

I. INTRODUCCIÓN

La complejidad funcional de la red vial de un país requiere desde vías estratégicas para el desarrollo, las cuales deben ser construidas con base a diseños de altos estándares de capacidad estructural y confortabilidad de sus usuarios, hasta caminos de bajo volumen vehicular. Los últimos son también fundamentales en una sociedad, ya que permiten el desplazamiento de personas y productos desde fincas o zonas rurales hasta los centros urbanos en los cuales se recibe atención médica, comercializa productos, existen fuentes de estudio y empleo y se llevan a cabo otras actividades básicas de la vida cotidiana de los seres humanos.

Sin embargo, debido a la poca población que atienden y por el número reducido de vehículos que transita por ellos, generalmente existen limitaciones de presupuesto para su mantenimiento, por lo que su superficie corresponde a grava o tierra, lo que genera emisiones de polvo que inciden en la calidad de vida de las personas y el ambiente.

II. EL FENÓMENO DE EMISIÓN DE POLVO FUGITIVO Y SUS EFECTOS EN LA SALUD

Los caminos no pavimentados tienen como desventaja la emisión continua de polvo hacia el ambiente que lo rodea. En la Figura 1, se muestra como este tipo de superficies no impermeabilizadas o donde no exista adhesión de partículas finas entre sí, generan polvo como resultado de esfuerzos cortantes entre las llantas del vehículo y el agregado, rotura de agregados en partículas de menor tamaño cuando los vehículos transitan sobre ellos, arrastre del polvo adherido a la llanta del auto en otros sitios de su recorrido, partículas finas previamente depositadas como material propio de la conformación del camino y otras provenientes de campos agrícolas o terrenos aledaños a la vía (Barnes & Connor, 2014).

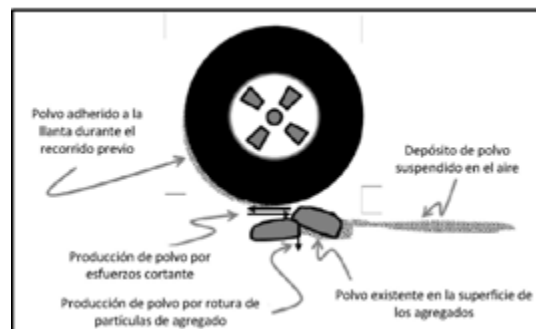


Figura 1. Fuentes emisoras de polvo en caminos no pavimentados.

Fuente: Adaptado de (Barnes & Connor, 2014).

El fenómeno de emisión de polvo fugitivo corresponde al transporte aéreo de polvo de un sitio a otro, o re-suspensión de las partículas de polvo, producto del movimiento del aire generado por el paso de vehículos. De acuerdo con (Barnes & Connor, 2014), los tres mecanismos que lo generan son: 1) empuje y desplazamiento de partículas de polvo hacia el aire una vez que entran en contacto con la llanta, 2) el desplazamiento de masas de aire provocadas por el movimiento del vehículo, las cuales generan remolinos o turbulencia que desarrollan a su vez pequeños esfuerzos cortantes sobre la superficie y que son capaces de levantar las partículas del suelo hasta mantenerlas suspendidas por cierto tiempo, y 3) el desplazamiento de partículas entre sí, que se da al momento de caer y chocar unas sobre otras.

En la gestión vial, la emisión de polvo es analizada desde diferentes enfoques, ya sea desde la seguridad vial ante la generación de nubes densas de polvo que disminuyen la visibilidad de la vía, hasta las afectaciones de la salud de los seres vivos por inhalación de partículas nocivas.

Ante esta problemática de salud extendida a nivel mundial y con el propósito de cuantificar la magnitud de las emisiones de polvo, se utiliza el término *material particulado* (*PM*, por sus siglas en inglés), establecido así por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (*EPA*, por sus siglas en inglés) y definido como la mezcla de partículas sólidas y gotas de líquido que se encuentran en el aire. Este material ha sido clasificado según su tamaño en PM_{10} y $PM_{2,5}$, ambos correspondientes a partículas inhalables, con un diámetro menor o igual a $10\ \mu m$, y menor o igual a $2,5\ \mu m$, respectivamente. En la Figura 2 puede apreciarse en mayor detalle estas magnitudes, identificando que el diámetro de un cabello humano podría ser hasta 30 veces mayor que una $PM_{2,5}$, por ejemplo.

