum required value of 40%.

It can be concluded that the addition of 5% lime significantly improved the physical and mechanical properties of the granular material, especially the plasticity index and CBR.

Keywords: CBR, compaction, plasticity, liquid limit, granular soils

INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial no pavimentada al año 2023 alcanza el 81% de la red vial del Sistema Nacional de Carreteras del Perú y en el departamento de Cajamarca es alrededor de 88.3%, según información del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2024). Según, Rincón & Sánchez (2019) este tipo de vías compuestas principalmente por afirmado granular, presentan limitaciones para soportar el tránsito vehicular, especialmente en temporadas de lluvia, cuando el material pierde cohesión y capacidad portante, provocando deterioros como pérdida de grava, ondulaciones y ahuellamientos, que se agravan por la falta de mantenimiento, reduciendo la durabilidad y calidad del servicio vial.

Asimismo, Cieza & Rodrigo (2024) indican que el deterioro de las carreteras se debe principalmente al tránsito vehicular, las condiciones climáticas, el mal drenaje, el uso de materiales de baja calidad y deficiencias en el diseño y mantenimiento. Para afrontar esta problemática, se recomienda aplicar estrategias integrales que incluyan un buen diseño, materiales adecuados, sistemas de drenaje eficientes, técnicas constructivas apropiadas y programas de mantenimiento preventivo y continuo.

En la provincia de Chota, la mayoría de vías de comunicación son trochas carrozables que por su naturaleza tienen una superficie de rodadura no pavimentada que se deterioran con rapidez debido al uso de materiales de afirmado de baja calidad, que no cumplen con los requisitos físico-mecánicos exigidos por la normativa vigente. Esta situación, agravada por el tránsito y las condiciones climáticas, genera constantes restricciones en la conectividad rural, incrementa los costos de mantenimiento y afecta directamente la economía local (Cieza & Rodrigo, 2024).

Ante esta problemática, la estabilización del afirmado se plantea como una alternativa técnica eficaz para mejorar el comportamiento y la resistencia del material, sin embargo, la efectividad y durabilidad del tratamiento dependen directamente un buen proceso constructivo y de la calidad del material estabilizado (Rincón & Sánchez, 2019). Entre las técnicas disponibles, el uso de cal ha demostrado ser una solución eficiente, accesible y de bajo costo para suelos con alta plasticidad y baja capacidad portante, como los presentes en Chota.

Diversos estudios han demostrado que la estabilización del suelo con cal reduce significativamente el índice de plasticidad, disminuye la humedad óptima y mejora el

CBR, al incrementar la resistencia al corte bajo condiciones controladas de compactación; además, la estabilización con cal resulta ser una alternativa más económica y eficiente frente a otros métodos convencionales (García, 2023). Asimismo, Aguilar (2021) indica que la cal puede ser una opción viable para la estabilización temporal de carreteras, donde ofrece un equilibrio aceptable entre economía y durabilidad.

Según (Ticlla, 2021), el banco de material más extenso del distrito de Chota es la cantera "La Chuica", con un área superior a los 6,000 m² y un volumen explotable mayor a 100,000 m³, cuyo material presenta una abrasión inferior al 50%, cumpliendo con lo establecido por la normativa técnica; sin embargo, parámetros como el límite líquido, el índice de plasticidad y el California Bearing Ratio (CBR) se encuentran fuera del rango exigido, aunque pueden ser mejorados mediante la incorporación de aditivos químicos.

En este contexto, el estudio tiene como objetivo determinar las propiedades físico-mecánicas del material de afirmado con adición de cal en 2% y 5% para su aplicación en la construcción y mantenimiento de superficies de rodadura en la provincia de Chota.

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar de estudio

El estudio se realizó en la cantera "La Chuica", ubicada en el centro poblado de Rojaspampa, distrito y provincia de Chota, región Cajamarca, Perú. Geográficamente, se localiza en la zona UTM 17S con coordenadas 764198.2590 E y 9275106.0670 N, a una altitud aproximada de 2,844.03 msnm. El clima

local presenta temperaturas máximas anuales que oscilan entre 13.8 °C y 21 °C, mientras que las mínimas varían entre 7.8 °C y 11.6 °C. La precipitación anual proyectada es de aproximadamente 1,160.8 mm, concentrada principalmente entre noviembre y abril (Cieza & Miranda, 2024).

El tipo de suelo dominante corresponde a suelos franco-arcilloso con presencia de limos y material granular fino, característicos de áreas con procesos de meteorización moderada. Según, la clasificación del MTC (2014) estos suelos presentan índices de plasticidad y CBR deficientes para ser usados directamente como afirmado en superficies de rodadura, por lo cual requieren estabilización para cumplir los parámetros técnicos normativos.

Diseño estadístico

El estudio fue de tipo experimental, descriptivo y correlacional, cuyo propósito es analizar cómo una variable independiente (cal) influye sobre una variable dependiente (propiedades físico mecánicas del afirmado), mediante la manipulación controlada de la primera y la eliminación de factores externos que puedan interferir en la relación causal (Vizcaíno et al., 2023, p. 8).

