

ARTÍCULO 3/5 - RAI

Del bosque esponja a la ciudad esponja

Por qué proteger una ciudad de las inundaciones exige retener, ralentizar y descontaminar el agua desde la cabecera de la cuenca hasta cada calle.

Alain Bélanger, ingeniero forestal - Beyond Sustainable Tech.

22 de octubre de 2026 · Ilustración conceptual

Una ciudad recibe más que la lluvia que cae sobre ella

Cuando una ciudad se inunda, observamos naturalmente la lluvia que cayó sobre sus calles. Revisamos los sumideros, las tuberías pluviales, los estanques de retención, las estaciones de bombeo y la capacidad del alcantarillado. Todos esos elementos son esenciales, pero no cuentan toda la historia.

Parte del agua que inunda una ciudad puede haber caído varias horas -y a veces varios días- antes sobre bosques, campos, humedales, carreteras y caminos situados mucho más arriba dentro de la cuenca. Esa agua inicia su recorrido lejos de la ciudad. Llega a una cuneta, la cuneta desemboca en una pequeña surgencia o quebrada, la quebrada alimenta un arroyo y los tributarios terminan reuniéndose en un río mayor.

La cuenca no reconoce los límites municipales, ni la frontera entre un bosque público y una propiedad privada, ni la división entre un barrio y el siguiente. Toda el agua termina perteneciendo al mismo sistema. Por eso, proteger una ciudad de las inundaciones no puede comenzar únicamente en su primera calle: debe comenzar en la cabecera de la cuenca.

Lo que establecieron los dos primeros artículos

En el primer artículo de esta serie expliqué cómo miles de kilómetros de caminos, cunetas, alcantarillas y superficies compactadas pueden formar una segunda red de drenaje superpuesta a la red hidrográfica natural. A escala de un solo camino, la lógica es racional: mantener la capacidad portante, proteger la estructura y reducir los daños causados por el agua y las heladas.

El problema aparece cuando sumamos los efectos de toda la red. En dos cuencas estudiadas en Oregón, hasta el 57 % de la longitud vial podía funcionar como una vía de escurrimiento. Algunos tramos enviaban el agua directamente a los cursos de agua; otros generaban nuevas cárcavas de erosión. En Caspar Creek, California, la modelización indicó que una red antigua situada cerca de los arroyos podía aumentar los caudales máximos hasta un 46 %, mientras que una red más reciente, alejada de la hidrografía, los aumentaba menos del 2 %.

El segundo artículo examinó lo que ocurre cuando el territorio no conserva el agua: disminuye la humedad del suelo, la vegetación entra en estrés hídrico, se alteran funciones biológicas y se reduce la resiliencia durante la sequía. Ahora debemos conectar esos dos hallazgos con la ciudad. El agua evacuada demasiado rápido aguas arriba no desaparece: se desplaza, y alguien aguas abajo termina recibéndola.

El tiempo de recorrido del agua

El agua que cae sobre una cuenca no llega al río principal al mismo tiempo. Su desplazamiento depende del tamaño de la cuenca, la pendiente, la naturaleza y la saturación de los suelos, la cobertura vegetal, los humedales, los lagos, la densidad de drenaje, las superficies compactadas, las carreteras, las cunetas y la distancia entre la zona de lluvia y la ciudad.

Una lluvia en la parte alta puede producir una onda de crecida que alcance la ciudad varias horas después; en una cuenca grande, el retraso puede ser aún mayor. Ese desfase crea a veces una falsa sensación de seguridad: la lluvia terminó aguas arriba y el cielo incluso puede haberse despejado, pero el agua continúa viajando por los suelos, las cunetas, las surgencias, los arroyos y los ríos. La crecida todavía está en camino.

Cuando se encuentran dos crecidas

Una ciudad puede enfrentar dos fenómenos distintos. El primero es una inundación pluvial local: la lluvia cae directamente sobre techos, estacionamientos, calles y aceras, y su volumen o intensidad supera la capacidad de las superficies, los sumideros y las tuberías. El segundo es una inundación fluvial: el agua procedente de la cuenca aguas arriba llega al río y el caudal supera la capacidad del cauce, las riberas o las obras de protección.

