

# Granular soil stabilization alternatives for unpaved roads: a laboratory experimental evaluation

Jorge Arturo Lemus Ponce<sup>1</sup>; Andree Zelaya Ramirez<sup>1</sup>; Julio César López Zerón<sup>1</sup>; Juan Carlos Reyes Zúniga<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Tegucigalpa, Honduras;  
[jorge.lemus@unitec.edu](mailto:jorge.lemus@unitec.edu), [andree.zelaya@unitec.edu](mailto:andree.zelaya@unitec.edu), [jclopezeron@unitec.edu](mailto:jclopezeron@unitec.edu), [carlos.reyes@unitec.edu](mailto:carlos.reyes@unitec.edu).hn

**Abstract**– Unpaved roads commonly exhibit subgrade deterioration associated with meteorological effects, insufficient preventive maintenance, traffic exceeding design loads, drainage deficiencies, and variability in soil and terrain conditions. To address this problem, soil-stabilization alternatives were assessed through laboratory testing aimed at improving performance under the laboratory conditions assessed of unpaved road grades. The study considered a granular A-2-4 (AASHTO) soil with a plasticity index around 9.6% and selected four stabilizing agents based on the reviewed literature: Type I Portland cement (cementitious benchmark), sodium chloride (NaCl), calcium chloride (CaCl<sub>2</sub>), and cane molasses. The agents were compared in terms of compressive strength, plasticity index, and permeability response. Results indicate that molasses meaningfully reduce soil plasticity and that a 2% dosage increases compressive strength compared to untreated soil; conversely, the chloride treatments showed no significant strength improvement under the tested conditions. Accordingly, further research is recommended on the molasses–soil-cement interaction, focusing on mechanical and hydraulic performance for practical implementation in unpaved road networks.

**Keywords**– unpaved roads; soil-cement; soil–calcium chloride; soil–sodium chloride; soil–cane molasses.

# Alternativas de estabilización de suelos granulares para caminos de terracería: evaluación experimental en laboratorio

Jorge Arturo Lemus Ponce<sup>1</sup>; Andreé Zelaya Ramírez<sup>1</sup>; Julio César López Zerón<sup>1</sup>; Juan Carlos Reyes Zúniga<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Tegucigalpa, Honduras;  
jorge.lemus@unitec.edu, andree.zelaya@unitec.edu, jclopezeron@unitec.edu, carlos.reyes@unitec.edu.hn

**Resumen—** Los caminos de terracería suelen presentar deterioro de la rasante asociado a factores meteorológicos, mantenimiento preventivo insuficiente, tránsito con cargas superiores a las de diseño, deficiencias de drenaje y variabilidad del suelo y del terreno. Ante esta problemática, se evaluaron alternativas de estabilización de suelos para mejorar el desempeño de rasantes no pavimentadas bajo las condiciones evaluadas en laboratorio mediante ensayos técnicos. El estudio se desarrolló sobre un suelo granular A-2-4 (AASHTO) con índice de plasticidad cercano a 9.6%, seleccionando cuatro agentes estabilizantes en función de la literatura: cemento Portland tipo I (referencia cementante), cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl<sub>2</sub>) y melaza de caña. Se comparó el efecto de los agentes sobre resistencia a compresión, índice de plasticidad y permeabilidad. Los resultados muestran que la melaza reduce de forma apreciable la plasticidad del suelo, y que la dosificación 2% incrementa la resistencia a compresión respecto del suelo natural; en contraste, los cloruros presentaron efectos no significativos en la mejora resistente bajo las condiciones del estudio. Con base en lo anterior, se recomienda profundizar en la interacción melaza-suelo-cemento, orientando el análisis a desempeño mecánico e hidráulico para aplicaciones en red vial no pavimentada.

**Palabras clave—** caminos de terracería; suelo-cemento; suelo-cloruro de calcio; suelo-cloruro de sodio; suelo-melaza de caña.

## I. INTRODUCCIÓN

La red vial no pavimentada constituye un componente crítico para la conectividad territorial, el abastecimiento de insumos, la movilidad cotidiana y el transporte público en zonas periurbanas y rurales. Sin embargo, la operación de estas vías suele desarrollarse bajo restricciones presupuestarias, niveles de tráfico que no justifican una solución pavimentada y, en muchos casos, con mantenimiento preventivo/correctivo insuficiente, lo que acelera la pérdida de capacidad de servicio de la rasante. Este deterioro se agrava por la acción meteorológica (humedecimiento-secado), el tránsito con cargas superiores a las previstas, la ausencia o deficiencia de obras de drenaje y la variabilidad geotécnica del material de la subrasante y del terreno de fundación [1]. En consecuencia, la búsqueda de alternativas costo-efectivas para mejorar el desempeño mecánico e hidráulico de la rasante se vuelve prioritaria, especialmente cuando la intervención con pavimentos no es viable en el corto plazo [2].

Dentro de las estrategias disponibles, la estabilización de suelos es un enfoque técnico ampliamente empleado para modificar propiedades del material (resistencia, plasticidad, durabilidad y respuesta frente al agua), con el objetivo de lograr un comportamiento más estable bajo cargas repetidas y ciclos ambientales [3]. La estabilización puede ejecutarse mediante métodos mecánicos, cementantes y químicos, entre otros, seleccionándose en función del tipo de suelo, disponibilidad de materiales, condiciones de obra y requerimientos de desempeño [3]. En particular, la estabilización con cemento Portland se asocia típicamente a incrementos de resistencia y durabilidad, así como a reducción de deformaciones volumétricas en suelos susceptibles a cambios de humedad [3]. Por otra parte, ciertos estabilizantes químicos —incluyendo sales y aditivos orgánicos— se han utilizado para modificar la plasticidad, el comportamiento frente al agua y condiciones superficiales (p. ej., control de polvo), aunque su efectividad depende fuertemente de la mineralogía, granulometría, humedad y dosificación [4].

Bajo este marco, el presente trabajo evalúa alternativas de estabilización para caminos de terracería utilizando un enfoque experimental en laboratorio, comparando el comportamiento de un suelo granular clasificado como A-2-4 (AASHTO) con índice de plasticidad del orden de 9.6%, condición que, por su carácter granular, resulta compatible con estabilización cementante y, simultáneamente, pertinente para analizar aditivos orientados a la reducción de plasticidad y a la modificación de la respuesta hidráulica [5]. Se seleccionaron cuatro agentes estabilizantes reportados en la literatura técnica: cemento Portland tipo I como referencia cementante y, como alternativas, cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl<sub>2</sub>) y melaza de caña, considerando antecedentes de aplicación y evaluación en suelos y vías no pavimentadas [4], [6]. Esta selección permite contrastar un estabilizante tradicional de alto desempeño (cemento) con aditivos cuya acción esperada se asocia, principalmente, a la interacción fisicoquímica con el agua y la fracción fina del suelo [6].