El material de afirmado fue procedente de la cantera "La Chuica", la cual presenta una extensión de 9823.47 m² (0.9823 has) y volumen de explotación de 137532.78 m³, las muestras se colectaron siguiendo la metodología del Manual de Suelos, Geología y Geotecnia (MTC, 2014). En ese sentido, se colectaron cinco muestras distribuidas en distancias aproximadamente equidistantes, con un promedio de separación de 45 metros

entre cada punto de muestreo; en seguida, a las muestras se les aplicaron tres cantidades de cal en porcentaje i) 0%, ii) 2% y iii) 5% al material de afirmado.

Colecta de datos

Preliminarmente se verificó el acceso a la cantera y se ejecutó una evaluación topográfica del área de estudio, se distribuyeron los puntos de muestreo y se extrajo material de acuerdo a lo establecido en la normativa MTC E 101 – Muestreo de suelos y rocas, para posteriormente seguir con la etapa de evaluación en laboratorio y gabinete.

En la etapa de laboratorio se determinó el contenido de humedad de acuerdo con la NTP 339.127:1998 (revisada el 2019) usando la muestra representativa de cada punto de muestreo, taras, estufa a temperatura de 110 ± 5 °C y balanza con aproximación de 0.01g. Se realizó el ensayo de granulometría de acuerdo a la NTP 339.128:1999 (revisada el 2019) usando tamices (3", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 3/8", N° 4, N° 10, N° 20, N° 40, N° 60, N° 140, N° 200), estufa a temperatura de 110 ± 5 °C, balanza con aproximación de 0.01g y tamizador mecánico, así mismo, el análisis granulométrico se dividió en dos grupos: el retenido en el tamiz N°10 se realizó un tamizado en seco, mientras el material pasante se procederá a realizar análisis granulométrico por lavado.

Se realizó el ensayo de límites de consistencia de acuerdo a la NTP 339.129:1999 (revisada el 2019), se evaluó el límite líquido usando el equipo de Casagrande mecánico, provisto de una copa de bronce con una altura de caída de $10 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$, taras, estufa a temperatura de 110 ± 5 °C y balanza con aproximación de 0.01g, para el límite

plástico se usó una placa de vidrio pulido cuadrada de 30 cm de lado por 1 cm de espesor.

Se realizó el ensayo de abrasión Los Ángeles conforme a la NTP 400.019:2020. De acuerdo con las características del material, se aplicó el método B, determinando el desgaste del material mediante el uso de la Máquina de Los Ángeles, compuesta por un cilindro hueco de acero con diámetro interior de 711 mm y longitud interna de 508 mm, la rotación se efectuó a una velocidad de 30 rpm hasta completar 500 revoluciones; asimismo, se emplearon tamices de 1", 3/4", 1/2" y 3/8", estufa a temperatura de 110 ± 5 °C y balanza con aproximación de 0.01g. Se realizó el ensayo de Proctor modificado de acuerdo a la NTP 339.141:1999 (revisada el 2019), según las características de nuestro material se usó el método B, para ello se usó molde con diámetro de 4 pulgadas, material pasante del tamiz 3/8, se compacto en 5 capas aplicando 25 golpes por capa.

El ensayo CBR se ejecutó conforme a la NTP 339.145:1999 (revisada el 2019) usando una máquina de carga (prensa CBR), pistón de penetración, molde cilíndrico de 6 pulgadas, disco espaciador, diales de medición, la muestra con humedad óptima se compacta en tres moldes con 10, 25 y 56 golpes por capa, estos moldes son sumergidos en agua para medir con el dial la deformación a lo largo del tiempo, posteriormente se aplica una carga utilizando la prensa CBR registrando las lecturas de la curva presión – penetración.

Todos los ensayos se realizaron en los laboratorios de Mecánica de Suelos y Mecánica de Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de Chota, excepto el

ensayo CBR, que fue ejecutado en un laboratorio externo certificado (Geoconcret HyM Ingenieros), debido a limitaciones de equipamiento.

En la etapa de gabinete, se utilizaron formatos validados por especialistas en suelos y se procesó la información mediante los programas Excel y AutoCAD Civil 3D.

Análisis de datos

El análisis de datos se realizó de forma secuencial para evaluar la influencia de la adición de cal al material de afirmado. Primero, se organizaron los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio (límite líquido, índice de plasticidad, densidad seca máxima, humedad óptima y CBR) en hojas de cálculo mediante Microsoft Excel, lo que permitió su procesamiento sistemático.

Posteriormente, se calculó el promedio de cada variable para los tres niveles de tratamiento (0%, 2% y 5% de cal), lo cual facilitó el análisis comparativo del comportamiento del material natural frente al modificado. Se realizó un análisis descriptivo con medidas de tendencia central y se elaboraron gráficos de regresión para visualizar el efecto de la cal sobre cada propiedad físico-mecánica del afirmado.

