



Infraestructura hídrica de las **Islas Canarias** riesgos naturales y fallos en cascada

Juan Carlos Santamarta Cerezal
Noelia Cruz Pérez
Jelena Koritnik
Mehdi Khoury
Megan Expósito Brazier

AVISO LEGAL / LIMITACIÓN DE USO

Esta obra se edita con fines de investigación, docencia y divulgación técnica. Los modelos, parámetros, cifras y ejemplos tienen carácter orientativo y dependen de hipótesis y datos de partida; no constituyen auditoría, certificación, dictamen pericial ni sustituyen proyectos, ingeniería de detalle, operación, mantenimiento, normativa aplicable o planes oficiales de emergencia.

La plataforma de simulación mencionada se facilita, cuando proceda, únicamente a entidades autorizadas mediante los correspondientes convenios/licencias del proyecto; este libro no incorpora ni distribuye software ni credenciales de acceso.

Cualquier aplicación práctica requiere verificación con datos oficiales actualizados, validación por profesionales habilitados y la intervención de los organismos competentes. En la medida legalmente admisible, los autores y entidades participantes no asumen responsabilidad por decisiones o actuaciones adoptadas exclusivamente sobre la base de esta obra sin la debida validación técnica y administrativa.

INFRAESTRUCTURA HÍDRICA DE LAS ISLAS CANARIAS: RIESGOS NATURALES Y FALLOS EN CASCADA

Juan Carlos Santamarta Cerezal

Noelia Cruz Pérez

Jelena Koritnik

Mehdi Khoury

Megan Expósito Brazier

INFRAESTRUCTURA HÍDRICA DE LAS ISLAS CANARIAS: RIESGOS NATURALES Y FALLOS EN CASCADA

Infraestructura hídrica de las Islas Canarias: riesgos naturales y fallos en cascada

© *Los autores*

Coordinación científica:

Dr. Juan Carlos Santamarta Cerezal

jcsanta@ull.es

Universidad de La Laguna

Edita:



Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Programa Marco de Investigación e Innovación Horizonte Europa de la Unión Europea, en el marco del proyecto GENESIS con la referencia 101157447 misión HORIZON-MISS-2023-CLIMA-01-02.



1ª Edición: marzo 2026

ISBN: 978-84-09-81944-7

Depósito legal: TF 21-2026

DOI: <https://doi.org/10.25145/b.2026.01>

Cómo citar este libro:

Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Koritnik, J., Khoury, M., Expósito-Brazier, M. (2026).

Infraestructura hídrica de las Islas Canarias: riesgos naturales y fallos en cascada. Universidad de La Laguna. <https://doi.org/10.25145/b.2026.01>

Foto de portada: Javier Durán @javiduranfotografo

Ninguna parte de este libro puede ser reproducida o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico o mecánico, incluido fotografías, grabación o por cualquier sistema de almacenar información sin el permiso escrito del coordinador de la obra.

Índice de contenidos

INTRODUCCIÓN	13
1. EL SISTEMA HIDRÁULICO CANARIO: ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO	17
1.1. Introducción	17
1.2. Objeto, alcance y criterios de lectura del «sistema hidráulico» ..	27
1.2.1. Alcance del «sistema hidráulico»	28
1.2.2. Variables operativas y umbrales mínimos	30
1.2.3. Criterios de interpretación funcional y operativa del sistema hidráulico	32
1.2.4. Criterios mínimos para inventario y modelado	34
1.3. La huella hídrica en Canarias: presión estructural y límites insulares	35
1.4. El papel del cambio climático como amplificador sistémico	37
1.5. Implicaciones para la planificación hidrológica y la gestión del agua	40
1.5.1. De la «infraestructura existente» a la «infraestructura funcional»	41
1.5.2. Priorización orientada a holgura y nodos críticos	42
1.5.3. Integración agua-energía en la transición	43
1.5.4. Gestión de sequías y emergencias	44
1.5.5. Calidad como condicionante de continuidad	44
1.5.6. Costa como zona funcional de tensión: planificación territorial y protección de activos	45
1.5.7. Datos, gobernanza y responsabilidad operativa	45
1.6. Escenarios multiamenaza y análisis dinámico: el valor del proyecto europeo GENESIS	46
1.6.1. Gestión: mantenimiento, pérdidas y capacidad de respuesta	48
1.7. Síntesis operativa y conclusiones	48
1.8. Referencias bibliográficas	50

2.	EL SISTEMA ENERGÉTICO EN CANARIAS Y SU RELACIÓN CON EL SUMINISTRO DE AGUA	57
2.1.	Estructura de la generación eléctrica en Canarias	57
2.2.	Energía como condición del suministro de agua	61
2.3.	Rasgos estructurales del sistema eléctrico insular canario	64
2.4.	Mix energético reciente y transición en curso	71
2.5.	Red de transporte y nodos: dónde se gana o se pierde la resiliencia	75
2.6.	El nexo agua-energía en Canarias: bidireccional, pero con dirección dominante	77
2.7.	Vulnerabilidades específicas que conectan energía y agua	78
2.7.1.	Doble dependencia: costa + energía	78
2.7.2.	Fallos en cascada	79
2.7.3.	Respaldo y autonomía: el margen temporal que evita el colapso	79
2.8.	Nodos y fallos: impacto energético en el ciclo integral del agua	80
2.9.	Referencias bibliográficas	81
3.	RIESGOS NATURALES EN CANARIAS: CLIMATOLOGÍA, PELIGROS Y EVENTOS HISTÓRICOS	89
3.1.	Introducción	89
3.2.	Climatología en Canarias	90
3.3.	Tipología y distribución de peligros. Eventos históricos	92
3.3.1.	Riesgos asociados a fenómenos meteorológicos adversos	93
3.3.2.	Movimientos sísmicos	103
3.3.3.	Erupciones volcánicas	105
3.3.4.	Movimientos gravitatorios	108
3.3.5.	Incendios forestales	109
3.4.	Lecciones para la infraestructura hídrica, vulnerabilidad y criterios de evaluación	111
3.5.	Referencias bibliográficas	113
4.	METODOLOGÍA DEL PROYECTO GENESIS PARA EVALUAR VULNERABILIDAD Y RESILIENCIA	119
4.1.	Introducción y alcance del enfoque del proyecto GENESIS	119
4.2.	Enfoque por islas y comparación de sistemas insulares	121

Índice de contenidos

4.3.	Definición operativa de vulnerabilidad y resiliencia	123
4.4.	Criterios de evaluación: escala de impacto, interdependencias y redundancias	123
4.5.	Construcción del inventario geoespacial de infraestructuras críticas	125
4.6.	Síntesis y aplicabilidad del enfoque	126
4.7.	Referencias bibliográficas	127
5.	MOTOR DE SIMULACIÓN DE FALLOS EN CASCADA: PRINCIPIOS Y CAPACIDADES	129
5.1.	Finalidad y alcance del motor de simulación	129
5.2.	Fundamentos del motor de simulación	131
5.3.	Escenarios de peligros y modificadores climáticos	132
5.4.	Capacidades exploratorias del motor	134
5.5.	Lectura de resultados y posibles aplicaciones	135
5.6.	Implicaciones para la evaluación de resiliencia	136
5.7.	Referencias bibliográficas	137
6.	PATRONES COMUNES DE VULNERABILIDAD Y RASGOS DE RESILIENCIA EN ISLAS VOLCÁNICAS	139
6.1.	Características sistémicas de los territorios volcánicos insulares	139
6.2.	Patrones comunes de vulnerabilidad	141
6.3.	Rasgos comunes de resiliencia	145
6.4.	Implicaciones para el análisis insular y perspectivas de aplicación	151
6.5.	Referencias bibliográficas	151
7.	LA PALMA: CAPTACIONES SUBTERRÁNEAS, CONDUCCIONES PRINCIPALES Y CONTINUIDAD DEL SERVICIO ...	155
7.1.	Marco físico e hidrogeológico del sistema hídrico	155
7.2.	Captaciones de agua subterránea	157
7.3.	Aprovechamientos superficiales	158
7.4.	Conducción y distribución: canales principales, impulsiones y redes	159
7.5.	Factores de vulnerabilidad de la infraestructura hídrica insular	162
7.6.	Modelo de fallos en cascada: estructura y criterios	165

Índice de contenidos

7.7.	Resultados de los escenarios de simulación	166
7.8.	Síntesis operativa y conclusiones	171
7.9.	Referencias bibliográficas	173
8.	GRAN CANARIA: OBRAS HIDRÁULICAS, DESALINIZACIÓN, REGENERACIÓN DE AGUAS Y FALLOS EN CASCAIDA	175
8.1.	Contexto climático, hidrogeológico y marco general	175
8.2.	La evolución de las captaciones hídricas: del agua subterránea a la no convencional	177
8.3.	Factores de vulnerabilidad de la infraestructura hídrica insular	181
8.4.	Modelo de fallos en cascada: estructura y criterios de simulación	182
8.5.	Resultados de los escenarios de simulación	184
8.6.	Síntesis operativa y conclusiones	186
8.7.	Referencias bibliográficas	186
9.	EL HIERRO: SEGURIDAD DE SUMINISTRO E INTEGRIDAD OPERATIVA DE UN SISTEMA HÍDRICO ENERGÉTICAMENTE DEPENDIENTE	189
9.1.	Contexto físico, hidrogeológico y evolución del abastecimiento ...	189
9.2.	Infraestructura hídrica y componentes del abastecimiento	191
9.3.	Limitaciones y condicionantes del sistema hídrico insular	195
9.4.	Modelo de fallos en cascada: estructura y criterios de simulación	197
9.5.	Resultados de los escenarios de simulación	200
9.6.	Conclusiones operativas para la resiliencia	204
9.7.	Referencias bibliográficas	206
10.	INFRAESTRUCTURA COSTERA Y DEPENDENCIA ENERGÉTICA: EL TALÓN DE AQUILES	207
10.1.	Concentración de nodos críticos en el litoral	207
10.2.	Exposición directa a temporales y procesos marinos	209
10.3.	Dependencia energética de las estaciones de bombeo	209
10.4.	Requisitos de respaldo: generación y redes protegidas	212
10.5.	El talón de Aquiles: doble dependencia del litoral y de la energía	212
10.6.	Referencias bibliográficas	213

11. SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA (SBN) ADAPTADAS A ISLAS VOLCÁNICAS	217
11.1. Enfoque general y papel de las Sbn en islas volcánicas	217
11.1.1. Encaje conceptual: Sbn estrictas y medidas complementarias	219
11.2. Diques subterráneos y regulación del flujo en acuíferos basálticos	219
11.3. Galerías filtrantes: captación controlada y regulación en medios altamente permeables	222
11.4. Captación de lluvia y soluciones extensivas de aprovechamiento ...	224
11.5. Recarga gestionada e infiltración en suelos volcánicos	227
11.6. Restauración de humedales y mejora de la calidad del agua	228
11.7. Integración con gemelo digital y monitorización inteligente	230
11.7.1. El gemelo digital como plataforma de simulación	231
11.7.2. Limitaciones y riesgos de la monitorización	232
11.8. Ruta de implantación en la Macaronesia	233
11.9. Cierre: límites y decisiones pendientes	235
11.10. Referencias bibliográficas	236
12. LECCIONES APRENDIDAS EN SISTEMAS HÍDRICOS INSULARES: VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL, GOBERNANZA Y DATOS	239
12.1. Introducción: qué significa aprender de un proyecto como GENESIS	239
12.2. Vulnerabilidad estructural de los sistemas hídricos insulares	239
12.3. Lección 1: La vulnerabilidad no es el evento: es la configuración	241
12.4. Lección 2: La dependencia energética es el multiplicador oculto ...	243
12.5. Lección 3: Las conducciones lineales son el eslabón más frágil	244
12.6. Lección 4: El almacenamiento es el único amortiguador real	245
12.7. Gobernanza fragmentada como amplificador del riesgo sistémico	247
12.8. Lección 5. La fragmentación institucional no es neutral	250
12.9. Lección 6: El legado histórico condiciona el presente más de lo esperado	251
12.10. Datos, preparación de inventarios y monitorización: de la brecha informativa al fallo operativo	252
12.11. Lección 7: El inventario no es un paso previo: es parte del análisis	254

Índice de contenidos

12.12. Lección 8: La monitorización existe, pero no está integrada	255
12.13. Prioridades operativas y estrategias de inversión para la protección de las infraestructuras hídricas	256
12.14. Lección 9. Las intervenciones pequeñas en los puntos correctos superan a las grandes inversiones dispersas	258
12.15. Transferibilidad del enfoque y condiciones para su replicación en otros archipiélagos	260
12.16. Lección 10. El método es transferible; los resultados, no	263
12.17. Conclusiones finales	264
12.18. Referencias bibliográficas	265
 13. GUÍA DE USO DE LA PLATAFORMA DE FALLOS EN CASCADA PARA LA PLANIFICACIÓN	 267
13.1. Introducción	267
13.2. Primeros pasos	267
13.3. Aplicación	271
13.4. Preparación de escenarios	273
13.5. Interpretación de los resultados	276
13.6. Priorización de nodos e identificación de medidas preventivas	280
13.7. Ejemplos reproducibles por isla	281
13.8. Consideraciones finales para la planificación estratégica	282
13.9. Referencias bibliográficas	283
 CONCEPTOS CLAVE Y TERMINOLOGÍA DEL SISTEMA HÍDRICO BAJO FALLOS EN CASCADA	 285
G.1 Alcance y criterios del glosario	285
G.2 Glosario de términos (orden alfabético)	286
G.3 Acrónimos y siglas	289

Introducción

Hay infraestructuras que solo se vuelven visibles cuando fallan. En Canarias pasa con el agua: llega, abres el grifo y todo funciona... hasta que deja de hacerlo. Sin embargo, detrás de esa normalidad opera una red extensa, dispersa y sometida a tensión permanente, construida para un territorio, como el canario, con fuertes pendientes, accesos difíciles y riesgos naturales que rara vez se presentan de forma aislada. Este libro parte de una premisa incómoda: el sistema hídrico insular no se explica como un inventario de obras, sino como una cadena de servicio cuya continuidad depende de acoplamientos técnicos, territoriales y organizativos que la planificación convencional tiende a ignorar.

La hidráulica insular se apoya en galerías, pozos, sondeos, conducciones, depósitos, estaciones de bombeo, plantas de tratamiento de aguas residuales y, en varias islas, en la desalinización de agua de mar como pieza estructural. Nada de eso funciona aislado. El agua se mueve porque hay energía disponible; se mantiene porque se puede acceder a la instalación; se recupera porque se diagnostica a tiempo y porque existe capacidad de respuesta. Cuando una perturbación afecta a un eslabón (una estación de bombeo, una línea eléctrica, una carretera clave, una instalación costera) el impacto rara vez queda confinado. Lo más frecuente es que se propague: baja presión, se pierde redundancia, se interrumpe el suministro, se tensiona la operación y, si se cruza un umbral, aparece lo que aquí llamamos fallo en cascada.

Hablar de fallos en cascada no es dramatizar; es describir una dinámica operativa conocida por quienes han gestionado incidentes reales. Un corte eléctrico puede dejar sin impulsión a una parte de la red; esa pérdida afecta a depósitos y sectores dependientes; el tiempo de respuesta crece si los accesos están dañados o si hay múltiples incidencias a la vez; el personal disponible se reduce cuando la disrupción también afecta a movilidad, comunicaciones o servicios básicos. En entornos insulares, donde la escala limita los márgenes y la redundancia no siempre es viable, la cascada no necesita un gran evento para arrancar. A veces, un fallo local en un punto clave, por su alta centralidad funcional, basta para desencadenar el problema.

Por eso la tesis de fondo es sencilla, aunque obliga a cambiar de marco: la seguridad hídrica en territorios insulares volcánicos no se mide solo por el balance anual entre oferta y demanda. Ese balance importa, pero no responde a la pregun-

ta que decide la estabilidad social: ¿puede el sistema seguir prestando el servicio cuando deja de ser «un día normal»? Prestación significa continuidad, presión, calidad, accesibilidad y capacidad de recuperación. Significa, también, aceptar que el agua es un servicio sociotécnico: depende de infraestructuras físicas, sí, pero también de energía, transporte, comunicaciones, organización institucional, operación diaria y toma de decisiones bajo incertidumbre.

El cambio climático entra aquí como un amplificador. No «crea» por sí solo los puntos débiles; lo que hace es estrechar márgenes, aumentar la frecuencia de condiciones exigentes y elevar la probabilidad de impactos simultáneos. Si el sistema ya opera cerca del límite (por dependencia de bombeos, concentración de nodos críticos en el litoral, envejecimiento de tramos estratégicos o escasez de almacenamiento operativo) el escenario futuro se vuelve menos tolerante a errores, retrasos y fallos menores. En ese contexto, la planificación basada únicamente en ampliar capacidad o en ajustar balances resulta insuficiente. Hay que entender dónde está el cuello de botella, qué sucede cuando cae y qué medidas pequeñas evitan pérdidas grandes de servicio.

