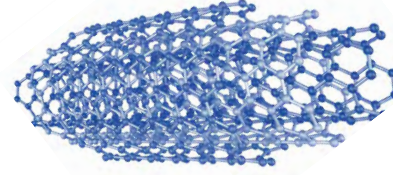




## Sí, chiquititos, pero con mucho fuerza: Nanoaditivos para estabilizar suelos

Jessica E. Martínez-Vázquez  
Fabián Fernández-Luqueño



Centro de Investigación de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV Unidad Saltillo); Ramos Arizpe, Coahuila de Zaragoza, México.

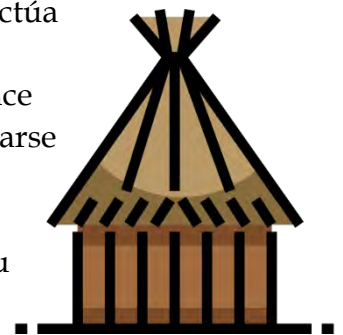
\*Autor para correspondencia: elizabeth.martinez@cinvestav.mx

Los nanoaditivos son materiales sintéticos o de origen natural de tamaño nanométrico, utilizados para estabilizar suelos. Un nanómetro es la millonésima parte de un metro; para comprender este concepto, basta saber que un cabello humano tiene 80,000 nanómetros de grosor, lo que nos da una idea de lo diminutas que son las partículas empleadas para estabilizar el suelo y superar las condiciones inadecuadas que limitan su uso en la construcción. El suelo es esencial para el soporte de edificaciones y de la vida que se desarrolla en ellas, pero a menudo requiere estabilización para garantizar la durabilidad de las construcciones.

### Introducción

El suelo cumple funciones como reservorio de nutrientes y agua, de los cuales se alimentan los microorganismos, las plantas y los animales. Asimismo, actúa como soporte físico de los organismos vivos. Gracias a su función como soporte estructural se han establecido asentamientos humanos desde hace miles de años. Sin embargo, es común que los suelos requieran estabilizarse para favorecer larga vida útil a las estructuras ingenieriles. La estabilización se puede realizar por métodos físicos, químicos, mecánicos, biológicos o la combinación de estos, para que incremente su capacidad de carga y resistencia a la tracción.

Las propiedades geotécnicas de los suelos son muy importantes para el establecimiento de obras civiles y arquitectónicas. Estas propiedades se refieren a la fuerza y la resistencia del suelo como estructura. Se requieren suelos que soporten el peso de rascacielos como el de la Torre Sears en Chicago, E.U.A., que pesa 200 mil toneladas, tiene 110 pisos y mide 452 metros de altura. También se requiere que los suelos resistan la deformación cuando pasen los camiones de carga por las carreteras.





Las ciudades crecen a una velocidad impresionante, al alcanzar hasta un índice de crecimiento de 9 % anual (Delhi, India, en 2023), debido al aumento de la población. Esto representa un reto tecnológico y social, ya que a la par del aumento de la población, se necesitan más servicios e infraestructura de alta calidad.

*Las propiedades geotécnicas de los suelos son muy importantes para el establecimiento de obras civiles y arquitectónicas*

Recientemente, es necesario construir edificios más altos para vivir, más plazas comerciales, más carreteras y un sinnúmero de edificaciones urbanas que cubran la demanda de la población. Estas construcciones se asientan sobre terrenos que alguna vez fueron arroyos o estanques. Incluso, algunas obras ingenieriles como las autopistas atraviesan cerros y montañas, a pesar de que generalmente, el suelo cuenta con pocas características favorable para la construcción.

Los hongos que dañan a los cultivos son comúnmente controlados mediante la aplicación de fungicidas químicos, así como prácticas culturales tradicionales, pero cada vez se están adoptando más enfoques biológicos que son efectivos y respetuosos con el ambiente, como lo es el uso de hongos amigos, dentro de los cuales destacan los del género *Trichoderma*.