El riesgo aumenta especialmente cuando ambos picos se acercan en el tiempo. Imagine una lluvia importante en la parte alta de la cuenca. Las carreteras y cunetas aceleran una parte de la transferencia hacia los arroyos. La onda de crecida comienza a descender. Un día después, una nueva lluvia cae directamente sobre la ciudad.

La ciudad debe gestionar simultáneamente:

- el agua que cae sobre sus propias calles;
- el agua procedente de techos y estacionamientos;
- el agua descargada por barrios vecinos;
- el agua drenada por territorios agrícolas o forestales;
- la onda de crecida ya presente en el río.

La ciudad ya no recibe solamente una tormenta. Recibe la suma de varios sistemas diseñados para transferir rápidamente su agua aguas abajo.

«Una infraestructura puede ser eficaz localmente y, al mismo tiempo, agravar colectivamente el riesgo en el punto más bajo de la cuenca.»

Una ciudad esponja comienza aguas arriba

Con frecuencia se presenta la ciudad esponja como un proyecto urbano: jardines de lluvia, techos verdes, parques inundables, pavimentos permeables y alcorques ampliados. Todas esas soluciones son importantes, pero no bastan si el territorio aguas arriba continúa acelerando el agua hacia la ciudad.

Una verdadera estrategia de ciudad esponja debe comenzar antes del límite municipal y proteger o restaurar las funciones de la cuenca:

- suelos capaces de infiltrar;
- bosques;
- turberas y humedales;
- llanuras de inundación;
- lagos y estanques;
- zonas ribereñas;
- meandros y espacios de desbordamiento;
- sectores donde el flujo pueda ralentizarse y distribuirse;
- caminos cuyas cunetas no estén conectadas directamente con los cursos de agua.

Estos ambientes no son terrenos improductivos. Son infraestructura hidrológica. Almacenan temporalmente el agua, reducen determinados picos de caudal, contribuyen a la recarga, sostienen los caudales durante los periodos secos y protegen a las comunidades situadas aguas abajo.

«Una ciudad no puede convertirse en esponja si su cuenca ha perdido las funciones que ralentizaban el agua antes de su llegada.»

Cómo funciona un bosque esponja

Un bosque no absorbe cada gota de lluvia ni evita todas las crecidas. Tampoco sustituye presas, estanques u obras de protección. Pero un territorio forestal funcional multiplica los recorridos y los obstáculos que el agua debe atravesar.

El dosel intercepta una parte de la precipitación. Las hojas y ramas reducen la energía con la que la lluvia golpea el suelo. La hojarasca ralentiza el escurrimiento. Las raíces crean vías de paso. La materia orgánica sostiene la porosidad. Los microorganismos participan en la estructura del suelo. Las depresiones naturales retienen el agua temporalmente y los humedales absorben parte de los excesos.

El agua se ralentiza, se distribuye, se infiltra, se almacena, es utilizada por la vegetación y se libera gradualmente. El bosque esponja no depende de una sola tecnología; depende de una multitud de funciones distribuidas en todo el territorio.

Nuestras ciudades suelen hacer lo contrario

En una ciudad convencional, la lluvia encuentra un sistema casi opuesto. Los techos la conducen hacia las canaletas; las entradas asfaltadas la empujan hacia la calle; los estacionamientos y las aceras limitan la infiltración; los suelos han sido excavados, rellenados y compactados; los bordillos concentran el agua; los sumideros la captan; las tuberías la transportan; y los emisarios la descargan.

La ciudad se convierte en una gran máquina para desplazar el agua horizontalmente. Las superficies impermeables reducen la infiltración, aumentan la conexión directa con el alcantarillado y los cursos de agua y, en general, producen picos de caudal más rápidos y elevados. También favorecen la erosión y el transporte de contaminantes hacia los medios acuáticos.

La ciudad deja de recibir la lluvia como un territorio vivo y comienza a recibirla como una red de tuberías.

Inundada hoy, seca mañana

La misma ciudad puede inundarse durante una tormenta y necesitar agua pocos días después. El aparente contrasentido es el mismo que observamos en las cuencas forestales: demasiada agua, demasiado rápido, durante el evento; y muy poca agua retenida cuando vuelve el calor.