Este libro propone un enfoque para hacerlo. Reúne, por un lado, una lectura estructural del sistema hídrico canario y su vínculo con el sistema energético y el territorio. Por otro, presenta una metodología aplicada, desarrollada en el marco del proyecto europeo GENESIS, que permite representar interdependencias, construir inventarios geoespaciales operativos y simular trayectorias de disrupción y recuperación bajo distintos peligros, con y sin modificadores climáticos. La simulación no pretende dar certezas deterministas. Su valor está en otra parte: permite explorar, comparar, priorizar. Permite ver la cascada antes de que ocurra en el sistema real.

Cómo se organiza el libro

La obra está pensada en bloques que se leen bien de forma continua, pero también funcionan por separado si el lector busca una pieza concreta.

En los capítulos iniciales se caracteriza el sistema hidráulico insular y su lógica de funcionamiento, con atención especial a las dependencias energéticas y a los condicionantes territoriales propios de islas volcánicas. A continuación, se desarrolla el panorama de amenazas relevantes: deslizamientos y desprendimientos de rocas, temporales costeros, lluvias extremas, incendios forestales y otros procesos capaces de afectar simultáneamente a infraestructuras y a la capacidad de respuesta.

El bloque metodológico explica el marco de evaluación empleado en el proyecto europeo GENESIS y el motor de simulación de fallos en cascada: cómo se construye el modelo, qué representa cada nodo, cómo se codifican dependencias,

cómo se introducen escenarios y cómo se interpretan los resultados. No se trata de «hacer software», sino de describir con transparencia qué hipótesis sostienen el análisis y qué límites tiene.

El bloque de aplicaciones en las islas seleccionadas, descende a estudios insulares completos, con configuraciones distintas, dependencias diferentes y vulnerabilidades propias, y permite comparar patrones de fragilidad y de resiliencia. Aparecen, así, rasgos repetidos: concentración costera de funciones críticas, necesidad de transportar agua a cotas altas, coincidencia espacial de conducciones en corredores expuestos, dependencia de estaciones de bombeo y sensibilidad del sistema a interrupciones eléctricas. El lector verá también que la resiliencia no es solo «más infraestructura»: en varias islas, tramos por gravedad, redundancias modestas bien situadas o una mejora de observabilidad pueden cambiar de forma radical la trayectoria de una disrupción.

Los capítulos finales abordan gobernanza, datos y criterios para priorizar inversiones, y proponen medidas que no dependen de grandes obras: análisis de criticidad, protección selectiva, respaldo energético donde realmente cambia el comportamiento del sistema, mejora de accesos, refuerzo de la monitorización y mejora de la coordinación entre actores.

Se incluye, además, una guía práctica para la reproducción de escenarios en la plataforma de simulación, cuando se dispone de acceso autorizado, con el objetivo de que el trabajo no quede como una fotografía, sino como un marco de aprendizaje y apoyo al análisis, siempre sujeto a validación técnica y al criterio de los organismos competentes.

A quién va dirigido y cómo leerlo

Este libro está dirigido a técnicos, gestores, planificadores, responsables públicos, personal de operación, investigadores y perfiles con responsabilidad institucional u operativa en agua, energía, protección civil, ordenación del territorio e infraestructuras críticas. No es un manual de cálculo hidráulico ni un compendio normativo. Es un diagnóstico sistémico con instrumentos aplicados, pensado para quienes necesitan responder a preguntas incómodas sin refugiarse en generalidades.

Si el lector busca una visión de conjunto, conviene empezar por los capítulos de caracterización y por el bloque metodológico. Si necesita aterrizar en un territorio concreto, los capítulos insulares funcionan de forma autónoma. Quien quiera ir un paso más allá, probar escenarios, contrastar medidas, discutir prioridades con una base común, encontrará en la guía de la plataforma un itinerario claro para trabajar con el modelo.

El agua en Canarias no es solo un recurso. Es un servicio crítico que aguanta, día a día, gracias a decisiones técnicas y organizativas que se toman en ámbitos distintos: energía, carreteras, protección civil, planificación territorial, operación y mantenimiento. Este libro intenta unir esas piezas sin maquillaje. No para «cerrar» el debate, sino para abrirlo donde de verdad importa: en los puntos donde el sistema se rompe cuando nadie lo esperaba, y en las intervenciones pequeñas, bien elegidas, que evitan que una disrupción puntual se convierta en una isla a oscuras y sin agua.

Juan Carlos Santamarta Cerezal
Catedrático de la Universidad de La Laguna
Coordinador científico

Capítulo 1

El sistema hidráulico canario: estructura y funcionamiento

Juan Carlos Santamarta Cereza

1.1. Introducción

El sistema hidráulico de las Islas Canarias no es un inventario de captaciones, depósitos y conducciones; es una cadena de servicio que transforma una geografía volcánica abrupta, una climatología irregular y una ocupación del territorio muy concentrada en costa, tanto en continuidad, presión y calidad en el punto de consumo. En Canarias, no basta con disponer de «recurso» en términos agregados; importa dónde está, cuándo está, con qué energía se mueve y qué vulnerabilidades comparten los eslabones. La escasez de aguas superficiales en Canarias, una constante subrayada desde la literatura técnica sobre la hidrología de las islas, y el peso estructural de las aguas subterráneas han empujado, durante décadas, hacia una cultura hidráulica singular, apoyada en captaciones mineras y en una logística de transporte y elevación de aguas que rara vez es neutral desde el punto de vista energético y ambiental.

La condición insular introduce un rasgo duro: cada isla funciona como un sistema acotado, con poca capacidad de apoyo externo inmediato cuando el fallo no es local sino sistémico. Además, el archipiélago es marcadamente heterogéneo. Las islas occidentales, más altas y húmedas, combinan recarga orográfica y captaciones en altura; las orientales, más bajas y secas (Figura 1.1), dependen en mayor medida de recursos no convencionales y de infraestructuras costeras. Esa diferencia no se queda en «clima»: se traduce en trazados, cotas, bombeos, necesidades de tratamiento y, en último término, en modos distintos de degradación del servicio.

El sistema hídrico canario está intrínsecamente ligado a su origen volcánico, donde las características geofísicas influyen de manera decisiva en la dinámica hidráulica. La interacción entre volcanismo y topografía genera comportamientos hidrológicos diferenciados. Por ejemplo, la configuración de las estructuras volcánicas condiciona directamente los patrones de recarga de los acuíferos, tal y como ponen de manifiesto estudios sobre procesos hidrogeológicos en islas volcánicas, que subrayan la influencia de los factores geológicos en la dinámica del agua (An-

drade et al., 2025). De forma análoga, la amplia variabilidad topográfica y climática del archipiélago da lugar a fluctuaciones significativas en la disponibilidad del recurso, determinadas tanto por la precipitación estacional como por los patrones climáticos de largo plazo (Santamarta et al., 2025).



Fuente: Santamarta, J.C. (2026)

Figura 1.1. Paisaje árido en la isla de Fuerteventura

La respuesta del sistema hidráulico canario ha sido, en buena medida, tecnológica y minera (Santamarta, 2009). Las galerías no son un detalle patrimonial: constituyen una red de captación con magnitudes excepcionales para la escala insular; en Tenerife se han inventariado longitudes perforadas superiores a 1.600 km, con trazados que pueden superar varios kilómetros por obra y una evolución desde la captura de rezumes y nacientes hacia la intercepción del acuífero principal (Gobierno de Canarias, 2011) (Figura 1.2). Los pozos, por su parte, han sido una pieza complementaria o dominante según la isla, condicionados por la accesibilidad al agua basal y por la geometría del relieve, con una tradición técnica específica y regulación asociada a la seguridad minera y al control del aprovechamiento (Gobierno de Canarias, 2012; Santamarta, 2009) (Figura 1.3).



Fuente: Santamarta, J.C. (2026)

Figura 1.2. Sección de una galería (mina de agua) en la isla de El Hierro

Ese sistema, sin embargo, no es estático ni inmune. Los manuales técnicos advierten síntomas de fondo: tendencia a la disminución del caudal total extraído (incluso con avance de galerías y aumento de pozos) y deterioro de calidad en determinados ámbitos, señales coherentes con escenarios de estrés por explotación y por cambios de recarga (Gobierno de Canarias, 2011; Braojos, 2023; Santamarta & Cruz Pérez, 2025).

El sector del agua en Canarias se caracteriza por operar como un sistema híbrido, en el que coexisten recursos naturales limitados, infraestructuras de captación y producción altamente especializadas y una logística intensiva en energía. A diferencia de sistemas continentales, la disponibilidad real de agua no viene determinada únicamente por la precipitación o la recarga, sino por la capacidad de transformar recurso potencial en servicio efectivo, manteniendo continuidad, presión y calidad bajo condiciones variables.

Desde el punto de vista de la oferta, el sistema se apoya en tres pilares principales:

1. Aguas subterráneas, captadas mediante galerías, pozos y sondeos, que siguen siendo estructurales en varias islas, especialmente en las occidentales,

aunque con señales de estrés cuantitativo y cualitativo en determinados ámbitos.

2. Recursos no convencionales, con un peso creciente de la desalinización de agua de mar, clave para el abastecimiento urbano y turístico en islas orientales y en sectores costeros.
3. Regeneración de aguas, particularmente relevante para el uso agrícola y como medida de adaptación frente a sequías prolongadas y reducción de recarga (Santamarta & Cruz Pérez, 2025).



Fuente: Santamarta, J.C. (2026)

Figura 1.3. Pozo-galería en la isla de El Hierro

La demanda se distribuye de forma heterogénea entre usos urbanos, turísticos y agrícolas, siendo este último sector el que mayor demanda de agua requiere (Santamarta & Cruz Pérez, 2025). Esta, además, presenta una marcada concentración espacial en la franja litoral y en los corredores metropolitanos. Este patrón intensifica la dependencia de infraestructuras costeras, impulsiones a cotas elevadas y redes presurizadas complejas, aumentando la sensibilidad del sistema a fallos energéticos, restricciones operativas o eventos extremos.

En relación con la oferta de agua, el archipiélago no es homogéneo. La diferencia entre islas occidentales, con mayor disponibilidad de precipitaciones y po-

1. El sistema hidráulico canario: estructura y funcionamiento

tencial orográfico, e islas orientales, más bajas y secas, aparece ya descrita en términos de posibilidades de captación y alumbramiento. En las orientales la presencia de galerías es históricamente marginal y dominan soluciones asociadas a pozos y pequeñas explotaciones, con aguas frecuentemente salobres en los niveles accesibles (galerías del macizo de Famara en Lanzarote), siendo la desalinización de agua de mar clave y suministradora de casi prácticamente todo el recurso hídrico, como ocurre en Lanzarote y Fuerteventura; en las occidentales, por el contrario, el modelo de galerías se vuelve una infraestructura vertebradora, complementada en algunas islas por la desalinización de agua de mar, como es el caso de las islas de El Hierro y Tenerife (Figura 1.4).



Fuente: Santamarta, J.C. (2026)

Figura 1.4. Depósito de aguas en la isla de El Hierro

Ese sesgo territorial se intensifica cuando se baja de «isla» a «vertiente». Barlovento y sotavento no son etiquetas paisajísticas: condicionan vegetación, recarga, localización de captaciones, trazados y, en último término, la vulnerabilidad operativa. Las series y observaciones históricas ilustran contrastes de pluviosidad muy marcados en espacios relativamente próximos, ligados a la orografía y a la dinámica atmosférica regional (Hausen, 1954).

En términos contemporáneos, esta heterogeneidad se mantiene y complica la planificación, porque el régimen pluviométrico responde de forma desigual entre

islas e incluso entre vertientes dentro de una misma isla, con implicaciones directas sobre recarga y gestión hidrológica (Santamarta & Cruz Pérez 2025).



Fuente: Santamarta, J.C. (2026)

Figura 1.5. Presa en la isla de La Gomera

A ese mosaico físico se superpone un cambio de fase climático: no solo se discute una posible reducción de la pluviometría, sino un aumento de la irregularidad estacional y de la concentración de la lluvia en eventos más intensos, alternando con periodos secos más largos. El resultado operativo es incómodo: captar y almacenar se vuelve más difícil, y la eficiencia hidrológica del episodio extremo puede ser baja por incremento de escorrentía, erosión y pérdidas rápidas de agua hacia el océano a través de los barrancos (Santamarta et al., 2025) (Figura 1.5). Además, la incertidumbre asociada a la proyección de la precipitación es mayor que la de la temperatura; aun así, la convergencia de modelos sugiere un escenario que obliga a revisar supuestos de planificación y, sobre todo, a aceptar que la estabilidad histórica ya no es una hipótesis segura (Santamarta et al., 2025).

En Canarias, el agua debe interpretarse como servicio crítico antes que como recurso aislado. Su continuidad no depende únicamente de la disponibilidad hidrogeológica, sino de un sistema interdependiente de infraestructuras y capacida-

des, que integra captación o producción, transporte, almacenamiento, tratamiento, distribución y retorno, con dependencias funcionales hacia energía, transporte, comunicaciones y capacidad operativa (personal, accesos, repuestos). Esta lectura es especialmente pertinente en territorios insulares volcánicos, donde la compartimentación hidrogeológica, la topografía abrupta y la distribución espacial de la demanda obligan a sistemas de conducción complejos y, a menudo, a transferencias intermunicipales que concentran criticidad en corredores y nodos concretos (Custodio, 2020; Poncela et al., 2022) (Figura 1.6).

La demanda de agua, por su parte, presenta una distribución poco «isla-céntrica» y muy costa-céntrica, con picos asociados a turismo (costa sur de Tenerife o la costa sur de Gran Canaria), corredores metropolitanos y regadíos intensivos (plátanos y aguacates principalmente). Este patrón genera cuellos de botella recurrentes: no necesariamente falta agua en términos generales, pero puede faltar servicio en nodos concretos (bombeos, depósitos cabecera, impulsiones litorales) o en ventanas temporales críticas.

De aquí se derivan dos ideas que guían el presente libro. Primero, el sistema hidráulico canario debe evaluarse por su funcionalidad, no por su mera existencia: un activo puede estar «en pie» y, sin embargo, no sostener la prestación mínima en modo degradado. Segundo, los riesgos relevantes rara vez actúan de forma aislada. Un temporal costero, un incendio, un deslizamiento o una avenida pluvial no solo dañan un elemento; pueden cortar accesos, limitar energía, dificultar reposiciones y activar fallos en cadena. En este marco, el análisis por redes e interdependencias no es una sofisticación académica: es una manera de priorizar holgura real y de identificar puntos donde una intervención pequeña evita una pérdida grande de servicio.

La pieza que termina de cerrar el sistema, y a veces lo tensiona, es la energía. Canarias opera con sistemas eléctricos insulares y una estructura de generación donde, en 2023, la participación de tecnologías térmicas siguió siendo dominante en el conjunto regional, con una cuota renovable global cercana a una quinta parte, variando de forma notable entre islas (Gobierno de Canarias, 2025). En este marco, la disponibilidad de agua y la continuidad del abastecimiento no dependen solo de la hidrología: dependen de la capacidad de bombeo, de la estabilidad eléctrica, del coste energético de elevar agua a cotas de consumo y de mantener presiones en redes complejas. Lo que en un esquema parecería «transporte» es, en la práctica, un consumo energético persistente y sensible a fallos, sobre todo cuando los activos críticos se localizan en litoral (desalinización de agua de mar, estaciones de bombeo, depósitos de regulación próximos a costa) o cuando los trayectos atraviesan laderas o barrancos con inestabilidad potencial.

La interdependencia agua–energía ha sido ampliamente documentada como una de las principales fuentes de fragilidad en sistemas insulares y aislados, esta cuestión se estudiará en profundidad en el capítulo 2 de este libro. La evidencia sintetizada mediante análisis de citas apoyadas muestra que los fallos eléctricos tienen una capacidad desproporcionada de degradar servicios hídricos cuando existen bombeos, tratamientos avanzados o producción no convencional de agua, incluso en ausencia de daño físico directo (Rinaldi et al., 2001). Este patrón, respaldado de forma recurrente en la literatura, refuerza la necesidad de incorporar la energía como condición habilitante primaria en la lectura del sistema hidráulico canario.



Fuente: Santamarta, J.C. (2026)

Figura 1.6. Conducciones de agua en el sur de la isla de Tenerife

La funcionalidad hidráulica hereda vulnerabilidades del sistema eléctrico: cualquier degradación del suministro, de la logística asociada o del acceso a activos clave se traduce en pérdida de presión, caudal o calidad en plazos cortos (Tabla 1.1). Este acoplamiento no se expresa solo en términos de consumo, sino de operabilidad: redundancias energéticas, autonomía temporal y capacidad de reconfiguración de la red condicionan la resiliencia del servicio. Esta relación pone de relieve variables estructurales que condicionan la disponibilidad hídrica, en las que la resiliencia de las infraestructuras depende del acceso continuo a la energía, especialmente ante la respuesta frente a peligros naturales como erupciones volcánicas o deslizamientos (Becerril et al., 2017; Sobradelo et al., 2011). De hecho, las consecuencias de la actividad volcánica suponen riesgos significativos no solo

1. El sistema hidráulico canario: estructura y funcionamiento

para los ecosistemas, sino también para las infraestructuras hidráulicas, reforzando que los sistemas hídricos no pueden desvincularse de las realidades geológicas y climáticas de su entorno (López-Saavedra et al., 2021). La evidencia comparada en islas volcánicas de la Macaronesia muestra que la dependencia energética del ciclo del agua constituye uno de los patrones regionales más robustos de vulnerabilidad, junto con la limitada capacidad de almacenamiento superficial y la exposición de infraestructuras lineales a laderas inestables (Custodio, 2020; Navarro Alvargonzález et al., 1993).