Finalmente, los datos usados para el análisis estadístico de varianza (ANOVA) se realizó utilizando el software Minitab 19, con el objetivo de aceptar la hipótesis nula (H_0) si el valor-p era mayor que el nivel de

significancia (0.05), o rechazarla si el valor-p resultaba menor que dicho nivel.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La cantera "La Chuica" es clasificada como un depósito de suelos pluviales antiguos, contiene grava, arena y material fino, y está destinada al suministro de materiales para obras viales. Cuenta con un volumen aprovechable de 137,532.78 m³, un área de 9,823.47 m² y un perímetro de 471.55 m, lo que evidencia su potencial para proyectos de afirmado.

Propiedades físico – mecánicas de las muestras patrón

Al analizar las propiedades físico mecánicas del material de afirmado se obtuvo que cumple parcialmente con los requisitos establecidos por el MTC, el análisis granulométrico de las cinco muestras se ajustó de manera limitada a las especificaciones de la gradación Tipo C, como se detalla en la Figura 1, evidenciándose una elevada proporción de finos, dando un indicio de la necesidad de un tratamiento con cal para mejorar su comportamiento mecánico, asimismo, las muestras M2, M3 y M5 evidencian una distribución granulométrica con mayor similitud con los rangos establecidos por el MTC. Al realizar la clasificación SUCS, las muestras se clasificaron como tipo SC y según la clasificación AASHTO como tipo A-2-6 y A-2-7 (Tabla 1), asimismo la resistencia al desgaste del material granular se verificó que son menores al 50% cumpliendo así con el parámetro establecido, como se muestra en la Tabla 2.

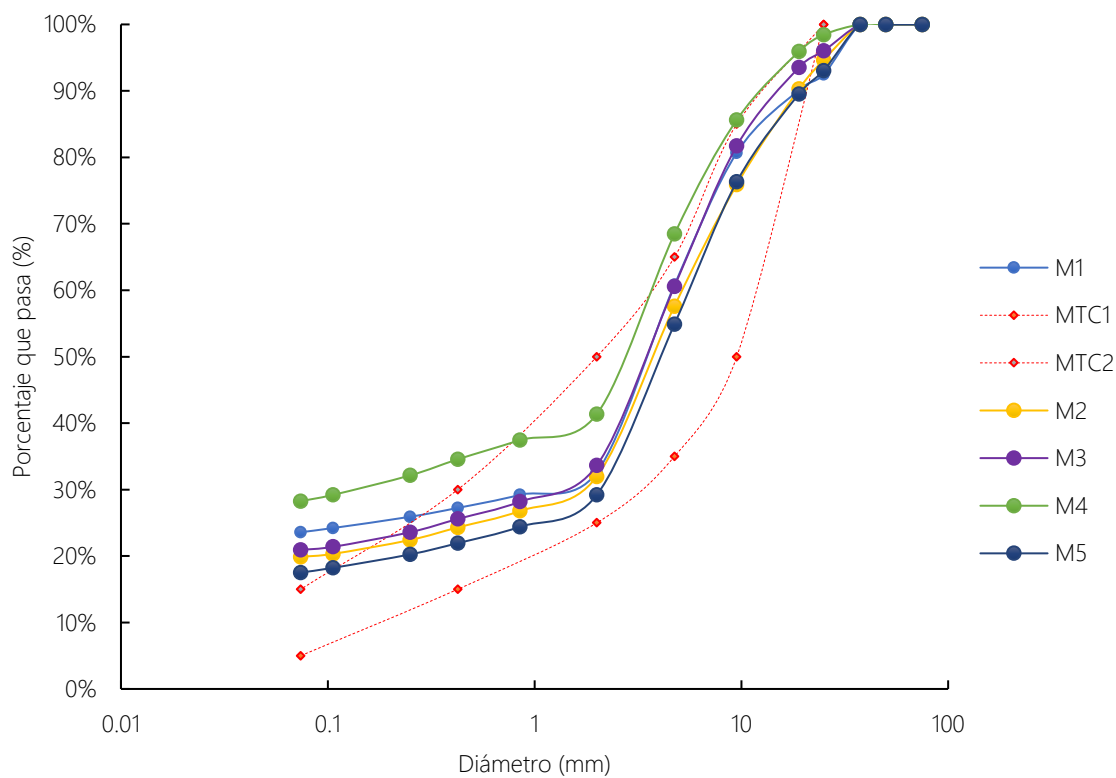


Figura 1. Curva granulométrica de las cinco muestras patrón del material de afirmado de la cantera la Chuica ubicada en Chota, Cajamarca.

Tabla 1. Clasificación de suelos mediante SUCS y AASHTO del material de afirmado de la cantera la Chuica en Chota, Cajamarca.

Muestra	M1	M2	M3	M4	M5
Clasificación SUCS	SC	SC	SC	SC	SC
Clasificación AASHTO	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-6 (0)	A-2-6 (0)	A-2-6 (0)

Tabla 2. Pérdida por abrasión mediante ensayo en la maquina Los Ángeles del material de afirmado de la cantera la Chuica en Chota, Cajamarca.

