

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Analizar la viabilidad del uso de conglomerantes hidráulicos en caminos rurales en Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Andrea Celeste Escalante Morales para optar el grado académico de Licenciada en Ingeniería Civil Industrial

Guatemala

2024

Analizar la viabilidad del uso de conglomerantes hidráulicos en caminos
rurales en Guatemala

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Analizar la viabilidad del uso de conglomerantes hidráulicos en caminos rurales en Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Andrea Celeste Escalante Morales para optar el grado académico de Licenciada en Ingeniería Civil Industrial

Guatemala

2024

Vo.Bo.:


(f) 

Ing. Alvaro José Rubio Hassler

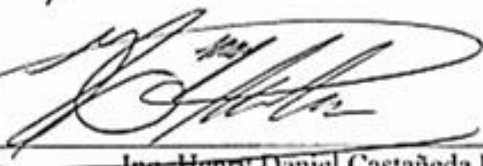
Tribunal Examinador:

(f) 

Ing. Alvaro José Rubio Hassler

(f) 

Ing. Andrés Fernando Herrera

(f) 

Ing. Henry Daniel Castañeda Reyes

Fecha de aprobación: Guatemala, 08 de enero de 2025.

PREFACIO

El desarrollo y mantenimiento de caminos rurales en Guatemala se ha convertido en un reto considerable, afectando directamente la conectividad y calidad de vida de numerosas comunidades. La búsqueda de nuevos métodos para estabilizar suelos y mejorar estas vías ha adquirido una relevancia, especialmente mediante el uso de materiales que ofrezcan durabilidad y sostenibilidad a largo plazo. En este contexto, los conglomerantes hidráulicos, como la cal y el cemento, se perfilan como una opción para mejorar la infraestructura rural, lo cual motivó mi interés en profundizar en este tema.

El objetivo principal de esta tesis es proporcionar una visión sobre las ventajas y limitaciones del uso de materiales como la cal y el cemento en la estabilización de suelos. Este trabajo no presenta resultados experimentales directos; en su lugar, se basa en un análisis basado en una amplia revisión de la literatura existente y en la comparación de datos técnicos.

Quiero aprovechar esta oportunidad para expresar mi agradecimiento a las personas que me han apoyado a lo largo de este proceso. En primer lugar, a Dios, por darme la fortaleza para enfrentar los desafíos y permitirme alcanzar esta meta. Al ingeniero Álvaro Rubio, por su guía y conocimientos, que fueron esenciales en el desarrollo de esta investigación. Finalmente, a mi familia, por su apoyo incondicional en todo momento.

CONTENIDO

PREFACIO	vi
LISTA DE CUADROS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE ACRÓNIMOS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN	2
III. OBJETIVOS	4
A. Objetivo general.....	4
B. Objetivos específicos	4
IV. MARCO TEÓRICO	5
A. Clasificación de la red vial de Guatemala.....	5
1. Según tipo de rutas.....	5
2. Jerarquía vial.....	6
3. Tipo de terreno y topografía	8
4. Tipo de rodadura	9
B. Generalidades de los caminos rurales	9
1. Diseño geométrico	9
2. Sección transversal.....	10
3. Capa de rodadura	11
C. Generalidades de los suelos en ingeniería	14
1. Tipos de suelos.....	14
2. Sistema de clasificación AASHTO.....	17
3. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).....	19
D. Conglomerantes hidráulicos.....	21
1. Componentes principales	21
2. Componentes adicionales.....	22

3.	Clasificación de los conglomerantes hidráulicos	22
E.	Tipos de estabilización de suelos	23
1.	Estabilización mecánica	24
2.	Estabilización física	25
3.	Estabilización química	26
F.	Estabilización de suelos con cemento	27
G.	Estabilización de suelos con cal	35
H.	Tipos de pavimentos	38
1.	Pavimento flexible	39
2.	Pavimento rígido	40
3.	Pavimento semirrígido	42
4.	Pavimento adoquinado	43
5.	Pavimento Unicapa de Alto Desempeño (PUAD)	44
I.	Factores de diseño de pavimentos	46
1.	Tránsito	46
2.	Propiedades del suelo	47
3.	Propiedades de los materiales	47
4.	Condiciones climáticas	47
5.	Confiabilidad	48
6.	Serviciabilidad	48
V.	METODOLOGÍA	49
VI.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	51
A.	Red vial de Guatemala	51
1.	Extensión y composición de la red vial	51
2.	Distribución de caminos rurales	53
3.	Estado de la red vial no pavimentada	54
4.	Conectividad y calidad vial	55
5.	Vulnerabilidad ante el cambio climático	57
6.	Suelos predominantes	57
7.	Recursos locales	58
8.	Fallas comunes en los caminos rurales	58
B.	Conglomerantes hidráulicos en infraestructura rural	63
1.	Aplicación del conglomerante hidráulico	63

2.	Estabilización de suelos con cemento.....	64
3.	Estabilización de suelos con cal.....	67
4.	Estabilización de suelos con cemento – cal	70
5.	Ciclo de vida	70
C.	Implementación de Pavimento Unicapa de Alto Desempeño (PUAD)	73
1.	Características técnicas	73
2.	Durabilidad y mantenimiento	73
3.	Desempeño en condiciones climáticas adversas.....	73
4.	Contribución a la seguridad vial	73
D.	Comparativa con el método tradicional	74
1.	Ventajas.....	74
2.	Impacto ambiental.....	75
VII.	DISCUSIÓN	78
VIII.	CONCLUSIONES.....	80
IX.	RECOMENDACIONES.....	81
X.	BIBIOGRAFÍA	82

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 Requisitos del diseño geométrico de caminos rurales.....	10
Cuadro 2 Granulometría de balasto según <i>Libro Azul de Caminos</i>	13
Cuadro 3 Clasificación AASHTO de los grupos A-1, A-2 y A-3.....	17
Cuadro 4 Clasificación AASHTO de los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7	17
Cuadro 5 Simbología utilizada en la clasificación SUCS.....	20
Cuadro 6 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.....	20
Cuadro 7 Requisitos mecánicos de los conglomerantes hidráulicos.....	23
Cuadro 8 Tipos de estabilización de suelos.	24
Cuadro 9 Aplicabilidad de los métodos de estabilización	24
Cuadro 10 Requisitos físicos del cemento para uso en estabilización	29
Cuadro 11 Requerimientos típicos de cemento según tipo de suelo	32
Cuadro 12 Resistencia a compresión mínima del suelo - cemento	33
Cuadro 13 Requisitos de los suelos a estabilizar con cal y/o cemento	37
Cuadro 14 Resistencia a compresión mínima de estabilización con cal	38
Cuadro 15 Características del suelo para implementar el PUAD	44
Cuadro 16 Muestreo de pruebas de control de calidad del PUAD.....	45
Cuadro 17 Escala de evaluación matriz Leopold.....	50
Cuadro 18 Composición de la red vial de Guatemala al año 2020	51
Cuadro 19 Distribución de la red vial de Guatemala según tipo de rodadura.....	52
Cuadro 20 Estado de la red vial no pavimentada.....	54
Cuadro 21 Análisis de aplicación de conglomerante hidráulico.....	64
Cuadro 22 Análisis del Ciclo de Vida del cemento en estabilización de suelos....	72
Cuadro 23 Comparación entre PUAD con Camino Rural con Balasto	74
Cuadro 24 Matriz de Leopold del proceso de colocación de balasto.....	76
Cuadro 25 Matriz de Leopold del pavimento unicapa de alto desempeño.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Sección transversal de corte en tangente en caminos rurales.	11
Figura 2 Tipos de capa de rodadura para caminos rurales.	11
Figura 3 Clasificación de suelos según el tamaño de sus partículas.	16
Figura 4 Rango del límite líquido y del índice de plasticidad.....	18
Figura 5 Carta de plasticidad de Casagrande.	21
Figura 6 Ejemplo de compactación de suelo – estabilización mecánica	25
Figura 7 Ejemplo de estabilización física – colocación de geomallas	26
Figura 8 Ejemplo de estabilización química – adición de cemento	27
Figura 9 Curva típica densidad-humedad suelo cemento	33
Figura 10 Estructura típica del pavimento flexible	39
Figura 11 Esquema del comportamiento del pavimento flexible.....	40
Figura 12 Estructura típica del pavimento rígido.....	41
Figura 13 Esquema del comportamiento del pavimento rígido	41
Figura 14 Esquema del comportamiento del pavimento semirrígido	42
Figura 15 Sección típica de un pavimento de adoquines	43
Figura 16 Composición de la Red Vial de Guatemala al año 2020	52
Figura 17 Distribución de caminos rurales totales por departamento.....	54
Figura 18 Propuesta de caminos rurales en Guatemala durante 2018-2032.	56
Figura 19 Comparación regional de la red vial en extensión y condición.	56
Figura 20 Niveles de vulnerabilidad de la infraestructura vial	58
Figura 21 Ejemplo de saturación de suelo en Guatemala	59
Figura 22 Construcción de tramo carretero con sección transversal incorrecta.....	60
Figura 23 Colapso de tramo carretero por fallas en drenaje	61
Figura 24 Ejemplo de polvo procedente del paso de vehículos	61
Figura 25 Camino rural con formación de baches	62
Figura 26 Ahuellamientos en camino de terracería.....	62
Figura 27 Agregado suelto y erosión de suelo en camino de terracería.....	63
Figura 28 Estado de distribución de esfuerzos según PCA.....	66
Figura 29 Variación de la plasticidad de un suelo estabilizado con cal	68
Figura 30 Variación de la resistencia a compresión de un suelo estabilizado	69
Figura 31 Ciclo de vida del cemento y cal en la estabilización de suelos	71

LISTA DE ACRÓNIMOS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ACI	American Concrete Institute
ACV	Análisis del Ciclo de Vida
ASTM	American Society for Testing and Materials
CA	Carretera Centroamericana
CBR	California Bearing Ratio
CR	Camino Rural
DGC	Dirección General de Caminos
INEC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
IP	Índice de Plasticidad
ISO	International Organization for Standardization
LL	Límite Líquido
LP	Límite Plástico
PCA	Portland Cement Association
PUAD	Pavimento Unicapa de Alto Desempeño
RN	Ruta Nacional
RD	Ruta Departamental
SNICC	Sistema Nacional de Información sobre Cambio Climático
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

RESUMEN

En el entorno del desarrollo de infraestructura vial en Guatemala, los caminos rurales desempeñan un papel importante en la conectividad y el acceso a servicios básicos para las comunidades rurales. Sin embargo, la mayoría de estos caminos enfrenta desafíos significativos en términos de durabilidad y mantenimiento, lo que impacta negativamente la calidad de vida de las poblaciones locales. Ante este contexto, el objetivo principal de este estudio es evaluar la viabilidad del uso de conglomerantes hidráulicos, específicamente la cal y el cemento, para la estabilización de los caminos rurales en Guatemala.

A través de una revisión de literatura existente y el análisis de datos secundarios, se identificaron problemáticas clave como la baja capacidad portante de los suelos y el impacto de condiciones climáticas adversas. Asimismo, se analizaron las propiedades técnicas de los conglomerantes, destacando aspectos como la cohesión, resistencia a la compresión, durabilidad, entre otras propiedades relevantes de cada material. Adicionalmente, se evaluó el impacto ambiental asociado al uso de estos materiales mediante herramientas como el análisis del ciclo de vida y la matriz de Leopold, con el fin de establecer una valoración sobre la interacción entre las acciones del proyecto y factores ambientales.

Como resultado, el análisis proporciona un marco de referencia técnico para la implementación de conglomerantes hidráulicos en la estabilización de suelos. Además, se establece una comparación entre el pavimento unicapa de alto desempeño y los caminos rurales de balasto, brindando una visión de alternativas para la construcción y mejora de la red vial rural en Guatemala.

ABSTRACT

In the context of road infrastructure development in Guatemala, rural roads play a significant role in connectivity and access to basic services for rural communities. However, most of these roads face significant challenges in terms of durability and maintenance, which negatively affect the quality of life of local populations. In this context, the main objective of this study is to evaluate the feasibility of using hydraulic binders, specifically lime and cement, for the stabilization of rural roads in Guatemala.

Through a review of existing literature and the analysis of secondary data, key issues were identified, such as the low load-bearing capacity of soils and the impact of adverse climatic conditions. Additionally, the technical properties of hydraulic binders were analyzed, highlighting aspects such as cohesion, compressive strength, durability, and other relevant characteristics of each material. Furthermore, the environmental impact associated with the use of these materials was assessed using tools such as life cycle analysis and the Leopold matrix to evaluate the interaction between project activities and environmental factors.

As a result, the analysis provides a technical framework for the implementation of hydraulic binders in soil stabilization. Moreover, it offers a comparison between high-performance single-layer pavement and rural ballast roads, providing a perspective on alternatives for the construction and improvement of the rural road network in Guatemala.

I. INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial en Guatemala enfrenta diferentes retos, especialmente en las áreas rurales, donde gran parte de las rutas no están pavimentadas y se encuentran en condiciones deficientes. Esta problemática afecta la conectividad y dificulta el acceso a servicios básicos, limitando el desarrollo económico y social de las comunidades más alejadas. Ante estas limitaciones, se hace necesario implementar estrategias que mejoren la durabilidad y funcionalidad de los caminos rurales.

En este contexto, el uso de conglomerantes hidráulicos se presenta como una propuesta para la estabilización de suelos y la mejora de la durabilidad de las vías no pavimentadas. Estos materiales han sido ampliamente utilizados en diversas regiones del mundo, debido a su capacidad para mejorar las propiedades mecánicas del suelo. Entre los beneficios destacan el incremento en la resistencia a la compresión y la cohesión del suelo, factores que aumentan su capacidad portante y disminuyen su vulnerabilidad a la erosión.

A partir de esta premisa, el propósito de este trabajo de investigación es evaluar la viabilidad del uso de cal y cemento en la estabilización de suelos para caminos rurales en Guatemala. Para ello, se realizó una revisión de la literatura existente y un análisis de datos técnicos secundarios. Este enfoque permite identificar tanto las ventajas como las limitaciones de la aplicación de conglomerantes hidráulicos, con el objetivo de proponer un marco de referencia que facilite la planificación de futuros proyectos de mejora vial en las zonas rurales del país.

Como complemento, se incluye una comparación con el método tradicional utilizado para la construcción de los caminos rurales, proporcionando un panorama sobre las opciones que pueden adaptarse a las necesidades locales. La correcta elección del material es un factor clave para el éxito de estas intervenciones, ya que depende de variables como la disponibilidad local, el tipo de tráfico esperado, las características del suelo y la durabilidad requerida.

II. JUSTIFICACIÓN

Guatemala se caracteriza por su variada topografía y condiciones climáticas cambiantes, lo que plantea importantes desafíos para la construcción y mantenimiento de su infraestructura vial. Actualmente, alrededor del 58% de la red vial nacional está constituida por carreteras no pavimentadas, y el 28% corresponde a caminos rurales (Dirección General de Caminos, 2018). Estas cifras evidencian la urgente necesidad de implementar un plan de acción estratégico para abordar las limitaciones de estos caminos, que son fundamentales para la conectividad y el desarrollo de las comunidades rurales.

Los caminos rurales desempeñan un papel estratégico en la economía del país al conectar sectores clave, como el agrícola, minero y forestal, con rutas principales y mercados regionales. Sin embargo, el deterioro progresivo de estas vías afecta negativamente la competitividad de las zonas rurales, limitando las oportunidades de desarrollo económico y social. Factores como la variabilidad climática, la falta de planificación estratégica, el mantenimiento inadecuado y los recursos locales limitados son obstáculos recurrentes que agravan esta problemática.

En este contexto, una alternativa posible para abordar estos desafíos es la estabilización del suelo mediante el uso de conglomerantes hidráulicos, como la cal y el cemento. Estos materiales se caracterizan por mejorar las propiedades mecánicas del suelo, debido a su capacidad para reaccionar químicamente al entrar en contacto con agua y suelo. Este proceso incrementa la capacidad de soporte, reduce la plasticidad y refuerza la resistencia frente a las variaciones climáticas.

Por otro lado, el pavimento unicapa de alto desempeño surge como una alternativa innovadora que complementa las estrategias de mejora vial. Este sistema combina un diseño estructural simplificado con la eficiencia del Cemento Portland, ofreciendo una solución adaptable a las condiciones geográficas y climáticas del país. Su capacidad para soportar cargas y su bajo costo de mantenimiento lo convierten en una opción para áreas

con recursos limitados.

El análisis de las propiedades del cemento y la cal, junto con la evaluación de sistemas como el pavimento unicapa, es esencial para tomar decisiones informadas que promuevan la implementación de soluciones más eficientes. La investigación en este ámbito no solo responde a los retos actuales de la infraestructura vial rural, sino que también fomenta a la adopción de tecnologías adaptadas a las condiciones locales. De esta manera, contribuir al fortalecimiento de la conectividad, el desarrollo económico y la integración social de las comunidades rurales en Guatemala.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Evaluar la viabilidad del uso de conglomerantes hidráulicos para la estabilización de suelos y mejora en caminos rurales en la zona rural de Guatemala.

B. Objetivos específicos

- Identificar los principales retos y dificultades que se pueden presentar en los caminos rurales.
- Evaluar las ventajas del uso de conglomerantes hidráulicos en la estabilización del suelo.
- Investigar el impacto ambiental de la aplicación de estos materiales en las rutas no pavimentadas.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Clasificación de la red vial de Guatemala

Una carretera es una vía de comunicación terrestre para el tránsito de vehículos, que está acondicionada dentro de una franja de terreno denominada derecho de vía. Son esenciales para la conectividad y el transporte en una región, facilitando la movilidad de las personas, mercancías y servicios (Cárdenas, 2002).

En Guatemala, la red vial se clasifica en diferentes categorías según criterios como jerarquía vial, función, competencia y características técnicas.

1. Según tipo de rutas

Es la red vial que se basa en mantener la conectividad tanto a nivel regional como nacional, facilitando el desarrollo económico y social del país. Se definen de acuerdo con criterios de funcionalidad y la administración a cargo del sistema de transporte.

a. Rutas Centroamericanas (CA)

Son rutas de primer orden con un alto nivel de servicio, que forman parte de la red de carreteras que conectan a Guatemala con los países vecinos de Centroamérica, como El Salvador, Honduras y Belice. En particular, las rutas primarias se entrelazan con los corredores regionales de las fronteras, o atraviesan el país longitudinal o transversalmente, facilitando el comercio internacional y la movilidad de personas entre países vecinos (Dirección General de Caminos, 2018).

b. Rutas Nacionales (RN)

Son clasificadas como rutas de primer orden con derecho de vía de 25.00 metros, encargadas de interconectar cabeceras departamentales de Guatemala con cabeceras municipales. También se consideran red auxiliar para conectar rutas centroamericanas con puertos comerciales del país

(Dirección General de Caminos, 2018).

c. Rutas Departamentales (RD)

Estas rutas se clasifican de segundo orden, cuentan con un derecho de vía de 20.00 metros. Son las que conectan departamentos entre sí y sirven como conexiones importantes para el transporte local. Además, fortalece aún más la conectividad interna, al interconectar cabeceras municipales con rutas centroamericanas y nacionales (Dirección General de Caminos, 2018).

d. Caminos rurales (CR)

Son vías diseñadas específicamente para conectar a las comunidades rurales de los distintos municipios. Se concentran con un volumen de tránsito considerablemente bajo, con una capa rodadura de terracería y un ancho de 4 metros (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente -IARNA-, 2013).

2. Jerarquía vial

Esta clasificación de carreteras se genera en tres niveles: rutas primarias, secundarias y terciarias. Estas categorías se integran con las rutas centroamericanas, rutas nacionales y rutas departamentales, creando un sistema de conexión vial basado en aspectos estratégicos de comunicación (Dirección General de Caminos, 2014).

a. Red vial primaria

La red primaria facilita y fortalece la comunicación directa entre las diferentes regiones del país. Entre los componentes más importantes de esta red se encuentran las carreteras que conectan a Guatemala con países vecinos, que permiten el comercio exterior y la integración regional. Está conformada por las rutas centroamericanas, tramos específicos de rutas nacionales y departamentales, y la Franja Transversal del Norte (Dirección General de Caminos, 2014).

b. Red vial secundaria

Se ocupan de la conectividad regional y local en Guatemala. Esta red está orientada a mejorar la comunicación hacia y desde los principales centros de población y producción, formando así una red complementaria y/o alternativa a la red vial primaria (Dirección General de Caminos, 2014).

c. Red vial terciaria

Con relación a la red terciaria, esta conecta las comunidades que están aisladas del resto del país. Estas vías buscan que las comunidades rurales tengan acceso a servicios como la educación y la atención médica. Los caminos terciarios son especialmente importantes en áreas montañosas y boscosas, donde la topografía hace que la construcción de carreteras sea un desafío (Dirección General de Caminos, 2014).

d. Red rural

Los caminos rurales son clave para el desarrollo socioeconómico de las zonas rurales y la conectividad territorial. Estas vías son carreteras no pavimentadas y de bajo volumen de tránsito, que conectan pequeñas localidades y áreas rurales, proporcionando acceso a servicios básicos como salud, educación y mercados para la población rural. Además, son la conexión de varios sectores como: agrícolas, mineras y forestales con rutas principales y mercados regionales (Pérez G. , 2021).

e. Red prioritaria peatonal

Consiste en un sistema diseñado para garantizar la sostenibilidad y accesibilidad en el desplazamiento de personas dentro del entorno urbano. Incluye recorridos peatonales y señalización adecuada para asegurar un transporte seguro en las vías públicas del país. Se centra en áreas turísticas, educativas, ambientales y de uso cotidiano, facilitando el acceso a bienes y servicios (Velásquez, 2011).

3. Tipo de terreno y topografía

Existen criterios generales relacionados con la topografía que se consideran en el diseño geométrico de las carreteras.

a. Terreno plano

Las carreteras tienen alineamientos rectos y pendientes suaves que permite que los vehículos pesados puedan mantener una velocidad constante y similar a la de los vehículos livianos. Se caracteriza por tener pendientes longitudinales menores al 3% (AECID, 2011).

b. Terreno ondulado

Presentan curvas amplias y pendientes moderadas que son ascendentes y descendentes, lo cual obliga que los vehículos tengan que reducir velocidades en las pendientes longitudinales que se encuentran entre el 3% y 6% (AECID, 2011).

c. Terreno montañoso

Tienen curvas cerradas, pendientes pronunciadas y requieren grandes movimientos de tierra durante su construcción. Sus pendientes longitudinales predominantes se encuentran entre el 6% y el 8% (AECID, 2011).

d. Terreno escarpado

Es la combinación de alineamientos horizontal y vertical. Este tipo de terreno demanda el mayor movimiento de tierras durante la construcción, presentando retos para el trazado y explanación. Estas vías suelen tener pendientes longitudinales superiores al 8% (Cárdenas, 2002).

