

UNIVERSIDAD SAN PEDRO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE ESTUDIO DE INGENIERÍA CIVIL



**“Resistencia al corte de un suelo adicionando ceniza de cola de caballo
y cal en el A.A.H.H Los Jardines en Nuevo Chimbote – 2024”**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniería Civil

Autora:

Aguirre Gonzales Luci Carolay
(ORCID 0009-0000-1085-3742)

Asesor:

Miguel Solar Jara
(ORCID 0000-0002-8661-418X)

CHIMBOTE – PERÚ

2024

Índice general

Índice general	i
Índice de tablas.....	ii
Palabras clave.....	iii
Constancia de originalidad.....	iv
Título.....	v
Resumen.....	vi
Abstract	vii
Introducción	1
METODOLOGÍA	34
Tipo y diseño de investigación.....	34
Población y muestra	36
Técnicas e instrumentos de investigación	38
Procesamiento y análisis de la información	39
Resultados	43
Análisis y discusión.....	56
Conclusiones y recomendaciones	59
Agradecimientos	61
Referencias bibliográficas.....	62
ANEXO.....	66

Índice de tablas

Tabla 1	Clasificación de Suelos según tamaño de partículas	10
Tabla 2	Clasificación de Suelos según Índice de Plasticidad	11
Tabla 3	Porcentajes de cal	23
Tabla 4	Categorías de subrasante	28
Tabla 5	Composición elemental de ceniza de cola de caballo y la cal en % de la masa total	45
Tabla 6	Resultados del Ensayo Proctor modificado, en relación a la densidad seca y el contenido de humedad óptimo del sueño patrón y los suelos experimentales.	47
Tabla 7	Ensayo de CBR en relación a la resistencia y capacidad de carga del suelo patrón y los suelos experimentales.	49
Tabla 8	Resistencia al corte del suelo natural y del suelo con la adición de ceniza de cola de caballo en proporciones del 3% y 4%, y cal.	50
Tabla 9	Resistencia al corte de un suelo al adicionar ceniza de cola de caballo y cal en proporciones específicas (3% CCC + 9% Cal y 4% CCC + 12% Cal)	52
Tabla 10	Prueba de normalidad de Shapiro – Wilk	54
Tabla 11	Prueba de ANOVA de un factor	55
Tabla 12	Prueba Poct Hoc de Tukey	55

Palabras clave

Tema	Estabilización en la Sub Rasante
Especialidad	Transporte

Líneas de investigación

Área	Transporte
Sub área	Ingeniería Civil
Disciplina	Ingeniería Civil
Líneas de investigación	Ingeniería Civil

Constancia de originalidad



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

El que suscribe, Vicerrector de Investigación de la Universidad San Pedro:

HACE CONSTAR

Que, de la revisión del trabajo titulado "Resistencia al corte de un suelo adicionando ceniza de cola de caballo y cal en el A.A.H.H Los Jardines en Nuevo Chimbote - 2024" del (a) estudiante: **AGUIRRE GONZALES LUCI CAROLAY**, identificado(a) con Código N° **1112000096**, se ha verificado un porcentaje de similitud del **24%**, el cual se encuentra dentro del parámetro establecido por la Universidad San Pedro mediante resolución de Consejo Universitario N° 5037-2019-USP/CU para la obtención de grados y títulos académicos de pre y posgrado, así como proyectos de investigación anual Docente.

Se expide la presente constancia para los fines pertinentes.

Chimbote, 11 de agosto de 2025

UNIVERSIDAD SAN PEDRO
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

Dr. JAVIER MARTÍNEZ CARRIÓN
Vicerrector



NOTA: Este documento carece de valor si no tiene adjunta el reporte del Software TURNITIN.

Título

“Resistencia al corte de un suelo adicionando ceniza de cola de caballo y cal en el
A.A.H.H Los Jardines en Nuevo Chimbote – 2024”

Resumen

En la investigación se planteó como objetivo determinar la resistencia al corte de la subrasante de un suelo con características arenosas o arcillosas, mediante la adición parcial de ceniza de cola de caballo y cal. El estudio se desarrolló en un tramo específico de la carretera del Asentamiento Humano Los Jardines, en Nuevo Chimbote. Este proyecto propuso una alternativa innovadora para la estabilización de suelos, lo que contribuyó principalmente a la reducción de costos asociados al transporte de materiales de préstamo. La metodología adoptada correspondió a un enfoque experimental. Las muestras fueron tratadas con ceniza de cola de caballo y cal, preparadas a través de procesos artesanales de lavado, secado y combustión, y posteriormente activadas técnicamente utilizando una mufla. Se encontró como resultados que la temperatura óptima de calcinación de la ceniza de cola de caballo es de 400°C a 600°C, asegurando su estabilidad mineral. Su composición química mostró 37.08% de SiO₂ y 12.02% de CaO, mientras que la cal presentó 85% de CaO y 92% de CaCO₃. La adición de 4% de ceniza y 12% de cal mejoró la compactación del suelo, aumentando la densidad seca (1.576 g/cm³) y la humedad óptima (9.7%), además de incrementar el CBR de 15.1% a 44.1% y la resistencia al corte, con una cohesión de 45 kPa y un ángulo de fricción de 35°. Se concluyó que esta proporción de estabilizantes es la más efectiva para mejorar las propiedades mecánicas del suelo.

Abstract

The objective of this research was to determine the shear strength of the subgrade of a sandy or clayey soil by partially adding horsetail ash and lime. The study was conducted on a specific section of the road in the Los Jardines Human Settlement, in Nuevo Chimbote. This project proposed an innovative alternative for soil stabilization, which primarily contributed to reducing costs associated with the transportation of borrowed materials. The methodology adopted was experimental. The samples were treated with horsetail ash and lime, prepared through artisanal washing, drying, and combustion processes, and subsequently technically activated using a muffle furnace. The results showed that the optimal calcination temperature for horsetail ash is 400°C to 600°C, ensuring its mineral stability. Its chemical composition showed 37.08% SiO₂ and 12.02% CaO, while lime presented 85% CaO and 92% CaCO₃. The addition of 4% ash and 12% lime improved soil compaction, increasing dry density (1.576 g/cm³) and optimal moisture content (9.7%), in addition to increasing the CBR from 15.1% to 44.1% and shear strength, with a cohesion of 45 kPa and a friction angle of 35°. It was concluded that this proportion of stabilizers is the most effective in improving the mechanical properties of the soil.

Introducción

En las últimas décadas, el crecimiento urbano acelerado ha generado un aumento en la demanda de terrenos para la construcción, muchas veces en zonas donde las condiciones del suelo no son óptimas para soportar estructuras de manera segura. Este es el caso del Asentamiento Humano Los Jardines, en Nuevo Chimbote, donde se han identificado suelos con baja cohesión y resistencia al corte, lo que representa un desafío para el desarrollo de infraestructuras. La inestabilidad del terreno puede derivar en asentamientos diferenciales, grietas en edificaciones y fallas estructurales que comprometen la seguridad de los habitantes y generan costos adicionales en mantenimiento y refuerzo de construcciones.

Los métodos tradicionales para mejorar la estabilidad del suelo, como el uso de cementos especiales y otros aditivos industriales, suelen ser costosos y poco accesibles para comunidades en desarrollo. Por ello, la búsqueda de alternativas económicas y sostenibles ha cobrado relevancia en la ingeniería geotécnica. Entre estas opciones, la estabilización con cal es una de las técnicas más utilizadas, debido a su capacidad para reducir la plasticidad del suelo y aumentar su resistencia mecánica. Sin embargo, el uso de residuos orgánicos con propiedades minerales, como la ceniza de cola de caballo (*Equisetum arvense*), representa una propuesta innovadora que podría mejorar aún más las características del suelo y reducir el impacto ambiental de los procesos constructivos.

La ceniza de cola de caballo es un material que, tras ser sometido a calcinación, libera compuestos como sílice y alúmina, los cuales pueden reaccionar con la cal y los minerales del suelo para mejorar su compactación y resistencia. Su incorporación en mezclas con cal podría representar una solución eficiente y sostenible para la estabilización de suelos en zonas con baja resistencia al corte. No obstante, aún existen pocos estudios sobre la efectividad de este material en combinación con cal para mejorar las propiedades mecánicas del suelo, por lo que es necesario evaluar su desempeño en escenarios reales.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo determinar el efecto de la adición de ceniza de cola de caballo y cal en diferentes proporciones sobre la resistencia al corte del suelo en el A.A.H. Los Jardines. Se busca analizar su impacto en la compactación, cohesión y capacidad de carga del terreno, comparando los resultados obtenidos con los de un suelo natural sin aditivos. Con ello, se espera generar evidencia que permita proponer una alternativa accesible y ambientalmente responsable para la mejora de suelos en comunidades con condiciones similares, contribuyendo así a la optimización de procesos constructivos y la reducción de riesgos estructurales.

García (2022) realiza un análisis técnico sobre la estabilización de suelos con cal, presentándola como una alternativa eficiente y sostenible para la construcción y rehabilitación de vías terciarias y caminos rurales en Colombia. Este estudio, aborda las ventajas técnicas, económicas, ambientales y sociales de emplear cal como estabilizante químico para optimizar características subrasantes presentes en el lugar. El documento evalúa el uso de diferentes proporciones de cal, específicamente 2%, 4%, 6%, 8% y 10%, aplicadas a suelos arcillosos, demostrando que estas adiciones generan una mejora importante en las características del suelo. Se muestra una mejora en el índice CBR, optimizando así la capacidad de soporte y la calidad de la subrasante, tanto para pavimentos rígidos como flexibles. El autor concluye que incluso con adiciones mínimas de cal, el suelo experimenta una mejora sustancial en su estabilidad, facilitando procesos constructivos como la compactación y la extensión.

Pinzón (2020) desarrolla un proyecto enfocado en la estabilización de materiales granulares remanentes (MGR) con la adición de cal viva en vías urbanas de Bogotá, D.C. En la primera fase, se llevó a cabo un análisis de factibilidad, definiendo las condiciones generales del proyecto, incluyendo el objeto de estudio, alcance, metodología y roles de los participantes. En la segunda fase, se validó la tecnología de estabilización mediante ensayos de laboratorio y la ejecución de un tramo de prueba. Este tramo consistió en la construcción de dos estructuras de pavimento: la primera utilizando materiales nuevos convencionales y la segunda incorporando MGR estabilizados con un 3% de cal viva.

Durante esta etapa, se realizaron verificaciones adicionales mediante pruebas de laboratorio en muestras extraídas del campo. Los resultados obtenidos hasta la segunda fase demostraron que la tecnología de estabilización con cal viva mejoró las propiedades del MGR, reduciendo su plasticidad y aumentando su resistencia. Además, el uso de esta tecnología evidenció una reducción en los costos iniciales y una optimización en los tiempos de intervención, posicionándola como una alternativa eficiente y sostenible para la rehabilitación de vías urbanas.

Rezabala y Ortiz (2023) presentan un estudio enfocado en la estabilización de subrasantes con la incorporación de cemento y la cal, aplicado a suelos arcillosos clasificados como A-7-5 según el sistema AASHTO. El estudio se enfocó en analizar los impactos de la estabilización utilizando porcentajes del 1% y 3%, considerando como variables principales el índice CBR tras inmersión y la mayor densidad alcanzable. Se aplicó un diseño experimental que incluyó la extracción de suelos a través de calicatas y la ejecución de pruebas de laboratorio (LL y LP), contenido de humedad natural, entre otros. Se encontró que la aplicación de un 1% de aditivos cementantes generó una mejora restringida en las características mecánicas del suelo. Sin embargo, el porcentaje del 3% incrementó la resistencia del suelo en más de cinco veces en comparación con el suelo original, permitiendo clasificar la subrasante como regular. Este hallazgo posiciona el 3% como el porcentaje más adecuado para estabilizar suelos arcillosos con agentes cementantes, debido a su capacidad para mejorar las características del suelo, destacando su aplicabilidad para infraestructuras viales en suelos con características similares.

Zambrano y Zambrano (2023) desarrollaron un estudio enfocado en la estabilización de suelos como método para mejorar las propiedades y características de suelos naturales no cohesivos mediante la incorporación de aditivos. La finalidad del estudio fue identificar el porcentaje óptimo de cal y cemento para estabilizar la subrasante de un suelo. A nivel metodológico fue experimental de tipo deductivo. Se identificó que la adición de un 2% de cal mejora significativamente las características del suelo estudiado, reduciendo el índice de plasticidad del material desde un 22.21% en estado

natural a un 8.16% en estado estabilizado. Este cambio también se tradujo en un aumento de la resistencia del suelo, haciéndolo más adecuado para soportar cargas y mejorar el desempeño de la subrasante. La investigación destaca que el tratamiento químico con cal y cemento no solo incrementa las características mecánicas del suelo, sino que también mejora su habilidad para soportar deformaciones.

A nivel Nacional

Hurtado y Ricra (2020) desarrollaron un estudio enfocado en la aplicación de cal como técnica para incrementar la estabilidad de la subrasante en la calle Wiracocha, ubicada en el distrito y provincia de Andahuaylas. La investigación se planteó como de tipo aplicativo, con un diseño experimental. Los porcentajes de cal utilizados fueron del 4%, 6% y 8%, evaluando su impacto en las propiedades mecánicas del suelo. Los resultados mostraron que, aunque el uso de cal al 8% respecto al peso del suelo no mejoró significativamente la plasticidad de la subrasante, sí contribuyó a optimizar el contenido de humedad. Además, este porcentaje demostró ser el más adecuado para incrementar la capacidad portante del suelo, logrando un progreso notable en las características de la subrasante estabilizada. En conclusión, la investigación confirma que la aplicación de cal, en porcentajes adecuados, es una técnica eficiente para mejorar la capacidad portante del suelo, a pesar de no generar cambios sustanciales en la plasticidad.

Vargas, Ore y Paz (2022) realizaron un estudio para evaluar las características mecánicas del mortero utilizando muros portantes adhiriendo ceniza de cola de caballo y hojas de espino. utilizado en muros portantes mediante la incorporación de ceniza de cola de caballo (CCC) y hojas de espino. La investigación evaluó las dosificaciones de 5%, 7%, 9% y 11%. La metodología fue de tipo aplicada, con un diseño experimental. Los resultados indicaron que las dosificaciones del 7% y 9% generaron los mayores incrementos en la resistencia. Para probetas cúbicas de mortero, la resistencia aumentó de 217.6 kg/cm² a 240 kg/cm² y 243.5 kg/cm² respectivamente. En las pilas de ladrillo, al 7% se registró un incremento de 67.8 kg/cm² a 86.8 kg/cm², mientras que al 9% se alcanzó un valor de 83.6 kg/cm². Estos resultados reflejan unas mejoras en las características del

mortero, posicionándolo como una alternativa eficaz para reforzar muros portantes en construcciones.

Velásquez (2021) desarrolló un estudio enfocado en la estabilización de suelos arcillosos de subrasante mediante la incorporación de cal y cloruro de sodio, aplicado en la carretera Titilaca – Santa Rosa, Puno. La investigación utilizó el método científico con un diseño cuasi-experimental, analizando la efectividad de mejorar el suelo a través de la incorporación de 1% de cal y 3% de cloruro de sodio. Los ensayos realizados mostraron que esta combinación incrementó la habilidad del suelo para soportar cargas, alcanzando un valor de CBR del 16%. En conclusión, los resultados demostraron que la incorporación de cal y cloruro de sodio mejora considerablemente la capacidad de soporte de la subrasante.

Enrique y Montes (2022) desarrollaron un estudio centrado en la estabilización de suelos arcillosos mediante la incorporación de residuos de concha de mejillón (RCM) y cal viva, aplicado en el sector vial de Paria-Recrish, Áncash. La investigación fue aplicada, y de diseño experimental, evaluando la eficacia de diferentes porcentajes de residuos de concha de mejillón (18%) y cal viva (4% y 6%). Los resultados evidenciaron que la incorporación de un 18% de residuos de concha de mejillón y un 6% de cal viva logró una estabilización eficiente del suelo arcilloso, alcanzando un valor óptimo de CBR al 95%. Esta mejora significativa en la capacidad portante posiciona a esta técnica como una práctica eficiente para la estabilización de suelos en infraestructuras viales.

Huamallyalli y Méndez (2020) desarrollaron un estudio orientado al diseño de pavimentos tras estabilizar la subrasante con cal de construcción y cemento tipo I en el asentamiento humano Ampliación La Unión, Chimbote. La investigación fue aplicada, y diseño experimental. Se evaluaron porcentajes de cal y cemento en proporciones de 2%, 5% y 8%, con el propósito de determinar la dosificación más efectiva para incrementar el CBR. Los resultados concluyeron que la adición del 8% de cal fue la más adecuada para estabilizar la subrasante, logrando un incremento significativo en el CBR. Esto permitió obtener una subrasante con las condiciones necesarias para un diseño óptimo de

pavimento flexible, posicionando esta proporción como la mejor alternativa para proyectos viales en el contexto estudiado.

Ludeña (2020) realizó un estudio sobre la resistencia del concreto al sustituir parcialmente el cemento con ceniza de cola de caballo (CCC), evaluando su comportamiento mecánico bajo diferentes proporciones. La metodología empleada fue de tipo aplicada con diseño experimental, dividiendo la investigación en dos grupos: uno con un 5% y otro con un 10% de sustitución de cemento por CCC. Ambas muestras fueron sometidas a pruebas de compresión tras un curado de 28 días. Los resultados concluyeron que el grupo con un 5% de sustitución de CCC presentó una resistencia óptima de 210.87 kg/cm², mientras que el grupo con un 10% mostró una resistencia de 200.40 kg/cm², lo que indica que un menor porcentaje de adición de CCC genera una mayor resistencia a la compresión. Esto sugiere que el 5% es la proporción más adecuada para mejorar las propiedades mecánicas del concreto sin comprometer su desempeño estructural.

En relación a la fundamentación científica, esta se definirá de la siguiente manera, los suelos, se definen como materiales compuestos por partículas minerales, que forman la capa superficial de la corteza terrestre. Su clasificación depende de diversos factores, como su composición, textura y propiedades físicas, químicas y mecánicas. Los suelos son estudiados en función de su capacidad para soportar cargas estructurales y su comportamiento bajo parámetros definidos de contenido de humedad y nivel de compactación. Según Bowles (1984), los suelos representan un material fundamental para la construcción, ya que sus propiedades determinan la firmeza y resistencia de las construcciones levantadas sobre estos.

