



NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS: HUELLA ECOLÓGICA

Gerardo D. López^{(1) (2)} y **Marcela S. Ambrosini**⁽³⁾

(1) Nanotek S.A., Güemes 3878, Dpto 4 (S3002GHH) Santa Fe, Argentina Facultad Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional, Lavaise 610 (S3004EWB) Santa Fe, Argentina

(2) Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional del Litoral, Moreno 2557, (3000) Santa Fe, Argentina

Correo Electrónico (autor de contacto): gerardo@santafe-conicet.gob.ar

Palabras claves: estabilización, nanotecnología, huella ecológica, emisiones de CO₂, externalidades

RESUMEN

La huella ecológica es una medida estándar de la demanda humana sobre los ecosistemas. Una buena red de caminos resulta vital para el desarrollo social y económico. Sin embargo, la construcción de caminos rurales muchas veces es ineficiente en términos energéticos originando impactos ambientales negativos. Se requiere así un enfoque más sostenible sin resignar prestaciones técnicas. En este trabajo, se cuantifica la huella de carbono de la construcción de caminos rurales mediante técnicas convencionales en contraste con un enfoque innovador, basado en la estabilización nanoquímica de suelos naturales. Determinamos que la opción nanotecnológica permite disminuir en un orden de magnitud el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero. Para ello cuantificamos los beneficios medioambientales (movimiento de materiales, generación de desechos, minería de áridos, energía, emisiones gases relacionados con dichas actividades), de la innovación nanotecnológica respecto de las técnicas convencionales, probando su ventaja en una evaluación holística en el marco del desarrollo sostenible.

Keywords: nanotechnological soil stabilization, ecological footprint, CO₂ emissions, externalities

ABSTRACT

The ecological footprint is a standardized measure of human demand on Earth's ecosystems. A good network of roads is vital for economic and social development. But building roads in rural areas often can be costly and energy inefficient, hence impact adversely on the environment. Thus, a green approach is required to fulfill the needs on rural roads, while preserving the environment. In this work we quantified CO₂ emissions during rural roads construction by using conventional paving method as compared with an alternative sustainable approach, namely nanochemical soil stabilization. We found that the nanotechnological approach is able to reduce the carbon footprint by an order of magnitude, while providing similar technical performance. This was achieved by allocating values to environmental benefits for in situ nanochemical stabilization (movement of materials; waste generation; quarrying replacement materials; energy usage; emissions related to these activities). In this way we could prove this innovation environmental friendliness when assessed from a holistic and sustainable point of view.

1. INTRODUCCIÓN

En el 312 a.C. Apio Claudio comenzó la construcción del primer camino empedrado romano, que posteriormente sería conocido como *Via Appia*. Partía de Roma en dirección sudeste hacia Capua y se extendía por 211 kilómetros. Su finalidad inicial era militar: por caminos empedrados las legiones podían avanzar más rápido y en orden, y el transporte de pertrechos se efectuaba de modo más seguro. Por ese mismo camino circularon luego los mercaderes y Roma siguió construyendo caminos hasta convertirse en el más vasto imperio de la Antigüedad.

En América del Sur, antes de la llegada de los europeos, se había construido un sistema vial de 40.000 km, el *Qhapaq Ñan* o Camino del Inca, que comunicaba el sur de la actual Colombia con la región que actualmente ocupa la provincia de Mendoza en Argentina. En materia de obras viales no se hizo nada comparable hasta el siglo XIX, cuando los británicos iniciaron la construcción de sus ferrocarriles. Finalmente, en el siglo XX la red caminera más importante fue trazada sobre el mapa de los Estados Unidos, lo que pone en evidencia que una buena comunicación terrestre se encuentra muy ligada al desarrollo económico y político de cada país o región.

En la actualidad, obviamente, nadie cuestiona que los caminos constituyen una plataforma para las actividades económicas, tanto en zonas urbanas como rurales. La facilidad de accesos a zonas aisladas, entre otros beneficios, mejora la calidad de vida, incrementa el valor de las propiedades, promueve la generación de nuevos emprendimientos y facilita el traslado de la producción agropecuaria a los mercados. Sin embargo, aunque es de sentido común que los caminos resultan esenciales para el desarrollo de áreas rurales, tanto por razones técnicas (geología y topografía, por ejemplo) como económicas (dificultades de acceso, costos de traslados de materiales, etc.) conspiran contra la construcción y mantenimiento de redes viales rurales de buena prestación sostenible en el tiempo.

