

## Alternativas para contrarrestar los efectos del sellado antropogénico del suelo Alternatives to counteract the effects of anthropogenic soil sealing

Jesús Alberto Martínez-Ortiz<sup>a</sup> , Carlos Alexander Lucho-Constantino<sup>a</sup> , Liliana Gpe. Lizárraga-Mendiola<sup>b</sup> , Carlos Alfredo Bigurra-Alzati<sup>b</sup> , Rosa Icela Beltrán-Hernández<sup>a\*</sup> 

<sup>a</sup> Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo / Carr. Pachuca-Tulancingo km. 4.5, Col Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México

<sup>b</sup> Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

### Resumen

El sellado antropogénico del suelo es un proceso que ocurre cuando un suelo natural se cubre con estructuras o construcciones que impermeabilizan la superficie, con lo cual se impide que el suelo realice el resto de sus funciones. La finalidad de este artículo es describir la aplicación de tecnologías y materiales funcionales, respetuosos con el medio ambiente, que contrarresten el impacto negativo generado por el sellado del suelo, recuperando así parcialmente algunas de las funciones naturales del mismo.

#### Palabras Clave:

Sellado del suelo, urbanización, pavimentos permeables, pavimentos reflectivos, tecnologías de infiltración.

### Abstract

Anthropogenic soil sealing is a process that occurs when the ground is covered by structures or constructions that waterproof the surface, preventing the soil from performing the rest of its functions. The purpose of this article is to describe the application of eco-friendly technologies and functional materials that counteract the negative impact generated by the sealing of the soil, thus partially recovering some of the natural soil functions.

#### Keywords:

Soil sealing, housing development, permeable pavements, reflective pavements, infiltration technologies.

### 1. Introducción

Con el avance del desarrollo urbano, la proporción de suelo cubierto por superficies impermeables ha aumentado progresivamente (Liu *et al.*, 2018). Esto ocurre debido a que la urbanización implica la construcción de áreas para vivienda, comercio, industria, recreo, entre otras. La FAO (2016) ha estimado que a nivel mundial cada minuto se sellan 17 ha de suelo. México no está exento de esta tendencia: López y Plata (2009) encontraron que durante la década 1990 – 2000, la expansión urbana en la Zona Metropolitana del Valle de México aumentó 202 km<sup>2</sup>; en tanto que en el estado de Hidalgo Cano *et al.* (2017) reportaron que en el periodo 2000 – 2014 la zona urbana creció 7,230 ha. Este crecimiento acelerado conlleva, por un lado, que se construya sobre superficies que anteriormente eran suelos naturales, y por otro, que se cubran

esas superficies con capas impermeables de asfalto o concreto, esto último se conoce con el nombre de *sellado del suelo* (Figura 1).



Figura 1: Sellado del suelo con una capa de asfalto.

\*Autor para la correspondencia: icelabeltran@gmail.com

Correo electrónico: alberto.martinez09@hotmail.es (Jesús Alberto Martínez-Ortiz), luchouaeh@gmail.com (Carlos Alexander Lucho-Constantino), lililga.lm@gmail.com (Liliana Gpe. Lizárraga-Mendiola), carlos.a.bigurra.alzati@gmail.com (Carlos Alfredo Bigurra-Alzati), icelabeltran@gmail.com (Rosa Icela Beltrán-Hernández)

Si bien es cierto que la población crece y requiere de toda la infraestructura urbana para asentarse, también es cierto que la urbanización no ha aumentado en proporción al crecimiento poblacional. Al fenómeno que ocurre cuando se sellan grandes extensiones de suelo debido a cambios en el estilo de vida o a intereses económicos se le llama *ocupación desacoplada del suelo*. La construcción de desarrollos residenciales con viviendas y espacios sociales y deportivos más amplios, obedecen a un cambio en el estilo de vida de una parte de la población. Por otro lado, cuando las empresas deciden construir en terrenos alejados de las ciudades, porque es más barato que hacerlo dentro de ellas, es un claro ejemplo de que la ocupación del suelo se debe a intereses económicos. En los dos casos anteriores, la población no necesariamente creció; más bien cambió su residencia del interior a las afueras de la ciudad. Aunado a las situaciones anteriores están el sobredimensionamiento de zonas comerciales y la dispersión de zonas industriales. Como resultado de esta mala planeación, no es raro observar hasta el 50% de viviendas no ocupadas o naves comerciales e industriales abandonadas; para las cuales se construyó la infraestructura de apoyo necesaria como vialidades de acceso o redes de servicios, y cuyo mantenimiento representa un costo económico para todos los ciudadanos, y desde luego un costo ambiental no visible para la mayoría: la pérdida de suelo natural funcional (CE, 2013).