Estas presentan diversas características que influyen en su comportamiento y funcionalidad. Entre las propiedades físicas, destacan la textura, que describe la distribución de partículas como arena y arcilla; la estructura, que se refiere a la organización de estas partículas en agregados; la densidad volumétrica, entendida como la relación entre masa del suelo y su volumen total, que mide el volumen de espacios

vacíos, aspectos que afectan la retención y drenaje de agua, así como la facilidad para ser trabajado (Das & Sobhan, 2020).

En cuanto a las propiedades químicas, el pH determina la alcalinidad, influenciando la accesibilidad de nutrientes, mientras que la facultad de intercambio catiónico (CIC) refleja la capacidad del suelo para almacenar cationes esenciales. Además, la materia orgánica mejora la estructura, incrementa la retención hídrica y aporta nutrientes esenciales (Smith et al., 2021).

Las propiedades mecánicas, como la resistencia al deslizamiento y la capacidad portante, son cruciales en ingeniería civil. La resistencia al corte define la habilidad para soportar fuerzas deslizantes, la capacidad de carga es la máxima carga admisible sin fallos, y la compresibilidad mide el grado de compactación bajo una carga aplicada, determinando la firmeza de las edificaciones asentadas sobre el suelo (Craig & Craig, 2021).

Comprender estas características es vital para la gestión adecuada del suelo en actividades de construcción, optimizando su uso y asegurando la sostenibilidad de ecosistemas e infraestructuras (Das & Sobhan, 2020; Smith et al., 2021; Craig & Craig, 2021).

En relación a la resistencia se define como la habilidad de un material para resistir cargas o tensiones aplicadas sin sufrir deformaciones permanentes o fallos estructurales. En el contexto de la mecánica de materiales, esta propiedad se evalúa en función de diferentes tipos de esfuerzos, como tracción, compresión, flexión o corte, y se evalúa habitualmente en función de tensión (fuerza por unidad de área). Según Ugural y Fenster (2020), la resistencia es un parámetro crítico en la planificación y evaluación de sistemas estructurales, ya que garantiza la seguridad y funcionalidad de los componentes bajo condiciones específicas de carga.

La resistencia, como propiedad fundamental de los materiales, presenta diversas características que determinan su comportamiento frente a fuerzas externas. Algunas de estas características incluyen:

Límite elástico: Define la máxima tensión que un material es capaz de resistir sin experimentar deformaciones irreversibles.

Resistencia última: Representa la tensión máxima que un material puede soportar antes de romperse. Este valor es crucial para evaluar la seguridad estructural.

Tenacidad: Indica la capacidad del material para absorber energía antes de fallar.

Ductilidad: Hace referencia a la habilidad del material para experimentales deformaciones permanentes sin fracturarse., característica común en metales como el acero.

Fragilidad: Propiedad opuesta a la ductilidad, asociada con materiales que fallan bruscamente sin experimentar deformación plástica significativa, como el vidrio.

Resistencia al corte: Específica para analizar fuerzas que actúan paralelas a la superficie del material, evaluando su capacidad para resistir deslizamientos internos.

Fatiga: Describe la resistencia del material a fallos cuando está sometido a cargas cíclicas o repetitivas durante un periodo prolongado.

Resiliencia: Representa la capacidad del material para absorber y liberar energía elásticamente sin sufrir daño permanente.

Cada una de estas permiten seleccionar materiales adecuados para soportar diferentes tipos de cargas y condiciones de servicio (Callister & Rethwisch, 2021).

Una vez identificadas y comprendidas las principales de los suelos, así como su clasificación en función de parámetros físicos y texturales, resulta esencial establecer y aplicar procedimientos científicos estandarizados. Estos procedimientos permiten un

análisis detallado de los suelos en relación con sus propiedades inherentes, asegurando la uniformidad y reproducibilidad de los resultados.

La estandarización de estos procedimientos, respaldada por normativas internacionales como las de la ASTM (American Society for Testing and Materials) y las especificaciones locales, es crucial para garantizar resultados consistentes. Esto no solo permite comparar datos entre diferentes estudios, sino también diseñar soluciones específicas para el mejoramiento y estabilización de los suelos en función de sus aplicaciones, ya sea en la construcción de pavimentos, cimentaciones o estructuras geotécnicas más complejas (Craig & Craig, 2021).

Por otra parte, los ensayos de suelos son procedimientos técnicos y científicos diseñados para evaluar las propiedades del suelo. Los principales ensayos se agrupan según el tipo de propiedad que evalúan:

Los resultados de estos ensayos permitirán categorizar los suelos y anticipar su desempeño en condiciones específicas, facilitando el diseño de soluciones adaptadas a las características del terreno. Además, los procedimientos estandarizados, como los establecidos por la ASTM y las normas ISO, garantizan la fiabilidad y consistencia de los datos obtenidos (Smith et al., 2021).

Respecto a los procedimientos, se llevará a cabo el proceso de granulometría, el cual es un procedimiento esencial en la caracterización de suelos, ya que permite determinar el reparto de los diversos tamaños de partículas presentes en una muestra. Este análisis es importante para categorizar los suelos según su textura y estructura, lo que resulta crucial para evaluar su comportamiento mecánico e hidráulico. Según Das y Sobhan (2020), este ensayo proporciona información clave sobre propiedades como la permeabilidad, la compactación y la estabilidad del suelo, aspectos que influyen directamente en el diseño y desempeño de estructuras.

Existen dos métodos principales para realizar el análisis granulométrico. El primero es el tamizado, utilizado para partículas mayores de 0.075 mm, como arena y

grava. Este método emplea un conjunto de mallas con aperturas definidas utilizadas para dividir y categorizar las partículas según su tamaño. Por otro lado, el análisis por sedimentación, comúnmente conocido como ensayo de hidrómetro, evalúa partículas más finas, como limo y arcilla, midiendo su velocidad de sedimentación en un líquido, de acuerdo con la Ley de Stokes (Das & Sobhan, 2020).

La tabla clasifica los materiales del suelo de acuerdo con la dimensión de sus partículas, proporcionando un rango específico para cada categoría.

Tabla 1

Clasificación de Suelos según tamaño de partículas

Material	Tamaño de las partículas
Grava	75mm – 4.75mm
	Arena gruesa: 4.75mm – 2.00mm
Arena	Arena media: 2.00mm – 0.425mm
	Arena fina: 0.425mm – 0.075mm
Material Fino	Limo 0.075 mm – 0.005 mm
	Arcilla Menor a 0.005 mm

Fuente: Manual de Carreteras, MTC. (2013). Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimento

Los límites de Atterberg son indicadores fundamentales en la caracterización de suelos finos (limo y arcilla) que describen su comportamiento en función del contenido de humedad. Según Das y Sobhan (2020), estos límites permiten identificar las transiciones entre los estados sólido, semisólido, plástico y líquido de un suelo.

Algunos límites principales de Atterberg:

El límite líquido (LL), se considera la cantidad de agua presente en el suelo en la que este transiciona del estado plástico al estado líquido. En este punto, el suelo tiene una consistencia blanda y se deforma sin resistencia al corte.

También el límite plástico, representa la proporción de humedad en el suelo que determina el cambio del estado semisólido al estado plástico. En este estado, el suelo puede moldearse sin desmoronarse.

El índice de plasticidad, es el rango de contenido de humedad comprendido entre el límite líquido y el límite plástico ($IP = LL - LP$). Este índice indica la plasticidad del suelo; valores mayores reflejan suelos más cohesivos y deformables.

En este contexto, el suelo se puede categorizar según su valor de índice de plasticidad (IP), considerando los siguientes criterios:

Tabla 2

Clasificación de Suelos según Índice de Plasticidad

Índice de Plasticidad	Plasticidad	Característica
IP > 20	Alta	Suelos muy arcillosos
IP ≤ 20	Media	Suelos arcillosos
IP > 7		
IP < 7	Baja	Suelos poco arcillosos plasticidad
IP = 0	No Plástico (NP)	Suelos exentos de arcilla

Fuente: *Manual de Carreteras, MTC. (2013). Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos.*

Es fundamental tener en cuenta que la cantidad de arcilla presente en un suelo, según su porcentaje, puede representar un factor de riesgo significativo en su aplicación. Este riesgo se atribuye principalmente a la alta sensibilidad de la arcilla al agua, lo que puede generar cambios en sus propiedades mecánicas y afectar la estabilidad de la infraestructura.

Humedad Natural, es una propiedad física fundamental del suelo que se refiere al contenido de agua presente en una muestra en su estado original, tal como se encuentra en el terreno. Este valor varía según los factores climáticos, la clase de suelo y su habilidad para almacenar agua. La humedad natural afecta directamente las propiedades mecánicas del suelo, lo que la convierte en un parámetro crucial para proyectos de ingeniería civil y geotécnica (Das & Sobhan, 2020).

La humedad natural se determina mediante un procedimiento estandarizado, generalmente descrito por normativas como la ASTM D2216. El método más común consiste en:

Obtención de la muestra: Se obtiene una porción del suelo, asegurándose de preservarla en su estado natural para evitar pérdida de humedad.

Pesado inicial: Se pesa inmediatamente después de su extracción para registrar su peso húmedo.

Secado: Se introduce en un horno a una temperatura de 105°C a 110°C durante un periodo de 24 horas, o hasta alcanzar un peso constante. Este proceso elimina completamente el contenido de agua.

Pesado final: Una vez seca, se vuelve a pesar para determinar su peso en estado seco.

Cálculo de la humedad natural: Se calcula mediante la fórmula:

$$\text{Humedad natural}(\%) = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \times 100$$

Estabilización de Suelos, es un método que optimiza las características físicas y mecánicas del terreno mediante técnicas mecánicas o la adición de agentes químicos, naturales o sintéticos. Este proceso busca obtener un suelo sólido y estable, adecuado para

resistir cargas de tránsito y condiciones climáticas extremas (Rivera Martínez y Gómez, 2020).

Existen diferentes métodos de estabilización de suelos, entre los cuales se destacan:

Estabilización mecánica: Consiste en la compactación del suelo. Este procedimiento puede implicar la combinación de suelos con distintas granulometrías para lograr una composición óptima (Rivera et al., 2020).

Estabilización química: Involucra la adición de agentes estabilizantes, como cal, cemento o polímeros, que reaccionan con los componentes del suelo para mejorar sus propiedades. Por ejemplo, la cal puede reducir la plasticidad y aumentar la resistencia del suelo, mientras que los polímeros pueden mejorar la cohesión y disminuir la permeabilidad (Pradena et al., 2010).

Tipo de Estabilización, se clasifican según los métodos y materiales empleados para mejorar sus propiedades físico-mecánicas y químicas. Según Rivera et al. (2020) y Pradena, Mery y Novoa (2010), los principales métodos de estabilización incluyen técnicas mecánicas, químicas, con geosintéticos, térmicas y biológicas.

La estabilización mecánica implica alterar las características físicas del suelo mediante técnicas como la compactación o la combinación de suelos con distintas propiedades. La compactación incrementa la concentración del suelo, disminuye su porosidad y mejora su capacidad de carga y resistencia. Por otro lado, la mezcla de suelos de granulometrías diversas permite obtener una composición más estable y adecuada para aplicaciones específicas, como pavimentos o cimentaciones.

La estabilización química refiere a la incorporación de agentes estabilizantes que reaccionan con los componentes minerales del suelo para optimizar sus características. Entre los más utilizados se encuentra la cal, que disminuye la plasticidad y mejora la resistencia, especialmente en suelos arcillosos. El cemento, por su parte, incrementa la

rigidez y resistencia a la compresión, mientras que los polímeros mejoran la cohesión y reducen la permeabilidad.

Otra técnica común es la estabilización por geosintéticos, que emplea materiales sintéticos como geotextiles, geomallas y geoceldas para reforzar el suelo y mejorar su comportamiento estructural. Este método es particularmente útil en terrenos inestables o con baja capacidad portante.

Cada tipo de estabilización tiene aplicaciones específicas y ventajas particulares, lo que permite adaptarlos a las necesidades de cada proyecto. La combinación de técnicas también puede ser una estrategia eficaz para lograr suelos más estables y funcionales (Pradena et al., 2010; Rivera et al., 2020).

Pavimentos, se considera como una estructura construida sobre la superficie del suelo, con la finalidad de resistir y repartir las cargas producidas por el tráfico vehicular o peatonal hacia la subrasante de manera uniforme. Esta estructura debe brindar una superficie de circulación estable y confiable, capaz de resistir tanto las cargas dinámicas como las condiciones ambientales a lo largo del tiempo (Huang, 2021).

Entre las características principales de los pavimentos se encuentra su capacidad estructural, que les permite soportar y distribuir las cargas sin deformaciones excesivas ni fallos estructurales. Asimismo, la resistencia al desgaste es esencial, ya que garantiza que la superficie soporte la abrasión causada por el tránsito constante y las inclemencias climáticas. Otra característica clave es la impermeabilidad, que minimiza la infiltración de agua y protege tanto las capas internas del pavimento como la subrasante. Además, la durabilidad asegura que el pavimento mantenga su funcionalidad y estructura durante su vida útil prevista.

La textura superficial de los pavimentos también juega un rol importante, al proporcionar una adherencia adecuada entre los neumáticos y la superficie, lo que mejora la seguridad, especialmente en condiciones de lluvia. Dependiendo de los materiales y el diseño, los pavimentos pueden clasificarse como flexibles o rígidos. Los pavimentos

flexibles, como los de asfalto, se adaptan a las deformaciones del terreno, mientras que los rígidos, hechos de concreto hidráulico, ofrecen mayor resistencia a cargas concentradas, pero tienen un costo inicial más alto (Yoder & Witczak, 2015).

Finalmente, los pavimentos se dividen en tres tipos principales: los flexibles, que están compuestos por capas granulares y mezclas asfálticas y requieren mayor mantenimiento; los rígidos, contruidos con concreto hidráulico y caracterizados por su durabilidad y resistencia; y los semirrígidos, que combinan bases estabilizadas con capas de rodadura flexible. El diseño adecuado de los pavimentos es importante para asegurar el rendimiento y la estabilidad del tránsito en infraestructuras viales y urbanas (Huang, 2021; Yoder & Witczak, 2015).

Figura 1

Estructura de pavimento flexible



Fuente: Autor

Figura 2

Estructura de pavimento rígido



Fuente: Autor

Componentes de un Pavimento, un pavimento se compone de varias capas, cada una con funciones específicas para distribuir las cargas del tránsito y proteger el suelo natural. Los principales componentes la capa superficie, la base y la subrasante, los cuales trabajan en conjunto para asegurar la resistencia a largo plazo de la construcción (Huang, 2021).

Capa de rodadura, la capa de rodadura es la parte superior del pavimento y está en contacto directo con el tránsito vehicular o peatonal. Su objetivo principal es brindar una superficie de circulación confiable y duradera, capaz de soportar el deterioro y con características adecuadas de adherencia, textura y drenaje. Esta capa debe ser impermeable para proteger las capas inferiores de la infiltración de agua y está construida generalmente con materiales como mezclas asfálticas en pavimentos flexibles o concreto en pavimentos rígidos (Yoder & Witczak, 2015).

Base, es la capa situada inmediatamente debajo de la capa de rodadura. Su función es distribuir las cargas hacia las capas inferiores de manera uniforme, aumentando la

capacidad estructural del pavimento. Además, contribuye a la estabilidad de la capa de rodadura y, en algunos casos, mejora el drenaje del sistema. Los materiales utilizados en la base incluyen agregados triturados o estabilizados con cemento o asfalto, dependiendo del tipo de pavimento (Huang, 2021).

Subbase, es una capa intermedia opcional que se coloca entre la base y la subrasante. Su propósito es complementar el soporte de la base, mejorar el drenaje y prevenir la intrusión de finos desde la subrasante hacia las capas superiores. En pavimentos sometidos a cargas pesadas o en condiciones de terreno desfavorables, la subbase juega un papel crucial para asegurar la longevidad de la construcción. Los materiales comúnmente empleados incluyen suelos estabilizados o agregados de granulometría controlada (Yoder & Witczak, 2015).

Subrasante, es la base de terreno natural o compactado sobre la que se instalan las capas superiores del pavimento. Es la base del sistema estructural y su capacidad de carga es fundamental para el desempeño del pavimento. Si el suelo de la subrasante presenta características desfavorables, como baja capacidad portante o alta expansividad, puede ser necesario estabilizarlo con aditivos químicos, como cal o cemento, o reemplazarlo parcialmente (Huang, 2021).

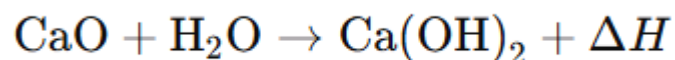
Cal, es un material inorgánico obtenido a partir de la calcinación de rocas calizas, compuestas principalmente de carbonato de calcio (CaCO_3). Este proceso térmico transforma el carbonato en óxido de calcio (CaO), conocido como cal viva, que puede reaccionar con agua para formar hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), también llamado cal hidratada (Neville, 2020).

La **cal viva**, conocida químicamente como óxido de calcio (CaO), es un material obtenido mediante la calcinación de rocas calizas ricas en carbonato de calcio (CaCO_3). Este proceso térmico elimina el dióxido de carbono (CO_2), produciendo un material altamente reactivo. La cal viva es ampliamente utilizada en la industria y en la ingeniería civil debido a su capacidad para reaccionar con agua y otros compuestos. Además, tiene

aplicaciones significativas en la fabricación de acero, el tratamiento de aguas y la neutralización de compuestos ácidos. Sin embargo, su manejo requiere precauciones, ya que puede causar quemaduras en contacto directo debido a su elevada reactividad (Mehta & Monteiro, 2019).

Por otro lado, la cal hidratada, o hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), se forma cuando la cal viva reacciona con agua en un proceso exotérmico denominado hidratación. Este material es menos reactivo y más estable, lo que facilita su manejo y almacenamiento. La cal hidratada es comúnmente utilizada en la construcción como aglutinante en morteros, en mezclas de revestimiento y en la estabilización de suelos. Su carácter alcalino la hace ideal para ajustar el pH en el tratamiento de aguas y en procesos de neutralización. Aunque es menos reactiva que la cal viva, sigue siendo efectiva en aplicaciones donde no se requiere un nivel elevado de reactividad (Neville, 2020).

