

Casos piloto de adaptación al riesgo de inundación

Pablo Ferreiro - Tragsatec

Abraham Rambla - Tragsatec

Mónica Aparicio - Dirección General del Agua, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

Juan Francisco Arrazola - Dirección General del Agua, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

1. Introducción

Los actuales desafíos ecológicos exigen cambios colectivos e individuales, a diferentes escalas, que incorporen la incertidumbre como material de trabajo y promuevan sociedades más resilientes.

En los últimos años, impulsadas por graves episodios como las inundaciones fluviales en Europa o los huracanes Sandy y Katrina en Estados Unidos, ciudades de todo el mundo están desarrollando ambiciosas estrategias integrales que combinan el pensamiento global de la resiliencia con las condiciones específicas locales. Agrupando equipos multidisciplinares compuestos por arquitectos, ingenieros, paisajistas y urbanistas, con aportaciones de las ciencias naturales y sociales e implicando a nuevos actores, este enfoque sistémico reconoce la vulnerabilidad ante futuros desastres y planifica respuestas de forma proactiva desde el paisaje, la ciudad y el edificio, final del recorrido.

En España, las inundaciones constituyen el riesgo natural que genera los daños más graves, en términos tanto materiales como de vidas humanas. En este contexto, la adaptación de edificios puede contribuir significativamente a disminuir las pérdidas económicas y a mejorar la seguridad de los usuarios.

Tras impulsar las *Guías de adaptación al riesgo de inundación*, desde la Dirección General del Agua del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico se están desarrollando una serie de *casos piloto de adaptación al riesgo de inundación*. Sus objetivos son poner en práctica los conceptos recogidos en las guías, identificar líneas generales de actuación en función del uso, ubicación y características constructivas de los edificios, y recopilar buenas prácticas.

Se proponen, así, soluciones enmarcadas en un enfoque multiescalar de la resiliencia: transformaciones territoriales a largo plazo, complementadas con medidas inmediatas y puntuales a nivel local que hagan frente a eventos para los que, en condiciones actuales, no existe capacidad de respuesta.

2. Antecedentes

La Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de la Unión Europea, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y la gestión de los riesgos de inundación, tiene por objetivo establecer un marco destinado a "reducir las consecuencias negativas para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica, asociadas a las inundaciones". Otras directivas europeas vinculadas a la gestión fluvial como la Directiva Marco del Agua y la Directiva Hábitats plantean un amplio escenario de complementariedad para una gestión integral del riesgo de inundación.



Figura 1. Inundación en Los Alcázares en septiembre de 2019.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura.

En España, el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, constituye la transposición al ordenamiento jurídico estatal de la Directiva de Inundaciones. Por su parte, el Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre, por el que se modifican, entre otros, el Reglamento del Dominio Público Hidráulico y el Reglamento de Planificación Hidrológica, identifica las actividades vulnerables frente a avenidas y fija ciertas limitaciones básicas al uso de las zonas inundables.

El Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) es un instrumento de apoyo a la gestión del espacio fluvial, la prevención de riesgos, la planificación territorial y la transparencia administrativa. Su eje central, el visor cartográfico de zonas inundables, facilita el acceso ciudadano a la información relativa a la inundabilidad.



Figura 2. Entorno de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón (Asturias): mapa de peligrosidad y mapa de riesgo a las actividades económicas T=500.

Fuente: SNCZI.

Los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI) son los documentos de referencia para la administración y la sociedad en general en la gestión de avenidas. Su contenido esencial es el programa de medidas, incluyendo aquellas en materia de ordenación territorial y urbanismo, que contemplan la elaboración de guías técnicas para reducir la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

La *Guía para la reducción de la vulnerabilidad de los edificios frente a las inundaciones*, elaborada dentro de un convenio de colaboración suscrito entre la Dirección General del Agua y el Consorcio de Compensación de Seguros, ofrece información relativa a la gestión del riesgo, el diseño de edificaciones, medidas de protección civil y medidas de autoprotección para minimizar los daños que producen las inundaciones.

De forma complementaria, en el marco del *Plan de Impulso al Medio Ambiente para la Adaptación al Cambio Climático en España (Plan PIMA Adapta)*, la Dirección General del Agua y TRAGSATEC han elaborado las siguientes guías, que se están aplicando a diferentes casos piloto representativos:



Figura 3. Guías de adaptación al riesgo de inundación.

- *Evaluación de la resiliencia de los núcleos urbanos frente al riesgo de inundación: redes, sistemas urbanos y otras infraestructuras*, para ayudar a identificar los daños directos o indirectos que una inundación puede causar en una ciudad o en su entorno, de forma que se puedan realizar actuaciones que incrementen la resiliencia.
- *Sistemas urbanos de drenaje sostenible*, para profundizar en las causas y consecuencias de las inundaciones a nivel urbano y conseguir una mejor gestión de las aguas pluviales mediante el uso de SUDS.
- *Recomendaciones para la construcción y rehabilitación de edificaciones en zonas inundables*, para exponer criterios constructivos aplicables a nuevos edificios en zona inundable y opciones de mejora para los ya construidos.
- *Adaptación al riesgo de inundación de explotaciones agrícolas y ganaderas*, para dar a conocer las consecuencias de las inundaciones y fomentar la reducción del riesgo en entornos agrícolas y ganaderos.

3. Resiliencia frente al riesgo de inundación y enfoque multiescalar

El concepto de resiliencia refleja la capacidad de adaptación de la sociedad o los ecosistemas a los riesgos que puedan soportar.

En el contexto de la emergencia climática, la Agenda 2030 constituye una hoja de ruta eficaz para abordar la resiliencia, con un enfoque amplio que contribuya a salvaguardar el medio ambiente, la salud y la seguridad de la ciudadanía. Adoptada en 2015 por los jefes de Estado y de Gobierno de los países miembros de Naciones Unidas, propone 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible que pueden ser articulados mediante una gestión integral del riesgo de inundación.



Figura 4. Objetivos de Desarrollo Sostenible 6, 11, 13 y 15.

Fuente: Organización de las Naciones Unidas.

Por su parte, la Agenda Urbana Española, tomada en consideración por el Consejo de Ministros el 22 de febrero de 2019, propone un Decálogo de Objetivos Estratégicos en el que la resiliencia y su capacidad para generar nuevos beneficios juegan un papel esencial. Con el objetivo de reforzar la participación y la responsabilidad compartida plantea, además, poner en marcha una gobernanza del riesgo que implique a todos los interesados (expertos, gobiernos, sector privado, sociedad civil, etc.) en la deliberación y en la propia gestión.