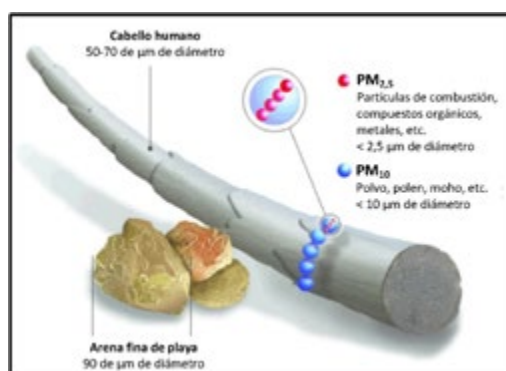


Figura 2. Comparación de tamaños entre partículas de polvo y cabello humano.

Fuente: EPA US, 2016.

III. LA EMISIÓN DE POLVO FUGITIVO Y REGLAMENTACIÓN EN COSTA RICA

Según datos del Consejo Nacional de Vialidad (2017), la red vial de Costa Rica consta de 35 820 km, en la que poco más del 67 % tiene superficie de lastre o grava, evidenciado así que gran cantidad de localidades a nivel nacional podrían encontrarse expuestas a problemáticas asociadas a la emisión de polvo en caminos no pavimentados, y que por tanto se requiere ampliar los campos de investigación en la materia, de modo que se puedan aplicar soluciones eficientes. Costa Rica dispone del *Reglamento de Calidad del Aire para Contaminantes Criterio*, Decreto Ejecutivo N° 39951-S (2016), donde se indican valores máximos permitidos de concentración en el aire ambiente de PM_{10} , $PM_{2,5}$ y otros contaminantes de los cuales sea necesario proteger a la población.

La emisión de polvo de los caminos no pavimentados en varias zonas del país, sobre todo durante la época seca, genera graves afectaciones a las comunidades, entre ellas ingreso de polvo a viviendas, escuelas, centros médicos y hoteles, así como efectos en la salud de las personas como daños visuales, alergias, y problemas respiratorios (bronquitis, bronconeumonía, asma bronquial extrínseca y otros). Este problema se ha elevado a instancias legales donde la Sala Constitucional ha ordenado a las municipalidades y MOPT implementar acciones relacionadas con la mitigación de polvo de los caminos cantonales y rutas nacionales no pavimentados.

IV. LAS METODOLOGÍAS DE MEDICIÓN Y EVALUACIÓN DE POLVO FUGITIVO

La medición del polvo emitido por el tránsito vehicular en un camino no pavimentado puede buscar determinar 1) si un área o sitio específico cumple con las regulaciones, 2) la cantidad de polvo emitido por los vehículos que transitan por el camino específicamente y 3) si una medida de mitigación es efectiva (Barnes & Connor, 2014). Dependiendo del objetivo buscado, el monitoreo de las emisiones de polvo puede realizarse por medio de una o varias de las metodologías que se resumen en la Figura 3.



Figura 3. Resumen de metodologías de medición de las emisiones de polvo.
Fuente: Adaptado de (Barnes & Connor, 2014).

V. TÉCNICAS PARA MITIGAR LA EMISIÓN DE POLVO FUGITIVO

La mitigación de polvo en un camino no pavimentado empieza por el uso del material correcto (capa granular de rodadura), la conformación de la calzada (bombeo suficiente) y buenos drenajes (cunetas y pasos de alcantarilla suficientes). Si alguno de estos elementos no es atendido, otras medidas de control o supresión de polvo adicionales, como las que se describen más adelante, serán menos efectivas de lo previsto (Barnes & Connor, 2014). El control de velocidad es otra medida básica para mitigar el polvo, dado que a mayor velocidad de operación vehicular, mayor cantidad de polvo fugitivo se genera desde la superficie del camino. Se ha demostrado que disminuir la velocidad de 50 km/h a 25 km/h reduce entre 30% y 80% la cantidad de polvo PM10 generado por el tránsito vehicular, además permite extender la vida útil de los caminos no pavimentados donde se haya aplicado un supresor de polvo, pues reduce la generación de esfuerzos de corte que producen los deterioros de la capa de rodadura.