4. Tipo de rodadura

La clasificación de las carreteras según su transitabilidad se basa en las condiciones de la vía y su capacidad para permitir el paso de vehículos en diferentes circunstancias.

a. Terracería

Estas vías presentan una superficie hasta nivel de la subrasante, es decir, cuya superficie de rodadura está constituida por suelo natural. Este tipo de caminos se caracterizan por no tener una capa de rodadura impermeable o consolidada, lo que los hace susceptibles a deteriorarse bajo condiciones climáticas adversas, como lluvias intensas, y son comunes en zonas rurales o de bajo tráfico (Cardona H. , 2018).

b. Revestida

Son las carreteras que cuentan con una superficie mejorada con materiales como grava compactada o mezclas estabilizadoras que proporcionan una capa más uniforme y resistente que las de terracería. Aunque no alcanzan el nivel de funcionalidad y calidad de las pavimentadas (Cardona H. , 2018).

c. Pavimentada

Es cuando se tiene una superficie de rodadura hecha de materiales pavimentados, como asfalto o concreto, lo que permite una vía funcional y segura en la mayoría de las condiciones climáticas (Cardona H. , 2018).

B. Generalidades de los caminos rurales

1. Diseño geométrico

Se enfoca en la planificación y disposición de los elementos que componen una vía, adaptándose a las características del terreno y las necesidades de las comunidades rurales. Estos caminos, se caracterizan principalmente por bajo volumen de tránsito, y que se diseñan para velocidades entre 20 y 40 km/h, con un ancho de calzada reducido, que varía entre 4 y 6 metros.

Las pendientes longitudinales se adaptan a la topografía, manteniéndose por debajo del 8% en terrenos planos y llegando hasta el 12% en zonas montañosas. Los radios de curvatura suelen ser mayores para permitir maniobras seguras en zonas de pendientes pronunciadas. El uso del peralte, con valores entre el 6% y 8%, mejora el tránsito en curvas, contrarrestando las fuerzas centrífugas (Dirección General de Caminos, 2002).

Como señala el documento de “Especificaciones Técnicas para la Construcción de Caminos Rurales en Guatemala (2002)”, El diseño geométrico de los caminos rurales debe adaptarse a las condiciones del terreno y considerar varios factores clave para garantizar su funcionalidad y seguridad.

Aspecto de diseño	Características
Velocidad de diseño	
≠ terreno plano	40 km/hora
≠ terreno ondulado	30 km/hora
≠ terreno montañoso	20 km/hora
Pendiente	
≠ terreno plano	6%
≠ terreno ondulado	8%
≠ terreno montañoso	12%
Curvatura	
≠ terreno plano	radio mínimo 47 metros
≠ terreno ondulado	radio mínimo 30 metros
≠ terreno montañoso	radio mínimo 18 metros
Ancho de corona	4.00 metros
Ancho de capa de rodadura	3.60 metros
Hombros	no se construyen
Bombeo	3% a 5%
Tipos de drenaje	drenajes transversales
Capa de rodadura	10 - 20 cm. de grava
Tránsito promedio diario	100 vehículos
Cambia vía (ensanchamientos)	Cada 300 metros en terrenos planos y dependiendo de la visibilidad, topografía y volumen de tránsito. Quedará a criterio del proyectista en terrenos ondulados y montañosos.

Cuadro 1. Requisitos del diseño geométrico de caminos rurales
Fuente: (Dirección General de Caminos, 2002)

2. Sección transversal

La sección transversal de un camino rural consiste en la disposición en corte vertical de sus componentes principales, incluyendo la calzada, cunetas, bermas y taludes. La calzada, está diseñada para soportar el tránsito local y tiene una pendiente transversal para el drenaje. Las cunetas laterales facilitan la evacuación del agua de lluvia, mientras que las bermas y los taludes se diseñan según el tipo de suelo, con inclinaciones que varían para asegurar la estabilidad estructural y la seguridad del camino, adaptándose a las características topográficas y

geotécnicas del terreno (Dirección General de Caminos, 2002).

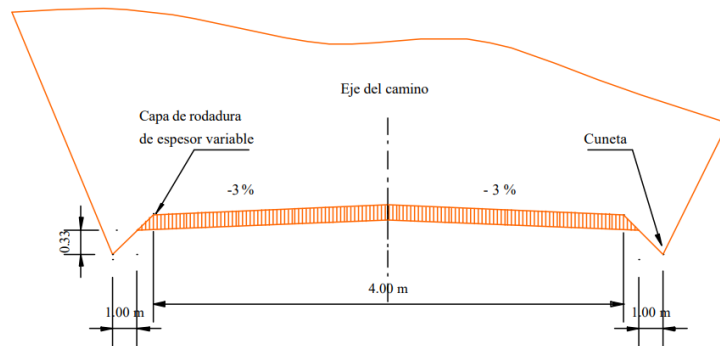


Figura 1. Sección transversal de corte en tangente en caminos rurales
Fuente: (Dirección General de Caminos, 2002)

3. Capa de rodadura

Las capas de rodadura en caminos rurales comúnmente son de materiales económicos como terracería, grava o una mezcla de materiales granulares compactados. En algunos casos, cuentan con un tratamiento superficial si el tráfico o las condiciones climáticas lo requieren. La selección de la capa de rodadura depende del tránsito, el clima, y los recursos disponibles para mantenimiento (Dirección General de Caminos, 2018).

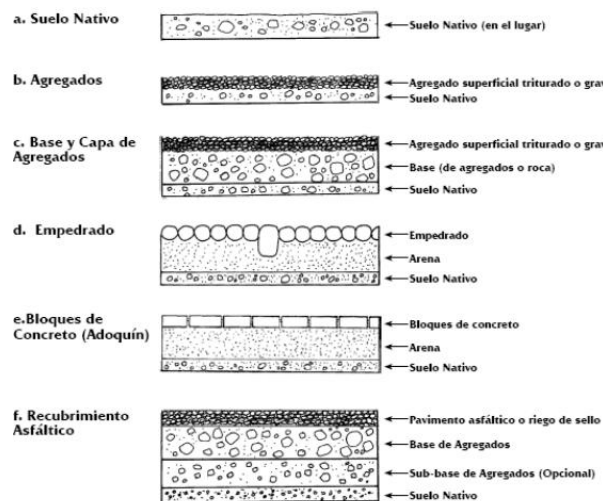


Figura 2. Tipos de capa de rodadura para caminos rurales
Fuente: (Keller & Sherar, 2004)

a. Terracería

Se define como el prisma en corte o terraplén, en el cual se construyen las partes de la carretera mostradas en la sección típica. En otras palabras, también se puede definir como un camino construido a nivel de suelo. Estos suelos pueden variar en su composición, desde arcillas y limos hasta arenas y gravas, según la región geográfica (Dirección General de Caminos, 2001).

b. Revestidas con balasto

El balasto es un material utilizado como capa de rodadura en caminos rurales, el cual debe cumplir con características específicas para garantizar su funcionalidad y durabilidad. Esta capa se coloca sobre la subrasante, proporcionando una superficie resistente al desgaste generado por el tráfico de vehículos. El espesor de la capa de rodadura oscila entre 10 - 20 centímetros (Dirección General de Caminos, 2001).

Las principales características y propiedades que debe cumplir el balasto son las siguientes:

- Debe ser de calidad uniforme y estar exento de residuos de madera, sustancias vegetales, raíces o cualquier material perjudicial.
- Peso unitario suelto: El balasto debe tener un peso unitario suelto no menor a $1,470 \text{ kg/m}^3$ (90 lb/ft^3), de acuerdo con el método.
- Tamaño máximo del agregado: No debe exceder $2/3$ del espesor de la capa y no debe ser mayor a 100 mm.
- Distribución granulométrica: La porción retenida en el tamiz No. 4 debe estar entre el 60% y el 40%, y la porción que pasa el tamiz No. 200 no debe exceder del 15% en peso.
- Resistencia a la abrasión: El balasto debe tener un porcentaje de abrasión no mayor al 60%, determinado por el método AASHTO T-96.
- Índice de plasticidad: Debe estar entre 5 y 11, determinado por AASHTO T-90.
- Límite líquido: La porción que pase el tamiz No. 0.425 debe tener un límite no mayor a 35, según AASHTO T-89.
- CBR (California Bearing Ratio): El material debe tener un CBR mínimo de 30, determinado por AASHTO T-193, en muestra saturada a 95% de compactación (AASHTO T-180).

(Dirección General de Caminos, 2001)

Tamiz	% que pasa
75 mm (3")	100
50 mm (2")	90-100
No. 4 (4.75mm)	30-70
No. 200 (0.075mm)	8-20

Cuadro 2. Granulometría del balasto
Fuente: (SIECA, 2010)

El proceso de constructivo de colocación de balasto en caminos rurales requiere de la ejecución de una serie de etapas, que incluyen:

- Selección de sitio de extracción: Se debe seleccionar un área que sea adecuada para la extracción del balasto, considerando factores como la calidad del material, la cercanía a los proyectos de construcción y el impacto ambiental. Además, se realiza análisis granulométrico del material, para garantizar que el material cumpla con las especificaciones técnicas necesarias establecidas por el Libro Azul de Caminos.
- Extracción: Es necesario el uso de excavadoras y cargadores frontales para retirar el material de la ladera. Durante esta etapa, se deben de seguir prácticas que minimicen el impacto ambiental, como evitar la erosión del suelo y proteger la zona alrededor.
- Transporte: Una vez extraído, el balasto es transportado del banco de material al sitio de construcción.
- Colocación y compactación: En el sitio de construcción, el material se coloca sobre la subrasante preparada y se compacta para formar una base estable para la capa de rodadura. La compactación debe de ser como mínimo al 95 % de la densidad máxima determinada por el método AASHTO T 180.
- Mantenimiento frecuente: Debido a su susceptibilidad a la erosión y pérdida de compactación, los caminos de balasto necesitan mantenimiento regular, especialmente antes y después de la estación lluviosa. Esto implica la aplicación de nuevo material, nivelación y compactación repetidas.

(SIECA, 2010)

C. Generalidades de los suelos en ingeniería

En términos generales, el suelo es la capa superficial de la corteza terrestre, formada por la descomposición de las rocas por medio de procesos químicos, biológicos y físicos. El suelo es un recurso no renovable debido a su lenta regeneración y está sujeto a procesos de degradación tanto naturales como antrópicos (Brady & Weil, 2017).

En ingeniería civil y geotecnia, el suelo es un conjunto de material no consolidado compuesto de partículas sólidas minerales u orgánicas que están separadas por espacios vacíos que pueden contener agua, aire u otros gases. En los proyectos de infraestructura, las características y propiedades del suelo proporciona la base para la ejecución de la construcción (Das, Braja M., 2010).

1. Tipos de suelos

En ingeniería, los suelos se clasifican en diferentes tipos según su composición, origen, propiedades mecánicas y comportamiento. A continuación, se describen los principales tipos de suelos:

a. Suelos granulares

Los suelos granulares están formados por partículas de gran tamaño, principalmente arena y grava. Estos suelos se caracterizan por que son altamente permeables, lo cual facilita el drenaje. La capacidad de drenaje está directamente relacionada con el tamaño de las partículas que componen el suelo; por lo que, cuanto mayor es el volumen de los espacios vacíos o la porosidad del suelo, mejor es su capacidad para permitir el paso del agua (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000).

- Grava: Su origen se debe a la fragmentación natural de rocas, con partículas compuestas principalmente de cuarzo, feldespato y otros minerales reconocidos por su dureza y resistencia a la erosión. En el ámbito de la construcción, las gravas se emplean frecuentemente como material de base en carreteras y caminos, proporcionando una capa estable y resistente que mejora la capacidad de soporte de la estructura vial (Das, 2010).
- Grava gruesa: pasa el tamiz de 75 mm (3") y queda retenida sobre el tamiz de 19 mm

(3/4”).

- Grava fina: pasa el tamiz de 19 mm (3/4”) y queda retenida sobre el tamiz de 4.75 mm (No.4).

(ASTM International, 2011)

- Arena: Este tipo de suelo está compuesto de partículas provenientes de la desintegración natural de rocas o de la trituración artificial. Sus granos finos tienen un tamaño que varía entre 0.05 y 2 milímetros. Debido a su estructura suelta y a los amplios espacios porosos entre las partículas, la arena permite un rápido drenaje del agua, evitando así su acumulación en la superficie (Das, 2010).
- Arena gruesa: pasa el tamiz de 4.75mm (No.4) y queda retenida sobre tamiz de 2.00mm (No.10).
- Arena media: pasa el tamiz de 2.00mm (No.10) y queda retenida sobre el tamiz de 425µm (No. 40).
- Arena fina: pasa el tamiz de 425 µm (No.40) y queda retenida sobre el tamiz de 75 µm (No. 200).

(ASTM International, 2011)

b. Suelos cohesivos

Son aquellos que poseen una alta cohesión y plasticidad debido a la presencia significativa de partículas finas que pasa por el tamiz No. 200. Su clasificación es en dos grandes grupos, principalmente arcillas y limos. Debido al reducido tamaño de sus poros y compresibilidad, tienen una alta capacidad para retener el agua. Por consiguiente, estos suelos afectan directamente su capacidad de carga y estabilidad (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000).

- Arcilla: Los suelos arcillosos se componen por un tamaño de partícula extremadamente pequeña, generalmente inferior a 0.002 milímetros. Se caracterizan por su capacidad de expansión y contracción. Cuando los suelos arcillosos se saturan, tienden a expandirse, lo que puede resultar en problemas de hinchamiento del suelo, Por otro lado, en períodos secos, los suelos arcillosos tienden a contraerse, lo que puede causar grietas en las estructuras (ASTM International, 2011).

- Limo: Los suelos limosos son granos finos que se componen de partículas que tienen un tamaño que oscila entre 0.002 y 0.05 milímetros. Es la porción fina de un suelo con poca o ninguna plasticidad, es decir, que tienen un rango limitado de contenido de humedad en el cual el suelo puede deformarse sin fracturarse. Su alta retención de agua puede llevar a problemas de drenaje, especialmente en áreas con precipitaciones abundantes (ASTM International, 2011).

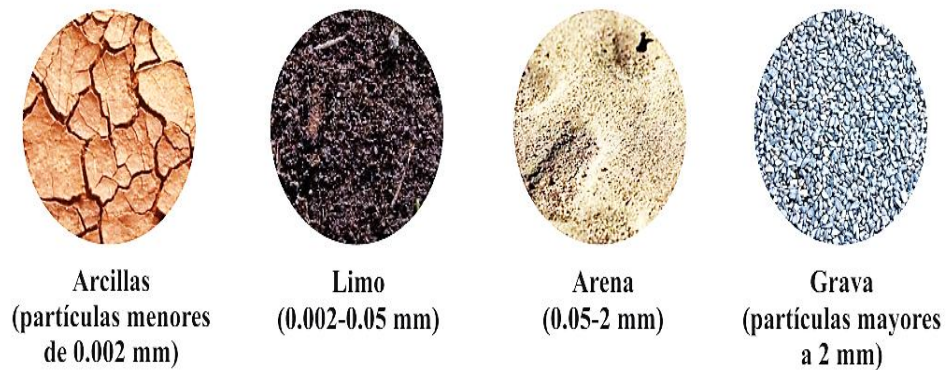


Figura 3. Clasificación de suelos según el tamaño de sus partículas
 Fuente: (gensoil.net, 2023)

c. Suelos orgánicos

Se caracterizan por su alto contenido de materia orgánica, derivado de la descomposición de residuos vegetales y animales. Estos suelos presentan una baja capacidad portante y alta compresibilidad, lo que los hace inadecuados para soportar estructuras pesadas, como carreteras o edificios. Además, generan problemas de estabilidad al terreno, dado que su tendencia a retener humedad los hace susceptibles a cambios volumétricos, que pueden expandirse o contraerse significativamente con las variaciones en el contenido de agua (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000).

2. Sistema de clasificación AASHTO

Es el sistema utilizado para el diseño de carreteras, su clasificación se basa en la distribución del tamaño de partículas, el límite líquido y el índice de plasticidad del suelo. La granulometría de las partículas en una masa de suelo tiene una influencia determinante en sus propiedades y en su comportamiento mecánico. El sistema clasifica los suelos en siete grupos principales, que van del A-1 al A-7 (Das, Braja M., 2010).

- Los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, por lo que el 35% o menos de las partículas pasan a través del tamiz número 200.
- Los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 son principalmente suelos limos o arcillas, dado que más del 35% pasa del tamiz número. 200.

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasan el tamiz N°200)						
	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis del tamizado (porcentaje que pasa) N° 10 N° 40 N° 200	50 max. 30 max. 15 max.	50 max. 25 max.	51 min. 10 max.	35 max.	35 max.	35 max.	35 max.
características de la fracción que pasa el tamiz N°40 Límite líquido Índice de plasticidad			NP	40 max. 10 max.	41 max. 10 min.	40 max. 11 min.	41 min. 11 min.
Tipos usuales de los materiales constituyentes	Fragmento de roca, Grava y arena		Arena fina	Grava con limo o arcilla y arena			
Evaluación general de la subrasante	Excelente a bueno						

Cuadro 3. Clasificación de los grupos A-1, A-2 y A-3 del sistema AASHTO
Fuente: (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2011)

Clasificación general	Materiales limo – Arcilla (más del 35% del total de la muestra pasa el tamiz N°200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 ^a A-7-6 ^b
Clasificación de grupo	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 ^a A-7-6 ^b
Análisis de tamiz (porcentaje que pasa) N° 10 N° 40 N° 200	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características de la fracción que pasa el tamiz N°200 Límite líquido Índice de plasticidad	40 max. 10 max.	41 min. 10 max.	40 max. 11 min.	41 min. 11 min.
Tipos usuales de los materiales constituyentes	Suelos limosos		Suelos arcillosos	
^a Para A-7-5, IP ≤ LL-30 ^b Para A-7-6, IP > LL-30				

Cuadro 4. Clasificación de los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 del sistema AASHTO
Fuente: (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2011)

Los suelos se categorizan en grupos específicos basados en sus propiedades de consistencia, como el límite líquido y el índice de plasticidad.

- Los suelos del grupo A-2 presentan características variables, combinando materiales granulares con finos, y suelen tener un límite líquido inferior a 40% y un índice de plasticidad bajo, generalmente menor a 10%.
- Los grupos A-4 y A-5 se componen principalmente de suelos limosos, con el grupo A-4 mostrando un límite líquido inferior a 40% y el grupo A-5 con un límite que puede exceder este valor.
- Los suelos del grupo A-6 son arcillosos, con un límite líquido que supera el 40% y un índice de plasticidad generalmente mayor a 11%, reflejando una mayor plasticidad.
- Los suelos del grupo A-7, que son altamente plásticos y arcillosos, se subdividen en A-7-5 y A-7-6, diferenciándose por el índice de plasticidad en relación con el límite líquido

(Das, Braja M., 2010).

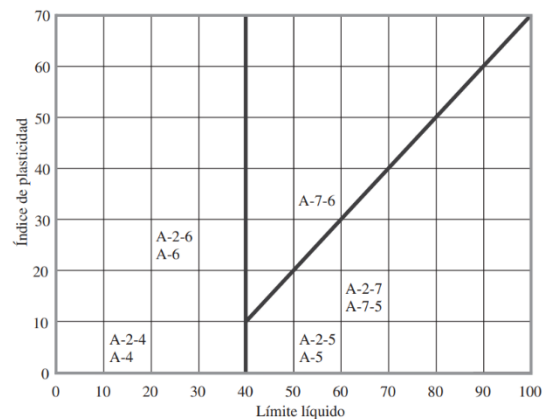


Figura 4. Rango del límite líquido y del índice de plasticidad para suelos en los grupos A-2, A-4, A-5, A-6 y A-7

Fuente: (Das, Braja M., 2010)

3. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Este sistema está regido por la norma ASTM D-2487 y es utilizado para describir las características del suelo, comúnmente para establecer la calidad de la gradación y la plasticidad. Divide los suelos en dos amplias categorías en función de su granulometría, con la finalidad de comprender el comportamiento del suelo.

a. Suelos de granulometría gruesa

Se clasifican en gravas y arenas, cuando más del 50% del material se retiene en un tamiz No. 200. Un suelo se categoriza como grava si más del 50% de sus partículas son retenidas por el tamiz número 4, mientras que se clasificará como arena si no cumple con esta condición (ASTM International, 2011).

b. Suelos de granulometría fina

Se clasifican suelos finos aquellos en los que más del 50% del material pasa a través del tamiz No. 200. Estos suelos se dividen en tres grupos principales: limos inorgánicos, arcillas inorgánicas y limos y arcillas orgánicas. Cada uno de estos grupos se subdivide adicionalmente según su límite líquido, dividiéndolos en dos grupos con una frontera establecida en $Ll = 50\%$ (ASTM International, 2011).

La simbología en la clasificación de suelos permite identificar rápidamente las propiedades de los materiales y determinar su comportamiento mecánico. En esta nomenclatura, los suelos se dividen en gravas (G), arenas (S), limos (M), arcillas (C) y materiales orgánicos (O y Pt), con subclasificaciones que describen su graduación, plasticidad y límite líquido.

