Use of organic additives in the improvement of gravel roads

José P. Aguiar-Moya[1]; Yuliana Sandoval[2]; Alejandra Baldi[3]
[1]Universidad Fidélitas, San Pedro, Costa Rica, jaguiar@ufidelitas.ac.cr
[2]Universidad Fidélitas, San Pedro, Costa Rica, ysandoval80830@ufide.ac.cr
[3]Universidad Fidélitas, San Pedro, Costa Rica, abaldi@ufidelitas.ac.cr
*Corresponding author

Abstract– ***This study evaluates the potential of organic additives to improve the resistance and performance of gravel soils in Costa Rica with the main objective to reduce the carbon footprint associated to road maintenance. The research focuses on two specifically organic additives: molasses and palm oil. Tests were carried out in the laboratory to evaluate the mechanical properties on the treated material. The research shows that the application of these additives improves the capacity of soil to resist weather conditions and the high traffic on the highway. The main findings reveals that the use of molasses and palm oil improves the stability, the bearing capacity and the volumetric changes due to environment conditions. The study also includes a cost analysis that confirms that road management and the use of these organic additives is a feasible alternative to traditional stabilization methods. The use of these organic products reduces the cost of conservation strategies but also improves the sustainability of traditional methods. The study suggests the implementation of full-scale test sections to generate more data to allow more information for future implementation. The proposed methods can serve as a sustainable alternative not only at the national level, but at the regional level where material conditions are similar.***

Keywords-- ***Gravel roads, organic additives, molasses, palm oil, sustainable road maintenance.***

Evaluación de la utilización de aditivos orgánicos para el mejoramiento en caminos de lastre

José P. Aguiar-Moya[1]; Yuliana Sandoval[2]; Alejandra Baldi[3]
[1]Universidad Fidélitas, San Pedro, Costa Rica, jaguiar@ufidelitas.ac.cr
[2]Universidad Fidélitas, San Pedro, Costa Rica, ysandoval80830@ufide.ac.cr
[3]Universidad Fidélitas, San Pedro, Costa Rica, abaldi@ufidelitas.ac.cr
*Corresponding author

Resumen– ***Este estudio investiga el potencial de los aditivos orgánicos para mejorar la durabilidad y resistencia de los suelos de lastre en Costa Rica, con el objetivo de reducir la huella de carbono asociada con el mantenimiento vial. La investigación se centra en dos aditivos orgánicos específicos: melaza y aceite de palma. Se realizaron pruebas de laboratorio para evaluar las propiedades mecánicas en el material tratado. Los resultados demuestran que la aplicación de estos aditivos mejora la capacidad del suelo para resistir condiciones climáticas y alto tránsito. Los hallazgos clave indican que el uso de melaza y aceite de palma mejoran la estabilidad, la capacidad de soporte y los cambios volumétricos producto de las condiciones del ambiente. El estudio también incluye un análisis de costos comparativo, que confirma la viabilidad del uso de estos aditivos orgánicos en comparación con el método tradicional de mantenimiento. Al incorporar estos productos naturales, las prácticas de conservación no solo podrían ser más sostenibles ambientalmente, sino que también a un menor costo. La investigación recomienda la ejecución de planes piloto en campo y estudios a gran escala adicionales para así obtener mayor cantidad de datos que permitan mejorar la toma de decisiones y la asignación de los recursos a largo plazo. Este enfoque podría servir como modelo para otras regiones que enfrentan desafíos infraestructurales y ambientales similares.***

Palabras clave Caminos de lastre, aditivos orgánicos, melaza, aceite de palma, mantenimiento vial sostenible.