La intervención de un camino para el control de polvo involucra realizar una inversión de recursos y tiempo, por lo que es importante definir previamente el objetivo buscado, sea exclusivamente control de polvo o mejoramiento de la capa de rodadura. Se pueden considerar cuatro objetivos básicos para intervenir un camino como lo indican (Jones & Surdahl, 2014) y se resume en la Figura 4. Por ejemplo, si la necesidad primordial en un camino no pavimentado es controlar el polvo, lo más sencillo sería la aplicación de medidas o productos que se ajusten a la Categoría 1 (CPCP), no sin antes realizar un análisis de costo de ciclo de vida donde se evalúe las otras alternativas respecto al presupuesto disponible y los potenciales beneficios de cada una. Lo anterior de acuerdo con características básicas del camino como la importancia de la vía (jerarquía), volumen y tipo de tránsito vehicular, el tipo de material disponible, trazado (curvas y pendientes) y el clima.

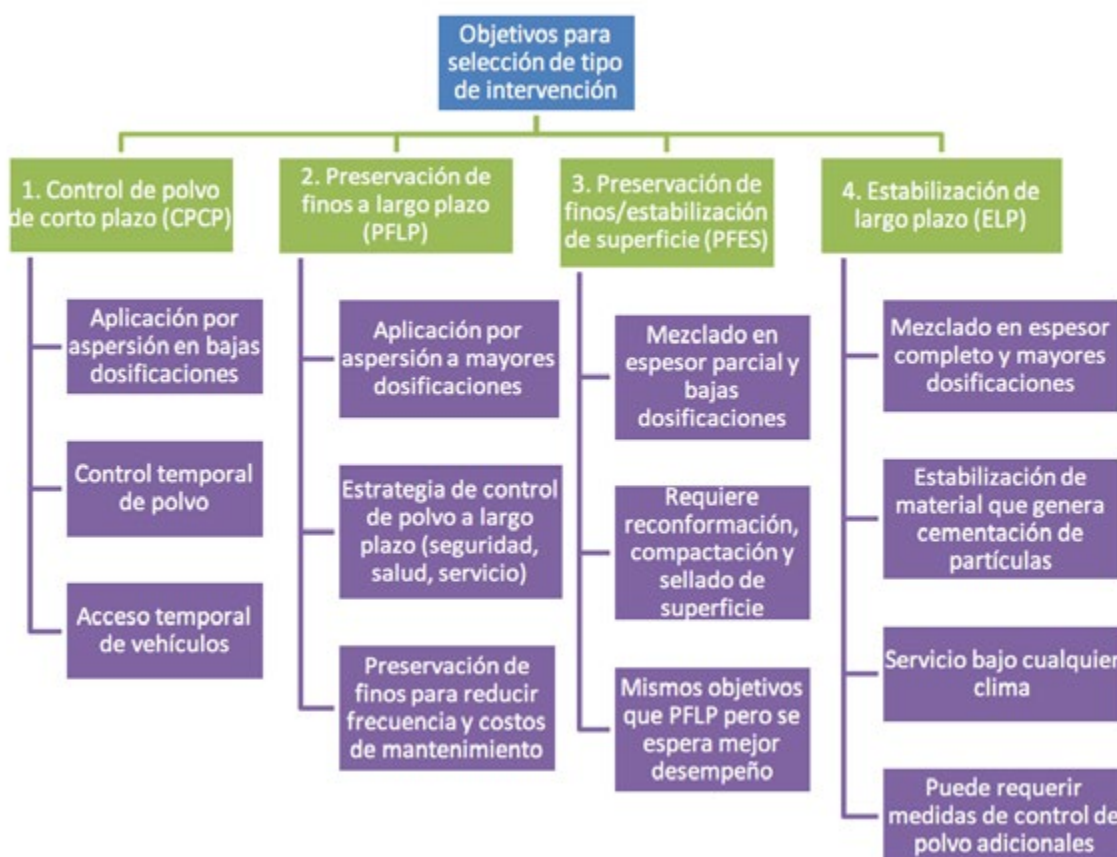


Figura 4. Resumen de objetivos típicos a considerar para la aplicación de productos estabilizadores no tradicionales.
Fuente: Adaptado de (Jones & Surdahl, 2014)