Tipo de Suelo	Prefijo	Subgrupo	Sufijo
Grava	G	Bien graduada	W
Arena	S	Mal graduado	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Límite líquido alto (>50)	L
Turba y suelos altamente orgánicos	Pt	Límite líquido bajo (<50)	H

Cuadro 5. Simbología utilizada en la clasificación SUCS
Fuente: (Das, Braja M., 2010)

Criterios para la asignación de símbolos de grupo y nombre de grupo con el uso de ensayos de laboratorio			Clasificación de suelos		
			Símbolo de grupo	Nombre del grupo	
Suelos de partículas gruesas mas del 50% es retenido en la malla No. 200	Gravas Mas del 50% de la fracción gruesa es retenida en la malla No. 4	Gravas limpias Menos del 5% pasa la malla No. 200	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3$	GW	Grava bien graduada
			$Cu < 4$ y $1 > Cc > 3$	GP	Grava mal graduada
		Gravas con finos Mas del 12% pasa la malla No. 200	IP < 4 o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad	GM	Grava limosa
			IP > 7 o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad	GC	Grava arcillosa
	Gravas limpias y con finos Entre el 5 y 12% pasa malla No.200		Cumple los criterios para GW y GM	GW-GM	Grava bien graduada con limo
			Cumple los criterios para GW y GC	GW-GC	Grava bien graduada con arcilla
			Cumple los criterios para GP y GM	GP-GM	Grava mal graduada con limo
			Cumple los criterios para GP y GC	GP-GC	Grava mal graduada con arcilla
	Arenas El 50% o mas de la fracción gruesa pasa la malla No. 4	Arenas limpias Menos del 5% pasa la malla No. 200	$Cu \geq 6$ y $1 \leq Cc \leq 3$	SW	Arena bien graduada
			$Cu < 6$ y $1 > Cc > 3$	SP	Arena mal graduada
		Arenas con finos Mas del 12% pasa la malla No. 200	IP < 4 o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad	SM	Arena limosa
			IP > 7 o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad	SC	Arena arcillosa
		Arenas limpias y con finos Entre el 5 y 12% pasa malla No.200	Cumple los criterios para SW y SM	SW-SM	Arena bien graduada con limo
			Cumple los criterios para SW y SC	SW-SC	Arena bien graduada con arcilla
Suelos altamente orgánicos	Principalmente materia orgánica de color oscuro	Límite líquido - secado al horno < 0.75 límite líquido - no secado	OL	Arcilla orgánica Limo orgánico	
		IP > 7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"	CH	Arcilla de alta plasticidad	
Suelos de partículas finas El 50% o mas pasa la malla No. 200	Limos y arcillas Limite Líquido menor que 50	IP < 4 y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"	ML	Limo de baja plasticidad	
		Límite líquido - secado al horno < 0.75 límite líquido - no secado	OH	Arcilla orgánica Limo orgánica	
Limos y arcillas Limite Líquido mayor que 50	Inorgánicos	IP > 4 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"	MH	Limo de alta plasticidad	
		Límite líquido - secado al horno < 0.75 límite líquido - no secado	OH	Arcilla orgánica Limo orgánica	
Suelos altamente orgánicos			PT	Turba	

Cuadro 6. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
Fuente: (Matus & Blanco, 2014)

Se utiliza la carta de plasticidad de Casagrande como herramienta gráfica para determinar las propiedades de plasticidad de los suelos, específicamente para clasificar los suelos finos como arcillas y limos. Esta carta se basa en los límites de Atterberg, que incluyen el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), y permite clasificar los suelos de acuerdo con su comportamiento bajo distintas condiciones de humedad (Das, Braja M., 2010).

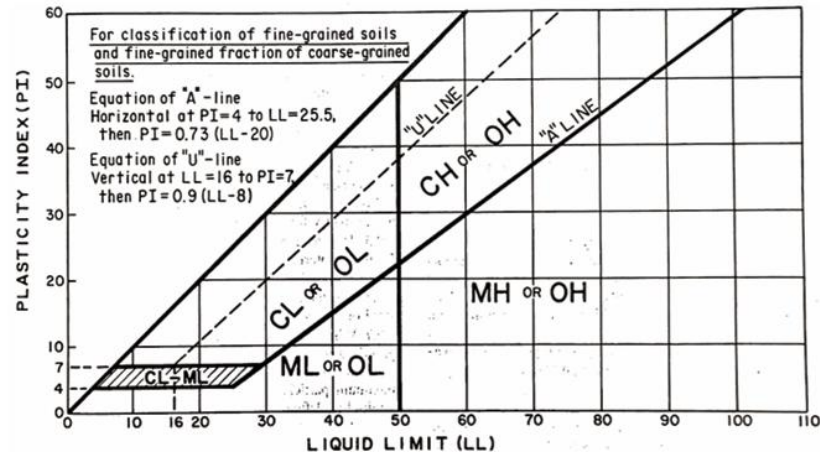


Figura 5. Carta de plasticidad de Casagrande
Fuente: (ASTM International, 2011)

D. Conglomerantes hidráulicos

Los conglomerantes hidráulicos son materiales capaces de unir fragmentos de uno o varios materiales y dar cohesión al conjunto. Asimismo, que, al mezclarse con agua, reaccionan químicamente para formar un compuesto sólido y resistente que mantiene su integridad tanto en condiciones secas como húmedas (Calvo, 2019).

1. Componentes principales

Los componentes principales de un conglomerante hidráulico para estabilización de suelos son aquellos cuya proporción en masa es superior al 10% y pueden ser los siguientes:

- a. Clinker de Cemento Portland: Es el principal componente del cemento Portland, obtenido a partir de la calcinación de una mezcla de caliza y arcilla, que al mezclarse con agua desarrolla propiedades cementantes, endureciendo y proporcionando resistencia a las estructuras (Calvo, 2019).
- b. Materiales puzolánicos: Estos materiales poseen propiedades reactivas que mejoran la durabilidad y resistencia del conglomerante. La puzolana natural se deriva de cenizas

volcánicas o arcillas ricas en sílice y alúmina, mientras que la puzolana calcinada es una variante calcinada de la puzolana natural (Calvo, 2019).

- c. Ceniza volante silíceo y calcárea: Son subproductos de la combustión de carbón y otros materiales (Calvo, 2019).
- d. Esquistos calcinados: Los esquistos son un tipo de roca que se caracteriza por la presencia de minerales en capas. Cuando se muele finamente, el esquisto calcinado posee propiedades hidráulicas similares a las del cemento Portland, además de propiedades puzolánicas (Calvo, 2019).
- e. Caliza: Mineral compuesto principalmente de carbonato de calcio, que, al ser calcinado y combinado con agua, forma cal hidratada, una sustancia con propiedades cementantes (Calvo, 2019).
- f. Cal hidratada y Cal hidráulica natural: La cal hidratada se obtiene al hidratar la cal viva, y es utilizada en la estabilización de suelos y mezclas de mortero. Por otro lado, la cal hidráulica natural contiene compuestos que le permiten endurecerse al reaccionar con el agua, incluso bajo condiciones húmedas (Calvo, 2019).

2. Componentes adicionales

- Los componentes adicionales minoritarios consisten en materiales minerales inorgánicos de origen natural, minerales inorgánicos derivados del proceso de fabricación de Clinker o cal. Estos materiales pueden ser inertes o tener propiedades hidráulicas, hidráulicas latentes o puzolánicas.
- Los aditivos son elementos que se incorporan con el fin de mejorar el proceso de fabricación o las características del conglomerante hidráulico. El contenido total de aditivos, calculado sobre el residuo seco, no debe superar el 1% en masa del conglomerante.

(NTG 41098, 2017)

3. Clasificación de los conglomerantes hidráulicos

Los conglomerantes hidráulicos se dividen en dos categorías principales según su resistencia a la compresión y el tiempo de fraguado inicial. Están clasificados de la siguiente manera:

- Endurecimiento Normal: Estos materiales cumplen con los requisitos de resistencia a los 56 días y tienen un tiempo de fraguado inicial mayor o igual a 150 minutos (NTG 41098, 2017).
- Endurecimiento Rápido: Estos materiales se evalúan en función de la resistencia a los 7 y 28 días y tienen un tiempo de fraguado inicial mayor o igual a 90 minutos, lo que permite un desarrollo de resistencia más rápido (NTG 41098, 2017).

Nombre	Clase de resistencia	Resistencia a compresión MPa (lb/pulg ²)		
		a 7 días	a 28 días	a 56 días
Conglomerante hidráulico de endurecimiento normal (N)	N1	No aplica	No aplica	de 2.5 (362) a 22.5 (3263)
	N2	No aplica	No aplica	de 12.5 (1813) a 32.5 (4714)
	N3	No aplica	No aplica	de 22.5 (3263) a 42.5 (6164)
	N4	No aplica	No aplica	de 32.5 (4714) a 52.5 (7614)
Conglomerante hidráulico de endurecimiento rápido (R)	R1	≥ 5.0 (725)	de 12.5 (1813) a 32.5 (4714)	No aplica
	R2	≥ 10.0 (1450)	de 22.5 (3263) a 42.5 (6164)	No aplica
	R3	≥ 16.0 (2321)	de 32.5 (4714) a 52.5 (7614)	No aplica
	R4-R5 ¹	≥ 16.0 (2321)	≥ 32.5 (4714)	No aplica

¹Conglomerante hidráulico de endurecimiento y fraguado rápido

Cuadro 7. Requisitos mecánicos de los conglomerantes hidráulicos
Fuente: (NTG 41098, 2017)

E. Tipos de estabilización de suelos

La estabilización de suelos es una técnica en la geotecnia vial que permite mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos para su uso en proyectos de ingeniería vial. Es una serie de procesos mecánicos, físicos, físicos químicos y químicos que transforman las propiedades de los suelos (Higuera, Gómez, & Pardo, 2012).

En el ámbito de la construcción e infraestructura, los conglomerantes hidráulicos desempeñan un papel esencial en la estabilización de suelos, ya que transforman suelos inestables en bases sólidas para carreteras de difícil acceso y otras infraestructuras críticas. Se emplean principalmente en el tratamiento de capas de base, sub-bases y rasantes de terrenos naturales, mejorando la capacidad portante y la durabilidad de las estructuras. Entre los más comunes se encuentran el cemento y la cal, ambos fundamentales para la estabilización de suelos y la mejora de las propiedades mecánicas del mismo (NTG 41098, 2017).

Existen diversos métodos de estabilización, cada uno con sus propias características y aplicaciones específicas.

Tipo	Estabilización	Produce
Mecánica	Proceso de compactación	Densificación
Física	Granulometría Suelo Betún	Fricción y cohesión Cohesión e impermeabilización
Físicoquímica	Suelo-Cal	Intercambio iónico y cementación
Química	Suelo Cemento	Intercambio iónico y cementación

Cuadro 8. Tipos de estabilización de suelos
Fuente: (Higuera, Gómez, & Pardo, 2012)

La elección del tipo de estabilización depende de las características físicas y mecánicas del suelo, particularmente de su granulometría y estabilidad volumétrica. Esta información es clave para la determinar el material de estabilización más adecuado, en función de la cohesión y capacidad de carga del suelo, optimizando su desempeño en la infraestructura vial.

<i>Suelo</i>		<i>Arcillas finas</i>	<i>Arcillas gruesas</i>	<i>Limos finos</i>	<i>Limos gruesos</i>	<i>Arenas finas</i>	<i>Arenas gruesas</i>
Tamaño de las partículas (mm)		<0.0006	0.0006–0.002	0.002–0.01	0.01–0.06	0.06–0.4	0.4–2.0
Estabilidad volumétrica		Muy pobre	Regular	Regular	Buena	Muy Buena	Muy Buena
Tipo de Estabilización	Cal						
	Cemento						
	Asfalto						
	Mecánica						
Rango de máxima eficiencia							
Efectiva, pero el control de calidad puede ser difícil							

Cuadro 9. Aplicabilidad de los métodos de estabilización
Fuente: (IDU, 2005). Guía para el diseño y la construcción de capas estructurales de pavimentos estabilizadas mediante procesos químicos. Bogotá D.C., 2005. p.5.

1. Estabilización mecánica

Es una técnica que busca mejorar las propiedades del suelo mediante proceso de escarificación, homogenización, compactación y curado del suelo existente en un proyecto, sin involucrar la adición de productos químicos. Su objetivo es mejorar la resistencia y estabilidad de suelos mediante la aplicación de fuerzas mecánicas (Higuera, Gómez, & Pardo, 2012).

En proyectos de carreteras, la estabilización mecánica comúnmente se utiliza para la preparación de subrasantes, bases y subbases. El principio básico de este tipo de estabilización

es la aplicación de energía para reorganizar las partículas del suelo, reduciendo los vacíos y aumentando la densidad. Esto se logra principalmente a través de la compactación, que es el método más común y efectivo de estabilización mecánica (Higuera, Gómez, & Pardo, 2012).

Es importante señalar que la estabilización mecánica presenta ciertas limitaciones. No es tan efectiva en suelos con alto contenido de arcilla o materia orgánica, y en muchos casos, puede no ser suficiente para cumplir con los requisitos de resistencia más exigentes. Durante la ejecución de un proyecto, se recomienda realizar ensayos de control de compactación, ya sea mediante el método del cono de arena o utilizando un densímetro nuclear, para asegurar que se alcancen los niveles de compactación y densidad especificados (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000).



Figura 6. Ejemplo de estabilización mecánica – compactación de suelo
Fuente: (Villar, 2023)

2. Estabilización física

La estabilización física implica la modificación del suelo a través de su estructura granulométrica o mediante procesos como el control de la humedad y temperatura. Este método suele combinarse con técnicas de compactación para aumentar la estabilidad estructural de los suelos. Se usa especialmente en suelos que necesitan un ajuste en su distribución granulométrica, de esta forma aumentar la fricción, la cohesión y la impermeabilidad del suelo primitivo (Higuera, Gómez, & Pardo, 2012).

De acuerdo con las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes, en la sección 302, la estabilización física de subrasantes se puede dar a través de la adición de

materiales preferentemente granulares que deben cumplir con criterios estrictos de calidad y rendimiento. Entre los requisitos, se destaca que, para garantizar la estabilidad volumétrica del suelo bajo diversas condiciones de carga y humedad, los materiales para la estabilización deben poseer un porcentaje de hinchamiento inferior al 3%, según lo determinado por el ensayo CBR, procedimiento establecido en la norma AASHTO T193 (Dirección General de Caminos, 2001).

Por otra parte, también se puede realizar el procedimiento constructivo utilizando geosintéticos, que son telas o membranas de material geotextil o de geocompuestos, fabricados de polímeros sintéticos. Este producto puede ser utilizado también como impermeabilizante, con el fin de aumentar la vida útil del pavimento que se agrega formando una barrera encima del geotextil (Dirección General de Caminos, 2001).



Figura 7. Ejemplo de estabilización física -colocación de geomallas
Fuente: (ECOMEX, 2024)

3. Estabilización química

La estabilización química del suelo es un método muy utilizado en la ingeniería geotécnica para mejorar las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los suelos. Se logra mediante la adición de agentes químicos, estos materiales reaccionan con los componentes del suelo para formar compuestos que aumentan la resistencia y durabilidad. La estabilización química es particularmente efectiva en suelos con altos contenidos de arcilla o limos, o los que tienden a presentar problemas de inestabilidad volumétrica o suelos con baja capacidad de carga (Higuera, Gómez, & Pardo, 2012).

Dentro de los materiales empleados en la estabilización química, destacan los conglomerantes hidráulicos, siendo los más utilizados la cal y el cemento. La cal se usa

principalmente en suelos arcillosos para reducir plasticidad, mejorar la compactación y aumentar la resistencia a la humedad, mientras que el cemento es más eficaz en suelos con baja cohesión, proporcionando rigidez y mayor resistencia a la compresión. En algunos casos, se pueden utilizar mezclas de cal y cemento para optimizar las propiedades del suelo, dependiendo de su composición y condiciones ambientales (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000).

La elección del estabilizante depende de diversos factores, como el tipo de suelo, las condiciones ambientales y los requisitos de desempeño del proyecto. Para garantizar la efectividad del tratamiento, es necesario realizar ensayos de laboratorios que permitan determinar la dosificación óptima y evaluar el impacto del estabilizante en las propiedades del suelo (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000).



Figura 8. Ejemplo de estabilización química - Adición de conglomerante hidráulico
Fuente: (Magalhaes, 2024)

F. Estabilización de suelos con cemento

La estabilización de suelos con cemento es una técnica ampliamente utilizada en la ingeniería civil para mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad de suelos naturales que, por sí solos, no cumplen con los requisitos necesarios para soportar cargas estructurales o resistir las condiciones ambientales a las que están expuestos (De la Fuente, 2013).

1. Cemento

Según la norma NG 41095, define el cemento hidráulico como el material que fragua y endurece por su reacción química con el agua.

El cemento Portland es el conglomerante hidráulico más común debido a sus propiedades de reacción con el agua. Este compuesto inorgánico se produce mediante un proceso de pulverización de Clinker, consistente principalmente de silicatos hidráulicos de calcio junto

con aluminatos de calcio, sulfatos de calcio y aluminoferritos de calcio. Cuando este polvo se mezcla con agua, se inicia una serie de reacciones químicas conocidas colectivamente como hidratación. A medida que la hidratación continua, el cemento se rigidiza hasta volverse duro y resistente a los efectos de compresión (NTG 41095, 2018).

La norma ASTM C150 clasifica los tipos de cemento Portland utilizando numeración romana del I al V. No obstante, en Guatemala se emplea la norma NTG 41095, la cual establece una nomenclatura diferente para la clasificación de los cementos. Según esta norma, los tipos de cemento recomendados para proyectos de estabilización de suelos son los siguientes:

- Tipo I (Tipo UG): Cemento hidráulico de uso general, en la cual no se requieren las propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo.
- Tipo II (Tipo MRS): Destinado cuando se desea una moderada resistencia a los sulfatos o un moderado calor de hidratación.
- Tipo III (Tipo AR): Para cuando se requiere alta resistencia inicial.
- Tipo IV (Tipo BCH): Se utiliza cuando interesa que desarrolle poco calor a partir de la hidratación del cemento.
- Tipo V (Tipo ARS): Se utiliza cuando se requiere alta resistencia a los sulfatos.

(ASTM C150, 2012)

2. Requisitos físicos

La norma NTG 41095 establece las especificaciones por desempeño para los cementos hidráulicos en Guatemala para estabilización de suelos, basándose en los siguientes criterios:

Método de ensayo		Tipos de cemento						
		UG	AR	DLR	MRS	ARS	MCH	BCH
Finura	NTG 41003 h6 (ASTM C430) NTG 41014 h2 (ASTM C204)	A	A	A	A	A	A	A
Expansión en autoclave, cambio de longitud en porcentaje, (%) máximo	NTG 41014 h1 (ASTM C151)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
Expansión Chatelier, en milímetros [#]	UNE-EN 196-3	10	10	10	10	10	10	10
Tiempo de fraguado Vicat ^{en minutos}								
Inicial, no menor que	NTG 41003 h10 (ASTM C191)	45	45	45	45	45	45	45
Inicial, no mayor que		420	420	420	420	420	420	420
Contenido de aire en el mortero ^o en %	NTG 41003 h3 (ASTM C185)	12	12	12	12	12	12	12
Resistencia a compresión mínima en MPa, [psi] [#] a 28 días								
1 día			12 [1740]					
3 días		13 [1890]	24 [3480]		11 [1600]	11 [1600]	5 [725]	
7 días	NTG 41003 h4 (ASTM C 109)	20 [2900]			18 [2610]	18 [2610]	11 [1600]	11 [1600]
28 días		28 [4060]		11 [1600]		25 [3620]		21 [3050]
90 días				18 [2610]				
Calor de hidratación,								
7 días, máximo en kJ/kg (kcal/kg)	ASTM C186	--	--	--	--	--	290 (70)	250 (60)
28 días, máximo en kJ/kg (kcal/kg)		--	--	--	--	--	--	290 (70)
Expansión de la barra de mortero, % máximo 14 días	NTG 41014 h3 (ASTM C1038)	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Expansión a los sulfatos (resistencia a los sulfatos) ^f								
6 meses, % máximo	NTG 41014 h5 (ASTM C1012)	--	--	--	0.10	0.05	--	--
1 año, % máximo		--	--	--	--	0.10	--	--
Opción BRA/R Baja reactividad con agregados reactivos a los álcalis [#]								
Expansión barra de mortero								
14 días, % máximo	NTG 41003 h7 (ASTM C227)	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
56 días, % máximo		0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060
Opción BL Color blanco								
Índice de blancura, % mínimo	Índice de blancura de CIE	70	70	70	70	70	70	70
Opción A Con Incorporador de aire								
Contenido de aire en el mortero ^o								
Máximo en %	NTG 41003 h3 (ASTM C185)	22	22	22	22	22	22	22
Mínimo en %		16	16	16	16	16	16	16
Requisitos físicos opcionales								
Endurecimiento inicial, penetración final, mínima en %	NTG 41014 h4 (ASTM C451-08)	50	50	50	50	50	50	50
Resistencia a la compresión, MPa [psi], mín [#] a 28 días.	NTG 41003 h4 (ASTM C 109)	--	--		28 [4060]	--	22 [3190]	--
Contracción por Secado, %	NTG 41014 h8 (ASTM C596)	H	H	H	H	H	H	H

Cuadro 10. Requisitos físicos del cemento para uso en estabilización
Fuente: (NTG 41095, 2018)

3. Aplicación

El cemento puede utilizarse tanto para la estabilización de bases y subbases, pero también puede cumplir con el tratamiento de suelos mejorados, ofreciendo flexibilidad en su aplicación según las necesidades específicas de cada proyecto.

- Suelo Mejorado: El mejoramiento de suelos con cemento se refiere a la adición de pequeñas cantidades de cemento, generalmente entre 2% y 4% del peso seco del suelo.

Tiene como objetivo modificar algunas propiedades del suelo sin buscar un incremento significativo de resistencia. El tratamiento de suelo mejorado tiene un periodo de vida a corto plazo y los principales efectos del mejoramiento con cemento son: Mejorar la granulometría, reducir cambios volumétricos e incrementar ligeramente el CBR (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), 2008).

- Suelo estabilizado: La estabilización con cemento implica la adición de mayores cantidades de cemento con el objetivo de lograr un aumento significativo en la resistencia y durabilidad del suelo. Se considera un espesor típico de capa de suelo-cemento entre 15-30 cm, dependiendo de las condiciones específicas del proyecto. Este enfoque se utiliza para estabilizar capas estructurales en pavimentos, como bases y subbases. Los principales efectos de la estabilización con cemento son: Aumentar la resistencia a la compresión, reducir la susceptibilidad a los cambios de humedad, disminuir la permeabilidad (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), 2008).

En ambos casos, la elección entre mejoramiento y estabilización dependerá de las características del suelo original, las condiciones del proyecto y los requisitos de desempeño. El mejoramiento es una opción más económica cuando solo se requieren cambios moderados en las propiedades del suelo, mientras que la estabilización se utiliza cuando se necesita un material con propiedades mecánicas significativamente mejoradas (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), 2008).

4. Generalidades

a. Suelo

Puede aplicarse en diversos tipos de suelos, aunque los suelos granulares son los más comunes debido a su facilidad de pulverización y mezcla, además de requerir menos cantidad de cemento para lograr las resistencias establecidas por el Libro Azul de Caminos (2001).