Es innegable que el desarrollo de las ciudades requiere de la construcción de nuevas infraestructuras, sin embargo, no siempre tiene que construirse sobre suelos naturales o bien no es imperativo sellar toda la superficie, como se ha venido haciendo con las graves consecuencias que esto implica. Por ello, es urgente que la población y los gobiernos conozcan los servicios ecosistémicos que nos proporciona el suelo, cómo impactan todas aquellas actividades que llevan a su sellado y, cómo pueden contrarrestarse estos impactos.

## 2. Servicios ecosistémicos del suelo

El suelo es uno de los elementos del medio físico natural con mayores dinámicas asociadas, sobre todo, en cuanto a la prestación de servicios ecosistémicos al territorio se refiere. A estos servicios también se les llama funciones del suelo y son las siguientes: a) produce biomasa, útil como fuente de alimento, fibras, madera, principios activos y energía; b) regula el clima gracias al agua que retiene y al dióxido de carbono que absorbe; c) filtra el agua, absorbe, retiene y transforma contaminantes para proteger las aguas subterráneas y la cadena trófica; d) es el hábitat de muchos seres vivos y también es una reserva de recursos genéticos; e) es un almacén de herencia cultural al contener restos arqueológicos y paleontológicos; f) es una fuente de materias primas como arcilla, arena, grava y otros minerales; g) proporciona soporte a estructuras como edificaciones, vías de transporte, espacios para recreo y para la disposición de residuos (García *et al.*, 2014; CCE, 2002). Después de conocer todos los servicios que el suelo proporciona en los ecosistemas, es claro que su correcto funcionamiento es indispensable para que se lleven a cabo los ciclos biogeoquímicos que hacen posible la vida en la Tierra.

Dependiendo del uso y la calidad que tenga un determinado suelo, podrá proveer todos o solo algunos de sus servicios ecosistémicos. Cuando se sella un suelo prácticamente se limita su actuación a proporcionar soporte a las estructuras que

se construyen sobre él, y la pérdida del resto de los servicios ecosistémicos se reflejará en una medida proporcional al área de suelo sellado (CCE, 2002).

## 3. El sellado del suelo y sus consecuencias

Como se ha mencionado, la tendencia hacia la urbanización y el cambio de uso de suelo con fines de desarrollo económico tienen un efecto inmediato en los procesos y funciones que competen al suelo naturalmente, así como en los insumos que de él se demandan. En 2012 la Comisión Europea definió al sellado del suelo como la acción de cubrir de forma permanente una superficie de terreno con material impermeable artificial (CE, 2012). Además, la Agencia Europea de Medio Ambiente ha considerado al sellado como una de las principales causas de degradación del suelo (Banco Mundial, 2016).

El sellado de suelo provoca cambios significativos en el estado ambiental y en el balance hídrico de las cuencas fluviales, lo que afecta a los ecosistemas, particularmente en aquellos aspectos relacionados con el agua: disminuye la capacidad de infiltración con la consecuente reducción de recarga de los acuíferos, el caudal máximo de ríos y corrientes de agua superficiales se reduce durante la temporada de estiaje y crece desmesuradamente durante las lluvias. En las ciudades, toda el agua de lluvia que no puede infiltrarse en el suelo escurre sobre el asfalto buscando un cauce, a esto se le conoce como escorrentía urbana. Cuando cae una lluvia abundante, la gran cantidad de agua colapsa rápidamente los sistemas de alcantarillado y provoca inundaciones. Además, esa agua de lluvia estancada en la ciudad, no será filtrada por el suelo y llegará a las aguas superficiales y a los mantos freáticos con una carga mayor de contaminantes (CE, 2013).

El reemplazo de una cubierta de suelo natural, que puede absorber hasta 300 litros de agua por metro cúbico, por una cubierta impermeable que absorbe muy poca agua, también tiene un impacto directo en el clima local, ya que un suelo húmedo absorbe y libera calor de manera gradual, a diferencia de los pavimentos convencionales que lo hacen de manera rápida (CE, 2013). Como resultado, hay un incremento de temperatura en las zonas urbanas, fenómeno que se conoce como *isla de calor urbana*. Esto ocurre debido a que se construye principalmente con materiales de baja reflectancia solar y alta capacidad calorífica, lo que significa que absorben gran cantidad de la radiación solar durante el día e irradian ese calor con el consecuente aumento de temperatura (Alchapar y Correa, 2015). Las consecuencias de este fenómeno son principalmente la incomodidad térmica para los habitantes y el aumento en el consumo de energía eléctrica para refrescar los espacios, en casos extremos podría causar la muerte de los grupos más vulnerables, como ocurrió en Francia en el año 2003 (Trichês, 2017).

También se atribuye al sellado de los suelos la fragmentación de hábitats y pérdida de las pautas migratorias de multitud de especies. Se reduce la distribución de las poblaciones de animales y plantas, y se generan importantes alteraciones en las comunidades bióticas que viven directa e indirectamente del suelo. Asimismo, la cantidad y diversidad microbiana se ve seriamente afectada por el cambio de las condiciones edáficas y por la introducción de contaminantes que conlleva el sellado del suelo (Hu *et al.*, 2018; Piotrowska-

Długosz y Charzyński, 2015). La proliferación de espacios artificiales, sobre todo en zonas tradicionalmente ocupadas por suelos fértiles tiene a su vez una incidencia directa sobre la seguridad y la calidad agroalimentaria de los territorios (CE, 2012; García *et al.*, 2014).