El agua que podría haber penetrado en el suelo se envía a una tubería. El agua que podría haber alimentado un árbol llega al río. El agua que podría haber contribuido a la recarga abandona el barrio. Después de la lluvia, el pavimento vuelve a absorber calor, los suelos compactados se secan, los árboles urbanos entran en estrés, los parques requieren riego y aumenta la presión sobre el agua potable. La ciudad recibió el agua, pero no la conservó.

El agua y el calor son un mismo problema urbano

Las inundaciones y las islas de calor suelen ser gestionadas por servicios diferentes, pero nacen en parte de la misma decisión de diseño. Una ciudad muy mineralizada tiene menos superficies capaces de absorber agua y menos vegetación capaz de utilizarla para enfriar el ambiente.

Las carreteras, los estacionamientos y los edificios acumulan energía solar. Cuando los árboles carecen de suelo, espacio y agua, la ciudad pierde simultáneamente sombra, evapotranspiración, interceptación, biodiversidad y confort térmico. El agua conservada en el suelo urbano no sirve únicamente para reducir inundaciones: sostiene la vegetación, ayuda a enfriar el entorno, reduce el estrés de los árboles, prolonga su vida y puede disminuir las necesidades de riego y climatización.

Cada barrio debe gestionar su parte de la lluvia

La responsabilidad no puede recaer únicamente en la red municipal central. Debe distribuirse. Una nueva urbanización no debería considerarse eficiente solo porque logra enviar toda su agua fuera de sus límites; en ese caso, simplemente transfiere el problema al lote vecino, al barrio situado más abajo o a la red colectiva.

Un diseño resiliente debería seguir este orden de prioridad:

- retener una parte del agua en el lugar donde cae;
- ralentizar su desplazamiento;
- almacenarla temporalmente;
- reutilizarla para la vegetación cuando sea posible;
- infiltrarla cuando la calidad del agua y las condiciones del suelo lo permitan;
- filtrarla cuando transporte contaminantes;
- evacuar de manera segura únicamente el excedente.

Esta lógica debe aplicarse a la propiedad, el estacionamiento, el desarrollo comercial, la calle, el callejón, el barrio, la zona industrial, el municipio y la cuenca completa. Llamo a este principio responsabilidad hidrológica distribuida.

«Cada terreno, cada calle y cada barrio deberían conservar una parte del agua que reciben, en vez de convertir toda esa agua en un problema para el vecino situado aguas abajo.»

La calle es el eslabón que falta

Muchas ciudades ya invierten en parques inundables, jardines de lluvia, techos verdes, estanques, alcorques ampliados y pavimentos permeables. Son proyectos útiles, pero a menudo permanecen separados de la red vial.

La calle conecta casi todos los componentes de la ciudad. Bordea edificios, recibe agua de techos, entradas y estacionamientos, aloja redes de agua, energía y telecomunicaciones, atraviesa barrios y conecta las partes altas con las partes bajas. Es una de las mayores superficies públicas continuas de la ciudad.

Por eso la calle no debería considerarse únicamente una superficie de circulación. Puede convertirse en una infraestructura climática distribuida. Una calle regenerativa puede combinar una estructura que distribuya las cargas, menor compactación innecesaria, espacios laterales de infiltración, celdas de suelo para los árboles, almacenamiento temporal, medios filtrantes, desbordamientos seguros, sensores y un programa de mantenimiento y sustitución.

Retener no es suficiente

Debemos añadir una dimensión esencial: el agua retenida o infiltrada no es automáticamente agua limpia. Las carreteras acumulan partículas de neumáticos, microplásticos, polvo de frenos, metales, hidrocarburos, aceites y fluidos, sólidos en suspensión, sales de deshielo y compuestos orgánicos asociados al desgaste de los vehículos y del pavimento.

Una calle regenerativa no debe abrir simplemente un camino para que toda el agua penetre en el suelo. Debe decidir qué agua puede infiltrarse, qué agua debe ralentizarse, cuál debe filtrarse, cuál debe almacenarse temporalmente, cuál requiere un tratamiento complementario y cuál debe evacuarse durante un evento extremo. El objetivo no es desplazar la contaminación del río hacia el acuífero; es interceptarla cerca de su fuente.