Muestra	M1	M2	M3	M4	M5
Pérdida por abrasión (%)	26.56	27.00	27.47	26.90	26.64

Nota. Según el MTC (2014), la pérdida por abrasión no debe superar el 50% para afirmados en capas de rodadura.

Entre las propiedades físico-mecánicas que indicaron que es necesario realizar estabilización con cal está el límite líquido, que en promedio se obtuvo el valor de

40.17%, el límite plástico en promedio es de 21.63%, el índice de plasticidad es de 18.50%, la densidad seca máxima en promedio es de 2.20 g/cm³, el contenido

de humedad óptimo en promedio fue de 6.91% y el índice de CBR fue de 25.74%. Estos datos

Este comportamiento se debe a la alta proporción de finos presentes en el material, los cuales aumentan la plasticidad y disminuyen la resistencia al corte y la capacidad de soporte, especialmente bajo condiciones de humedad. Según Ticlla (2021), los suelos de la cantera "La Chuica" presentan una textura arcillosa con presencia significativa de limos, lo que explica los elevados valores en los límites de consistencia y un CBR deficiente. De igual manera, Cieza &

Rodrigo (2024) señalan que los afirmados con altos contenidos de finos, tienden a perder cohesión estructural rápidamente, generando deformaciones superficiales. En este sentido, el bajo CBR reflejado en las muestras patrón es consecuencia directa de un material con baja compacidad, plasticidad elevada y poca resistencia. Por tanto, estos resultados iniciales no solo confirman las condiciones reportadas de la cantera la Chuica, sino que también justifican la aplicación de técnicas de estabilización como la incorporación de cal para mejorar el comportamiento mecánico del afirmado.

Tabla 3. Propiedades físico-mecánicas de las muestras patrón del material de afirmado de la cantera la Chuica en Chota, Cajamarca.

Muestra	M1	M2	M3	M4	M5
Límite líquido	40.73	41.11	40.05	38.73	40.23
Límite plástico	22.78	20.83	21.62	22.21	20.7
Índice de plasticidad	17.95	20.05	18.43	16.52	19.53
Densidad seca máxima	2.196	2.198	2.196	2.195	2.195
Contenido de humedad óptimo	7.44	6.27	6.57	7.59	6.7
CBR (100%)	25.8	26	25.8	26	25.1

Propiedades físico – mecánicas de las muestras adicionando 2% de cal

La adición de cal al 2% al material de afirmado generó una ligera mejora en sus propiedades físico-mecánicas. El límite líquido presentó una leve reducción a 36.56%, entre tanto, el límite plástico aumentó a 24.52%, lo que ocasionó una disminución del índice de plasticidad a

12.08%. Asimismo, la densidad seca máxima alcanzó un promedio de 2.21g/cm³, y el contenido de humedad óptimo se redujo a 6.82%. En cuanto al valor de CBR al 100% de su densidad seca máxima, se observó un incremento significativo, alcanzando un promedio de 30.96% (Tabla 4)

Tabla 4. Propiedades físico-mecánicas de del material de afirmado de la cantera la Chuica con la adición de 2% de cal.

Muestra	M1	M2	M3	M4	M5
Límite líquido	36.94	37.13	36.29	36.86	35.57
Límite plástico	25.2	23.97	24.36	24.1	24.98
Índice plástico	11.74	13.36	11.93	12.76	10.59
Densidad seca máxima	2.209	2.208	2.206	2.204	2.206
Contenido de humedad óptimo	6.85	7.19	6.28	7.26	6.5
CBR (100%)	31	30.7	31.4	30.5	31.2

Propiedades físico – mecánicas de las muestras adicionando 5% de cal

La adición de cal en un 5% al material de afirmado generó mejores resultados en sus propiedades físico-mecánicas. El límite líquido presentó una leve reducción, con un valor promedio de 33.86 %, mientras que el límite plástico se incrementó a 28.21 %, lo que ocasionó una disminución

del índice de plasticidad a 5.65 %. Asimismo, la densidad seca máxima alcanzó un promedio de 2.21g/cm³, y el contenido de humedad óptimo se redujo a 6.72 %. En cuanto al valor de CBR al 100% de su densidad seca máxima, se observó un incremento significativo, alcanzando un promedio de 40.24 % (Tabla 5)

Tabla 5. Propiedades físico-mecánicas de del material de afirmado de la cantera la Chuica con la adición de 5% de cal.