Una vez atendidos los elementos básicos de un camino, así como la identificación de una justificación técnica y financiera correspondiente, se puede implementar un programa de control de polvo que involucre la aplicación de paliativos, reductores o supresores de polvo; la Tabla 1 resume una gran variedad de productos que se pueden agrupar de acuerdo con su origen o formulación química.

En Costa Rica se dispone de poca información técnica acerca de la aplicación de supresores de polvo en caminos no pavimentados. En la práctica se han aplicado diferentes productos, generalmente de forma esporádica y como mecanismo de atención de emergencia ante evidentes afectaciones en la salud de los habitantes cercanos. Sin embargo, en la mayoría de los casos estas aplicaciones no responden a un análisis de ciclo de vida, condiciones particulares de tránsito, material disponible ni clima de la zona, por lo que en ocasiones no se obtiene el desempeño esperado.

En algunas ocasiones se utiliza la melaza y aceite de palma aplicados manualmente por parte de vecinos, empresas u organizaciones comunales, principalmente en Guanacaste, Zona Norte y Península de Nicoya (Figura 5, izquierda). En rutas nacionales o cantonales se han utilizado algunas técnicas formales como sellos con emulsiones asfálticas y colocación de material perfilado de mezclas asfáltica en caminos de grava por parte del MOPT, CONAVI o Municipalidades (Figura 5, derecha). Estas técnicas se aplican generalmente en secciones o tramos mezclados con el material de rodadura, de manera que no solo reducen el polvo generado por los caminos no pavimentados, sino también mitigan la erosión de finos producida por el tránsito vehicular y la lluvia.

RN. 624 (Frente a Escuela Futuro Verde). Cóbano



RN. 150, La florida, Nicoya.



Figura 5. Aplicación de melaza (izquierda) y sellos asfálticos (derecha) para control de polvo.

Recientemente, se han incorporado al mercado nacional empresas comercializadoras nacionales e internacionales que ofrecen variedad de productos para el control de polvo y estabilización de gravas y suelos. Sin embargo, todavía no se cuenta con experiencia de campo documentada o protocolos oficiales de prueba para su certificación.

Tabla 1. Resumen de productos paliativos, supresores y mitigadores de polvo.