Tabla 1.1. Grados de dependencia energética del sistema hidráulico

Tipo de dependencia	Procesos asociados	Capacidad de almacenamiento	Vulnerabilidad
Continua	Bombeos, desalinización de agua de mar, tratamiento y regeneración de aguas	Muy baja	Muy alta
Intermitente	Maniobras, telecontrol	Media	Media
Con autonomía	Redes con depósitos	Alta	Baja-media

Fuente: elaboración propia (2026)

En paralelo, el cambio climático actúa como multiplicador de tensiones operativas más que como explicación única. El incremento de episodios extremos (olas de calor, viento, precipitación intensa, tormentas) y su traducción en alertas climáticas proyectadas introduce modificadores que pueden amplificar daño directo e indirecto sobre infraestructuras y servicios, afectando tanto a la exposición física (incendios, inundaciones, deslizamientos) como a la estabilidad operativa (fatiga de equipos, accesibilidad, continuidad eléctrica). En marcos metodológicos recientes aplicados a islas, estos modificadores se incorporan explícitamente como incrementos porcentuales del daño o de la severidad esperable en nodos afectados, permitiendo explorar trayectorias de disrupción y recuperación bajo horizontes temporales (Santamarta et al., 2025; Reyes Parrilla, 2025)

Bajo estas condiciones, la gestión del agua en Canarias se desplaza desde una lógica centrada en «obras» hacia una lógica centrada en continuidad del servicio, donde la prioridad es identificar nodos de alta centralidad, dependencias críticas, holguras (capacidad excedentaria, autonomía, redundancia operativa) y posibles propagaciones de fallo entre sectores. En consecuencia, la evaluación de vulnerabilidad y resiliencia exige un enfoque sistémico y dinámico que integre inventarios geoespaciales, interdependencias funcionales y análisis de escenarios multiamenaza, con capacidad de representar fallos en cascada y bucles de retroalimentación entre infraestructura y población (Rathnayaka et al., 2025; Borzì, 2023).

Dos conclusiones se derivan de esta estructura. Primero, el equilibrio oferta–demanda es un indicador insuficiente de seguridad hídrica: un sistema puede disponer de recurso agregado suficiente y, sin embargo, ser vulnerable por fallos en transporte, almacenamiento o energía. Segundo, la eficiencia física y operativa (pérdidas en red, redundancia activable, capacidad de maniobra) forma parte del propio recurso disponible; su deterioro reduce de forma inmediata la capacidad de respuesta del sistema frente a perturbaciones.

En ese punto entra la lógica del libro: si el sistema hidráulico canario ya es una arquitectura interdependiente, los riesgos naturales, deslizamientos, incendios forestales, inundaciones pluviales y costeras, oleaje extremo, no actúan como incidentes aislados, sino como detonantes con capacidad de propagación. Y, el cambio climático, lejos de ser un «fondo» abstracto, modifica probabilidades, intensidades y, sobre todo, condiciones de contorno (recarga, demanda, estrés energético) que determinan si una incidencia queda contenida o escala. La lectura que proponemos en este capítulo asume esa complejidad: describir el sistema hidráulico no como inventario de obras, sino como un mecanismo territorial donde fuentes de captación, redes de transporte, almacenamiento, saneamiento y regeneración de aguas se acoplan a un vector energético y a un régimen de riesgos en transición (Figura 1.7) (Santamarta et al., 2016; Santamarta et al., 2025).



Fuente: Santamarta, J.C. (2026)

Figura 1.7. Balsas en la isla de Gran Canaria para almacenar escorrentía

Este capítulo, en definitiva, fija el objeto y los criterios de lectura del «sistema hidráulico» en Canarias, propone variables operativas y umbrales mínimos, y prepara el terreno para el análisis posterior por islas y por escenarios multiamenaza. El foco no está en describirlo todo, sino en dejar un marco común que permita comparar, discutir decisiones y, sobre todo, entender por qué en un territorio insular la continuidad del agua es, en la práctica, continuidad de sistema.

1.2. Objeto, alcance y criterios de lectura del «sistema hidráulico»

En este capítulo se adopta una delimitación operativa: el «sistema hidráulico» se define por su capacidad de prestar servicio bajo condiciones normales y de fallo. El foco no es el ciclo hidrológico completo, sino la prestación (continuidad, presión/cota, calidad y accesibilidad) desde el punto de producción hasta el punto de consumo y, cuando procede, el saneamiento y la regeneración de aguas (Figura 1.8). Quedan fuera, salvo cuando actúan como dependencia o condicionante directo, la economía del agua, la evaluación ecosistémica¹ detallada y el análisis social exhaustivo, que se tratan en capítulos específicos o se incorporan mediante indicadores de exposición y vulnerabilidad.

Para asegurar consistencia comparativa entre islas, se emplean cuatro convenciones:

1. Cadena de servicio: producción–regulación–distribución–retorno, entendiendo «retorno» como saneamiento/depuración, regeneración y/o vertido controlado.
2. Criticidad: se interpreta como pérdida de función por debajo de umbrales mínimos (caudal, presión/cota, calidad o accesibilidad), no como daño físico en el activo.
3. Dependencias habilitantes: la energía, las comunicaciones/telecontrol y la logística se tratan como condiciones habilitantes cuando gobiernan la continuidad (bombeo, tratamiento, automatización, reposición).
4. Costa como zona funcional de tensión: no por su localización, sino por la concentración de activos expuestos a temporales, corrosión, intrusión marina, accesos limitados y vulnerabilidades eléctricas asociadas.

¹ Evaluación ecosistémica: proceso estructurado que recopila, sintetiza y evalúa críticamente la evidencia disponible sobre el estado y tendencias de los ecosistemas, los servicios que aportan (beneficios para las personas) y las causas, impactos e incertidumbres de su cambio, con el objetivo de informar decisiones de gestión y políticas públicas.



Fuente: Santamarta, J.C. (2026)

Figura 1.8. Canal de distribución de agua abandonado en la isla de Gran Canaria

En Canarias, la costa se trata como zona funcional de tensión. En un mismo corredor costero suelen coexistir activos de producción (especialmente desalinización de agua de mar), captaciones litorales, estaciones de bombeo principales, depuración y regeneración, centros de control y, con frecuencia, equipamiento eléctrico asociado o próximo. A esa concentración se suma una exposición combinada: temporales y elevación del nivel del mar, inundación marina puntual, aerosol salino y corrosión, intrusión salina, y pérdida de accesibilidad por daños en viales o por condiciones de operación inseguras.

El efecto relevante no es solo el daño directo, sino la indisponibilidad simultánea de agua, energía y logística, que reduce drásticamente la capacidad de maniobra y acelera fallos en cadena.

1.2.1. Alcance del «sistema hidráulico»

Como se ha comentado, en este libro, «sistema hidráulico» no equivale a hidrología, ni a recursos naturales. Se acota como un sistema integrado de prestación de servicio, con tres capas:

1. El sistema hidráulico canario: estructura y funcionamiento

Capa física (activos)

Fuentes, que incluyen: galerías, pozos y sondeos, captaciones litorales (del acuífero costero), desalinización de agua de mar (Figura 1.9), presas, balsas y depósitos; transporte y distribución, formado por conducciones y canales, estaciones de bombeo, válvulas, sectorización y depósitos reguladores; y saneamiento y regeneración de aguas, que integra las redes, estaciones de bombeo de saneamiento, depuración y regeneración de agua, impulsiones y el almacenamiento de agua regenerada.



Fuente: Santamarta, J.C. (2026)

Figura 1.9. Bastidor de ósmosis inversa en una planta desalinizadora de agua de mar en la isla de El Hierro

Capa operativa (reglas de funcionamiento)

Régimen de presiones, turnos, sectorización, bombeos en cascada, reservas mínimas, protocolos de emergencia. En Canarias, un activo puede estar físicamente disponible y, aun así, el servicio caer si la regla operativa deja de ser sostenible (energía, acceso, presión mínima o calidad).

Capa habilitante (dependencias críticas)

La energía aparece como dependencia dominante en gran parte del archipiélago: sin suministro eléctrico, el agua deja de moverse en tramos esenciales (producción, impulsiones, tratamiento y control). No se pretende modelar todo el sistema energético, sino lo imprescindible para entender el riesgo: dependencia del suministro, respaldo, vulnerabilidad de nodos eléctricos próximos, exposición costera de equipos y restricciones de acceso/logística. En Canarias esto no es marginal: el sistema eléctrico se organiza en seis sistemas aislados, de modo que un evento severo no se amortigua con una red continental.

1.2.2. Variables operativas y umbrales mínimos

La lectura del sistema requiere explicitar umbrales (Tabla 1.2). Se proponen cuatro familias de umbrales mínimos, adaptables por isla y subsector:

- Continuidad: autonomía temporal aportada por depósitos y balsas, y capacidad de sostener el servicio sin reposición inmediata.
- Capacidad: margen entre caudal disponible y demanda punta/estacional, incluyendo pérdidas y restricciones de transporte.
- Presión y cota: mantenimiento de presión mínima en redes presurizadas y capacidad de elevar e impulsar agua hacia cotas de consumo, considerando puntos de estrangulamiento.
- Calidad operativa: límites que condicionan potabilización, mezcla o uso agrícola (salinidad, nitratos, turbidez, episodios puntuales de contaminación).

Estos umbrales separan infraestructura «existente» de infraestructura «funcional» y explican por qué perturbaciones de apariencia local pueden producir disrupciones extensas cuando afectan nodos con baja holgura o alta concentración de flujos.

Tabla 1.2. Umbrales mínimos operativos del sistema hidráulico (estructura propuesta)

Familia de umbral	Variable operativa (símbolo)	Definición operativa (cómo se calcula /observa)	Unidad	Umbral mínimo (definición, no valor)	Fuente de dato típico	Nota de uso en Canarias
Continuidad	Autonomía de almacenamiento (T _{aut})	Tiempo que el sistema mantiene servicio sin producción o sin impulsión (depósitos/ balsas/depósitos de cabecera)	h, d	$T_{aut} \geq T_{crit}$ (definido por sector y estacionalidad)	Inventario de depósitos, niveles operativos, telecontrol, reglas de operación	Variable «puente» entre fallo eléctrico y pérdida de suministro; distingue islas con regulación real de las que viven al día

1. El sistema hidráulico canario: estructura y funcionamiento

Tabla 1.2. Umbrales mínimos operativos del sistema hidráulico (estructura propuesta)

Familia de umbral	Variable operativa (símbolo)	Definición operativa (cómo se calcula /observa)	Unidad	Umbral mínimo (definición, no valor)	Fuente de dato típico	Nota de uso en Canarias
Continuidad	Índice de reposición (R_rep)	Capacidad de reponer el volumen consumido en ventana crítica (producción + impulsión efectiva)	%	$R_{rep} \geq 100\%$ en ventana crítica	Producción /caudales medidos, horarios de bombeo	Captura el cuello de botella de impulsiones/cotas, aunque «haya agua» en origen
Capacidad	Margen de producción (M_prod)	(Producción efectiva – demanda punta) / demanda punta	%	$M_{prod} \geq M_{min}$	Producción real, demanda sectorial, pérdidas	Se evalúa por periodos (verano, picos turísticos, campañas agrícolas)
Capacidad	Margen de transporte troncal (M_tr)	Capacidad hidráulica troncal disponible vs caudal requerido en punta	%	$M_{tr} \geq M_{min}$	Modelos hidráulicos, aforos, PRV, sectorización	Relevante en corredores lineales con pocos bypass (típico insular)
Presión /cota	Presión mínima en red (P_min)	Presión mínima en nodos de servicio en hora punta	mca / bar	$P \geq P_{min}$ en nodos críticos	SCADA ² , campañas de presión, válvulas	Umbral que explica «apagones de agua» sin rotura física: cae presión, cae servicio
Presión /cota	Altura disponible de impulsión (H_disp)	Cota alcanzable con bombeo/ energía disponible para alimentar depósitos/zona alta	m	$H_{disp} \geq H_{req}$	Curvas de bomba, energía, pérdidas, operación	Captura el patrón «costa funciona, medianías no» tras degradación eléctrica
Calidad	Cumplimiento potabilización (Q_pot)	Capacidad de cumplir calidad objetivo en mezcla/ tratamiento bajo régimen perturbado	cumple/ no	$Q_{pot} =$ «cumple» en ventana crítica	Analíticas, control de proceso	Útil cuando la restricción no es volumen sino mezcla (salinidad/ nitratos/turbidez)
Calidad	Robustez de mezcla (R_mix)	Capacidad de sustituir una fuente sin salir del rango de calidad de uso.	%	$R_{mix} \geq R_{min}$	Balance de fuentes, conductividad, nitratos	En sequía o intrusión, el sistema se «estrecha» por calidad antes que por caudal
Accesibilidad	Acceso operativo a activo (A_op)	Posibilidad considera acceso físico, seguridad y logística para operar/ reparar	sí/no	$A_{op} =$ «sí» para nodos críticos	Vías, riesgos, protocolos, disponibilidad de repuestos	En temporales/ incendios/ deslizamientos, la indisponibilidad es logística, no hidráulica
Energía habilitante	Cobertura eléctrica funcional (E_cov)	Disponibilidad de energía para procesos críticos (bombeo, tratamiento, control)	% / h	$E_{cov} \geq E_{crit}$ o $\text{respaldo} \geq T_{crit}$	Operador eléctrico, cuadros, grupos, combustible	En desalinización de agua de mar, el umbral energético es prácticamente umbral hídrico

² SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition (Control Supervisory y Adquisición de Datos). Sistema de telecontrol y monitorización industrial que permite supervisar procesos en tiempo real, registrar datos, generar alarmas y operar equipos e infraestructuras a distancia (p. ej., bombes, válvulas, depósitos, estaciones de tratamiento).

Tabla 1.2. Umbrales mínimos operativos del sistema hidráulico (estructura propuesta)

Familia de umbral	Variable operativa (símbolo)	Definición operativa (cómo se calcula /observa)	Unidad	Umbral mínimo (definición, no valor)	Fuente de dato típico	Nota de uso en Canarias
Control/operación	Observabilidad mínima (O_min)	Capacidad de monitorizar y maniobrar (telecontrol, instrumentación básica)	sí/no	O_min = «sí» en nodos críticos	SCADA, inventario de instrumentación.	Sin observabilidad, sube el «tiempo hasta diagnóstico» y se amplifica la cascada

Fuente: elaboración propia (2026)

Nota de aplicación: los umbrales numéricos (T_crit, M_min, P_min, etc.) se parametrizan por isla y por subsector (abastecimiento urbano, agrícola, turístico).

1.2.3. Criterios de interpretación funcional y operativa del sistema hidráulico

Se proponen cuatro lecturas simultáneas. Son filtros para no confundir complejidad con conocimiento (ver Tabla 1.3).

(a) Lectura funcional (cadena de servicio)

Cada isla se interpreta como una secuencia: producción, regulación, distribución y retorno. En esa secuencia, los puntos de ruptura típicos no son aleatorios: estaciones de bombeo, ladera y cruces de barranco, tramos costeros, y nodos donde confluyen varias rutas.

Tabla 1.3. Tipos de nodos críticos en el sistema hidráulico canario

Tipo de nodo	Función en la cadena	Modos de fallo típicos	Efecto en cascada (qué arrastra)	Indicadores proxy ³ (para inventario rápido)	Medidas de reducción de criticidad
Producción subterránea (pozos/ sondeos/ galerías)	Aporta caudal base; regula parcialmente	Caída de caudal, salinización/ intrusión, contaminación puntual, fallo de bombeo	Pérdida de mezcla; presión/cota insuficiente; cambio de calidad de red	Caudal histórico, conductividad, energía por m³, dependencia de bombeo	Redundancia de fuentes, gestión de mezcla, protección sanitaria, respaldo energético selectivo
Desalinización de agua de mar	Producción intensiva y costera; estabiliza oferta	Fallo eléctrico, temporal costero, indisponibilidad de membranas/ químicos, toma afectada	Caída brusca de producción; presión urbana; restricciones por turnos	kWh/m³, dependencia eléctrica, exposición litoral, stock crítico	Respaldo/arranque negro parcial, elevación de equipos críticos, protección frente a inundación/ corrosión, contratos de suministro

³ Indicador proxy: medida indirecta que se utiliza como sustituto de una variable o fenómeno difícil de observar o cuantificar de forma directa, bajo el supuesto de que mantiene una relación consistente con aquello que se pretende estimar.