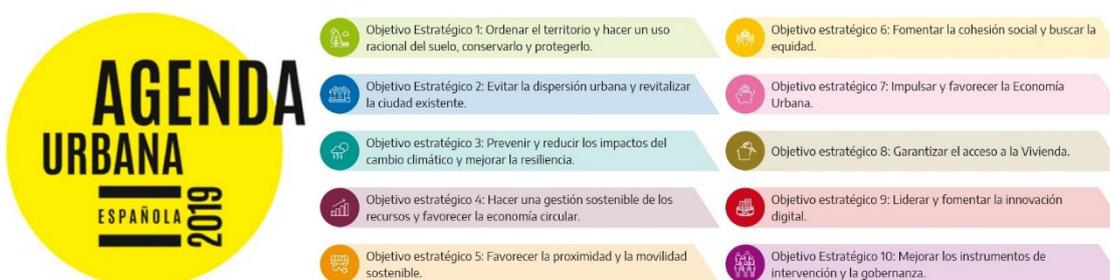


Figura 5. Decálogo de Objetivos Estratégicos de la Agenda Urbana Española.

Fuente: Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.

Las estrategias que integran gestión de inundaciones y sostenibilidad ambiental permiten reducir el riesgo manteniendo o aumentando los beneficios que aportan los ríos, pero ante situaciones heredadas, como núcleos de población consolidados o infraestructuras estratégicas en zonas vulnerables, es preciso completarlas con mecanismos de protección (Ollero, 2014). Este enfoque multiescalar de la resiliencia plantea una interacción entre el sistema ecológico y el sistema social, basada en la protección conjunta de los ecosistemas y las actividades humanas, para mantener la funcionalidad de ambos generando, además, nuevos valores. En este contexto, reforzar la resiliencia significa planificar procesos lentos a escala global y estar preparados para perturbaciones rápidas a escala local (García García, 2016).

A escala urbana, además de disponer de normativa y herramientas para gestionar el riesgo de forma coordinada, las ciudades y comunidades deben también evolucionar hacia nuevos planteamientos e ideas que permitan mejorar su resiliencia y afrontar los futuros condicionantes climatológicos, combinando adaptación y mitigación.



Figura 6. Infraestructura verde urbana de Vitoria-Gasteiz.
Fuente: Centro de Estudios Ambientales, Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz.

En este contexto, las infraestructuras verdes y azules son soluciones multifuncionales basadas en la naturaleza, útiles en la gestión del riesgo de inundación, que aportan múltiples beneficios ambientales, económicos y sociales. Con esta perspectiva, se desarrolla la planificación y gestión hidrológica que Vitoria-Gasteiz, designada Capital Verde Europea 2012, está llevando a cabo para solucionar sus problemas de inundabilidad y saneamiento (Marañón, 2019).

Por su parte, los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) son una herramienta preventiva de gestión del agua de lluvia que contribuye a minimizar los efectos de las inundaciones. Su estrategia se basa en dos objetivos principales: reducir la cantidad de agua que llega al punto final de vertido y mejorar la calidad del agua que se vierte al medio natural. Municipios como Benaguasil (Valencia), galardonado en 2015 con el Premio Ciudad Sostenible a nivel nacional en la categoría Gestión de Agua, demuestran que existen medios y técnicas para dar un nuevo enfoque al tratamiento del agua de lluvia en la ciudad, integrando la gestión de escorrentías en el paisaje urbano (Perales-Momparler y Valls-Benavides, 2013).



Figura 7. Cité Fluviale de Matra (Romorantin-Lanthenay, Francia).
Fuente: CEPRI / Éric Daniel-Lacombe.

A escala arquitectónica no es posible evitar las inundaciones, pero sí reducir significativamente sus efectos. En este sentido, las administraciones locales y la iniciativa individual pueden ejercer un papel decisivo en la prevención, impulsando la reducción de la exposición, los criterios constructivos resilientes y las medidas de autoprotección.

En las nuevas construcciones en zonas de riesgo resulta importante considerar la posibilidad de implementar medidas compensatorias y albergar usos compatibles con la inundación. Al incorporar criterios de transparencia hidráulica

(edificaciones en sentido de la corriente, elevación sobre pilotes, alteraciones topográficas, espacios públicos que ralenticen y drenen el agua, etc.) se permite el paso libre del flujo, sin obstruir su movimiento natural. Así, el barrio de Matra en Romorantin-Lanthenay (Francia) se anticipa en su diseño a la posible presencia del agua, contribuyendo a la mejora de la percepción del riesgo en lugar de ocultarlo (CEPRI, 2014).

Para edificios ya construidos en zonas de riesgo existen diversas medidas de adaptación de carácter paliativo, orientadas a reducir la vulnerabilidad frente a las inundaciones. Las más destacadas son aquellas orientadas a evitar el contacto del agua con el edificio, impedir su entrada y minimizar los daños una vez en el interior (FEMA, 2014).

4. Casos piloto de adaptación al riesgo de inundación: metodología

Los casos piloto de adaptación al riesgo de inundación proponen líneas generales de actuación, trasladando el contenido de las guías redactadas a ejemplos concretos, y recopilan buenas prácticas, ya implementadas, para facilitar su divulgación. En coordinación con las diferentes demarcaciones hidrográficas, se han seleccionado usos muy diversos (sanitario, institucional, docente, industrial y patrimonio cultural) en distintos contextos geográficos. La metodología empleada se desarrolla en 4 fases:

1. Caracterización del riesgo: se realiza mediante la recopilación de información cartográfica disponible en el SNCZI y datos sobre episodios de inundación previos. Se analizan el edificio, entorno o localidad estudiados y su contexto, y se realiza la correspondiente visita y entrevista con sus gestores y usuarios.
2. Diagnóstico de la vulnerabilidad: se identifica la procedencia y principales puntos de entrada de agua, así como los daños potenciales que generaría una inundación en situación actual.
3. Propuesta de adaptación: se exponen diversas medidas generales de autoprotección para salvaguardar a las personas, la edificación y su equipamiento, así como actuaciones recomendadas si se espera una inundación en la zona y se dispone de tiempo de reacción.

Se distinguen cuatro tipos de acciones para mitigar los daños en la edificación: EVITAR que el agua alcance el edificio; RESISTIR la entrada de agua en el edificio, una vez que ha llegado al exterior del mismo; TOLERAR la entrada de agua en el edificio, pero tomando las medidas necesarias para minimizar los daños; y RETIRAR el uso cuando el riesgo es demasiado elevado.

La medida más habitual es el empleo de barreras temporales. Para ser efectivas deberán cumplir una serie de requisitos: altura



Figura 8. Casos piloto de adaptación al riesgo de inundación.