Categoría	Productos típicos	Descripción	Aplicación	Consideraciones ambientales
1. Agua	<ul style="list-style-type: none"> • Agua dulce • Agua salada 	<ul style="list-style-type: none"> • Su tensión superficial aglomera las partículas finas • Se evapora rápidamente (1 hora) 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicaciones sucesivas que pueden resultar costosas • Preferiblemente utilizar bajas y frecuentes dosificaciones. Las dosificaciones altas y esporádicas deterioran la capa de ruedo 	<ul style="list-style-type: none"> • Ninguna
2. Sales o productos absorbentes de humedad	<ul style="list-style-type: none"> • Cloruro de Calcio • Cloruro de Magnesio • Cloruro de Sodio 	<ul style="list-style-type: none"> • Absorben humedad del aire y la retienen • Aumenta la tensión superficial del agua entre las partículas finas • Cloruro de Calcio preferible en climas húmedos y calientes • Cloruro de Magnesio preferible en climas secos y calientes • Moderadamente corrosivos del acero 	<ul style="list-style-type: none"> • Por aspersión como supresores de polvo principalmente • Vía tratada se puede reconformar y compactar previo a aplicaciones sucesivas (1 o 2 aplicaciones por estación) • Se comercializan en hojuelas, granos o salmuera • Preferible en materiales con al menos 10-20% de finos (arcillosos-limosos) 	<ul style="list-style-type: none"> • Solubles en agua • Muy bajo impacto en la calidad de agua si existe zona de amortiguamiento entre vía y cauce • Algunas especies de flora son susceptibles
3. Productos Orgánicos	<ul style="list-style-type: none"> • Aceites vegetales • Melaza • Linaza • Aceite de palma • Resinas vegetales • Glicerina 	<ul style="list-style-type: none"> • Aglomeran las partículas con fuerzas físicas débiles temporalmente • Rigidiza el material tratado en condición seca principalmente • Sufren rápida oxidación • En condición húmeda se suavizan 	<ul style="list-style-type: none"> • Por aspersión o riego como supresores de polvo • Preferible en materiales finos (al menos 8%) • Generalmente se requiere una o dos aplicaciones por temporada 	<ul style="list-style-type: none"> • Solubles en agua, se escurren y filtran • Potencial impacto por consumo de oxígeno en cuerpos de agua • Aparentemente inofensivos para la flora • Vecinos han reportado algunos casos de mal olor y generación de moscas
4. Derivados del petróleo	<ul style="list-style-type: none"> • Emulsiones asfálticas • Resinas de petróleo 	<ul style="list-style-type: none"> • Ligan o adhieren las partículas del material • Impermeabiliza la capa tratada • Puede formar una cáscara susceptible al agrietamiento por tránsito pesado y humedad 	<ul style="list-style-type: none"> • Por aspersión o riego como supresores de polvo • Mezclado para preservación de finos y estabilización de largo plazo • Preferible en materiales granulares compatibles con la carga iónica de la emulsión • Mayor durabilidad al combinar con cemento o cal 	<ul style="list-style-type: none"> • Composición de productos generalmente tóxica • Impacto moderado por derrames previo al curado • Bajo impacto luego de curado
5. Estabilizadores electroquímicos concentrados	<ul style="list-style-type: none"> • Productos iónicos • Enzimas • Aceites sulfonados 	<ul style="list-style-type: none"> • Producen intercambio de cationes con los minerales arcillosos y reducen su afinidad con la humedad • Tratamiento permite aumentar la densidad del material, pero no genera cementación o adhesión de las partículas 	<ul style="list-style-type: none"> • Por aspersión o riego como supresores de polvo • Mezclado para estabilización de largo plazo • Efectivo en suelos finos arcillosos y limosos de alta plasticidad • Suele aplicarse diluido en bajas dosificaciones 	<ul style="list-style-type: none"> • Se requiere análisis de cada producto • Productos altamente ácidos en concentrado, posible impacto por derrames
6. Fluidos Sintéticos y Estabilizadores Poliméricos	<ul style="list-style-type: none"> • Acetatos de vinilo • Co-polímeros acrílicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Generan adhesión de las partículas y también intercambio iónico que aumenta la resistencia mecánica de la capa tratada • Puede producir superficie impermeable en algunos casos difícil de mantener 	<ul style="list-style-type: none"> • Por aspersión o riego como supresores de polvo • Mezclado para estabilización de largo plazo • Se reduce su efectividad luego de 3 meses, por lo que requiere aplicaciones adicionales • Más efectivos en materiales granulares (arenas y gravas) que en suelos finos • Efectos sinérgicos con cemento o cal 	<ul style="list-style-type: none"> • Se requiere análisis de cada producto • Impacto mínimo en calidad del agua • Ningún impacto en flora

Fuente: Adaptado de (Jones & Surdahl, 2014), (Beaulieu, Pierre, Juneau, & Lérege, 2011), (Tingle, Newman, Larson, Weiss, & Rushing, 2007) y (Bolander & Yamada, 1999)

VI. PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DEL LANAMMEUCR

Dado lo anterior, el PITRA del LanammeUCR ha adquirido un monitor ambiental llamado DustMate del fabricante Turnkey Instruments Ltd. El equipo es un nefelómetro láser que mide rápidamente la concentración de partículas torácicas, inhalables y respirables en el aire (TSP, PM10, PM2,5 y PM1). El monitor fue adaptado a un vehículo como se observa en la Figura 6, con el propósito de realizar mediciones que permitan determinar objetivamente la efectividad de las medidas de mitigación de polvo (como los productos supresores o paliativos) en caminos no pavimentados.