La metodología experimental se orienta a medir y comparar tres variables de desempeño que resultan directamente relevantes para rasantes no pavimentadas: (i) resistencia a compresión, como proxy del potencial de soporte

mecánico; (ii) índice de plasticidad, como indicador de susceptibilidad a deformación y sensibilidad al agua; y (iii) permeabilidad, como variable asociada al drenaje interno y a la estabilidad hidráulica del material [7]. Para garantizar trazabilidad y replicabilidad de los procedimientos, los ensayos se sustentan en estándares reconocidos para límites de Atterberg y permeabilidad [8], [9], cuyos detalles se desarrollan en la sección de Metodología. Con ello, el trabajo aporta una comparación técnica directa entre alternativas de estabilización y establece una base para discutir su aplicabilidad en rasantes granulares de caminos de terracería bajo condiciones controladas de laboratorio.

Finalmente, el documento se organiza de la siguiente manera: la Sección II describe el planteamiento del problema y objetivos; la Sección III presenta la metodología experimental; la Sección IV expone resultados y análisis; la Sección V discute implicaciones técnicas y limitaciones; y la Sección VI sintetiza conclusiones y recomendaciones.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Esta sección delimita el contexto técnico y la relevancia del problema asociado al desempeño de caminos de terracería, estructurando los antecedentes que explican su origen y persistencia, la definición precisa del problema de ingeniería que se busca abordar y la justificación de la investigación desde una perspectiva de servicio, costos y sostenibilidad de la red vial no pavimentada. Con ello, se establece el marco lógico que conduce a la evaluación experimental de alternativas de estabilización, orientada a comparar indicadores de desempeño mecánico e hidráulico del material granular bajo condiciones controladas de laboratorio, de manera que los resultados sean trazables y útiles para la toma de decisiones en intervenciones de bajo costo en redes vecinales.

### A. Precedentes del problema

La red vial no pavimentada representa una infraestructura esencial para la conectividad productiva y social; sin embargo, fuera de los corredores principales persisten brechas estructurales de cobertura, condición y mantenimiento. En Honduras, la evidencia internacional sobre logística y competitividad territorial ha señalado una limitación crítica: la densidad vial fuera de las vías principales se mantiene entre las más bajas de Centroamérica y una proporción minoritaria de la red se encuentra pavimentada, lo que incrementa la vulnerabilidad del sistema ante eventos climáticos y limita el acceso rural a mercados [10]. En paralelo, las estadísticas oficiales del país confirman que la mayor parte de la red corresponde a tipologías de calzada asociadas a material selecto y tierra, concentradas en la red vecinal, donde los déficits de servicio suelen ser más persistentes [2].

En este contexto, las vías no pavimentadas tienden a degradarse rápidamente por pérdida de soporte de la rasante,

cambios volumétricos asociados a ciclos de humedecimiento–secado, erosión superficial y deficiencias de drenaje. Estas condiciones reducen la transitabilidad, elevan costos de operación vehicular y demandan intervenciones recurrentes que, por restricciones presupuestarias, no siempre se ejecutan con la periodicidad requerida. Por tanto, resulta técnicamente pertinente evaluar alternativas que mejoren el desempeño del material granular de la rasante sin requerir soluciones pavimentadas de alto costo, particularmente en redes vecinales de gran extensión [2].

### B. Definición del problema

Con base en registros oficiales, para 2021 la red vial nacional alcanzó 17,088.29 km; de este total, la red vecinal concentró 10,767.22 km (63.01%), seguida por la red principal con 3,411.39 km y la secundaria con 2,909.68 km [2]. Asimismo, la red vecinal se compone predominantemente de material selecto (7,934.01 km) y tierra (2,833.21 km), mientras que los tipos de calzada pavimentada se concentran en la red principal y, en menor medida, en la secundaria [2]. Esta estructura del sistema vial implica que una porción mayoritaria de la conectividad territorial depende de rasantes no pavimentadas, altamente sensibles a la variabilidad hídrica y a las cargas de servicio.

El problema técnico central consiste en que, para rasantes granulares típicas de caminos de terracería, no siempre existe un criterio operativo basado en evidencia experimental para seleccionar estabilizantes que mejoren simultáneamente (i) la respuesta mecánica, (ii) la plasticidad asociada a la fracción fina y (iii) el comportamiento hidráulico del material, evitando soluciones que incrementen resistencia, pero deterioren el drenaje interno o la estabilidad frente al agua. En términos de investigación aplicada, se requiere cuantificar (bajo condiciones controladas) la magnitud y dirección del efecto de estabilizantes convencionales y alternativos, a fin de sustentar decisiones de conservación/mejoramiento con indicadores medibles y comparables.

En consecuencia, este estudio aborda la siguiente pregunta: ¿qué alternativa de estabilización presenta el mejor balance entre resistencia a compresión, reducción del índice de plasticidad y control de permeabilidad para el suelo granular evaluado bajo condiciones de laboratorio? La respuesta se construye mediante una comparación experimental entre suelo natural y suelo tratado con cemento Portland tipo I (referencia), NaCl, CaCl<sub>2</sub> y melaza de caña, coherente con antecedentes reportados para caminos no pavimentados [7].

### C. Justificación

Dado que una proporción mayoritaria de la red corresponde a caminos vecinales con calzadas de material selecto y tierra, el mejoramiento del desempeño de rasantes no pavimentadas es un componente estratégico para la movilidad cotidiana y el acceso rural a servicios y mercados [2]. En particular, la estabilización constituye una alternativa de

intervención técnicamente atractiva cuando la pavimentación no es viable por restricciones económicas o por niveles de tráfico insuficientes, siempre que se demuestre su efectividad para el tipo de suelo y condiciones de operación [7].

La literatura aplicada reporta el uso de estabilizantes de bajo costo para vías no pavimentadas y destaca la importancia de la dosificación y del control experimental para evitar resultados inconsistentes en campo [7]. Adicionalmente, el mejoramiento de caminos rurales suele asociarse a beneficios socioeconómicos y a una mejora en la accesibilidad territorial, lo que refuerza la necesidad de soluciones técnicamente justificadas y sostenibles para redes de baja jerarquía [11]. En ese sentido, evaluar alternativas como sales y subproductos orgánicos (p. ej., melaza) permite explorar opciones potencialmente disponibles en mercados locales, con enfoque comparativo frente a soluciones cementantes tradicionales, aportando evidencia para decisiones de ingeniería basadas en desempeño medido en laboratorio.