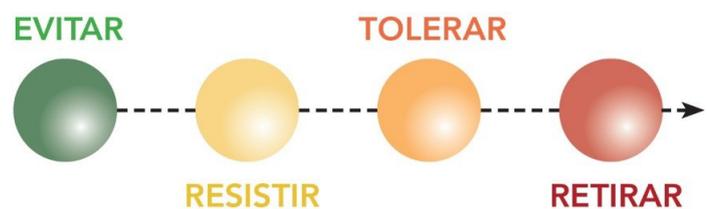


Figura 9. Medidas orientadas a la mitigación de daños en la edificación.

Fuente: Guía para la reducción de la vulnerabilidad de los edificios frente a las inundaciones. Dirección General del Agua y Consorcio de Compensación de Seguros.

superior a la máxima cota de inundación prevista, estanqueidad, resistencia tanto a la presión del agua como al impacto de elementos arrastrados y disponibilidad, tanto de tiempo como de recursos suficientes para su instalación. Otras medidas habituales son los sistemas antirretorno para evitar el reflujó de aguas residuales o las bombas de achique para evacuar el agua acumulada y reducir el tiempo de permanencia de la inundación, asegurando el suministro eléctrico, en caso de cortes de energía, mediante sistemas de alimentación ininterrumpida.

A su vez, se diferencian tres tipos de acciones para mitigar los daños en el equipamiento: ELEVAR (subir el elemento vulnerable por encima de la cota inundable), REUBICAR (trasladarlo a una zona no expuesta) y PROTEGER (mantener su ubicación tomando las medidas necesarias para limitar el daño).

4. Valoración económica: se realiza un análisis coste/beneficio orientativo con el fin de trasladar la conveniencia de la inversión en prevención, aplicando la metodología descrita en la *Guía para la reducción de la vulnerabilidad de los edificios frente a las inundaciones*.

El cálculo se realiza considerando tanto los daños en el edificio y su equipamiento como los derivados del cese de la actividad. Se evalúan las pérdidas en función del porcentaje de afección para 0,5, 1,5 y 3 metros de altura de calado. Con esta información, mediante una regla proporcional, se consideran diferentes hipótesis de riesgo, atendiendo a los periodos de retorno de 10, 100 y 500 años, y sus respectivos calados. Aplicando un modelo matemático que integra los daños y sus frecuencias, se obtiene el daño anual medio y se multiplica para obtener las pérdidas potenciales acumuladas en 30 años. Con estos condicionantes se plantean diferentes estrategias preventivas y su coste estimado de ejecución. Por último, se calcula el daño residual o valor estimado de los daños, tras implementar el paquete de medidas, y se estudia la reducción del riesgo y la relación coste/beneficio que ofrece cada alternativa.

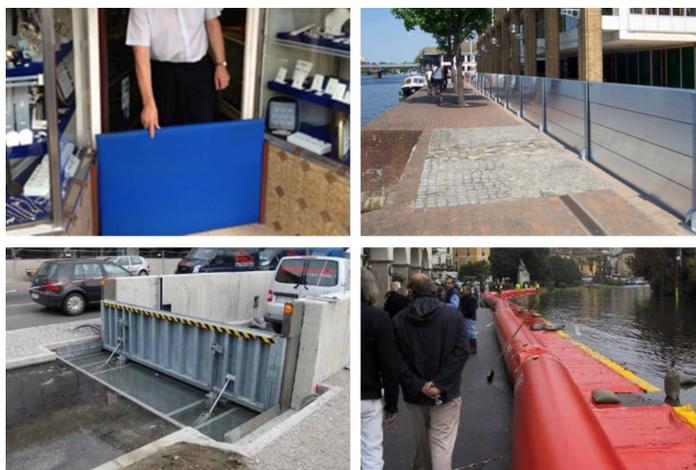


Figura 10. Ejemplos de barreras temporales. Desmontables (Fuente: CAG Canalizaciones), apilables (Fuente: Flood Control International), abatibles (Fuente: Aggères), e hinchables (Fuente: Tandem HSE).

5. Casos piloto de adaptación al riesgo de inundación: ejemplos

Resiliencia frente a inundaciones: Fraga (Huesca)

Fraga (Huesca, 14.979 habitantes) es un claro ejemplo de ocupación urbana de la llanura de inundación. La localidad ha registrado avenidas recurrentes, entre las que destaca el episodio de 1982, así como eventos recientes de menor intensidad en 2010, 2013 y 2018. Para dar respuesta a esta situación, la Modificación Aislada nº 50 del Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) de Fraga introduce limitaciones relativas al riesgo de inundación en la normativa municipal.

En este caso se ha aplicado la metodología recogida en la guía de *Evaluación de la resiliencia de los núcleos urbanos frente al riesgo de inundación: redes, sistemas urbanos y otras infraestructuras*, con el objetivo de identificar aquellos elementos críticos cuya inoperatividad puede poner en peligro el funcionamiento del resto de la red urbana. A partir de la información cartográfica disponible en el Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) se obtiene el inventario de redes, sistemas urbanos y otras infraestructuras de Fraga. Su superposición con

los mapas de peligrosidad disponibles en el SNCZI permite obtener una visión global de las necesidades de adaptación de la localidad.

Para incrementar la resiliencia se proponen nuevos usos compatibles con la inundabilidad en las zonas con mayor riesgo. Por otra parte, se identifican diversos elementos de la red de abastecimiento y saneamiento, red eléctrica y red de transporte, que requieren actuaciones de adaptación. Existe, además, un elevado número de equipamientos situados en zona inundable que pueden presentar aglomeraciones de personas y dificultar las tareas de evacuación en caso de emergencia, por lo que deben establecer sus propios planes de autoprotección. Asimismo, aplicando los conceptos recogidos en la guía de *Sistemas urbanos de drenaje sostenible*, se identifican diversos elementos del paisaje que pueden integrarse en el desarrollo urbano con criterios de conectividad ecológica, articulando diferentes aprovechamientos desde una visión de infraestructura verde y azul.

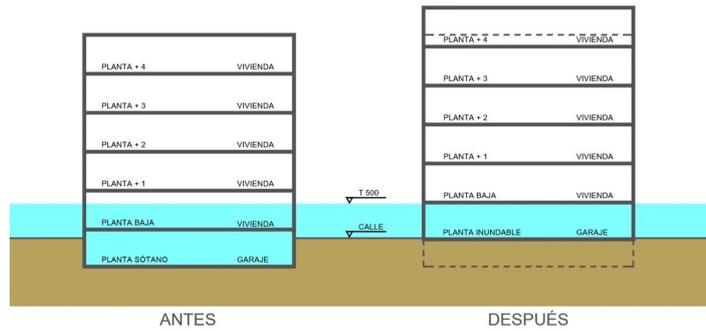


Figura 11. Regulación de la planta inundable establecida en la Modificación nº 50 del PGOU.