La contaminación ambiental aumenta debido a que un suelo sellado ya no es capaz de absorber el CO<sub>2</sub> y otros contaminantes, lo que repercute en la calidad del aire. Además, sobre el suelo sellado se realizan actividades que producen contaminantes atmosféricos, líquidos y sólidos, además de contaminación por ruido y por exceso de luces artificiales. León-Borges y Lizardi-Jiménez (2017) comprobaron que el asfalto, por su composición, es una fuente de contaminación por hidrocarburos aromáticos policíclicos. Estos hidrocarburos contaminan el suelo cubierto con asfalto y también el agua subterránea que hay debajo de ellos. Como puede apreciarse, el conjunto de los factores anteriores demerita la calidad ambiental de los espacios urbanos (CCE, 2002).

#### 4. Alternativas para contrarrestar los efectos del sellado del suelo

Dada la importancia que representa el buen funcionamiento del suelo, ha sido necesario desarrollar alternativas para contrarrestar los efectos negativos que acarrea su sellado, entre las que están todas aquellas que ofrece la infraestructura verde.

Mientras que la infraestructura urbana convencional, llamada también infraestructura gris, solo busca proporcionar todos los elementos y servicios para que la población urbana se asiente y funcione; la infraestructura verde pretende desarrollar entornos urbanos en los que se conserven las funciones naturales del ecosistema en la medida de lo posible. Lo anterior se logra interconectando espacios verdes y fomentando el cuidado de los recursos naturales, la apreciación del paisaje, la movilidad no motorizada y la convivencia social (Abellán, 2015). Es claro que la infraestructura verde desempeña diversas funciones y beneficios en un mismo ámbito territorial. Entre estas funciones se encuentran las de tipo ambiental: conservación de la biodiversidad o la adaptación al cambio climático; las de corte social: construcción de espacios verdes, obras de captación pluvial y áreas de esparcimiento; y las de índole económico: creación de empleo y aumento del precio de los bienes inmuebles (Abellán, 2015).

Algunos ejemplos de infraestructura verde son ciertos tipos de pavimentos (como los permeables, fotocatalíticos, articulados, reductores de ruido, entre otros), corredores o cinturones verdes, parques y jardines públicos, y azoteas y muros verdes. En un contexto urbano, este tipo de infraestructura ofrece beneficios como: mejora de la salud y el bienestar de la población, proporciona sombra, regulación térmica, un aire más puro, infiltración en superficies que han sido impermeabilizadas y un agua de mejor calidad.

En el siglo XX se realizaron extensos estudios sobre los materiales poliméricos y, en consecuencia, se observó un incremento significativo en la vida útil y estabilidad del pavimento. Esto se logró con el uso de diversos materiales modificados y cemento de alto rendimiento (Jiang *et al.*, 2018). Posteriormente, los esfuerzos se han centrado en desarrollar pavimentos que minimicen algunos de los efectos ocasionados

por el sellado del suelo. La composición de los pavimentos es un factor de suma importancia para garantizar que no sean una fuente adicional de contaminación, como ocurre con el asfalto.

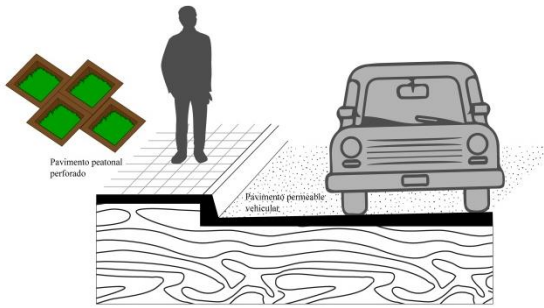
Anteriormente el pavimento de concreto ordinario brindaba comodidad a las personas, lo que mejoró enormemente el nivel de vida y la eficiencia de producción de las personas (Liu *et al.*, 2018). Sin embargo, hoy en día se espera que este tipo de materiales de construcción proporcionen otros servicios, como favorecer la infiltración del agua de lluvia, reducir el ruido de los neumáticos y purificar los gases de efecto invernadero, además de sus funciones básicas (es decir, soporte de carga, uniformidad, durabilidad y comodidad) (Jiang *et al.*, 2018).

En los siguientes párrafos se comentan algunas alternativas de infraestructura verde que se han empleado o que se están desarrollando para contrarrestar el sellado del suelo.