En Argentina, el conjunto de rutas nacionales (también denominada red vial troncal) tiene un total de 39.500 km, de los cuales alrededor de un 10% están constituidos por caminos de ripio (3.200 km) y de tierra (1.100 km). Las rutas provinciales (o red vial secundaria), por su parte, alcanzan a un total de 189.000 km, de los cuales poco más de 43.000 km están pavimentados o asfaltados, 37.000 tiene mejorados de diferentes clases y 109.000 km son de tierra. La red terciaria, administrada por municipalidades o comunas, aporta los 285.000 km restantes, de tierra prácticamente en su totalidad, para conformar una estructura vial total de alrededor de 500.000 km, de los cuales menos del 15% está pavimentado o asfaltado, el 10% está enripiado y el resto es de tierra [1,2,3].

Estas magnitudes fundamentan el requerimiento de nuevas técnicas competitivas y sustentables, menos costosas que los pavimentos y asfaltos convencionales, que permitan mejorar sustancialmente las prestaciones de las vías de comunicación de ripio y tierra, que constituyen el porcentaje absolutamente mayoritario de la estructura vial argentina.

Un aspecto importante a tener en cuenta al diseñar soluciones para la mejora de la red vial no pavimentada, es el impacto ambiental de las diferentes tecnologías aplicables. La huella ecológica es una medida estándar de la demanda humana sobre los ecosistemas en comparación con la capacidad del planeta para regenerar los recursos. Este enfoque permitió calcular en 2007 que los hábitos de consumo de los países más desarrollados requerían 1,5 planetas. Es decir que, con ese tren de vida, la humanidad gastaba los servicios ecológicos a una tasa de una vez y media la capacidad de regeneración de recursos para las generaciones futuras.

Los pavimentos convencionales imponen un costo ambiental significativo, que se incrementa al considerar que los caminos rurales suelen estar alejados y en malas condiciones de transitabilidad, lo cual aumenta las externalidades de una obra por la necesidad de transportar los materiales de construcción a muchos kilómetros de su extracción y/o manufactura.

Adicionalmente, según el tipo de suelo a trabajar, se pueden requerir cantidades muy significativas de áridos, agregados, asfalto y similares, los cuales en última instancia son extraídos de fuentes no renovables, con consumos energéticos altos y su consiguiente emisión de gases de efecto invernadero.

Por estas razones, es interesante analizar tecnologías más amigables con el ambiente, especialmente aquellas que permitan utilizar el suelo nativo de cada lugar y que al mismo tiempo resulten sencillas en su aplicación, tanto por la técnica a utilizar como por la maquinaria requerida. En el marco de un enfoque de desarrollo sustentable, se evalúa la estabilización nanoquímica de caminos naturales desde el punto de vista ecológico, complementado los enfoques técnicos y económicos desarrollados en otros trabajos [4,5].

2. METODOLOGÍA

Para evaluar la huella ecológica de las tecnologías alternativas de estabilización de caminos, se utiliza como parámetro la emisión de gases de efecto invernadero, en particular CO₂. Sobre esta base, se contrasta la técnica de pavimento convencional, que utiliza agregados, asfalto y concreto como materias primas principales contra la estabilización química, empleando un producto formulado sobre la base de una emulsión estable de nanohierro en una matriz polimérica, el cual se aplica sobre suelos nativos, con mínimo aporte de otras materias primas ex situ.

Ambas técnicas pueden dividirse en tres etapas: producción de las materias primas, transporte de las mismas hacia el sitio de trabajo y construcción propiamente dicha del camino (pavimentado o estabilizado según el caso), a lo cual se suma la eventual disposición final de desechos. Sobre esta base conceptual, la energía consumida y la consiguiente emisión de dióxido de carbono fueron calculadas de acuerdo con los siguientes criterios:

1. Producción de materias primas: incluye las cantidades totales de materiales necesarios para un caso base, tanto para la subrasante como para la cubierta de rodamiento, así como la maquinaria empleada y la eventual disposición de desechos
2. Transporte: incluye el consumo de combustible para el despacho de todos los materiales y de las máquinas viales hasta el sitio de trabajo, así como el traslado de material de descarte generado si es aplicable al caso.
3. Construcción: incluye en consumo de combustible de la maquinaria vial empleada para la pavimentación o el estabilizado, según el caso.