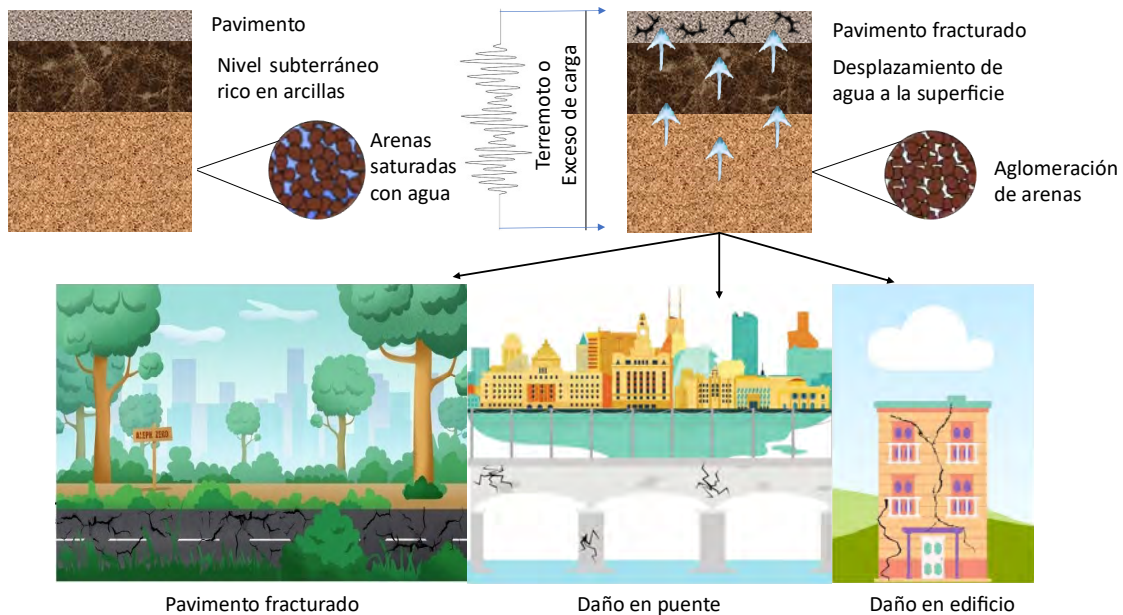
## Desarrollo

Demasiada carga y presión para un suelo que no es naturalmente compacto, causa inestabilidad. Los suelos tienen una composición típica aproximada de 20-30 % agua, 20-30 % aire y 50 % material sólido (mineral y materia orgánica), algo similar a una esponja. Cuando el peso de los edificios alcanza miles de toneladas, se construyen en zonas sísmicas y sucede un sismo, se presenta un fenómeno llamado licuefacción, el cual pudiera ser bastante destructivo.

La licuefacción (Figura 1) ocurre cuando la resistencia y la rigidez del suelo se pierden debido a la influencia de cargas o tensiones rápidas no previstas. Esto provoca que el agua de las capas subterráneas salga hacia la superficie y el suelo se fracture en varias direcciones, causando daños en la estructura de puentes, edificios o carreteras.



Hay sitios en los que se pretende construir, pero el suelo no tiene las propiedades físicas, químicas o mecánicas adecuadas, por lo que es necesario estabilizar el suelo por diversos métodos. La estabilización mecánica utiliza maquinaria para mezclar y compactar agregados o suelos diferentes en el terreno. La estabilización biológica recurre a la cubierta vegetal como el pasto para evitar la erosión, aunque se necesitan otras técnicas de inicio para propiciar el crecimiento y desarrollo de las plantas.



**Figura 1.** Licuefacción del suelo y daño estructural en construcciones.

Por último, en la estabilización química se usan mezclas llamadas “lechadas químicas”, también llamadas poliepóxidos o reinas epoxy, y también rellenos como cal y cemento, estos últimos son los más comunes. Estos materiales son caros, volátiles y causan perturbaciones ambientales importantes. Una de las perturbaciones ambientales más preocupantes es la impermeabilización del suelo, esto significa la pérdida de la capacidad de infiltración y retención de agua, lo que en consecuencia provoca problemas de erosión, inundaciones y contaminación de las aguas subterráneas y superficiales. Además, los disolventes que se usan son inflamables y poseen un alto riesgo de explosión.