1. El sistema hidráulico canario: estructura y funcionamiento

Tabla 1.3. Tipos de nodos críticos en el sistema hidráulico canario

Tipo de nodo	Función en la cadena	Modos de fallo típicos	Efecto en cascada (qué arrastra)	Indicadores proxy ³ (para inventario rápido)	Medidas de reducción de criticidad
Estación de bombeo troncal	Eleva a depósitos y zonas altas	Fallo eléctrico, avería mecánica, inundación, acceso bloqueado	Desconexión de cotas; vaciado de depósitos; efecto «isla dentro de la isla»	Potencia instalada, nº bombas, bypass inexistente, ruta única	Redundancia N+1, bypass hidráulico, autonomía por depósito, mantenimiento por criticidad
Depósito cabecera / regulación	Amortigua variabilidad; sostiene continuidad	Vaciado por no reposición, fallo de válvulas, contaminación	Caída de presión; cortes sectoriales; pérdida de capacidad de maniobra	Volumen útil, autonomía estimada, número de sectores alimentados	Reglas de reserva mínima, sectorización, interconexiones, control de calidad
Conducción troncal / corredor lineal	Transporte principal en orografía compleja	Rotura, deslizamiento, incendio, socavación, vandalismo	Aislamiento de sectores; sobrecarga de rutas alternativas	Longitud sin redundancia, cruces de barranco, laderas inestables	Duplicación selectiva, protección de cruces, válvulas de seccionamiento, rutas alternativas
Nodo de sectorización (PRV/ valvulería clave)	Control de presiones y reparto	Fallo de maniobra, telecontrol caído, error operativo	Pérdidas de presión; reventones; pérdida de servicio en subzonas	Nº usuarios afectados, ausencia de control alternativo	Estandarización, telecontrol mínimo, procedimientos, formación y simulacros
EDAR / regeneración	Cierra ciclo; aporta recurso para riego	Fallo eléctrico, sobrecarga hidráulica, vertido no conforme	Pérdida de reutilización; presión sobre recursos convencionales; conflicto social	Caudal regenerado, cumplimiento, dependencia energética	Redundancia de líneas, almacenamiento de agua regenerada, planes de contingencia
Impulsión de saneamiento	Evita vertidos; habilita depuración	Fallo eléctrico, bloqueo, inundación	Vertido; cierre de playa; impacto reputacional y sanitario	Grupos críticos, nivel de aliviaderos, acceso	Respaldo energético, elevación de cuadros, alarmas, planes de emergencia
Nodo costero expuesto	Concentra activos + energía + accesos	Inundación marina, corrosión acelerada, temporal, intrusión	Indisponibilidad simultánea (agua + energía + logística)	Cota, distancia al mar, historial de temporales, corrosión	Diseño defensivo, relocalización puntual, protecciones, redundancia interior

Fuente: elaboración propia (2026)

(b) Lectura topográfica operativa (gravedad vs. presión)

La diferencia entre una red por gravedad y una red presurizada no es estética. En la primera, el fallo tiende a ser local y «lento»; en la segunda, aparece el fenómeno incómodo: una interrupción pequeña puede dejar sin agua cotas altas completas, porque la presión mínima desaparece. Esta lectura es especialmente relevante en islas con escalones altitudinales intensos y corredores estrechos.

(c) Lectura de criticidad espacial (costa como zona de tensión)

Resulta tentador pensar que lo crítico está «en la cumbre» o en las «medianías», donde se extraen la mayoría de los recursos subterráneos. No siempre. La costa concentra, por economía y logística, activos muy sensibles: desalinización de agua de mar, pozos y sondeos costeros, bombeos principales, EDAR y emisarios. Con temporales e inundaciones costeras, el problema no es solo el daño directo: es la pérdida de accesibilidad, la corrosión acelerada, la intrusión marina y la indisponibilidad eléctrica.

(d) Lectura energética (electricidad como condición de continuidad)

No es suficiente señalar que el sistema «depende de la energía»; es necesario concretar la forma de esa dependencia y los procesos cuya funcionalidad queda condicionada por ella.

- Dependencia continua: bombeos troncales, desalinización de agua de mar, depuración avanzada.
- Dependencia intermitente: maniobras, telecontrol, bombeos de apoyo.
- Dependencia con almacenamiento: depósitos que otorgan autonomía temporal (minutos, horas, días; varía por isla y por sector).

El marco energético insular aporta dos ideas operativas: la primera el balance energético muestra una estructura con flujos cuantificables, y la segunda es que la evolución anual permite situar la magnitud del problema sin recurrir a intuiciones.

Además, hay un caso que rompe la separación «agua, por un lado, energía por otro»: la hidroeléctrica usa depósitos y bombeo como almacenamiento energético; es literalmente agua trabajando como batería, como el caso de la hidroeléctrica de la isla de El Hierro y la futura central hidroeléctrica reversible Chira-Soria en Gran Canaria.

1.2.4. Criterios mínimos para inventario y modelado

Para que el presente capítulo no quede en una mera descripción, se fijan criterios que luego se traducen en inventario geoespacial y en nodos/enlaces del motor:

- **Nodo:** activo cuya pérdida altera el estado del sistema (producción, presión, calidad o continuidad) más allá de un umbral.

- **Enlace:** tramo cuya pérdida desconecta nodos o reduce capacidad por debajo del mínimo operativo.
- **Redundancia:** no es «tener dos tuberías»; es poder sostener el servicio con una ruta alternativa sin reducir presión, calidad y energía disponibles.
- **Tiempo de autonomía:** capacidad de seguir prestando servicio ante fallo energético/operativo usando almacenamiento (depósitos/balsas) y manobra.

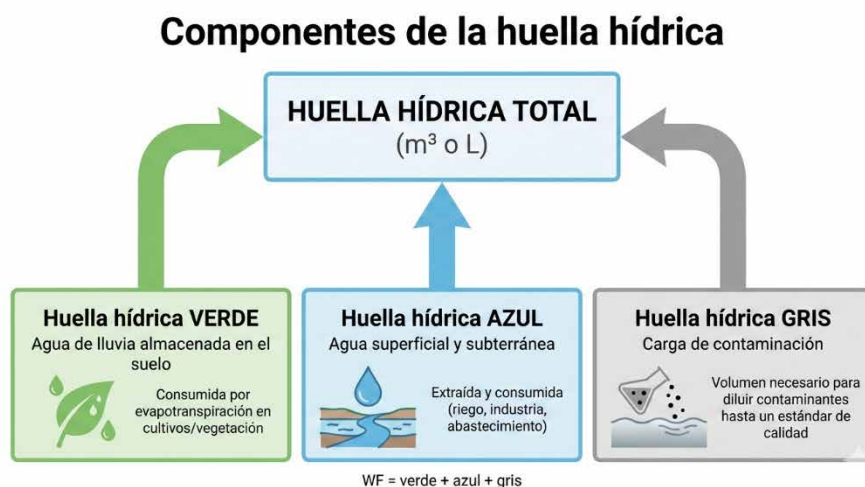
Este marco evita dos errores frecuentes: declarar «resiliencia» por mera existencia de infraestructuras, y subestimar la cascada porque el daño inicial parezca localizado.

1.3. La huella hídrica en Canarias: presión estructural y límites insulares

La lectura del sistema hidráulico canario gana precisión cuando, además de describir captaciones, conducciones y plantas, se incorpora la huella hídrica⁴ como indicador de presión real: no solo «cuánta agua se produce o se extrae», sino qué volumen total se moviliza (directa e indirectamente), qué pérdidas se asumen y qué impactos se desplazan dentro de un territorio cerrado y fragmentado (Hoekstra et al., 2011; Cruz-Pérez & Santamarta, 2021) (Figura 1.10).

En Canarias esa mirada es casi obligatoria, porque la escasez no es coyuntural sino estructural. Hay islas como Fuerteventura con precipitaciones medias anuales del orden de 119 mm (Cruz-Pérez & Santamarta, 2021) y, cuando la demanda crece, el sistema no «compensa» con trasvases internos como haría en un continente; sino que compensa con más bombeo, más elevación, más transporte y más desalinización de agua de mar, es decir, con más energía y más emisiones. Ahí la huella hídrica se vuelve incómoda, pero útil: pone números a lo que el relato técnico a veces suaviza.

⁴ Huella hídrica: indicador que cuantifica el volumen total de agua dulce asociado a un producto, actividad, persona, empresa o territorio, sumando el uso directo e indirecto a lo largo de toda la cadena (producción, transformación y consumo). Se desagrega en agua verde (lluvia almacenada en el suelo y usada por la vegetación), agua azul (agua superficial y subterránea extraída y consumida) y agua gris (volumen necesario para diluir contaminantes hasta cumplir un estándar de calidad aceptado por la normativa vigente aplicable en cada caso).



Fuente: elaboración propia (2026)

Figura 1.10. Componentes de la huella hídrica⁵

En turismo, por ejemplo, las estimaciones publicadas sitúan el consumo turístico en Canarias en un rango amplio (aprox. 300–600 L/turista y día), con valores medios estimados en torno a 300–400 L por pernoctación según contexto y tipología de alojamiento; en todo caso, el valor de 600 L/turista y día debe interpretarse como umbral máximo en escenarios de alta dotación de servicios y/o dotaciones en origen (Ruiz de la Rosa et al., 2019; Observatorio Turístico de Canarias, 2022). Dentro del hotel el reparto típico no deja dudas sobre dónde se esconde el volumen: lavandería ~47 %, cocinas ~27 %, habitaciones ~14 %, piscinas ~5 %, riego ~4 % (Cruz-Pérez & Santamarta, 2021). No es solo el «grifo»; es el servicio completo. Y cuando se añaden actividades de fuerte carga hídrica, como el golf, aparecen rangos anuales de 300.000 a 700.000 m³/campo, con dependencia estacional y espacial (Cruz-Pérez & Santamarta, 2021).

En agricultura ocurre otra paradoja típica de los sistemas insulares: mejoras de eficiencia pueden reducir el consumo unitario, pero no siempre reducen la presión total si se traduce en expansión o en cambio a cultivos más demandantes; la hue-

⁵ En el enfoque de la Water Footprint Network, la huella hídrica total se expresa como la suma de huella verde, azul y gris (m³ o L). La huella azul se refiere al consumo consuntivo de agua superficial y subterránea (no a toda el agua extraída), la huella verde al uso de agua de lluvia almacenada en el suelo consumida por evapotranspiración, y la huella gris a un volumen equivalente necesario para asimilar una carga contaminante hasta un estándar de calidad. La comparación entre estudios exige mantener la misma unidad funcional, límites del sistema y criterios de calidad (Hoekstra et al., 2011; Cruz-Pérez & Santamarta, 2021).

lla hídrica sirve precisamente para detectar ese efecto rebote y evitar conclusiones complacientes (Hoekstra et al., 2011; Cruz-Pérez & Santamarta, 2021).

A esto se suma un factor importante que es que, la huella hídrica en Canarias está acoplada a una huella de carbono muy visible. Las IDAM (Instalación desalinizadora de agua de mar) muestran intensidades de huella de carbono⁶ por volumen captado en el rango aproximado 0,48–5,15 kgCO₂eq/m³ (por ejemplo, Salinetas en la isla de Gran Canaria baja de 0,64 a 0,48 kgCO₂eq/m³ entre 2019–2020; Majanicho, en Fuerteventura, sube de 4,68 a 5,15 kgCO₂eq/m³), y además concentran emisiones absolutas relevantes: Salinetas pasa de una producción de agua de 12,767 hm³ en 2019 a 13,58 hm³ en 2020, con huellas de carbono totales de 8.153,89 tCO₂eq y 6.563,81 tCO₂eq, respectivamente (Cruz-Pérez & Santamarta, 2021).

La huella de carbono también revela que no todo lo «subterráneo» es automáticamente eficiente: en pozos y sondeos la intensidad puede variar brutalmente, desde 0,20 hasta 77,52 kgCO₂eq/m³, porque la energía bombeada no escala linealmente con el caudal y entran consumos fijos y condiciones de explotación, como por ejemplo la altura a la que se debe bombear el agua (Cruz-Pérez & Santamarta, 2021).

Y, para concluir, la huella hídrica obliga a mirar lo que se suele llamar «ineficiencias del sistema»: pérdidas en redes que alcanzan 6–19 % según ámbitos analizados o valores del orden del 5 % en casos concretos, que no son un detalle contable sino agua azul que se moviliza, se trata y se pierde antes de generar servicio (Cruz-Pérez & Santamarta, 2021).

En conjunto, integrar huella hídrica (y su traducción energética y climática) en el presente capítulo no añade un «tema nuevo»; afila el diagnóstico del sistema hidráulico canario: muestra que el margen no está en producir indefinidamente, sino en recortar presión estructural (demanda, pérdidas, intensidad energética) y en evitar que la seguridad hídrica se compre, silenciosamente, con más carbono (Hoekstra et al., 2011; Cruz-Pérez & Santamarta, 2021).

1.4. El papel del cambio climático como amplificador sistémico

En Canarias, el cambio climático debe leerse como un amplificador sistémico porque actúa sobre un sistema hidráulico ya condicionado por tres rasgos estruc-

⁶ Huella de carbono: indicador que estima la cantidad total de gases de efecto invernadero emitidos directa e indirectamente por una actividad, producto, organización o territorio a lo largo de su ciclo de vida, expresada como kilogramos o toneladas de CO₂ equivalente (CO₂eq), agregando gases como CO₂, CH₄ y N₂O según su potencial de calentamiento global.

turales: (1) cierre territorial y dependencia de infraestructuras lineales, (2) fuerte acoplamiento agua–energía, y (3) desajustes persistentes entre localización de recursos, demanda y capacidad de transporte. En este marco, el vector climático no «crea» por sí solo la vulnerabilidad, pero reduce márgenes operativos y aumenta la probabilidad de que se superen umbrales funcionales (continuidad, presión/cota, calidad y accesibilidad), con propagación de efectos hacia otros servicios.

La literatura reciente respalda de forma consistente que el cambio climático actúa principalmente como amplificador de vulnerabilidades sistémicas en infraestructuras críticas, más que como causa aislada de fallo (Tabla 1.4). Estudios comparativos en sistemas hídricos complejos muestran que los impactos más severos se producen cuando los extremos climáticos interactúan con dependencias preexistentes, baja redundancia y márgenes operativos reducidos, reforzando la necesidad de enfoques que integren interdependencias y umbrales funcionales (Setola et al., 2016).

El primer mecanismo de amplificación es la alteración de la recarga efectiva y del balance hídrico, que intensifica la presión sobre acuíferos y eleva el riesgo de sobreexplotación y de deterioro cualitativo en zonas sensibles (p. ej., intrusión marina o salinización en sectores costeros). En las islas, «menos lluvia» no es solo menos recurso: implica menor recarga y mayor fragilidad del almacenamiento subterráneo, precisamente el componente que aporta estabilidad interanual al sistema. Esta dinámica condiciona la capacidad de respuesta durante sequías y aumenta la dependencia de recursos no convencionales, como la desalinización de agua de mar, en escenarios de demanda rígida (Santamarta & Cruz Pérez, 2025).

Tabla 1.4. Mecanismos de amplificación climática en el sistema hidráulico

Mecanismo	Variable climática	Impacto directo	Amplificación
Hidrológico	Menor recarga de acuíferos	Menos recurso	Mayor dependencia de recursos no convencionales
Operativo	Olas de calor	Fatiga en equipos	Fallos energéticos
Espacial	Episodios costeros	Daño localizado	Cascada funcional
Estructural	Sequías prolongadas	Estrés en la red	Déficit acelerado

Fuente: elaboración propia (2026)

La disminución de las reservas de agua dulce no solo reduce la recarga subterránea, como se ha comentado, sino que también introduce una mayor variabilidad en la calidad del agua debido a procesos como la intrusión marina y la salinización de acuíferos. En particular, el descenso de los niveles piezométricos incrementa el riesgo de salinización, ya que la subida del nivel del mar y la erosión costera facilitan la intrusión de agua salina en los sistemas de agua dulce (Canton et al., 2023; Stanic et al., 2024). En conjunto, estos fenómenos hidrológicos

ponen de manifiesto una tendencia preocupante hacia la sobreexplotación de los acuíferos insulares, comprometiendo el abastecimiento de agua potable y alimentando bucles de retroalimentación positiva entre escasez de recursos y degradación ecológica (Cantelon et al., 2022; Hssaisoune et al., 2020), un ejemplo en Canarias son los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas (EDAS)⁷. Existen diferentes casos en las islas, como, por ejemplo, la Charca de Maspalomas (Gran Canaria) y su entorno interdunar, donde la presencia de vegetación higrófila/freatófila y los encharcamientos están ligados a fluctuaciones del nivel freático y a aportes de aguas subterráneas. Otro ejemplo importante son los bosques de galería (sauceda canaria y otras especies hidrofitas) asociados a nacientes y tramos con caudal persistente en barrancos, como el arroyo del Cedro (La Gomera), el barranco de los cernícalos en Gran Canaria o el barranco de Las Angustias (La Palma), cuya continuidad está ligada a la descarga subterránea y a la presión sobre los acuíferos (Santamarta, 2020).