Para llevar a cabo los cálculos, se plantean las siguientes condiciones de obra:

1. Logística: la distancia entre el almacenamiento de los materiales de construcción (grava, arena, asfalto, cemento, etc.) y el sitio de obra es de 200 km. La distancia entre la obra y el almacén del distribuidor del estabilizador nanoquímico es de 1.000 km. La distancia entre la obra y el estacionamiento de la maquinaria vial utilizada es de 40 km.
2. Diseño estructural: el valor soporte relativo (CBR) de un suelo nativo depende de su composición, siendo por ejemplo del 5% para arcillas limosas (*silty clay*) y del 6% para terrenos arcillo-arenosos (*sandy clay*). Sobre el mismo se prepara una capa base de áridos triturados de 200 mm para el caso de pavimento y una base de suelo nativo estabilizado de 200 mm para la alternativa no convencional. El pavimento convencional se termina con una capa superficial de concreto de 50 mm y el suelo nanoestabilizado se somete a un riego superficial de impermeabilización con un estabilizante anti polvo dosificado con nanozinc para incrementar la resistencia ambiental, especialmente a la radiación UV.
3. Dimensiones: los cálculos se realizan para 1 km de camino con 4 m de ancho en ambos casos, totalizando una superficie de 4.000 m².
4. Consumos específicos: para estimar el combustible empleado en las distintas fases de obra, se adoptan los valores combinados de diversas fuentes [6] que se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Tarea, tipo de maquinaria y consumo específico de combustible

Tarea	Maquinaria	Rango de consumo de gasoil
Superficie	Extendedora de asfalto	0,019-0,053 l/m ²
	Apisonadora	0,015-0,030 l/m ²
	Niveladora neumática	0,018-0,036 l/m ²
	Compactadora vibratoria	0,031 l/m ²
Base	Rotovator	0,019-0,053 l/m ²
	Motoniveladora	0,019-0,053 l/m ²
	Camión cisterna	0,1114 l/m ²
Transporte	Camión	4,90-19,72 l/hora

5. Cargas ambientales: en los cálculos de emisiones para cada etapa de la construcción de caminos rurales se adoptan valores usualmente aceptados [7] para el impacto ambiental o huella de carbono de materiales empleados en la construcción vial, los cuales se resumen en la tabla 2.

Tabla 2. Cargas ambientales unitarias

Material	Unidad de medida	Emisiones de CO ₂ (kg)
Concreto asfáltico	tonelada	26,2
Agregado virgen	tonelada	0,95
Bitumen	tonelada	248
Gasoil	litro	2,69

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 3 presenta los consumos estimados de materiales para el caso base, aplicando la metodología convencional y la estabilización nanoquímica respectivamente. Por su parte, la tabla 4 muestra el impacto ambiental relativo de cada tecnología, el cual se obtuvo multiplicando los consumos específicos y cargas unitarias detallados en el apartado anterior por el uso de materiales para la construcción de 1 km de camino con una calzada de 4 metros de ancho.

Adoptando la clasificación por fases o etapas involucradas en la operación global de pavimentado o estabilizado de caminos, según corresponda, se observa que el impacto ambiental más significativo está concentrado en la etapa de transporte de materiales hasta el sitio de obra. El segundo ítem en impacto es la disposición final de materiales de desecho.

Estos resultados coinciden con los supuestos previos, ya que el pavimento tradicional requiere de una gran cantidad de material *ex situ* que reemplaza al suelo existente, el que debe ser retirado. Consecuentemente la logística de estos dos tipos de transporte son los que suman la mayor demanda en gastos de combustible y sus emisiones correspondientes. La estabilización nanoquímica requiere mucha menor cantidad de material *ex situ*: prácticamente solo el estabilizante, que si bien en nuestro caso base se manufactura muy lejos del sitio de construcción, el tonelaje a transportar es significativamente menor al de los áridos, el cemento, etc. Adicionalmente, al trabajar sobre el suelo nativo, el cual permanece en su sitio, no resulta necesario el transporte de desechos al finalizar la obra.