El cemento representa el 90 % de las emisiones contaminantes de CO<sub>2</sub> en los procesos industriales, por lo que causa un gran impacto ambiental. Gran parte de las emisiones de CO<sub>2</sub> provienen de un proceso químico conocido como calcinación. Este proceso ocurre cuando la piedra caliza se somete a altas temperaturas en los hornos, lo que provoca su descomposición en CO<sub>2</sub> y óxido de calcio.

Otra fuente importante de CO<sub>2</sub> es la quema de combustibles en los hornos empleados en la producción de cemento. Generalmente se calientan con gas natural o carbón, lo que contribuye a las emisiones de dióxido de carbono además de las generadas por la calcinación. Y resulta que cada año se producen 4100 millones de toneladas de cemento.



¿Te has preguntado cuánta cantidad de cemento no vemos debajo de nuestros pies, utilizado para ayudar a soportar las construcciones? ¿Puedes imaginarlo? Bueno, para un edificio de 100 pisos con cimentación profunda utilizando pilotes, se podrían necesitar aproximadamente 4,130 toneladas de cemento, dependiendo de las especificaciones del diseño y las condiciones del suelo.

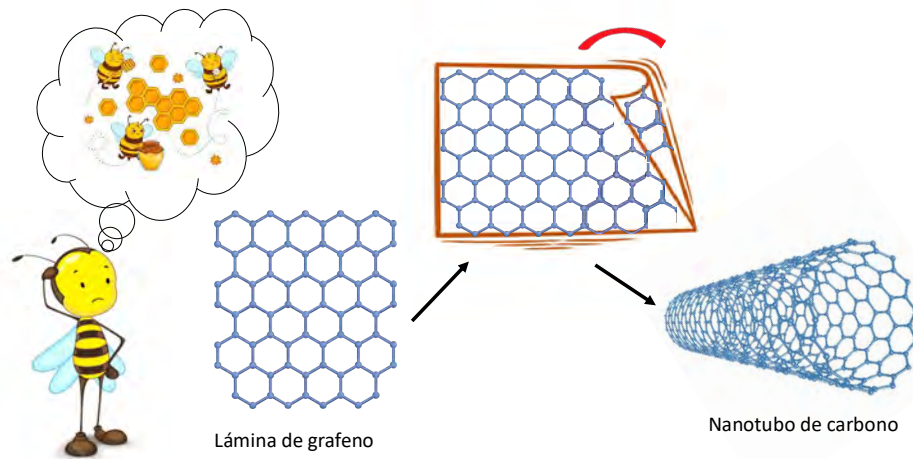
Cuando se emplean mezclas químicas para estabilizar el suelo, estas desprenden vapores de tipo ácido, por ejemplo, de ácido sulfúrico; o de tipo alcalino, como amoníaco; además, si el manejo es inadecuado estos productos pueden

ser tóxicos para la salud humana y el medioambiente.

Para superar estos problemas generados por el uso de mezclas químicas la nanotecnología contribuye a desarrollar materiales que se utilizan para estabilizar el suelo y evitar los daños estructurales en las edificaciones.