##### 4.1. Pavimento permeable o poroso

Un pavimento es una estructura de comunicación terrestre, formada por una o más capas de material que hace posible la circulación de vehículos de forma segura y cómoda a un costo óptimo. Los pavimentos convencionales se clasifican en rígidos, flexibles y articulados, de los cuales, los dos últimos son los que permiten en alguna medida la infiltración del agua (Montejo, 2002). En el caso de los pavimentos flexibles es necesario implementar un sistema de drenaje para que la infiltración ocurra rápidamente sin dañarlos. Con los pavimentos articulados, la infiltración aumenta cuando son perforados, el inconveniente es que no son recomendables para todos los usos (Reyes *et al.*, 2011).

En comparación con el pavimento ordinario, la preparación de pavimento permeable reduce o evita el uso de agregado fino y maximiza el de agregados gruesos (Siriwardene *et al.*, 2007). La estructura porosa resultante le confiere al pavimento una buena permeabilidad, por lo que la lluvia puede infiltrarse rápidamente en el suelo para recargar los acuíferos (Figura 2). Los valores de porosidad del pavimento permeable generalmente varían entre 15% y 25%; esta porosidad se logra aumentando la proporción de agregados gruesos con un tamaño nominal mayor a 4.75 mm y reduciendo la proporción de agregados de 2.36 mm a 4.75 mm (Jiang *et al.*, 2018). Los coeficientes de permeabilidad en su mayoría oscilan entre 2 a 6 mm/s, pero algunos incluso alcanzan los 10 mm/s (Tan *et al.*, 2003). Los poros en el pavimento permeable pueden ser bloqueados por partículas suspendidas, como sedimentos y escombros en la escorrentía superficial producida por la lluvia, lo que lleva a la reducción de la permeabilidad y acorta la vida útil del pavimento. Otros factores que afectan el desempeño de estos pavimentos a largo plazo son el paso repetido de las ruedas, el envejecimiento del aglomerante asfáltico, así como el desagregado y desprendimiento de sus componentes. Se ha demostrado que el coeficiente de permeabilidad de un pavimento permeable es un poco mayor a 50 mm/h después de funcionar entre 5 a 6 años sin ningún tipo de mantenimiento (Jiang *et al.*, 2018).



**Figura 1. Pavimento permeable vehicular y pavimento peatonal articulado perforado.**

Pese a la conveniencia de recuperar la capacidad de infiltración del suelo y los beneficios que esto conlleva, la aplicación de pavimento permeable no es factible en todos los proyectos carreteros. Por ejemplo, estos pavimentos no son adecuados para altos volúmenes de tránsito ni para vehículos pesados. De acuerdo con Scholz y Grabowiecki (2007), el pavimento permeable es una buena opción en los siguientes lugares y situaciones:

- accesos vehiculares: calzadas residenciales, calzadas de servicio y acceso, arcones, cruces, carriles para incendios y acceso a servicios públicos;
- estabilización de taludes y control de erosión,
- campos de golf: caminos de carritos y estacionamiento,
- estacionamientos,
- accesos peatonales,
- senderos ciclistas y ecuestres.

#### 4.2. Pavimento reductor de ruido

El incremento en el número de vehículos a nivel mundial ha provocado serios problemas ambientales y sociales, entre los que se encuentra el ruido. Este problema es generado principalmente por la interacción entre los neumáticos y la superficie de la carretera (Nelson *et al.*, 2008). Los factores que influyen en el ruido que producen los neumáticos en carretera incluyen: características del pavimento (propiedades de los agregados, textura, contenido de huecos de aire, etcétera), características del neumático (dibujo y profundidad de la banda de rodadura, tipo y presión del neumático, entre otros), factores ambientales (temperatura, humedad y polvo), y factores humanos de los conductores (velocidad) (Jiang *et al.*, 2018).

El uso de pavimento asfáltico poroso puede reducir el ruido de neumáticos en carretera. Estos pavimentos contienen una gran cantidad de poros que están conectados, por lo tanto, la "acción de bombeo de aire" entre un neumático y el pavimento se debilita significativamente (Mo *et al.*, 2014). Una estructura porosa mejora la impedancia acústica de los materiales del pavimento, lo que conduce a la interferencia del ruido de los neumáticos en el pavimento, la disipación de energía, la reducción del ruido generado por la fuente y la impedancia del ruido del pavimento (Tonin, 2016).

En general, los niveles de ruido de los pavimentos de asfalto poroso son de aproximadamente 3 a 6 dB más bajos que los del pavimento de asfalto denso (ISO, 1997).

#### 4.3. Pavimento fotocatalítico para la descomposición de gases de efecto invernadero

La superficie del pavimento es el primer sitio con el que hacen contacto los gases emitidos por los vehículos, entre los que se encuentran algunos gases de efecto invernadero: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), y también vapor de agua. Si la descomposición y purificación de estos gases se llevara a cabo en la superficie del pavimento, se reduciría de forma efectiva la contaminación atmosférica (Jiang *et al.*, 2018).