Teniendo en cuenta el alto impacto de las etapas de transporte de materias primas y maquinarias hasta la obra, se puede estimar la incidencia cuantitativa de reducir a la mitad las distancias establecidas como hipótesis en el apartado de metodología y recalcular las cargas ambientales con esta mayor cercanía. Este segundo caso (la misma obra, pero a menor distancia de la producción o almacenamiento de los materiales) está reflejado en la tabla 5.

Tabla 3. Consumos de materiales para el caso base (toneladas o litros s/c)

Etapa de obra	Aplicación	Método convencional	Estabilización nanoquímica
Producción de materias primas	Superficie: bitumen	29,7 t	2,5 t
	Superficie: agregados	510,8 t	0
	Base: agregados	2.208,0 t	46,0 t
	Base: nanoestabilizante	0	49,0 t
Transporte	Materiales	45.168 l	4.026 l
	Equipos	184 l	105 l
Construcción del camino	Consumo de combustible	1.063 l	587 l
Disposición de desechos	Consumo de combustible	36.284 l	0

Tabla 4. Impacto ambiental medido como emisión de CO₂ (toneladas). Caso base

Etapa de obra	Método convencional	Estabilización nanoquímica
Producción de materias primas	16,3 t	0,7 t
Transporte de materiales y maquinaria	122 t	11,2 t
Construcción del camino	2,9 t	1,6 t
Disposición de desechos	97,6 t	0
TOTALES	238,8 t	13,5 t

Tabla 5. Impacto ambiental medido como emisión de CO₂ (toneladas). Caso con distancias a obra reducidas.

Etapa de obra	Método convencional	Estabilización nanoquímica
Producción de materias primas	16,3 t	0,7 t
Transporte de materiales y maquinaria	61 t	5,6 t
Construcción del camino	2,9 t	1,6 t
Disposición de desechos	48,8 t	0
TOTALES	129 t	7,9 t

4. CONCLUSIONES

La huella ecológica de la construcción de caminos rurales mediante la técnica convencional es de al menos un orden de magnitud mayor que el impacto ambiental de la estabilización nanoquímica. En el caso base utilizado como ejemplo, la relación en términos de emisiones de gases de efecto invernadero es de casi 18 a 1.

Como se ha mostrado, el mayor impacto está determinado por el transporte de materiales y desechos, por lo que las distancias entre la obra y el almacenamiento de materias primas y maquinarias juegan un rol muy importante en esta relación de impactos. Sin embargo, si reducimos a la mitad las distancias establecidas como hipótesis en el apartado de metodología y recalculamos las cargas ambientales con esta mayor cercanía, encontramos que la relación de impactos no varía demasiado, ya que resulta de la tabla 5 un valor de algo más de 16 a 1.

En resumen, podemos concluir que la alternativa de estabilización nanoquímica, que se ha analizado en otros trabajos desde los puntos de vista del desempeño técnico y la competitividad económica, resulta además en la opción más adecuada ambientalmente, lo que la posiciona muy favorablemente en el marco del desarrollo sostenible, usualmente expresada en términos técnicos como la preservación de recursos para las generaciones futuras.

REFERENCIAS

1. http://www.vialidad.gov.ar/informe_gestion/INFORME%20GESTION%202003-2006.pdf
2. <http://www.e-asfalto.com/redvialarg/redvial.htm>
3. http://www.aacarreteras.org.ar/publicaciones/publicaciones_estadisticas/3
4. A. M. Leanza, A. Firpo, G. D. López, H. Tobías, "Nanotecnología: su aporte al futuro vial"; Anales XVI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito; ISBN 978-987-28682-1-5; 2012

5. G. D. López y M. S. Ambrosini, “Nanotecnología aplicada a la estabilización de suelos: factibilidad económica”; Anales SAM – CONAMET, 2013; aceptado para presentación
6. Atsushi Kawakami, Hiroyuki Nitta, Takashi Kanou and Kazuyuki Kubo, “Study on CO₂ Emissions of Pavement Recycling Methods”, the 13th Conference of the Road Engineering Association of Asia and Australasia, September 2009.
7. Hiroyuki Nitta, Itaru Nishizaki, “LCA Evaluation of Recycle Pavement Using Scrap Tire and Waste Plastic”, Journal of Pavement Engineering, Japan Society of Civil Engineers, (2008), p 79-86.