Los suelos arcillosos altamente plásticos o suelos con altos niveles de sulfatos son generalmente inadecuados para el suelo-cemento, comúnmente se requiere de realizar un tratamiento mixto. En algunos casos, se utilizan aditivos como la ceniza volante clase F o C

y la cal para mejorar las propiedades del suelo como disminuir humedad y plasticidad, antes de añadir el cemento (FICEM, 2007). Los requisitos de los suelos a estabilizar con cemento son:

- Pasa tamiz No. 200 <25% en masa
- Índice de plasticidad < 10
- Contenido de arcilla < 15% masa
- Materia orgánica <1% masa
- Sulfatos < 1% masa

(SIECA, 2010)

b. Agua

El agua actúa como lubricante en la mezcla, facilitando la compactación del suelo y el cemento. La determinación del nivel óptimo de humedad se realiza a través del ensayo Proctor modificado AASHTO T – 180 (De la Fuente, 2013).

c. Aditivos

Incluye agentes químicos, como cloruro de calcio para acelerar el fraguado, o materiales estabilizantes, como cenizas volantes o escorias, que aumentan la resistencia, reducen la permeabilidad y mejoran la cohesión del suelo tratado (FICEM, 2007).

d. Diseño de mezcla

El diseño de mezcla de suelo-cemento consiste en la determinación del contenido de cemento y humedad para lograr las propiedades deseadas. Existen diversos métodos de diseño, desde empíricos hasta racionales, que consideran factores como la granulometría del suelo, los límites de Atterberg y la resistencia requerida. El procedimiento común se basa en cumplir con los siguientes pasos:

1. Determinar la granulometría del suelo a estabilizar
2. Seleccionar un contenido de cemento inicial
3. Realizar pruebas de humedad – densidad
4. Realizar ensayos de resistencia a compresión

5. Seleccionar el contenido óptimo de cemento

(FICEM, 2007)

4. Dosificación del cemento

Para determinar la cantidad de cemento a incorporar según el tipo de suelo, se puede utilizar como referencia el método propuesto por el ACI 230.1R-09. Este enfoque sugiere diferentes proporciones de cemento basadas en la composición granulométrica del suelo. Es importante destacar que estas recomendaciones no deben considerarse como definitivas para su aplicación directa en campo, sino más bien como un punto de partida orientativo para el diseño de la estabilización.

El tipo de cemento más utilizado en la estabilización de suelos es el Tipo I. Para este proceso se preparan especímenes con diferentes contenidos de cemento y se someten a ensayos para determinar la dosificación que cumpla con los requisitos de resistencia y durabilidad especificados. Para cada contenido de cemento se debe realizar el ensayo de Proctor Modificado con el fin de determinar la humedad óptima y la densidad máxima de compactación, para luego calcular el índice CBR (ACI 230. 1R-09, 2009).

Tipo de Suelo	AASHTO	USCS	Rango típico de cemento (% en peso)	Contenido típico de cemento para prueba humedad - densidad (% en peso)	Contenido típico de cemento para pruebas de durabilidad (% en peso)
Fragmento de roca, Grava y arena	A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM	3-5	5	3-5-7
Fragmento de roca, Grava y arena	A-1-b	GM, GP, SM, SP	5-8	6	4-6-8
Grava con limo o arcilla y arena	A-2	GM, GC, SM, SC	5-9	7	5-7-9
Arena fina	A-3	SP	7-11	9	7-9-11
Suelos limosos	A-4	CL, ML	7-12	10	8-10-12
Suelos limosos	A-5	ML, MH, CH	8-13	10	8-10-12
Suelos arcillosos	A-6	CL, CH	9-15	12	10-12-14
Suelos arcillosos	A-7	MH, CH	10-16	13	11-13-15

Cuadro 11. Requerimientos típicos de cemento según tipo de suelo
Fuente: (ACI 230. 1R-09, 2009)

5. Propiedades

- Densidad: Esta propiedad influye directamente en la resistencia, durabilidad y

comportamiento general. Se determina mediante el ensayo Proctor modificado, que establece la densidad máxima y el contenido óptimo de humedad. La densidad del suelo-cemento puede variar ligeramente con la adición de cemento, dependiendo del tipo de suelo utilizado (ACI 230. 1R-09, 2009).

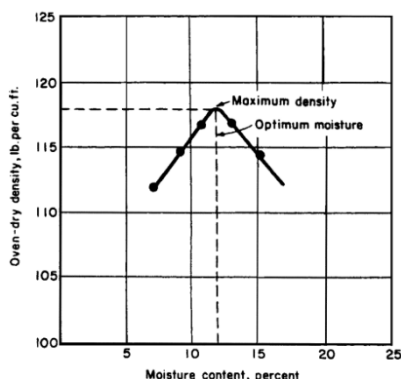


Figura 9. Curva típica densidad-humedad suelo cemento
Fuente: (ACI 230. 1R-09, 2009)

- Resistencia a la compresión: La resistencia a compresión del suelo estabilizado con cemento aumenta progresivamente con el tiempo de curado y el contenido de cemento en la mezcla. Entre los elementos que influyen en el desarrollo de la resistencia se encuentran el tipo de suelo utilizado, el contenido de cemento en la mezcla, la densidad de compactación alcanzada y las condiciones de curado, incluyendo temperatura, humedad y tiempo (ACI 230. 1R-09, 2009).

Capa de suelo estabilizado	Resistencia mínima a la compresión a 7 días		Especificación
	MPa	kg/cm ²	
Subbase	2.40 MPa	35.15	ASTM D 16333
Base	3.50 MPa	14.06	

Cuadro 12. Resistencia a compresión mínima de estabilización con cemento
Fuente: (Dirección General de Caminos, 2001)

- Resistencia a la flexión: Es la capacidad del suelo-cemento para resistir cargas que generan esfuerzos de tracción y compresión simultáneamente en puntos opuestos de la sección transversal. Se mide generalmente a través de pruebas de vigas. A través de varias pruebas de laboratorios, diversos autores coinciden que la resistencia a flexión suele ser entre el 10% y el 20% de la resistencia a compresión simple. Como resultado, establecen que el proceso de estabilización con este material proporciona gran capacidad de distribuir las

cargas y la rigidez de la capa (ACI 230. 1R-09, 2009).

6. Proceso constructivo

- a.** Preparación del área: Se inicia con la limpieza del terreno, removiendo vegetación, piedras grandes y otros materiales inadecuados que puedan interferir con el proceso. Posteriormente, se realiza la nivelación del terreno para garantizar una superficie uniforme antes de comenzar el tratamiento.
- b.** Escarificación del suelo: El suelo existente se escarifica o se mueve la capa superficial a la profundidad requerida. El espesor de la subrasante que se va a escarificar no debe exceder los 20 cm.
- c.** Pulverización del suelo: Se realiza una pulverización del suelo para reducir las partículas grandes y asegurar una mezcla uniforme, a fin de que, el material tenga mayor cohesión al ser homogenizado con el material estabilizante.
- d.** Colocación de material estabilizante: El material estabilizante debe ser uniformemente extendido en el área del proyecto. La cantidad que se aplicará es la especificada en el diseño de estabilización, de acuerdo con los ensayos de suelos realizados previamente. La aplicación del material estabilizante se podrá realizar por medio de un camión esparcidor y/o por medio de colocación de sacos distribuidos de acuerdo con la cantidad requerida por metro cuadrado.
- e.** Homogenización del suelo y el material estabilizante: Se mezclan el suelo y el material estabilizante para asegurar una distribución uniforme del conglomerante.
- f.** Aplicación de agua: Durante el proceso de mezcla, se añade agua en la cantidad adecuada para alcanzar el contenido de humedad óptimo. Este procedimiento activa la reacción química del cemento y así lograr una buena compactación del suelo
- g.** Compactación: Una vez que el suelo, cemento y agua están bien mezclados, se procede a la compactación con rodillos vibratorios o neumáticos. Este paso es esencial para alcanzar la densidad máxima del material.

- h.** Curado: Tras la compactación, el suelo-cemento debe curarse adecuadamente para evitar la desecación rápida y la formación de grietas. El curado se logra manteniendo la superficie húmeda durante un período de 7 a 14 días, mediante riego regular o cubriendo el área con materiales que retengan la humedad.

(SIECA, 2010)

G. Estabilización de suelos con cal

1. Cal

La cal es un material inorgánico compuesto principalmente por óxido de calcio (CaO) y/o hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), obtenido a partir de la calcinación de rocas calizas o dolomías. Es ampliamente utilizado en el sector de la construcción debido a su capacidad para proporcionar resistencia, durabilidad y apariencia en las distintas aplicaciones (National Lime Association, 2004).

La cal utilizada en la estabilización de suelos puede encontrarse en varias formas: cal viva (óxido de calcio), cal hidratada (hidróxido de calcio) y lechada de cal. La cal viva se obtiene de la transformación química de la piedra caliza en óxido de calcio, mientras que la cal hidratada se forma cuando la cal viva reacciona con agua. Es importante no confundir la cal para tratamiento de suelos con la cal agrícola, que no cuenta con la capacidad de reactividad necesaria para la estabilización (National Lime Association, 2004).

2. Aplicación

Puede ser utilizada en el tratamiento de suelos, en varios grados o cantidades, dependiendo del objetivo.

- **Modificación:** Según el Manual de Estabilización de suelo tratado con cal, de la National Lime Association, el tratamiento de suelos mejorados con cal se utiliza para lograr objetivos específicos, por lo que es período de vida a corto plazo. Este proceso busca principalmente reducir la plasticidad y el exceso de humedad natural del suelo, disminuir su expansividad y aumentar su capacidad de trabajabilidad. La cantidad de cal necesaria para la modificación es menor que la requerida para la estabilización, utilizando típicamente entre un 1% y 4% en peso del suelo seco. Las principales características del mejoramiento con cal son:

- Proporciona una mejora temporal de las propiedades del suelo.
- Facilita el uso de maquinaria y la ejecución de proyectos de construcción.
- Es especialmente efectivo en suelos arcillosos.
- No aporta una resistencia estructural significativa a largo plazo.

(National Lime Association, 2004)

- **Secado:** Cuando la cal reacciona químicamente con el agua, libera calor, lo que facilita la rápida evaporación de la humedad del suelo, incluso en aquellos con bajo contenido de arcilla. Este proceso permite secar los suelos húmedos de manera más eficiente que esperar a que se sequen naturalmente, lo que favorece la compactación. Generalmente, se utiliza entre un 1% y 4% de cal, con relación al peso del suelo seco, para reducir su humedad y permitir la continuación de las actividades de construcción (National Lime Association, 2004).
- **Estabilización:** La estabilización de suelos con cal tiene como finalidad transformar las propiedades del suelo, mejorando su resistencia y estabilidad a largo plazo, especialmente frente a la acción del agua. Este tratamiento es comúnmente utilizado en suelos arcillosos con un Índice de Plasticidad mayor a 10 y con al menos un 25% de finos que pasan el tamiz 200 son ideales para este proceso.
 - **Aplicación en subrasantes y subbases:** La cal se utiliza para estabilizar suelos finos en subrasantes o subbases, mejorando su capacidad estructural dentro del sistema de pavimento. Este procedimiento se realiza generalmente mezclando la cal directamente en el sitio de la obra, empleando entre un 3% y un 6% de cal en relación con el peso del suelo seco (National Lime Association, 2004).
 - **Aplicación en bases:** Este proceso es útil tanto en la construcción de nuevos caminos como en la rehabilitación de vías deterioradas, requiriendo entre un 2% y un 4% de cal respecto al peso del suelo seco (National Lime Association, 2004). La cal permite que un suelo se pueda trabajar al ser altamente plástico, pero que al final es necesario utilizar cemento para mejorar aún más las propiedades establecidas por el Libro Azul de Caminos.

3. Generalidades

a. Suelo

Generalmente, se emplea en suelos arcillosos con contenido de plasticidad media a alta. Estos suelos son susceptibles a los cambios volumétricos de contracción y expansión derivado al contenido de humedad del suelo. Por lo que, la cal permite mejorar propiedades geotécnicas del suelo, tales como: reducir la plasticidad del suelo y de esa forma mejorar su trabajabilidad (SIECA, 2010).

Estabilizador	IP	Pasa Tamiz 0.075mm (No. 200)	Contenido de arcilla (< 0.005 mm)	Materia Orgánica
Cal	$\geq 10\%$	> 25%	> 10% en peso	$\leq 1.5\%$ en peso
Cal y/o cemento	$10 < IP < 20$	< 10%	$\leq 15\%$ en peso	$\leq 1.5\%$ en peso

Cuadro 13. Requisitos de los suelos a estabilizar con cal y/o cemento
Fuente: (SIECA, 2010)

b. Agua

Se realiza el ensayo Proctor modificado o estándar para evaluar la cantidad de agua necesaria para lograr la máxima densidad seca posible del suelo tratado. Se debe agregar la cantidad correcta para garantizar la completa hidratación de la cal y alcanzar un contenido de humedad del suelo que esté 3% por encima del nivel óptimo antes de proceder con la compactación (SIECA, 2010).

c. Consideraciones

Según el documento (PCA, 2003), de la Portland Cement Association -PCA- los factores que influyen en la estabilización de suelos arcillosos, son los siguientes:

- Dosificación del estabilizador
- Método y esfuerzo de compactación
- Gradación y pulverización
- Periodo y condiciones de curación
- Compactaciones retrasadas

4. Dosificación de cal

Entre los procedimientos existentes para la dosificación de cal en el proceso de estabilización se pueden mencionar los siguientes:

- Procedimiento de Eades and Grim: Este método se fundamenta en la determinación del porcentaje óptimo de cal necesario para que un suelo arcilloso alcance un pH de 12.4, porque a este nivel se producen las reacciones químicas fundamentales para la estabilización efectiva del suelo (Pérez, Pérez, & Garnica, 2019).
- Procedimiento de Thompson: Este es el procedimiento más ampliamente utilizado debido a su enfoque integral y multifacético. Se basa en la evaluación de diversos parámetros geotécnicos, incluyendo, pero no limitándose a: Índice de plasticidad, resistencia a la compresión, densidad seca máxima, contenido óptimo de humedad, entre otros (Thompson M. R., 1979).

5. Propiedades

Resistencia a la compresión: El incremento de la resistencia a la compresión se produce a largo plazo como resultado de la combinación de reacciones químicas y mejoras físicas en la estructura del suelo (Dirección General de Caminos, 2001).

Capa de suelo estabilizado con cal	Resistencia mínima a la compresión a 28 días		Especificación
	MPa	kg/cm ²	
Subbase	1.40 MPa	14.3	ASTM D 5102
Base	2.00 MPa	20.4	

Cuadro 14. Resistencia a compresión mínima de estabilización con cal
Fuente: (Dirección General de Caminos, 2001)

H. Tipos de pavimentos

Los pavimentos son estructuras formadas por capas de diferentes materiales que se construyen sobre el terreno natural. Su objetivo es garantizar el flujo de tráfico seguro, cómodo y eficiente de vehículos y peatones (García, 2014). Según la norma AASHTO 93, los

pavimentos se clasifican principalmente en tres tipos: flexibles, rígidos y semirrígidos, cada uno con características y aplicaciones específicas.

1. Pavimento flexible

El pavimento flexible está compuesto por materiales generalmente bituminosos como el asfalto, con el fin de brindar resistencia, durabilidad y flexibilidad. Este tipo de pavimento se usa comúnmente en carreteras, autopistas y otros proyectos de infraestructura de transporte (NAPA & FHWA, 2001).

- Subrasante: Está compuesta de suelo natural compactado que sirve como base para toda la estructura de pavimento.
- Subbase: La subbase se encuentra entre la base y la subrasante y sirve como una transición y ayuda a distribuir la carga de manera uniforme. Proporciona soporte a la estructura del pavimento, la cual se construye comúnmente con materiales como piedra triturada, grava o mezcla con materiales reciclados.
- Base: Está compuesta por materiales granulares compactados, que pueden ser tratados con agentes estabilizadores, se encarga de la distribución de las cargas de tráfico hacia las capas subyacentes. Ayuda a prevenir la deformación de la capa de rodadura y mejora la capacidad estructural del pavimento.
- Capa superior: Se conoce como capa de rodadura y está directamente expuesta al tráfico y a los factores ambientales. Esta capa está compuesta por una mezcla de asfalto diseñada para satisfacer requisitos de rendimiento específicos.

(NAPA & FHWA, 2001)

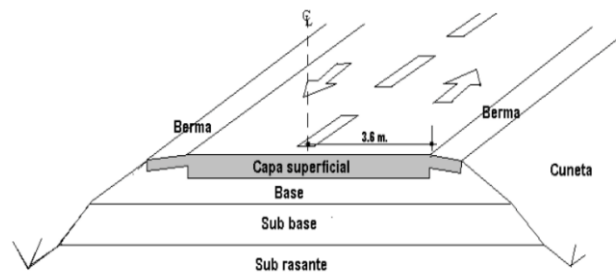


Figura 10. Estructura típica del pavimento flexible
Fuente: (Martinez, 2020)

El comportamiento estructural de este tipo de pavimento se basa en distribuir las cargas de tráfico a través de sus capas mediante el contacto entre partículas, lo que hace que la subrasante tenga una distribución de carga puntual, por el incremento progresivo entre capas. Estos pavimentos son más susceptibles a las grietas por fatiga y a la formación de roderas, especialmente en condiciones de tráfico pesado y cambios climáticos, debido a su flexibilidad (AASHTO Guide of Pavement Structures, 1993)

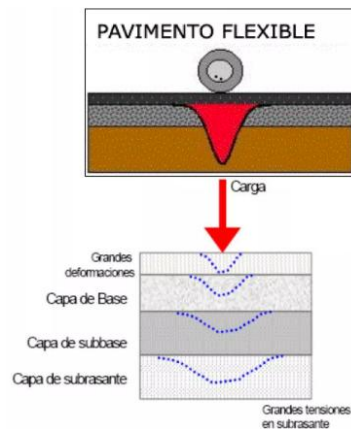


Figura 11. Esquema del comportamiento del pavimento flexible
Fuente: (Chirinos, 2015)

2. Pavimento rígido

Es una estructura de pavimento que utiliza como capa de rodadura una losa de concreto de cemento hidráulico. Se caracteriza por su alta rigidez, la cual le permite distribuir las cargas sobre una amplia superficie, transmitiendo presiones muy bajas a las capas inferiores. Esto contribuye a una mayor durabilidad y una vida útil más prolongada, con una menor necesidad de mantenimiento a lo largo del tiempo (Departamento Nacional de Planeación, 2017).

- **Subrasante:** Es la capa de suelo natural sobre en la que se construye la estructura del pavimento. No debe contener suelos altamente orgánicos, clasificados en el “grupo A” según AASHTO M 145.
- **Subbase:** La subbase es la capa de material granular situada entre la losa de concreto y la subrasante. Su función principal es mejorar el drenaje y proporcionar soporte uniforme y estable a la estructura del pavimento.

- Losa de concreto: Es la capa superior del pavimento, compuesta una losa de concreto de cemento Portland, encargada de soportar y distribuir directamente las cargas del tráfico en una forma minimizada. Su espesor suele variar entre 15 - 30 cm. Esta losa puede ser de concreto simple, reforzado o continuamente reforzado, y diseñada para resistir las tensiones de flexión.

(Departamento Nacional de Planeación, 2017)

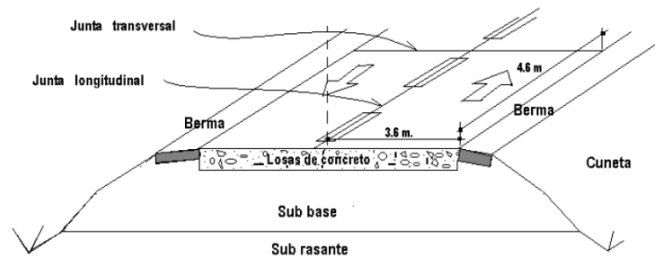


Figura 12. Estructura típica del pavimento rígido
Fuente: (Martinez, 2020)

Por la rigidez del concreto, la distribución de las cargas de tráfico se genera sobre un área extensa de la subrasante, es decir, se reducen las presiones transmitidas al suelo. Sin embargo, un reto en este tipo de pavimento son el diseño de las juntas transversal y longitudinal porque son propensas a agrietarse por contracción y expansión térmica (AASHTO Guide of Pavement Structures, 1993).

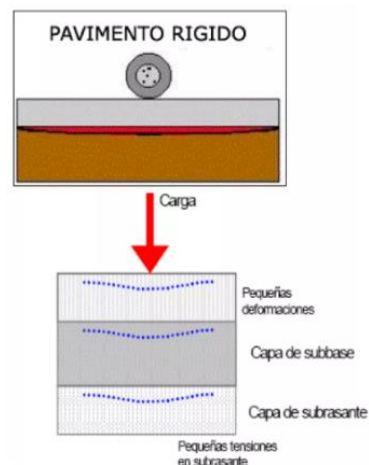


Figura 13. Esquema del comportamiento del pavimento rígido
Fuente: (Chirinos, 2015)

3. Pavimento semirrígido

Es una estructura de pavimento híbrido que combina características de los pavimentos flexibles y rígidos. Está compuesto por una capa de rodadura asfáltica sobre una base tratada con un agente estabilizador como cemento o cal. Esta combinación busca aprovechar las ventajas de ambos tipos de pavimentos (AASHTO Guide of Pavement Structures, 1993).

- Subrasante: Es la capa de suelo natural compactado que sirve de soporte a la estructura del pavimento.
- Subbase: Capa de material granular que mejora el drenaje y la capacidad de soporte.
- Base: Capa estabilizada con cemento, asfalto, cal o aditivos químicos, diseñada para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales locales.
- Capa superior: Proporciona una superficie de rodadura de concreto asfáltico, ofreciendo una mayor capacidad de absorción y distribución de cargas.

(CONSTRUNEIC, 2023)



Figura 14. Esquema del comportamiento del pavimento semirrígido
Fuente: (Moura, 2023)

4. Pavimento adoquinado

Los pavimentos de adoquines de hormigón son superficies conformadas por piezas prefabricadas de hormigón. Según los criterios de diseño considerados, son utilizados en áreas urbanas con bajo tráfico, como plazas públicas, calles peatonales, donde la estética y la durabilidad son aspectos clave. También se emplean en zonas con tráfico pesado a velocidad de circulación limitada hasta 60 km/h, como zonas portuarias y áreas industriales, debido a su resistencia a altas cargas, combustibles y grasas (IECA, 2014).

- Adoquines: Piezas prismáticas que soportan las cargas y ofrecen resistencia y estética.
- Cama de Arena: Capa que permite la correcta nivelación y asentamiento de los adoquines.
- Base y Subbase: Constituidas por materiales granulares o concreto, que soportan las cargas transmitidas.
- Explanada: Base natural que debe tener suficiente capacidad portante.
- Borde de Confinamiento: Elementos que limitan lateralmente el pavimento para evitar desplazamientos.
- Arena de Sellado: Rellena las juntas entre adoquines, facilitando la transmisión de esfuerzos verticales y mejorando la estabilidad.