Se han realizado las primeras pruebas del equipo utilizando como referencia el trabajo realizado por (Bellio & The-noux, 2005) y (Center for Dirt and Gravel Road Studies, 2017), para la implementación y definición del protocolo básico de prueba como se indica a continuación:

- Inicio del ensayo 50 m antes y se termina 50 m después del tramo a medir.
- Realizar mediciones al medio día entre 10:00 am y 2:00 pm.
- Condiciones ambientales secas y poco ventosas preferiblemente.
- Velocidad del ensayo entre 45 y 50 km/h.
- Monitor colocado a 1,5 m de la llanta trasera del vehículo y a 0,4 m de altura desde el suelo.
- Registro de mediciones cada 2 segundos en el monitor DustMate.
- Registro de ubicaciones en sistema GPS cada 1 segundo.
- Grabación de video desde parte posterior del vehículo para observar la nube de polvo.
- Registrar valores de humedad relativa, temperatura, velocidad y dirección del viento.
- Realizar mediciones antes y después de la aplicación del producto en el mismo tramo.
- Se realizan 5 repeticiones de cada medición para verificar variabilidad de datos.
- Se cuantifica la reducción porcentual de polvo emitido luego de la aplicación del producto supresor.

Adicionalmente, se planea realizar investigaciones relacionadas con el desempeño de estos productos incorporando mediciones de rugosidad por medio del Rugosímetro III de ARRB y caracterización de los materiales y productos utilizados.

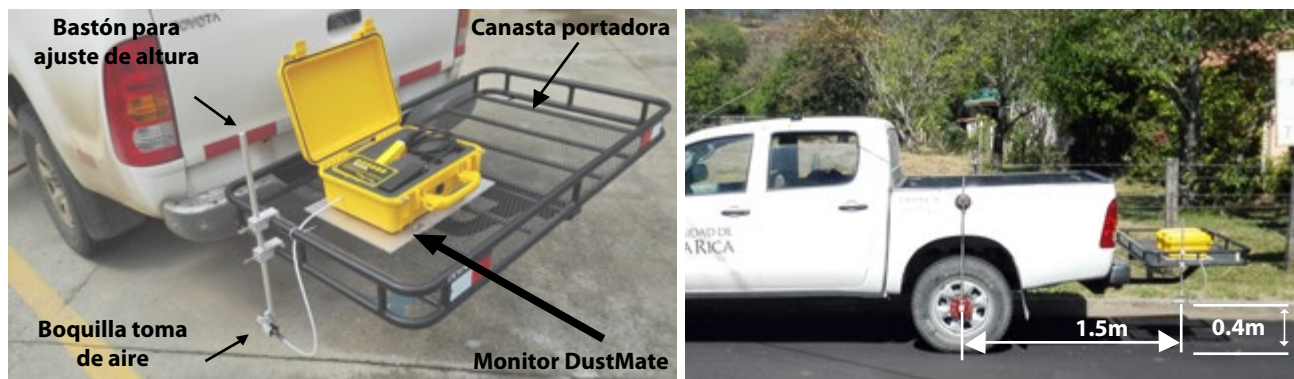


Figura 6. Monitor ambiental DUSTMATE, adaptado a vehículo para mediciones móviles de polvo en caminos.

En la Figura 7 se presentan los resultados obtenidos de acuerdo con las primeras pruebas de campo desarrolladas por el LanammeUCR con el DustMate. Al realizar una de las corridas iniciales de calibración del monitor ambiental, el camino tiene una longitud total de 1,03 km, compuesto por dos tipos de superficies de ruedo: los primeros 496 m cuentan con carpeta asfáltica (CA) y los restantes 533 m se tienen una capa granular de rodadura o grava (CGR) sin la aplicación de ningún producto supresor de polvo.

En el gráfico se observa como coincide casi perfectamente el cambio de la superficie de ruedo (identificado como una línea vertical color rojo) con el aumento en las concentraciones de partículas $PM_{2,5}$ y PM_{10} . Así mismo, se muestra una tendencia congruente entre las curvas de ambos tamaños de partícula de polvo. Los datos de concentración de polvo fueron ubicados espacialmente en el mapa de la derecha, donde se confirma el comportamiento, dado que un poco antes del estacionamiento 0+496, se observa como aumenta la concentración de polvo en el aire (color amarillo y rojo) respecto a la sección pavimentada (color verde). Los videos confirman visualmente la presencia de la nube de polvo en el tramo no pavimentado.