El segundo mecanismo es operativo. El cambio climático incrementa la frecuencia de situaciones que degradan el rendimiento y mantenimiento de las infraestructuras (olas de calor, viento, incendios, episodios de lluvia intensa con inestabilidad de laderas), afectando accesos, tiempos de reparación y continuidad eléctrica. Estos eventos afectan a nodos habilitantes críticos, en particular, infraestructuras energéticas y logísticas; que resultan esenciales para mantener la continuidad del servicio. Cuando se producen estas perturbaciones, se dificulta el acceso a las infraestructuras y se prolongan los tiempos de reparación, poniendo de manifiesto vulnerabilidades sistémicas asociadas a la baja redundancia de activos clave (Stanic et al., 2024; Hssaisoune et al., 2020).

Por ejemplo, la degradación del suministro eléctrico puede afectar de forma severa al funcionamiento de los servicios de agua, ya que las operaciones de bombeo durante picos de demanda o situaciones de emergencia dependen de un acceso energético continuo. De este modo, los efectos en cascada del estrés operativo se extienden a otros sistemas, deteriorando condiciones de servicio como la presión o la calidad del agua debido a la limitación de las capacidades de reparación y mantenimiento (Tigrine et al., 2023; Mafimisebi, 2025).

El tercer mecanismo es la interdependencia agua-energía en transición. Si bien la desalinización de agua de mar constituye una estrategia necesaria para reforzar el suministro de agua dulce, también incrementa la dependencia energética y

⁷ Los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas (EDAS): son sistemas naturales cuya estructura y funcionamiento dependen del nivel freático o de descargas subterráneas (nacientes, rezumes), de modo que una bajada piezométrica o un deterioro de calidad se traduce en pérdida de hábitat y funciones ecológicas.

ejerce presión adicional sobre sistemas eléctricos ya tensionados (Mafimisebi, 2025; Hadji et al., 2025). El aumento inducido por el cambio climático en las necesidades de producción de agua, combinado con vulnerabilidades en el suministro energético, genera una situación de fragilidad en la que las interrupciones en uno de los sectores se transmiten de forma directa al otro. Este punto no es teórico: el presente libro alude a episodios recientes de apagón a escala estatal como recordatorio de la exposición del conjunto de servicios ante interrupciones energéticas (Santamarta & Cruz Pérez, 2025).

Finalmente, el cambio climático amplifica también las ineficiencias estructurales: el libro «Agua y Cambio Climático en las Islas Canarias» de Santamarta & Cruz-Pérez (2025), señala que las pérdidas en red pueden alcanzar valores muy elevados (hasta un 50 % en algunos municipios según los últimos planes hidrológicos de Canarias), de modo que cualquier reducción del recurso disponible o incremento del estrés operativo se traduce en déficit funcional con mayor rapidez. En consecuencia, las estrategias de resiliencia más robustas no deben limitarse a la incorporación de nuevas fuentes de suministro, sino que han de centrarse también en la reducción de pérdidas, el refuerzo de redundancias y el desarrollo de tratamientos avanzados orientados a la reutilización del agua (Dillon et al., 2018; Chesnaux et al., 2021; Santamarta & Cruz Pérez, 2025).

1.5. Implicaciones para la planificación hidrológica y la gestión del agua

La planificación hidrológica en Canarias no puede leerse solo como la asignación de recursos y programación de obras. En un territorio insular, con nodos concentrados y dependencias habilitantes marcadas, la variable decisiva es la continuidad del servicio bajo condiciones normales y perturbadas. Eso obliga a desplazar el centro de gravedad: del «balance» al funcionamiento del sistema (umbrales, redundancia efectiva, autonomía, recuperación).

En Canarias, esta transición es particularmente relevante por la combinación de:

1. dependencia energética del ciclo urbano y agrario,
2. concentración de activos en costa y corredores lineales, y
3. exposición multiamenaza (incendios forestales, laderas de barrancos inestables, episodios costeros, sequías).

Este planteamiento reconoce que el funcionamiento de los sistemas hídricos es intrínsecamente sensible a distintos tipos de alteraciones y que el simple au-

1. El sistema hidráulico canario: estructura y funcionamiento

mento de la capacidad de oferta no aborda las vulnerabilidades estructurales que pueden interrumpir la prestación del servicio (Hussey & Pittock, 2012). Por el contrario, la atención debe dirigirse a incrementar la holgura operativa, que permite absorber impactos sin una degradación severa del servicio; a reducir acoplamientos críticos que pueden desencadenar fallos sistémicos; y a priorizar la protección de nodos con alta centralidad funcional dentro de los sistemas hídricos (Khiyami et al., 2016).

El criterio de inversión deja de ser «capacidad añadida» y pasa a ser «reducción de propagación». Medidas pequeñas en nodos críticos pueden tener más impacto que aumentos de producción si el cuello de botella está en distribución, impulsión o energía. La cartera de medidas debe ordenar intervenciones con tres preguntas:

- Contención: ¿reduce la probabilidad de cascada (redundancia operable, bypass, sectorización real, protección de enlaces)?
- Autonomía: ¿aumenta horas/días de continuidad sin reposición (volumen útil, reglas de reserva, operación en modo degradado)?
- Recuperación: ¿acorta tiempos de restablecimiento (accesos, repuestos críticos, maniobra local, procedimientos)?

La clave es «operable»: una redundancia que requiere energía o maniobra que no existe en emergencia es redundancia nominal, no funcional (Tabla 1.5).

Tabla 1.5. De la planificación clásica a la planificación orientada a continuidad del servicio

Dimensión	Enfoque clásico recurso–demanda	Enfoque funcional y sistémico
Objeto principal	Volumen disponible (hm³)	Continuidad del servicio
Variable crítica	Balance oferta–demanda	Caudal, presión, calidad y energía
Rol de la energía	Coste externo	Condición habilitante
Escala de análisis	Infraestructura aislada	Red interdependiente
Gestión del riesgo	Sectorial	Multiamenaza y en cascada
Resultado aparente	Seguridad hídrica nominal	Resiliencia operativa real

Fuente: elaboración propia (2026)

1.5.1. De la «infraestructura existente» a la «infraestructura funcional»

La primera implicación es metodológica: un inventario útil no es un catálogo de obras, sino una representación funcional y geoespacial del sistema (captación/producción–transporte–almacenamiento–tratamiento–distribución–retorno), con

dependencias explícitas de energía, accesos, telecontrol y operación. Esta conversión de infraestructura «presente» en infraestructura «funcional» permite identificar umbrales mínimos (autonomía, presión/cota, calidad operativa, margen capacidad–demanda) y diferenciar redundancias reales de redundancias nominales (Tabla 1.6). Aquí se ubica el puente con el proyecto europeo GENESIS: el enfoque requiere que los activos se describan como nodos conectados por enlaces de dependencia, para poder evaluar criticidad y propagación de fallos.

Tabla 1.6. Cadena funcional del sistema hidráulico canario y dependencias críticas

Eslabón	Activos típicos	Dependencias críticas	Fallo dominante
Producción / captación	Galerías, pozos, sondeos, desalinización de agua de mar	Energía, accesos	Pérdida de caudal
Transporte	Impulsiones, conducciones	Energía, laderas	Caída de presión
Regulación	Depósitos, balsas	Accesibilidad, maniobra	Pérdida de autonomía
Tratamiento	Potabilización, EDAR	Energía, reactivos	Calidad no conforme
Distribución	Redes presurizadas	Energía, sectorización	Cortes por cota
Retorno / Regeneración de aguas	Redes saneamiento, riego	Energía, control	Vertido / pérdida recurso

Fuente: elaboración propia (2026)

1.5.2. Priorización orientada a holgura y nodos críticos

La priorización de actuaciones debe orientarse a mejorar la continuidad del servicio a escala del sistema en su conjunto, en lugar de centrarse únicamente en el rendimiento de activos aislados (Tabla 1.7). Entre las intervenciones con mayor impacto potencial se incluyen:

- Protección y redundancia energética: garantizar que instalaciones esenciales como estaciones de bombeo, plantas de tratamiento y unidades de desalinización de agua de mar dispongan de sistemas de respaldo que permitan mantener la operación durante situaciones de disrupción (Guo et al., 2014).
- Refuerzo de corredores de transporte intermunicipal: abordar cuellos de botella que puedan limitar el suministro de agua bajo condiciones adversas (Khiyami et al., 2016).

1. El sistema hidráulico canario: estructura y funcionamiento

- Incremento de la autonomía mediante almacenamiento efectivo: ampliar la capacidad de almacenamiento para amortiguar fluctuaciones en el suministro asociadas a la variabilidad climática y a picos de demanda (Shahzad et al., 2017).
- Reducción de pérdidas reales en red: mejorar la eficiencia de las redes de distribución para minimizar fugas y desperdicios, un aspecto clave para la viabilidad operativa del sistema (Farid et al., 2016).
- Garantía de mantenimiento y accesibilidad: diseñar o adaptar las infraestructuras para que mantengan su funcionalidad bajo escenarios de meteorología extrema o desastres, asegurando la continuidad del servicio (Duvenhage et al., 2019).

Tabla 1.7. Criterios de priorización en planificación resiliente

Tipo de actuación	Mejora local	Mejora sistémica	Prioridad
Nueva captación	Alta	Baja	Media
Reducción pérdidas	Media	Alta	Alta
Respaldo energético	Baja	Muy alta	Muy alta
Protección nodos	Media	Muy alta	Muy alta
Digitalización aislada	Baja	Baja	Baja

Fuente: elaboración propia (2026)

El argumento central es que las medidas más resilientes son aquellas que reducen vulnerabilidades estructurales (pérdidas, dependencias y concentración de recursos) antes que las que se limitan a aumentar la capacidad en puntos aislados del sistema (Sahin et al., 2015).

1.5.3. Integración agua-energía en la transición

La tercera implicación es de gobernanza técnica: la planificación hídrica debe integrar explícitamente la dimensión energética, tanto por costes como por resiliencia. La expansión de recursos no convencionales, en particular la desalinización de agua de mar, incrementa la necesidad de electricidad estable y de logística asociada, y desplaza parte de la vulnerabilidad hacia activos costeros y redes eléctricas. Esto exige criterios de diseño y gestión que reduzcan acoplamientos: respaldos, diversificación, capacidad de operación degradada y coordinación entre operadores de agua y energía. En ausencia de esta integración, el sistema puede aumentar la «seguridad hídrica» nominal a costa de elevar fragilidad sistémica.

En Canarias, parte del sistema hidráulico se comporta como infraestructura electrodependiente. La planificación debe incorporar, como mínimo, una lectura

de vulnerabilidad energética funcional: qué procesos caen primero, qué nodos requieren respaldo selectivo, qué autonomía existe y qué capacidad real hay de operar en modo degradado. Esto es especialmente relevante donde la desalinización de agua de mar y las grandes impulsiones gobiernan la continuidad.

Aquí conviene separar dos planos:

- Planificación hidrológica: identifica dependencias críticas, umbrales y medidas (respaldo selectivo, reconfiguración, almacenamiento operativo).
- Operación y coordinación energética: define protocolos y responsabilidades con operador eléctrico, sin pretender que la planificación hidrológica «resuelva» el sistema eléctrico.

1.5.4. Gestión de sequías y emergencias

La sequía en islas no implica únicamente menos aportación de recurso hídrico; además, suele llevar asociada la activación de un conjunto de degradaciones (mezclas más estrictas por calidad, más energía por m³, mayores tiempos de operación, desgaste de equipos, presión social). Por eso, los planes de sequía y emergencia deberían alinearse con los umbrales del sistema:

- Disparadores basados en autonomía y continuidad (no solo en reservas/precipitación).
- Reglas de operación que protejan nodos cabecera y eviten «colapsos por presión».
- Priorización de usos no como dogma, sino como preservación de la funcionalidad mínima (hospitales, seguridad, saneamiento, abastecimiento esencial).

1.5.5. Calidad como condicionante de continuidad

La calidad no es un capítulo aparte: puede ser el factor que cierra el sistema antes que el caudal. Intrusión salina, nitratos y otros elementos, degradan la capacidad de potabilización o restringen usos agrícolas. La planificación debe tratar la «calidad operativa» como umbral: asegurar mezcla, monitorización mínima y alternativas funcionales. Si la calidad se gestiona tarde, se convierte en multiplicador de cascada (más tratamiento, más energía, más indisponibilidad).

1.5.6. Costa como zona funcional de tensión: planificación territorial y protección de activos

La costa concentra funciones críticas y exposición. En planificación, esto se traduce en decisiones físicas y organizativas:

- Protección y/o elevación de equipos críticos.
- Reducción de concentración de vulnerabilidades (agua + energía + control en el mismo punto).
- Diseño y mantenimiento orientado a corrosión y accesibilidad.
- Escenarios de temporal e inundación marina como perturbación operativa, no solo como riesgo costero.

No se trata de «blindar todo»: se trata de identificar dónde una pérdida simultánea de funciones dispara la cascada de fallos.

1.5.7. Datos, gobernanza y responsabilidad operativa

Sin inventario funcional y reglas operativas mínimas, la planificación se vuelve declarativa (Tabla 1.8). La implicación práctica es institucional: hay que fijar quién aporta qué dato, con qué periodicidad y con qué estándar mínimo. Y, sobre todo, acordar qué se considera «servicio aceptable» en modo degradado.

Aquí la coordinación no es un «extra»: en islas, el cuello de botella suele estar en la interfaz entre titulares de infraestructuras, operadores, energía, protección civil y logística. Una planificación que no explicita esa interfaz deja el sistema vulnerable en el momento relevante: la perturbación.

Tabla 1.8. Traducción operativa: de capítulo a decisiones de planificación (propuesta)

Decisión de planificación	Información mínima	Indicador/umbral	Responsable típico
Priorizar inversiones	Nodos/enlaces críticos + redundancia operable	Criticidad funcional / pérdida de servicio esperada	Consejo insular de aguas/operador
Definir reservas	Volumen útil + reglas de operación	Autonomía (h/d) por sector	Operador
Respaldo selectivo	Procesos críticos + energía por m³	Continuidad en modo degradado	Operador + energía
Plan de sequía	Disparadores funcionales	Umbral de continuidad/calidad	Autoridad/operador

Tabla 1.8. Traducción operativa: de capítulo a decisiones de planificación (propuesta)

Decisión de planificación	Información mínima	Indicador/umbral	Responsable típico
Protección costa	Exposición + concentración de infraestructuras	Pérdida simultánea de funciones	Operador + territorial
Control mínimo	Instrumentación/ maniobra	Observabilidad mínima	Operador

Fuente: elaboración propia (2026)

1.6. Escenarios multiamenaza y análisis dinámico: el valor del proyecto europeo GENESIS

La cuarta implicación es operativa: la planificación y la gestión se benefician de herramientas capaces de explorar escenarios, no para predecir de forma determinista, sino para identificar rutas de propagación, cuellos de botella y efectos indirectos que no son evidentes con enfoques sectoriales (Santamarta et al., 2026a; 2026b; 2026c). En un sistema insular, donde la holgura suele ser limitada y las dependencias son estrechas, el valor de los escenarios reside en poner a prueba el funcionamiento conjunto del ciclo integral del agua (captación/producción–transporte–almacenamiento–tratamiento–distribución–retorno) frente a perturbaciones que pueden coincidir o encadenarse (sequías, incendios, inundaciones, episodios costeros).

En este marco se sitúa el proyecto GENESIS (Geologically Enhanced Nature-based Solutions for climate-resilient critical water InfraStructure). GENESIS se centra en territorios insulares donde el agua subterránea es el recurso dominante y, al mismo tiempo, vulnerable a cambios climáticos y a perturbaciones multiamenaza; por ello, el proyecto combina demostradores de SbN (Soluciones basadas en la Naturaleza) con marcos de evaluación que permiten analizar la continuidad del servicio y la reducción de vulnerabilidad en infraestructuras esenciales.

Los riesgos que comprometen al agua en Canarias, rara vez actúan de forma aislada. El problema real aparece cuando una perturbación abre varias puertas a la vez: daño físico, pérdida de energía, accesos limitados, operación en modo manual, calidad condicionada por mezcla y, finalmente, restricciones de servicio. Ese encadenamiento es lo que justifica trabajar con escenarios multiamenaza y con análisis dinámico (en el tiempo), en lugar de limitarse a mapas de peligros o a inventarios estáticos.

1. El sistema hidráulico canario: estructura y funcionamiento

En este libro, multiamenaza no significa «muchos peligros listados», significa interacción entre peligros y dependencias:

- Secuencias (p. ej., temporal costero, inundación puntual, corrosión acelerada, avería diferida).
- Simultaneidad (p. ej., incendio + pérdida de accesos + caída de telecontrol).
- Amplificación por dependencias (p. ej., fallo eléctrico: cae bombeo y cae producción de agua por desalinización de agua de mar).

La clave es que el impacto final se mide más como una pérdida de servicio que como «daño» en un activo.