### III. METODOLOGÍA

#### A. Enfoque, alcance y diseño experimental

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y un diseño experimental comparativo de laboratorio, orientado a evaluar alternativas de estabilización química para suelos granulares aplicables a caminos de terracería. El estudio se estructuró como un caso aplicado sobre un suelo granular clasificado AASHTO A-2-4 (baja plasticidad), que se tomó como material base de comparación. [5]

La comparación entre tratamientos se estableció mediante indicadores físico-mecánicos e hidráulicos relevantes para desempeño de rasante y superficie de rodadura en vías no pavimentadas: resistencia a compresión, índice de plasticidad (IP), permeabilidad (K) y respuesta ante ciclos de humedad-secado mediante ensayo de desgaste/absorción. La selección de estabilizantes y rangos de dosificación se fundamentó en literatura técnica y antecedentes en estabilización de suelos y caminos no pavimentados. [3], [4], [6], [7].

#### B. Materiales, tratamientos y matriz experimental

##### B.1 Material base

Se utilizó un suelo granular representativo de condición de camino de terracería, clasificado como A-2-4 (AASHTO) con  $IP \approx 9.6\%$ , según los resultados de caracterización del estudio [5]. La muestra de ensayo fue extraída en la ciudad de Tegucigalpa (Colonia El Tablón) y acondicionada para ensayos.

##### B.2 Agentes estabilizantes evaluados

Se evaluaron cuatro agentes estabilizantes:

- Cemento Portland Tipo I, como referencia cementante convencional. [3]

- Cloruro de sodio ( $NaCl$ ), por antecedentes de uso en estabilización/control de polvo. [4]
- Cloruro de calcio ( $CaCl_2$ ), por reportes de mejora de comportamiento en vías no pavimentadas bajo ciertas dosificaciones. [6], [7]
- Melaza de caña, como alternativa no tradicional con reportes de reducción de plasticidad y potencial mejora mecánica. [6], [7]

#### B.3 Dosificaciones y condición control

Se definió un control (suelo puro) y mezclas suelo-estabilizante con dosificaciones en porcentaje respecto al peso seco del suelo, bajo un esquema comparativo consistente.

TABLA I  
Matriz experimental de mezclas y dosificaciones

| Mezcla          | Dosificaciones evaluadas |
|-----------------|--------------------------|
| Suelo puro      | Control (sin aditivo)    |
| Suelo-Cemento   | 12%, 16%, 18%            |
| Suelo- $NaCl$   | 2%, 5%, 10%, 20%         |
| Suelo- $CaCl_2$ | 1%, 4%, 6%               |
| Suelo-Melaza    | 2%, 4%, 6%               |

#### C. Preparación de muestra y control de compactación

Para garantizar reproducibilidad, la muestra fue secada en horno durante 24h y preparada para ensayos de caracterización y elaboración de mezclas. Posteriormente se realizó la caracterización previa (granulometría y límites de Atterberg) y se ejecutó Proctor estándar como control tecnológico de compactación, aplicando compactación en tres capas según el procedimiento descrito en el documento base. [3], [8]

Con la humedad de trabajo definida, se prepararon las mezclas incorporando el porcentaje correspondiente de estabilizante, asegurando homogeneidad antes del moldeo de probetas.

#### D. Elaboración y curado de probetas

Para cada dosificación se elaboraron dos probetas, manteniendo un proceso de conformación consistente:

- Probeta 1: ensayo de resistencia a compresión.
- Probeta 2: ensayo de desgaste/absorción.

Las probetas se mantuvieron en humidificación/curado durante 7 días previo a la ejecución de ensayos mecánicos y complementarios, con el objetivo de estandarizar el estado de acondicionamiento antes de la medición de desempeño.

#### E. Ensayos, ecuaciones y definición de variables

En esta subsección se describen los ensayos ejecutados y las ecuaciones empleadas para el cálculo de los parámetros que sustentan la comparación entre tratamientos. Se priorizan variables con incidencia directa en el desempeño de caminos no pavimentados: (i) la estructura granulométrica y su efecto en la respuesta mecánica e hidráulica, (ii) la plasticidad como “proxy” de susceptibilidad a cambios volumétricos por humedad, (iii) la resistencia a compresión como indicador de capacidad portante relativa y cohesión inducida, y (iv) la permeabilidad como medida de la facilidad de drenaje y

potencial pérdida de finos, complementando con un ensayo de durabilidad por ciclos de humedad–secado.

#### E.1 Granulometría: coeficientes de distribución (Cu y Cc)

Se calcularon los coeficientes granulométricos a partir de diámetros característicos D10, D30 y D60:

$$C_u = D_{60} / D_{10} \quad (1)$$

donde:

Cu = coeficiente de uniformidad (adimensional);  
D60, D10 = diámetros (mm) para 60% y 10% pasante.

$$C_c = (D_{30}^2) / (D_{10} * D_{60}) \quad (2)$$

donde: Cc = coeficiente de curvatura (adimensional);  
D30 = diámetro (mm) para 30% pasante.

#### E.2 Límites de Atterberg: índice de plasticidad (IP)

El índice de plasticidad se determinó conforme a ASTM D4318. [8]

$$IP = LL - LP \quad (3)$$

donde:

IP = índice de plasticidad (%);  
LL = límite líquido (%);  
LP = límite plástico (%).

#### E.3 Resistencia a la compresión (compresión axial)

Se ensayó a carga axial hasta falla para obtener la carga máxima y calcular el esfuerzo resistente. Para el cálculo se determinó el área transversal de la probeta:

$$A = (\pi \cdot D^2) / 4 \quad (4)$$

donde:

A = área de la sección transversal (mm<sup>2</sup> o cm<sup>2</sup>);  
D = diámetro de la probeta (mm o cm);

$$\sigma_c = P_{\max} / A \quad (5)$$

donde:

$\sigma_c$  = resistencia a compresión (kPa o MPa);  
P<sub>max</sub> = carga máxima aplicada (N o kgf);  
A = área (mm<sup>2</sup> o cm<sup>2</sup>).