(IECA, 2014)

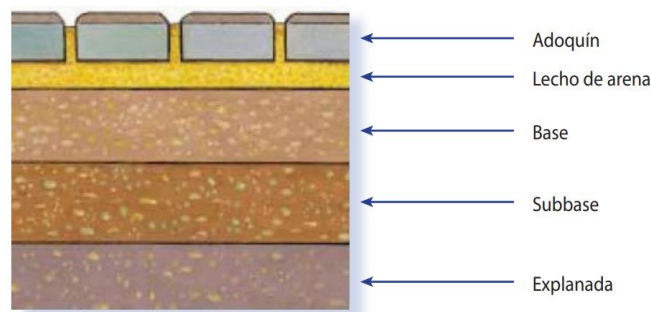


Figura 15. Sección típica de un pavimento de adoquines
Fuente: (IECA, 2014)

5. Pavimento Unicapa de Alto Desempeño (PUAD)

Es un sistema de pavimentación que utiliza una sola capa de pavimento utilizando el suelo existente, mezclado y compactado con un porcentaje de conglomerante hidráulico, generalmente entre 8% y 20%, formando una superficie resistente capaz de soportar las fuerzas de compresión y fricción del tráfico. Este tipo de pavimento destaca por su alta durabilidad, resistencia a la deformación y baja permeabilidad, lo que lo hace ideal para caminos rurales y carreteras con tráfico moderado. Están diseñados para velocidades máximas de 40 Km/h y un periodo de servicio de 3 a 6 años (SIECA, 2010).

El diseño estructural se realiza mediante métodos racionales que consideran el comportamiento real del material tanto a flexión como a fatiga, utilizando parámetros como el módulo de elasticidad, módulo de ruptura y relación de Poisson de la mezcla seleccionada (SIECA, 2010). Las características del suelo deben estar dentro de los rangos siguientes:

Característica del suelo	Porcentaje
Índice de Plasticidad	25.0, máximo
Porcentaje pasa malla, 200	30.0, máximo
Porcentaje retenido en malla, N° 4	4.2, mínimo
Tamaño máximo de partículas gruesas	2.0" máximo

Cuadro 15. Características del suelo para implementar el PUAD
Fuente: (SIECA, 2010)

El proceso constructivo de los PUAD se basa en el cumplimiento de los siguientes pasos:

- **Preparación del suelo existente:** Se prepara y escarifica el suelo existente, y debido a su contenido de cemento, es recomendable que la humedad del suelo esté entre un 5 y 10% por encima del valor de humedad óptima.
- **Colocación del cemento:** Se utiliza Cemento Portland ASTM C-91 Tipo M. Se distribuye sobre la superficie previamente preparada, asegurando que solo se extienda en el área que se pueda finalizar dentro de la jornada de trabajo.
- **Mezcla de suelo con el cemento:** Se realiza el mezclado in situ del suelo con el conglomerante hasta obtener una mezcla homogénea. Este proceso puede llevarse a cabo utilizando equipos tipo mezclador - escarificador o motoniveladora. Al aplicar el cemento,

se dispone de un plazo de dos horas para trabajarlo, por lo que es fundamental considerarlo en los procesos posteriores.

- Aplicación del agua: Se debe revisar el contenido de humedad con el propósito de comparar y cumplir con $\pm 2\%$ de la humedad óptima de compactación, según el ensayo proctor AASHTO T-180. Para esta operación, se utiliza camión de cisterna con distribuidor de agua.
- Compactación: Se conforma y compacta la mezcla para alcanzar la densidad y espesor especificados. El mezclado y compactado se debe concluir en un plazo no mayor de 2 horas. El proceso de compactación debe cumplir con un porcentaje de al menos 95 % de AASTHO T 180.
- Curado: Se realiza un curado para evitar la evaporación rápida de la humedad y garantizar el desarrollo de resistencia del pavimento. Para ello se pueden utilizar compuestos químicos de curado de base acuosa, según dosificación del fabricante, así como emulsiones asfálticas en una tasa de aplicación variando entre 0.7 a 1.4 Litros/m². También se puede aplicar curado con riegos continuos de agua durante 7 días garantizando que la superficie del pavimento no se reseque en ningún momento.
- Cunetas: Se construye las obras de drenaje de los caminos, generalmente en forma triangular o en “V”, ubicadas a los lados del pavimento.

(SIECA, 2010)

Actividad o material	Características	AASHTO	ASTM	Frecuencia mínima	Valor mínimo	Valor Máximo	Punto de muestreo
Pavimentos Unicapa de Alto Desempeño (PUAD)	Granulometría	T-11, T-27		Una muestra cada 1,000 m ³	Según diseño		Después de mezclado
	Índice de Plasticidad	T-90 y T-89	D-4318	Una muestra cada 1,000 m ³	N/A	25.0	Del acopio
	Relación Densidad – Humedad	T-180		Una muestra cada 2,000 m ³ o cambio de material (banco)	N/A	N/A	Del acopio
	Espesor		D-6236	Una muestra cada 250 ml		N/A	Capa compactada
	Densidad de campo y humedad (cono/densímetro nuclear)	T-191/T-310		Una muestra cada 100 ml/carril o tramo trabajado si es menor de 100 ml		100% de T-180	Capa compactada

Cuadro 16. Muestreo de pruebas de control de calidad del PUAD
Fuente: (SIECA, 2010)

I. Factores de diseño de pavimentos

La Guía de Diseño de Pavimentos Mecanístico-Empírica -MEPDG- (2008) ofrece un enfoque sistemático para el diseño de pavimentos. Este método considera diversos factores para garantizar la construcción de estructuras viales que cumplan con los requisitos de desempeño a lo largo de su vida útil.

1. Tránsito

Este factor incluye el flujo de tráfico vehicular, la composición vehicular, las tasas de crecimiento proyectadas, el periodo de diseño, y los factores de distribución por carril y dirección (MEPDG- AASHTO, 2008).

La MEPDG reemplaza el concepto tradicional de Cargas Equivalentes por Eje Simple (ESAL) y, en su lugar, se centra en la distribución de cargas según el tipo de eje, como ejes simples, tándem, trídem y cuádruple. Esta metodología permite evaluar con mayor precisión el impacto del tráfico sobre el pavimento, ya que considera configuraciones especiales de ejes y distribuciones de carga específicas para cada uno de ellos.

Adicionalmente, la metodología contempla la distribución horaria y mensual del tráfico. Los factores de distribución horaria indican el porcentaje de vehículos pesados que utilizan una vía en cada hora del día, mientras que los factores de distribución mensual definen cómo varía el volumen de camiones a lo largo de los meses del año. Estos factores son esenciales para modelar el impacto del tráfico en diferentes condiciones climáticas y de carga (MEPDG- AASHTO, 2008).

Para efectos de este trabajo de investigación, se incluye la distribución del Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA) en el país. En Guatemala, la Dirección General de Caminos es la entidad encargada de clasificar el tránsito en siete categorías principales, considerando los volúmenes vehiculares, el tipo de región y las características geométricas de las vías.

a. Tránsito Promedio Diario (TPDA)

- Tipo A+: corresponde a un tránsito promedio diario anual mayor a 40,000 vehículos.
- Tipo A: corresponde a un tránsito promedio diario anual de 10,000 a 40,000 vehículos
- Tipo B: corresponde a un tránsito promedio diario anual de 3,000 a 10,000 vehículos

- Tipo C: corresponde a un tránsito promedio diario anual de 1,500 a 3,000 vehículos
- Tipo D: corresponde a un tránsito promedio diario anual de 500 a 1,500 vehículos
- Tipo E: corresponde a un tránsito promedio diario anual de 100 a 500 vehículos
- Tipo F: corresponde a un tránsito promedio diario anual de 10 a 100 vehículos

(Dirección General de Caminos, 2018)

2. Propiedades del suelo

Las características del suelo de subrasante son determinantes para el rendimiento y la durabilidad de la estructura en el diseño de pavimentos. El módulo resiliente es el parámetro más importante, dado que es el que indica la rigidez del suelo y su capacidad para soportar cargas repetidas sin experimentar deformaciones permanentes. Adicionalmente, se deben tener en cuenta las propiedades volumétricas y de clasificación, como la granulometría, los límites de Atterberg, el peso unitario y el contenido de humedad, se evalúan mediante ensayos estándar, tales como AASHTO T 88, T 89 y T 90 (MEPDG- AASHTO, 2008).

3. Propiedades de los materiales

Los materiales empleados en la construcción del pavimento deben cumplir con especificaciones técnicas para garantizar el correcto desempeño y larga vida útil. Entre las propiedades se puede mencionar la durabilidad, la resistencia y las características mecánicas, así como la capacidad de soportar las cargas impuestas por las condiciones ambientales y el tráfico (MEPDG- AASHTO, 2008).

4. Condiciones climáticas

En el diseño de pavimentos, un factor importante a considerar son las condiciones climáticas, especialmente en un país como Guatemala, donde las variaciones climáticas pueden ser notables entre las diversas regiones y altitudes. Según la Guía de Diseño de Pavimentos Mecánico-Empírica (MEPDG), el Modelo Climático Integrado (ICM) se emplea para analizar las condiciones climáticas, dado que se utilizan datos climáticos horarios que incluyen precipitación, velocidad del viento, cobertura de nubes y humedad relativa. Este modelo avanzado puede predecir la temperatura y la humedad en cada capa del pavimento y terreno de fundación.

5. Confiabilidad

La confiabilidad en el diseño de pavimentos se refiere a la capacidad del pavimento para cumplir con los requisitos de desempeño esperado a lo largo de su vida útil. A través de este enfoque, se puede establecer el nivel de confiabilidad deseado para cada tipo de deterioro, asegurando que el pavimento mantenga su seguridad y funcionalidad bajo diversas condiciones ambientales y de cargas de tráfico (MEPDG- AASHTO, 2008).

6. Serviciabilidad

El factor de serviciabilidad hace referencia a la capacidad del pavimento para ofrecer a los usuarios un nivel aceptable de comodidad, seguridad y funcionalidad durante su vida útil. Una de las principales métricas utilizadas para medir el deterioro de la superficie es por medio del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), un indicador que evalúa la calidad de la superficie de rodadura. El IRI se determina mediante el perfil longitudinal de la carretera y se expresa mediante la respuesta de un "vehículo de referencia" que circula sobre pavimento. El resultado del índice se ve afectado por factores como la acumulación de deformaciones permanentes, el agrietamiento por fatiga y las condiciones climáticas (MEPDG- AASHTO, 2008).

V. METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad evaluar la viabilidad del uso de conglomerantes hidráulicos para la estabilización de suelos y mejora de caminos rurales en Guatemala. La problemática actual de estos caminos radica en la falta de mantenimiento, baja capacidad estructural y el deterioro acelerado bajo condiciones climáticas adversas. Este estudio busca identificar materiales estabilizantes, como el cemento y la cal, en función de su capacidad para mejorar las propiedades mecánicas del suelo y optimizar el rendimiento de los caminos rurales, presentando opciones técnicas que se adapten a las características del entorno guatemalteco.

Se trata de una investigación con enfoque cualitativo, basado en la revisión de literatura existente y análisis de datos secundarios para analizar la viabilidad del uso de conglomerantes hidráulicos en la estabilización de caminos rurales en Guatemala. La metodología se desarrolló en tres etapas principales: recolección de información, análisis comparativo y elaboración de conclusiones.

Fase No. 1 -Recopilación de información

La primera fase se resume en la recopilación exhaustiva de información. Esto consiste en la revisión de estudios previos, investigaciones relacionadas y datos sobre las condiciones de los caminos rurales en Guatemala. Se consideraron factores como la geología, el clima, la infraestructura existente, la inversión disponible y las necesidades de las comunidades locales. Asimismo, se recopiló información técnica sobre las propiedades fundamentales de los conglomerantes hidráulicos, en este caso del cemento y la cal, incluyendo su capacidad de mejorar la cohesión, resistencia a la compresión, plasticidad y durabilidad de los suelos estabilizados.

Fase No. 2- Análisis de información

Se analizó sobre aspectos como la extensión de la red vial rural, condiciones de transitabilidad, y las fallas comunes que se puedan presentar en los caminos rurales. Para ello se utilizaron informes y datos estadísticos de instituciones gubernamentales, como el Ministerio

de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda de Guatemala (CIV), y entidades internacionales, como el Banco Mundial y otras instituciones.

Se identificaron los beneficios y limitaciones de los conglomerantes hidráulicos en función de las propiedades de los materiales, tales como el aumento de la capacidad portante del suelo, la disminución de su expansividad, la reducción de su susceptibilidad a la erosión y su comportamiento frente a la acción del agua.

La evaluación del impacto ambiental asociado al uso de conglomerantes hidráulicos en caminos rurales es un aspecto importante para determinar su viabilidad. En este estudio, se utilizó la matriz de Leopold con el objetivo de evaluar de manera sistemática y detallada. Este método analiza la interacción entre dos dimensiones principales: las actividades del proyecto que pueden generar impacto ambiental y los factores ambientales susceptibles de ser afectados. La metodología se centra en evaluar tanto la magnitud (intensidad del impacto) como la importancia (relevancia del impacto) de cada interacción. Para ello, se utilizó una escala de evaluación subjetiva que permite calificar estos aspectos de manera estructurada.

IMPACTO NEGATIVO / POSITIVO					
MAGNITUD			IMPORTANCIA		
Intensidad	Afectación	Calificación	Duración	Influencia	Calificación
Baja	Baja	(+/-) 1	Temporal	Puntual	+1
Baja	Media	(+/-) 2	Media	Puntual	+2
Baja	Alta	(+/-) 3	Permanente	Puntual	+3
Media	Baja	(+/-) 4	Temporal	Local	+4
Media	Media	(+/-) 5	Media	Local	+5
Media	Alta	(+/-) 6	Permanente	Local	+6
Alta	Baja	(+/-) 7	Temporal	Regional	+7
Alta	Media	(+/-) 8	Media	Regional	+8
Alta	Alta	(+/-) 9	Permanente	Regional	+9
Muy alta	Muy alta	(+/-) 10	Permanente	Nacional	+10

Cuadro 17. Escala de evaluación matriz Leopold.

Fase No. 3 - Conclusiones

El análisis de factores como las limitaciones en los tipos de suelo, la disponibilidad de materiales, las ventajas técnicas, el impacto ambiental y las capacidades técnicas locales permitió desarrollar un marco de referencia para la implementación de estos materiales en Guatemala.

VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Red vial de Guatemala

1. Extensión y composición de la red vial

De acuerdo con el Plan Estratégico Institucional 2022-2032 del Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, la extensión de la red vial de Guatemala al año 2020 corresponde a 18,174.92 kilómetros. La infraestructura vial está compuesta por 7,473.87 kilómetros pavimentados, lo que equivale al 41.12% del total y una extensión de 10,701.05 kilómetros que se clasifican en terracería y caminos rurales, lo que corresponde al 30.97% y 27.91% respectivamente.

<i>Clasificación de la Ruta</i>	<i>Pavimentadas (km,)</i>	<i>Terracería (km)</i>	<i>Caminos Rurales (km)</i>	<i>Total (km)</i>	<i>% según composición</i>
<i>Centroamericanas</i>	2144.18			2,144.18	11.80%
<i>Nacionales</i>	1,902.90	1,008.80		2,911.70	16.02%
<i>Departamentales</i>	3,426.79	4,619.98		8,046.77	44.27%
<i>Caminos Rurales</i>			5,072.27	5,072.27	27.91%
<i>Total (kilómetros)</i>	7,473.87	5,628.78	5,072.27	18,174.92	
<i>% según tipo de rodadura</i>	41.12%	30.97%	27.91%		

Cuadro 18. Composición de la Red Vial de Guatemala al año 2020
Fuente: (Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, 2023)

La red vial de Guatemala está compuesta principalmente por rutas departamentales, las cuales representan el 44.27% del total de la infraestructura vial. Es importante destacar que la mayor parte de estas rutas son de terracería, lo que genera un impacto negativo en la sociedad, ya que el propósito de la red departamental es facilitar la conexión entre las áreas rurales y los centros urbanos. Por otra parte, los caminos rurales ocupan el segundo lugar en extensión, abarcando el 27.91% de la red vial total del país, lo que resalta su relevancia en la infraestructura vial nacional.

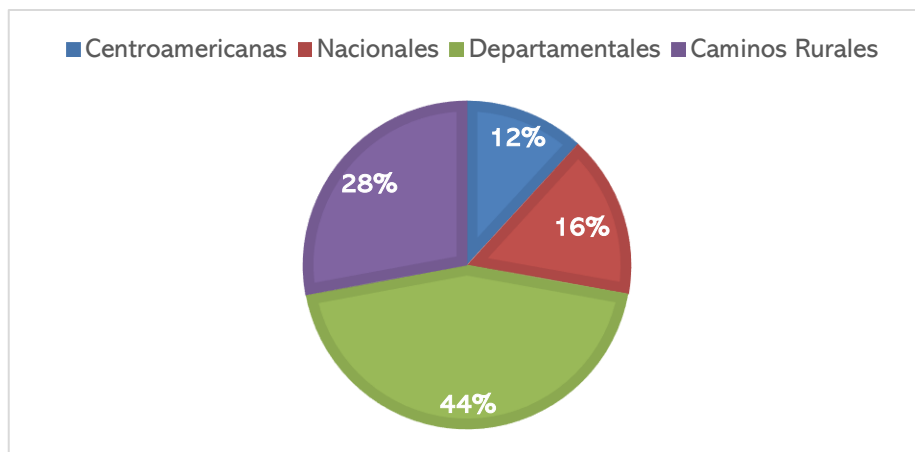


Figura 16. Composición de la Red Vial al año 2020.
Fuente: Elaboración propia

La alta proporción de caminos de terracería refleja los desafíos de infraestructura que enfrenta el país, en términos de mantenimiento, accesibilidad y desarrollo. La condición de estas carreteras no pavimentadas en Guatemala presenta una alta variabilidad temporal, influenciada principalmente por factores estacionales, características del suelo, volumen de tránsito y el nivel de mantenimiento aplicado a la vía de transporte.

<i>Clasificación de la Ruta</i>	<i>% Pavimentadas</i>	<i>% Terracería</i>
<i>Centroamericanas</i>	100%	0.00%
<i>Nacionales</i>	65.35%	34.65%
<i>Departamentales</i>	42.59%	57.41%
<i>Caminos Rurales</i>	0.00%	100%

Cuadro 19. Distribución de la Red Vial de Guatemala según tipo de rodadura
Fuente: (Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, 2023)

La distribución en términos de pavimentación y terracería, clasificada por tipo de ruta, evidencia una marcada diferencia en la infraestructura según su función y nivel de importancia. El 100% de las rutas centroamericanas están pavimentadas, dado que constituyen los principales ejes de conexión interregional y son fundamentales para el comercio y transporte a nivel centroamericano.

Por otro lado, las rutas nacionales presentan un 65.35% de pavimentación, mientras que el 34.65% restante corresponde a terracería. Si bien este porcentaje refleja un avance significativo en la pavimentación, aún existen tramos considerables sin asfaltar, lo que limita la conectividad en ciertas regiones del país.

En cuanto a las rutas departamentales, solo el 42.59% está pavimentado, mientras que el 57.41% permanece en terracería. Esta situación refleja un desafío importante en términos de infraestructura, especialmente porque estas vías son esenciales para la conexión entre las áreas rurales y los centros urbanos.

2. Distribución de caminos rurales

Los caminos rurales en Guatemala son las rutas que evidencian la falta de infraestructura pavimentada en el país, que se traduce a problemas de accesibilidad y desarrollo de las comunidades más alejadas.

De acuerdo con el Plan de Desarrollo Vial 2018-2032 de la Dirección General de Caminos, los departamentos con mayor cantidad de caminos rurales coinciden con los de mayor extensión territorial, como Petén, Chimaltenango, Alta Verapaz y Quiché. Asimismo, estas mismas regiones representan importantes centros de producción agrícola.

La red vial rural es un elemento estratégico para el país, ya que facilita el transporte y distribución de productos agrícolas desde las zonas productoras hasta las diferentes áreas y puntos de exportación, conectando con los mercados nacionales e internacionales (FUNDESA; CACIF, 2017). La mayor parte de la producción agrícola se concentra en las áreas rurales, donde la calidad y diversidad de los cultivos generan ingresos significativos a través de las exportaciones. Este sector constituye un pilar esencial de la economía nacional, por su significativa contribución al Producto Interno Bruto (PIB) (ICEX, 2021).

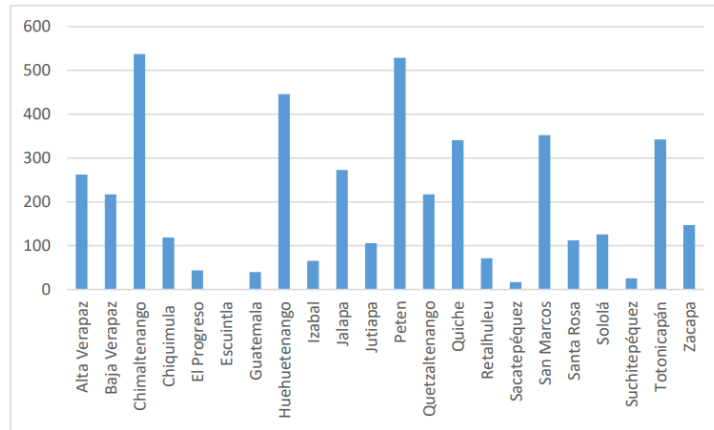


Figura 17. Distribución de caminos rurales totales por departamento
Fuente: (Procuraduría de los Derechos Humanos, 2018)

3. Estado de la red vial no pavimentada

Según la evaluación realizada en 2018 por la empresa Gisystems, determinaron que el 11% de una extensión de 3,691 kilómetros de carreteras se encuentra en un estado de deterioro total, requiriendo una reconstrucción completa (Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, 2023).

Esta evaluación se basó en el Índice de Condición de Carreteras No Pavimentadas (Unsurfaced Road Condition Index - URCI, por sus siglas en inglés), una metodología que utiliza un inventario visual y la medición de daños en la superficie vial con equipo básico. El URCI clasifica las fallas en tres niveles de severidad: bajo (L), medio (M) y alto (H) (Vásquez Varela, 2023).