Fuente: Ayuntamiento de Fraga.

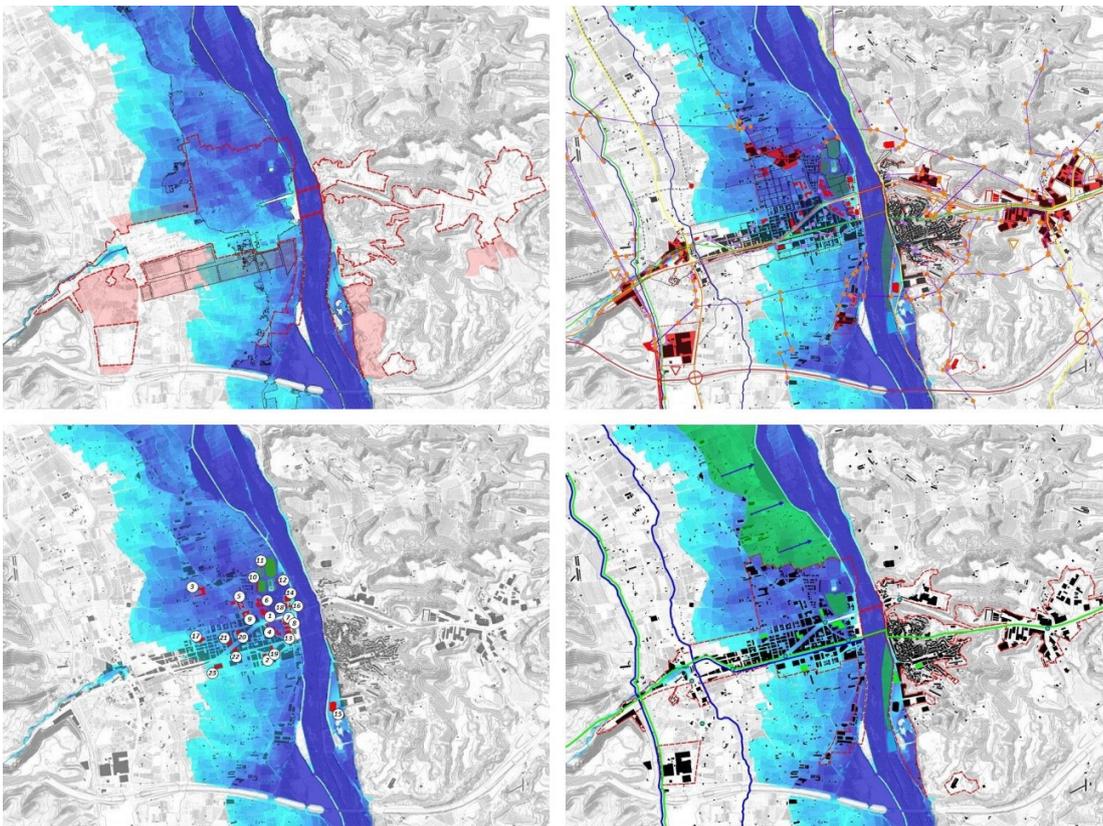


Figura 12. Resiliencia urbana en Fraga: análisis gráfico.

Fuente: Elaboración propia a partir de CNIG y SNCZI.

Se ha realizado una valoración económica orientativa de las medidas destinadas a evitar y resistir la entrada de agua en el centro de salud, el centro de día y un colegio de educación infantil y primaria. Al tratarse de inmuebles sencillos, los análisis coste/beneficio arrojan resultados moderados en comparación con otras tipologías. Sin embargo, han de ser objeto prioritario de adaptación, dada la vulnerabilidad que plantean su uso y las características de sus ocupantes.

Hospital - Residencia Recoletas (Cuenca)

El Hospital-Residencia Recoletas se sitúa en el meandro del río Júcar a su paso por Cuenca, una zona con frecuentes inundaciones y variaciones del nivel del río. Aplicando los conceptos recogidos en la *Guía para la reducción de la vulnerabilidad de los edificios frente a las inundaciones* y la guía de *Recomendaciones para la construcción y rehabilitación de edificaciones en zonas inundables*, el estudio piloto tiene por objetivo reducir el nivel de riesgo por inundación en el edificio, mediante actuaciones que completen los planteamientos del *Proyecto de disminución del riesgo de inundación y mejora del estado ecológico de los ríos Júcar y Moscas a su paso por Cuenca*, donde se plantea el retranqueo de la mota de la margen derecha para ceder espacio al río.

La visita permite identificar los posibles puntos de entrada de agua y los daños potenciales que provocaría una avenida. En primer lugar, la red general de saneamiento se sitúa a una cota similar a la de la lámina de agua del río, de forma que durante las crecidas se produce su colapso y el reflujó de aguas residuales. Las rejillas de ventilación situadas en el pavimento exterior, los huecos en fachada vulnerables a la rotura y entrada del agua por presión hidrostática o impacto de elementos arrastrados, así como las rampas de acceso a los sótanos, son otros puntos que requieren adaptación. Por otra parte, existen diversas instalaciones que se verían comprometidas en caso de inundación, inutilizando los servicios vitales del centro.

La implantación de sistemas antirretorno soluciona la problemática vinculada a la red de saneamiento. Adicionalmente, se propone la construcción de muretes de protección perimetral y antepechos, así como la instalación de compuertas hidráulicas abatibles integradas en el pavimento. Por último, se requiere el traslado a plantas superiores de las instalaciones eléctricas, las instalaciones de climatización y agua caliente sanitaria, el depósito de oxígeno y otros equipamientos vulnerables.