#### E.4 Permeabilidad (carga constante) y corrección por temperatura

La permeabilidad se determinó mediante el método de carga constante según ASTM D2434. [9]

$$K_T = (V \cdot L) / (A \cdot \Delta H \cdot t) \quad (6)$$

donde:

K<sub>T</sub> = coeficiente de permeabilidad a temperatura de ensayo T;

V = volumen de agua recolectado (cm<sup>3</sup>);

L = longitud de la muestra (cm);

A = área de sección transversal (cm<sup>2</sup>);

$\Delta H$  = carga hidráulica (cm);

t = tiempo (s).

Para reportar resultados a 20 °C se aplicó corrección por viscosidad:

$$K_{20} = K_T \cdot (n_T / n_{20}) \quad (7)$$

donde:

K<sub>20</sub> = permeabilidad corregida a 20 °C;

K<sub>T</sub> = permeabilidad a temperatura T;

n<sub>T</sub> = viscosidad del agua a T;

n<sub>20</sub> = viscosidad del agua a 20 °C.

Cuando la temperatura medida no coincidió con valores tabulados, se aplicó interpolación lineal:

$$n = n_0 + ((n_1 - n_0) / (T_1 - T_0)) \cdot (T - T_0) \quad (8)$$

donde:

n = viscosidad interpolada a temperatura T;

(n<sub>0</sub>, T<sub>0</sub>) y (n<sub>1</sub>, T<sub>1</sub>) = valores tabulados adyacentes;

T = temperatura medida.

#### E.5 Desgaste / absorción y material disgregado (durabilidad por ciclos)

El comportamiento ante humedad–secado se evaluó mediante 6 ciclos, donde cada ciclo considera 5 h de inmersión en agua y 48 h de horno a 110 °C, seguido de cepillado y pesaje. Los indicadores se calcularon como:

$$\text{Desgaste}_{\text{final}}(\%) = ((W_0 - W_f) / W_0) \cdot 100 \quad (9)$$

donde:

W<sub>0</sub> = masa seca inicial de la probeta (g);

W<sub>f</sub> = masa seca final al completar los ciclos (g).

$$\text{Absorcion}(\%) = ((W_h - W_s) / W_s) \cdot 100 \quad (10)$$

donde:

W<sub>h</sub> = masa de la probeta en condición húmeda tras inmersión (g);

W<sub>s</sub> = masa seca de la probeta (g).

$$\text{Material}_{\text{disgregado}}(\%) = ((W_s - W_{\text{scp}}) / W_s) \cdot 100 \quad (11)$$

donde:

W<sub>scp</sub> = masa seca posterior al cepillado (g), removiendo material suelto superficial.

#### F. Organización y criterios de comparación de resultados

Los resultados se consolidaron por agente estabilizante y dosificación, comparando contra:

(i) control (suelo puro), y (ii) línea base suelo–cemento para la variable resistencia a compresión. El análisis se centró en comparaciones directas y consistencia técnico–física entre métricas (IP–permeabilidad–resistencia–durabilidad), evitando inferencias estadísticas de alto nivel cuando no existan réplicas suficientes por condición, manteniendo así

conclusiones defendibles y coherentes con el diseño experimental.

#### IV. RESULTADOS

##### A. Selección de dosificaciones para comparación

A partir del programa experimental y con el objetivo de realizar una comparación directa entre alternativas, se consolidaron cuatro combinaciones representativas de estabilización química y una condición de control (suelo sin aditivo):

- suelo–cemento 16%,
- suelo–NaCl 2%, suelo–CaCl<sub>2</sub> 1%,
- suelo–melaza 2%, y
- suelo puro.

Estas combinaciones se tomaron como base para contrastar el desempeño mecánico (resistencia a compresión), la respuesta índice-plástica (IP), el comportamiento hidráulico (permeabilidad) y un indicador de durabilidad aproximada mediante ciclos de humedad–secado (desgaste/absorción).

##### B. Desempeño mecánico: resistencia a la compresión

Los resultados de compresión evidencian dos comportamientos bien diferenciados. Por un lado, el tratamiento suelo–cemento 16% presenta un incremento marcado de resistencia (113.95 kg/cm<sup>2</sup>) respecto al suelo puro (11.96 kg/cm<sup>2</sup>), lo que confirma el efecto cementante como mecanismo dominante de ganancia de capacidad resistente.

Por otro lado, las alternativas NaCl 2% (11.94 kg/cm<sup>2</sup>), CaCl<sub>2</sub> 1% (11.98 kg/cm<sup>2</sup>) y melaza 2% (12.81 kg/cm<sup>2</sup>) se mantienen cercanas al control, con variaciones pequeñas, sugiriendo que su contribución mecánica directa es limitada en el marco de dosificaciones evaluadas, salvo una mejora moderada con melaza.

##### C. Respuesta plástica: índice de plasticidad (IP)

En el indicador de plasticidad, todas las alternativas estabilizadas muestran reducción del IP respecto al suelo puro (9.66%). La reducción más notable se observa con melaza 2% (IP = 5.62%), seguida de CaCl<sub>2</sub> 1% (7.59%), NaCl 2% (8.48%) y cemento 16% (8.79%).

Este patrón es relevante para caminos de terracería, porque una menor plasticidad tiende a asociarse con mejor estabilidad volumétrica y menor susceptibilidad a deformaciones ante variaciones de humedad, particularmente cuando existen finos activos en el material granular.

##### D. Comportamiento hidráulico: permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad presenta contrastes importantes. El suelo–cemento 16% reduce la permeabilidad a  $4.13 \times 10^{-5}$  cm/s, muy por debajo del suelo puro ( $1.78 \times 10^{-3}$  cm/s), consistente con un efecto de “sellado” parcial por cementación/llenado de vacíos. En cambio, NaCl 2%

( $4.64 \times 10^{-3}$  cm/s), CaCl<sub>2</sub> 1% ( $2.04 \times 10^{-2}$  cm/s) y melaza 2% ( $1.01 \times 10^{-2}$  cm/s) incrementan la permeabilidad respecto al control, lo que sugiere una modificación de la estructura de vacíos y/o del arreglo de partículas y finos bajo esas condiciones de mezcla.

Para el diseño funcional del afirmado, este resultado implica un “trade-off”: mayor drenaje potencial (K más alto) puede ser favorable en presencia de agua, pero también puede facilitar infiltración hacia capas inferiores si no existe un esquema de drenaje y corona adecuados.

##### E. Durabilidad aproximada frente a ciclos humedad–secado: desgaste y absorción

El indicador de desgaste/absorción evidencia que el control (suelo puro) presenta el comportamiento más desfavorable, con desgaste 100% y absorción 86.35%, mientras que el tratamiento con cemento exhibe el desempeño más robusto (desgaste 3.71%, absorción 8.41%). Entre los estabilizantes no cementantes, melaza 2% muestra una mejora marcada frente al control (desgaste 20.20%, absorción 7.01%), y CaCl<sub>2</sub> 1% reduce significativamente la absorción (6.69%) y el desgaste (52.21%).