El fenómeno de *emisión de polvo fugitivo* puede ser observado en el gráfico por medio del desfase existente entre el incremento en las curvas de concentración de partículas y el cambio de superficie de ruedo (línea vertical color rojo). En el mapa, se observan como algunos puntos color rojo están presentes en la sección pavimentada, es decir, algunas de las partículas de polvo generadas en la sección de grava se han suspendido en el aire y han sido desplazadas hasta aproximadamente 20 metros antes del cambio de superficie. Esta condición podría ser afectada por variables como la velocidad y dirección del viento, velocidad y peso de los vehículos, humedad relativa y temperatura de la zona.



Figura 7. Resultados obtenidos en las primeras pruebas de campo del LanammeUCR.

El objetivo final de este proyecto es incentivar la aplicación de medidas de mitigación de polvo en caminos no pavimentados, de forma controlada, para optimizar la inversión de recursos y así beneficiar a las personas y al ambiente expuestos a esta problemática.

Este es un esfuerzo incipiente que busca establecer una metodología objetiva a nivel nacional que permita determinar la efectividad de diversos productos supresores o paliativos de polvo. Posteriormente, se planea incorporar los datos y experiencia obtenidos, en la normativa y especificaciones de aplicación en la fase de construcción de rutas nuevas o conservación de rutas no pavimentadas.

REFERENCIAS

- Barnes, D., & Connor, B. (2014). Managing Dust on Unpaved Roads and Airports. Alaska Department of Transportation & Public Facilities, Alaska University Transportation Center, Fairbanks, Ak.
- Beaulieu, L., Pierre, P., Juneau, S., & Lérege, G. (2011). Maintenance Guide for Unpaved Roads, A Selection Method for Dust Suppressants and Stabilizers. FP Innovations y Université LAVAL.
- Belliolo, J. P., & Thenoux, G. (2005). Metodología para la Medición de Polvo Generado por los Vehículos en Caminos No Pavimentados. Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción.
- Bolander, P., & Yamada, A. (1999). Dust Palliative Selection and Application Guide. United States Department of Agriculture, Forest Service Technology & Development Program . San Dimas, California: San Dimas Technology and Development Center.
- Center for Dirt and Gravel Road Studies. (2017). Real-time Dust Monitoring. The Pennsylvania State University.
- Jones, D., & Surdahl, R. (2014). A New Procedure for Selecting Chemical Treatments for Unpaved Roads. University of California Davis, University of California Pavement Research Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Davis, CA.
- Tingle, J. S., Newman, K. K., Larson, S. L., Weiss, C. A., & Rushing, J. F. (2007). Stabilization Mechanism of Nontraditional Additives. U.S. Army Engineer Research and Development Center. Washington, D.C.: Transportation Research Board Record: Journal of the National Academies.



LanammeUCR

LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

PITRA Programa de **Infraestructura del Transporte**

Ing. Luis Guillermo Loría-Salazar, Ph.D.

Coordinador General

Ing. Fabián Elizondo-Arrieta, MBA

Subcoordinador

UNIDADES

Unidad de Auditoría Técnica (UAT)

Ing. Wendy Sequeira-Rojas, M.Sc

Coordinadora

Unidad de Seguridad Vial y Transporte (USVT)

Ing. Diana Jiménez-Romero, M.Sc, MBA

Coordinadora

Unidad de Normativa y Actualización Técnica (UNAT)

Ing. Raquel Arriola-Guzmán

Coordinadora

Unidad de Materiales y Pavimentos (UMP)

Ing. José Pablo Aguiar-Moya, Ph.D.

Coordinador

Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN)

Ing. Roy Barrantes-Jiménez

Coordinador

Unidad de Gestión Municipal (UGM)

Lic. Carlos Campos-Cruz

Coordinador

CENTRO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

Diagramación, diseño y control de calidad: Katherine Zúñiga Villaplana / Óscar Rodríguez Quintana

Boletín técnico: CONTROL DE POLVO EN CAMINOS NO PAVIMENTADOS. / Marzo, 2018