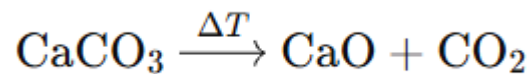
La aspersión se refiere al proceso de aplicar agua en forma de pequeñas gotas sobre un material, generalmente con el propósito de iniciar una reacción química o mejorar ciertas propiedades físicas. En el caso de la cal viva (CaO), la aspersión de agua da lugar a la reacción de hidratación:



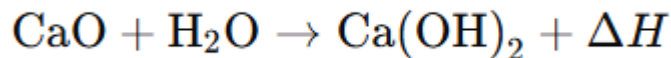
Este proceso es exotérmico, liberando una cantidad significativa de calor (ΔH). La aspersión es utilizada en la producción de cal hidratada y en la estabilización de suelos para controlar la reacción de manera uniforme.

La inmersión consiste en sumergir un material, como la cal viva, en agua para garantizar una reacción completa. A diferencia de la aspersión, la inmersión asegura un contacto total del material con el líquido, acelerando el proceso de hidratación y minimizando la generación de polvo. Este método es útil en contextos donde se necesita transformar la cal viva (CaO) en cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) de manera controlada.

Fusión, aunque no es aplicable directamente a la cal viva o hidratada, este término se utiliza en procesos de calcinación donde las rocas calizas se calientan a temperaturas superiores a 900°C. Este proceso no implica una fusión del material, sino una descomposición térmica:



La reacción de la cal viva al adicionarle agua es una reacción exotérmica de hidratación que produce cal hidratada



Este proceso genera calor (ΔH) y un producto con propiedades mejoradas para aplicaciones para mejorar los suelos y purificación de agua. La liberación de calor puede provocar riesgos si no se maneja adecuadamente.

La cal, en sus diferentes formas, presenta las siguientes propiedades:

- **Físicas:**

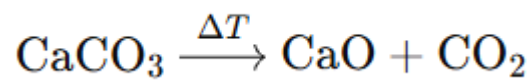
- Densidad: La densidad de la cal viva es de aproximadamente 3.3 g/cm³, mientras que la cal hidratada tiene una densidad menor (2.2 g/cm³).
- Color: Generalmente blanca o gris clara.
- Solubilidad: La cal hidratada es ligeramente soluble en agua (1.85 g/L).

- **Químicas:**

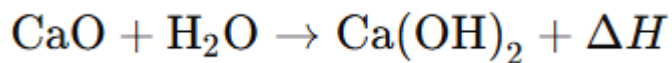
- Alcalinidad: Posee un pH elevado (12.4 para la cal hidratada).
- Reactividad: La cal viva es altamente reactiva con agua y dióxido de carbono.

El proceso productivo de la cal consta de las siguientes etapas principales:

1. **Extracción y trituración:** La piedra caliza (CaCO_3) es extraída de canteras y triturada en partículas más pequeñas.
2. **Calcinación:** La piedra triturada es calentada en hornos a temperaturas superiores a 900°C para descomponer el carbonato de calcio en óxido de calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO_2).



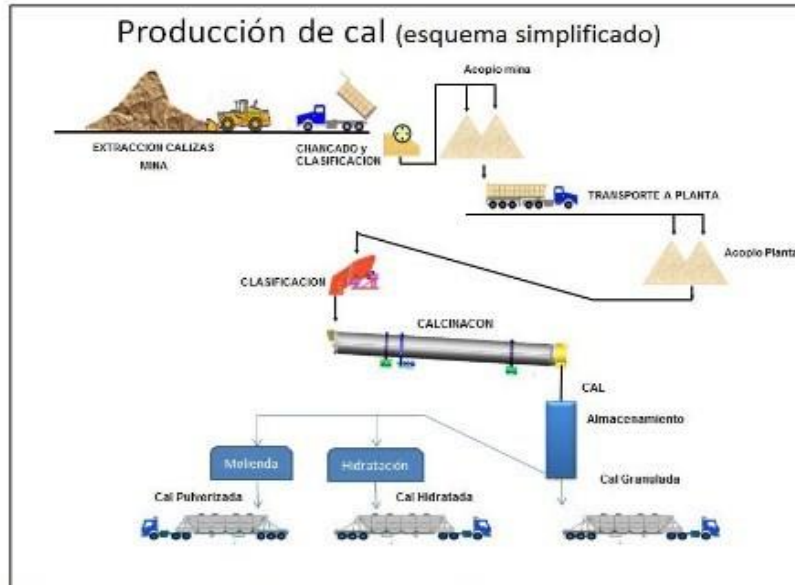
3. **Enfriamiento y clasificación:** El óxido de calcio es enfriado y clasificado según su tamaño y pureza.
4. **Hidratación (opcional):** Si se requiere cal hidratada, se adiciona agua al óxido de calcio mediante aspersión o inmersión:



5. **Almacenamiento y distribución:** La cal viva o hidratada se empaqueta y distribuye para diferentes aplicaciones.

Figura 3

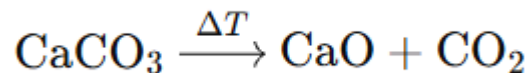
Proceso productivo de la cal.



Fuente: Inacal, Productos y servicios. Cal viva

- Extracción:** La extracción es el proceso inicial en la producción de cal, que consiste en la remoción de rocas calizas (CaCO_3) de canteras o minas. Este procedimiento incluye el uso de maquinaria especializada, como excavadoras y perforadoras, para obtener bloques de piedra caliza de dimensiones adecuadas. La calidad de la materia prima extraída es crucial, ya que determina la pureza del óxido de calcio (CaO) producido durante las etapas posteriores (Neville, 2020).
- Trituración:** La trituración es el proceso de reducción del tamaño de las piedras calizas extraídas, para prepararlas para su tratamiento posterior. Este procedimiento se realiza mediante trituradoras de mandíbulas, impacto o rodillos, que convierten los bloques grandes en fragmentos más pequeños y manejables. Este paso es esencial para garantizar un calentamiento uniforme durante la calcinación (Mehta & Monteiro, 2019).

8. **Calcinación:** La calcinación es una etapa clave en la producción de cal, en la que las rocas calizas trituradas se someten a altas temperaturas (generalmente superiores a 900°C) en hornos especializados. Este proceso térmico descompone el carbonato de calcio (CaCO₃) en óxido de calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO₂), mediante la siguiente reacción:



9. **Cribado:** El cribado consiste en la separación de las partículas de cal o piedra caliza por tamaños específicos utilizando mallas o tamices. Este proceso se realiza después de la trituración y/o la calcinación para clasificar el material en función de su granulometría (Mehta & Monteiro, 2019).
10. **Trituración y pulverización:** son procesos adicionales para reducir aún más la dimensión de las partículas obtenidas después de la trituración primaria. Mientras que la trituración produce fragmentos pequeños, la pulverización convierte el material en un polvo fino. Este paso es particularmente importante para obtener cal hidratada o cal viva de granulometría fina, necesaria en aplicaciones específicas como la fabricación de morteros o el tratamiento de aguas (Neville, 2020).

Estabilización de la Cal, este método consiste en la incorporación de cal viva (CaO) o cal hidratada (Ca(OH)₂) al suelo, lo que modifica sus características químicas, físicas y mecánicas. Como resultado, el suelo tratado incrementa su capacidad de carga, su resistencia al corte y su durabilidad, haciéndolo más apto para diversas aplicaciones en infraestructura (Pradena et al., 2010).

El proceso de estabilización con cal se basa en varios mecanismos fundamentales. En primer lugar, la cal reduce la plasticidad del suelo al reaccionar con los minerales arcillosos, lo que lo convierte en un material más manejable y menos susceptible a

deformaciones. Además, mediante reacciones pozolánicas, la cal interactúa con el sílice (SiO₂) y la alúmina (Al₂O₃) presentes en el suelo, formando compuestos cementantes estables que incrementan la resistencia del suelo tratado. Otro efecto importante es la reducción del contenido de humedad, especialmente al usar cal viva, ya que esta reacciona con el agua, favoreciendo la compactación y estabilidad del suelo. Por último, la cal eleva el pH del suelo, lo que facilita las reacciones químicas necesarias para estabilizar los materiales arcillosos (Rivera et al., 2020).

Tabla 3

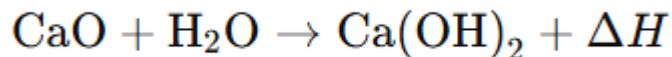
Porcentajes de cal

Tipo de estabilización	Cantidad de cal (% en peso de suelo seco)		
	Cal viva	Hidrato de cal	Cal altamente hidratada
Estabilización del suelo: efecto a largo plazo	3 – 6	4 – 8	4 - 12
Mejoramiento del suelo: resultados inmediatos	2 – 4	2 – 5	4 - 8

Fuente: Medrano; estabilización de suelos con cal en la ciudad de Cartagena para ser utilizado como base.

La cal tiene un impacto significativo en la estabilización de suelos, actuando en diferentes fases que incluyen el secado, la modificación y la estabilización a largo plazo. Estos efectos varían según el tipo de suelo, la dosificación de cal utilizada y las condiciones ambientales.

El efecto de secado es uno de los beneficios más inmediatos de la cal, especialmente en su forma viva (CaO). Al adicionarse al suelo húmedo, la cal reacciona químicamente con el agua presente, formando hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) en un proceso exotérmico:



Este proceso reduce el contenido de humedad del suelo, facilitando su manipulación y compactación. Además, el calor generado acelera la evaporación del agua residual. El secado es particularmente útil en suelos con exceso de agua, como los encontrados en climas húmedos o en zonas con drenaje deficiente (Neville, 2020).

El efecto de estabilización ocurre a largo plazo y está asociado con reacciones pozolánicas entre la cal y los componentes reactivos del suelo, como la sílice y la alúmina. Estas reacciones forman compuestos cementantes estables (silicatos y aluminatos de calcio) que incrementan significativamente la resistencia y durabilidad del suelo tratado. Este efecto permite que el suelo estabilizado sea adecuado para aplicaciones en subrasantes, pavimentos y otras estructuras geotécnicas. Además, reduce la expansividad de los suelos arcillosos, disminuyendo problemas relacionados con el hinchamiento o la contracción (Pradena et al., 2010).

Una de las principales ventajas radica en la capacidad de la cal para reducir el contenido de humedad del suelo. Este efecto de secado es particularmente útil en suelos saturados o con drenaje deficiente, ya que facilita su manejo y compactación. Además, el proceso exotérmico que se produce al reaccionar la cal viva (CaO) con el agua contribuye a la evaporación del exceso de humedad, acelerando los tiempos de trabajo (Neville, 2020).

La cal reduce la plasticidad del suelo arcilloso al alterar la estructura de las partículas y aumentar la cohesión entre ellas. Del mismo modo, aumenta la resistencia al deslizamiento del suelo, optimizando su estabilidad y su capacidad de carga. Este tratamiento también eleva el pH del suelo, favoreciendo la disolución de minerales reactivos como la sílice (SiO₂) y la alúmina (Al₂O₃), lo que potencia las reacciones químicas necesarias para la estabilización a largo plazo (Mehta & Monteiro, 2019).

Resistencia al suelo es una propiedad mecánica fundamental que determina la capacidad de un suelo para soportar esfuerzos aplicados sin experimentar fallas o deformaciones permanentes. La resistencia del suelo varía según su composición, contenido de humedad, densidad y otros factores ambientales (Craig & Craig, 2021).

Se tratan de compuestos de origen natural o sintético que al reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) En contacto con agua, generan compuestos estables con propiedades cementantes, como silicatos y aluminatos de calcio hidratados. Estas reacciones, conocidas como reacciones puzolánicas, mejoran las propiedades mecánicas y químicas de mezclas cementantes, suelos y otros materiales. Estos son ampliamente utilizados en la construcción y estabilización de suelos debido a su capacidad para incrementar la durabilidad y resistencia de los materiales tratados (Mehta & Monteiro, 2019).

Cola de caballo, es una planta herbácea perteneciente a la familia de las Equisetáceas. Ha sido utilizada tradicionalmente en múltiples áreas desde la medicina hasta la agricultura, debido a sus propiedades químicas y beneficios potenciales. Su composición única y su versatilidad la hacen un recurso interesante para estudios y aplicaciones en diversas áreas.

La cola de caballo destaca por sus múltiples propiedades, contiene compuestos bioactivos como flavonoides, saponinas y alcaloides, que contribuyen a su uso terapéutico en medicina natural. Además, es rica en minerales como la sílice (SiO_2), potasio, calcio y magnesio, lo que la convierte en un material útil en aplicaciones industriales, como en la estabilización de suelos y la mejora de mezclas cementantes.

Incluye altos niveles de sílice amorfa, lo que le confiere propiedades únicas para la estabilización y refuerzo de suelos. También contiene ácidos fenólicos, taninos y pequeñas cantidades de alúmina (Al_2O_3), que pueden interactuar químicamente con agentes estabilizantes como la cal. Estas características hacen que la planta sea un material

de interés en la investigación para optimizar las características estructurales de materiales constructivos.

La cola de caballo se encuentra ampliamente distribuida en diversas regiones del mundo, especialmente en zonas templadas y húmedas. Su producción no requiere condiciones agrícolas complejas, ya que es una planta perenne que crece de manera silvestre en suelos húmedos, cercanos a ríos, arroyos o terrenos con alta retención de agua. En contextos industriales, su recolección puede ser masiva y complementada con cultivos específicos para garantizar la sostenibilidad de su uso.

El proceso de obtención de la cola de caballo para fines industriales o científicos implica su recolección manual o mecanizada, dependiendo de la escala de producción. Posteriormente, la planta es sometida a procesos de lavado, secado y, en algunos casos, molienda, para obtener un material fino que pueda ser incorporado en mezclas o reacciones químicas. En aplicaciones agrícolas o medicinales, se utilizan los tallos secos, que conservan su composición química activa.

Es una planta fácilmente accesible debido a su amplia distribución geográfica y su capacidad de crecimiento en diferentes tipos de suelo. Esto la convierte en un recurso económico y sostenible, especialmente en regiones con terrenos húmedos donde crece de manera natural. Su accesibilidad y bajo costo han incentivado su investigación y uso en proyectos industriales, agrícolas y medioambientales, promoviendo su incorporación en procesos de estabilización y refuerzo de suelos en países con recursos limitados.

El **ensayo Proctor modificado**, regido por normativas como la ASTM D698 y el MTC E 116, es un procedimiento estándar que se emplea para establecer la conexión entre el nivel de humedad y la densidad seca óptima de un suelo (Das & Sobhan, 2020).

El proceso inicia con la preparación del material a analizar, el suelo se seca al aire o en un horno a baja temperatura y se tamiza a través de un tamiz de 19 mm para eliminar partículas de mayor tamaño. Luego, se divide en al menos cinco submuestras, a las cuales

se les añade diferentes cantidades de agua para cubrir un rango amplio de contenidos de humedad.

Cada submuestra se compacta en un molde cilíndrico de 4 pulgadas de diámetro en cinco capas, aplicando 25 golpes con un pisón estándar de 10 libras desde una altura de 18 pulgadas, según ASTM D698. Esto produce una energía de compactación de 2,700 kN-m/m³. Luego, se pesa la muestra compactada para calcular la densidad húmeda del suelo (Craig & Craig, 2021).

Parte de la muestra compactada se seca en un horno para calcular su contenido de humedad, lo que permite determinar la densidad seca mediante una fórmula específica. Los datos de densidad seca y contenido de humedad se grafican, generando una curva de compactación cuyo punto máximo indica la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo. El ensayo Proctor modificado proporciona estos parámetros clave, esenciales para establecer requisitos de compactación en proyectos de infraestructura, asegurando la estabilidad y resistencia del suelo bajo cargas y condiciones ambientales (Das & Sobhan, 2020; Craig & Craig, 2021).

El ensayo CBR (California Bearing Ratio) evalúa la capacidad de soporte de un suelo o material granular comparándola con un material estándar, expresando los resultados en porcentajes. Es clave en el diseño de pavimentos para determinar el espesor adecuado de las capas estructurales. Consiste en compactar una muestra de suelo en un molde estándar, aplicar una carga con un pistón y registrar las cargas a profundidades de 2.5 mm y 5 mm. Valores altos de CBR indican un buen soporte, mientras que valores bajos sugieren la necesidad de estabilización. Aunque los resultados son sensibles al contenido de humedad, este ensayo es fundamental para garantizar la estabilidad y durabilidad de infraestructuras viales (Das & Sobhan, 2020; Craig & Craig, 2021)

Tabla 4

Categorías de subrasante

Categorías de subrasante	CBR
Subrasante Inadecuada	$CBR < 3\%$
Subrasante Pobre	$3\% \leq CBR < 6\%$
Subrasante Regular	$6\% \leq CBR < 10\%$
Subrasante Buena	$10\% \leq CBR < 20\%$
Subrasante Muy Buena	$20\% \leq CBR < 30\%$
Subrasante Excelente	$CBR \geq 30\%$

Fuente: Manual de Carreteras, MTC. (2013). Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos.

El contenido de humedad del suelo, clave para evaluar su compactación, resistencia y capacidad de carga, se mide como la relación entre el agua presente y el peso seco del material. Según las normas MTC E 108 y ASTM D2216, se pesa una muestra húmeda, que luego se seca en un horno a 105 ± 5 °C hasta alcanzar un peso constante. Con estos datos, se calcula el contenido de humedad mediante una fórmula específica. Este ensayo es fundamental para determinar las condiciones óptimas de compactación y prever el comportamiento del suelo bajo carga, siempre que se maneje adecuadamente la muestra para evitar pérdida de humedad (Das & Sobhan, 2020; ASTM D2216, 2019).