Carreteras No Pavimentadas		
LONGITUD (KM)	%	ESTADO
565	15.00%	Excelente
886	24.00%	Muy bueno
743	20.00%	Bueno
615	17.00%	Regular
339	9.00%	Malo
150	4.00%	Muy malo
393	11.00%	Colapsado
3,691	100.00%	

Cuadro 20. Estado de la red vial no pavimentada
Fuente: (Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, 2023)

En Guatemala, la mayoría de los caminos rurales carece de un plan de mantenimiento preventivo adecuado, lo que resulta en un estado de abandono o deterioro avanzado de la infraestructura vial. Esta situación afecta gravemente la conectividad y la seguridad en las zonas rurales.

La falta de programas de conservación efectivos no solo acelera el desgaste de las vías, sino que también incrementa considerablemente los costos de rehabilitación. Además, reduce la eficiencia de los caminos para cumplir con su función principal: facilitar el transporte y mejorar la accesibilidad en estas áreas.

4. Conectividad y calidad vial

“En infraestructura vial, Guatemala cuenta con la menor inversión en cuanto a metros de red vial por habitante, apenas un metro, cuando, por ejemplo, Panamá tiene 3.96 metros por habitante” (Véliz, 2024).

Actualmente, Guatemala construye un promedio de 211 kilómetros de carreteras por año, una cifra insuficiente para alcanzar una cobertura vial adecuada. Se estima que el país necesita expandir su red vial a aproximadamente 37,000 kilómetros para mejorar la competitividad y atraer nuevas inversiones comerciales. Para ello, es necesario incrementar la construcción anual entre 1,200 y 2,000 kilómetros, lo que incluye tanto la construcción de nuevas vías como la rehabilitación de carreteras existentes (FUNDESA, 2020).

En este contexto, el Plan de Desarrollo Vial 2018-2032 refuerza la urgencia de estas mejoras, al mostrar la propuesta de caminos rurales y su distribución a nivel nacional. Este plan se basa en llevar a cabo diferentes programas y acciones que adecuen los caminos rurales facilitando el acceso hacia cabeceras municipales y departamentales.

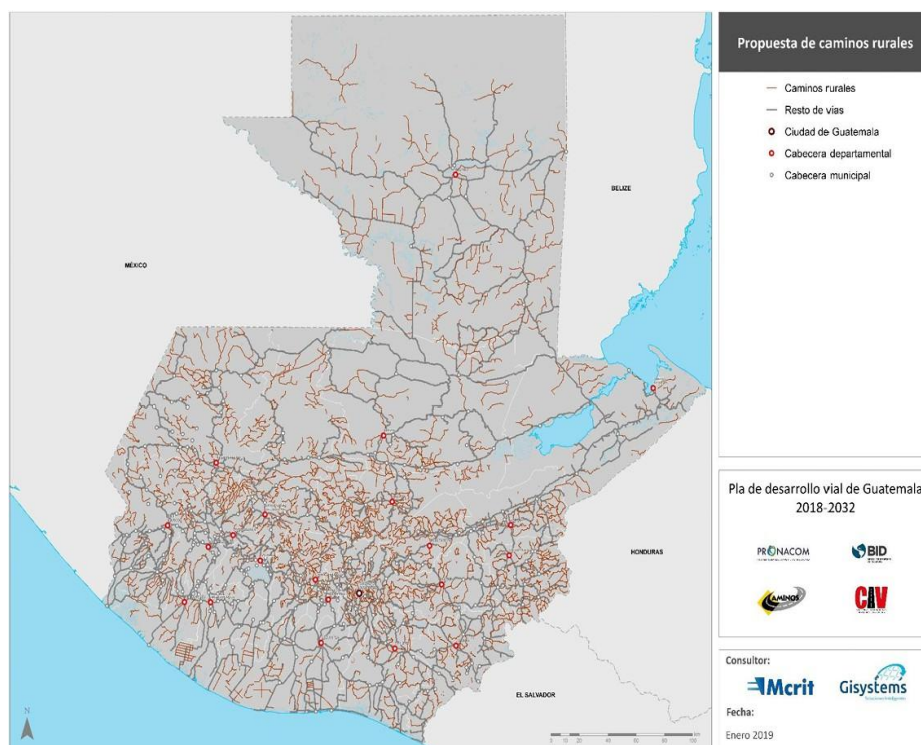


Figura 18. Propuesta de caminos rurales en Guatemala durante el período de 2018-2032. Fuente: (Dirección General de Caminos, 2018)

Según el Índice de Competitividad Global 2019 del Foro Económico Mundial, Guatemala se posiciona en el puesto 134 de 141 países evaluados en cuanto a la conectividad de la red vial y en el puesto 132 en términos de la extensión y condición de sus carreteras. Estas cifras evidencian las limitaciones en la infraestructura vial del país, lo que afecta negativamente su competitividad y capacidad de desarrollo.

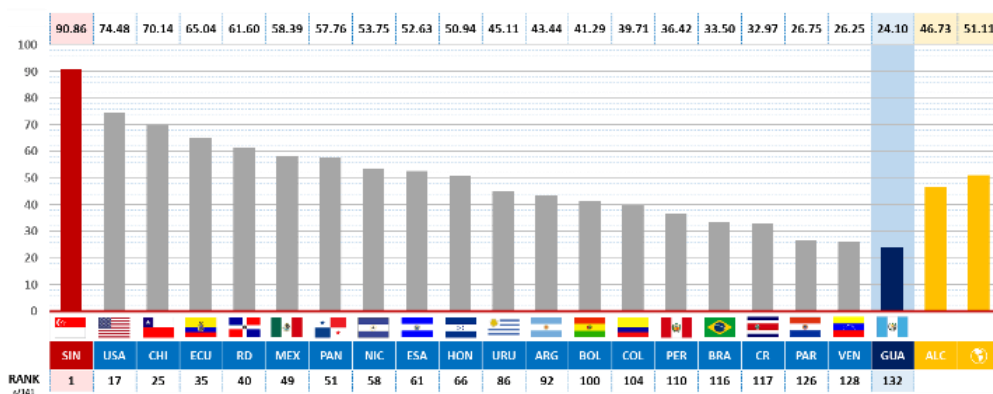


Figura 19. Comparación regional de la red vial respecto a calidad de carreteras en extensión y condición.

Fuente: (Data Export, 2020)

5. Vulnerabilidad ante el cambio climático

Guatemala se encuentra entre los diez países más vulnerables al cambio climático a nivel mundial (UNICEF, 2012). Su ubicación geográfica lo expone a amenazas naturales recurrentes que impactan severamente la infraestructura vial, especialmente en zonas montañosas y de difícil acceso.

Durante la temporada de lluvias, las carreteras de terracería sufren diversos daños debido a que no han sido diseñadas para resistir los efectos de la variabilidad climática. Las precipitaciones intensas pueden provocar erosión, formación de surcos, baches, así como el reblandecimiento del suelo, lo que puede resultar en tramos intransitables, aumentando los tiempos de viaje y riesgos para los usuarios. En contraste, durante la época de verano, surgen problemas como la generación excesiva de polvo, lo cual afecta la visibilidad y la calidad del aire en las diferentes regiones del país.

Asimismo, la red vial de Guatemala está expuesta a desastres naturales, con un 24% de las carreteras expuestas a inundaciones, 51% a deslizamientos de tierra, 70% a huracanes y 88% a terremotos. Esta alta vulnerabilidad a desastres naturales subraya la necesidad urgente de implementar medidas de mitigación y resiliencia en la planificación y mantenimiento de la infraestructura vial del país (Santiago X., 2024).

6. Suelos predominantes

En Guatemala, la composición del suelo varía según la región geográfica, predominando los suelos arcillosos y limo-arcillosos, caracterizados por su alta capacidad de retención de agua. Durante la temporada de lluvias, estos suelos tienden a saturarse, volviéndose extremadamente blandos, lo que favorece la formación de baches, afectando la transitabilidad y aumentando la necesidad de mantenimiento continuo.

Por otra parte, las regiones de mayor altitud presentan suelos compuestos por gravas y arenas, los cuales ofrecen un mejor drenaje. Sin embargo, estos suelos son más propensos a la erosión y, durante la estación de verano, favorecen la formación excesiva de polvo, lo que no solo afecta la visibilidad de los conductores, sino que también compromete la calidad del aire en las comunidades cercanas (Pineda, 2024).



Figura 20. Ejemplo de saturación de suelo en Guatemala
Fuente: (CONRED, 2024)

7. Recursos locales

La disponibilidad de materiales para la construcción y mantenimiento de caminos rurales en Guatemala representa un desafío para el desarrollo de la infraestructura vial. La limitada accesibilidad a agregados de calidad, como el balastro, dificulta tanto la construcción como la conservación de estas vías. Una de las principales desventajas del método tradicional con balastro es que no todas las regiones de Guatemala cuentan con yacimientos cercanos de este material. Esto obliga a transportar el material desde otras áreas, lo que incrementa significativamente los costos de logística y construcción.

Además, la extracción de balastro está regulada por el Ministerio de Energía y Minas, lo que puede generar restricciones ambientales y de sostenibilidad en ciertas áreas, limitando aún más su disponibilidad. Los departamentos que cuentan con bancos de material, como Guatemala, El Progreso, Alta Verapaz, Sololá, San Marcos y Quetzaltenango, entre otros, enfrentan una alta demanda para abastecer regiones más alejadas (Ministerio de Energía y Minas, 2019). Esta situación se ve intensificada por las condiciones geográficas y logísticas del país, las cuales dificultan la movilización de materiales desde las canteras, incrementando los costos de los proyectos y retrasando su ejecución.

8. Fallas comunes en los caminos rurales

Además de las limitaciones en los recursos locales y los métodos tradicionales, los caminos rurales enfrentan una serie de fallas estructurales que afectan directamente su funcionalidad y durabilidad.

La falta de programas de mantenimiento preventivo y correctivo contribuye al deterioro acelerado de la red vial rural, que dificultan el tránsito.

1. Sección transversal incorrecta

Entre los problemas más comunes se encuentran un diseño deficiente de la calzada, sin el bombeo adecuado para un drenaje eficiente. Además, cunetas mal diseñadas que impiden la evacuación correcta del agua, afectando la estabilidad estructural de la vía. A esto se suman taludes con pendientes mal diseñados y la falta de estabilización, que incrementan la probabilidad de deslizamientos de tierra, especialmente en suelos arcillosos o en zonas montañosas.



Figura 21. Construcción de tramo carretero con sección transversal incorrecta
Fuente: (Herrera, 2021)

2. Drenaje inadecuado en el borde de la carretera

El drenaje deficiente en las carreteras rurales de Guatemala es un problema persistente que compromete su durabilidad y funcionalidad. Esto se debe, en gran medida, a la falta de mantenimiento y al diseño inadecuado de los sistemas de drenaje, como cunetas y alcantarillas. Las cunetas, a menudo no revestidas o bloqueadas por vegetación y sedimentos, dificultan el flujo de agua. Además, las pendientes inadecuadas en las cunetas y contracunetas aumentan el riesgo de deslizamientos y fallas estructurales. La ausencia de disipadores de energía en las salidas de agua también intensifica la erosión del terreno circundante, agravando los daños a la infraestructura vial.



Figura 22. Colapso de tramo carretero por fallas en drenaje en Ixcán, Quiché
Fuente: (Barreno, 2022)

3. Corrugaciones

El tráfico vehicular produce vibraciones repetitivas sobre la superficie del camino, provocando el desplazamiento del material granular y la formación de ondulaciones. Este fenómeno se ve agravado por la falta de mantenimiento periódico, el uso de materiales pobremente graduados y a las condiciones climáticas adversas, como lluvias intensas, que aceleran la erosión de la superficie. La combinación de estos factores reduce la vida útil del camino, comprometiendo su funcionalidad y seguridad para los usuarios (Comisión de Caminos Rurales, 2018).

4. Polvo

La falta de pavimentación o estabilización del suelo provoca el levantamiento de polvo, afectando tanto la visibilidad en la vía como la salud de las comunidades cercanas. El constante paso de vehículos y la fricción generan la desintegración del suelo, formando partículas finas que se dispersan fácilmente con el viento, especialmente durante la temporada seca.



Figura 23. Ejemplo de polvo procedente del paso de vehículos en ruta en San Marcos
Fuente: (Barrera, 2019)

5. Baches

Los baches en los caminos rurales son el resultado de la acción combinada del tránsito vehicular, la infiltración de agua y las variaciones de temperatura. El tráfico continuo, especialmente el de vehículos pesados, provoca el deterioro progresivo de la superficie, generando grietas que, con el tiempo, se profundizan y comprometen la estabilidad del camino.

Según las "Especificaciones Técnicas para la Construcción de Caminos Rurales en Guatemala", es fundamental implementar un mantenimiento regular que incluya la nivelación de la superficie para eliminar irregularidades, así como el relleno adecuado de baches con materiales apropiados. Estas acciones permiten mantener una vía uniforme y segura, prolongando su vida útil y reduciendo los costos de rehabilitación a largo plazo (Dirección General de Caminos, 2001).



Figura 24. Camino rural con formación de baches
Fuente: (Cardona, 2012)

6. Surcos (ahuellamientos)

Se originan principalmente por el tráfico vehicular, especialmente de vehículos pesados, que compactan el material del camino de manera desigual. Esto, en conjunto con la falta de mantenimiento regular, contribuye a la formación de depresiones longitudinales en la superficie del camino. Las condiciones climáticas adversas, agrava el problema al erosionar el material suelto, acentuando los surcos. Además, la ausencia de un diseño de drenaje adecuado permite la acumulación de agua en estas depresiones, acelerando el deterioro del camino (Comisión de Caminos Rurales, 2018).



Figura 25. Ahuellamientos en camino de terracería
Fuente: (Álvarez, 2023)

7. Agregado suelto

Este problema ocurre cuando el material granular que conforma la capa de rodadura del camino no ha sido compactado de manera adecuada o se ha deteriorado con el tiempo debido al tráfico vehicular y a la acción del agua. Como consecuencia, el material se desplaza, dejando una superficie irregular y suelta.



Figura 26. Agregado suelto y erosión de suelo en camino de terracería
Fuente: (Siliezar, 2021)

B. Conglomerantes hidráulicos en infraestructura rural

El desarrollo de la infraestructura vial en áreas rurales en Guatemala presenta ciertos desafíos debido a condiciones como terrenos inestables, vulnerabilidad al cambio climático y limitaciones de recursos. En este contexto, la selección de nuevas alternativas de materiales para la estabilización de suelos es fundamental para mejorar su durabilidad y funcionalidad.

1. Aplicación del conglomerante hidráulico

La selección de conglomerantes hidráulicos para la estabilización de suelos en caminos rurales debe basarse principalmente en la tipología del suelo en cada región. Además, de considerar las condiciones climáticas adversas a las que están expuestos estos caminos, dado que influyen en el rendimiento y durabilidad de los suelos estabilizados.

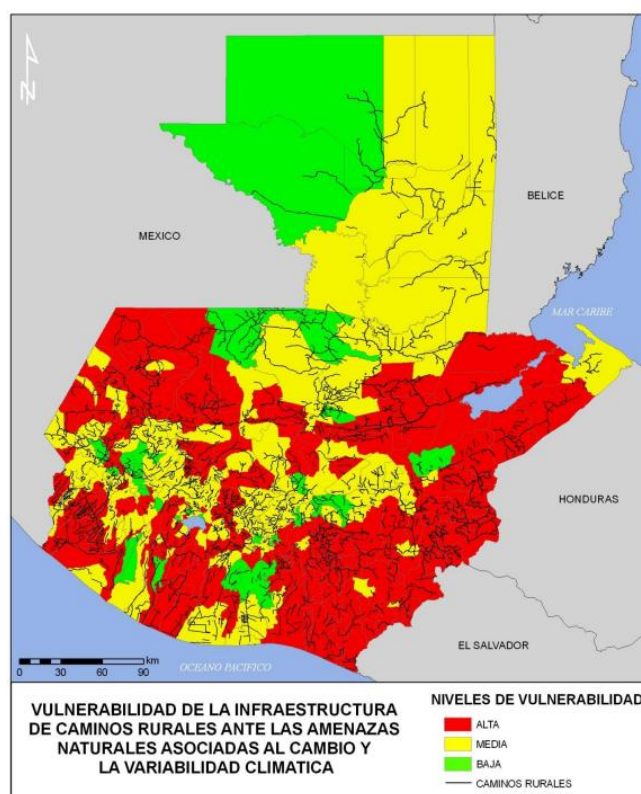


Figura 27. Niveles de vulnerabilidad de la infraestructura de caminos rurales ante las amenazas naturales asociadas al cambio climático

Fuente: (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente -IARNA-, 2013)

Una de las principales ventajas técnicas de los conglomerantes hidráulicos es su capacidad

de adaptación a distintos tipos de suelos, desde arcillas finas hasta arenas gruesas, lo que los hace adecuados para las diversas condiciones geológicas de Guatemala. En términos funcionales, estos materiales contribuyen a mejorar la accesibilidad en áreas rurales, dado que sus propiedades permiten la estabilización de suelos locales, reduciendo la necesidad de materiales externos como el balastro, cuya disponibilidad y calidad pueden ser limitadas en ciertas regiones. Asimismo, los suelos estabilizados con conglomerantes hidráulicos presentan una mayor resistencia a condiciones climáticas extremas, como lluvias intensas e inundaciones, lo que incrementa la durabilidad y resiliencia de los caminos rurales.

NIVEL DE VULNERABILIDAD CLIMÁTICA	REGIONES	CARACTERÍSTICAS	CONDICIÓN PREDOMINANTE DEL SUELO	CONGLOMERANTE HIDRÁULICO RECOMENDADO	JUSTIFICACIÓN TÉCNICA
ALTA	La mayor parte de la región del Suroccidente, Noroccidente, Central y algunas áreas del Oriente del país.	Zonas con lluvias intensas, erosión y deslizamientos	Arcilloso y limo-arcilloso	Cemento / Combinación Cemento-Cal	La cal reduce la plasticidad y expansión; el cemento aporta resistencia mecánica, mejora la cohesión del suelo y reduce la permeabilidad.
MEDIA	Región Norte, algunas áreas de Petén y áreas del Suroccidente del país.	Variabilidad climática con lluvias moderadas y riesgo de erosión leve	Suelo con plasticidad moderada	Cemento	Mejora la compactación, reduce la plasticidad y controla la expansión del suelo.
BAJA	Áreas de la región del Norte, áreas aisladas en el Suroccidente y municipios de Petén como San Andrés, La Libertad y Las Cruces.	Menor riesgo de sufrir daños significativos en su infraestructura vial rural debido a su topografía y condiciones climáticas más estables.	Compuestos principalmente por suelo granular o arenoso	Cal	Reduce la plasticidad y mejora la estabilidad sin generar fisuración excesiva.

Cuadro 21. Análisis de aplicación del conglomerante hidráulico en función de la vulnerabilidad climática y tipo de suelo

Fuente: Elaboración propia

2. Estabilización de suelos con cemento

La estabilización de suelos con cemento permite aprovechar los suelos disponibles in situ, lo cual reduce los costos asociados al transporte y la extracción de materiales de bancos externos, Además, mejora las propiedades mecánicas del suelo original.

a. Ventajas

- Mayor resistencia a la compresión: La composición del cemento puede crear enlaces entre las partículas del suelo, de tal manera aumenta su cohesión y resistencia. Según la norma ASTM D1633 y Tabla 307-3 del Libro Azul de Caminos, la resistencia que alcanza un suelo-cemento para subbases es de 2.40 MPa y para bases es de 3.50 MPa.

- Reducción de la susceptibilidad del suelo a cambios de humedad: La permeabilidad de la mayoría de los suelos se disminuye con la adición de cemento, por la reacción química que se produce entre el cemento y los componentes del suelo, que es conocido como reacción de hidratación y cementación. Sin embargo, para aumentar el tiempo de vida útil del suelo estabilizado, la estructura debe de contar con un sistema de drenado de aguas.
- Aprovechamiento de suelo existente: Se puede utilizar el suelo existente a excepción de los suelos muy plásticos, orgánicos o con altos contenidos de sales. De lo contrario, puede afectar el comportamiento estructural.
- Reducción en el transporte de materiales de préstamo: El suelo-cemento permite utilizar los suelos disponibles in situ o materiales cercanos al lugar de la obra, reduciendo significativamente la necesidad de transportar grandes cantidades de materiales desde canteras lejanas.
- Disminución la explotación de bancos de material: No se requiere de explotación de material natural en un banco de préstamo y permite un control más regulado en el uso de materiales de construcción.
- Menores intervenciones de mantenimiento: Las propiedades mecánicas del suelo cemento aumentan con el tiempo, lo que hace que el mantenimiento sea mínimo, y que no sean intervenciones correctivas.
- Mayor durabilidad: Reduce los efectos adversos causados por la erosión y la fatiga del pavimento generada por los esfuerzos superficiales debidos al tránsito vehicular.
- Mejor distribución de cargas aplicadas al pavimento: Su rigidez permite distribuir las cargas sobre un área más amplia, reduciendo los esfuerzos y deformaciones en las capas inferiores del pavimento. Además, permite reducir el espesor requerido de los pavimentos.

(FICEM, 2007)

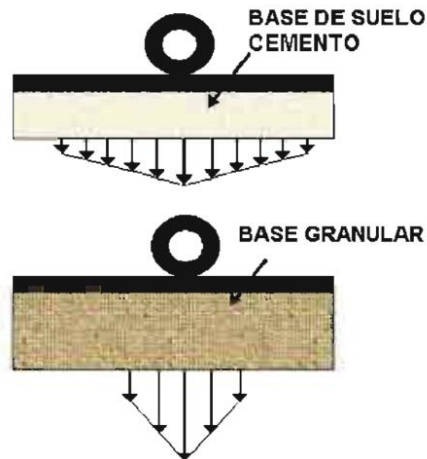


Figura 28. Estado de distribución de esfuerzos según Portland Cement Association
Fuente: (FICEM, 2007)

b. Limitaciones

- Tipo de suelo: Los suelos más apropiados para estabilizar utilizando cemento son los granulares tipo A-1, A-2 y A-3, o suelos con plasticidad baja o media. Se limita su uso para suelos de alta plasticidad, suelos con altos contenido de materia orgánica o con alto contenido de sales (ACI 230. 1R-09, 2009).
- Fisuración por contracción: Un diseño, dosificación y control de calidad inadecuado, pueden provocar que el suelo-cemento desarrolle fisuras de contracción que pueden reflejarse en capas superiores.
- Tiempo limitado del proceso: El proceso de mezclado, conformado y compactación debe realizarse en un tiempo limitado por el fraguado del cemento, lo que exige una planificación y ejecución cuidadosa del proceso constructivo para evitar fallas en el comportamiento estructural.
- Sensibilidad a las condiciones de curado: El desarrollo óptimo de sus propiedades depende del proceso de curado, lo cual puede ser desafiante en presencia de condiciones climáticas adversas.