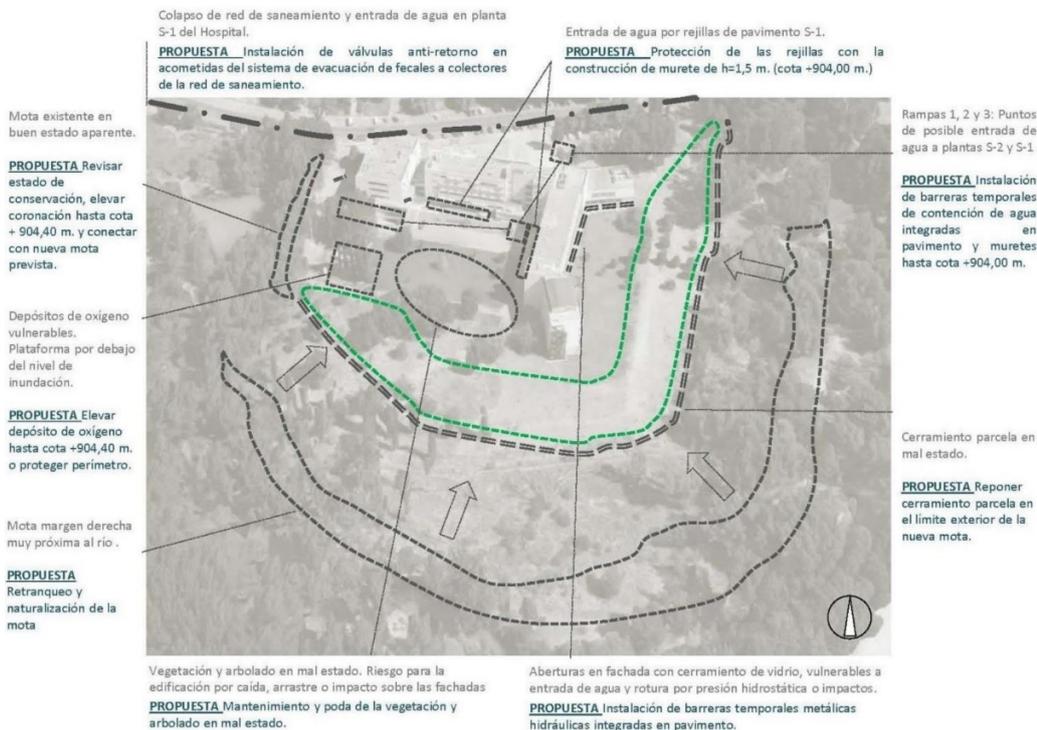


Figura 13. Caso piloto en Cuenca: esquema resumen de la propuesta.

La nueva mota protege el edificio hasta la inundación del periodo de retorno de 25 años. Para crecidas superiores es preciso acometer medidas de adaptación complementarias. Los daños estimados que generaría una avenida que alcanzase el edificio se estiman en 920.000 euros, mientras que el coste orientativo de las medidas es de 197.000 euros.

Ayuntamiento de Cebolla (Toledo)

El municipio de Cebolla (Toledo, 3.263 habitantes) ha sufrido a lo largo de la última década varios episodios de inundación. Destaca, por su gravedad, el evento del 8 de septiembre de 2018, cuya siniestralidad supuso para el Consorcio de Compensación de Seguros la apertura de 173 expedientes y un coste de 639.180,28 euros. El predominio aguas arriba de terrenos de cultivo de olivos e higueras, con fuerte pendiente y sin medidas de control de la escorrentía y la erosión, origina cambios drásticos en la dinámica fluvial. Por otra parte, la canalización subterránea del arroyo Sangüesa y su falta de capacidad de conducción a través del recorrido urbano genera, en situaciones de aumento del caudal de forma precipitada, la acumulación de elementos que provocan su obstrucción y desbordamiento.

El Ayuntamiento de Cebolla se sitúa en la calle principal del núcleo urbano, donde la elevada pendiente provoca que las aguas desbordadas discurran a gran velocidad. Se trata de un edificio sencillo, de muros de carga de fábrica de ladrillo y forjados de madera, pero en él se activan determinados protocolos de emergencia en caso de inundación, por lo que su inoperatividad podría generar daños indirectos en la actividad del municipio.

Asumiendo que la posible avenida provocará el contacto del agua con la fachada del edificio, se propone resistir la entrada de agua mediante barreras temporales en los seis accesos al edificio. Una posible solución es el empleo de dispositivos compuestos por un marco de acero que se expanda en el plano horizontal y vertical, rodeado de una funda de neopreno que forma un sello estanco. Estos elementos resultan de fácil y rápida colocación y retirada, y se adaptan a un rango de medidas. Requieren un ajuste para asegurar la impermeabilidad, pero no precisan obra previa. Se propone también la instalación de sistemas antirretorno.

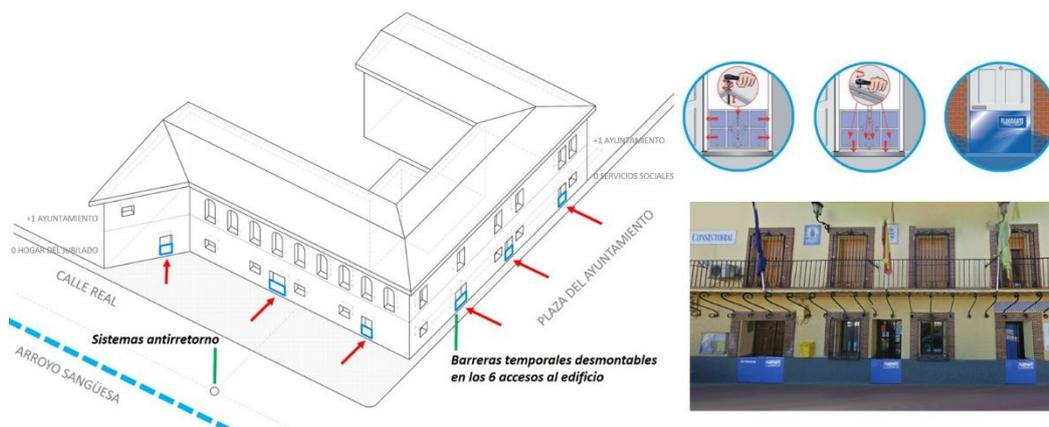


Figura 14. Caso piloto en Cebolla: esquema resumen de la propuesta. Detalle: barreras desmontables (Fuente: CAG Canalizaciones) y ejemplo de aplicación en el edificio.

El coste orientativo del programa de medidas es de 7.500 euros. Aplicando la metodología descrita en las guías, que aúna los daños y sus frecuencias, las pérdidas acumuladas en 30 años se estiman en más de 80.000 euros. El resultado es una relación coste/beneficio de 10,7.



Figura 15. Caso piloto en Cebolla: análisis coste/beneficio.

Ayuntamiento de Los Alcázares (Murcia)

El municipio de Los Alcázares (Murcia, 15.674 habitantes), situado en la ribera del Mar Menor, ha sufrido recientemente varios episodios de inundación que han generado cuantiosos daños materiales y económicos. Su casco urbano se ubica en la zona de confluencia entre la Rambla de la Maraña y diversos ramblizos, que provocan la entrada de agua de manera muy laminada y dispersa, sin que exista un cauce principal definido. Además, el término municipal limita al sur con la Rambla del Albujón, desbordada en el episodio del 12 de septiembre de 2019. La alteración antrópica del paisaje, vinculada a la agricultura y el urbanismo, ha incrementado la vulnerabilidad de la localidad ante el riesgo de inundación. La situación se ve agravada por fenómenos como la DANA (depresión aislada en niveles altos) y la mayor frecuencia de este tipo de eventos debido al cambio climático. Esta compleja problemática requiere estrategias integrales que aborden la resiliencia a diferentes escalas (adaptación de edificios, obras hidráulicas, infraestructuras verdes y azules, etc.) y contribuyan además a la protección y recuperación del Mar Menor.