I. Introducción

La infraestructura vial es un componente fundamental para el desarrollo económico y social de los países. En Costa Rica, la Red Vial Nacional (RVN) y la Red Vial Cantonal (RVC), incluyendo las que se encuentran en condición de lastre, son esenciales para el transporte de bienes y personas, particularmente en áreas rurales. Sin embargo, estas redes viales enfrentan desafíos significativos debido al deterioro causado por las condiciones climáticas adversas y el tráfico pesado. Los caminos de lastre, en particular, presentan problemas críticos de mantenimiento, especialmente relacionados con la compactación deficiente, la pérdida de resistencia y la generación de polvo durante la estación seca. Además, los procesos de conservación y mantenimiento de estos caminos inciden significativamente en la huella de carbono del país [1], compuesta por 7566 kilómetros de la RVN y 36495 kilómetros de la RVC. Las rutas de lastre son vitales para la economía agrícola y la conectividad rural, pero su estado de conservación es deficiente debido a la falta de recursos y a su vulnerabilidad ante los eventos climatológicos [2]. Históricamente, el enfoque en el mantenimiento de caminos de lastre ha sido insuficiente, lo que ha llevado a un deterioro continuo y a la necesidad de intervenciones más sostenibles y efectivas [3].

En ese sentido, la búsqueda de métodos de mantenimiento más sostenibles es esencial para reducir la huella de carbono y aprovechar los recursos locales de manera eficiente. En este contexto, el uso de aditivos orgánicos, como la melaza y el aceite de palma, presentan una alternativa viable para mejorar la resistencia y durabilidad de estos caminos [4].

La investigación considera que la evaluación de la aplicación de aditivos orgánicos en caminos de lastre como mecanismo de conservación sostenible que propicie una mejora en la resistencia ante las cargas, durabilidad y su impacto en la huella de carbono del proyecto. Dentro de los objetivos específicos del estudio se encuentran:

1. Analizar el efecto de los aditivos orgánicos en el comportamiento mecánico de los materiales de base/subbase.
2. Cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) derivadas de la aplicación de aditivos orgánicos.
3. Evaluar financieramente la viabilidad y sostenibilidad de estas intervenciones.

Sobre el particular, es necesario señalar que la literatura existente sobre la estabilización de suelos y la conservación vial con aditivos orgánicos indica que estos métodos pueden mejorar significativamente las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Estudios previos internacionales y bajo diversos suelos han demostrado que la melaza y el aceite de palma pueden reducir la generación de polvo y la huella de carbono asociada al mantenimiento vial [5]. Además, estas soluciones podrían convertirse en alternativas económicamente viables, que promueven el uso de recursos naturales locales, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental [6].

Este estudio examina las propiedades mecánicas del suelo, como la cohesión, la capacidad de carga y cambios volumétricos. Las variables principales incluyen los tipos de suelo (arcilla expansiva y limo plástico) y los aditivos orgánicos (melaza y aceite de palma). Las pruebas de laboratorio se centran en el análisis granulométrico, los límites de Atterberg, el Proctor estándar y el Índice de Capacidad de Soporte de California (CBR).

En síntesis, esta investigación propone una solución innovadora y sostenible para los desafíos de mantenimiento de caminos de lastre en Costa Rica, utilizando aditivos orgánicos para mejorar la infraestructura vial de manera económica y ambientalmente responsable.

II. Metodología

Este estudio se llevó a cabo para evaluar el impacto de los aditivos orgánicos en la mejora de los suelos: arcilla expansiva y limo plástico, la cuantificación de las emisiones GEI de dichos aditivos en su aplicación y una evaluación comparativa de costos directos. La metodología para la evaluación del impacto de los aditivos orgánicos adoptada se divide en varias etapas clave: la selección de suelos, evaluación de aditivos orgánicos, pruebas de laboratorio y análisis de datos. Cada una de estas etapas se describe detalladamente a continuación.

Selección de suelos. Se seleccionaron dos tipos de suelo comúnmente encontrados en zonas rurales de Costa Rica: arcilla expansiva y limo plástico. Estos suelos fueron seleccionados por sus características distintivas y el desafío que presentan en actividades de mantenimiento de caminos. Las muestras de suelo fueron aportadas por el Laboratorio Castro & de la Torre.

Evaluación de aditivos orgánicos. Los aditivos seleccionados para este estudio fueron la melaza y el aceite de palma, ambos disponibles localmente. La selección de estos aditivos se basó en estudios previos internacionales que señalan su eficacia en la mejora de las propiedades mecánicas del suelo [5].