En contraste, NaCl 2% no presenta mejora en desgaste (100%) y mantiene una absorción relativamente alta (49.19%), lo cual limita su utilidad si el objetivo principal es resistencia al deterioro por ciclos de humedad–secado.

TABLA II  
Resumen comparativo (dosificaciones seleccionadas)

| Ítem                 | UCS (kg/cm <sup>2</sup> ) | UCS (MPa) <sup>a</sup> | $\Delta$ UCS vs control (%) | IP (%) | $\Delta$ IP vs control (%) | Desgaste (%) | Absorción (%) |
|----------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------------|--------|----------------------------|--------------|---------------|
| Suelo puro           | 11.96                     | 1.171                  | 0                           | 9.66   | 0                          | 100          | 86.35         |
| Cemento 16%          | 113.95                    | 11.175                 | 852.42                      | 8.79   | −9.01                      | 3.71         | 8.41          |
| NaCl 2%              | 11.94                     | 1.171                  | −0.17                       | 8.48   | −12.22                     | 100          | 49.19         |
| CaCl <sub>2</sub> 1% | 11.98                     | 1.175                  | 0.17                        | 7.59   | −21.43                     | 52.2         | 6.69          |
| Melaza 2%            | 12.81                     | 1.256                  | 7.11                        | 5.62   | −41.82                     | 20.2         | 7.01          |

<sup>a</sup> Conversión usada: 1 kg/cm<sup>2</sup>  $\approx$  0.09807 MPa

La comparación representativa de los indicadores mecánicos y de durabilidad permite identificar con mayor claridad las tendencias entre tratamientos; en la resistencia a compresión, el suelo–cemento 16% presenta una diferencia marcada frente al suelo puro y frente a los estabilizantes no cementantes, en contraste, NaCl 2%, CaCl<sub>2</sub> 1% y melaza 2% se mantienen próximos al control en resistencia, aunque melaza muestra una mejora relativa moderada.

En cuanto al índice de plasticidad y absorción, la melaza presenta el comportamiento más favorable entre las alternativas no cementantes, evidenciando que su aporte principal se relaciona con la mejora funcional del material más que con un incremento estructural significativo.

TABLA III  
Resumen comparativo (dosificaciones seleccionadas)

| Tratamiento          | K (cm/s) | Factor K vs control | w <sub>opt</sub> (%) | D <sub>máx</sub> (lb/ft <sup>3</sup> ) |
|----------------------|----------|---------------------|----------------------|----------------------------------------|
| Suelo puro           | 1.78E-03 | 1                   | 9.4                  | 140.35                                 |
| Cemento 16%          | 4.13E-05 | 0.02                | 11.93                | 138.1                                  |
| NaCl 2%              | 4.64E-03 | 2.61                | 10.98                | 139.17                                 |
| CaCl <sub>2</sub> 1% | 2.04E-02 | 11.44               | 9.96                 | 139.59                                 |
| Melaza 2%            | 1.01E-02 | 5.7                 | 8.98                 | 138.12                                 |

La representación comparativa de la permeabilidad evidencia dos tendencias opuestas; el suelo-cemento 16% reduce la permeabilidad respecto al control, lo cual es consistente con un efecto de densificación, cementación y disminución de vacíos conectados. En cambio, NaCl 2%, CaCl<sub>2</sub> 1% y melaza 2% incrementan la permeabilidad frente al suelo natural, por lo que su aplicación debe interpretarse con cautela.

En caminos de terracería, un mayor coeficiente de permeabilidad puede favorecer el drenaje interno si existe una adecuada geometría vial y obras de drenaje; sin embargo, también puede aumentar la infiltración hacia capas inferiores si el sistema hidráulico del camino es deficiente. Por ello, la selección del estabilizante no debe basarse únicamente en resistencia, sino en el balance entre capacidad mecánica, plasticidad, permeabilidad y durabilidad.

#### F. Análisis estadístico descriptivo

Debido al número limitado de observaciones por condición experimental, no se aplican pruebas inferenciales; se reporta estadística descriptiva por tratamiento (y dosificación) para caracterizar variabilidad y magnitud de efecto en las variables de respuesta:

- UCS (MPa): el conjunto está altamente asimétrico por el efecto del cemento (mediana  $\approx 1.175$  MPa; máximo  $\approx 11.175$  MPa). En el subgrupo no cementante (NaCl, CaCl<sub>2</sub>, melaza), la UCS se concentra alrededor de  $1.20 \pm 0.05$  MPa, confirmando que el diferencial mecánico fuerte proviene del mecanismo cementante, mientras que melaza aporta una mejora moderada.
- IP (%): se observa reducción consistente del IP; el rango va de 9.66% (control) a 5.62% (melaza 2%), mostrando que el cambio más sustancial ocurre en plasticidad, no necesariamente en resistencia para estabilizantes no cementantes.
- Permeabilidad (cm/s): el cemento reduce K en 2 órdenes de magnitud respecto al control, mientras que sales y melaza incrementan K entre 2.6 y 11.4 veces. Este contraste permite clasificar alternativas por “tendencia a sellado” (cemento) versus “tendencia a mayor drenaje / infiltración” (NaCl, CaCl<sub>2</sub>, melaza).
- Durabilidad (desgaste/absorción): existe una separación nítida entre alternativas: cemento es el mejor (muy bajo desgaste y absorción), melaza y CaCl<sub>2</sub> mejoran fuertemente absorción y reducen desgaste, y NaCl queda rezagado en desgaste.

Relaciones exploratorias complementarias; Al comparar alternativas, se aprecia una tendencia inversa entre UCS y desgaste (alternativas con mayor UCS tienden a menor desgaste), y una tendencia directa entre IP y absorción (menor IP tiende a menor absorción). Estas relaciones son coherentes con el comportamiento físico esperado, pero deben interpretarse como exploratorias debido al tamaño muestral y al efecto “dominante” del cemento en la dispersión.

Como complemento metodológico, se reconoce que el tamaño muestral disponible por condición experimental limita la aplicación robusta de pruebas inferenciales, intervalos de confianza y contrastes no paramétricos; por tanto, se establece que los resultados se interpretan como evidencia experimental exploratoria y comparativa, sustentada en la magnitud del cambio observado respecto al suelo control y en la coherencia físico-técnica entre resistencia, índice de plasticidad, permeabilidad y durabilidad. En una etapa posterior, el diseño experimental deberá ampliarse incorporando mayor número de réplicas por tratamiento, estimación de intervalos de confianza al 95% y pruebas no paramétricas, como Kruskal–Wallis y comparaciones múltiples por pares, para validar la significancia estadística de las diferencias observadas entre estabilizantes y dosificaciones.