La conexión con este capítulo es directa: la «lectura» del sistema hidráulico como red interdependiente requiere instrumentos que representen dependencias funcionales entre servicios (agua–energía–transporte–comunicaciones–operación) y permitan observar cómo una perturbación localizada puede traducirse en degradación funcional amplia. En la lógica de GENESIS, los escenarios multiamenaza sirven para identificar qué nodos y corredores concentran criticidad y qué medidas (protección de activos, redundancias energéticas, cambios en dependencias, reconfiguración operativa) alteran de manera más eficaz la trayectoria de disrupción y recuperación (Tabla 1.9). Este enfoque aporta una base reproducible para justificar priorizaciones: proteger nodos, añadir respaldos o modificar dependencias y evaluar cómo cambia el comportamiento sistémico bajo estrés.

Tabla 1.9. Escenarios multiamenaza y mecanismo dominante de pérdida de servicio (propuesta)

Escenario	Amenaza(s) principal(es)	Dependencia que amplifica	Mecanismo dominante	Efecto típico
Costa bajo estrés	Temporal, inundación marina, aerosol salino	Energía + accesos + corrosión	Indisponibilidad simultánea	Caída de producción costera y restricción urbana
Interior lineal	Deslizamientos, Avenida en barranco, incendio	Accesos + enlace único	Desconexión troncal	Aislamiento de sectores y pérdida de presión en cotas
Energía degradada	Fallo eléctrico parcial/total	Bombeo + control	Pérdida de impulsión/producción	Vaciado de depósitos, cortes por cota
Sequía + calidad	Sequía prolongada + intrusión/mezcla	Tratamiento + energía por m³	Cierre por umbral de calidad	Restricciones, aunque exista volumen
Evento compuesto	Temporal + energía + accesos	Logística + operación manual	Recuperación lenta	Cascada prolongada, no solo incidente

Fuente: elaboración propia (2026)

1.6.1. Gestión: mantenimiento, pérdidas y capacidad de respuesta

Finalmente, la gestión cotidiana adquiere un peso estructural: la resiliencia no se «compra» solo con obra nueva, también se construye con mantenimiento, reducción de pérdidas, control de calidad, digitalización útil y protocolos de operación en modo degradado. Como se ha comentado anteriormente, estudios de Santamarta & Cruz Pérez (2025) subrayan que las pérdidas en red alcanzan valores muy elevados en determinados municipios, de modo que la mejora de eficiencia física es, en la práctica, una medida de adaptación climática de primer orden. A ello se suma la necesidad de capacidades de respuesta: acceso a repuestos, personal, comunicaciones y coordinación intersectorial para acortar tiempos de recuperación.

1.7. Síntesis operativa y conclusiones

Este capítulo ha definido el «sistema hidráulico canario» como sistema de prestación de servicio, no como suma de recursos. La continuidad del agua en islas se decide en la intersección entre umbrales operativos (presión/cota, caudal, calidad y continuidad), dependencias habilitantes (energía, control y accesos) y estructura de red (nodos, enlaces, redundancia y autonomía). Con esa lectura, el riesgo relevante no es solo el daño inicial, sino la propagación y el tiempo: cuánto tarda el sistema en degradarse y cuánto tarda en recuperarse (Tabla 1.10).

Esta síntesis operativa no pretende repetir el diagnóstico insular desarrollado en los capítulos de caso, sino fijar un conjunto de reglas de lectura comunes para interpretar, con coherencia, sistemas hidráulicos volcánicos sometidos a presiones climáticas, territoriales y energéticas. Este apartado, se presenta como un cierre técnico: condensa los resultados conceptuales del análisis y los traduce en criterios aplicables a inventarios, jerarquización de infraestructuras y priorización de medidas. El objetivo es explícito: separar lo accesorio de lo estructural, identificar dónde se concentra la criticidad y establecer qué significa «funcionar» bajo perturbación (continuidad, umbrales y redundancia operativa). Desde esta perspectiva, el agua se entiende como un servicio cuya estabilidad depende de una red interdependiente, donde energía, logística, topografía y emplazamiento determinan tanto la vulnerabilidad como la capacidad de recuperación.

Tabla 1.10. Lectura funcional del sistema hidráulico canario

Dimensión	Clave interpretativa
Agua	Servicio crítico
Energía	Condición habilitante
Infraestructura	Red interdependiente
Riesgos	Detonantes, no causa
Clima	Amplificador
Planificación	Continuidad bajo estrés

Fuente: elaboración propia (2026)

Con las próximas diez conclusiones se definen, por tanto, la gramática de lectura que se utilizará para analizar vulnerabilidad y resiliencia, incorporando dependencias y posibles propagaciones de fallo como parte del comportamiento normal del sistema.

1. En Canarias, la continuidad del servicio no depende solo del recurso, sino de la red. La disponibilidad hídrica puede ser localmente suficiente y, aun así, existir vulnerabilidad sistémica si fallan transporte, almacenamiento, presión o tratamiento.
2. La energía es un habilitante estructural del agua. Allí donde predomina el bombeo, la desalinización de agua de mar o el tratamiento intensivo, el sistema hidráulico hereda la fragilidad del sistema energético. La resiliencia hídrica exige lectura conjunta de ambos sistemas.
3. La criticidad se concentra en pocos nodos y corredores. La topografía insular fuerza cuellos de botella (impulsiones, estaciones de bombeo, depósitos cabecera, conducciones). La pérdida de estos elementos se traduce en disrupciones desproporcionadas frente al daño directo.
4. La redundancia real es operativa, no declarativa. No basta con «tener alternativas»: deben ser activables bajo condiciones de perturbación (capacidad disponible, conectividad efectiva, calidad aceptable, accesos y personal). La redundancia debe evaluarse como capacidad de sustitución funcional.
5. La costa es un espacio funcional de vulnerabilidad compuesta. Concentra activos de energía, logística y, a menudo, producción de agua; por ello, episodios costeros pueden desencadenar fallos en cascada sin necesidad de afectar directamente a conducciones interiores.
6. Los riesgos naturales actúan como perturbaciones iniciales; el sistema decide si el impacto se amplifica. La magnitud de la disrupción viene menos del evento en sí y más de la holgura del sistema: autonomía, capacidad excedentaria, interconexión, mantenimiento y accesibilidad.

7. El cambio climático opera como multiplicador, no como explicación única. Aumenta frecuencia e intensidad de condiciones que aceleran degradación, interrupciones y fatiga operativa; pero la vulnerabilidad emerge de dependencias preexistentes, decisiones de emplazamiento y falta de margen operativo.
8. La lectura correcta del sistema exige umbrales mínimos. Autonomía temporal, presión/cota, calidad operativa y margen capacidad–demanda son variables de control que permiten distinguir entre infraestructura «presente» e infraestructura «funcional».
9. La planificación eficaz prioriza protección de nodos críticos y estabilidad de corredores. El objetivo no es maximizar inventario de obras, sino aumentar continuidad del servicio: proteger puntos de alta centralidad, diversificar rutas, reducir dependencia energética y reforzar operación y mantenimiento.
10. Este marco habilita la comparación entre islas y la transferencia de soluciones. Al homogeneizar criterios de lectura (dependencias, criticidad, redundancia y umbrales), se facilita interpretar patrones comunes y diseñar medidas adaptadas al contexto insular sin perder comparabilidad.

1.8. Referencias bibliográficas

- Almaleh, A. (2023). Measuring resilience in smart infrastructures: A comprehensive review of metrics and methods. *Applied Sciences*, 13(11), 6452. <https://doi.org/10.3390/app13116452>
- Al-Mutrafi, H., Al-Zubari, W., El-Sadek, A., & Gelil, I. (2018). Assessment of the water–energy nexus in the municipal water sector in Eastern Province, Saudi Arabia. *Computational Water, Energy and Environmental Engineering*, 7(1), 1–26. <https://doi.org/10.4236/cweee.2018.71001>
- Andrade, M., Hernández, A., Pimentel, A., Cruz, J., Ramos, A., Ludwig, P., ... & Ramalho, R. (2025). Controls on water–magma interactions at hydraulically charged volcanic islands. *Geophysical Research Letters*, 52(18). <https://doi.org/10.1029/2025GL115727>
- Becerril, L., Martí, J., Bartolini, S., & Geyer, A. (2017). Assessing qualitative long-term volcanic hazards at Lanzarote Island (Canary Islands). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(7), 1145–1157. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1145-2017>
- Borzi, I. (2023). Vulnerability assessment of water supply infrastructures through multiple indicator methodology. *Journal of Water and Climate Change*, 14(11), 3967–3984. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.148>

- Braojos Ruiz, J. J. (2023). Alumbramientos, agotamientos y fracasos en los 175 años de historia de las galerías de Tenerife. Consejo Insular de Aguas de Tenerife. https://www.aguastenerife.org/images/pdf/Libros/ALUMBRA%2CAGO-TA%20y%20FRACASOS_OK_2aEdi-VDigCopia.pdf
- Buldyrev, S. V., Parshani, R., Paul, G., Stanley, H. E., & Havlin, S. (2010). Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. *Nature*, 464(7291), 1025–1028. <https://doi.org/10.1038/nature08932>
- Cantelon, J., Guimond, J., Robinson, C., Michael, H., & Kurylyk, B. (2022). Vertical saltwater intrusion in coastal aquifers driven by episodic flooding: A review. *Water Resources Research*, 58(11). <https://doi.org/10.1029/2022WR032614>
- Cantelon, J., Robinson, C., & Kurylyk, B. (2023). Morphologic, atmospheric, and oceanic drivers cause multi-temporal saltwater intrusion on a remote sand island. *Water Resources Research*, 59(10). <https://doi.org/10.1029/2023WR035820>
- Cárdenas-Mamani, Ú., Kahhat, R., & Reyes, J. (2022). Interdependent response of three critical infrastructures in a South American megacity. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 2(2), 025003. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac6a0a>
- Castet, J., & Saleh, J. (2013). Interdependent multi-layer networks: Modeling and survivability analysis with applications to space-based networks. *PLoS One*, 8(4), e60402. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0060402>
- Chesnaux, R., Marion, D., Boumaiza, L., Richard, S., & Walter, J. (2021). An analytical methodology to estimate changes in fresh groundwater resources with sea-level rise and coastal erosion in strip-island unconfined aquifers. *Hydrogeology Journal*, 29(3), 1355–1364. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02300-0>
- Cruz-Pérez, N., Rodríguez-Alcántara, J. S., Clavijo-Núñez, S., Paradinas-Blázquez, C., & Santamarta, J. C. (2025). Climate projections and temperature evolution in the Canary Islands: High resolution analysis at island scale. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/JOC.70139>
- Cruz-Pérez, N., & Santamarta Cerezal, J. C. (2021). La huella ecológica del agua en las Islas Canarias. Tenerife: Universidad de La Laguna. <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/26148>
- Custodio, E. (2020). Hidrogeología y recursos de agua subterránea en formaciones e islas volcánicas (HIRAVOL). Universitat Politècnica de Catalunya; Cetaqua. <https://doi.org/10.5821/ebook-9788498809473>
- Dillon, P., Stuyfzand, P., Grischek, T., Lluria, M., Pyne, R., Jain, R., ... & Sapiaño, M. (2018). Sixty years of global progress in managed aquifer recharge.

- Hydrogeology Journal, 27(1), 1–30. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z>
- Duvenhage, D., Brent, A., & Stafford, W. (2019). The need to strategically manage CSP fleet development and water resources: A structured review and way forward. *Renewable Energy*, 132, 813–825. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.033>
- European Commission. (2024). Geologically Enhanced NaturE-based Solutions for climate change resiliency of critical water Infrastructure (GENESIS) (Grant agreement ID: 101157447). CORDIS. <https://doi.org/10.3030/101157447>
- Fang, Y., Pedroni, N., & Zio, E. (2015). Optimization of cascade-resilient electrical infrastructures and its validation by power flow modeling. *Risk Analysis*, 35(4), 594–607. <https://doi.org/10.1111/risa.12396>
- Farid, A., Lubega, W., & Hickman, W. (2016). Opportunities for energy-water nexus management in the Middle East & North Africa. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 4. <https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000134>
- Foglietta, C., Panzieri, S., & Pascucci, F. (2014). Algorithms and tools for risk/impact evaluation in critical infrastructures. In *Proceedings* (pp. 227–238). https://doi.org/10.1007/978-3-662-44160-2_8
- Fu, G., Dawson, R., Khoury, M., & Bullock, S. (2014). Interdependent networks: Vulnerability analysis and strategies to limit cascading failure. *The European Physical Journal B*, 87(7). <https://doi.org/10.1140/epjb/e2014-40876-y>
- Gobierno de Canarias. (2012, 8 de mayo). Resolución de 22 de marzo de 2012, por la que se actualiza el Programa de Inspecciones a las explotaciones de agua subterránea (pozos y galerías) en las Islas Canarias. *Boletín Oficial de Canarias*, (90). <https://www.gobiernodecanarias.org/boc/2012/090/001.html>
- Gobierno de Canarias, Consejería de Empleo, Industria y Comercio, Dirección General de Industria. (2011). Manual técnico para la ejecución de galerías. https://www.gobiernodecanarias.org/cmsgob2/export/sites/industria/temas/minas/Manual_Tecnico_Galerias.pdf
- Gobierno de Canarias, Consejería de Empleo, Industria y Comercio, Dirección General de Industria. (2012). Manual técnico para la ejecución de pozos (Elaborado por Interra, Ingeniería y Recursos, S. L.). https://www.gobiernodecanarias.org/cmsgob2/export/sites/industria/temas/minas/MT_pozos.pdf
- Gobierno de Canarias, Consejería de Transición Ecológica y Energía (CTEE). (2025). Anuario energético de Canarias 2023. <https://www.gobiernodecanarias.org/energia/descargas/SDE/Portal/Publicaciones/AnuarioEnergeticodeCanarias-2023.pdf>

- Guo, L., Liu, W., Li, X., Liu, Y., Jiao, B., Wang, W., ... & Li, F. (2014). Energy management system for stand-alone wind-powered-desalination microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2377374>
- Hall, J. (2019). A simulation tool to guide infrastructure decisions: System-of-systems modeling aids prioritization and uncertainty planning. *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine*, 5(3), 10–20. <https://doi.org/10.1109/MSMC.2019.2913565>
- Hall-May, M., & Surridge, M. (2010). Resilient critical infrastructure management using service-oriented architecture. *Proceedings* (pp. 1014–1021). <https://doi.org/10.1109/CISIS.2010.103>
- Hadji, R., Hamed, Y., Gentilucci, M., Khan, S., & Barbieri, M. (2025). Advancing water resource management: The role of drywell recharge systems and desalination technologies in addressing water scarcity in the MENA region. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s43994-025-00280-z>
- Hausen, H. M. (1954). *Hidrografía de las Islas Canarias: Rasgos generales y riego de los cultivos subtropicales*. Instituto de Estudios Canarios (Universidad de La Laguna) / CSIC. <https://hdiacan.org/biblioteca-virtual-iecan/hidrografia-de-las-islas-canarias-rasgos-generales-y-riego-de-los-cultivos-subtropicales/>
- Hernández-Martín, R., & León-González, C. J. (Coords.). (2022). *Sostenibilidad del turismo en Canarias: Informe 2022*. Observatorio Turístico de Canarias. doi: 10.25145/r.Tour.Canarias.2022.06.
- Hssaisoune, M., Bouchaou, L., Sifeddine, A., Bouimetarhan, I., & Chehbouni, A. (2020). Moroccan groundwater resources and evolution with global climate changes. *Geosciences*, 10(2), 81. <https://doi.org/10.3390/geosciences10020081>
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. London: Earthscan. https://www.waterfootprint.org/resources/TheWaterFootprintAssessmentManual_English.pdf
- Huang, L., Chen, J., & Zhu, Q. (2018). Distributed and optimal resilient planning of large-scale interdependent critical infrastructures. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1809.02231>
- Khiyami, A., Ishimatsu, T., Alfari, A., & Weck, O. (2016). A graph theoretic framework for integrated and co-optimized power system planning. *INCOSE International Symposium*, 26(1), 2331–2345. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2016.00298.x>