6PPD y polvo de neumáticos

Uno de los compuestos que debemos vigilar especialmente es el 6PPD, utilizado en los neumáticos para protegerlos de la degradación causada por el ozono. A medida que los neumáticos se desgastan, sus partículas se depositan sobre la calzada. En el ambiente, el 6PPD puede transformarse en 6PPD-quinona (6PPD-Q), un compuesto especialmente preocupante para algunas especies de salmónidos.

Las partículas de neumáticos son además una forma de contaminación por microplásticos. Pueden ser transportadas por el escurrimiento, las cunetas, las tuberías pluviales, los cursos de agua, el viento y los sedimentos. La red vial es, por tanto, una infraestructura de movilidad y también una vía de transferencia de contaminantes.

¿Podemos descontaminar el agua antes de que llegue al río?

Los primeros estudios demuestran que el tratamiento cerca de la fuente es técnicamente posible. Un experimento a escala real con una celda madura de biorretención en Vancouver observó una reducción aproximada del 95 % en la masa de 6PPD-Q que alcanzaba el drenaje de salida. La modelización asociada indicó que, durante la mayoría de las lluvias consideradas típicas, el sistema podía reducir en más del 90 % la carga descargada directamente a las aguas receptoras. Sin embargo, la eficacia disminuye durante los eventos mayores cuando el sistema desborda.

Otro estudio sobre pavimentos permeables midió más del 96 % de retención de la masa de partículas de neumáticos y una reducción media del 68 % de la masa de 6PPD-Q. Estos resultados no significan que un único sistema elimine todos los contaminantes en todas las condiciones. Sí demuestran que la calle puede convertirse en un lugar de tratamiento y que es preferible interceptar los contaminantes antes de que se dispersen en un gran curso de agua.

Simulaciones recientes sugieren también que algunos medios, incluido el biochar, podrían mejorar la captura de compuestos móviles en sistemas de biorretención. La validación a escala real sigue siendo indispensable. Debemos medir las concentraciones de entrada y salida, la masa total capturada, la saturación de los medios, el posible lavado, la frecuencia de sustitución y el destino seguro de los materiales retirados.

La nueva continuidad hidrológica

La ciudad esponja debe entenderse como un sistema continuo que opera en cuatro escalas:

- La cuenca: bosques, suelos, humedales, lagos, tierras agrícolas y caminos ralentizan el agua antes de que llegue a la ciudad.
- El municipio y sus barrios: cada sector conserva una parte de su lluvia en vez de transferir inmediatamente toda su carga hidráulica a la red central.
- La calle: ralentiza, almacena, filtra, infiltra o reutiliza el agua y evacua únicamente el excedente.
- El medio receptor: el agua que finalmente llega al arroyo, río, estuario o acuífero debería hacerlo más lentamente, con un pico menor y con menos sólidos y contaminantes, después de contribuir más a la humedad y la recarga del territorio.

Esta continuidad constituye el verdadero paso del bosque esponja a la ciudad esponja.

Una ciudad esponja no es una ciudad sin drenaje

Debemos evitar otro falso debate. Una ciudad esponja sigue necesitando tuberías, estanques, bombas, cunetas, alcantarillas, emisarios, obras de protección y capacidad de emergencia. La diferencia está en el orden de prioridades.

Una ciudad convencional pregunta primero: «¿Cómo evacuamos esta agua?». Una ciudad esponja pregunta primero: «¿Qué parte podemos retener, ralentizar, filtrar, infiltrar o reutilizar cerca del lugar donde cae?». Solo después pregunta: «¿Qué parte debemos evacuar de manera segura?». El excedente siempre necesita una vía de salida, pero el agua no debería convertirse en residuo desde la primera gota.

Una carretera inteligente debe comprender el agua

Cuando hablamos de carreteras inteligentes pensamos normalmente en vehículos conectados, tráfico, velocidad, estacionamiento, semáforos sincronizados, cámaras y seguridad. Todas estas funciones son útiles. Pero una carretera que cuenta vehículos sin comprender el agua que desplaza todavía no es verdaderamente inteligente.

Una infraestructura moderna también debería medir la lluvia recibida, el volumen retenido, el volumen evacuado, el caudal máximo, el tiempo de residencia, la humedad del suelo, la temperatura superficial, las condiciones de congelación y deshielo, la saturación de los medios filtrantes, el estado hídrico de los árboles, la presencia de agua bajo la estructura, las deformaciones, las cargas y vibraciones y la calidad del agua en la entrada y la salida.