Muestra	M1	M2	M3	M4	M5
Límite líquido	32.77	34.79	32.91	34.81	34.01
Límite plástico	27.3	28.01	27.46	28.92	29.35
Índice de plasticidad	5.47	6.78	5.45	5.89	4.66
Densidad seca máxima	2.211	2.211	2.216	2.211	2.213
Contenido de humedad óptimo	6.48	6.28	6.93	6.85	7.05
CBR (100%)	40.9	40.2	40.1	40	40

Variación de las propiedades físico-mecánicas del material de afirmado al adicionar cal en 2% y 5%

El análisis comparativo de las muestras

tratadas con 2% y 5% de cal evidenció mejoras significativas en las propiedades físico-mecánicas del material de afirmado. En cuanto al límite líquido, la adición cal

indica una pérdida de cohesión y una menor sensibilidad a la humedad, facilitando la compactación del suelo y reduciendo el riesgo de deformaciones. En la investigación la adición de 2% de cal redujo parcialmente los valores, sin embargo, no cumple con todo lo especificado en la normativa del MTC (2014); no obstante, con el 5% de cal todas

las muestras se ubicaron por debajo del umbral del 35%, cumpliendo con el requerimiento técnico del MTC (Figura 2); estos resultados coinciden con lo reportado por García (2023), quien también encontró que la adición del 5% de cal hidratada genera mejoras sustanciales en la plasticidad y clasificación del suelo.

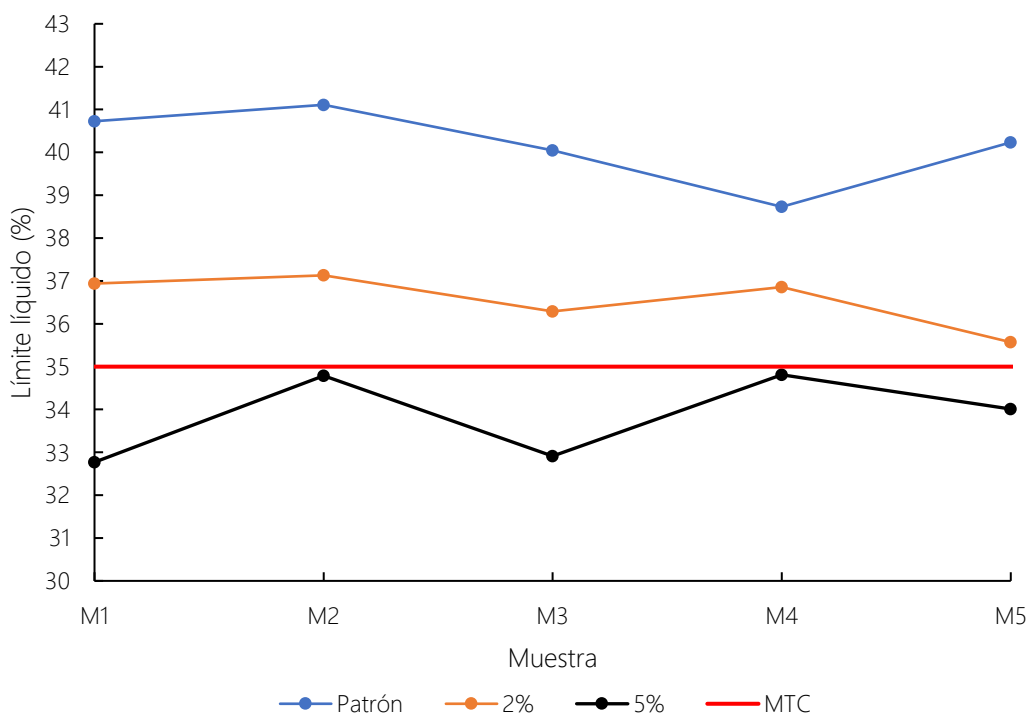


Figura 2. Límite líquido de las cinco muestras de material de afirmado de la cantera la Chuca con la adición de 2% y 5% de cal.

Respecto al índice de plasticidad, los resultados muestran un comportamiento similar determinando mejora de la estabilidad del material al adicionar cal. Con 2% de cal, los valores disminuyeron, pero solo con el 5% todas las muestras se ajustaron al rango normativo de 4% a 9%, lo que refleja una mejora significativa en la plasticidad del material (Figura 3); esto

concuera con lo indicado por Rincón & Sánchez (2019) mostraron una disminución considerable del índice de plasticidad con la adición de cal, logrando incluso que en algunos casos no se pudieran determinar los límites de Atterberg debido a la pérdida total de plasticidad, lo que valida el efecto estabilizador del material.