Pruebas de laboratorio. Las muestras de suelo fueron sometidas a una serie de pruebas de laboratorio para determinar sus propiedades iniciales y evaluar los efectos de los aditivos orgánicos. Las pruebas incluyeron:

1. Análisis granulométrico: Para determinar la distribución de tamaños de partículas en las muestras de suelo.
2. Límites de Atterberg: Para evaluar la plasticidad y la consistencia del suelo.
3. Proctor estándar: Para determinar la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca del suelo.
4. Índice de Capacidad de Soporte de California (CBR): Para medir la resistencia del suelo y su capacidad de soporte.

Se prepararon muestras de suelo mezcladas con 4% de melaza y 4% de aceite de palma. Cada muestra fue manipulada bajo condiciones controladas antes de someterse a los ensayos de laboratorio.

La metodología para la Cuantificación de emisiones de GEI se llevó a cabo mediante el Análisis del Ciclo de Vida (LCA) [7-11]. Este enfoque permitió cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas con la producción, transporte y aplicación de los aditivos.

En lo que respecta a la evaluación financiera, se llevó a cabo un comparativo de los costos asociados con el uso de los aditivos orgánicos frente a los métodos tradicionales de mantenimiento de caminos de lastre. Este análisis incluyó costos de materiales, transporte, mano de obra y maquinaria.

La metodología integral aplicada en esta investigación permitió evaluar de manera rigurosa y sistemática el impacto de los aditivos orgánicos en suelos comúnmente encontrados en zonas rurales, proporcionando una base sólida para las conclusiones y recomendaciones derivadas de este estudio.

III. Resultados

Los resultados obtenidos evidencian, en términos generales, aportes en cuanto a la mejora de propiedades mecánicas de los suelos tratados con aditivos, las emisiones de GEI en dicha aplicación y la valoración financiera desde una perspectiva de costos. A continuación, se detallan los principales elementos:

Mejora en las propiedades mecánicas del suelo. Los resultados obtenidos demuestran que la adición de melaza y aceite de palma mejoran las propiedades mecánicas de los suelos tratados. En las pruebas de Humedad-Densidad (Proctor Estándar), ambos aditivos mostraron un aumento notable en la densidad seca máxima y una reducción en la humedad óptima requerida. Las muestras tratadas con melaza mostraron un incremento en la cohesión y en la capacidad de carga, medido a través del ensayo de California Bearing Radio (CBR).

Particularmente, la arcilla plástica gris, en su estado original, presentó una baja capacidad de soporte de carga, lo que la hace inadecuada para la conservación de rutas de bajo tránsito. Al añadir un 4% de aceite de palma crudo, se observa un incremento en la densidad y en los valores de CBR, pero también un aumento en la plasticidad que podría comprometer la estabilidad y durabilidad del suelo bajo condiciones de alto tránsito, haciendo que este aditivo en combinación con la arcilla expansiva no sea ideal en la proporción experimentada. En contraposición, la incorporación de un 4% de melaza mejora significativamente los valores de CBR y reduce la plasticidad, lo que convierte al suelo tratado en una opción viable para la conservación de rutas de bajo tránsito, mejorando su capacidad de soporte y estabilidad y reduciendo la susceptibilidad a deformaciones bajo carga. Los resultados pueden visualizarse en la siguiente figura:

	Resultados sin aditivo	Resultados con 4% de Aceite de Palma	Resultados con 4% de Melaza
Límites de Atterberg	LL = 111,8 LP = 34,7 IP = 77,17	LL = 139,6 LP = 57,6 IP = 81,9	LL = 96,6 LP = 58,1 IP = 37,9
Humedad - Densidad (Proctor Estándar)	1330 Kg/m3 30%	1363 Kg/m3 25%	1165,1 Kg/m3 28%
CBR	2,5 mm = 1,83 5,0 mm = 1,92	2,5 mm = 1,93 5,0 mm = 2,02	2,5 mm = 4,81 5,0 mm = 4,84

Fig. 1 Resumen Integral de los resultados de la Arcilla plástica color gris.