- Liu, X., Fang, Y., Ferrario, E., & Zio, E. (2021). Resilience assessment and importance measure for interdependent critical infrastructures. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*, 7(3). <https://doi.org/10.1115/1.4051196>
- López-Saavedra, M., Martí, J., Rubio, J., & Kelfoun, K. (2021). Cascading effects of extreme geohazards on Tenerife (Canary Islands). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(9). <https://doi.org/10.1029/2021JB022294>
- Mafimisebi, P. (2025). Vulnerability of groundwater quality and hydrology to climate change induced factors: Temperature and precipitation. *Irish Interdisciplinary Journal of Science & Research*, 9(2), 75–88. <https://doi.org/10.46759/ijjsr.2025.9211>
- Navarro Alvargonzález, A., Fernández Uría, A., & Doblas Domínguez, J. G. (1993). Las aguas subterráneas en España: Estudio de síntesis. Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=50657>
- Nukavarapu, N., & Durbha, S. (2020). Healthcare critical infrastructure stochastic interdependencies simulation model for smart cities: Flood disaster scenario. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-4-2020, 123–129. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-v-4-2020-123-2020>
- Passos, M., Barquet, K., Kan, J., Destouni, G., & Kalantari, Z. (2024). Flood resilience assessment of interconnected critical infrastructures. <https://doi.org/10.31223/x5p11b>
- Phan, T., & Arosio, M. (2025). Assessing infrastructure criticality using input–output table and network analysis. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-15331>
- Pinnaka, S., Yarlagadda, R., & Çetinkaya, E. (2015). Modelling robustness of critical infrastructure networks. *Proceedings* (pp. 95–98). <https://doi.org/10.1109/DRCN.2015.7148995>
- Poncela, R., Santamarta, J. C., García-Gil, A., Cruz-Pérez, N., Skupien, E., & García-Barba, J. (2022). Recession analysis of deep water gallery discharge in heterogeneous volcanic aquifers. *Journal of Hydrology*, 610, 127975. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127975>
- Qureshi, R., Ford, D., & Wolf, C. (2020). Descriptive design structure matrices for modelling infrastructure interdependencies in community recovery. <https://doi.org/10.35199/dsm2020.18>
- Rathnayaka, B., Robert, D., Adikariwattage, V., Siriwardana, C., Kuligowski, E., Setunge, S., & Amaratunga, D. (2025). Novel methodology for resilience assessment of critical infrastructure considering the interdependencies: A case

- study in water, transportation and electricity sector. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 119, 105271. <https://doi.org/10.1016/j.ij-drr.2025.105271>
- Reyes Parrilla, D. (2025). GENESIS D1.2 Climate risk profiles to each Macaronesian island (1.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17813870>
- Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P., & Kelly, T. K. (2001). Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine*, 21(6), 11–25. <https://doi.org/10.1109/37.969131>
- Ruiz de la Rosa, C. I., García Rodríguez, J. L., Castilla Gutiérrez, C., Santamarta, J. C., & Antonova, N. (2019). Agua y turismo en Tenerife: producción, gestión y consumo. Universidad de La Laguna. <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/18353>
- Sahin, O., Stewart, R., & Porter, M. (2015). Water security through scarcity pricing and reverse osmosis: A system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*, 88, 160–171. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.009>
- Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Koritnik, J., & Khoury, M. (2026a). GENESIS–La Palma platform for cascading-failure simulation in water systems and critical infrastructures [Application software]. Universidad de La Laguna. https://doi.org/10.25145/o.GENESIS_Palma.2025
- Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Koritnik, J., & Khoury, M. (2026b). GENESIS–Gran Canaria platform for cascading-failure simulation in urban water networks and critical infrastructures [Application software]. Universidad de La Laguna. https://doi.org/10.25145/o.GENESIS_Gran-Canaria.2025
- Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Koritnik, J., Khoury, M., & García-Gil, A. (2026c). GENESIS–El Hierro platform for cascading-failure simulation in water–energy systems [Application software]. Universidad de La Laguna. https://doi.org/10.25145/o.GENESIS_Hierro.2025
- Santamarta, J. C. (2020). Los montes de las islas Canarias y las aguas subterráneas. *Revista Montes*, (141), 22–26. https://www.researchgate.net/publication/344238473_Los_montes_de_las_Islas_Canarias_y_las_Aguas_subterranneas
- Santamarta, J. C. (2009). Singularidades sobre la construcción, planificación y gestión de las obras y recursos hídricos subterráneos en medios volcánicos. Aplicación a las Islas Canarias (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. <https://oa.upm.es/3389/>
- Santamarta, J. C. (2016). Tratado de minería de recursos hídricos en islas volcánicas oceánicas (1.ª ed.). Colegio Oficial de Ingenieros de Minas del Sur de España. <https://oa.upm.es/47880/>

- Santamarta, J. C., & Cruz-Pérez, N. (2025). Agua y cambio climático en las Islas Canarias. Universidad de La Laguna. <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/43245>
- Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Paradinas-Blázquez, C., Prado López, C., & Galiano Sánchez, L. (2025). Escenarios locales de cambio climático en las Islas Canarias, adaptados al VI Informe del IPCC [Plataforma web]. Fundación para la Investigación del Clima; Meteogrid; Universidad de La Laguna (Proyecto ARSINOE). <https://doi.org/10.25145/o.canarias.sicma.2025>
- Setola, R., Geretshuber, S., & Thissen, W. (Eds.). (2016). Managing the complexity of critical infrastructures: A modelling and simulation approach. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51043-9>
- Shahzad, M., Burhan, M., Li, A., & Ng, K. (2017). Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability. *Desalination*, 413, 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.03.009>
- Sobradelo, R., Martí, J., Mendoza-Rosas, A., & Melis, G. (2011). Volcanic hazard assessment for the Canary Islands (Spain) using extreme value theory. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(10), 2741–2753. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2741-2011>
- Stanic, S., LeRoux, N., Paldor, A., Mohammed, A., Michael, H., & Kurylyk, B. (2024). Saltwater intrusion into a confined island aquifer driven by erosion, changing recharge, sea-level rise, and coastal flooding. *Water Resources Research*, 60(1). <https://doi.org/10.1029/2023WR036394>
- Tigrine, Z., Aburideh, H., Zioui, D., Hout, S., Sahraoui, N., Benchoubane, Y., & Lebouachera, S. (2023). Feasibility study of a reverse osmosis desalination unit powered by photovoltaic panels for a sustainable water supply in Algeria. *Sustainability*, 15(19), 14189. <https://doi.org/10.3390/su151914189>
- Varga, L., Camci, F., Boxall, J., Toossi, A., Machell, J., Blythe, P., & Taylor, C. (2013). Transforming critical infrastructure. *International Journal of E-Planning Research*, 2(3), 38–49. <https://doi.org/10.4018/ijep.2013070104>
- Zhang, C., Kong, J., & Simonović, S. (2018). Modeling joint restoration strategies for interdependent infrastructure systems. *PLoS One*, 13(4), e0195727. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195727>

Capítulo 2

El sistema energético en Canarias y su relación con el suministro de agua

Juan Carlos Santamarta Cerezal

Noelia Cruz Pérez

2.1. Estructura de la generación eléctrica en Canarias

En las Islas Canarias, la generación eléctrica se apoya en un esquema mixto, con un peso todavía dominante de tecnologías térmicas basadas en productos derivados del petróleo, y un bloque de generación renovable en crecimiento que se concentra, sobre todo, en eólica y fotovoltaica. En términos de parque de generación, el anuario energético de Canarias muestra para 2023 una estructura térmica compuesta por ciclos combinados (concentrados en Gran Canaria y Tenerife), junto con motores diésel, turbinas de gas y, en menor medida, turbinas de vapor, tecnologías que encajan con la lógica insular por su modularidad y capacidad de cubrir demanda con reservas relativamente acotadas, aunque a costa de exposición a combustibles importados y a su volatilidad por las perturbaciones en la geopolítica mundial (Tabla 2.1, Figura 2.1).

En paralelo, el componente renovable se articula principalmente mediante parques eólicos y plantas fotovoltaicas, con aportes muy residuales de minihidráulica y biogás (Tabla 2.2). Asimismo, aparece un caso singular, relevante también por su lectura de sistema, en El Hierro, donde la central hidroeólica integra potencia eólica y de turbinación dentro de un esquema de operación acoplado a un almacenamiento hidráulico.

En Canarias, en el caso de la energía geotérmica, nos encontramos en una fase que ya no es «prospectiva» en el sentido blando, sino exploratoria con perforación, que es donde se decide casi todo: recurso, caudal, temperatura, química, reinyección y viabilidad económica. En 2024, el Estado asignó a Canarias 106,2 M€ para impulsar los primeros sondeos de geotermia profunda en España (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2024; IDAE, 2024).

Tabla 2.1: Tecnologías térmicas en las Islas Canarias: definición y lectura insular

Tecnología	Qué es (definición operativa)	Ventajas en sistemas insulares	Limitaciones y «coste oculto»	Rol en escenarios de alta penetración renovable
Ciclo combinado (CC)	Turbina de gas + caldera de recuperación + turbina de vapor: se genera electricidad dos veces aprovechando el mismo combustible	Buena eficiencia y potencia firme; puede sostener el sistema cuando cae eólica/fotovoltaica	Dependencia de combustible importado; exige nodos eléctricos robustos; la indisponibilidad de un grupo puede notarse rápido	Respaldo y «columna» de estabilidad en horas sin recurso renovable; soporte a la operación
Motores diésel	Motores alternativos acoplados a alternador; unidades modulares que se pueden arrancar y parar con facilidad	Arranque rápido, alta modularidad; útiles para reservas y seguimiento de carga en redes pequeñas	Coste operativo elevado, mantenimiento intensivo, emisiones; vulnerabilidad logística al suministro de combustible	Regulación y cobertura de picos; amortigua variabilidad y eventos locales, a costa de coste y emisiones
Turbina de vapor	Vapor a presión producido en caldera expande en turbina y mueve el alternador; operación más continua que «rápida»	Puede aportar generación estable; útil como base en esquemas con demanda sostenida	Menor flexibilidad ante rampas; eficiencia y emisiones condicionadas por el combustible y el diseño	Tiende a actuar como base si existe; menos adecuada para seguir variabilidad rápida sin apoyo de otras tecnologías

Fuente: elaboración propia (2026)

Ese movimiento se encuadra en el Programa de Geotermia Profunda del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), que reserva una línea específica para las islas y detalla el reparto orientativo por territorios (PRTR, 2023; IDAE, 2024).

A partir de ahí, cada isla empieza a mostrar su propia «biografía» geotérmica: en Tenerife se anunció el primer sondeo profundo en el municipio de Vilaflor (aproximadamente 3 km) para verificar condiciones >150 °C y presencia de fluido, un paso que, si sale bien, abre la puerta a una renovable gestionable en un sistema aislado (Agencia EFE, 2025).

En La Palma ya existen permisos y tramitaciones concretas en el BOE, como, por ejemplo, la admisión definitiva del permiso de investigación «Tacande» y, además, el Cabildo (vía Sodepal) ha comunicado la obtención de derechos de investigación en zonas de interés, señal de que el proceso se está institucionalizando (Boletín Oficial del Estado, 2025; Cabildo de La Palma, 2025).

2. El sistema energético en Canarias y su relación con el suministro de agua

En Gran Canaria se ha comunicado el avance hacia la preparación de los primeros sondeos profundos (hasta ~2,7 km), como fase decisiva tras la validación de datos y selección de áreas prioritarias (Energía Gran Canaria, 2025).

Y mientras la alta entalpía madura (o bien, se descarta), la geotermia de baja entalpía ya se está usando como solución «silenciosa» para reducir la demanda energética en determinados servicios y hoteles: el Gobierno de Canarias ha presentado la climatización geotérmica del Hospital Molina Orosa en Lanzarote (Gobierno de Canarias, 2025).



Fuente: Santamarta, J.C. (2026)

Figura 2.1. Central térmica en la isla de El Hierro

El punto, para este libro, es incómodo y útil: si la geotermia eléctrica se confirma, puede aportar firmeza y resiliencia a las islas (menos dependencia de combustibles y más estabilidad para cargas críticas del agua); si no se confirma, habrá costado dinero, pero deja una lección útil: en geología se planifica por riesgo, con decisiones por etapas y alternativas preparadas.

Tabla 2.2: Tecnologías no térmicas: definición y lectura insular

Tecnología	Qué es (definición operativa)	Ventajas en sistemas insulares	Limitaciones y «coste oculto»	Tendencia de futuro en Canarias
Eólica (onshore)	Aerogeneradores conectados a red que convierten energía cinética del viento en electricidad	Muy competitiva en islas con buen recurso; reduce dependencia de combustibles; despliegue relativamente rápido	Variabilidad y rampas; necesidad de reserva/servicios de ajuste; restricciones por red y por aceptación social/territorial	Crecimiento sostenido, especialmente donde haya refuerzos de red y mejor gestión de operación; más hibridación con almacenamiento
Solar fotovoltaica (a red)	Módulos FV + inversores que inyectan electricidad a la red (producción diurna)	Modular, escalable, rápida de instalar; buena correlación con demanda diurna (turismo/servicios)	Intermitencia y «pico» diurno que exige flexibilidad después; congestión en redes débiles; vertidos si falta capacidad	Aumento fuerte, con énfasis en autoconsumo y plantas conectadas; tendencia a combinarse con baterías y control avanzado
Autoconsumo FV (sin excedentes / con excedentes)	Generación FV en cubierta o suelo para consumo local; puede o no verter a red	Reduce demanda aguas arriba y pérdidas; mejora resiliencia local si se combina con almacenamiento; democratiza inversión	Si no hay almacenamiento, aporta poco en fallos de red; integración masiva puede complicar tensión/calidad si no se gestiona	Expansión intensa, con más «comunidades energéticas» y soluciones con baterías/gestión de demanda
Hidráulica convencional / minihidráulica	Turbinación en conducciones o saltos (pequeños caudales y alturas)	Producción relativamente predecible donde existe; puede aportar estabilidad local	Potencial limitado por hidrología insular y disponibilidad de saltos; conflictos ambientales/uso del agua	Crecimiento limitado: papel de nicho (turbinación en redes, mejoras puntuales)
Hidroeléctrica (sistema eólico + bombeo-turbinación)	Integración de eólica con almacenamiento hidráulico (bombeo a depósito superior y turbinación)	Aporta almacenamiento de media duración, firmeza y servicios de ajuste; reduce vertidos renovables	Alta inversión, complejidad operativa, dependencia de infraestructuras hidráulicas y aceptación territorial	Se mantiene como referencia (El Hierro) y modelo conceptual para otras islas; futuro ligado a proyectos de bombeo y planificación
Baterías (BESS) a escala de red	Battery Energy Storage Systems. Almacenamiento electroquímico conectado a red para regulación, arbitraje y soporte	Respuesta rápida; mejora estabilidad/frecuencia; útil para suavizar FV y eólica en redes pequeñas	Coste y reposición; degradación; permisos; necesidad de estrategia de operación para maximizar valor sistémico	Crecimiento probable, asociado a subestaciones y nodos críticos, y a hibridación con FV/eólica

2. El sistema energético en Canarias y su relación con el suministro de agua

Tabla 2.2: Tecnologías no térmicas: definición y lectura insular

Tecnología	Qué es (definición operativa)	Ventajas en sistemas insulares	Limitaciones y «coste oculto»	Tendencia de futuro en Canarias
Bombeo reversible (centrales hidráulicas de almacenamiento)	Dos embalses a distinta cota; bombeo en horas valle y turbinación en punta	Gran capacidad y duración; palanca estructural en islas; mejora garantía de suministro e integración renovable	Requiere obra civil y tiempos largos; impactos territoriales; dependencia de disponibilidad hidráulica/ embalses	Eje estratégico donde sea viable (p. ej., proyectos tipo Salto de Chira); tendencia a consolidarse como «infraestructura de sistema»
Geotermia eléctrica (alta entalpía)	Extracción de calor profundo para generar electricidad (fluido caliente + reinyección)	Renovable gestionable (base), muy valiosa para firmeza; reduce exposición a combustibles	Riesgo exploratorio alto; perforación cara; tiempos largos; incertidumbre de recurso y permisos	Apuesta de medio plazo: si los sondeos confirman recurso, podría aportar base renovable; si no, quedará como un intento costoso
Geotermia de baja entalpía (térmica, bombas de calor)	Uso del subsuelo/ acuíferos como fuente/sumidero térmico para climatización/ACS	Reduce demanda eléctrica térmica; tecnología madura; replicable en edificios públicos/ servicios	No genera electricidad; requiere diseño hidrogeológico y control; inversión inicial elevada	Crecimiento en usos térmicos y edificios; vector «silencioso» de transición (menos demanda, más eficiencia)
Biogás / valorización de residuos	Producción de gas a partir de residuos orgánicos/EDAR; puede generar electricidad/ calor	Gestionable; integra economía circular; útil en depuración y residuos	Potencial limitado por disponibilidad de sustratos; requiere operación constante y control de emisiones/ olores	Nicho creciente en plantas de residuos y EDAR; más relevante por estabilidad que por volumen total

Fuente: elaboración propia (2026)

Este retrato no es meramente tecnológico: la empresa Red Eléctrica de España (REE) subraya que los sistemas insulares, por su menor tamaño y su carácter aislado, tienen menos inercias y márgenes que un sistema continental interconectado, de modo que la seguridad de suministro se juega en la combinación «generación + red + operación» y, cada vez más, en la incorporación de almacenamiento (por ejemplo, bombeo reversible) y refuerzos que amortigüen la variabilidad renovable.