La descomposición de los gases de escape por los materiales del pavimento se puede lograr mediante procesos fotocatalíticos (Fujishima *et al.*, 2008). Para ello, se aplica una capa de fotocatalizador en la superficie del pavimento para promover la oxidación de CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub> (en presencia de luz solar) en carbonatos, nitratos y sulfatos, que serán absorbidos por la superficie del pavimento y luego lavados por el agua de lluvia o el riego artificial. Los materiales fotocatalíticos permanecen sin cambios durante este proceso. Los materiales que se pueden usar como fotocatalizadores incluyen óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>), óxido de zinc (ZnO), dióxido de circonio (ZrO<sub>2</sub>) y sulfuro de cadmio (CdS) (Jiang *et al.*, 2018).

#### 4.4. Pavimentos de alta reflectancia

Los pavimentos y recubrimientos de alta reflectancia (alto albedo) ayudan a combatir el efecto *isla de calor urbana*, porque están fabricados con materiales que reflejan en mayor proporción la energía solar y son de colores claros. La implementación de materiales porosos que permiten el enfriamiento al fluir el aire y el agua en la capa de rodamiento, también son útiles para evitar el sobrecalentamiento de las ciudades (Mendoza, 2014).

Actualmente, las mezclas asfálticas en caliente se fabrican y se extienden a temperaturas que superan varios grados centígrados la temperatura ambiental, ocasionando un gran número de emisiones a la atmósfera que contribuyen al calentamiento global, la generación de lluvia ácida y la formación de smog. Disminuir la temperatura cambiando a mezclas asfálticas tibias, podrían reducir el uso de combustibles fósiles en su elaboración y disminuir su temperatura de colocación, con el fin de mejorar la salud de los trabajadores y reducir el impacto al medio ambiente con la reducción en el uso de energía y costos por su rendimiento (Mendoza, 2014).

Desde 1980 se ha estudiado cómo el albedo de las superficies altera la temperatura del ambiente y se encontró que las mezclas asfálticas oscuras tienen un albedo de 0.05 y las de concreto a base de cemento Portland de 0.42. Se les han añadido pigmentos a las mezclas asfálticas con lo que se ha logrado modificar su color e incrementar su albedo, pero aun así este sigue siendo entre 4 y 6 veces menor que el de las mezclas hechas con cemento Portland. También se ha probado cubrir las superficies asfálticas con pinturas claras de alto albedo, pero se observó que esto ocasionaba la disminución e incluso la pérdida de algunas propiedades de dichas superficies, como la capacidad de absorción sonora, la drenabilidad y la adherencia de los neumáticos. Otro reto que tienen que superar las superficies reflejantes es realizar su función sin causar molestias a la vista (Trichès, 2017). Como puede apreciarse, actualmente los pavimentos reflectivos son un campo de estudio con gran potencial.

#### 4.5. Corredores verdes y jardines públicos

Son aquellos espacios verdes urbanos asociados con un jardín. Desde el punto de la infraestructura verde, se conceptualizan como una zona “bien delimitada en la que el hombre manipula y modela la naturaleza para adaptarla a sus propios fines, ya sean estos productivos, estéticos, recreativos o simbólicos” (Vásquez, 2016). Estos espacios pueden implementarse a escala local, urbana y regional. Por ejemplo, los patios públicos, calles arboladas, derechos de paso de caminos, rutas peatonales y ciclistas, canales y bosques urbanos, plazas municipales, por mencionar algunos.

En la Ciudad de México, desde la década de 1970, la reserva natural del Pedregal de San Ángel, se adaptó y rediseñó en torno a 4 ejes principales: 1) desarrollos tecnológicos para la captación, infiltración y depuración del agua de lluvia, 2) diseños para favorecer la movilidad de la ciudadanía a través de la inclusión, 3) espacios públicos que fomenten hábitos saludables, puntos de encuentro social, diseño y paisaje urbano y 4) selección e inserción de flora y fauna (Suárez *et al.*, 2011).

#### 4.6. Azoteas y muros verdes

Son sistemas de naturación de azoteas y muros, ampliamente conocidos por termo regular la temperatura interior de las edificaciones, así como impactar positivamente en las islas de calor urbanas; además, son sistemas depuradores de contaminantes atmosféricos. También ayudan a disminuir la escorrentía ocasionada durante la época de lluvias, lo que además puede mitigar inundaciones. Sin embargo, es importante tener en cuenta que requieren de un mantenimiento adecuado, y antes de su construcción se debe medir la capacidad de carga del edificio para que no colapse la estructura, y seleccionar el tipo de vegetación adecuada. También se recomienda combinar las azoteas y muros verdes con sistemas de captación de agua de lluvia y de paneles solares para aprovechar mejor los recursos (Reyes, 2016).