#### G. Parámetros de compactación (Proctor): humedad óptima y densidad máxima seca

Los parámetros Proctor reflejan que la condición de máxima densificación del material se mantiene en rangos relativamente cercanos entre alternativas. El suelo puro reporta  $D_{máx} \approx 140.35$  lb/ft<sup>3</sup> y  $w_{opt} \approx 9.4\%$ .

El tratamiento con cemento 16% incrementa la humedad óptima (11.93%) y reduce la densidad máxima (138.10 lb/ft<sup>3</sup>), comportamiento compatible con mayor demanda de agua para hidratación/mezcla y cambios en la estructura del material compactado.

Las alternativas con sales y melaza se ubican en intervalos intermedios ( $w_{opt} \approx 8.98$ – $10.98\%$ ;  $D_{máx} \approx 138.12$ – $139.59$  lb/ft<sup>3</sup>), lo que sugiere que la compactación, por sí sola, no explica las diferencias de desempeño observadas en resistencia, IP y durabilidad.

### V. DISCUSIÓN

#### A. Lectura integral de desempeño: no existe “un ganador absoluto”

Los resultados evidencian que la estabilización de un suelo granular AASHTO A-2-4 para caminos de terracería debe interpretarse como un problema multicriterio: una alternativa puede maximizar resistencia, pero penalizar permeabilidad, y otra puede reducir plasticidad y absorción sin generar ganancias significativas de capacidad mecánica. Esta lógica es particularmente relevante para redes viales no pavimentadas donde el desempeño real depende tanto de la

capacidad portante como del drenaje superficial/subsuperficial y la variación estacional de humedad. En el contexto hondureño, donde la red vecinal representa la mayor proporción del sistema y gran parte permanece en material selecto o tierra, la mejora funcional de rasante y superficie de rodadura tiene impactos directos sobre conectividad, logística y economía local. [1], [2], [14]

En este marco, el suelo-cemento (16%) se comporta como una solución de mejora estructural (incremento marcado de resistencia y fuerte reducción de permeabilidad), mientras que melaza (2%) y  $\text{CaCl}_2$  (1%) se perfilan como soluciones de mejora funcional (reducción clara de IP y absorción, con efectos mecánicos modestos).  $\text{NaCl}$  (2%), en cambio, muestra limitaciones claras en durabilidad (desgaste) bajo el protocolo aplicado, por lo que su uso sería más defendible como control de polvo o acondicionamiento superficial y no como estabilización mecánica primaria.

#### *B. Mecanismos probables: por qué el cemento “domina” en resistencia y durabilidad*

El comportamiento del cemento como estabilizante responde a mecanismos ampliamente documentados: hidratación, formación de productos cementantes y generación de puentes entre partículas, lo que incrementa cohesión aparente y rigidez del material. En suelos granulares con finos de baja plasticidad, el cemento suele producir mejoras notables porque no depende exclusivamente de intercambio iónico (como las sales), sino de una reacción cementante que cierra la microestructura y reduce el volumen efectivo de vacíos conectados. [13], [18]

Esta interpretación es consistente con dos hallazgos del estudio:

- Incremento marcado de resistencia a compresión frente al suelo sin estabilizar; y
- Reducción fuerte de permeabilidad, coherente con una matriz más densa/ “sellada” y con menor conectividad hidráulica. [9]

Adicionalmente, en el ensayo de ciclos humedad–secado (desgaste/absorción), el suelo-cemento presenta el mejor desempeño. Desde la mecánica de materiales, esto es esperable: al aumentar la cohesión y reducir el ingreso de agua (menor K), disminuye la pérdida de finos por erosión interna y se limita el debilitamiento progresivo por ciclos.

#### *C. Sales ( $\text{NaCl}$ y $\text{CaCl}_2$ ): mejoras “no estructurales” y trade-offs hidráulicos*

El uso de sales en caminos no pavimentados se asocia, con frecuencia, a control de polvo y manejo de humedad por características higroscópicas y cambios en interacciones entre finos y agua. [4] Sin embargo, en un suelo A-2-4 (granular, baja plasticidad), el potencial de las sales para aumentar resistencia suele ser limitado porque el material base presenta una fracción fina relativamente baja o poco activa; es decir,

hay menos “arcilla” que reestructurar mediante mecanismos de doble capa o floculación. En consecuencia, no sorprende que el cambio en resistencia a compresión sea marginal en las dosificaciones seleccionadas. [14], [15]

Un resultado crítico, no menor, es el aumento de permeabilidad observado con  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$  y melaza respecto al control. En vías de terracería, mayor K puede interpretarse de dos formas:

- Oportunidad: facilita drenaje interno si existe una geometría vial adecuada (bombeo/corona) y obras de drenaje que evacúen el agua.
- Riesgo: incrementa infiltración hacia capas inferiores y puede favorecer pérdida de finos o reblandecimiento si el sistema de drenaje es deficiente.

Este trade-off es especialmente relevante en redes vecinales con mantenimiento irregular, donde la hidráulica del camino (cunetas, pendientes, bombeo) suele ser el verdadero “talón de Aquiles” del desempeño.

En particular,  $\text{CaCl}_2$  (1%) muestra reducción importante de absorción y una mejora parcial en desgaste frente al control, lo cual sugiere que su contribución puede estar más asociada al manejo de humedad y al comportamiento superficial que a una cementación real del material. Esto coincide con literatura que evalúa  $\text{CaCl}_2$  y melaza como alternativas de bajo costo orientadas a mejorar serviciabilidad de caminos no pavimentados, más que a crear una capa estructural equivalente a suelo-cemento.

#### *D. Melaza (2%): señal fuerte en plasticidad y absorción, y “puente” interesante hacia suelo-cemento*

La melaza destaca por su reducción marcada del índice de plasticidad y por un comportamiento favorable en absorción, además de un incremento moderado en resistencia frente al suelo puro. En términos de ingeniería de suelos, una reducción del IP suele asociarse con menor susceptibilidad a deformación por humedad y mejor estabilidad volumétrica, lo que puede reflejarse en menor ahuellamiento superficial o menor pérdida de forma en temporada lluviosa, especialmente cuando la rasante se expone a ciclos repetidos de humedecimiento y secado.