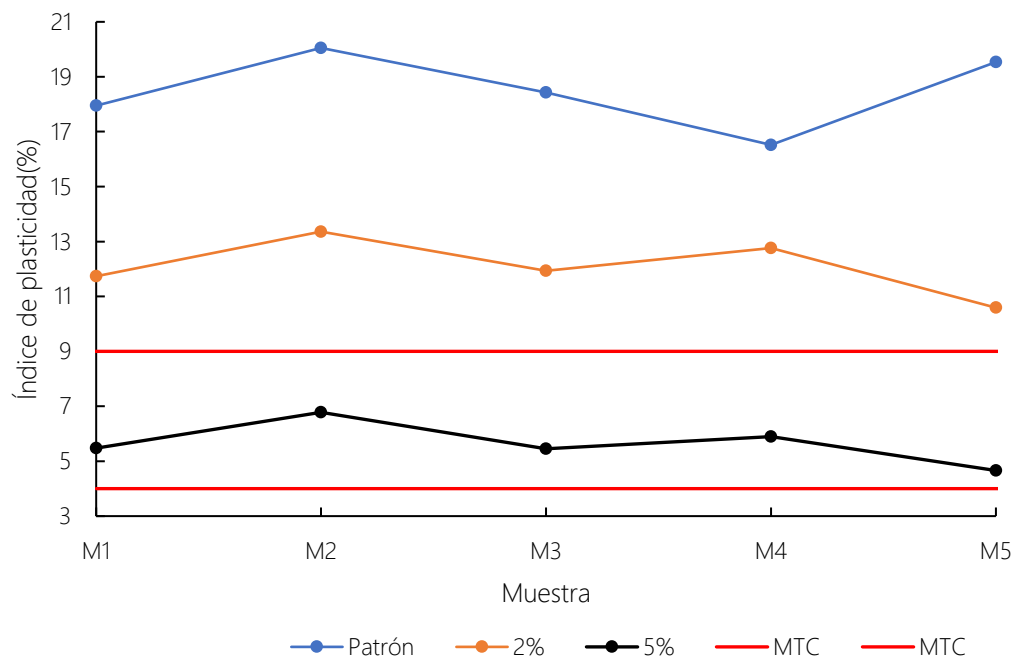


Figura 3. Índice de plasticidad en las muestras de material de afirmado de la cantera la Chuica con la adición de 2% y 5% de cal.

En términos de compactación, se observó un incremento gradual en la densidad seca máxima al aumentar el porcentaje de cal, pasando de un promedio de 2.196 g/cm^3 (muestra patrón) a 2.207 g/cm^3 (2% de cal) y a 2.212 g/cm^3 (5% de cal). Paralelamente, el contenido de humedad óptimo disminuyó levemente con la estabilización, mejorando la capacidad del suelo para alcanzar una mejor compactación con menor humedad. Este comportamiento indica que el material tratado con cal requiere menor cantidad

de agua para alcanzar su máxima densidad y presenta una mejor respuesta frente a la compactación mecánica. Esta mejora puede atribuirse al efecto aglomerante de la cal, que favorece una mejor distribución y acomodación de las partículas del suelo. Barrantes (2019) también identificó incrementos en la compactación mediante estabilización con cal, lo que refuerza la validez técnica de los resultados obtenidos en esta investigación.

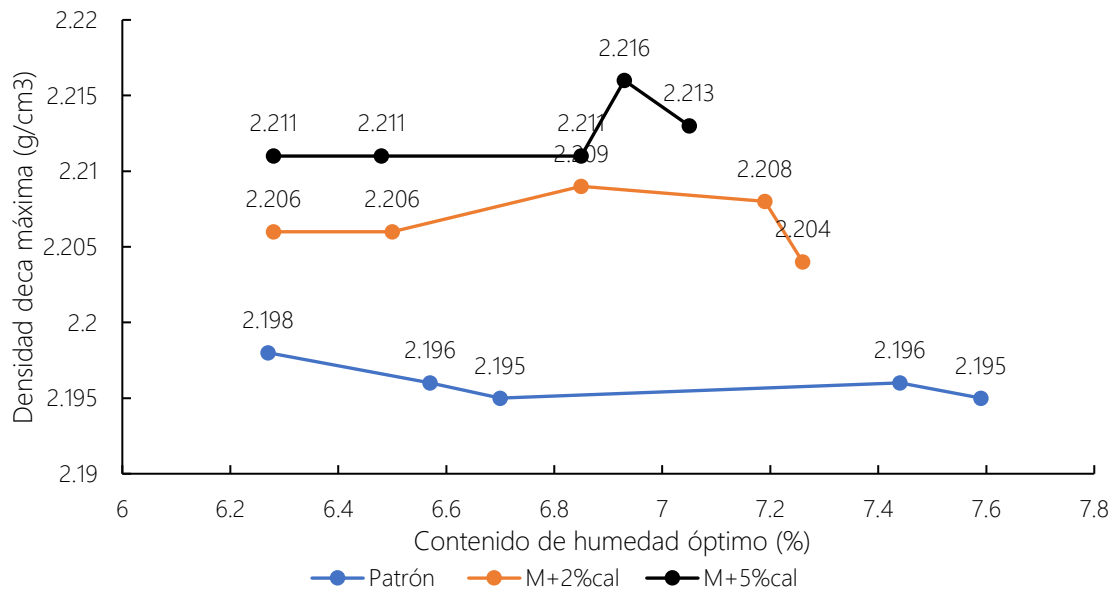


Figura 4. Nivel de compactación del material de afirmado de la cantera la Chuica con la adición de 2% y 5% de cal.

Finalmente, el índice de CBR mostró un incremento progresivo con la adición de cal. Con 2%, los valores mejoraron respecto a la muestra patrón, sin embargo, no alcanzaron el mínimo de 40% exigido por la normativa. En cambio, con 5% de cal, todas las muestras superaron dicho umbral, validando la eficacia del tratamiento en cuanto a la capacidad portante del material. Estas mejoras se atribuyen a la formación de compuestos cementantes producto de la reacción entre la cal y los minerales del

suelo, lo cual contribuye a una matriz más densa y rígida, en consecuencia, el suelo tratado presenta una mayor resistencia frente a las cargas aplicadas. Este resultado coincide con lo reportado por Aguilar (2021), Rincón & Sánchez (2019) y Flores (2021), quienes también evidenció incrementos significativos del CBR al aplicar proporciones similares de cal, demostrando que este aditivo es eficaz para mejorar la capacidad portante del afirmado.