Los Alcázares cuenta con diversos equipamientos públicos situados en zona inundable. Entre ellos destaca el edificio del Ayuntamiento de la localidad, que ya experimentó daños cercanos a 1 millón de euros en el episodio de septiembre de 2019, la mayor parte de los cuales se concentró en las dos plantas de aparcamientos subterráneos. La inundación de estos espacios es un fenómeno recurrente en los episodios de inundación, por lo que el caso piloto ofrece una solución escalable y replicable en escenarios similares. Permite, asimismo, demostrar cómo, mediante la identificación de los puntos de entrada de agua y la implementación de medidas relativamente sencillas y económicas, pueden evitarse daños muy elevados.

La propuesta se basa en la instalación de barreras temporales en los accesos al aparcamiento. Se plantea el uso de paneles ligeros de aluminio de 20 centímetros, colocados entre guías y soportes incrustados en una base de hormigón. Para su instalación se apilan y quedan sellados de forma automática, ofreciendo máxima seguridad y permitiendo alcanzar cotas elevadas. Se propone también el empleo de dispositivos de sellado temporal en los huecos de ventilación y sistemas antirretorno en la acometida de la red de saneamiento, además de una serie de medidas complementarias para el edificio adyacente, de uso comercial y hotelero, con el que se comparte el aparcamiento.

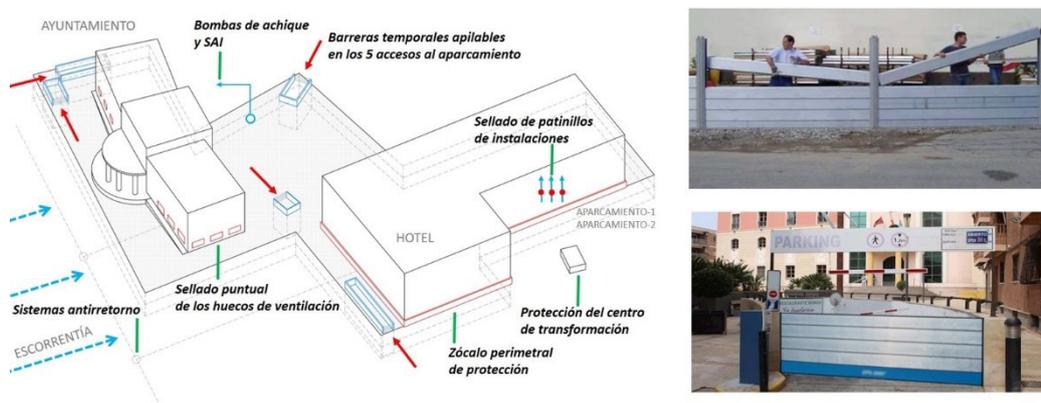


Figura 16. Caso piloto en Los Alcázares: esquema resumen de la propuesta. Detalle: barreras apilables (Fuente: CAG Canalizaciones) y ejemplo de aplicación en el edificio.

La afección de los aparcamientos subterráneos es un fenómeno recurrente en los episodios de inundación y los daños son muy elevados, independientemente de la altura de calado alcanzada en el exterior. El caso piloto ofrece una solución escalable y replicable en escenarios similares y permite demostrar cómo, mediante la identificación de los puntos de entrada de agua y la implementación de medidas relativamente sencillas y económicas, pueden evitarse daños muy elevados. El análisis coste/beneficio arroja resultados muy favorables: una inversión estimada en 55.000 euros evitaría daños potenciales superiores a los 4 millones de euros para un periodo de 30 años.



Figura 17. Caso piloto en Los Alcázares: análisis beneficio/coste.

Edificio polivalente de la escuela politécnica de ingeniería de Gijón (Asturias)

El 11 de junio de 2018 el edificio polivalente de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón (Asturias) sufrió una inundación derivada del desbordamiento del río Peñafrancia, la afloración de agua del subsuelo y las fuertes precipitaciones in situ. La ocupación y estrechamiento de la zona inundable, así como un modelo de urbanización y movilidad orientado al automóvil, que genera obstáculos adicionales e impermeabiliza el terreno, han generado condiciones de elevada vulnerabilidad. Esta situación se ve agravada, en la actualidad, por el aumento de la duración y frecuencia de los eventos tormentosos intensos.

Dada la complejidad del edificio, las posibles vías de entrada de agua son múltiples. Destaca el ascenso de agua a través de los patinillos de instalaciones debido a la inundación de la cámara bajo forjado sanitario, generando daños de gran magnitud distribuidos por toda la planta.

Se propone, de forma preferente, evitar que el agua alcance el edificio en caso de avenida mediante soluciones continuas que aislen su perímetro. Si no fuesen viables, sería preciso inventariar todos los puntos vulnerables y desarrollar un complejo programa de medidas puntuales orientado a resistir la entrada de agua. En ese caso, si alguna de las intervenciones falla o aparecen puntos de entrada imprevistos, la propuesta quedaría invalidada. Por otra parte, dado que el edificio alberga una importante actividad de investigación y cuenta con equipos e instalaciones de coste muy elevado, es recomendable reubicar los elementos de valor elevado en plantas superiores no expuestas.



Figura 18. Caso piloto en Gijón: esquema resumen de la alternativa 2. Detalle: ejemplos de barreras permanentes integradas en el paisaje.

En el episodio de 2018 hasta 80 centímetros de agua inundaron la planta baja del edificio, generando unos daños estimados en 4,5 millones de euros. Sin adaptación, las pérdidas estimadas en 30 años superarían los 30 millones de euros. El uso de barreras temporales hinchables; económicas, versátiles y de fácil instalación y almacenamiento, ofrece una relación coste/beneficio muy ventajosa (en torno a 1:200). Sin embargo, dependen del buen funcionamiento de los protocolos de actuación y de la elevada incertidumbre en los sistemas de alerta temprana, debido a las características de la cuenca hidrográfica. Otra posibilidad, de coste superior, es la construcción de un muro o barrera permanente, cuyo impacto ambiental y paisajístico puede mitigarse mediante respuestas mixtas que combinen soluciones propias de la ingeniería con otras basadas en la naturaleza. Se completaría con la instalación de barreras automáticas (activadas mediante sensores o por la presión del agua) en los puntos de acceso. Por último, una ampliación resiliente del edificio sería mucho más costosa, pero solucionaría el problema proporcionando, además, un aumento de la superficie útil de la escuela. Sin embargo, está sujeta a las limitaciones que se desprenden del Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre.