Nota: La figura muestra un resumen de los resultados de ensayo con y sin los aditivos.

Respecto al limo de alta plasticidad, en su condición original, muestra una capacidad de soporte de carga moderada, aceptable para rutas de muy bajo tránsito, pero con posibles necesidades de mejoras adicionales para aumentar su

durabilidad. Al tratarlo con un 4% de aceite de palma, se mejora significativamente su capacidad de soporte de carga, estabilidad y densidad, haciéndolo adecuado para rutas de bajo tránsito. De manera similar, el tratamiento con melaza también incrementa los valores de CBR, mejorando la capacidad de soporte de carga y reduciendo notablemente la plasticidad del suelo, lo que sugiere que este tratamiento es igualmente viable para la conservación de rutas de bajo tránsito.

	Resultados sin aditivo	Resultados con 4% de Aceite de Palma	Resultados con 4% de Melaza
Límites de Atterberg	LL = 65,1 LP = 34,5 IP = 30,6	LL = 68,1 LP = 49,1 IP = 18,8	LL =62,8 LP = 59,7 IP = 3,08
Humedad - Densidad (Proctor Estándar)	1278 Kg/m3 32%	1314 Kg/m3 30%	1273 Kg/m3 29%
CBR	2,5 mm = 5,57 5,0 mm = 5,16	2,5 mm = 15,08 5,0 mm = 11,06	2,5 mm = 14,99 5,0 mm = 10,51

Fig. 2 Resumen Integral de los resultados del Limo de Alta plasticidad.

Nota: La figura muestra un resumen de los resultados de ensayo con y sin los aditivos.

Evaluación del impacto ambiental. El análisis del ciclo de vida (LCA) reveló que la producción y aplicación de melaza y aceite de palma como aditivos resultan en una reducción neta de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en comparación con el método tradicional de mejoramiento de una superficie de ruedo en lastre. Las estimaciones indican una reducción en promedio del 30% en las emisiones de CO_2 equivalente por kilómetro tratado. Estos resultados sugieren que los aditivos orgánicos no solo mejoran la funcionalidad de los caminos de lastre, sino que también contribuyen a la sostenibilidad ambiental.

El siguiente cuadro muestra los resultados generales de emisiones de GEI en cada una de sus etapas:

TABLA I
RESULTADO DE HUELLA CARBONO SEGÚN ESCENARIO PROPUESTO

Escenario	Producción de aditivos	Transporte de aditivos al sitio de aplicación	Aplicación de aditivos en caminos de lastre	Huella Carbono totalizada por Km
Melaza	23112	174,48	345,24	23631,72
Aceite de Palma	58752	114,64	343,98	59210,62
Método Ordinario	35148,6	23631,78	523,44	59303,82

Nota: La tabla muestra los resultados de Huella Carbono totalizados por kilómetro, contabilizada a partir de las emisiones GEI en cada etapa. Fuente: Elaboración propia.

Análisis financiero. El análisis comparativo de costos directos entre los diferentes métodos de mejoramiento de suelos revela diferencias significativas en los costos totales. El método que utiliza melaza resulta ser el de menor costo, con un total de ₡6.598.161, mientras que el método ordinario es el más costoso con un total de ₡21.724.896. El método con aceite de palma se encuentra en un punto intermedio, con un costo total de ₡18.247.890. Esta disparidad obedece principalmente a las diferencias en los costos de los materiales utilizados en cada método.

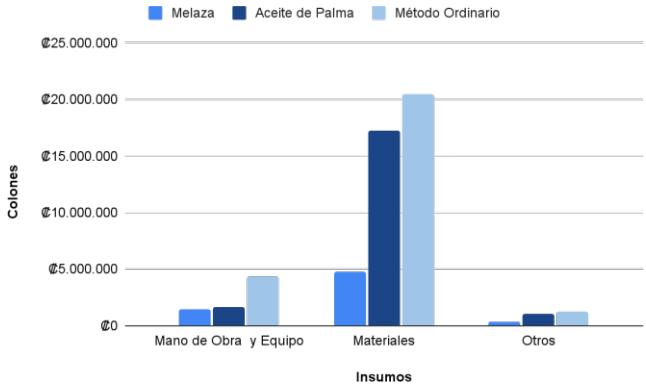

Fig. 3 Resultados del análisis de costos por insumo.