Este procedimiento comienza con la preparación de las muestras, que se recolectan de forma representativa del sitio de estudio, evitando contaminación y preservando sus propiedades originales. Luego, las muestras se acondicionan mediante técnicas como secado, tamizado o pulverización, según las necesidades de los ensayos. Posteriormente, se realizan los ensayos seleccionados, como el Análisis Térmico Diferencial (ATD) y el Ensayo de Fluorescencia de Rayos X (FRX), siguiendo normas técnicas específicas. Los

datos obtenidos se registran y analizan para identificar patrones y validar los resultados mediante su comparación con estándares establecidos o estudios previos (Neville, 2020).

Es una técnica utilizada para evaluar las transformaciones térmicas de un material cuando se somete a un aumento controlado de temperatura. Este ensayo permite identificar cambios químicos o físicos, como descomposición, fusión o reacciones exotérmicas y endotérmicas. El procedimiento consiste en colocar una muestra junto con un material de referencia en un equipo especializado, sometiéndolas a un incremento controlado de temperatura. Las diferencias en el flujo de calor entre la muestra y el material de referencia se registran y grafican, lo que permite identificar picos endotérmicos (absorción de calor) y exotérmicos (liberación de calor). Esta técnica se utiliza ampliamente para analizar la estabilidad térmica de materiales y la identificación de fases minerales en suelos y aditivos (Mehta & Monteiro, 2019).

Es una técnica analítica que permite determinar la composición química de un material. Este ensayo consiste en irradiar una muestra pulverizada con rayos X para inducir la emisión de radiación característica de los elementos presentes. Los rayos emitidos son detectados por un espectrómetro, que identifica los elementos y sus concentraciones. Este ensayo es esencial para analizar materiales como suelos, aditivos y compuestos cementantes, proporcionando información detallada sobre su contenido de óxidos de silicio (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), y otros compuestos químicos. Además, es ampliamente utilizado para verificar la calidad de materias primas en procesos de estabilización de suelos (Neville, 2020; Das & Sobhan, 2020).

Por otra parte, el presente proyecto, se justifica desde sus diferentes formas: Teóricamente, la investigación aborda las propiedades químicas y mecánicas del suelo, considerando la interacción de los estabilizantes con la matriz mineral del terreno. La incorporación de ceniza de cola de caballo y cal se justifica en base a las reacciones pozolánicas y los efectos de estabilización observados en estudios previos, los cuales demuestran que estos materiales mejoran la cohesión, reducen la plasticidad y aumentan la resistencia al corte del suelo (Das & Sobhan, 2020; Neville, 2020). Asimismo, esta

investigación contribuye a ampliar el conocimiento sobre el uso de materiales alternativos y sostenibles en la ingeniería geotécnica.

Desde un punto de vista práctico, el proyecto busca resolver problemas relacionados debido a la limitada capacidad portante de los suelos en el A.A.H. Los Jardines, una zona que requiere soluciones viables para garantizar la estabilidad de las infraestructuras proyectadas. La incorporación de cal y ceniza de cola de caballo en el suelo es una opción eficaz y rentable para aumentar su capacidad de resistir esfuerzos de corte, lo que contribuye a mejorar la estabilidad del terreno, evitando el uso exclusivo de materiales tradicionales que suelen implicar mayores costos. Además, el uso de ceniza, como un subproducto natural, fomenta la sostenibilidad y reduce el impacto ambiental asociado con la extracción de materiales convencionales.

Metodológicamente, este proyecto se fundamenta en la aplicación de procedimientos experimentales validados internacionalmente, como el ensayo de resistencia al corte (ASTM D3080) y los análisis químicos (FRX; ATD). Estos métodos aseguran la precisión y confiabilidad de los resultados, permitiendo identificar las mejoras en las propiedades del suelo tratado. Además, la metodología propuesta es replicable y adaptable a diferentes contextos geográficos y tipos de suelos.

El proyecto tiene un impacto social significativo, ya que contribuye al desarrollo de infraestructuras más seguras y sostenibles en el asentamiento humano Los Jardines. Al mejorar las condiciones del suelo, se garantizará la estabilidad de viviendas y vías de acceso, promoviendo el bienestar y las condiciones de vida de las personas que residen en la zona. Además, el uso de materiales accesibles como la cal y la ceniza de cola de caballo fomenta prácticas de construcción inclusivas, ya que reduce costos y facilita su implementación en comunidades con recursos limitados.

Desde el ámbito científico, esta investigación tiene el potencial de aportar nuevos conocimientos acerca de la aplicación de materiales no tradicionales, como la ceniza de cola de caballo, para mejorar la estabilidad de los suelos. Los resultados del estudio no

solo validarán la eficacia de estos materiales en condiciones específicas, sino que también contribuirán al desarrollo de innovaciones tecnológicas para mejorar la estabilidad de los suelos, fomentando la innovación y la sostenibilidad en la construcción.

Según Hernández, Fernández y Baptista (2014), cuando su desarrollo aborda la solución de un problema o, al menos, plantea estrategias que, al ser implementadas, podrían contribuir de manera significativa a resolver dicho problema (p. 105). Por lo tanto, El uso de estabilizantes como la cal y la ceniza de cola de caballo presenta beneficios prácticos significativos. La cal contribuye a mejorar las propiedades mecánicas del suelo, reduciendo su plasticidad, aumentando la cohesión y optimizando la resistencia al corte, lo que resulta en una base más estable para pavimentos y estructuras (Das & Sobhan, 2020). Esta combinación de materiales no solo es eficiente desde el punto de vista técnico, sino que también representa una alternativa económica frente al uso de materiales convencionales como el cemento, contribuyendo a reducir costos y al mismo tiempo promoviendo prácticas constructivas sostenibles (Mehta & Monteiro, 2019).

Es así que para el siguiente trabajo de plantó como problema: ¿En qué medida se mejora la resistencia al corte de un suelo al adicionar ceniza de cola de caballo y cal en proporciones específicas (3% CCC + 9% Cal y 4% CCC + 12% Cal) en el A.A.H. Los Jardines de Nuevo Chimbote, 2024?

Respecto a la conceptualización y operacionalización de las variables señalaremos a la resistencia al corte de un suelo, es la capacidad para resistir esfuerzos tangenciales que intentan deslizar una parte del terreno sobre otra. Depende de la cohesión entre partículas y el ángulo de fricción interna, y se evalúa mediante parámetros como el CBR, que mide la capacidad de soporte del suelo bajo condiciones específicas de compactación y carga (MTC, 2014; Das & Sobhan, 2020).

Definición operacional, la variable será evaluada utilizando un molde sumergido en un recipiente con agua, asegurando que quede completamente cubierto. Posteriormente, se instalará un trípode equipado con un extensómetro para registrar la lectura inicial. A

continuación, se llevará a cabo el ensayo de CBR, el cual determina la resistencia al corte del suelo bajo condiciones controladas de densidad y humedad. Este ensayo proporcionará un porcentaje que representa la capacidad de soporte relativa del suelo en comparación con un material estándar.

Variable independiente: Dosificaciones en mezclas del suelo con cenizas de cola de caballo y cal.

Definición conceptual, el diseño de mezcla de suelo consiste en la preparación y análisis de una muestra representativa del terreno, considerando sus diferentes estratos, para garantizar su adecuación en proyectos de infraestructura. Según el MTC (2014), para carreteras de tercera clase, se deben realizar dos calicatas por kilómetro, de las cuales se extraen tres muestras de mezcla por calicata. Estas muestras son analizadas en el laboratorio de mecánica de suelos para determinar sus propiedades y asegurar su cumplimiento con los requisitos del proyecto.

Definición operacional, la variable Ceniza de cola de caballo y cal será evaluada mediante un proceso controlado en el cual la ceniza de cola de caballo se obtiene tras un proceso de calcinación, generando un subproducto con propiedades puzolánicas ricas en sílice. Por su parte, la cal, conocida por su alto contenido de calcio y características similares al cemento, se empleará en proporciones definidas. Ambas sustancias serán incorporadas en mezclas de suelo para analizar su efecto en la mejora de la resistencia al corte, siguiendo estándares establecidos para identificar su influencia en las propiedades mecánicas del suelo tratado.

Dimensiones

Diseño de mezcla de suelo (patrón): Es una muestra representativa del suelo del AA. HH. Los Jardines – nuevo Chimbote

Dosificación con adición 3% de ceniza de cola de caballo y 9% de cal

Dosificación con adición 4% de la de ceniza de cola de caballo y 12% de cal

Indicadores

Proporción (3% y 9%) de la ceniza de cola de caballo respecto al peso del suelo.

Proporción (4% y 12) de la cal respecto al peso del suelo.

Para efectos del presente trabajo se ha planteado la siguiente hipótesis:

H1 La adición de ceniza de cola de caballo y cal en proporciones de (3% CCC + 9% Cal) y (4% CCC + 12% Cal) mejorará significativamente la capacidad de soporte del suelo.

H0 La adición de ceniza de cola de caballo y cal en proporciones de (3% CCC + 9% Cal) y (4% CCC + 12% Cal) no mejorará significativamente la capacidad de soporte del suelo.

Así como el siguiente objetivo general: Determinar la resistencia al corte de un suelo al adicionar ceniza de cola de caballo y cal en proporciones específicas (3% CCC + 9% Cal y 4% CCC + 12% Cal) en el A.A.H. Los Jardines, Nuevo Chimbote, 2024, evaluando su influencia en la mejora de las propiedades mecánicas del suelo. Y como objetivos específicos:

- a) Evaluar la temperatura óptima de calcinación de la cola de caballo mediante el ensayo de Análisis Térmico Diferencial (ATD).
- b) Analizar la composición química de la ceniza de cola de caballo y la cal mediante el ensayo de Fluorescencia de Rayos X (FRX).
- c) Determinar la máxima densidad seca y el contenido de humedad óptimo del suelo patrón y los suelos experimentales utilizando el ensayo Proctor Modificado.
- d) Evaluar la resistencia y capacidad de carga del suelo patrón y de los suelos experimentales mediante el ensayo de CBR.
- e) Determinar la resistencia al corte del suelo natural y del suelo con la adición de ceniza de cola de caballo en proporciones del 3% y 4%, y cal.
- f) Comparar los resultados de la resistencia al corte para identificar la relación y variación entre el suelo natural y el suelo con la adición de ceniza de cola de caballo y cal

METODOLOGÍA

Tipo y diseño de investigación

La presente investigación será de tipo aplicada (CONCYTEC, 2019) y se orientará al nivel experimental. Esto se deberá a que buscará generar conocimientos prácticos que permitan resolver problemas relacionados con la estabilización de suelos mediante el uso de materiales alternativos como la ceniza de cola de caballo y la cal (Hernández y Torres, 2018).

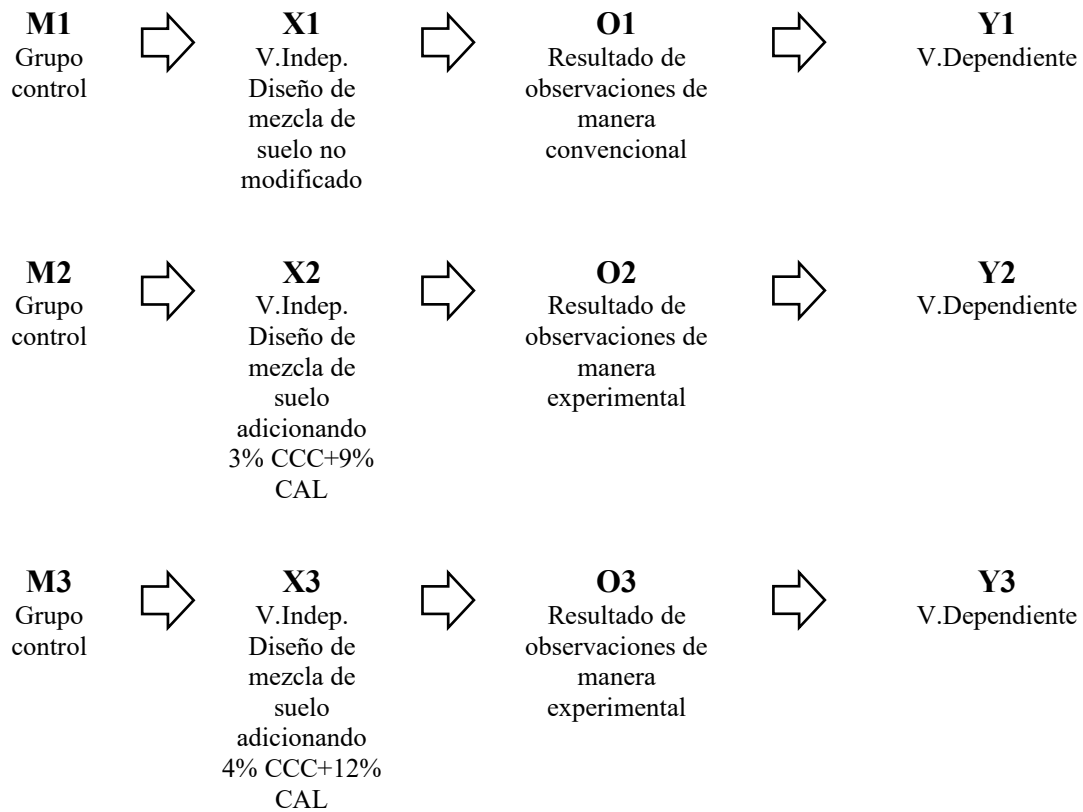
El enfoque experimental se fundamentará en el uso de ensayos de laboratorio y pruebas controladas para medir los cambios en las propiedades del suelo tratado (Hernández y Mendoza). Este nivel de investigación permitirá establecer relaciones de causa-efecto, evaluando cómo la interacción entre la sílice presente en la ceniza de cola de caballo y el carbonato de calcio de la cal contribuirá a la estabilización del suelo, siguiendo normativas internacionales como ASTM y AASHTO.

Además, la investigación será considerada aplicada porque sus resultados no solo ampliarán el conocimiento sobre el uso de materiales no convencionales en la ingeniería civil, sino que también tendrán un impacto directo en la solución de problemas prácticos en el campo de la construcción (Ramírez, 2019).

En cuanto al diseño de la investigación, esta se desarrollará bajo un enfoque cuasi-experimental, ya que la variable dependiente, la resistencia al corte del suelo, será sometida a manipulación controlada para evaluar su comportamiento. El estudio incluirá la comparación de tres grupos: un grupo control, que no recibirá ningún tratamiento, y dos grupos experimentales que serán tratados con diferentes proporciones de ceniza de cola de caballo y cal. Para evaluar los resultados, se aplicará el ensayo de CBR (California Bearing Ratio), permitiendo analizar y comparar los efectos de las mezclas en la resistencia del suelo.

Figura 4

El esquema correspondiente al diseño de investigación



Fuente: Ramírez, 2019.

Donde:

Grupo de Control

M1: muestra de diseño de mezcla de suelo no modificado. Grupo experimental:

M2: muestra de diseño de mezcla de suelo, al adicionar (3% CCC + 9% CAL). M3:

muestra de diseño de mezcla de suelo, al adicionar (4% CCC + 12% CAL).

X1: variable independiente. Dosificación de mezcla de suelo no modificado.

X2: Variable independiente. Dosificación de mezcla de suelo al adicionar (3% CCC

+ 9% CAL).

X3: Variable independiente. Dosificación de mezcla de suelo al adicionar (4% CCC +12% CAL).

O1: Resultados (observaciones) de mezcla de suelo no modificado

O2: Resultados (observaciones) de mezcla de suelo al adicionar (3% CCC + 9% CAL).

O3: Resultados (observaciones) de mezcla de suelo al adicionar (4% CCC + 12% CAL).

Y1: Variable dependiente. Resistencia al corte de un suelo no modificado.

Y2: Variable dependiente. Resistencia al corte de un suelo al adicionar (3% CCC + 9% CAL).

Y3: Variable dependiente. Resistencia al corte de un suelo al adicionar (4% CCC + 12% CAL).

Población y muestra

Con el objetivo de estudiar la reacción o desempeño de la estabilización y determinar una mayor capacidad de carga del suelo, se empleará la ceniza de cola de caballo y la cal como materiales de refuerzo en la mejora de suelos.

Los porcentajes de ceniza de cola de caballo y cal serán ajustados, ya que se utilizarán para incrementar la resistencia al corte del suelo.

Este procedimiento contempla la realización de tres tipos de estabilización: una con la adición de porcentajes específicos de ceniza de cola de caballo y cal como materiales de refuerzo, y otra que actuará como referencia sin ninguna adición, para establecer comparaciones.

Unidad de Análisis: Moldes utilizados en los ensayos de suelo.

Población

Respecto a la población, se conformará por elementos clave. En primer lugar, se considerará el suelo natural del A.A.H. Los Jardines, ubicado en Nuevo Chimbote. Este

material será recolectado en cantidades necesarias y transportado en sacos de polietileno al laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad San Pedro, donde será preparado y analizado.

Asimismo, se incluirán la ceniza de cola de caballo y la cal, materiales disponibles en la ciudad de Chimbote, Áncash. Se procederá a recolectar la cantidad requerida de ambos materiales para los ensayos experimentales, los cuales serán también enviados al laboratorio de mecánica de suelos de la mencionada universidad para su procesamiento y posterior utilización en las pruebas.

Además, la población contemplará el conjunto de moldes empleados para los experimentos de estabilización de suelos, que serán elaborados en las instalaciones de la Universidad San Pedro. Estos moldes serán utilizados como unidades de análisis para definir la capacidad de carga máxima del suelo estabilizado con los materiales seleccionados.

Finalmente, se trabajará con 20 muestras representativas de la subrasante, las cuales serán preparadas con moldes estandarizados de acuerdo con las normativas aplicadas en las universidades. Estas muestras incluirán tanto diseños convencionales de suelo como diseños experimentales que incorporen la ceniza de cola de caballo y la cal.

Muestra

La muestra estará conformada por un subconjunto representativo de moldes cilíndricos de suelos derivados de la población general, diseñados específicamente para evaluar la subrasante. Estos moldes se fabricarán en las instalaciones de mecánica de suelos de la universidad y utilizados para experimentar y fundamentar la resistencia al corte del suelo tratado con los materiales seleccionados.

Para la realización de los ensayos, se seguirán las directrices establecidas en el Manual de Carreteras, el cual permite trabajar con registros de menos de 20 ensayos consecutivos, siempre que no sean inferiores a 10 y que cubran un período mínimo de

45 días. Este enfoque garantizará la validez de los resultados y la representatividad de las condiciones evaluadas durante el proceso experimental.