- Baja resistencia al desgaste: En algunas aplicaciones, puede ser necesario agregar capas de rodadura adicionales para soportar adecuadamente el desgaste causado por las condiciones climáticas y el tráfico vehicular.

(FICEM, 2007)

3. Estabilización de suelos con cal

La estabilización de suelos con cal tiene como objetivo principal mejorar las características de trabajabilidad y las propiedades mecánicas del suelo, con un enfoque particular en la reducción de su plasticidad. Este método se emplea comúnmente en suelos arcillosos que presentan un índice de plasticidad mayor a 10 y con al menos un 25% de finos que pasan el tamiz No. 200 (National Lime Association, 2004).

a. Ventajas

- Reducción de la expansión y contracción: La cal disminuye el índice de plasticidad (IP) de los suelos arcillosos, reduciendo su tendencia a expandirse y contraerse ante variaciones de humedad. Esto reduce problemas como agrietamientos y levantamientos del pavimento o estructuras construidas sobre suelos expansivos (National Lime Association, 2004).
- Mejora la trabajabilidad del suelo: Transforma el suelo de un estado plástico y pegajoso a una superficie más estable y manejable, facilitando el movimiento de la maquinaria y la compactación del suelo (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000).
- Reducción de la humedad del suelo: La cal viva reacciona químicamente con el agua presente en el suelo, generando calor y acelerando la evaporación de la humedad (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), 2008).
- Aumenta la impermeabilidad: Al reducir la porosidad, la cal limita el paso de agua a través del suelo, permitiendo únicamente un movimiento lento por capilaridad. Este efecto mejora la resistencia del suelo a la saturación de agua (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000).
- Reducción de la plasticidad: Al interactuar la cal químicamente con las partículas del suelo reduce la plasticidad de este. Por lo tanto, es efectivo en suelos con índices de plasticidad

mayores al 10%, como clasificados en el grupo A-5, A-6, A-7, según la norma AASHTO M-145 y en los grupos MH, CH, OH según el Sistema Unificado de Calcificación de Suelos.

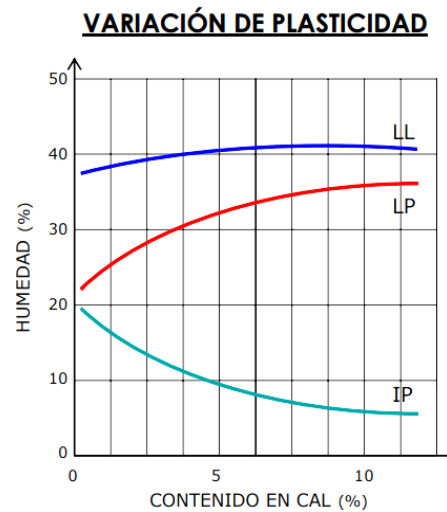


Figura 29. Variación de la plasticidad de un suelo estabilizado con cal
Fuente: (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000)

- **Aumento de la resistencia:** La resistencia a la compresión del suelo mejora a largo plazo como resultado de la combinación de reacciones químicas y las mejoras físicas en su estructura. Según las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes, la resistencia mínima a la compresión a 28 días debe de ser de 1.40MPa para subbase y 2.00MPa para bases (Dirección General de Caminos, 2001).

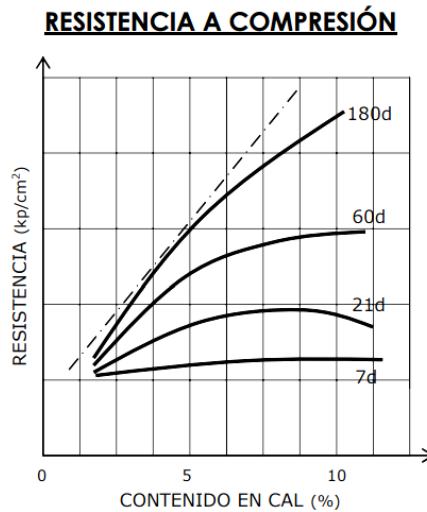


Figura 30. Variación de la resistencia a compresión de un suelo estabilizado con cal
Fuente: (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000)

b. Limitaciones

- Tipo de suelo: La estabilización de suelos con cal es menos efectiva en suelos arenosos o con un índice de plasticidad inferior a 10, ya que estos suelos no contienen de los minerales arcillosos necesarios para que se desarrollen las reacciones químicas que forman los compuestos puzolánica (National Lime Association, 2004).
- Sensibilidad a las condiciones climáticas: La estabilización con cal necesita condiciones de clima cálido para endurecerse correctamente. Se recomienda que la temperatura del aire sea de al menos 40 grados Fahrenheit (4.4 grados Celsius) o superior. Esta temperatura debe mantenerse a la sombra para asegurar una reacción química adecuada entre la cal y el suelo (National Lime Association, 2004).
- Control de calidad: Es necesario un control de calidad riguroso tanto en la dosificación como en el proceso constructivo para asegurar los resultados esperados. Cualquier desviación en la mezcla, la compactación o el curado compromete el desempeño final del suelo estabilizado (SIECA, 2010).
- Tiempo de curado: La estabilización de suelo con cal requiere un período de curado mínimo de 28 días para permitir que las reacciones químicas se completen y el suelo

adquiera la resistencia necesaria. Este tiempo se ve influenciado por factores climáticos, el tipo y cantidad de cal utilizada y los requisitos del proyecto (SIECA, 2010).

4. Estabilización de suelos con cemento – cal

En las áreas rurales de Guatemala, es común encontrar suelos arcillosos y arenosos de baja cohesión. Cuando los suelos presentan altos niveles de humedad o plasticidad, es recomendable realizar un tratamiento previo con cal para maximizar la acción del cemento sobre el suelo.

Siendo Guatemala un país con gran variedad de suelos y climas, este método puede ser de utilidad. La adición inicial de cal facilita el mezclado y la compactación, creando una base más homogénea y adecuada para la incorporación posterior de cemento Portland. La cal reduce la plasticidad y humedad del suelo, mejorando su trabajabilidad y proporcionando una base estable para el proceso de estabilización. Una vez que el suelo ha sido preparado adecuadamente, se añade el cemento Portland, que aporta resistencia adicional y forma una matriz cementante más efectiva (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), 2008). En regiones con clima lluvioso, esta combinación ayuda a mantener la integridad del suelo estabilizado, soportando mejor la presión del agua y reduciendo el riesgo de saturación y degradación rápida del camino.

5. Ciclo de vida

El cemento y la cal son materiales ampliamente utilizados en la industria de la construcción, en aplicaciones de estabilización de suelos sirve para mejorar la resistencia y durabilidad de caminos y pavimentos. Sin embargo, su producción y uso generan un impacto ambiental significativo, derivado de la extracción intensiva de materias primas, las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo energético y la generación de residuos.

Por esta razón, es necesario realizar una evaluación integral del impacto ambiental, considerando cada etapa de su ciclo de vida, desde la extracción y fabricación hasta su aplicación y disposición final.



Figura 31. Ciclo de vida del cemento y cal en la estabilización de suelos
Fuente: Elaboración propia

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una metodología que permite estudiar el impacto ambiental de un producto desde la extracción de sus materias primas hasta su disposición final. Este enfoque integral proporciona una visión de las emisiones, el consumo de recursos y los residuos generados en cada fase del ciclo de vida del conglomerante hidráulico, permitiendo identificar las áreas más críticas y las oportunidades para mejorar la sostenibilidad. La metodología del ACV está estandarizada bajo las normas ISO 14000, que proporcionan directrices para evaluar y reducir los impactos ambientales de productos y procesos industriales (Mora, Romay, Segovia, & Herrero, 2008).

ETAPA	DESCRIPCIÓN	IMPACTOS GENERADOS
Extracción de materias primas	Extracción de caliza, arcilla, arena y mineral de hierro de canteras y minas (Revista Granito de Arena, 2022).	Erosión de las minas y canteras, contaminación atmosférica por ruido y material particulado, consumo de recursos naturales no renovables (Instituto Centroamericano de Estudios Fiscales, 2014) .
Producción del cemento	Se realiza la trituración de materias primas. Luego, estas se pulverizan y homogeneizan. Posteriormente, la mezcla se somete a un proceso de calcinación en el que se calienta a altas temperaturas, convirtiéndose en clinker. Este clinker se muele finamente junto con otros aditivos minerales para producir el cemento (Revista Granito de Arena, 2022).	Emisiones significativas de CO ₂ (aproximadamente 0.9 kg de CO ₂ por kg de cemento producido), alto consumo de energía (entre 3.4 y 5.0 Gigajoule por tonelada), generación de partículas, y emisión de óxidos de nitrógeno y azufre que contribuyen a la contaminación del aire (INECC, 2016).
Transporte al sitio de aplicación	Traslado del cemento mediante el uso de transporte pesado hasta la ubicación de la obra.	Emisiones de CO ₂ (62-110 g CO ₂ /ton-km) y otros contaminantes por el uso de combustibles fósiles en el transporte, ruido y contaminación por partículas debido a la fricción de neumáticos y pavimento (McKinnon, 2007).
Aplicación del conglomerante hidráulico para la estabilización del suelo	Aplicación del cemento en bolsas o a granel con esparcidor. Se esparce en la capa de suelo escarificado, pulverizado y húmedo. La cantidad de conglomerante a distribuir es según el diseño de la obra. Posteriormente, se realizan las siguientes etapas: mezclado, nivelación: compactación y curado (SIECA, 2010).	Emisiones de CO ₂ por el uso de maquinaria pesada para la mezcla y compactación, alteración del pH del suelo, contaminación del aire por el proceso de distribución del cemento en el suelo in situ.
Uso y mantenimiento	El mantenimiento rutinario abarca limpieza de drenajes y reparaciones menores (SIECA, 2010).	Emisiones de CO ₂ derivadas del uso de maquinaria para reparaciones, generación de residuos de cemento y partículas que pueden ser arrastradas a los drenajes, posible lixiviación de materiales a cuerpos de agua cercanos.
Fin de la vida útil	Al finalizar la vida útil de una carretera estabilizada, puede ser necesario remover o reutilizar los materiales (Dirección General de Caminos, 2002) .	Gestión de residuos sólidos.

Cuadro 22. Análisis del Ciclo de Vida del cemento en estabilización de suelos
Fuente: Elaboración propia

La estabilización del suelo mediante el uso de conglomerantes hidráulicos, como el cemento, conlleva una serie de etapas que generan diversos impactos ambientales. Desde la extracción de materias primas hasta el final de la vida útil de la carretera estabilizada, cada fase del proceso genera emisiones de CO₂ y otros contaminantes, contribuyendo a la huella ecológica del proyecto. Sin embargo, a largo plazo, el uso de materiales con mayor durabilidad permite reducir el consumo de recursos y las emisiones asociadas a la rehabilitación o reparación de los caminos.

C. Implementación de Pavimento Unicapa de Alto Desempeño (PUAD)

En países en desarrollo, como Guatemala, donde gran parte de la red vial rural no está pavimentada y enfrenta problemas significativos de mantenimiento, el PUAD ofrece una alternativa para optimizar la conectividad y reducir los costos de conservación.

1. Características técnicas

La resistencia a la compresión aproximada a los 28 días estará entre 50 y 70.0, kg/cm² y los valores típicos en flexión a los 28 días estarían en un rango de 11 kg/cm² – 23 kg/cm² (entre 18 y 20% de la resistencia a compresión) (SIECA, 2010).

2. Durabilidad y mantenimiento

Requieren un mínimo de intervenciones de mantenimiento en la calzada, salvo la limpieza periódica de los sistemas de drenaje. Están diseñados para períodos cortos entre 3 y 6 años, una vez finalizado su ciclo de servicio, su estructura puede reutilizarse como base para una nueva capa de rodadura (Siliezar, 2021).

3. Desempeño en condiciones climáticas adversas

Los materiales empleados en este tipo de pavimento se distinguen por su baja permeabilidad y alta capacidad de carga, lo que les confiere una mayor resistencia frente a la erosión y a las deformaciones ocasionadas por lluvias intensas y el tránsito vehicular (ACI 230. 1R-09, 2009).

4. Contribución a la seguridad vial

La implementación de este tipo de pavimento mejora la seguridad vial al proporcionar una superficie de rodadura más uniforme, con mejor adherencia y menor susceptibilidad a la formación de baches y charcos, así como la producción de polvo. Esto reduce el riesgo de accidentes, especialmente en condiciones climáticas adversas.

D. Comparativa con el método tradicional

En Guatemala, el balasto es el material más utilizado en la construcción y mantenimiento de caminos rurales. Sin embargo, en ciertas regiones del país, su disponibilidad es limitada o la calidad del material es deficiente, lo que compromete la durabilidad y funcionalidad de las vías. Ante estos desafíos, el pavimento unicapa de alto desempeño (PUAD) emerge como una alternativa para la construcción de la capa de rodadura de caminos rurales, siendo un sistema de pavimentación que se basa en el uso de cemento y el suelo in situ.

1. Ventajas

Esta comparativa evalúa las características técnicas y beneficios de ambos tipos de capa de rodadura, con el objetivo de identificar las ventajas del uso de cada material en la infraestructura vial rural de Guatemala.

Criterio	Pavimento Unicapa	Camino Rural con Balasto
Resistencia a la Compresión a 28 días	4.90 - 6.86 MPa	No aplica (material granular)
Resistencia a la Flexión	1.08 - 2.26 MPa	No se evalúa directamente
Adherencia	Alta, debido al uso de cemento	Baja, depende de la compactación
Durabilidad	Alta, resiste erosión y desgaste	Baja, desplazamiento de material, formación de baches
Vida Útil	3-6 años con mantenimiento mínimo	1 - 2 años, con mantenimiento constante
Mantenimiento	Bajo, solamente aplica para limpieza de drenajes	Alto, requiere aplicación de material dos veces al año (antes y después de la estación lluviosa)
Capacidad de Drenaje	Moderada, depende de la calidad del diseño	Alta, permite la infiltración de agua
Impacto Ambiental	Emisiones por uso de cemento	Requiere extracción de material
Tiempo de construcción	Requiere más tiempo debido al curado y procesos de construcción	Construcción más rápida, se puede utilizar inmediatamente
Comportamiento ante condiciones climáticas extremas	Mejor comportamiento en lluvias intensas, resistencia mejorada	Menos efectivo en lluvias, puede volverse intransitable, se desplaza el material
Sostenibilidad y reciclabilidad	Uso de suelo in situ, bajo impacto ambiental al final de vida útil	Extracción de material tiene mayor impacto ambiental, reciclado difícil
Tiempo de curado	Requiere entre 7 a 14 días para un curado adecuado	No requiere tiempo específico de curado
Adaptabilidad a modificaciones	Menos adaptable una vez curado	Fácil de modificar y reparar
Materiales	Utiliza suelo in situ, requiere disponibilidad de cemento	Material de cantera

Cuadro 23. Comparación entre Pavimento Unicapa y Camino Rural con Balasto
Fuente: Elaboración propia

El pavimento unicapa destaca principalmente por su durabilidad y resistencia, ofreciendo una vida útil de 3 a 6 años con un mantenimiento mínimo, lo cual permite reducir los costos operativos a lo largo del tiempo. Su mejor adherencia y resistencia a la erosión también favorecen su desempeño en carreteras rurales.

La amplia disponibilidad de cemento y la presencia de múltiples plantas de producción locales optimizan la logística de transporte y suministro, convirtiéndolo en una alternativa accesible y práctica para proyectos de infraestructura vial en áreas rurales. Siendo Guatemala el mayor productor de cemento de Centro América, que alcanzó en el 2021 una producción de 4.13 millones de toneladas (Palala, 2024).

Por otro lado, el camino rural con balasto ofrece la ventaja de una construcción más rápida y sencilla, dado que no requiere tiempo de curado, permitiendo su uso inmediato después de su aplicación. Sin embargo, su implementación depende de la disponibilidad de bancos de material de préstamo, lo que puede representar un desafío en ciertas regiones. Además, es una capa de rodadura que exige un mantenimiento constante, de lo contrario, este se desplaza y afecta los drenajes de las carreteras y la capa de rodadura del camino rural, lo cual compromete la transitabilidad del camino.

2. Impacto ambiental

La calificación obtenida en la matriz de Leopold se basa en un proceso subjetivo, ya que se tiene como base la interpretación de información disponible y las percepciones de los impactos generados por cada actividad evaluada. Esta subjetividad está influenciada por diversos factores, como las fuentes de información utilizadas, que incluyen noticias, reportes ambientales y datos técnicos.

a. Camino rural con balasto

La construcción de caminos con capa de revestimiento de balasto implica la extracción de materiales, lo cual genera impactos negativos en el entorno natural, especialmente en áreas donde los recursos minerales son escasos o frágiles.

Proceso de colocación de capa de revestimiento (balasto) en camino rural			Extracción del balasto				Preparación del terreno		Capa de revestimiento de Camino Rural						Afectaciones		Total Afecciones	Agregado del Impacto
			Limpieza del banco de material	Ensayos in situ	Explotación (Excavación)	Acarreo (Carga y transporte)	Limpieza del terreno	Excarificación	Colocación del balasto	Homogenización o mezcla	Conformación	Humedecimiento	Compactación	+	-			
Características físicas y químicas	Procesos - Suelo	Erosión	-5	1	-7	5	-3	2	-5	-4	2	-2	1	1	0	8	8	-72
	Procesos - Suelo	Estabilidad de taludes (deslizamientos)	-3	1	-5	5	-2	-4	5	-2	2	-4	5	2	0	4	4	-52
	Agua	Calidad del agua	-2	2	-4	3	-2	2	-2	5	2	-4	5	-1	0	9	9	-61
	Atmósfera	Calidad del aire (gases, partículas)	-3	2	-9	4	-4	5	-3	2	-6	5	1	-2	0	5	5	-98
Condiciones biológicas	Flora	Árboles Productos agrícolas	-7	3	-8	4	-5	5	1	1	6	4	2	4	0	3	3	-78
	Fauna	Pájaros	-3	3	-5	4	4	1	4	1	6	4	2	2	0	2	2	-29
		Animales terrestres	-3	3	-5	4	4	1	4	1	6	4	2	2	0	2	2	-29
Factores culturales	Aspectos culturales	Salud y seguridad	-3	2	-4	4	-5	4	1	1	6	4	2	4	7	3	10	20
	Aspectos culturales	Empleo	2	2	5	4	4	4	4	1	6	4	3	4	11	0	11	41
	Facilidades y actividades	Red de transporte	1	1	1	1	2	2	2	2	6	4	3	4	6	0	6	88
	Afectaciones	+	1	1	1	1	3	2	3	3	3	3	3	3	24	34	58	-241
		-	7	0	7	5	5	2	3	2	2	0	1					
	Total de afectaciones	8	1	8	6	8	4	6	5	5	3	4						
	Agregado del impacto	-52	2	-171	-50	-62	-3	-4	21	19	23	36		-241				

Cuadro 24. Matriz de Leopold del proceso de colocación de balasto en Camino Rural
Fuente: Elaboración propia

El impacto ambiental de la extracción de balasto se debe, en gran medida, a la explotación no controlada de los bancos de materiales. Esta práctica, que en muchos casos la realizan sin la debida supervisión, puede generar una significativa degradación ambiental en las zonas de extracción.

De acuerdo con los resultados, el proceso de la colocación de balasto genera un impacto ambiental severo, especialmente durante la fase de extracción de balasto, siendo una actividad que afecta en gran medida la calidad del aire debido a la emisión de polvo y partículas finas que se dispersan en el ambiente. Esta actividad contribuye a la contaminación atmosférica y afecta la salud de las comunidades cercanas.

Asimismo, la menor vida útil (1 a 2 años) del camino rural construido con este material, lo convierte en una opción que requiere intervenciones frecuentes, lo que incrementa los costos y la afectación al entorno a lo largo del tiempo.

b. Pavimento unicapa de alto desempeño

La larga vida útil de los caminos rurales con pavimento unicapa de alto desempeño, utilizando al cemento como aglutinante principal, reduce la frecuencia de reparaciones y la necesidad de reemplazo, de esta forma disminuye la demanda de recursos.

Pavimento Unicapa de Alto Desempeño (PUAD) en caminos rurales			Preparación del suelo existente					Pavimento Unicapa de Alto Desempeño					Apertura al tráfico		Total Afecciones Agregado del impacto					
			Levantamiento topográfico y geometría del tramo	Análisis de laboratorio (humedad y densidad)	Adición de agua	Escarificación / Pulverización	Distribución del cemento	Mezclado con conglomerante y humedad óptima, in situ	Conformación de la mezcla	Compactación	Curado	Afectaciones +					Afectaciones -			
Características físicas y químicas	Procesos - Suelo	Erosión			-2	4	-6	5	-2	5	-2	5	-2	1			0	5	5	-60
	Procesos - Suelo	Estabilidad de taludes (deslizamientos)															0	0	0	0
	Agua	Calidad del agua			-2	4	-5	5	-6	5							0	3	3	-63
	Atmósfera	Calidad del aire (gases, partículas)			-2	4	-6	5	-9	5	-6	5	-5	4	-3	1		0	6	6
Condiciones biológicas	Flora	Árboles	-1														0	1	1	-1
		Productos agrícolas	1																	
	Fauna	Pájaros	-1														0	1	1	-1
	Animales terrestres	1																		
Factores culturales	Aspectos culturales	Salud y seguridad							-9	5	-6	4	-4	3	3	4	3	3	6	2
	Aspectos culturales	Empleo	3	3	4	4	6	6	6	6	4	6	4	3	4	5	4	9	7	
	Facilidades y actividades	Red de transporte	1	1	1	1	2	1	6	1	1	3	1	3	1	3	1	9	4	
	Afectaciones	+	1	1	1	2	2	1	2	3	2	3	3	2			18	19	37	-119
		-	2	0	3	3	4	3	3	1	0	0								
		Total de afectaciones	3	1	4	5	6	4	5	4	3	2								
		Agregado del impacto	1	3	-20	-77	-100	-58	-20	24	29	99					-119			

Cuadro 25. Matriz de Leopold del proceso de pavimento unicapa de alto desempeño en caminos rurales

Fuente: Elaboración propia

El impacto ambiental del pavimento unicapa está principalmente relacionado con el uso de cemento, un material cuya producción genera emisiones significativas de dióxido de carbono (CO₂). La fabricación de cemento es una de las industrias más intensivas en términos de consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero (Kunak, 2022). Según el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), la producción de cemento genera entre 0.7 y 0.9 toneladas de CO₂ por cada tonelada de cemento producido.