IV. ANÁLISIS

Los resultados obtenidos en este estudio proporcionan evidencia de que los aditivos orgánicos, específicamente la melaza y el aceite de palma, pueden mejorar las propiedades mecánicas de los suelos: arcilla expansiva y limo plástico, materiales usualmente identificados en redes de lastre de zonas rurales de Costa Rica. Estos hallazgos permiten cumplir con el objetivo planteado y concluir que su aplicación aumenta la resistencia y durabilidad del material, además de reducir la huella de carbono asociada con su mantenimiento.

Mejora en las propiedades mecánicas del suelo

En particular, los resultados de CBR muestran incrementos que sugieren una mejora importante en la capacidad de carga de los suelos tratados. Este incremento en la resistencia mecánica puede atribuirse a la mejora en la cohesión y densidad del suelo, como se observó en el ensayo de Humedad-Densidad. Estos resultados son consistentes con estudios previos que han demostrado la eficacia de los aditivos orgánicos en la estabilización de suelos [4,5].

En cuanto al análisis del ciclo de vida (LCA) los resultados sugieren menor contabilización de emisiones GEI utilizando la melaza derivada de sus prácticas de producción, menores necesidades de transporte y la sencillez en su aplicación; en contraste al método ordinario, el cuál es intensivo en insumos y maquinaria. En cuanto a la utilización de aceite de palma, su proceso de producción es detonante para los incrementos en las emisiones de CO_2. Cabe señalar que la reducción de la huella de carbono es particularmente relevante en el contexto de los objetivos nacionales e internacionales de sostenibilidad y mitigación del cambio climático [1].

Finalmente, a nivel del análisis de costos, el ahorro promedio ronda un 43% en los costos de utilizando aditivos orgánicos vrs método ordinario intuyen una viabilidad económica de estos métodos de conservación. En ese sentido los menores costos asociados al mantenimiento, en combinación con las mejoras en la durabilidad y resistencia de los caminos, hacen que el uso de melaza y aceite de palma sea una alternativa económicamente viable. Estos resultados apoyan la implementación de estas prácticas a mayor escala, proporcionando una solución sostenible y rentable para el mantenimiento vial.

IV. Conclusiones y Recomendaciones

Este estudio evidenció que el uso de aditivos orgánicos, específicamente la melaza y el aceite de palma, pueden mejorar las propiedades mecánicas de los suelos de lastre en Costa Rica. Las principales conclusiones obtenidas son las siguientes:

a. Mejora en la Capacidad de Carga: La aplicación de melaza y aceite de palma incrementó notablemente el valor de CBR de los suelos tratados, mejorando su capacidad de carga y resistencia mecánica. Esto sugiere que los caminos de lastre podrían soportar mejor el tráfico y las condiciones climáticas adversas.
b. Impacto Ambiental Positivo: El análisis del ciclo de vida (LCA) indicó una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas con el uso de aditivos orgánicos, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y al cumplimiento de los objetivos de mitigación del cambio climático en actividades de conservación vial.
c. Viabilidad Económica: El análisis financiero demuestra que el uso de melaza y aceite de palma presenta menores costos que la aplicación del método tradicional. Lo cual configura un resultado importante ante la implementación de estas prácticas como una alternativa rentable y sostenible.