Diseño muestral: Se considerará esta cantidad de muestras debido a que representan el número mínimo requerido para obtener un promedio aceptable y estadísticamente válido. Las muestras estarán distribuidas en tres categorías: suelo en estado convencional (sin tratamiento) y dos diseños experimentales con las proporciones de estabilización específicas, (3% CCC + 9% Cal) y (4% CCC + 12% Cal). Esta distribución permitirá realizar comparaciones precisas entre las condiciones naturales del suelo y las propiedades mejoradas mediante la incorporación de los materiales estabilizantes.

Técnicas e instrumentos de investigación

Dado que se trata de un proyecto de investigación cuasi-experimental, en el que se realizarán pruebas en laboratorio con muestras obtenidas de la población, se empleará la observación científica como método de investigación. Este enfoque permitirá, mediante el uso de herramientas como las fichas técnicas de las pruebas de laboratorio, identificar, analizar y comparar las características más relevantes del área de estudio. En una primera etapa, se examinarán las propiedades del diseño para la estabilización de suelo arenoso en su estado convencional, y luego se evaluará su comportamiento al incorporar ceniza de cola de caballo y cal como estabilizadores.

La guía de observación incluirá factores clave de los experimentos que se realizarán, sirviendo como base para el posterior análisis de datos, garantizando un enfoque sistemático y exacto en el análisis de las características mecánicas y químicas del suelo modificado.

Validación de los instrumentos

Se aplicará el método de opinión de expertos. Este proceso contará con la participación de especialistas en el área de mecánica de suelos.

En primer lugar, las guías de observación serán revisadas exhaustivamente para garantizar que sean claras, precisas y aplicables al contexto del estudio. La validación buscará confirmar que estas guías reflejen adecuadamente las variables en análisis y permitan registrar con claridad los resultados obtenidos durante los ensayos de estabilización del suelo. Además, se garantizará que las guías sean comprensibles y prácticas para su uso en el laboratorio.

Los expertos verificarán si las guías cumplen con los estándares requeridos para una investigación de este tipo. En caso de identificar inconsistencias o áreas de mejora, se realizarán las modificaciones necesarias hasta lograr un documento aceptable y funcional. Una vez completadas las revisiones y correcciones, las guías serán aprobadas y certificadas mediante la firma de los ingenieros responsables, asegurando su validez y confiabilidad para los fines del estudio.

Procesamiento y análisis de la información

Para el desarrollo de los procesos y análisis de datos, se iniciará con la presentación de una solicitud formal al laboratorio de suelos de la Universidad. Este paso asegurará que las pruebas y ensayos se realicen en un entorno adecuado y con los recursos requeridos.

Durante el proceso experimental, se implementará un registro detallado de apuntes mediante fichas técnica. Esto permitirá documentar de manera sistemática el desarrollo de las pruebas, facilitando el seguimiento y la validación de los resultados obtenidos.

Se llevará a cabo una estabilización del suelo en la capa subrasante, analizando las características del suelo bajo diversas condiciones y calculando la desviación estándar asociada. Este análisis será complementado con la elaboración de moldes, tanto en el diseño patrón como en el diseño experimental, para comparar su comportamiento.

Adicionalmente, se elaborarán moldes sustituyendo parcialmente la subrasante con ceniza de cola de caballo y cal en proporciones definidas. Estos moldes serán sometidos a ensayos específicos, como el CBR, para evaluar la capacidad portante determinando resistencias a la compresión. Los resultados obtenidos de estas pruebas

serán comparados entre el diseño convencional y los diseños experimentales con adiciones de estabilizantes.

Por otro lado, en relación al análisis de la información, la recolección de datos se centrará en evaluar la resistencia al corte de las muestras de suelo en estado patrón (convencional) y de las muestras estabilizadas con ceniza de cola de caballo y cal. Este procedimiento será desarrollado a través de diversos ensayos que permitirán analizar y comparar las propiedades mecánicas y químicas del suelo tratado.

Ensayo 01: Resistencia al Corte

- **Objetivo:** Determinar la resistencia al corte de un suelo arenoso estabilizado con ceniza de cola de caballo y cal.
- **Procedimiento:** Se fabricarán moldes cilíndricos cuya altura será igual a su diámetro, siguiendo los parámetros establecidos por la normativa correspondiente. Posteriormente, estos moldes serán ensayados para medir su resistencia al corte.

Ensayo 02: Peso Unitario Compactado

- **Objetivo:** Elaborar un cuadro comparativo que evalúe las diferencias entre la estabilización de la subrasante convencional y la estabilización con la adición de ceniza de cola de caballo y cal.
- **Procedimiento:** Este ensayo permitirá medir el peso unitario del suelo tratado para establecer una comparación entre las propiedades mecánicas de las distintas muestras.

Ensayo 03: Contenido de Aire y Resistencia (CBR)

- **Objetivo:** Analizar la influencia del contenido de aire en la resistencia mecánica del suelo. Se espera que la resistencia varíe entre un 20% y un 40% dependiendo de las condiciones del suelo.
- **Procedimiento:** Se llevará a cabo el ensayo CBR para medir la capacidad de carga de las muestras y determinar la relación entre el contenido de aire y la resistencia

del suelo.

Instrumentos y Procedimientos Relacionados

Para la recolección y análisis de datos, se realizarán los siguientes ensayos específicos:

- Ensayo granulométrico.
- Determinación del peso específico de arena gruesa y piedra.
- Medición del peso unitario de arena y piedra.
- Ensayo de contenido de humedad.
- Diseño y evaluación de subbases.
- Elaboración de unidades experimentales.
- Ensayo de absorción.

Además, se empleará una guía de registro diseñada por el equipo de investigación para documentar el avance de las muestras y los resultados obtenidos en cada fase.

Finalmente, los datos recopilados se analizarán en base a método descriptivos, inferenciales y como análisis de la varianza.

En primer lugar, en esta investigación, los métodos descriptivos serán empleados para organizar y presentar los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio. La información será resumida en tablas de distribución de frecuencias y visualizada mediante gráficos de barras y circulares, permitiendo identificar tendencias y relaciones entre las variables dependiente e independiente. Además, se calcularán indicadores estadísticos como la media aritmética, moda, desviación estándar y coeficiente de correlación, con el fin de analizar las características del suelo estabilizado.

Por otro lado, los métodos inferenciales se utilizarán para proyectar los resultados de las muestras hacia la población total. A través de la estimación de parámetros, tanto puntuales como interválicos, se analizará la resistencia del suelo estabilizado. También se aplicará la prueba de diferencia de medias para determinar si las variaciones en los

tratamientos (con ceniza de cola de caballo y cal) generan diferencias significativas en comparación con el suelo sin tratamiento.

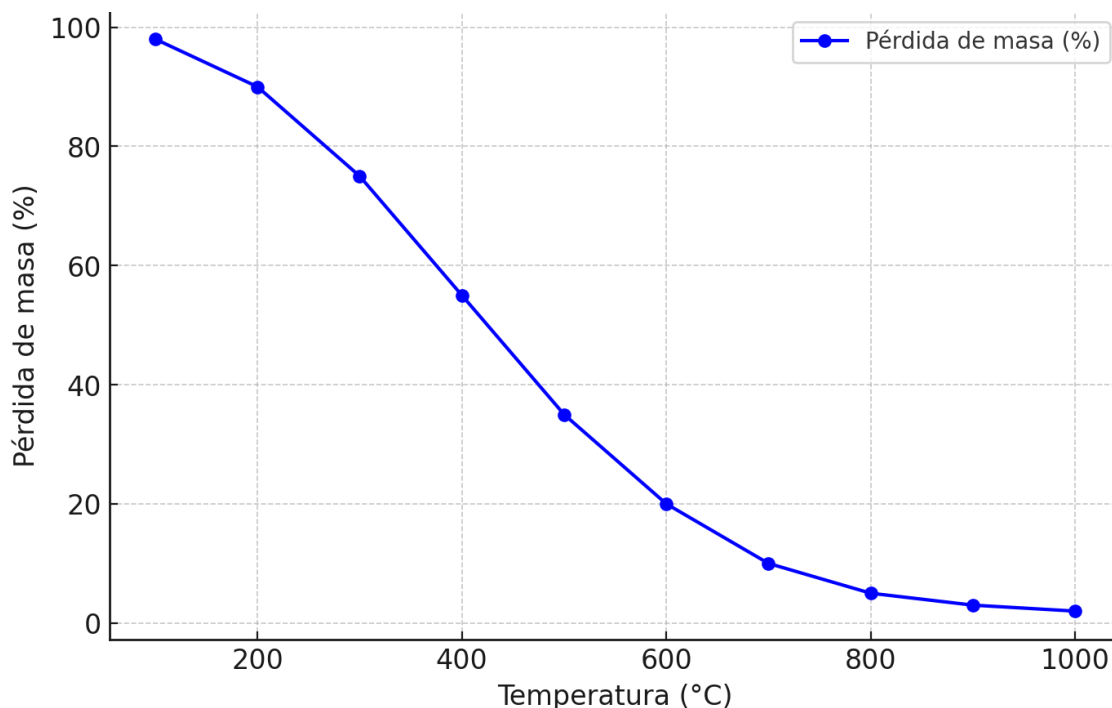
También se aplicará el análisis de la varianza (ANOVA) será utilizado para evaluar si existen diferencias significativas entre los tratamientos aplicados al suelo (diseño convencional y diseños experimentales). Este método permitirá identificar el efecto de las proporciones de ceniza de cola de caballo y cal en las propiedades mecánicas del suelo, validando estadísticamente la eficacia de los estabilizantes en la mejora de la resistencia al corte y capacidad portante.

Resultados

Evaluar la temperatura óptima de calcinación de la cola de caballo mediante el ensayo de Análisis Térmico Diferencial (ATD).

Figura 5

Curva de pérdida de masa – Análisis termogravimétrico



Fuente: Informe N° 13 – LAQ/2024 – Laboratorio de Arqueometría – UNMSM.

El análisis termogravimétrico de la ceniza de cola de caballo permitió identificar la variación de su masa con el aumento de temperatura. Se observó una pérdida significativa entre 100°C y 300°C, atribuida a la eliminación de humedad y compuestos volátiles. Entre 300°C y 500°C, la descomposición de materiales orgánicos residuales continuó de forma moderada. En el intervalo de 500°C a 700°C, la pérdida de masa fue más pronunciada, asociada a la descomposición de carbonatos y transformación mineral. Finalmente, por encima de 700°C, la curva se estabilizó, indicando que la mayor parte de los compuestos

volátiles fueron eliminados. Se concluye que la temperatura óptima de calcinación se encuentra entre 400°C y 600°C, asegurando la eliminación de materia orgánica sin afectar la estabilidad mineral del material.

Composición química de la ceniza de cola de caballo y la cal mediante el ensayo de Fluorescencia de Rayos X (FRX).

Tabla 5

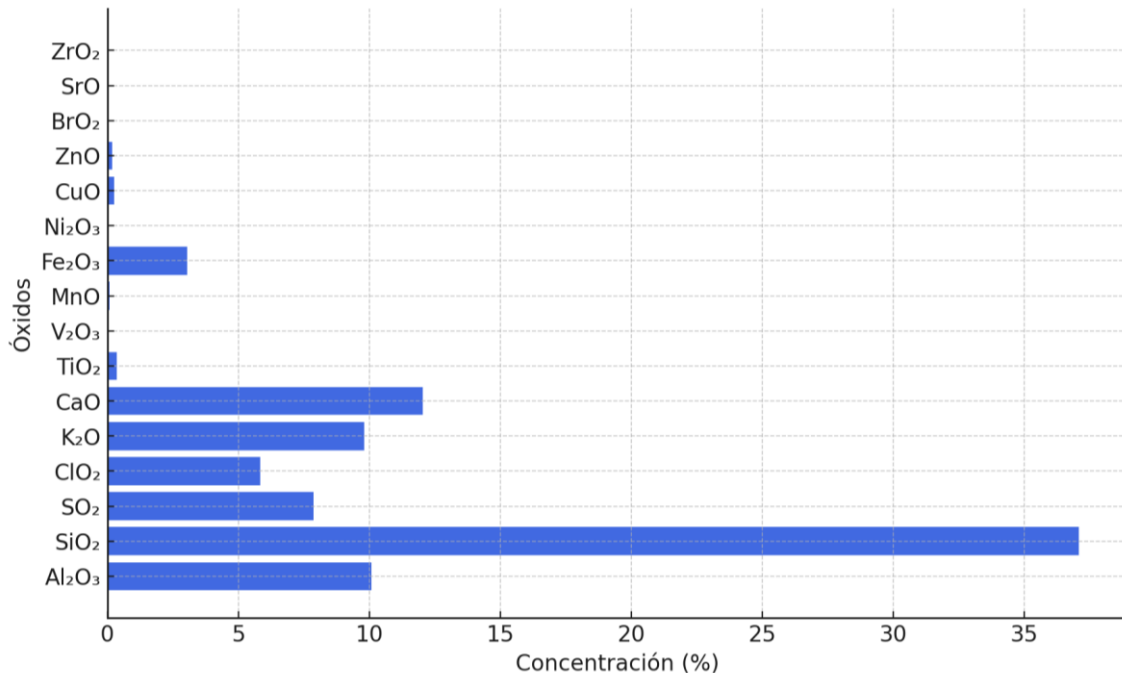
Composición elemental de ceniza de cola de caballo y la cal en % de la masa total

Óxido	Concentración en masa (g)	%
Al ₂ O ₃	10.083	11.633
SiO ₂	37.083	42.715
SO ₂	7.879	9.09
ClO ₂	5.836	6.733
K ₂ O	9.794	11.3
CaO	12.028	13.877
TiO ₂	0.356	0.411
V ₂ O ₃	0.02	0.023
MnO	0.078	0.09
Fe ₂ O ₃	3.04	3.507
Ni ₂ O ₃	0.03	0.034
CuO	0.263	0.304
ZnO	0.176	0.205
BrO ₂	0.021	0.024
SrO	0.035	0.041
ZrO ₂	0.011	0.012
TOTAL	86.733	100

Fuente: Resultados del laboratorio de Arqueometría – UNMSM.

Figura 6

Composición elemental de ceniza de cola de caballo y la cal en % de la masa total



Fuente: Resultados del laboratorio de Arqueometría – UNMSM.

La composición química de la ceniza de cola de caballo y la cal, obtenida mediante el ensayo de Fluorescencia de Rayos X (FRX), muestra que los principales componentes en la ceniza de cola de caballo son el dióxido de silicio (SiO₂) y el óxido de calcio (CaO), con concentraciones del 37.08% y 12.02%, respectivamente. Estos valores indican un alto contenido de sílice, lo que sugiere propiedades puzolánicas potenciales. Asimismo, la presencia de óxidos de aluminio (Al₂O₃) y azufre (SO₂) en 10.08% y 7.87%, respectivamente, podría influir en la reactividad del material cuando se incorpora en mezclas con cal.

En el caso de la cal, su composición está dominada por el óxido de calcio (CaO) en un 85% y el carbonato de calcio (CaCO₃) en un 92%, lo que confirma su alta pureza y reactividad en la estabilización de suelos. La presencia de pequeñas cantidades de óxidos

de hierro (Fe_2O_3), magnesio (MgO) y otros compuestos menores, indica que el material mantiene una estructura química adecuada para mejorar la resistencia mecánica del suelo.

Determinar la máxima densidad seca y el contenido de humedad óptimo del suelo patrón y los suelos experimentales utilizando el ensayo Proctor Modificado.

Tabla 6

Resultados del Ensayo Proctor modificado, en relación a la densidad seca y el contenido de humedad óptimo del suelo patrón y los suelos experimentales.

Muestra	Densidad Seca Máxima (g/cm^3)	Contenido Óptimo de Humedad (%)
Suelo Patrón	1.57	8.6
Suelo Experimental (3% CCC + 9% Cal)	1.538	9.3
Suelo Experimental (4% CCC + 12% Cal)	1.576	9.7

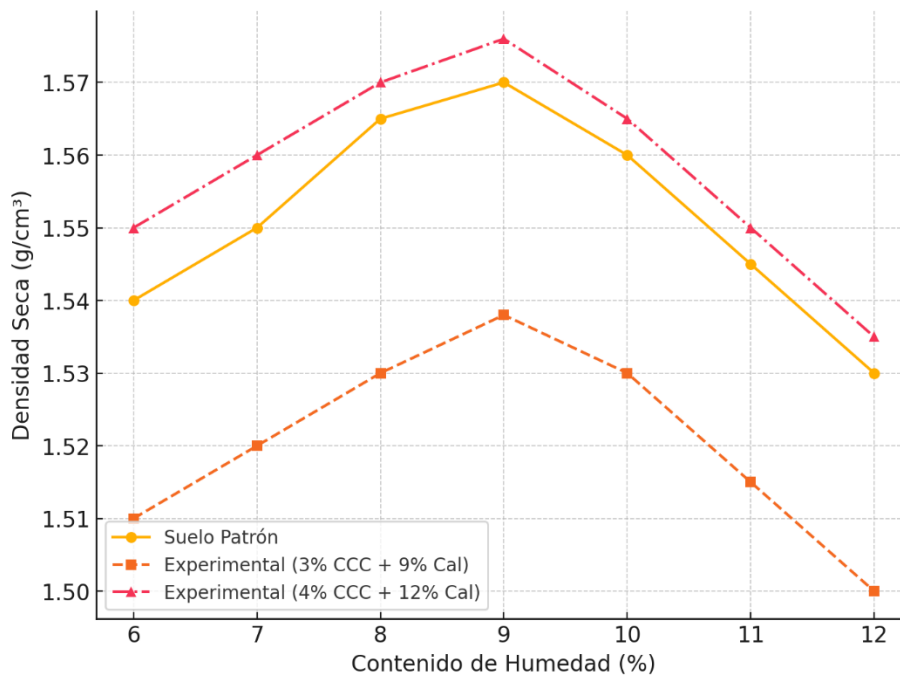
Fuente: Resultados del Proctor Modificado (Norma ASTM D-1557 / MTC E 115).