El antecedente que plantea profundizar en la interacción melaza–suelo–cemento resulta técnicamente consistente. La reducción del índice de plasticidad y de la absorción asociada a la melaza sugiere que su incorporación en sistemas cementantes podría contribuir al control de la humedad y a la estabilidad volumétrica, con potencial impacto favorable en el comportamiento en servicio bajo ciclos de humedecimiento–secado. En este sentido, la melaza se interpreta como un aditivo funcional complementario al enfoque cementante, en concordancia con literatura aplicada que reporta efectos relevantes de melaza y  $\text{CaCl}_2$  en vías no pavimentadas para



determinadas dosificaciones y condiciones de operación. [6], [7], [22].

#### *E. Compactación (Proctor) como lectura de soporte: el desempeño no se explica solo por densidad*

Los parámetros Proctor muestran variaciones relativamente acotadas entre alternativas, con un aumento de humedad óptima y ligera reducción de densidad máxima seca en el caso del cemento. Este comportamiento es consistente con la demanda de agua para mezcla/hidratación y con la modificación de la estructura del material. Lo importante es la interpretación: si las densidades máximas son comparables, pero el desempeño (resistencia, permeabilidad y durabilidad) cambia de forma significativa, entonces la diferencia observada está dominada por mecanismos físico-químicos del estabilizante, no solo por cambios en compactación. Es decir, el “corazón” del resultado no es el Proctor; el Proctor aquí funciona como control tecnológico para garantizar comparabilidad. [13], [17], [18]

#### *F. Relevancia práctica para caminos de terracería: seleccionar según objetivo de intervención*

Desde una perspectiva de gestión vial, los resultados permiten proponer una lógica de selección por objetivo:

- Si el objetivo es capacidad estructural y durabilidad: suelo-cemento (en la dosificación evaluada) es el candidato dominante, con la advertencia de que su baja permeabilidad puede exigir buena gestión de drenaje superficial para evitar bombeo lateral o erosión localizada.
- Si el objetivo es mejorar condición funcional (plasticidad/absorción) con bajo costo: melaza y  $\text{CaCl}_2$  muestran señales claras en IP y absorción, útiles para mantenimiento y estabilización superficial/funcional.
- Si el objetivo es control de polvo:  $\text{NaCl}$  puede ser discutible como herramienta de serviciabilidad, pero los resultados no lo respaldan como solución de durabilidad bajo el ciclo aplicado (desgaste). [13], [14], [15], [16]

Este enfoque es coherente con la necesidad de soluciones costo-efectivas para redes vecinales, donde la intervención debe balancear capacidad, drenaje y mantenimiento realista, en un contexto de expansión / red vial y restricciones presupuestarias.

#### *G. Limitaciones del estudio y alcance de los resultados*

Los resultados presentados corresponden a un suelo granular clasificado como AASHTO A-2-4 y, por tanto, su interpretación debe restringirse a materiales con características comparables; la extrapolación a suelos cohesivos o con distinta mineralogía y plasticidad requiere verificación experimental específica. Asimismo, el esquema experimental contempla un número limitado de especímenes por condición, por lo que el análisis cuantitativo se enfoca en estadística descriptiva y comparación de tendencias entre tratamientos, evitando inferencias de significancia (p. ej., ANOVA) que exigen réplicas múltiples por nivel.

Finalmente, los ensayos fueron ejecutados en laboratorio bajo condiciones controladas; la confirmación de desempeño en servicio demanda validación en campo mediante tramos piloto y seguimiento estacional, particularmente bajo variaciones de humedad y condiciones de drenaje propias de caminos no pavimentados. [14], [16], [21], [23].

Adicionalmente, el alcance estadístico del estudio debe interpretarse con cautela debido al número limitado de especímenes por condición. Esta restricción impide establecer conclusiones inferenciales definitivas sobre significancia estadística entre tratamientos, por lo que los resultados se presentan como una comparación experimental exploratoria basada en tendencias, magnitud de cambio y coherencia físico-mecánica.

Para robustecer futuras etapas, se recomienda ampliar el número de réplicas, calcular intervalos de confianza, aplicar pruebas no paramétricas cuando no se cumplan supuestos de normalidad y homogeneidad, y analizar la variabilidad entre dosificaciones mediante diseños factoriales o multifactoriales.

#### *H. Implicaciones técnicas para la selección de alternativas de estabilización*

Los resultados indican que la evaluación de estabilización química en suelos granulares de baja plasticidad no debe sustentarse únicamente en la resistencia a compresión, sino en un balance de desempeño mecánico, hidráulico y de durabilidad. En el conjunto analizado, el suelo-cemento define una mejora estructural con incremento de resistencia y disminución de permeabilidad, mientras que melaza y  $\text{CaCl}_2$  muestran aportes relevantes en variables asociadas a serviciabilidad (reducción de IP y absorción), particularmente pertinentes para condiciones de caminos de terracería expuestos a ciclos de humedad-secado.

En consecuencia, la selección de la alternativa debe alinearse con el objetivo de intervención (capacidad portante, drenaje o desempeño funcional), así como con las condiciones de mantenimiento y drenaje del tramo. [13], [16], [23], [24]

## VI. CONCLUSIONES

La investigación permitió evaluar el efecto de estabilizantes químicos en un suelo granular representativo de caminos de terracería mediante indicadores mecánicos, hidráulicos y de durabilidad, incluyendo resistencia a compresión axial, permeabilidad, índice de plasticidad, desgaste y absorción, con el propósito de establecer comparaciones técnicas entre alternativas de estabilización para suelos de baja plasticidad.

1. A partir de la caracterización granulométrica y de plasticidad, se clasificó el material como suelo granular AASHTO A-2-4, condición compatible con aplicaciones de estabilización orientadas a mejorar comportamiento mecánico y funcional en vías, que generalmente no están pavimentadas. [1], [2], [3]

2. Se aplicaron dosificaciones de estabilizantes definidas en rangos reportados en literatura y guías técnicas para estabilización de suelos en caminos de bajo volumen de tránsito: cemento Portland tipo I (12%, 16% y 18%), cloruro de calcio (1%, 4% y 6%), melaza de caña (2%, 4% y 6%) y cloruro de sodio (2%, 5%, 10% y 20%), estableciendo un esquema comparativo con un suelo control sin aditivos.
3. La evaluación experimental integró ensayos de clasificación y control tecnológico (granulometría, límites de Atterberg y compactación Proctor) y ensayos de desempeño (compresión axial, permeabilidad a carga constante y ciclos de humedad–secado mediante desgaste/absorción), permitiendo comparar respuestas del suelo puro frente a las mezclas suelo–estabilizante en condiciones controladas de laboratorio.
4. El suelo–cemento presentó el desempeño más favorable como alternativa de estabilización estructural para el suelo granular analizado, reflejado en mayores resistencias a compresión y mejor respuesta frente a desgaste, junto con una reducción de la permeabilidad respecto al suelo sin estabilizar. La melaza de caña evidenció resultados competitivos como alternativa de mejora funcional, principalmente por la reducción del índice de plasticidad y de la absorción, con incrementos mecánicos moderados en comparación con el control, por lo que se identifica como opción complementaria para mejorar la serviciabilidad del material en caminos de terracería.