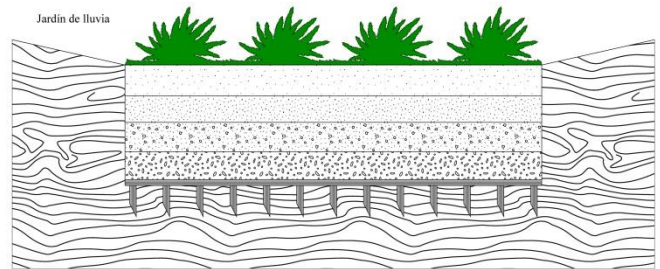
Se estima que son necesarias alrededor de 200 mil hectáreas vegetadas para ayudar a reducir un grado la temperatura en la Ciudad de México. También en la Ciudad de México existe un programa de desarrollo urbano denominado “Plan Verde”, el cual inició en 2008. Su finalidad principal es recuperar 15,000 m<sup>2</sup> de azoteas en espacios públicos urbanos para transformarlos en espacios verdes (Mendoza, 2010). De acuerdo con la evaluación realizada por el Centro Mario Molina (2012), después de cinco años de la implementación del Plan Verde los resultados fueron los siguientes: se culminaron las dos primeras fases del sistema ECOBICI, hubo 7 días más con concentraciones de ozono dentro de la norma con respecto al 2010, la contaminación por PM<sub>10</sub> disminuyó 10%, se inauguró la primera etapa del Museo Jardín del Agua, se concluyó la primera etapa del proyecto de rescate de los ríos Magdalena y Eslava, se plantaron más de 10 millones de árboles en 22 barrancas con valor ambiental, se redujo la emisión de CO<sub>2</sub> en 7.7 millones de toneladas y hubo ahorros importantes de energía eléctrica para alumbrado público (16%) y para el funcionamiento del metro (11%).

#### 4.7. Infraestructuras sostenibles de infiltración

Este tipo de infraestructura es de gran utilidad para minimizar los problemas que representan las aguas de escorrentía en las ciudades, como las inundaciones. Al mismo tiempo que se incrementa la infiltración del agua de lluvia, se alivia el caudal que recibirían los sistemas de desagüe y en algunos casos también se aprovechan elementos estéticos del paisaje, como los jardines.

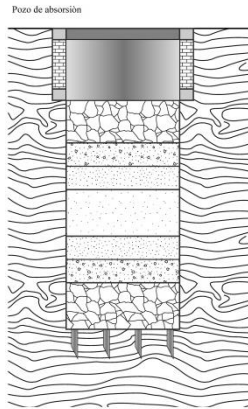
Entre estas tecnologías se encuentran los jardines de lluvia, los pozos de absorción y las zanjas de infiltración, por mencionar solo algunos. La función de estas tecnologías es captar la escorrentía de zonas impermeables, filtrarla y favorecer su infiltración.

Los jardines de lluvia son depresiones que se crean en un área (por ejemplo, jardines existentes), posteriormente se rellenan con capas de materiales filtrantes y en la parte superior se siembran plantas (Figura 3). Para su dimensionamiento, se recomienda que tengan un área de entre 7 y 20 % con respecto a la superficie de la que recibirán la escorrentía; la profundidad debe ser tal que permita el correcto desarrollo de las raíces de las plantas. En cuanto a la vegetación, se recomienda usar plantas perennes, nativas del lugar; también se pueden combinar plantas con diferentes alturas y colores de las inflorescencias para que el jardín sea estéticamente agradable (USDA y NCRS, 2011; Lizárraga *et al.*, 2017).



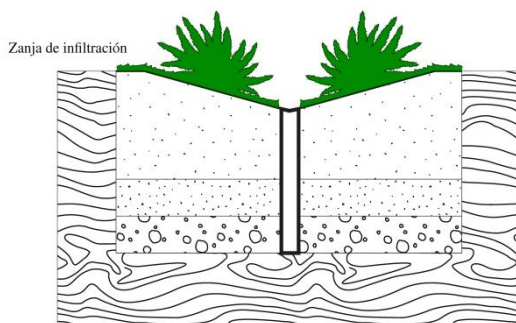
**Figura 2.** Corte transversal de un jardín de lluvia en el que se observan las capas de los materiales filtrantes y la vegetación en la superficie.

Los pozos de absorción son estructuras hidráulicas circulares cuya profundidad puede ser de 3 a 8 m (Figura 4). En las paredes tienen orificios por los que entra el caudal de escorrentía. Pueden construirse *in situ* o bien instalarse pozos prefabricados, en ambos casos deben contar con un filtro de grava perimetral. Los que se construyen *in situ* llevan una pared interior de tabique, mientras que los prefabricados pueden ser de concreto armado o de polietileno de alta densidad. También existe un sistema de infiltración horizontal, desarrollado en México, el cual consta de cámaras prefabricadas de polietileno de alta densidad, en uno de los costados tiene tapas con cortes que se pueden adaptar a diferentes diámetros de la tubería que conducirá la escorrentía hacia la cámara, y el fondo está completamente abierto para que el agua pueda infiltrarse a través del subsuelo. Este último sistema se recomienda para lugares donde el manto freático está muy cerca de la superficie (SIAPA, 2014).