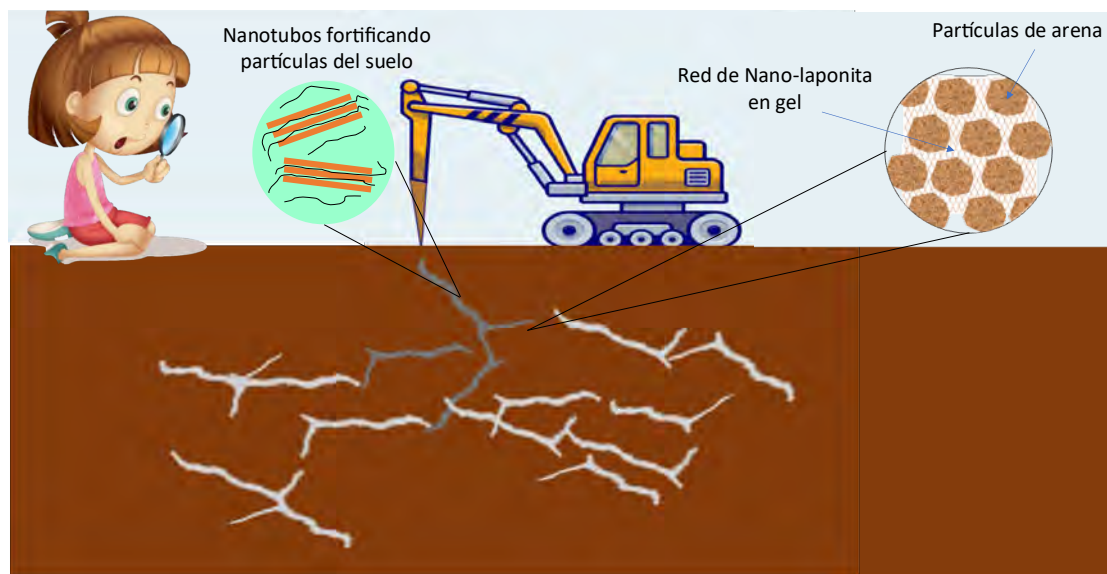
Un nanomaterial debe medir menos de 100 nanómetros en al menos una de sus dimensiones. Se han añadido al suelo nanomateriales a base de carbono, como los nanotubos de carbono; y con base de silicio como laponitas y bentonitas.

Los nanotubos de carbono, están constituidos por grafeno, que es el material más liviano y fuerte del mundo. Las láminas de grafeno se componen de una red hexagonal en forma de panal de abeja; al enrollarlas se forma el nanotubo que puede ser muy largo, pero su diámetro es nanométrico (Fig. 2).



**Figura 2.** Estructura molecular de grafeno y de nanotubo de carbono.

El nanotubo forma una fibra 100 veces más fuerte que el acero. Al ser un cilindro muy delgado, pero también muy largo, puede separar las láminas de las arcillas del suelo para darle más resistencia (Figura 3), a diferencia de las moléculas de cemento que por su tamaño no pueden penetrar en los pequeñísimos espacios de las arcillas.



**Figura 3.** Interacciones entre las partículas del suelo y nanomateriales en el proceso de inyección para estabilización.



En el caso de las laponitas y bentonitas, son arcillas que se encuentran de manera natural en el suelo. Sin embargo, la cantidad de estas y otras arcillas varía entre los diferentes tipos de suelo según la región, y en algunos casos no se encuentran en un porcentaje suficiente para darle al suelo una compactación natural. Las laponitas y las bentonitas se utilizan de acuerdo con el objetivo de la estabilización. Si se requiere reducir la permeabilidad, las bentonitas son muy efectivas, pero deben utilizarse con precaución en suelos que ya tienen baja permeabilidad. Por otro lado, si el objetivo es mejorar la estabilidad estructural, las laponitas son útiles en suelos donde se requiere mayor cohesión sin incrementar excesivamente la plasticidad.

La forma de las laponitas es parecida a un disco constituido por sílice y se adicionan como estabilizadores del suelo en una suspensión de gel suave que cambia a una gelatina. En la gelatina se forman cadenas que actúan como una red tridimensional (Figura 3) uniendo a las partículas más grandes como las arenas del suelo. Esto incrementa la resistencia a la compresión, lo que genera un suelo estable.

Los nanomateriales se agregan al suelo en cantidades muy pequeñas para incrementar su fuerza y rigidez. Se han agregado nanotubos desde 0.001 a 0.01 % en relación al volumen del suelo y laponitas o bentonitas desde 3 %.