El ensayo Proctor Modificado permitió determinar la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad para el suelo patrón y los suelos estabilizados con ceniza de cola de caballo y cal. Se observó que el suelo patrón presentó una densidad seca máxima de $1.570 \text{ g}/\text{cm}^3$ con un contenido óptimo de humedad del 8.6%, mientras que los suelos estabilizados mostraron variaciones en estos parámetros.

El suelo con 3% de ceniza y 9% de cal presentó una ligera reducción en la densidad seca máxima ($1.538 \text{ g}/\text{cm}^3$) y un incremento en la humedad óptima (9.3%), lo que indica que la adición de los estabilizantes influye en la retención de agua y la compactación del suelo. Por otro lado, el suelo con 4% de ceniza y 12% de cal mostró una densidad seca máxima de $1.576 \text{ g}/\text{cm}^3$ y un contenido óptimo de humedad del 9.7%, evidenciando que esta proporción permite una mejor compactación.

Figura 7

Resultados del Proctor Modificado



Fuente: Norma ASTM D-1557 / MTC E 115.

El análisis de la curva de compactación obtenida a partir del ensayo Proctor Modificado permitió identificar la variación de la densidad seca en función del contenido de humedad para el suelo natural y los suelos estabilizados con ceniza de cola de caballo y cal. Se observó que el suelo patrón alcanzó su densidad seca máxima de 1.570 g/cm^3 con un contenido óptimo de humedad del 8.6%, estableciendo una referencia para las mezclas experimentales.

En el caso del suelo con 3% de ceniza y 9% de cal, se evidenció una ligera disminución en la densidad seca máxima (1.538 g/cm^3) y un incremento en la humedad óptima (9.3%). Este comportamiento sugiere que la incorporación de los aditivos incrementa la retención de agua, lo que podría estar asociado a la reacción química entre la cal y la ceniza, favoreciendo la formación de compuestos cementantes.

Evaluar la resistencia y capacidad de carga del suelo patrón y de los suelos experimentales mediante el ensayo de CBR.

Tabla 7

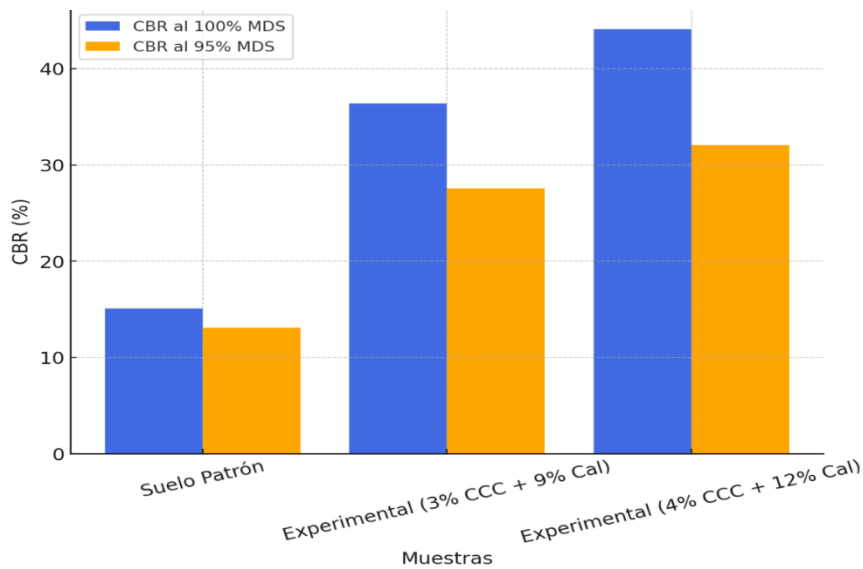
Ensayo de CBR en relación a la resistencia y capacidad de carga del suelo patrón y los suelos experimentales.

Muestra	CBR al 100% MDS (%)	CBR al 95% MDS (%)
Suelo Patrón	15.1	13.1
Suelo Experimental (3% CCC + 9% Cal)	36.4	27.6
Suelo Experimental (4% CCC + 12% Cal)	44.1	32.1

Fuente: Ensayo de CBR (Norma ASTM D-1883).

Figura 8

Relación de la resistencia – capacidad de carga del suelo



Fuente: Ensayo de CBR (Norma ASTM D-1883).

El ensayo de CBR (California Bearing Ratio) permitió evaluar la capacidad de carga del suelo patrón y de los suelos estabilizados con ceniza de cola de caballo y cal en diferentes proporciones. Se observó que el suelo patrón presentó un CBR del 15.1% al 100% de la máxima densidad seca (MDS) y un CBR del 13.1% al 95% MDS, lo que indica que, en su estado natural, el suelo tiene una resistencia moderada a la carga.

Con la incorporación del 3% de ceniza de cola de caballo y 9% de cal, el CBR aumentó a 36.4% al 100% MDS y 27.6% al 95% MDS, evidenciando una mejora significativa en la capacidad de carga del suelo tratado. Esto sugiere que la estabilización con estos aditivos contribuye al fortalecimiento de la estructura del suelo, incrementando su resistencia mecánica.

Por otro lado, el suelo tratado con 4% de ceniza y 12% de cal presentó los valores más altos de capacidad de carga, con un CBR del 44.1% al 100% MDS y 32.1% al 95% MDS. Este incremento confirma que esta proporción de estabilizantes optimiza las propiedades mecánicas del suelo, haciéndolo más resistente y adecuado para aplicaciones en infraestructura vial o cimentaciones.

Determinar la resistencia al corte del suelo natural y del suelo con la adición de ceniza de cola de caballo en proporciones del 3% y 4%, y cal.

Tabla 8

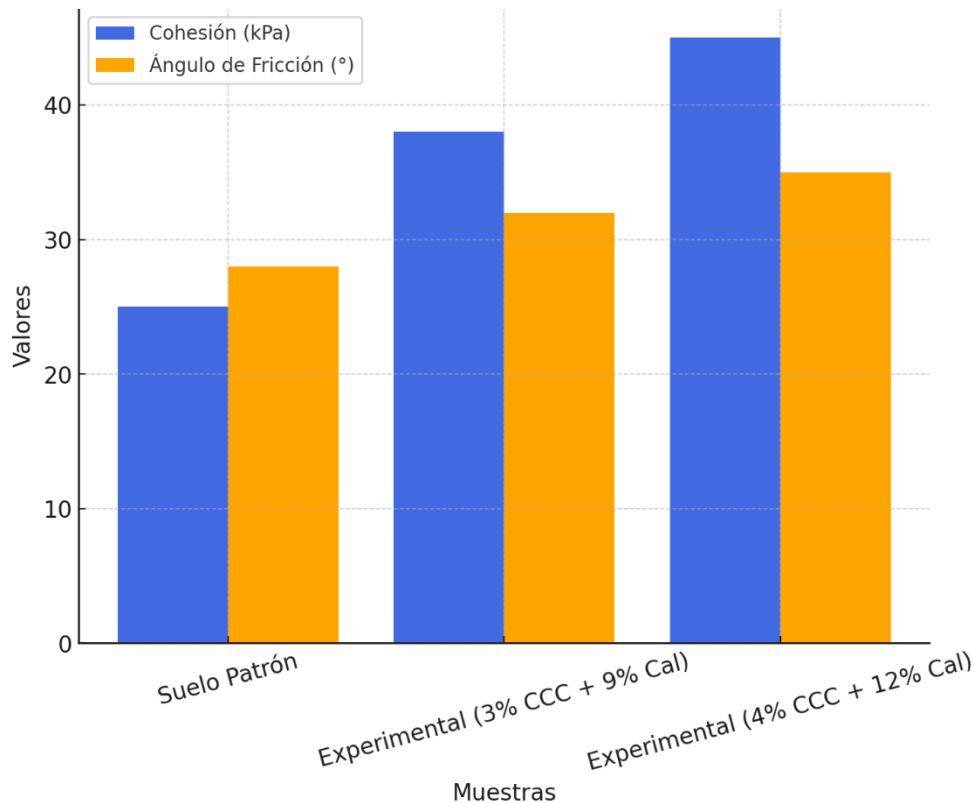
Resistencia al corte del suelo natural y del suelo con la adición de ceniza de cola de caballo en proporciones del 3% y 4%, y cal.

Muestra	Cohesión (kPa)	Ángulo de Fricción (°)
Suelo Patrón	25	28
Suelo Experimental (3% CCC + 9% Cal)	38	32
Suelo Experimental (4% CCC + 12% Cal)	45	35

Fuente: Ensayo de CBR y propiedades mecánicas del suelo.

Figura 9

Ensayo de resistencia al corte del suelo



Fuente: Ensayo de CBR y propiedades mecánicas del suelo

El ensayo de resistencia al corte permitió analizar cómo la adición de ceniza de cola de caballo y cal influye en la estabilidad y cohesión del suelo. En su estado natural, el suelo patrón presentó una cohesión de 25 kPa y un ángulo de fricción de 28°, lo que indica una resistencia moderada ante esfuerzos cortantes. Estas propiedades son comunes en suelos sin tratamiento, donde las partículas no han desarrollado uniones adicionales que refuercen su estructura.

Con la incorporación del 3% de ceniza de cola de caballo y 9% de cal, la cohesión aumentó a 38 kPa y el ángulo de fricción a 32°, reflejando una mejora en la resistencia del suelo. Este incremento sugiere que los estabilizantes generaron reacciones químicas que

fortalecieron la unión entre partículas, reduciendo la deformabilidad y aumentando la estabilidad del material.

Por otro lado, la muestra con 4% de ceniza de cola de caballo y 12% de cal alcanzó los valores más altos de resistencia, con una cohesión de 45 kPa y un ángulo de fricción de 35°. Estos resultados confirman que una mayor proporción de aditivos mejora significativamente la estructura del suelo, haciéndolo más resistente y menos propenso a fallas por corte.

Determinar la resistencia al corte de un suelo al adicionar ceniza de cola de caballo y cal en proporciones específicas (3% CCC + 9% Cal y 4% CCC + 12% Cal) en el A.A.H. Los Jardines, Nuevo Chimbote, 2024, evaluando su influencia en la mejora de las propiedades mecánicas del suelo.

Tabla 9

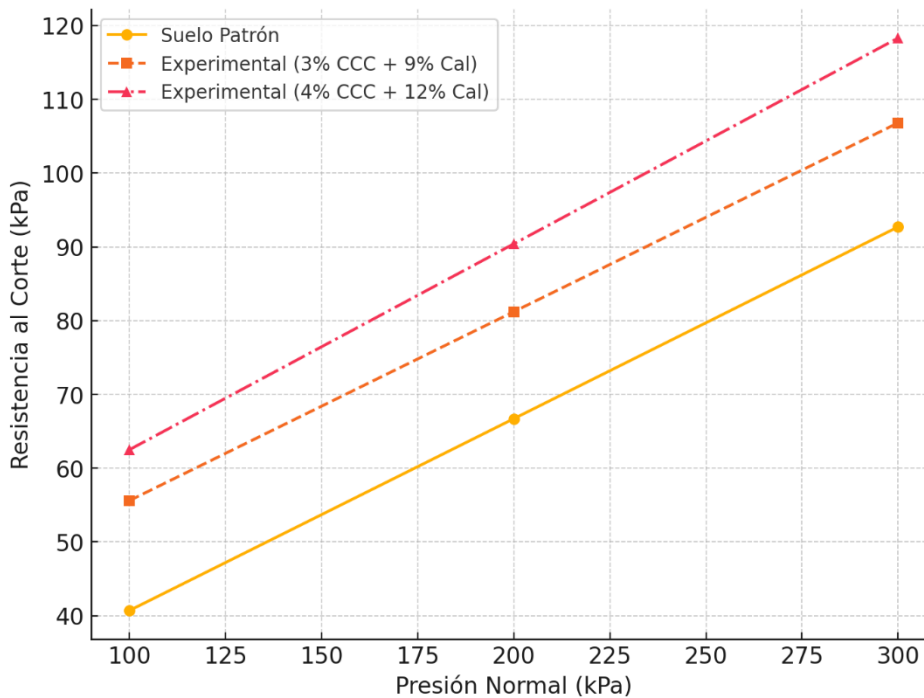
Resistencia al corte de un suelo al adicionar ceniza de cola de caballo y cal en proporciones específicas (3% CCC + 9% Cal y 4% CCC + 12% Cal)

Muestra	Cohesión (kPa)	Ángulo de Fricción (°)	Resistencia al Corte a 100 kPa (kPa)	Resistencia al Corte a 200 kPa (kPa)	Resistencia al Corte a 300 kPa (kPa)
Suelo Patrón	25	28	40.7	66.7	92.7
Suelo Experimental (3% CCC + 9% Cal)	38	32	55.6	81.2	106.8
Suelo Experimental (4% CCC + 12% Cal)	45	35	62.5	90.4	118.3

Fuente: Ensayo de CBR y propiedades mecánicas del suelo.

Figura 10

Resistencia al corte del suelo con diferentes estabilizaciones



Fuente: Ensayo de CBR y propiedades mecánicas del suelo

El análisis de la resistencia al corte del suelo permitió evaluar el efecto de la adición de ceniza de cola de caballo y cal en sus propiedades mecánicas. Se observó que el suelo patrón presentó los valores más bajos de resistencia, con 40.7 kPa a 100 kPa de presión normal, 66.7 kPa a 200 kPa y 92.7 kPa a 300 kPa, lo que indica una cohesión y un ángulo de fricción moderados en su estado natural.

Con la incorporación del 3% de ceniza y 9% de cal, la resistencia al corte experimentó un incremento significativo, alcanzando 55.6 kPa, 81.2 kPa y 106.8 kPa, respectivamente, en los mismos niveles de presión normal. Este comportamiento sugiere que la estabilización con estos aditivos favorece la interacción entre partículas del suelo, promoviendo una mayor cohesión y una mejor distribución de esfuerzos.

Por otro lado, la muestra con 4% de ceniza y 12% de cal presentó la mayor resistencia al corte, con 62.5 kPa, 90.4 kPa y 118.3 kPa, dependiendo de la carga aplicada. Este incremento indica que una mayor proporción de estabilizantes mejora sustancialmente la estructura interna del suelo, aumentando su capacidad para soportar esfuerzos cortantes sin deformaciones significativas.

Resultados mediante la interpretación estadística

Tabla 10

Prueba de normalidad de Shapiro – Wilk

Grupo	Estadístico	gl	p.
Suelo natural	0.997	3	0.998
3% CCC + 9% Cal	0.923	3	0.553
4% CCC + 12% Cal	0.970	3	0.881

Fuente: Elaboración propia

La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk indica que los datos de los tres grupos evaluados (suelo natural, 3% CCC + 9% Cal y 4% CCC + 12% Cal) presentan valores de p mayores a 0.05, lo que sugiere que no se rechaza la hipótesis nula de normalidad. Esto implica que los datos de resistencia al corte en cada grupo siguen una distribución normal, permitiendo el uso de pruebas paramétricas en los análisis posteriores.

Tabla 11*Prueba de ANOVA de un factor*

Estadístico	Resultado
Valor F	141.87
Valor p	4.46e-09 (p < 0.05)

Fuente: Elaboración propia

La prueba ANOVA de un factor revela un valor F de 141.87 y un valor p de 4.46e-09, el cual es significativamente menor a 0.05. Esto indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos evaluados (suelo natural, 3% CCC + 9% Cal y 4% CCC + 12% Cal) en términos de resistencia al corte. Por lo tanto, se justifica la aplicación de una prueba post hoc de Tukey para identificar entre qué grupos se presentan dichas diferencias.

Tabla 12*Prueba Poct Hoc de Tukey*

Grupo 1	Grupo 2	Media	P	Mínimo	máximo
3% CCC + 9% Cal	4% CCC + 12% Cal	20.0	0.00	16.5764	23.4236
3% CCC + 9% Cal	Suelo natural	-19.1	0.00	-22.5236	-15.6764
4% CCC + 12% Cal	Suelo natural	-39.1	0.00	-42.5236	-35.6764

Fuente: Elaboración propia

La prueba post hoc de Tukey permitió evaluar la existencia de diferencias significativas entre los grupos comparados. En primer lugar, se identificó una diferencia de 20.0 unidades entre los suelos tratados con 3% CCC + 9% Cal y 4% CCC + 12% Cal,

con un valor p de 0.00. Esta diferencia es significativa y sugiere que el aumento en la cantidad de ceniza de cola de caballo y cal contribuye a mejorar la resistencia del suelo. Además, el intervalo de confianza, que oscila entre 16.5764 y 23.4236, confirma que la variabilidad observada respalda este hallazgo.

Por otro lado, la comparación entre el suelo natural y el suelo tratado con 3% CCC + 9% Cal mostró una diferencia media de -19.1 unidades, con un valor p de 0.00. Esto indica una reducción significativa en la resistencia del suelo natural en comparación con el suelo modificado, lo que demuestra que la adición de ceniza de cola de caballo y cal mejora la capacidad de soporte del suelo. El intervalo de confianza para esta diferencia se encuentra entre -22.5236 y -15.6764, lo que refuerza la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Asimismo, se encontró una diferencia aún mayor al comparar el suelo natural con el suelo tratado con 4% CCC + 12% Cal, obteniéndose un valor de -39.1 unidades, con un valor p de 0.00. Este hallazgo sugiere que el tratamiento con la mayor proporción de aditivos mejora significativamente la resistencia del suelo, superando ampliamente al suelo sin modificaciones. El intervalo de confianza, ubicado entre -42.5236 y -35.6764, confirma que la variabilidad en los datos no afecta la validez de estos resultados.

Análisis y discusión

La investigación tuvo como objetivo evaluar la resistencia al corte de un suelo estabilizado con ceniza de cola de caballo y cal, comparando su desempeño con el suelo en estado natural. A partir de los ensayos realizados, se identificaron mejoras significativas en la estabilidad y capacidad de carga del suelo, las cuales fueron analizadas en función de sus propiedades mecánicas, composición química y comportamiento frente a la compactación.