**Figura 3.** Corte transversal de un pozo de absorción en el que se observa el filtro perimetral y el fondo abierto para permitir la infiltración.

Las zanjas de infiltración son excavaciones poco profundas (de 1 a 3 m), rellenas de material filtrante que recogen y almacenan el agua de escorrentía mientras se infiltra (Figura 5). Es recomendable ubicarlas en las orillas de los jardines o bien, en la parte alta o media de una pendiente. Al igual que los jardines de lluvia, se integran fácilmente en el paisaje y pueden funcionar como elemento estético (EPA, 1999; Lizárraga et al., 2017).



**Figura 4.** Corte transversal de una zanja de infiltración rellena de material filtrante.

Las tecnologías anteriores se recomiendan para zonas residenciales, comerciales e industriales. La selección de una u otra o combinación de ellas dependerá de las características y requerimientos del sitio, así como de los recursos disponibles. Por último, hay algunos aspectos que deben tenerse en cuenta a la hora de construir alguna de estas estructuras, ya que no deben ubicarse cerca de los cimientos de los edificios. En el caso de los pozos de absorción la distancia mínima recomendable al cimiento más próximo debe ser igual a la profundidad del mismo. También debe seleccionarse un sitio con al menos 12 mm/h de capacidad de infiltración, en el que no predominen las arcillas, ya que estas podrían colmatar los sistemas (EPA, 1999; SIAPA, 2014).

## 5. Conclusiones

Debido a la gravedad de las consecuencias que acarrea el sellado del suelo, los proyectos de urbanización deberían planearse cuidadosamente y regularse estrictamente. La reutilización de edificaciones abandonadas es una opción que

convendría priorizarse sobre la utilización de suelos abiertos, así como revertir el sellado del suelo en las áreas que sea posible para revegetar ese espacio o construir una infraestructura de infiltración. Cuando la ocupación de suelos abiertos es inevitable, la implementación de tecnologías que mitiguen o compensen los efectos del sellado deberían de ser un requisito indispensable. De acuerdo a las características del lugar, el espacio y los recursos disponibles, serán más recomendables algunas alternativas que otras para contrarrestar los efectos que acarrea el sellado del suelo. Una buena planeación urbana es responsabilidad de las autoridades, los desarrolladores y los ciudadanos.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACyT la beca doctoral otorgada a J.A. Martínez-Ortiz.

## Referencias

- Abellán, A., 2015. Ejemplo de infraestructura verde en España: El Anillo Verde de Vitoria-Gasteiz. Recuperado de: <http://sudsostenible.com/ejemplo-de-infraestructura-verde-en-espana-el-anillo-verde-de-vitoria-gasteiz/>
- Alchapar, N., Correa, E. 2015. Reflectancia solar de las envolventes opacas de la ciudad y su efecto sobre las temperaturas urbanas. *Informes de la Construcción*, 67(540): e112, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.131>.
- Banco Mundial, 2016. Del riesgo urbano a la resiliencia: Construir ciudades más seguras. Recuperado de: <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2016/04/06/from-urban-risk-to-resilience---building-safer-cities>
- Cano, S.L., Rodríguez, L.R., Valdez, L.J.R. Acevedo, S.O.A., Beltrán-Hernández, R.I. 2017. Detección del crecimiento urbano en el estado de Hidalgo mediante imágenes Landsat. *Investigaciones Geográficas*. 92, 64-73. ISSN (digital): 2448-7279 • DOI: [dx.doi.org/10.14350/ig.52339](http://dx.doi.org/10.14350/ig.52339)
- CE, 2012. Directrices sobre mejores prácticas para limitar, mitigar o compensar el sellado del suelo. Documentos de Trabajo de los servicios de la Comisión. Comisión Europea. Bruselas. 69 pp.
- Centro Mario Molina, 2012. Evaluación de Acción Climática de la Ciudad de Evaluación del Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2008-2012. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/106516/Evaluaci\\_n\\_del\\_PACCM\\_2008-2012.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/106516/Evaluaci_n_del_PACCM_2008-2012.pdf)
- CCE, 2002. Hacia una estrategia temática para la protección del suelo. Comunicación de la Comisión al Consejo, el Parlamento Europeo, el Comité Económico y Social y el Comité de las Regiones. Comisión de las Comunidades Europeas. Bruselas. 40 pp.
- EPA, 1999. Storm water technology. Fact sheet: Infiltration trench. Washington, D.C.
- FAO, 2016. Sellado del suelo. En: Amenazas del suelo (infografía). Obtenido desde: <http://www.fao.org/3/b-i6470s.pdf>
- Fujishima, A., Zhang, X. y Tryk, D. A., 2008. TiO<sub>2</sub> photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*, 63(12), 515-582.
- García, A. J. M., Pérez, G. M. E. y García, R. M. P. 2014. Revisión del concepto de sellado de suelos y propuesta de tipología urbana. *Anales de Geografía*, 14, (1): 87-103.
- Hu, Y., Dou, X., Li, J y Li, F. 2018. Impervious surfaces alter soil bacterial communities in urban areas: A case study in Beijing, China. *Frontiers in Microbiology*. 9:226. doi: 10.3389/fmicb.2018.00226
- ISO, 1997. Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise Part 1: Statistical pass-by method, ISO 11819-1, 1997.
- León-Borges, J.-A., y Lizardi-Jiménez, M. A. 2017. Hydrocarbon pollution in underwater sinkholes of the Mexican Caribbean caused by tourism and asphalt: Historical data series and cluster analysis. *Tourism Management*, 63, 179-186. doi:10.1016/j.tourman.2017.06.018
- López, V. H. y Plata, W., 2009. Análisis de los cambios de cobertura de suelo derivados de la expansión urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 1990-2000. *Investigaciones Geográficas*, 68, 85-101.