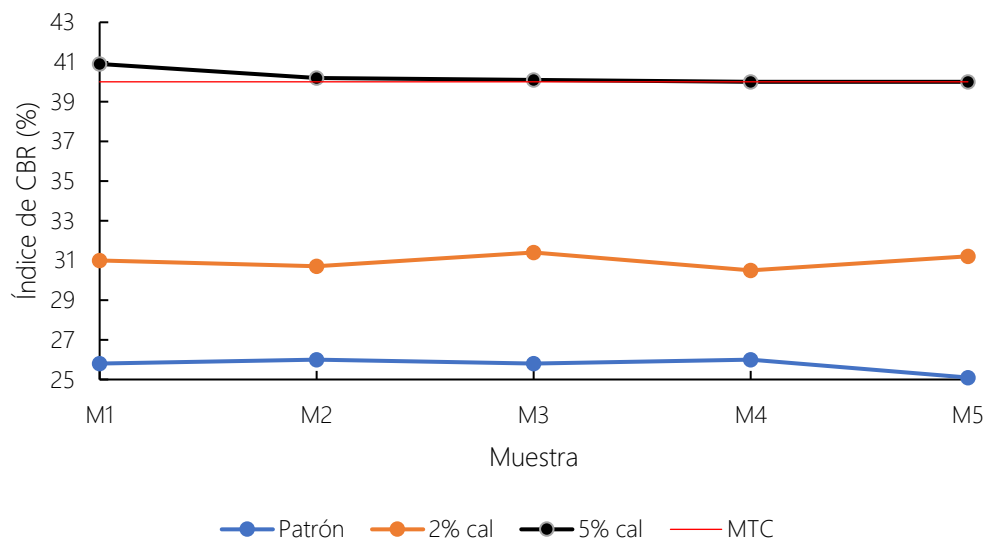


Figura 5. Índice de CBR en las muestras de afirmado de la cantera la Chuica con la adición de 2% y 5% de cal.

En conjunto, los resultados evidencian que el tratamiento con 5% de cal es el más efectivo, ya que permite que todas las propiedades evaluadas cumplan con los parámetros establecidos por el MTC (2014). Este porcentaje de cal mejora significativamente el comportamiento del material, haciéndolo más estable, menos plástico, más resistente y durable, lo que respalda su aplicación en proyectos de infraestructura donde se requieran determinados parámetros de calidad. Por tanto, se consolida como la dosis óptima de estabilización para el material de afirmado de la cantera 'La Chuica'.

Propuesta de mejora y variación de costos

Se propone mejorar el material de afirmado con la adición de un 5% de cal, con el objetivo de cumplir los parámetros establecidos por el MTC (2014). Esta mejora debe realizarse directamente en la cantera, mediante zarandeo y mezclado inmediato, optimizando el transporte y la ejecución en obra. El afirmado natural no cumple con los valores normativos de

límite líquido, plasticidad y CBR; sin embargo, al incorporar cal, se logra un material adecuado para superficies de rodadura.

El costo adicional por el mejoramiento es de S/ 34.77 por m^3 , considerando que la cal actualmente cuesta S/ 340 por tonelada. Esta inversión es justificable, ya que el afirmado tratado cumple con la normativa, mejora el desempeño vial, reduce la frecuencia de mantenimiento y extiende la vida útil del camino, especialmente frente a condiciones climáticas adversas.

Los resultados obtenidos concuerdan con diversos estudios previos que respaldan el uso de cal como estabilizante en suelos con propiedades físico-mecánicas deficientes. Carpio (2020) identificó suelos naturales con alta plasticidad similares a los de la cantera "La Chuica", en tanto, Rincón & Sánchez (2019) y Aguilar (2021) también documentaron la necesidad de estabilización en afirmados con comportamientos inadecuados. García

(2023) demostró que la adición de 5% de cal mejora significativamente el límite líquido, el índice de plasticidad y la clasificación AASHTO, resultados que coinciden con los obtenidos en este estudio. En la misma línea, Rincón & Sánchez (2019) reportaron una disminución extrema en la plasticidad con adiciones de cal, y Aguilar (2021) señaló incrementos significativos en el CBR con proporciones superiores al 5%. Además, Barrantes (2019) destacó mejoras en la compactación mediante estabilización con cal y cemento. Flores (2021) validó que la cal combinada con materiales naturales mejora la resistencia y reduce la plasticidad. Chiclayo (2022) observó mejoras mecánicas incluso con dosis bajas (3%). Estas investigaciones refuerzan la evidencia de que la cal, en proporciones óptimas, es un agente eficaz para estabilizar suelos granulares como los presentes en la cantera "La Chuica".