La Estrategia Europea de Resiliencia Hídrica avanza precisamente en esa dirección: restaurar el ciclo del agua desde la fuente hasta el mar, mejorar la retención, prevenir la contaminación, modernizar la infraestructura y

acelerar el uso de soluciones digitales e inteligencia artificial. La carretera inteligente del futuro no estará conectada únicamente con los vehículos; estará conectada con la cuenca.

Qué debería medir un proyecto piloto

Una nueva calle no debería evaluarse únicamente por su apariencia o sus intenciones. Debe compararse e instrumentarse. Un verdadero proyecto piloto debería incluir una sección convencional, una sección con retención, filtración e infiltración y un sector de control.

Hidrología: volumen total de escurrimiento; caudal máximo; tiempo hasta el pico; volumen almacenado e infiltrado; humedad del suelo a varias profundidades; comportamiento durante lluvias sucesivas; incidencia sobre la red pluvial. Calidad del agua: sólidos en suspensión; partículas de neumáticos; microplásticos; 6PPD y 6PPD-Q; polvo de frenos; metales; hidrocarburos; aceites; sales de deshielo; contaminantes específicos del sitio.

Medios filtrantes: capacidad de captura; vida útil; saturación; posible liberación; frecuencia de sustitución; destino final; costos de mantenimiento. Temperatura y vegetación: temperatura del pavimento y del suelo; humedad en los alcorques; necesidades de riego; crecimiento y mortalidad de los árboles; evolución de la sombra y del microclima.

Infraestructura: capacidad portante; deformaciones; congelación-deshielo; mantenimiento; reparabilidad; comportamiento a largo plazo; costo del ciclo de vida. Cuenca: reducción de la carga enviada aguas abajo; desconexión de superficies impermeables; sincronización o desincronización de los picos; efecto acumulativo de varias instalaciones; valor de los daños evitados.

La medición es lo que transformará una intención ambiental en una práctica de ingeniería.

El agua conservada tiene valor económico

Durante mucho tiempo, el agua de lluvia retenida en el suelo no aparecía en ningún balance municipal. No se facturaba, no se consideraba un activo y no formaba parte del valor de una calle. Sin embargo, el agua conservada puede reducir o aplazar numerosos costos: ampliación de tuberías, construcción de estanques, daños por inundación, bombeo, riego, sustitución de árboles, reparaciones viales, climatización, interrupciones económicas y presión sobre los servicios de emergencia.

El informe Hot Summer Economics de Triodos Bank estima que los efectos del calor extremo podrían reducir aproximadamente un 1 % el PIB de la Unión Europea en 2026 -cerca de 180 mil millones de euros- a través de la agricultura, la energía, el transporte, la logística y la productividad laboral. Triodos estima además que Francia podría figurar entre las economías más afectadas. Estas pérdidas no son atribuibles a las carreteras, pero demuestran que el agua, el calor y la resiliencia de la infraestructura tienen un valor económico mensurable.

«Si la escasez de agua, las inundaciones y el calor producen pérdidas económicas, una calle que retiene agua, reduce el calor y limita los daños también crea valor económico.»

No necesitamos reconstruir toda la ciudad de una sola vez

Transformar una red urbana completa puede parecer irreal. Lo sería si todo tuviera que hacerse al mismo tiempo, pero no es necesario. Una ciudad puede comenzar donde se superponen varios riesgos: calles que se inundan con frecuencia, puntos bajos, árboles en declive, islas de calor, redes pluviales sobrecargadas, callejones, estacionamientos públicos, corredores escolares, hospitales, zonas industriales, sectores ya previstos para rehabilitación y calles próximas a cursos de agua sensibles.

Cada reconstrucción se convierte así en una oportunidad. No solo para reponer el asfalto como antes, sino para preguntar: «¿Qué función hidrológica, climática y ambiental podría cumplir esta calle durante los próximos cincuenta años?». El cambio puede ser gradual, modular, mensurable, reversible y mejorado en cada fase.