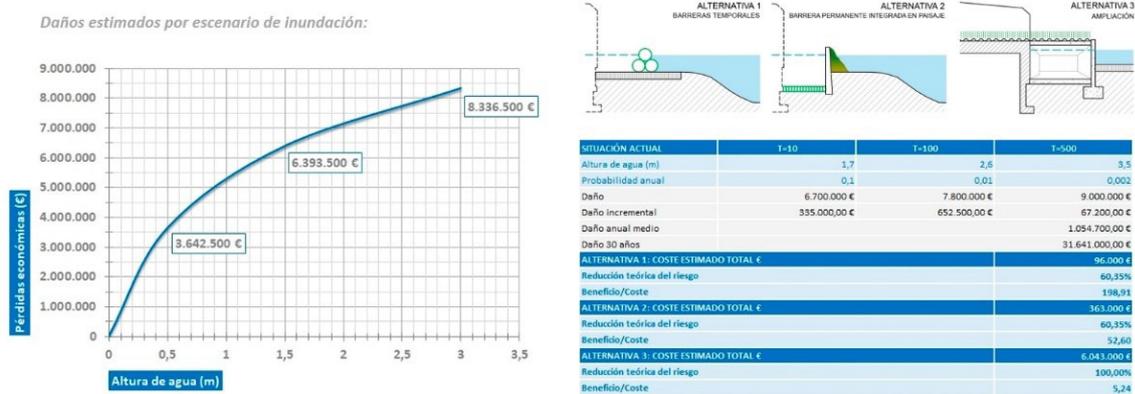


Figura 19. Caso piloto en Gijón: análisis coste/beneficio.

Polígono industrial de Marrón (Ampuero, Cantabria)

El Polígono Industrial de Marrón, especializado en la fabricación de componentes para el sector de la automoción, ocupa el espacio comprendido entre el meandro del río Asón a su paso por Ampuero (Cantabria, 4.219 habitantes) y la vía de ferrocarril Santander-Bilbao, una ubicación muy vulnerable ante inundaciones. La combinación entre las intensas precipitaciones y el aumento de las temperaturas que acelera el deshielo en las montañas ha generado avenidas recurrentes en los últimos años, en concreto el 31 de enero de 2015 y el 23 de enero de 2019.

A raíz del grave episodio de 2015, la principal empresa del polígono ha implementado un plan de contingencia basado en la monitorización constante del cauce del río, la capacitación específica para los profesionales y una serie de medidas de autoprotección (barreras temporales desmontables, sistemas antirretorno, bombas de achique y otras acciones puntuales) que permitió evitar el cese de actividad durante el evento de 2019.

La problemática se vincula al desbordamiento y las filtraciones a través del muro de contención que bordea la margen izquierda del río a su paso por la localidad. Como complemento a las medidas implantadas, es preciso garantizar su impermeabilización, así como estudiar la posibilidad de recrecerlo, valorando las posibles repercusiones mediante las correspondientes pruebas de modelización hidráulica. Se plantea también la construcción de arquetones drenantes que faciliten las labores de bombeo y permitan achicar el agua de manera eficaz, así como el cierre perimetral del polígono mediante barreras temporales y permanentes, para evitar el agua procedente de otros puntos en caso de eventos extremos.

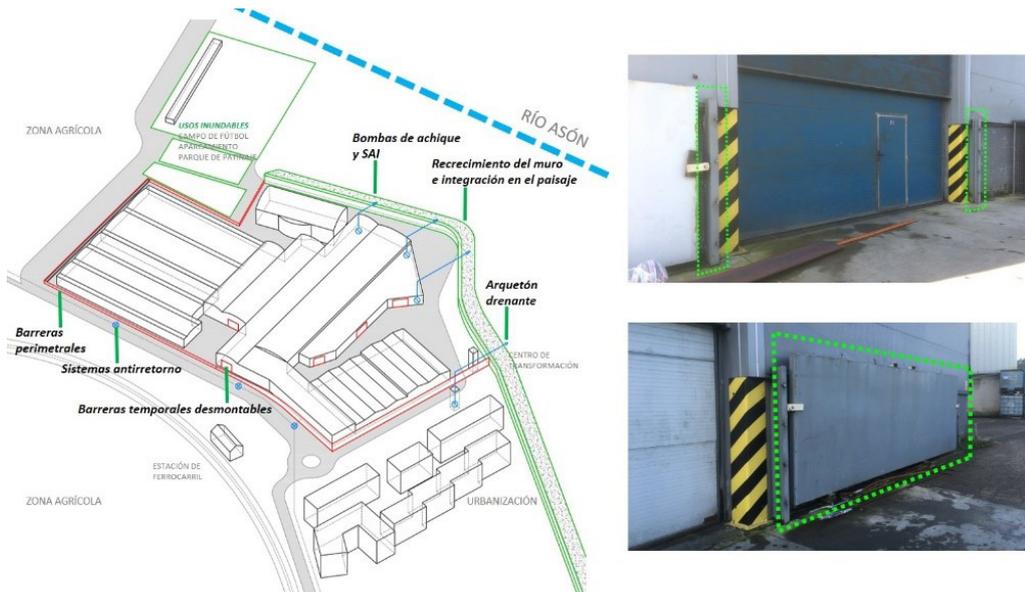


Figura 20. Caso piloto en Ampuero: esquema resumen de la propuesta. Detalle: barreras temporales desmontable.

En el episodio de 2015, el agua alcanzó los 1,70 metros en el interior de las naves, generando en la principal empresa del polígono unas pérdidas totales estimadas en 25 millones de euros, incluyendo los daños en los edificios, maquinaria, instalaciones, mercancías y aquellos derivados del cese de actividad. El programa de medidas implantado ha tenido un coste de 145.000 euros: si bien la protección que ofrece no es total y exige un importante esfuerzo de planificación y autoorganización, plantea una relación coste/beneficio claramente favorable (en torno a 1:600).