El análisis de la resistencia al corte evidenció que el suelo en su estado natural presentó los valores más bajos, alcanzando 40.7 kPa, 66.7 kPa y 92.7 kPa a presiones normales de 100 kPa, 200 kPa y 300 kPa, respectivamente. Este comportamiento es característico de suelos con cohesión moderada y baja capacidad de soporte en su estado original. No obstante, con la incorporación del 3% de ceniza de cola de caballo y 9% de cal, la resistencia experimentó un incremento, registrando 55.6 kPa, 81.2 kPa y 106.8 kPa en los mismos niveles de presión. Finalmente, la mayor resistencia se observó en la muestra con 4% de ceniza y 12% de cal, cuyos valores alcanzaron 62.5 kPa, 90.4 kPa y 118.3 kPa, lo que demuestra que un mayor porcentaje de estabilizantes fortalece la estructura interna del suelo y su capacidad para resistir esfuerzos cortantes.

Estos hallazgos coinciden con la investigación de Hurtado y Ricra (2020), quienes evidenciaron que el uso de cal en porcentajes de 4%, 6% y 8% permitió mejorar la capacidad portante del suelo en la calle Wiracocha, aunque sin generar cambios significativos en su plasticidad. Asimismo, los resultados obtenidos guardan relación con el estudio de Huamallyalli y Méndez (2020), quienes determinaron que la aplicación de 8% de cal incrementó el valor del CBR en la subrasante, lo que optimizó la resistencia estructural del suelo tratado.

Para validar estadísticamente los resultados, se aplicó un análisis de varianza de un factor (ANOVA), cuyo valor F de 141.87 y un valor p de 4.46e-09 confirmaron la existencia de diferencias significativas entre los tres grupos evaluados. La prueba post hoc

de Tukey permitió identificar diferencias relevantes entre los suelos tratados. Se encontró que la diferencia entre las muestras con 3% de ceniza y 9% de cal y aquellas con 4% de ceniza y 12% de cal fue de 20.0 unidades ($p = 0.00$), con un intervalo de confianza entre 16.5764 y 23.4236. Esto indica que un mayor contenido de estabilizantes mejora sustancialmente la resistencia del suelo. Asimismo, se evidenció que el suelo natural presentó una resistencia inferior en comparación con las muestras estabilizadas, observándose una diferencia de -19.1 unidades con respecto al suelo tratado con 3% de ceniza y 9% de cal ($p = 0.00$) y una diferencia de -39.1 unidades con respecto al suelo con 4% de ceniza y 12% de cal ($p = 0.00$).

El análisis de la capacidad de carga a través del ensayo CBR permitió determinar que el suelo patrón presentó un CBR de 15.1% al 100% de la máxima densidad seca (MDS) y 13.1% al 95% MDS, valores característicos de suelos con resistencia moderada. Sin embargo, con la adición de 3% de ceniza de cola de caballo y 9% de cal, el CBR aumentó a 36.4% al 100% MDS y 27.6% al 95% MDS. El mayor incremento se evidenció en la muestra tratada con 4% de ceniza y 12% de cal, alcanzando un CBR de 44.1% al 100% MDS y 32.1% al 95% MDS, lo que demuestra que esta proporción optimiza la capacidad portante del suelo. Estos resultados concuerdan con el estudio de Enrique y Montes (2022), quienes determinaron que la estabilización de suelos arcillosos con 18% de residuos de concha de mejillón y 6% de cal viva permitió alcanzar valores óptimos de CBR al 95%.

Por otro lado, el análisis de compactación mediante el ensayo Proctor Modificado permitió identificar la variación de la densidad seca en función del contenido de humedad en los distintos suelos evaluados. Se observó que el suelo patrón alcanzó una densidad seca máxima de 1.570 g/cm³ con un contenido de humedad óptimo del 8.6%. En el caso del suelo tratado con 3% de ceniza y 9% de cal, se evidenció una ligera reducción en la densidad seca máxima (1.538 g/cm³) y un incremento en la humedad óptima (9.3%), lo que sugiere que la adición de los estabilizantes influye en la retención de agua y en la compactación del suelo. Finalmente, con 4% de ceniza y 12% de cal, la densidad seca

máxima alcanzó los 1.576 g/cm³ y la humedad óptima aumentó a 9.7%, indicando que esta proporción permite una mejor compactación del suelo.

En cuanto a la composición química de los estabilizantes utilizados, el análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) determinó que la ceniza de cola de caballo contiene 37.08% de dióxido de silicio (SiO₂) y 12.02% de óxido de calcio (CaO), lo que indica su potencial puzolánico. En el caso de la cal, se identificó un contenido de 85% de óxido de calcio (CaO) y 92% de carbonato de calcio (CaCO₃), lo que confirma su alta pureza y reactividad en la estabilización del suelo. Asimismo, el análisis térmico diferencial (ATD) permitió identificar la temperatura óptima de calcinación de la ceniza de cola de caballo entre 400°C y 600°C, asegurando la eliminación de materia orgánica sin afectar la estabilidad mineral del material.

Estos hallazgos coinciden con la investigación de Vargas, Ore y Paz (2022), quienes evaluaron la incorporación de ceniza de cola de caballo en morteros y determinaron que dosificaciones entre 7% y 9% generaron los mayores incrementos en la resistencia estructural. De manera similar, Ludeña (2020) encontró que la sustitución parcial del cemento con un 5% de ceniza de cola de caballo permitió mejorar la resistencia del concreto, mientras que proporciones superiores redujeron la compacidad del material.

En conclusión, los resultados obtenidos en la investigación evidencian que la adición de ceniza de cola de caballo y cal mejora significativamente la resistencia al corte, la capacidad de carga y la compactación del suelo. El análisis estadístico confirmó la existencia de diferencias significativas entre los grupos evaluados, lo que demuestra que una mayor proporción de estabilizantes optimiza las propiedades mecánicas del suelo. Además, la comparación con antecedentes previos permitió contextualizar los hallazgos y reforzar la validez de los resultados obtenidos.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Se determinó que la temperatura óptima de calcinación de la ceniza de cola de caballo se encuentra entre 400°C y 600°C, asegurando la eliminación de materia orgánica sin alterar la estabilidad mineral.

El análisis químico confirmó que la ceniza de cola de caballo contiene 37.08% de SiO₂ y 12.02% de CaO, mientras que la cal presenta 85% de CaO y 92% de CaCO₃, garantizando su pureza y reactividad.

La compactación del suelo mostró que la adición de **4% de ceniza y 12% de cal** permitió alcanzar la mayor densidad seca máxima (1.576 g/cm³) y **un** contenido óptimo de humedad (9.7%), favoreciendo la estabilización del material.

La capacidad de carga del suelo mejoró significativamente con los estabilizantes, aumentando el CBR de 15.1% a 44.1% al 100% MDS, lo que indica una mayor resistencia y soporte estructural.

La resistencia al corte incrementó con la adición de estabilizantes, aumentando la cohesión de 25 kPa a 45 kPa y **el** ángulo de fricción de 28° a **35°**, lo que evidencia una mayor estabilidad del suelo tratado.

Se encontraron diferencias significativas entre los grupos evaluados, confirmando que el suelo tratado con 4% de ceniza y 12% de cal presentó la mayor resistencia mecánica, consolidándose como la mejor opción para mejorar las propiedades del suelo.

Recomendaciones

Optimizar la temperatura de calcinación de la ceniza de cola de caballo dentro del rango de 400°C a 600°C para garantizar su estabilidad y reactividad.

Utilizar la combinación de 4% de ceniza y 12% de cal en suelos de baja resistencia, ya que mejora significativamente la estabilidad y capacidad de carga.

Aplicar ensayos adicionales a largo plazo para evaluar el comportamiento del suelo estabilizado frente a factores ambientales y variaciones en la humedad.

Considerar la implementación de este tratamiento en proyectos de infraestructura vial y cimentaciones donde se requiera mejorar la resistencia del suelo.

Ampliar la investigación con diferentes porcentajes de ceniza y cal para determinar el equilibrio óptimo entre estabilidad y costos de aplicación.

Agradecimientos

Se expresa un profundo agradecimiento a la institución académica y al equipo de investigación que brindaron el apoyo necesario para la realización de este estudio. Asimismo, se reconoce la valiosa colaboración de los profesionales y docentes que aportaron sus conocimientos y experiencia en el desarrollo del trabajo.

Se extiende un especial agradecimiento a las personas y entidades que facilitaron el acceso a los materiales y equipos utilizados en los ensayos de laboratorio. Su disposición y compromiso fueron fundamentales para alcanzar los objetivos propuestos.

Finalmente, se agradece a la familia y amigos por su apoyo incondicional durante el proceso de investigación, cuya motivación y aliento hicieron posible la culminación de este estudio.

Referencias bibliográficas

- ASTM D2216. (2019). *Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass*. ASTM International.
- Bowles, J. E. (1984). *Physical and geotechnical properties of soils*. McGraw-Hill.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2021). *Materials science and engineering: An introduction*. Wiley.
- Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica – CONCYTEC. (2019). *Código nacional de la integridad científica*. Disponible en <https://portal.concytec.gob.pe/images/publicaciones/rp-192-2019-concytec-pr.pdf>
- Corzo, A. (2019). *Resistencia de ladrillos con sustitución del cemento por híbrido de cenizas de cola de caballo y conchas de abanico en un 15% y 20%* (Tesis de licenciatura). Universidad San Pedro, Chimbote. Disponible en http://repositorio.usanpedro.pe/bitstream/handle/USANPEDRO/12467/Tesis_62439.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Chávez, A., & Odar, G. (2019). *Propuesta de estabilización de suelos con cal para subrasante con presencia de suelos arcillosos en bofedales y su influencia en pavimento rígido bajo metodología de diseño ASSHTO 93 aplicado al tramo 1 de la carretera Oyon - Ambo* (Tesis de licenciatura). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima. Disponible en https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/625903/Ch%C3%A1vez_Ad.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Craig, R. F. (2021). *Soil mechanics*. CRC Press.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2020). *Principles of geotechnical engineering*. Cengage Learning.

- Enrique, Z., & Montes, C. (2022). *Estabilización de suelos arcillosos mediante residuos de conchas de mejillón y cal viva en el sector vial de Paria-Recrish-Ancash* (Tesis de licenciatura). Universidad César Vallejo, Huaraz. Disponible en <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/102116>
- Hernández-Sampieri, R., & Torres, C. (2018). *Metodología de la investigación* (Vol. 4). McGraw-Hill Interamericana.
- Hernández, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill.
- Huamallyalli, J., & Méndez, K. (2020). *Diseño de pavimento estabilizando la subrasante con cal y cemento en asentamiento humano ampliación La Unión, Chimbote – 2020* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional del Santa, Chimbote. Disponible en <https://repositorio.uns.edu.pe/handle/20.500.14278/4301>
- Huang, Y. H. (2021). *Pavement analysis and design*. Pearson.
- Hurtado, E., & Ricra, R. (2020). *Aplicación de cal para mejorar la estabilidad de la subrasante en la calle Wiracocha, distrito y provincia de Andahuaylas, 2020* (Tesis de licenciatura). Universidad César Vallejo. Disponible en <https://hdl.handle.net/20.500.12692/59175>
- López, J., & Ortiz, G. (2018). *Estabilización de los suelos arcillosos con cal para el tratamiento de la subrasante en las calles de la urbanización San Luis de la ciudad de Abancay* (Tesis de licenciatura). Universidad Tecnológica de los Andes, Apurímac. Disponible en <https://repositorio.utea.edu.pe/handle/utea/152>
- Ludeña, M. (2020). *Resistencia del concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ sustituyendo el cemento por el 5% y 10% de ceniza de cola de caballo* (Tesis de licenciatura). Universidad San Pedro, Cambio Puente, Chimbote. Disponible en http://publicaciones.usanpedro.edu.pe/bitstream/handle/20.500.129076/20580/Tesis_66936.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2019). *Concrete: Microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education.
- Neville, A. M. (2020). *Properties of concrete*. Pearson.
- Parra, G. (2018). *Estabilización de un suelo con cal y ceniza volante* (Tesis de maestría). Universidad Católica de Colombia, Bogotá. Disponible en <https://hdl.handle.net/10983/22856>
- Pinzón, A. (2020). *Estabilización de materiales granulares remanentes con adición de cal en vías urbanas de Bogotá, D.C.* Unidad de Mantenimiento Vial. Disponible en <https://www.umv.gov.co/portal/wp-content/uploads/2020/06/Estabilizacion-MGR-con-Adicion-de-Cal-1.pdf>
- Pradena, M., Mery, G., & Novoa, P. (2010). Comportamiento de agentes estabilizantes en caminos no pavimentados sometidos a condiciones de hielo y nieve en zonas de montaña. *Revista de la Construcción*, 9(1), 4-14.
- Ramírez, J. (2019). Metodología de la investigación. *Revista Manuela Ramírez*, 38(1), 51-62.
- Rezabala, D., & Ortiz, E. (2023). Propuesta de estabilización con cal y cemento para subrasante con presencia de suelos arcillosos ubicada en la vía Tosagua-Chone sector Bachillero – Ecuador. *Revista Científica Dominio de las Ciencias*, 3, 1-15. Disponible en <https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/3534/7805>
- Rivera, J., Martínez, L., & Gómez, A. (2020). Estabilización de suelos: bases teóricas y científicas. *Revista de Ingeniería Civil*, 15(2), 123-135.
- Segura, L., López, A., Romero, J., Salazar, D., & Urrutia, S. (2017). *Resistencia a la compresión de un mortero sustituyendo el cemento por cenizas de cola de caballo*

- y concha de abanico (Tesis de licenciatura). Universidad San Pedro. Disponible en <http://repositorio.usanpedro.edu.pe/handle/USANPEDRO/287>
- Smith, P., Brown, T., & Allen, R. (2021). *Soil: The foundation of agriculture*. Academic Press.
- Velásquez, O. (2021). *Estabilización de suelos arcillosos de subrasante incorporando cal y cloruro de sodio, carretera Titilaca – Santa Rosa, Puno, 2021* (Tesis de licenciatura). Universidad César Vallejo. Disponible en <https://hdl.handle.net/20.500.12692/79930>
- Vargas, L., Ore, J., & Paz, G. (2022). *Evaluación de propiedades del mortero incorporando ceniza de cola de caballo y hojas de espino para muros portantes, Ayacucho – 2022* (Tesis de licenciatura). Universidad César Vallejo. Disponible en <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/95571>
- Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (2015). *Principles of pavement design*. Wiley.
- Zambrano, T., & Zambrano, M. (2023). Estabilización de suelo con cal y cemento para el mejoramiento de subrasante. *Revista Científica Multidisciplinaria Arbitrada Yachasun*, 7(13), 45-60. Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo. Disponible en <https://editorialibkn.com/index.php/yachasun/article/view/395/666>

ANEXO

Matriz de consistencia

Enunciado: Resistencia al Corte de un Suelo Adicionando Ceniza de Cola de Caballo y Cal en el A.A.H.H Los Jardines en Nuevo Chimbote – 2024.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	METODOLOGÍA
¿En qué medida se mejora la resistencia al corte de un suelo al adicionar ceniza de cola de caballo y cal en proporciones específicas (3% CCC + 9% Cal y 4% CCC + 12% Cal) en el A.A.H. Los Jardines de Nuevo Chimbote, 2024?	<p>Objetivo general: Determinar la resistencia al corte de un suelo al adicionar ceniza de cola de caballo y cal en proporciones específicas (3% CCC + 9% Cal y 4% CCC + 12% Cal) en el A.A.H. Los Jardines, Nuevo Chimbote, 2024, evaluando su influencia en la mejora de las propiedades mecánicas del suelo.</p> <p>Objetivos específicos: Evaluar la temperatura óptima de calcinación de la cola de caballo mediante el ensayo de Análisis Térmico Diferencial (ATD). Analizar la composición química de la ceniza de cola de caballo y la cal mediante el ensayo de Fluorescencia de Rayos X (FRX). Determinar la máxima densidad seca y el contenido de humedad óptimo del suelo patrón y los suelos experimentales utilizando el ensayo Proctor Modificado. Evaluar la resistencia y capacidad de carga del suelo patrón y de los suelos experimentales mediante el ensayo de CBR. Determinar la resistencia al corte del suelo natural y del suelo con la adición de ceniza de cola de caballo en proporciones del 3% y 4%, y cal. Comparar los resultados de la resistencia al corte para identificar la relación y variación entre el suelo natural y el suelo con la adición de ceniza de cola de caballo y cal.</p>	<p>H1 La adición de ceniza de cola de caballo y cal en proporciones de (3% CCC + 9% Cal) y (4% CCC + 12% Cal) mejorará significativamente la capacidad de soporte del suelo.</p> <p>Ho La adición de ceniza de cola de caballo y cal en proporciones de (3% CCC + 9% Cal) y (4% CCC + 12% Cal) no mejorará significativamente la capacidad de soporte del suelo.</p>	<p>Enfoque: Cuantitativo Tipo: aplicado Diseño: Cuasi experimental Población 20 muestras. muestra: 20 muestras. Técnica e instrumento: observación guía de observación Análisis de datos: . SPSS – procesamiento -Excel (Base datos) - Estadística inferencial: Tablas y figura de frecuencia y porcentaje</p>

Fuente: *Elaboración propia.*

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA
<p>DEPENDIENTE</p> <p>Resistencia al corte de un suelo</p>	<p>La resistencia al corte de un suelo es su habilidad para soportar fuerzas que intentan deslizar sus capas. Depende de la unión entre partículas y la fricción interna, y se mide con parámetros como el CBR, que evalúa la capacidad del suelo para soportar carga bajo condiciones determinadas (MTC, 2014; Das & Sobhan, 2020).</p>	<p>La variable se evaluará sumergiendo un molde en agua, asegurando su cobertura total. Luego, se instalará un trípode con un extensómetro para obtener la lectura inicial. Después, se realizará el ensayo de CBR para medir la resistencia al corte del suelo en condiciones controladas de densidad y humedad.</p>	<p>Se obtiene relación para cierta profundidad dentro de la muestra compactada del suelo</p>	<p>Respecto a las cargas unitarias del patrón (lbs/pul².)</p>	<p>Tipo de variable:</p> <p>Variable cuantitativa .</p> <p>por su escala de medición:</p> <p>por intervalo y por razón</p>