A la luz de los hallazgos de este estudio, se proponen las siguientes recomendaciones para la implementación y futuras investigaciones:

a. Los ensayos de laboratorio implementados en la presente investigación deben complementarse con un proyecto piloto para validar los resultados expuestos en campo. En algunas zonas de Guanacaste la melaza es el supresor de polvo por elección y economía, por lo tanto, es esencial desarrollar protocolos de aplicación específicos para cada tipo de suelo y aditivo, asegurando que se logre la mejora deseada en las propiedades mecánicas del suelo.
b. A partir de la literatura, en la presente investigación se utilizó un 4% de adición de aditivos orgánicos, no obstante, se recomienda probar con otras cantidades. Cada ensayo debe incluir la evaluación de los límites de Atterberg, la densidad y humedad (Proctor Estándar), y el CBR (California Bearing Ratio) para identificar cómo oscilan estas propiedades con diferentes concentraciones de aditivos.
c. En América del Sur y otros países de Europa se ha incursionado en el uso combinado de aditivos orgánicos y químicos en procesos de estabilización iónica. La presente investigación sugiere que los aditivos tienen un gran potencial para mejorar la estabilidad y durabilidad de los caminos de lastre. Sin embargo, se recomienda realizar estudios adicionales para explorar otros tipos de aditivos y sus combinaciones.

En conclusión, el uso de melaza y aceite de palma como aditivos orgánicos en el mantenimiento de caminos de lastre ofrece una solución viable, rentable y ambientalmente responsable para los desafíos de infraestructura vial en Costa Rica. La adopción de estas prácticas puede mejorar significativamente la sostenibilidad y eficiencia del mantenimiento vial, beneficiando tanto a las comunidades rurales como al medio ambiente.

Agradecimiento/Reconocimiento

Se agradece el apoyo del Laboratorio Castro y De La Torre, así como el de la Universidad Fidélitas en la realización de este proyecto.

References

[1] Xu-Ye, L., López-Ramírez, S., Allen Monge, J., & Loría Salazar, L. G. (2021). Desarrollo de la gestión vial municipal en Costa Rica: Incidencia de elementos político-técnicos. Revista Centroamericana De Administración Pública, (75), 149-158. Recuperado de https://ojs.icap.ac.cr/index.php/RCAP/article/view/40.

[2] Contraloría General de la República de Costa Rica. (2023). Perspectiva presupuestaria del MOPT 2023 (Informe No. DFOE-CIU-MTR-00001-2023).

[3] EIC-Lanamme. (2022). Conformación y análisis preliminar de la inversión en la Red Vial Nacional no pavimentada (Informe No. EIC-Lanamme-INF-0337-2021).

[4] Abarca, L., & Leandro, G. (2016). Situación actual de la gestión de los materiales de construcción en Costa Rica. Tecnología en Marcha, 29(4), 111-122.

[5] Huaquisto, S. (2014). Efectos del aceite residual de la maquinaria pesada en los factores físicos mecánicos del suelo (Tesis de grado). Universidad Nacional del Antiplano Puno.

[6] Rico Rodríguez, A., & del Castillo, H. (2005). La ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas. Editorial Limusa.

[7] Medina, T.; Calmon, J.L.; Vieira, D.; Bravo, A.; Vieira, T. Life Cycle Assessment of Road Pavements That Incorporate Waste Reuse: A Systematic Review and Guidelines Proposal. *Sustainability* **2023**, *15*, 14892. https://doi.org/10.3390/su152014892.

[8] B. Yu and Q. Lu, "Life cycle assessment of pavement: Methodology and case study," *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.*, vol. 17, no. 5, pp. 380-388, 2012, doi: 10.1016/j.trd.2012.03.004. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920912000351.

[9] Plati, C., & Tsakoumaki, M. (2023). Life Cycle Assessment (LCA) of Alternative Pavement Rehabilitation Solutions: A Case Study. *Sustainability*, *15*(3), 2129. https://doi.org/10.3390/su15032129.

[10] N. J. Santero, E. Masanet, and A. Horvath, "Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55, no. 9–10, pp. 801–809, 2011, doi: 10.1016/j.resconrec.2011.03.010.

[11]D. Koh, S. Tokbolat, and S. A. Blaauw, "Life cycle assessment of pavement construction: A case study," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1363, p. 012065, 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1363/1/012065.