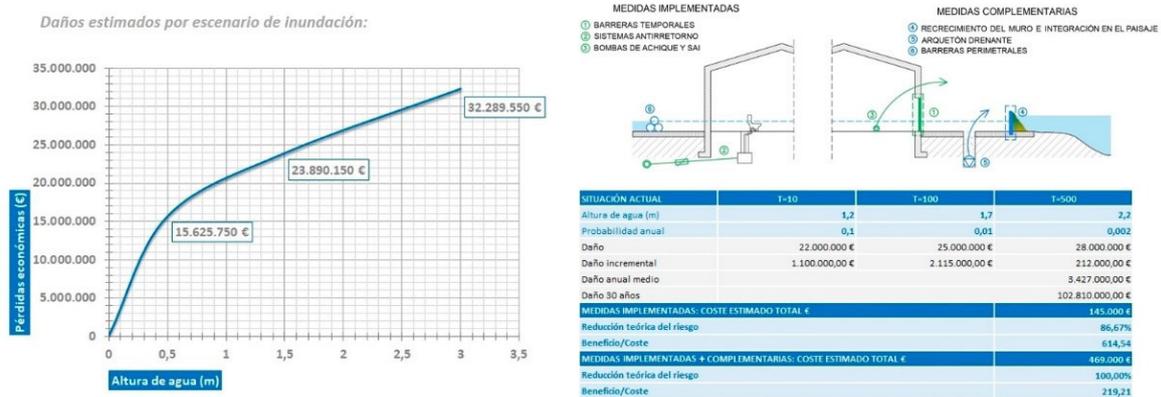


Figura 21. Caso piloto en Ampuero: análisis coste/beneficio.

Monasterio de Santa María de Huerta (Soria)

Santa María de Huerta (267 habitantes, Soria) experimenta desde la antigüedad, y a consecuencia de fenómenos pluviométricos muy localizados, el incremento repentino del caudal de los barrancos que alimentan el río Jalón a su paso por la localidad, generando inundaciones relámpago con graves consecuencias en el núcleo urbano. Transformaciones en la cuenca hidrográfica vinculadas a la agricultura, así como la presencia de obstáculos artificiales y obras hidráulicas de capacidad insuficiente, agravan en la actualidad el problema.

El Monasterio de Santa María de Huerta, ejemplo de arquitectura cisterciense, construido entre los siglos XII y XVI, declarado Bien de Interés Cultural con la categoría de monumento, es un elemento fundamental en el patrimonio cultural soriano y castellanoleonés. El colapso del denominado barranco del Tejar provocó el 23 de junio de 2015 la rotura del muro perimetral a su paso por el cementerio, si bien los daños en el monasterio fueron limitados. Un nuevo episodio el 9 de septiembre de 2018 derribó de nuevo el cerramiento, generando la irrupción violenta del agua y el arrastre de piedras y otros elementos. En el interior del edificio, el agua superó el metro de altura en la iglesia, refectorio, sala de conversos, claustros y otras estancias. Asimismo, la inundación afectó a diversos trabajos de acondicionamiento y excavación.

Aunque el Bien de Interés Cultural abarca la totalidad del recinto, el caso piloto plantea estudiar la compatibilidad entre protección del patrimonio e inundabilidad, diferenciando y priorizando los distintos elementos. Se propone evitar que el agua entre en contacto con el monasterio, el cementerio y los restos arqueológicos para garantizar su conservación, tolerando que parte del recinto se inunde de forma controlada en caso de avenida. Se impide, así, una rotura brusca del muro que aumente la velocidad del agua y los daños provocados, y se favorece la transparencia hidráulica, laminando la inundación para que el caudal llegue mermado al núcleo urbano.

Tras el episodio de 2018, se estableció un paquete de actuaciones de emergencia valorado en 400.000 euros, incluyendo, entre otras medidas de reparación y prevención, la instalación de compuertas en el muro perimetral para evacuar el agua del interior del recinto, la construcción de un muro metálico para evitar el contacto del agua con el edificio y la mejora del drenaje.



Figura 22. Santa María de Huerta: medidas implementadas.

6. Conclusiones

Los casos piloto de adaptación al riesgo de inundación permiten extraer las siguientes conclusiones de carácter general:

- En España, las inundaciones constituyen el riesgo natural que genera los daños más graves, en términos tanto materiales como de vidas humanas. En este contexto, la adaptación de edificios puede contribuir significativamente a disminuir las pérdidas económicas y a mejorar la seguridad de los usuarios.
- Estas medidas no deben entenderse de forma aislada, sino en el marco de estrategias integrales que permitan mejorar la resiliencia y afrontar los futuros condicionantes hidrometeorológicos. Como complemento a las transformaciones territoriales a largo plazo, la adaptación de edificios ofrece respuestas inmediatas frente a eventos para los que, en condiciones actuales, no existe capacidad de respuesta.
- En las ciudades y comunidades, la ordenación del territorio y la reducción de la exposición constituyen las principales medidas de prevención, pero la inversión en este tipo de medidas de carácter paliativo, relativamente económicas y sencillas, puede evitar daños muy elevados.
- La divulgación a todos los niveles es fundamental para fomentar la cultura del riesgo. Es preciso impulsar la responsabilidad compartida y el compromiso público y privado, implicando a todos los interesados y promoviendo incentivos que estimulen la adaptación.
- Los análisis coste/beneficio arrojan resultados muy favorables en determinadas tipologías, como los aparcamientos subterráneos, donde una inversión reducida evita muchos daños, o los centros de investigación y polígonos industriales, debido al alto impacto económico por el cese de actividad y porque albergan equipamientos de coste muy elevado.
- Es preciso adaptar también las infraestructuras estratégicas cuya inoperatividad puede comprometer el resto de la red urbana; las dotaciones de uso sanitario, residencial público y docente por la vulnerabilidad que plantean su uso y las características de sus ocupantes; los edificios institucionales donde se activan determinados protocolos de emergencia; o el patrimonio cultural, dada la importancia de sus valores simbólicos e identitarios.
- Los análisis coste/beneficio deben, por tanto, completarse con nuevos indicadores cualitativos y cuantitativos, e incorporar en la valoración los beneficios indirectos derivados de las medidas de adaptación, incluyendo nuevos valores ambientales, económicos y sociales.

Referencias

- CEPRI (2014). Comment saisir les opérations de renouvellement urbain pour réduire la vulnérabilité des territoires inondables face au risque d'inondation? Principes techniques d'aménagement.
- FEMA (2014). Homeowner's Guide to Retrofitting. Six Ways to Protect Your Home From Flooding, 3rd Edition.
- García García, M. (2016). Desmontando la paradoja de la sostenibilidad. Revista Ambienta. 116. 4-22.
- Marañón, B. (2019). Planificación y gestión del sistema hidrológico de Vitoria-Gasteiz en clave de infraestructura verde ("infraestructura azul"). Revista de Obras Públicas. 166. 21-26.
- Ollero, A. (2014). Guía metodológica sobre buenas prácticas en gestión de inundaciones. Manual para gestores. Contrato del río Matarraña.
- Perales-Momparler, S., Valls-Benavides, G. (2013). Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS). Revista Paisa. 24. 68-75.