CONCLUSIONES

El material natural de la cantera La Chuica presenta características que requieren estabilización, ya que su clasificación geotécnica y comportamiento inicial no cumplen con los estándares técnicos exigidos para su uso como afirmado.

La incorporación de cal al 5% mejora significativamente la calidad del material, permitiendo cumplir con los parámetros normativos establecidos para suelos utilizados en vías no pavimentadas, lo que valida su aplicación técnica.

Agradecimientos

Se agradece el valioso apoyo del personal técnico del Laboratorio de Mecánica de Suelos y del Laboratorio de Mecánica de

Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de Chota, quienes colaboraron en la ejecución de los ensayos físicos y mecánicos del material de afirmado. Asimismo, se reconoce la disposición del equipo de campo de la cantera "La Chuica" por facilitar el acceso al material y el acompañamiento durante la recolección de muestras.

Financiamiento

Los autores no recibieron financiamiento o patrocinio para ejecutar el trabajo de investigación.

Conflicto de intereses

No existe ningún tipo de interés con los contenidos del artículo científico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, N. (2021). Utilización de afirmado y cal para el mejoramiento de la superficie de rodadura, carretera vecinal San Andrés—Sapotepampa, Bellavista 2021 [Título profesional, Universidad César Vallejos]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/67713>
- Barrantes, A. (2019). Relación entre el porcentaje de compactación con el método de estabilización mixta—Cal y cemento—Y el porcentaje de compactación del método convencional con afirmado, en la capa base de la carretera vecinal HU 908 – HU 912 del km 4+000 al km 5+700 del centro poblado Tunapuco, Panao, Huánuco 2018 [Título profesional, Universidad de Huánuco]. <http://distancia.udh.edu.pe/handle/123456789/2062?show=full>

- Carpio, H. (2020). Mejoramiento de las propiedades del afirmado de la cantera Tres Piedras adicionando cenizas de bagazo de caña de azúcar y cal hidratada para fines de pavimentación [Título profesional, Universidad San Pedro]. <https://repositorio.usanpedro.edu.pe/items/f32f3240-91ef-4262-86c9-fc3b611c58d5>
- Chiclayo, C. (2022). Influencia de la incorporación de cal en 3%, 6% y residuos de PVC en 2%, 4% en las propiedades del material de cantera para subbase de pavimentos, Cajamarca, 2022 [Título profesional, Universidad Privada del Norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/34970>
- Cieza, D., & Miranda, C. A. (2024). Eficiencia del uso de atrapanieblas en el abastecimiento de agua para centro poblado La Palma en Chota-Cajamarca. REVISTA NOR@NDINA, 7(2), 276-285. <https://doi.org/10.37518/2663-6360X2024v7n2p276>
- Cieza, E., & Rodrigo, G. (2024). Factores que influyen en el deterioro de carreteras sin pavimentar: Una revisión. REVISTA NOR@NDINA, 7(2), 262-275. <https://doi.org/10.37518/2663-6360X2024v7n2p262>
- Flores, S. (2021). Efecto de la cal hidratada y ceniza de hojas ìchu-penca en la resistencia y plasticidad del afirmado carretera Huamachuco-El Capulí [Título profesional, Universidad César Vallejos]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/79582>
- García, E. (2023). Influencia de la adición de cal hidratada sobre la plasticidad, densidad máxima y valor de relación de soporte de califonia (CBR) en la carretera Mostazas-Chocán, provincia de Ayabaca-Piura-2022 [Título profesional, Universidad Privada Antenor Orrego]. <https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/11125>
- MTC. (2014). Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Servicios Gráficos Squadrito EIRL.
- MTC. (2024). Anuario Estadístico 2023. Estadísticas del MTC. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/6778343/5871728-anuario-estadistico-2023.pdf?v=1726086637>
- Rincón, R., & Sánchez, A. (2019). Determinación de las propiedades mecánicas de material proveniente de zonas de extracción en el municipio de Ocaña, para su uso en vías en afirmado, estabilizado con cal hidratada [Título profesional, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña]. <https://repositorioinstitucional.ufps.edu.co/xmlui/handle/20.500.14167/599>
- Ticlla, T. (2021). Evaluación de las Características Geotécnicas del Suelo de las Principales Canteras para Afirmado de Carreteras del Distrito de Chota [Título profesional, Universidad Nacional Autónoma de Chota]. <https://repositorio.unach.edu.pe/handle/20.500.14142/162>

Vizcaíno, P. I., Cedeño, R. J., & Maldonado, I. A. (2023). Metodología de la investigación científica: Guía práctica. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 7(4), 9723-9762.
https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7658

Contribución de autoría

José Jeiner Muñoz Núñez: Concepción y elaboración del manuscrito.

Luis Miguel Bustamante Silva: Concepción y elaboración del manuscrito.

Cristhian Saul López Villanueva: Análisis de datos.

Recibido: 26-06-2025 Aceptado: 7-08-2025 Publicado:8-08-2025