Una nueva definición del desempeño

Una buena vía urbana ya no debería juzgarse únicamente por su capacidad portante, costo inicial, vida útil, fluidez, mantenimiento y seguridad. También debería evaluarse por la cantidad de agua que concentra y conserva, el retraso que añade antes del pico, el calor que acumula, la vegetación que sostiene, los contaminantes que transporta o filtra, su contribución a la recarga, su desempeño durante eventos extremos y los daños que ayuda a evitar.

Una calle que evacua perfectamente su propia agua pero sobrecarga el barrio siguiente no puede considerarse plenamente eficiente. Una carretera que permanece intacta pero contribuye a la muerte de los árboles y al calor del barrio no es completamente resiliente. Una infraestructura que retiene agua pero deja que los contaminantes lleguen al acuífero no es regenerativa. El desempeño debe medirse a escala del sistema completo.

Construir una ciudad que conserve y proteja su agua

El paso del bosque esponja a la ciudad esponja no significa reproducir un bosque en cada calle. Significa recuperar algunas de sus funciones: ralentizar en vez de acelerar sistemáticamente; distribuir en vez de concentrar; crear varias vías de infiltración; mantener una reserva; sostener el sistema vivo; tratar los contaminantes cerca de su fuente; aceptar temporalmente el agua en espacios diseñados para recibirla; y evacuar el excedente únicamente cuando sea necesario.

Nuestras ciudades ya poseen la red capaz de llevar esta transformación: la red vial. Atraviesa cada barrio, conecta casi todos los edificios, recibe gran parte de la lluvia, se reconstruye continuamente y pertenece en gran medida al dominio público.

La verdadera pregunta no es si las ciudades seguirán invirtiendo en sus calles. Tendrán que hacerlo. La pregunta es si continuaremos reconstruyendo una red diseñada únicamente para evacuar el agua o si aprovecharemos cada intervención para crear una ciudad capaz de retenerla, ralentizarla, filtrarla y medirla.

Durante más de un siglo pedimos a nuestras calles que nos desplazaran. El clima del siglo XXI nos obliga a pedirles más: gestionar el agua, reducir el calor, sostener los árboles, filtrar la contaminación, proteger los medios acuáticos, medir su propio desempeño y contribuir activamente a la resiliencia de toda la cuenca.

«La ciudad esponja comienza en el bosque, continúa en cada barrio y se vuelve mensurable en cada calle.»

Próximo artículo

Una carretera inteligente no debería limitarse a contar vehículos. El próximo artículo examinará qué debería significar realmente la expresión carretera inteligente. Una infraestructura inteligente no debería medir solamente el tráfico, la velocidad y el estacionamiento. También debería comprender el agua que recibe y conserva, el calor que acumula, la contaminación que transporta, el estado del suelo bajo su estructura, las necesidades hídricas de la vegetación, las cargas que soporta y su propia degradación.

Veremos cómo los sensores, los datos, la inteligencia artificial y el mantenimiento predictivo pueden transformar una carretera pasiva en una infraestructura climática activa.

Pregunta abierta

Cuando se reconstruye una calle en su ciudad, ¿se evalúan únicamente el tráfico, el drenaje y la vida útil, o también su efecto sobre la cuenca, la calidad del agua, el calor del barrio y la salud de los árboles urbanos?

Sobre el autor

Alain Bélanger, ingeniero forestal - Beyond Sustainable Tech.

Referencias principales

1. [The Invisible Ditch Draining Our Rivers](#) - Artículo 1 de la serie
2. [Urbanization - Stormwater Runoff](#) (U.S. EPA)
3. [Mitigate Flooding](#) (U.S. EPA)
4. [Urbanization and Stormwater Runoff](#) (U.S. EPA)
5. [Bioretention Cells Provide a 10-Fold Reduction in 6PPD-Quinone Mass Loadings to Receiving Waters](#)
6. [Mitigating Tire Wear Particles and Tire Additive Chemicals in Stormwater with Permeable Pavements](#)
7. [Bioretention Design Modifications Increase the Simulated Capture of Trace Organic Compounds](#)
8. [European Water Resilience Strategy](#)
9. [New EU law to better protect water enters into force](#)
10. [Hot Summer Economics](#) - Triodos Bank

[Abrir el dossier en línea](#)