- Liu, D., Liu, X., Han, W., Chen, J., 2018. Research on the anti-plugging property of permeable concrete pavement. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 57, p. 01002). EDP Sciences.
- Lizárraga-Mendiola, L., Vázquez-Rodríguez, G.A., Lucho-Constantino, C.A., Bigurra-Alzati, C.A., Beltrán-Hernández, R.I., Ortiz-Hernández, J.E. y López-León, L.D. 2017. Hydrological Design of Two Low-Impact Development techniques in a Semi-Arid Climate Zone of Central Mexico. *Water*, 9, (561): 1-17, doi:10.3390/w9080561
- Jiang, W., Huang, Y., Sha, A., 2018. A review of eco-friendly functional road materials. *Construction and Building Materials*, 191, 1082-1092.
- Mendoza, G.B., 2010. Naturación de azoteas. Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto. Recuperado de: <http://www.imcyc.com/revistacyt/jun11/artsustentabilidad.htm>
- Mendoza, S. J. F., 2014. Criterios de sustentabilidad para carreteras en México. *Publicación Técnica*, (392).
- Mo, L., Huurman, M., Wu, S. y Molenaar, A. A. A., 2014. Mortar fatigue model for meso-mechanistic mixture design of raveling resistant porous asphalt concrete. *Materials and structures*, 47(6): 947-961.
- Montejo, A., 2002. Ingeniería de pavimentos para carreteras. (A. editores, Ed.) Bogotá D.C, Colombia: Ágora.
- Nelson, J. T., Kohler, E., Öngel, A. y Rymer, B., 2008. Acoustical absorption of porous pavement. *Transportation Research Record*, 2058(1): 125-132.
- Piotrowska-Długosz, A. y Charzyński, P. J., 2015. The impact of the soil sealing degree on microbial biomass, enzymatic activity, and physicochemical properties in the Ekranic Technosols of Toruń (Poland). *Soils Sediments* 15: 47. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0963-8>
- Reyes, L. F., Torres, A., Castaño, M. F. L., Herrera, B. J. M., Ruiz, L. A., Rojas, M. L., 2011. Pavimentos flexibles. Comportamiento hidráulico, beneficios y limitaciones de la aplicación de un SDGA a una estructura de pavimento flexible. *Infraestructura Vial*, 24, 17 – 21.
- Reyes, J., 2016. Azoteas y muros verdes, útiles para combatir islas de calor. Boletín UNAM-DGCS-471.
- Scholz, M. y Grabowiecki, P., 2007. Review of permeable pavement systems. *Building and environment*, 42(11), 3830-3836.
- SIAPA, 2014. Infiltración pluvial. En: Criterios y lineamientos técnicos para factibilidades. Sistema Intermunicipal de los Servicios del Agua. Cd. de México, pp. 1 – 10.
- Siriwardene, N. R., Deletic, A. y Fletcher, T. D., 2007. Clogging of storm water gravel infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study. *Water research*, 41(7), 1433-1440.
- Suárez A., Camarena, P., Herrera, I., Lot A., 2011. Infraestructura verde y corredores ecológicos de los pedregales: ecología urbana del sur de la Ciudad de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Primera edición. ISBN: 978-607-02-2879-7.
- Tan, S. A., Fwa, T. F. y Han, C. T., 2003. Clogging evaluation of permeable bases. *Journal of transportation engineering*, 129(3), 309-315.
- Tonin, R., 2016. Quiet road pavements: Design and measurement—State of the art. *Acoustics Australia*, 44(2), 235-247.
- Trichês, G., 2017. Islas de calor urbanas y pavimentos fríos. Recuperado de: <https://www.roadexpertsla.com/es/noticias/detalhes/islas-de-calor-urbanas-y-pavimentos-frios>
- Vásquez, A.E., 2016. Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 63: 63-86.
- USDA y NRCS, 2017. Los jardines de lluvia. Folleto informativo. Recuperado de: [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcs142p2\\_011368.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_011368.pdf)