En consecuencia, la adopción de pavimento unicapa contribuye, en cierta medida, a la huella de carbono global debido a este proceso. Sin embargo, debido a la vida útil del mismo disminuye el impacto ambiental a largo plazo.

VII. DISCUSIÓN

La presente investigación tuvo como objetivo general evaluar la viabilidad del uso de conglomerantes hidráulicos para la estabilización de suelos en caminos rurales en Guatemala. A lo largo de este análisis, se examinan tanto los aspectos técnicos como ambientales.

Uno de los primeros puntos abordados en la investigación fue la identificación de los principales problemas que afectan a los caminos rurales en Guatemala. Entre los más destacados se encuentran la erosión acelerada del suelo, la baja capacidad de carga y la limitada durabilidad de los materiales tradicionales utilizados en la construcción. Estos problemas están directamente relacionados con las características del suelo en las zonas rurales, que frecuentemente presenta una alta plasticidad y baja resistencia, particularmente en suelos arcillosos y limosos.

En Guatemala, donde los recursos para el mantenimiento regular de los caminos rurales son limitados, la aplicación de conglomerantes hidráulicos ofrece una solución para reducir los costos asociados a reparaciones frecuentes y mejorar la transitabilidad de los caminos por periodos prolongados. A diferencia del método tradicional basado en el uso de balasto, que presenta problemas como la pérdida de compactación y estabilidad ante las lluvias. Además, de que es altamente susceptible a la erosión superficial causada por el escurrimiento del agua, lo que puede saturar el material y dificultar el tránsito vehicular, generando mayores problemas de mantenimiento.

El uso de conglomerantes hidráulicos, como el cemento y la cal, en la estabilización de caminos rurales en Guatemala representa una alternativa debido a las mejoras en la durabilidad de los caminos y su adaptabilidad a las condiciones específicas del entorno rural guatemalteco. Un aspecto clave identificado es la disponibilidad local de ambos materiales, lo que facilita su implementación en proyectos de infraestructura vial. El uso de estos conglomerantes mejora las propiedades mecánicas del suelo, como la capacidad portante y la resistencia a la erosión, aspectos críticos para enfrentar las condiciones climáticas adversas típicas de muchas regiones del país.

Si bien el uso de conglomerantes hidráulicos, especialmente el cemento, genera impactos ambientales, como la emisión de CO₂ durante su producción, los beneficios ambientales a largo

plazo pueden compensar estas desventajas. La reducción en la frecuencia de reparaciones, la disminución de la erosión y la degradación del suelo contribuyen a un modelo con menores emisiones y consumo de recursos durante su vida útil. En comparación, del método tradicional, que su extracción a menudo se realiza sin regulaciones adecuadas, lo que genera impactos ambientales significativos, como la alteración de ecosistemas locales y en algunos casos inestabilidad y deslizamientos de tierra debido a la explotación de laderas.

Por otra parte, el uso de balasto presenta desafíos logísticos, como lo es la disponibilidad limitada de bancos de material cerca de los proyectos, lo que puede dificultar considerablemente el transporte del material. Si no existe un banco de material a corta distancia, el costo y la logística de transportar el balasto desde otras regiones incrementa de manera considerable, afectando el presupuesto del proyecto y los tiempos de ejecución.

Tanto el balasto como el uso de conglomerantes hidráulicos para la creación de pavimentos unicapa de alto desempeño, ofrecen alternativas para la mejora de caminos rurales en Guatemala, cada uno con sus fortalezas y limitaciones. Si bien el balasto es una opción tradicional y económica, presenta dificultades en términos de durabilidad, especialmente ante condiciones climáticas adversas y en regiones con limitados bancos de material. A su vez, los conglomerantes hidráulicos que aportan una solución más duradera para la estabilización del suelo, mejorando la resistencia y propiedades mecánicas. No obstante, su aplicación también tiene limitaciones que deben ser cuidadosamente consideradas, dado que su efectividad depende de una adecuada caracterización del suelo, control en la mezcla y condiciones óptimas de ejecución.

VIII. CONCLUSIONES

- Se concluye que el uso de conglomerantes hidráulicos, como el cemento y la cal, es una propuesta para la estabilización de suelos y la mejora de caminos rurales en Guatemala. Estos materiales proporcionan mejoras en las propiedades mecánicas, siempre que se realice una caracterización adecuada del suelo y un control riguroso en su aplicación.
- El principal reto identificado en los caminos rurales de Guatemala es su rápida degradación debido a factores como las lluvias intensas, la falta de pavimento y ausencia de un mantenimiento constante. Estos caminos, al estar contruidos mayoritariamente con balasto o suelos sin tratamiento, son susceptibles a la erosión, pérdida de compactación y formación de baches, lo que afecta la transitabilidad, especialmente durante la temporada de lluvias.
- El uso de conglomerantes hidráulicos, como el cemento y la cal, aporta diferentes ventajas en la estabilización de suelos. El cemento se caracteriza por proporcionar rigidez estructural, aumentando la resistencia del suelo a la compresión, mientras que la cal reduce la plasticidad y la expansividad del suelo arcilloso, mitigando los efectos negativos del agua.
- Si bien el uso de conglomerantes hidráulicos, particularmente el cemento, genera un impacto ambiental debido a la alta emisión de CO₂ durante su producción, este efecto puede ser compensado por la reducción de explotación no regulada de materiales no renovables, así como por la reducción de emisiones asociadas a la rehabilitación o reparación de un camino.

IX. RECOMENDACIONES

- Para asegurar el correcto desempeño de los conglomerantes hidráulicos y determinar el tipo de estabilizante a utilizar en caminos rurales, es importante realizar un análisis completo mediante ensayos de laboratorio para evaluar las propiedades generales y específicas del suelo, tales como los límites de Atterberg, contenido de humedad, granulometría y resistencia a la compresión.
- A estudiantes que deseen continuar con este tema de investigación, se recomienda realizar ensayos de laboratorio para complementar el trabajo y verificar de forma práctica los resultados teóricos, así como proporcionar una mayor solidez a las recomendaciones para la aplicación en caminos rurales.
- Desarrollar simulaciones de estabilidad de suelos utilizando algún software, para evaluar el rendimiento estructural y la resistencia del pavimento bajo diferentes cargas de tráfico, así como en distintos tipos de suelos.
- Se recomienda continuar con investigaciones que exploren materiales más sostenibles, como bio estabilizantes y residuos industriales que puedan integrarse en la mezcla de estabilización del suelo.
- Se recomienda el uso de equipo de seguridad industrial durante el proceso de estabilización de suelos, especialmente para la distribución del cemento, ya que el polvo de cemento, al ser inhalado, puede causar afecciones respiratorias, como irritación de las vías respiratorias o enfermedades pulmonares.

X. BIBIOGRAFÍA

- AASHTO Guide of Pavement Structures. (1993). American Association of State Highway and Transportation Officials. Estados Unidos.
- AASHTO Supplement to the Guide for Design of Pavement Structures 1998. (s.f.). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ACI 230. 1R-09. (2009). *Report on Soil Cement*. American Concrete Institute.
- AECID. (2011). *Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras*. Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). Obtenido de <https://interconecta.aecid.es/Gestin%20del%20conocimiento/Manual%20Centroamericano%20de%20normas%20para%20el%20dise%C3%B1o%20geometrico%20de%20carreteras%202011.pdf>
- Álvarez, L. (07 de diciembre de 2023). Caminos rurales están en mal estado: Cómo acelerar los fondos para reconstruirlos. *Prensa Libre*. Obtenido de <https://www.prensalibre.com/guatemala/guatemala-no-se-detiene/caminos-rurales-estan-en-mal-estado-como-acelerar-los-fondos-para-reconstruirlos/>
- ASTM C150. (2012). *Standard Specification for Portland Cement*. ASTM International. Obtenido de <https://www.astm.org/standards/c150>
- ASTM D1557. (2012). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort*. ASTM International.
- ASTM D1557-12. (2021).): *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ [2,700 kN-m/m³])*. ASTM International.
- ASTM D2166/ D2166M-16. (2016). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*.
- ASTM D6276-19. (2019). *Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization*. American Society for Testing and Materials. ASTM International.
- ASTM D698-23. (2023). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³)*. ASTM International.

- ASTM International. (2011). *ASTM D2487-11: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*.
- Bañón Blázquez, L., & Beviá García, J. F. (2000). *Manual de Carreteras. Volumen II: Construcción y mantenimiento. Caminos II*.
- Barreno, R. (07 de octubre de 2022). Ixcán, Quiché: familias incomunicadas por el mal estado la carretera de terracería (problemas para desplazarse y otros inconvenientes). Obtenido de <https://www.prensalibre.com/ciudades/quiche/ixcan-quiche-familias-incomunicadas-por-el-mal-estado-la-carretera-de-terraceria-problemas-para-desplazarse-y-otros-inconvenientes/>
- Barrera, W. (12 de mayo de 2019). Tortuoso viaje de décadas sin asfalto en Guatemala. *Prensa Libre*. Obtenido de <https://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/tortuoso-viaje-de-decadas-sin-asfalto/>
- Barrios, P. (2013). *Manual de obras de drenaje para caminos rurales*. Universidad de San Carlos de Guatemala: Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil.
- Berry, P., & Reid, D. (2022). *Mecánica de Suelos*. Bogotá: Mc Graw Hill, 378-383.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The Nature and Properties of Soils 14th Edition*. Pearson Education.
- Calvo, P. P. (2019). *Desarrollo de conglomerantes hidráulicos de carretera empleando cáscara de huevo como componente. Influencia del tamaño de partícula*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla.
- Cárdenas, J. (2002). *Diseño Geométrico de Carreteras*. Segunda edición. ECOE Ediciones.
- Cardona. (13 de septiembre de 2012). Comunas reparan carretera. *Prensa Libre*.
- Cardona, H. (2018). *Guía actualizada para el curso de vías terrestres I*. Repositorio institucional Universidad San Carlos de Guatemala. Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/11407/1/Hugo%20Ricardo%20Cardona%20Villatoro.pdf>
- Chirinos, E. (2015). *Métodos de Diseño de Pavimentos*. Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda.
- Comisión de Caminos Rurales. (2018). *Manual de Caminos Rurales*. Asociación Argentina de Carreteras Obtenido de <https://www.aacarreteras.org.ar/pdfs/documentos-tecnicos/MANUAL-CAMINOS-RURALESe-book.pdf>

- CONSTRUNEIC. (2023). *Pavimento Semi Rígido*. Obtenido de <https://construneic.com/pavimentos/pavimento-semi-rigido/>
- Craig R. F. (2004). *Craig's Soil Mechanics*. Department of Civil Engineering. University of Dundee UK. Seventh edition.
- Das, Braja M. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering 7th edition*. Cengage Learning.
- Data Export. (2020). *Conectividad vial: Clave para generar mayor desarrollo*. Obtenido de <https://dataexport.com.gt/conectividad-vial-clave-para-generar-mayor-desarrollo/>
- De la Fuente, E. (2013). *Suelo - cemento*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. Departamento Nacional de Planeación. (2017). *Construcción de pavimento rígido en vías urbanas de bajo tránsito*. Subdirección Territorial y de Inversiones Públicas, República de Colombia. Obtenido de <https://proyectostipo.dnp.gov.co/images/pdf/pavimento/PTpavimento.pdf>
- Dirección General de Caminos. (2001). *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*. Libro Azul de Caminos.
- Dirección General de Caminos. (2002). *Especificaciones Técnicas para la Construcción de Caminos Rurales en Guatemala, Caminos Ambientalmente Compatibles*. Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura, Vivienda. Guatemala.
- Dirección General de Caminos. (2014). *Red Vial de Guatemala Año 2014*. Ministerio De Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda.
- Dirección General de Caminos. (2018). *Plan de Desarrollo Vial 2018-2032*. Resumen Ejecutivo: Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda de Guatemala. Obtenido de https://www.pronacom.org/wp-content/uploads/library/biblioteca_pdv_guatemala_2018-2032_resumen_ejecutivo.pdf
- ECOMEX. (18 de enero de 2024). Obtenido de <https://ecomex.com.mx/geomallas-para-la-estabilizacion-y-refuerzo-de-suelos/>
- European Commission, DRMKC - INFORM. (s.f.). *INFORM Subnational Risk: Guatemala. Disaster Risk Management Knowledge Centre*. Obtenido de <https://drmkc.jrc.ec.europa.eu/inform-index/INFORM-Subnational-Risk/Guatemala>
- FICEM. (2007). *El estado del suelocemento en estructuras de pavimenots*. Federación Interamericana del Cemento.

- Foro Económico Mundial. (2019). *The global competitiveness report 2019. World Economic Forum*. Obtenido de https://www3.weforum.org/docs/WEF_TheGlobalCompetitivenessReport2019.pdf
- FUNDESA. (2020). *Inversión en Infraestructura Vial*. Fundación para el Desarrollo de Guatemala.
- FUNDESA; CACIF. (2017). *Infraestructura para el Desarrollo*. Guatemala: Edición XVI. Obtenido de https://www.fundesa.org.gt/content/files/mg/revista/MG_-_Revista_Ed-16.pdf
- Gabriels, D., & Lobo, D. (2006). *Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo*. Venesuelos.
- Gallardo, R., Gómez, L., & Guillin, W. (2021). *Análisis del comportamiento de suelos de alta plasticidad estabilizados con cementantes*. Grupo de Investigación en Construcción Geotecnia y Medio Ambiente.
- García, B. E. (2014). *Manual de aplicación técnica del derecho de vía en carreteras y puentes de Guatemala*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Herrera, F. (10 de junio de 2021). Caminos de terracería. *Asociación Guatemalteca Aérea Para Edificación*.
- Higuera, C., Gómez, J., & Pardo, Ó. (2012). *Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio*. Facultad de Ingeniería, vol. 21, núm. 32, pp. 21-40, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/4139/413940771003.pdf>
- ICEX. (2021). *Sector agrícola en Guatemala*.
- IDU. (2005). *Guía para el diseño y la construcción de capas estructurales de pavimentos estabilizadas mediante procesos químicos*. Bogotá D. C. .
- IECA. (2014). *Pavimentos con adoquines de hormigón*. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. Obtenido de https://www.andece.org/images/BIBLIOTECA/adoquines_de_hormigon.pdf
- Instituto Centroamericano de Estudios Fiscales. (2014). *Minería en Guatemala: realidad y desafíos frente al a democracia y desarrollo*. Guatemala. Obtenido de <https://biblioteca.clacso.edu.ar/Guatemala/icefi/20140903122033/mineria-impresion.pdf>

- Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente -IARNA-. (2013). *Manual para la planificación, diseño, construcción y mantenimiento de caminos rurales con enfoque de gestión y adaptación a la variabilidad y al cambio climático*. Guatemala: Universidad Rafael Landívar.
- Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). (2008). Manual de estabilización de suelos con cemento o cal.
- Izquierdo Bautista, J., & Arévalo Hernández, J. J. (2021). *Determinación de la materia orgánica del suelo (MOS) por el método químico y por calcinación*. Revista Ingeniería y Región Vol. 26, 20-28.
- Keller, G., & Sherar, J. (2004). *Guía de Campo para las Mejores Prácticas de Administración de Caminos Rurales*. Instituto Mexicano del Transporte.
- Kunak. (2022). *Impacto ambiental de la industria cementera, poniendo en valor la monitorización*. Obtenido de [https://kunakair.com/es/impacto-ambiental-industria-cementera-calidad-
aire/#:~:text=El%20cemento%20consume%20casi%20una,efecto%20isla%20de%20calor%20urbano](https://kunakair.com/es/impacto-ambiental-industria-cementera-calidad-aire/#:~:text=El%20cemento%20consume%20casi%20una,efecto%20isla%20de%20calor%20urbano).
- Librería del ingeniero. (2017). *Limites de consistencia*.
- Magalhaes, R. (5 de junio de 2024). *COMPRACO*. Obtenido de <https://compraco.com.br/es/blogs/construcao-civil/estabilizacao-do-solo-metodos-quimicos-e-mecanicos>
- Martinez, G. (02 de abril de 2020). *Ingeniería & Construcciones*.
- Matus, I., & Blanco, M. (2014). *Sistema Unificado de Clasificación de Suelos ASTM D2487*.
- MEPDG- AASHTO. (2008). *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide*. American Association of Sthat Highway and Transportation Officials.
- Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. (2023). *Plan Estratégico Institucional 2022-2032*. Guatemala.
- Ministerio de Energía y Minas. (2019). *Política Minera Institucional*. Guatemala. Obtenido de <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2019/01/Pol%C3%ADtica-Minera-Institucional.pdf>

- Mora, P., Romay, M., Segovia, S., & Herrero, C. (2008). *El ciclo de vida del cemento, un puente a la sostenibilidad en la construcción*. Obtenido de <https://www.recuperaresiduosencementeras.org/wp-content/uploads/2017/09/014-El-ciclo-de-vida-del-cemento.pdf>
- Moura, E. (23 de octubre de 2023). *JBR ENGENHARIA LTDA*.
- NAPA & FHWA. (2001). *HMA Pavement Mix Type Selection Guide. Information Series 128*. National Asphalt Pavement Association and Federal Highway Administration. Lanham, MD and Washington D.C. Obtenido de <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/asphalt/HMA.pdf>
- National Lime Association. (2004). *MANUAL DE ESTABILIZACIÓN DE SUELO TRATADO CON CAL*. National Lime Association.
- NTG 41095. (2018). *Cementos hidráulicos. Especificaciones por desempeño*. Guatemala: Comisión Guatemalteca de Normas.
- NTG 41098. (2017). *Conglomerantes hidráulicos para estabilización de suelos. Especificaciones*. Comisión Guatemalteca de Normas.
- Orellana, h. (2014). *SEGURIDAD VIAL EN CAMINOS RURALES, REALIZANDO MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO EN LA REPÚBLICA DE GUATEMALA*. Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Palala, G. M. (2024). *Guatemala es una fábrica de cemento regional con poca competencia*. Publicación de Plaza Pública. Obtenido de <https://www.plazapublica.com.gt/economia-capturada/articulo/guatemala-es-una-fabrica-de-cemento-regional-con-poca-competencia>
- Pavement Interactive. (s.f.). *Pavement Structure*. Obtenido de <https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/structural-design/pavement-structure/>
- Peláez, R. (2022). *La inversión pública en infraestructura vial: situación, necesidades y posibilidades*. Guatemala: Revista Análisis de la Realidad Nacional. Edición 232.

- Pérez, G. (2021). *Caminos rurales: vías claves para la producción, la conectividad y el desarrollo territorial*. Comisión Económica para América Latina y Caribe (CEPAL).
Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/05dfba47-0c4a-42e5-a77d-feabc108a05b/content>
- Pérez, N., Pérez, A., & Garnica, P. (2019). *Evaluación del óxido de calcio como estabilizador de suelos*. Instituto Mexicano del Transporte.
- Pineda, S. (24 de junio de 2024). Saturación de los suelos en Guatemala alcanza el 90% y hay 14 departamentos en alerta. *Prensa Libre*.
- Prensa Libre: Hemeroteca. (7 de diciembre de 2023). Caminos rurales están en mal estado: Cómo acelerar los fondos para reconstruirlos. *Prensa Libre*.
- Procuraduría de los Derechos Humanos. (2018). *Informe de supervisión de carreteras, caminos rurales y acceso físico a los alimentos*. Obtenido de <https://www.pdh.org.gt/documentos/seccion-de-investigacion/investigacion/notas-conceptuales/2018-10/3894-informe-supervision-micivi-2018/file.html>
- Revista Granito de Arena. (2022). *Aprendamos cómo se fabrica el cemento en seis pasos*. Obtenido de <https://www.revistagranitodearena.com/aprendamos-como-se-fabrica-el-cemento-en-seis-pasos/>
- Santiago, X. (11 de abril de 2024). Carreteras pueden ser resistentes al clima desde antes de ser construidas. *Prensa Libre*. Obtenido de <https://www.prensalibre.com/guatemala/guatemala-no-se-detiene/carreteras-pueden-ser-resistentes-al-clima-desde-antes-de-ser-construidas/>
- Santiago, X. (02 de mayo de 2024). Los caminos rurales están ‘huérfanos’ en Guatemala y necesitan recursos para su mantenimiento. *Prensa Libre*. Obtenido de <https://www.prensalibre.com/guatemala/guatemala-no-se-detiene/los-caminos-rurales-estan-huerfanos-en-guatemala-y-necesitan-recursos-para-su-mantenimiento/>
- SIECA. (2010). *Manual Centroamericano de mantenimiento de carreteras con enfoque de gestión de riesgo y seguridad vial*. Secretaría de Integración Económica Centroamericana. Obtenido de <https://www.sieca.int/producto/manual-centroamericano-de-mantenimiento-de-carreteras/>

- Siliezar, L. (2021). *Pavimentos Unicapa de Alto Desempeño*. Cementos Progreso Guatemala.
- Thompson M. R. (1979). *Suggested Method of Mixture Design Procedures for lime-Treated Soils*. ASTM Special Technical Publication.
- UNICEF. (2012). *Cambio climático en Guatemala*. Guatemala. Obtenido de <https://www.unicef.org/guatemala/media/1391/file/Cambio%20clim%C3%A1tico%20en%20Guatemala.pdf>
- Unidad Ejecutora de Conservación Vial -COVIAL-. (2024). *Especificaciones Técnicas 2024*. Guatemala.
- Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. (2011). *Clasificación de suelos y de mezclas de agregados de suelos de la American Association of State Highway Officials* (.).
- Uribe, M. (2022). *Índice de condición de carreteras no pavimentadas (URCI)*. Cementos Progreso Guatemala. Obtenido de <https://cid.cempro.com/indice-de-condicion-de-carreteras-no-pavimentadas-urci/>
- Vásquez Varela, L. R. (2023). *Índice de Condición del Pavimento*. Universidad Nacional de Colombia.
- Velásquez, O. (2011). *Making Areas Cozy and Sustainable: Diseño de una red peatonal accesible*. Grupo de Estudios y Alternativas S. L. 1a. edición. Guatemala.
- Véliz, L. (25 de julio de 2024). *Los principales retos recaen en infraestructura vial y logística*. Obtenido de CACIF: <https://cacif.org.gt/los-principales-retos-recaen-en-infraestructura-vial-y-logistica/>
- Vicepresidencia de la República de Guatemala. (2024). *La Infraestructura Económica para el Buen Vivir*.
- Villar, W. (14 de mayo de 2023). *Estabilización de suelos*. Obtenido de CONSTRUNEIC: <https://construneic.com/mecanica-de-suelos/estabilizacion-de-suelos/>