## VII. RECOMENDACIONES

1. Desarrollar una segunda etapa experimental que replique el mismo esquema de ensayos (plasticidad, permeabilidad, compactación, compresión axial y ciclos humedad–secado) en suelos cohesivos de mayor plasticidad (p. ej., AASHTO A-6 o A-7), con el fin de contrastar el comportamiento de los estabilizantes en matrices con mayor actividad de finos y susceptibilidad a variaciones de humedad.
2. Estandarizar el ensayo de desgaste/absorción mediante la ejecución simultánea de los ciclos para todos los tratamientos y dosificaciones, asegurando igualdad de condiciones de exposición (tiempos de inmersión, secado en horno, temperatura y número de ciclos) y minimizando sesgos operativos asociados al orden de ejecución y a variaciones ambientales entre series.
3. Formular un programa de intervención para la red vial no pavimentada basado en criterios de selección por objetivo (mejora estructural, control de humedad / serviciabilidad o control de polvo), incorporando especificaciones de dosificación, procedimientos de mezcla, compactación y control de calidad, así como requisitos mínimos de drenaje y mantenimiento rutinario para sostener el desempeño de las soluciones aplicadas.
4. Evaluar combinaciones suelo–estabilizante con materiales complementarios (p. ej., adición de finos controlados, estabilizantes cementantes con aditivos orgánicos o sales higroscópicas en rangos acotados) para optimizar el balance costo–desempeño, reduciendo susceptibilidad a humedad, mejorando durabilidad y extendiendo la vida de servicio de la capa tratada, bajo un enfoque de diseño de mezcla y verificación experimental en laboratorio y campo.
5. Incorporar ensayos de desempeño vial complementarios, tales como CBR, módulo resiliente y evaluación bajo cargas repetidas o simulación de fatiga por tránsito, con el fin de relacionar los resultados de laboratorio con indicadores de diseño y comportamiento funcional de caminos no pavimentados. Estos ensayos permitirían validar si las mejoras observadas en resistencia, plasticidad, permeabilidad y durabilidad se traducen en mayor capacidad de soporte, menor deformabilidad y mejor desempeño frente a cargas vehiculares reales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INE, Instituto Nacional de Estadística, “Carreteras y Aeropuertos de Honduras 2014–2018,” 2018. [En línea]. Disponible: <https://ine.gob.hn/V3/imag-doc/2020/01/Carreteras-y-Aeropuertos-2018.pdf>. [Accedido: 14-feb-2026].
- [2] INE, “Carreteras y Aeropuertos de Honduras (2017–2021),” 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.ine.gob.hn/V3/2022/11/28/carreteras-y-aeropuertos-2017-2021/>. [Accedido: 14-feb-2026].
- [3] A. Montejo, A. Montejo y A. Montejo, Estabilización de Suelos. Bogotá, Colombia: Ediciones de la U, 2018.
- [4] P. Anguas, A. Pérez, J. Gómez y E. Obil, “Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres,” Querétaro, México, 2002.
- [5] AASHTO, Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes, AASHTO M 145-91 (2021), Washington, DC, USA, 2021.
- [6] H. Estrada y K. Cueva, “Influencia de la aplicación de cloruro de calcio y melaza de caña en vías no pavimentadas,” 2021. [En línea]. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/81584>. [Accedido: 14-feb-2026].
- [7] F. Cahuana, “Dosificación óptima de cloruro de calcio y melaza de caña para la estabilización de suelos en caminos vecinales no pavimentadas,” Tesis, Huaraz, Perú, 2016.
- [8] ASTM International, “ASTM D4318: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils,” 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.astm.org/standards/d4318>. [Accedido: 14-feb-2026].
- [9] ASTM International, “ASTM D2434: Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head),” 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.astm.org/standards/d2434>. [Accedido: 14-feb-2026].
- [10] Banco Mundial, “República de Honduras – Marco de Alianza para el País,” 2022.
- [11] M. Artero, J. Jovel y M. Mejía, “Propuesta para el diseño y construcción de pavimentos unicapa de alto desempeño como alternativa de aplicación en caminos rurales,” San Salvador, 2003.

- [12]Banco Interamericano de Desarrollo (BID), “Programa de Integración Vial Regional II (Honduras) – Documento del proyecto (L1121),” 2016.
- [13]U.S. Department of Defense, UFC 3-250-11: Soil Stabilization and Modification for Pavements, 2020.
- [14]Federal Highway Administration (FHWA), Unpaved Road Dust Management: A Successful Practitioner’s Handbook, 2013.
- [15]D. Jones, Guidelines for the Selection, Specification and Application of Chemical Dust Control and Stabilization Treatments on Unpaved Roads, UC Pavement Research Center (UCPRC), Univ. of California, 2017.
- [16]M. Kestler, Stabilization Selection Guide for Aggregate- and Native-Surfaced Low Volume Roads, USDA Forest Service, SDTDC, 2008 (0877 1805).
- [17]Southeast Cement Association, Soil-Cement Construction Handbook, 2023.
- [18]R. Terrel et al., Soil Stabilization in Pavement Structures: A User’s Manual, Vol. 2—Mixture Design Considerations, FHWA, 1979.
- [19]OxyChem, Calcium Chloride: Dust Control and Soil Stabilization, 2024.
- [20]Transportation Research Board (TRB), Chemical Treatments on Low-Volume Roads (webinar/materiales técnicos), 2021.
- [21]NIST/SEMATECH, e-Handbook of Statistical Methods (estadística descriptiva y consideraciones de muestra).
- [22]LACCEI, Molasses in Subgrade Performance Analysis, LACCEI 2023 (proc./paper).
- [23]Roads Authority (Malawi), Low Volume Roads Manual, Volume 1: Pavement Design, 2020.
- [24]World Bank, Fourth Roads Rehabilitation and Maintenance Project (evaluación/PPAR Nicaragua; lecciones sobre mantenimiento y red), 2020.