<p>INDEPENDIENTE</p> <p>Dosificaciones en mezclas del suelo con cenizas de cola de caballo y cal.</p>	<p>El diseño de mezcla de suelo implica preparar y analizar una muestra representativa del terreno, teniendo en cuenta sus diferentes capas, para asegurar su idoneidad en proyectos de infraestructura. Según el MTC (2014), para carreteras de tercera clase, se deben realizar dos calicatas por kilómetro, de las cuales se extraen tres muestras de mezcla por calicata.</p>	<p>La variable "Ceniza de cola de caballo y cal" se evaluará a través de un proceso controlado en el que la ceniza de cola de caballo se obtiene mediante calcinación, produciendo un subproducto con propiedades puzolánicas y altas concentraciones de sílice.</p>	<p>Diseño de mezcla de suelo (patrón)</p> <p>Dosificación con adición 3% de ceniza de cola de caballo y 9% de cal</p> <p>Dosificación con adición 4% de la de ceniza de cola de caballo y 12% de cal</p>	<p>Proporción (3% y 9%) de la ceniza de cola de caballo respecto al peso del suelo.</p> <p>Proporción (4% y 12) de la cal respecto al peso del suelo.</p>	<p>Tipo de Variable:</p> <p>Variable Cuantitativa.</p> <p>Por su Escala de Medición:</p> <p>Por Intervalo y por</p>
--	---	--	--	---	---

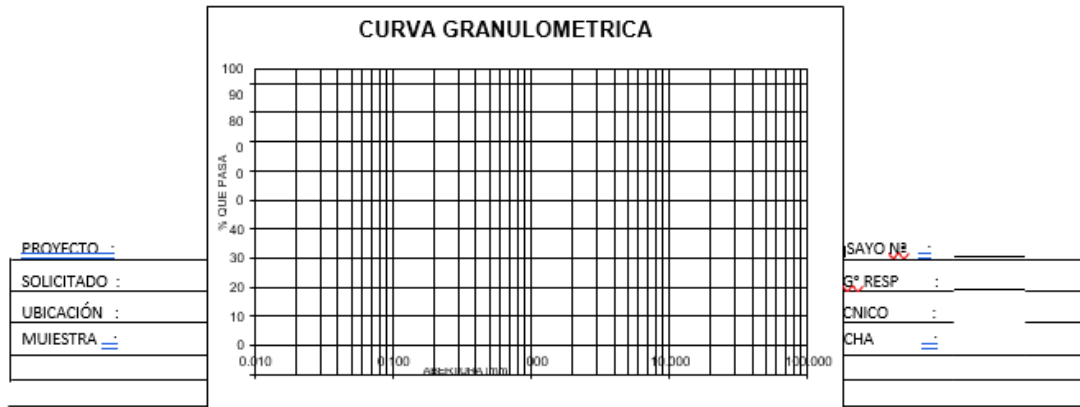
ANEXO 2:**ANÁLISIS DE SUELOS**

SOLICITA:
PROYECTO:
LUGAR:
FECHA:
CALICATA:
ESTRATO:
PROF. (m):

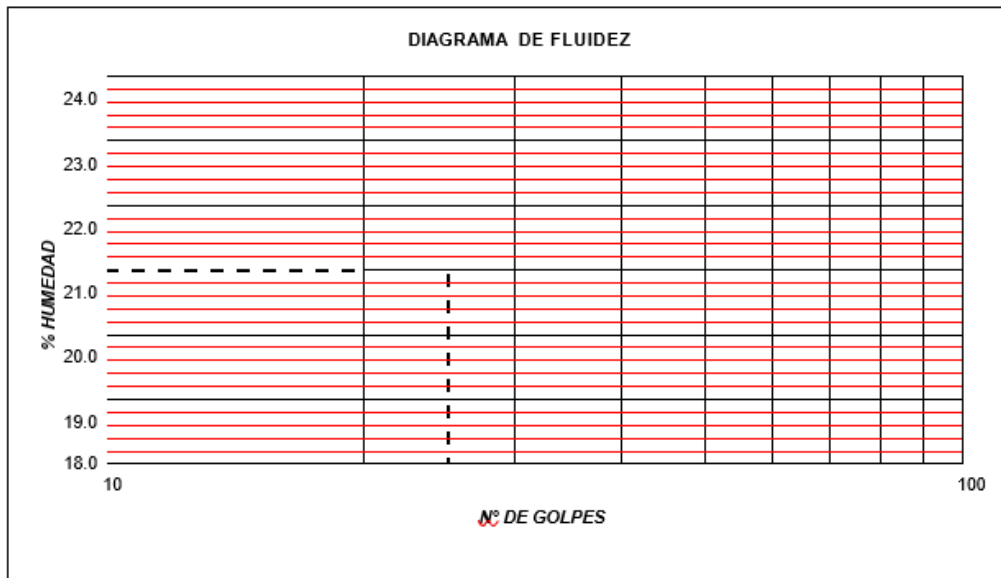
TAMIZ	N°	ABERT. (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
3"		76.2				
2 1/2"		63.5				
2"		50.8				
1 1/2"		38.1				
1"		25.4				
3/4"		19.1				
1/2"		12.7				
3/8"		9.52				
1/4"		6.35				
N° 4		4.76				
N° 10		2				
N° 20		0.84				
N° 30		0.59				
N° 40		0.42				
N° 60		0.25				
N° 100		0.149				
N° 200		0.074				
PLATO						
TOTAL						

Observaciones adicionales:

- Límite Líquido (%):
- Límite Plástico (%):
- Índice de Plasticidad (%):
- Humedad Natural (%):
- Clasificación SUCS:
- Clasificación AASHTO:



DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO	
	1	2	3	4	1	2
ENSAYO No.						
CÁPSULA No.						
PESO CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)						
PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)						
PESO AGUA (gr)						
PESO DE LA CÁPSULA (gr)						
PESO SUELO SECO (gr)						
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)						
NÚMERO DE GOLPES						



OBSERVACIONES =

RESULTADOS DE ENSAYOS

LÍMITE LÍQUIDO (%)		LÍMITE PLÁSTICO (%)		ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%)	

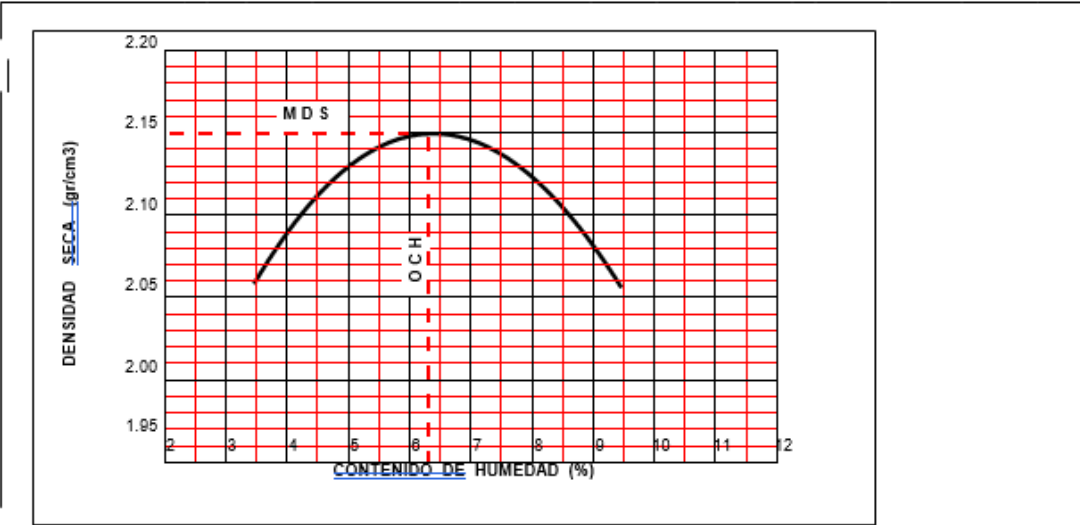
PROCTOR MODIFICADO

ASTM D-1557

PROYECTO	:	ENSAYO N ^o	:
SOLICITADO	:	ING. RESP.	:
PROCEDENCIA	:	EFECTUADO	:
MUESTRA	:	FECHA	:

- Número de golpes	- Peso del martillo (Kg)	- Volumen del molde (cm ³)
- Número de capas	- Altura de caída martillo (cm)	- Energía de compactación (Kg-cm/cm ³)

01 - Peso suelo húmedo + molde (gr)					
02 - Peso del molde (gr)					
03 - Peso suelo húmedo (gr) [01-02]					
04 - Volumen del molde (cm ³)					
05 - Densidad suelo húmedo (gr/cm ³) [03/04]					
06 - Tarro N ^o					
07 - Peso suelo húmedo + tarro (gr)					
08 - Peso suelo seco + tarro (gr)					
09 - Peso del agua (gr) [07-08]					
10 - Peso del tarro (gr)					
11 - Peso suelo seco (gr) [08-10]					
12 - Contenido de humedad (%) [09/11*100]					
13 - Promedio de humedad (%)					
14 - Densidad del suelo seco (gr/cm ³) [05*100/13+100]					



REPOSITORIO INSTITUCIONAL DIGITAL
FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN DE DOCUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

1. Información del Autor				
LUCI CAROLAY AGUIRRE GONZALES		46589615	Ag luci18@hotmail.com	
Apellidos y Nombres		DNI	Correo Electrónico	
2. Tipo de Documento de Investigación				
<input checked="" type="checkbox"/>	Tesis	<input type="checkbox"/>	Trabajo de Suficiencia Profesional	<input type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>	Trabajo Académico	<input type="checkbox"/>
			Trabajo de Investigación	
3. Grado Académico o Título Profesional ¹				
<input checked="" type="checkbox"/>	Bachiller	<input type="checkbox"/>	Título Profesional	<input type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>	Título Segunda Especialidad	<input type="checkbox"/>
			Maestría	<input type="checkbox"/>
			Doctorado	
4. Título del Documento de Investigación				
"Resistencia al corte de un suelo adicionando ceniza de cola de caballo y cal en el A.A.H.H Los Jardines en Nuevo Chimbote - 2024"				
5. Programa Académico				
INGENIERIA CIVIL				
6. Tipo de Acceso al Documento				
<input checked="" type="checkbox"/>	Abierto o Público ² (info:eu-repo/semantics/openAccess)	<input type="checkbox"/>		
		Acceso restringido ⁴ (info:eu-repo/semantics/restrictedAccess) ^(*)		
	Embargo (Máximo 24 meses) (info:eu-repo/semantics/embargoedAccess)	Fecha de Liberación de embargo: ____ / ____ / ____ (Formato: día / mes / año)		
(*) En caso de restringido y embargo sustentar motivo				

A. Originalidad del Archivo Digital

Por el presente dejo constancia que el archivo digital que entrego a la Universidad, es la versión final del trabajo de investigación sustentado y aprobado por el Jurado Evaluador y forma parte del proceso que conduce a obtener el grado académico o título profesional.

B. Otorgamiento de una licencia CREATIVE COMMONS⁵

El autor, por medio de este documento, autoriza a la Universidad, publicar su trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Institucional Digital, al cual se podrá acceder, preservar y difundir de forma libre y gratuita, de manera íntegra a todo el documento.⁶




Firma

Ciudad Día Mes Año
Chimbote. 30 Septiembre 2025

Importante

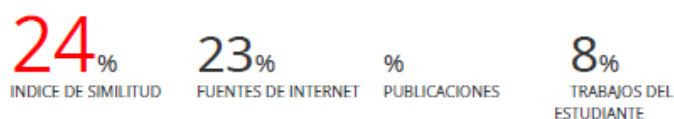
- Según Resolución de Consejo Directivo N° 033-2016-SUNEDU-CD, Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar Grados Académicos y Títulos Profesionales, Art 8, inciso 8.2.
- Ley N° 30035. Ley que regula el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto y D.S. 006-2015-PCM.
- Si el autor eligió el tipo de acceso abierto o público, otorga a la Universidad San Pedro una licencia no exclusiva, para que se pueda hacer arreglos de forma en la obra y difundir en el Repositorio Institucional Digital. Respetando siempre los Derechos de Autor y Propiedad Intelectual de acuerdo en el Marco de la Ley 822.
- En caso de que el autor elija la segunda opción, únicamente se publicará los datos del autor y resumen de la obra, de acuerdo a la directiva N° 004-2016-CONYTEC-DEG (Numerales 5.2 y 6.9) que norma el funcionamiento del Repositorio Nacional Digital.
- Las licencias Creative Commons (CC) es una organización internacional sin fines de lucro que pone a disposición de los autores un conjunto de licencias flexibles y de herramientas tecnológicas que facilitan la difusión de información, recursos educativos, obras artísticas y científicas, entre otros. Estas licencias también garantizan que el autor obtenga el crédito por su obra.
- Según el inciso 12.2 del artículo 12° del Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales -RENATI, "Las universidades, instituciones y escuelas de educación superior tienen como obligación registrar todos los trabajos de investigación y proyectos, incluyendo los metadatos en sus repositorios institucionales precizando así son de acceso abierto o restringido, los cuales serán posteriormente recolectados por el Repositorio Digital RENATI, a través del Repositorio ARIKAY."

Nota: - En caso de falsedad en los datos, se procederá de acuerdo a ley 6.097 27444, art. 32, n.ºm. 32.3).

Anexo 3. Turnitin

RESISTENCIA AL CORTE DE UN SUELO ADICIONANDO CENIZA DE COLA DE CABALLO Y CAL EN EL A.A.H.H LOS JARDINES EN NUEVO CHIMBOTE – 2024

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	7%
2	repositorio.usanpedro.edu.pe Fuente de Internet	3%
3	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	1%
5	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
6	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	<1%
7	www.umv.gov.co Fuente de Internet	<1%
8	Submitted to ucb Trabajo del estudiante	<1%
9	www.repositorio.unach.edu.pe Fuente de Internet	<1%
10	Submitted to Universidad Ricardo Palma Trabajo del estudiante	<1%
11	Submitted to Universidad San Ignacio de Loyola Trabajo del estudiante	<1%

12	repositorio.upla.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
13	repositorio.uandina.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
14	repositorio.unsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
15	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
16	www.gecgr.co.cu Fuente de Internet	<1 %
17	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
18	Submitted to Universidad Católica San Pablo Trabajo del estudiante	<1 %
19	Submitted to Universidad Privada San Pedro Trabajo del estudiante	<1 %
20	es.kindle-tech.com Fuente de Internet	<1 %
21	dspace.unach.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
22	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
23	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %
24	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
25	idoc.pub Fuente de Internet	<1 %
26	repositorio.uct.edu.pe Fuente de Internet	<1 %

27	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
28	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC Trabajo del estudiante	<1 %
29	Submitted to Universidad Militar Nueva Granada Trabajo del estudiante	<1 %
30	Submitted to Universidad San Francisco de Quito Trabajo del estudiante	<1 %
31	stutzartists.org Fuente de Internet	<1 %
32	cybertesis.uni.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
33	doczz.es Fuente de Internet	<1 %
34	dominiodelasciencias.com Fuente de Internet	<1 %
35	dspace.unitru.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
36	ociogune.unirioja.es Fuente de Internet	<1 %
37	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
38	Submitted to consultoriadeserviciosformativos Trabajo del estudiante	<1 %
39	Submitted to Universidad TecMilenio Trabajo del estudiante	<1 %
40	Submitted to Universidad Tecnica De Ambato- Direccion de Investigacion y Desarrollo , DIDE	<1 %

Trabajo del estudiante

41	repositorio.ulvr.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
42	patents.google.com Fuente de Internet	<1 %
43	doaj.org Fuente de Internet	<1 %
44	Submitted to Escuela Politecnica Nacional Trabajo del estudiante	<1 %
45	diposit.ub.edu Fuente de Internet	<1 %
46	repositorio.usmp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
47	publicaciones.usanpedro.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
48	revistascientificas.una.py Fuente de Internet	<1 %
49	Submitted to Universidad Privada del Norte Trabajo del estudiante	<1 %
50	es.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
51	es.unionpedia.org Fuente de Internet	<1 %
52	repositorio.uchile.cl Fuente de Internet	<1 %
53	www.repositorio.usac.edu.gt Fuente de Internet	<1 %
54	www.spanishdict.com Fuente de Internet	<1 %
55	Submitted to Mondragon Unibertsitatea Trabajo del estudiante	<1 %

56	Submitted to Universidad Andina del Cusco Trabajo del estudiante	<1 %
57	idus.us.es Fuente de Internet	<1 %
58	repositorio.utea.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
59	www.fumec.org Fuente de Internet	<1 %
60	1library.co Fuente de Internet	<1 %
61	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
62	www.fi-a.unam.mx Fuente de Internet	<1 %
63	www.jstage.jst.go.jp Fuente de Internet	<1 %
64	www.mazalan.com.ar Fuente de Internet	<1 %
65	bibliotecadigital.agronet.gov.co Fuente de Internet	<1 %
66	docshare.tips Fuente de Internet	<1 %
67	documents.mx Fuente de Internet	<1 %
68	fdocuments.es Fuente de Internet	<1 %
69	jscw.in Fuente de Internet	<1 %
70	pt.scribd.com Fuente de Internet	<1 %

71	repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
72	repository.udem.edu.co Fuente de Internet	<1 %
73	scielo.sld.cu Fuente de Internet	<1 %
74	trabajosuelos2019.site123.me Fuente de Internet	<1 %
75	vdocumento.com Fuente de Internet	<1 %
76	www.scielo.org.bo Fuente de Internet	<1 %
77	addi.ehu.es Fuente de Internet	<1 %
78	documentop.com Fuente de Internet	<1 %
79	pesquisa.bvsalud.org Fuente de Internet	<1 %
80	repositorio.undac.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
81	repositorio.unini.edu.mx Fuente de Internet	<1 %
82	repositorio.upt.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
83	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
84	repositorio.uta.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
85	revistas.ucsc.cl Fuente de Internet	<1 %

86	ri.uacj.mx Fuente de Internet	<1 %
87	sedici.unlp.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
88	tesisenred.net Fuente de Internet	<1 %
89	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	<1 %
90	www.clubensayos.com Fuente de Internet	<1 %
91	www.gtz.org.mx Fuente de Internet	<1 %
92	www.scielo.br Fuente de Internet	<1 %
93	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
94	www.uteg.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
95	mecanicadesuelos1unitec.wordpress.com Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas Apagado Excluir coincidencias < 6 words
 Excluir bibliografía Activo