Añadir entre 0.001 % y 3 % de nanomateriales sintéticos o de origen natural incrementa la resistencia del suelo como matriz. Este porcentaje es significativamente menor que el utilizado para estabilizar el suelo con cemento (6 %). Por ejemplo, se han preparado suspensiones de nanotubos al 0.01 % como estabilizador en mezclas de suelo-cemento, logrando aumentar la resistencia del suelo hasta en un 360 % en comparación con un suelo naturalmente compacto.

Esto es importante ya que, en algunas obras de ingeniería, como en los parques eólicos, se instalan turbinas que llegan a pesar 315 toneladas, lo que implica construir cimentaciones de hasta 9 metros de profundidad. Esto significa miles de toneladas de cemento y varilla para reforzar el suelo donde se establecen. Por consiguiente, los nanomateriales podrían mejorar la resistencia del suelo y disminuir la cantidad de cemento que se usa actualmente.

La relación entre el precio y la cantidad de nanomateriales que se pueden aplicar como estabilizadores de suelo es alta, ya que son materiales de nueva generación; sin embargo, los beneficios a largo plazo pueden reducir este aspecto.



La relación entre el precio y la cantidad de nanomateriales que se pueden aplicar como estabilizadores de suelo es alta, ya que son materiales de nueva generación; sin embargo, los beneficios a largo plazo pueden reducir este aspecto. La relación costo/beneficio entre los nanomateriales y la lechada química es media, porque se utilizan hasta tres sustancias diferentes en la lechada para poder estabilizar la mezcla. Además, cada año se incrementa la fabricación de nanomateriales, lo que eventualmente abarataría su costo.

Si bien los nanomateriales tienen diversas aplicaciones potenciales, los efectos tóxicos se han evaluado en diversas condiciones, pero aún se requiere información adicional. En el caso de los nanotubos, se ha considerado su viabilidad debido a que datos preliminares sugieren que estos, tienen poco o ningún efecto sobre los microorganismos del suelo, mientras que los nanomateriales de sílice son naturalmente inertes. Sin embargo, es importante comprender totalmente los efectos de los nanomateriales en el ambiente para realizar una evaluación ecológica profunda. Ya que el uso para la estabilización de suelos en la construcción a nivel industrial es una tecnología emergente y prometedora, pero aún no se ha generalizado completamente.

Las aplicaciones a gran escala de esta tecnología nanométrica dependerán en gran medida de las evaluaciones que involucren la mayoría de las interacciones con el entorno. Adicionalmente, también se requiere capacitación a los trabajadores para que puedan emplear técnicas adecuadas y replicar los ensayos que se han desarrollado en laboratorios.





## Conclusiones

La nanotecnología aplicada a la arquitectura e ingeniería civil avanza al desarrollar nanomateriales que brindan soluciones para estabilizar suelos y expandir asentamientos urbanos seguros y duraderos. Las innovaciones tecnológicas y la formación de recursos humanos de alto nivel permitirán reemplazar materiales convencionales con fuerte impacto ambiental por otros de última generación; es decir, el uso de la nanotecnología en la ingeniería civil se vuelve una realidad aplicable a gran escala, sin ocasionar daños que atenten contra la sostenibilidad de suelo y la salud humana.

## Literatura recomendada



Morantes, F. R., Ortiz, O. J. R., & Cárdenas, J. C. R. (2020). Estado del arte del uso de nano materiales en suelos para construcción de carreteras. *Respuestas*, 25(2), 213-223.

Anburuvel, A. (2024). La ingeniería detrás de la estabilización de suelos con aditivos: una revisión del estado del arte. *Ingeniería geotécnica y geológica*, 42(1), 1-42.

## Semblanzas de autores



SCIENCE



**Jessica E. Martínez-Vázquez:** Estudiante de Doctorado en Ciencias en Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Saltillo. Ramos Arizpe, Coahuila de Zaragoza.

**Fabian Fernández-Luqueño:** Investigador del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Saltillo. Adscrito a los Programas de Maestría en Ciencias y Doctorado en Ciencias en Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía, Doctorado en Ciencias en Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad y Doctorado en Ciencias en Nanociencias y Nanotecnología.