2.2. Energía como condición del suministro de agua

Como ya se comentó en el capítulo anterior, las Islas Canarias operan el ciclo urbano del agua bajo una condición previa que rara vez se explicita: sin continui-

dad eléctrica no hay continuidad hidráulica, incluso cuando el recurso existe y la infraestructura está físicamente intacta. Esta asimetría de agua dependiente de energía más que energía dependiente de agua, es especialmente visible en sistemas insulares, donde el margen de maniobra es pequeño y las dependencias tienden a concentrarse en pocos nodos críticos. La literatura sobre interdependencias y recuperación de redes advierte que, cuando dos sistemas están acoplados, una perturbación local puede amplificarse si la dependencia es rígida y la capacidad de amortiguación es baja (Buldyrev et al., 2010; Hu et al., 2016).

Cuando el suministro eléctrico se interrumpe, el efecto no queda «en el sector energía», se propaga. Estaciones de bombeo que se paran, depósitos que no se rellenan, redes que pierden presión, desalinizadoras que no producen, depuradoras que no tratan aguas residuales, comunicaciones que fallan, y una cadena de decisiones operativas que acaban afectando a la población y su actividad económica. Esta lógica de interdependencias es, de hecho, la base de los enfoques de simulación de fallos en cascada aplicados a servicios críticos.

El patrón se repite en islas donde la producción de agua potable descansa en la desalinización de agua de mar: una incidencia eléctrica puede reducir la producción de forma abrupta y trasladar el problema desde la energía hacia el abastecimiento sin pasar por una «escasez» del recurso en sentido físico. En términos de gestión, esto obliga a pensar en la resiliencia del agua no solo como disponibilidad de recurso, sino como disponibilidad operativa, que depende de red, maniobra y respaldo (Bondank & Chester, 2020).

El marco adoptado en el presente libro es el de infraestructuras críticas interdependientes. No se trata de una elección retórica. Este enfoque permite describir el acoplamiento agua-energía como un problema de nodos, redundancias, modos de fallo y recuperación; y evita caer en explicaciones sectoriales que, aunque útiles para otras preguntas (propiedad, tarifas, cultura del agua), dicen poco cuando lo que está en juego es la continuidad operativa (Motter & Lai, 2002; Applegate & Tien, 2019; Goldbeck et al., 2019; Almaleh, 2023).

La relación agua-energía en Canarias, por tanto, no debería tratarse como un «tema transversal» genérico, sino como una condición estructural del servicio. Y aquí es donde el capítulo conecta con una plataforma de fallos en cascada sin necesidad de forzar el argumento: si se modelan los nodos eléctricos que alimentan funciones hídricas críticas y se incorpora la capacidad de amortiguación (depósitos, gravedad, redundancias, autonomía real de respaldo), el análisis deja de ser narrativo y se convierte en diagnóstico operativo. No es evidente si el principal riesgo será siempre la falta de generación, la indisponibilidad de red o la pérdida de flexibilidad; lo que sí parece consistente con la evidencia es que, en sistemas acoplados, la fragilidad emerge cuando las dependencias son rígidas y la recupe-

ración no está pensada como parte del diseño (Bondank & Chester, 2020; Hu et al., 2016).

El concepto de nexo agua–energía subraya una relación conocida: el agua requiere energía para su captación, tratamiento y distribución; y la energía puede requerir agua para parte de su producción o refrigeración. En islas con sistemas eléctricos aislados, la asimetría suele ser más marcada: la provisión de agua depende de la electricidad de forma directa y diaria, mientras que el sistema eléctrico puede mostrar dependencias hídricas comparativamente menores o más indirectas.

La aportación de trabajos desarrollados desde Canarias ayuda a fijar el marco con más precisión y menos abstracción. En el caso de Tenerife, el análisis del nexo agua–energía muestra una relación bidireccional cuantificable: una fracción del agua consumida se asocia a usos energéticos y, a la inversa, una parte no despreciable de la energía se destina a funciones del ciclo integral del agua (abastecimiento, depuración y descarga al mar, entre otras), con escenarios prospectivos que tensionan esa relación a medio plazo (Rodríguez-Urrego et al., 2022).

Ese tipo de resultados tiene un valor práctico: obliga a abandonar la idea de «servicios paralelos» y a pensar en un sistema único con acoplamientos, cuellos de botella y dependencias temporales.

Este encaje «insular» también aparece en análisis de política y operación del sistema eléctrico que, aunque no nacen en el sector del agua, son decisivos para entender su fragilidad: la integración de renovables en un sistema aislado no depende solo de potencia instalada, sino de rampas¹, reservas, control y marco regulatorio, con capacidad técnica condicionada por el propio diseño del sistema (Guerrero-Lemus et al., 2015).

Si se acepta esa premisa, resulta difícil sostener que la transición energética pueda evaluarse solo por porcentajes anuales. La continuidad del suministro hídrico exige otra métrica: capacidad de sostener el servicio bajo estrés, con respuesta rápida ante perturbaciones y con márgenes suficientes para que una incidencia eléctrica no derive en pérdida de presión, parada de bombeos o detención de instalaciones clave.

La literatura sobre interdependencias advierte que, cuando dos redes están acopladas, una perturbación local puede producir efectos desproporcionados si

¹ Rampa (ramp rate): velocidad de cambio de la potencia activa que una unidad (o el sistema) puede incrementar o reducir en un intervalo dado; se expresa como MW/min o como variación de MW en 15–30 min. En operación del sistema se usa para caracterizar la capacidad de seguimiento de la demanda y de activación de reservas, y para fijar límites de variación de potencia cuando el operador lo exige.

existen dependencias rígidas y escasa capacidad de amortiguación (Buldyrev et al., 2010; Hu et al., 2016). Conviene no asumir linealidad: el mismo fallo eléctrico puede ser irrelevante en un sector y crítico en otro, según el estado de depósitos, la redundancia de alimentación o la flexibilidad operativa. Esa no linealidad se ve con nitidez en Canarias cuando el fallo eléctrico cae justo sobre nodos «duros» del sistema hidráulico: durante el cero energético de La Gomera (los días 30 y 31 de julio de 2023), originado por un incendio en la central térmica de El Palmar, el propio Consejo Insular de Aguas pidió moderar el consumo porque se produjo una parada de sondeos y, en paralelo, se constató que las estaciones de bombeo dejaron de elevar agua hacia los depósitos de cabecera; aun así, no todos los municipios sufrieron el impacto con la misma intensidad gracias a las reservas existentes, que amortiguaron el golpe durante horas allí donde el almacenamiento estaba alto o la distribución era más favorable.

Algo parecido pero con otro «punto de acoplamiento» ocurrió en Lanzarote (los días 26 y 27 de octubre de 2022): un corte eléctrico en plantas desalinizadoras paralizó la producción de agua potable en las cuatro instalaciones, forzó el agotamiento de depósitos reguladores y mantuvo afecciones en las zonas más dependientes del suministro desde depósitos concretos (p. ej., Zonzamas), mientras otras áreas quedaron relativamente protegidas; el mismo tipo de perturbación eléctrica, por tanto, puede traducirse en consecuencias muy distintas según la combinación de almacenamiento disponible, dependencia de impulsión y redundancia operativa, y ahí es donde el sistema deja de comportarse «en proporcional».

2.3. Rasgos estructurales del sistema eléctrico insular canario

En Canarias, la operación eléctrica se organiza en sistemas insulares. Históricamente cada isla operaba de forma aislada, con la excepción del subsistema Lanzarote–Fuerteventura; desde 2026 se suma el subsistema Tenerife–La Gomera. El resto de las islas continúa sin interconexiones eléctricas entre sí. Esta configuración implica un mallado relativamente débil, frecuentemente compuesto por líneas de transmisión que no están interconectadas de manera robusta entre islas. Esto resulta en una sensibilidad aumentada ante perturbaciones, lo que puede afectar gravemente la estabilidad del suministro de electricidad (Benítez-Cortéz et al., 2021). La limitada capacidad de interconexión interinsular significa que, ante un fallo en una isla, los sistemas eléctricos de las otras islas no pueden ofrecer apoyo inmediato, lo que incrementa el riesgo de apagones.

2. El sistema energético en Canarias y su relación con el suministro de agua

Además, el tamaño reducido de las islas complica la creación de reservas energéticas eficaces, ya que los recursos disponibles son escasos. Esta incapacidad de amortiguar perturbaciones también se ve reflejada en la capacidad de respuesta ante cambios en la demanda o en la oferta de recursos renovables, lo que podría argumentarse que limita la resiliencia del sistema. En consecuencia, la estabilidad del ciclo integral del agua que incluye bombeos, potabilización, depuración, reutilización y desalinización, se encuentra estrechamente vinculada a estas características estructurales del sistema eléctrico canario (Canales et al., 2020) (Tabla 2.3).

La generación de electricidad en Canarias depende en gran medida de la quema de combustibles fósiles, siendo el petróleo el principal. Sin embargo, en años recientes ha habido un impulso significativo hacia la integración de fuentes de energía renovables, como la eólica y solar. Este crecimiento difiere entre las islas, lo que se traduce en variaciones notables en la matriz energética insular; Tenerife y Gran Canaria lideran en términos de integración de renovables respecto a Lanzarote y Fuerteventura, que aún dependen más de fuentes fósiles.

Sin embargo, esta transición a fuentes renovables enfrenta un dilema: la intermitencia de la energía solar y eólica puede generar tensiones en el sistema, especialmente cuando se combina con la demanda energética durante períodos de alta necesidad. A medida que se desarrollan más proyectos renovables, el rol que estas tecnologías juegan se vuelve crucial para la reducción de los costes energéticos y las emisiones de CO₂, aunque su variabilidad plantea desafíos operacionales.

En este sentido y en relación con las energías renovables, la condición insular no es solo un rasgo geográfico; define restricciones técnicas. En Tenerife, por ejemplo, se ha analizado la capacidad del sistema para integrar escenarios cercanos de eólica y fotovoltaica bajo el marco regulatorio español, y se concluye que el sistema puede gestionar las rampas previstas en escenarios de corto plazo, con un matiz que conviene no ocultar: esa «capacidad técnica» está condicionada por la operación, la reserva y la planificación de red asociada, no por la potencia instalada (Guerrero-Lemus, González-Díaz, Ríos, & Dib, 2015).

Una revisión reciente sobre política energética y objetivos de transición en Canarias refuerza esta idea desde otra vía: identifica obstáculos históricos y condicionantes de gobernanza que ayudan a explicar por qué la trayectoria real no siempre sigue el plan, incluso cuando la tecnología existe (Escamilla-Fraile, Ramos-Real, Calero-García, & González-Díaz, 2023).



Fuente: Santamarta, J.C. (2026)

Figura 2.1. Molino de viento para elevación de aguas.

La lectura para este capítulo es directa: en sistemas pequeños, la estabilidad se sostiene con pocas palancas y, cuando una falla (red, reserva, combustible, control), el margen cae con rapidez.

En 2023, la escala del sistema (y, con ella, su tipo de vulnerabilidad) queda bien acotada: 3588 MW de potencia instalada bruta y 3339 MW netos, con 9225 GWh de producción y 8762 GWh de demanda (en barras de central²), además de pérdidas cuantificadas y una demanda final (RdTyD³) explícitamente reportada en el anuario energético de Canarias (Consejería de Transición Ecológica y Energía (CTEE), 2023).

No es solo una cuestión de números: en sistemas pequeños, un margen que «sobraría» en un sistema continental puede convertirse en un cuello de botella

² Barras de central (b.c.): demanda/energía medida en el punto de entrega de las centrales a la red; se corresponde con la energía inyectada por la generación (y las importaciones), descontando consumos en bombeo y exportaciones. Para obtener la energía en puntos de consumo hay que descontar las pérdidas de la red de transporte y distribución.

³ RdTyD (Red de Transporte y Distribución): «demanda final (RdTyD)» se refiere a la energía efectivamente entregada a los consumidores a través de la red, es decir, la demanda en barras de central una vez descontadas las pérdidas de transporte y distribución.

2. El sistema energético en Canarias y su relación con el suministro de agua

operativo cuando coinciden rampa de demanda, parada de grupo o un episodio de baja producción eólica (REE, 2016).

La concentración espacial de potencia instalada es otro rasgo estructural, porque condiciona redundancias y capacidad de maniobra. En 2023, Tenerife (39,9 %) y Gran Canaria (39,3 %) concentran, juntas, cerca del 80 % de la potencia eléctrica bruta instalada del archipiélago (CTEE, 2023).

El resto se reparte entre subsistemas mucho menores, donde la indisponibilidad de un grupo o de un elemento de red pesa más, proporcionalmente, que en los dos sistemas principales (REE, 2016).

La estructura tecnológica explica el «carácter» del suministro y su exposición a combustibles importados. Si se utiliza la potencia neta (más útil para discutir operación), en 2023 Canarias suma 2421 MW asociados a tecnologías basadas en productos derivados del petróleo, frente a 918 MW de fuentes renovables (CTEE, 2023).

Dentro del bloque térmico, el agregado regional muestra un peso relevante de ciclos combinados (865 MW), concentrados en Gran Canaria y Tenerife, mientras que en islas no capitalinas tienen mayor presencia motores diésel (489 MW) y turbinas de gas (521 MW), coherentes con una lógica de modularidad y cobertura, aunque con consecuencias claras en coste, logística y riesgo de suministro de combustible (CTEE, 2023).

En renovables, el anuario recoge para 2023, 638,7 MW eólicos y una potencia fotovoltaica que se sigue de forma específica por islas y series temporales, con crecimiento sostenido en los últimos años (CTEE, 2023).

Aquí aparece un matiz metodológico importante: la contabilidad del anuario se centra en instalaciones que vierten a redes de transporte/distribución y en ciertos regímenes de autoconsumo con excedentes sin compensación; quedan fuera otras tipologías (aisladas, sin excedentes o con compensación), de modo que la fotografía es sólida para la operación de red, pero no pretende agotar todo el despliegue distribuido (CTEE, 2023).

La operación del sistema es, en sí misma, un rasgo estructural en Canarias. REE actúa como transportista y operador del sistema, con dos Centros de Control Eléctrico (Gran Canaria y Tenerife) para supervisión en tiempo real, programación de grupos para cobertura de demanda al mínimo coste, equilibrio generación–demanda e integración segura de renovables (REE, 2016).

La red eléctrica canaria se sustenta en un sistema de transporte con distintas tensiones que interconectan subestaciones distribuidas por las islas. Las tensiones de operación estándar y la estructura de estas subestaciones son fundamentales para la estabilidad de la red, pero también suponen un punto de control crítico para la operativa del sistema. Este control se basa en sistemas automatizados,

donde los centros de control gestionan flujos y regulaciones de energía en tiempo real, ayudando a mantener el equilibrio entre la oferta y demanda. No obstante, la naturaleza aislada del sistema incrementa las restricciones operativas que los centros de control deben gestionar, como la posibilidad de excedentes o déficits de energía por variaciones estacionales en la generación renovable o picos de demanda.

La red de transporte se describe con tensiones ≥ 66 kV, enlaces entre islas y transformación 220/132/66 kV, lo que da una idea bastante concreta del esqueleto eléctrico de alta tensión (REE, 2016).

Cuando se baja a distribución, la capilaridad y el volumen de activos ayuda a entender por qué la «robustez» no depende solo de generar, sino de sostener la red en condiciones reales. En diciembre de 2023 se documentaron 8.857 centros de distribución, 9891 transformadores MT/BT y 4301 MVA instalados (CTEE, 2023).

Este tejido, por islas y con condicionantes territoriales fuertes, hace que las averías no tengan una traducción homogénea: la misma perturbación puede quedarse en un incidente local o escalar si afecta a un elemento estructural sin vía alternativa (REE, 2016). La limitación de opciones de respaldo en caso de averías podría acentuar apagones y modificar la continuidad del ciclo integral del agua (Canales et al., 2020). Estos factores estructurales invitan a un análisis más detallado de cómo se podrían hacer más resilientes las infraestructuras, y cómo dicha resiliencia podría beneficiar el ciclo integral del agua.

Desde esta perspectiva, almacenamiento e interconexiones no son «complementos», sino palancas de estabilidad. REE subraya que, para reducir vulnerabilidad en sistemas aislados, el almacenamiento (p. ej., centrales reversibles) aporta garantía de suministro, seguridad de sistema e integración de renovables no gestionables, y que nuevas interconexiones permitirían apoyo mutuo y mallado con rutas alternativas ante averías (REE, 2016).

En esa línea, se documenta la creación en 2015 de REINCAN (Red Eléctrica Infraestructuras en Canarias) para impulsar proyectos de almacenamiento, y se presenta Soria-Chira como pieza de referencia en Gran Canaria, con 200 MW de turbinación y objetivos explícitos de regulación e integración renovable (REE, 2016).

Retomando de nuevo la cuestión de la producción por energías renovables y particularizando por islas, el ISTAC indica que en 2024 la generación eléctrica en Canarias siguió dominada por productos petrolíferos (79,2 %), mientras que las energías renovables aportaron el 20,8 %; dentro de estas, la eólica representó el 15,9 % del total. El reparto por islas no fue homogéneo: El Hierro alcanzó un 43,7 % de generación renovable, frente a valores bajos en La Palma (8,77 %) y Lanzarote (8,95 %). En términos de variación interanual, la producción total

2. El sistema energético en Canarias y su relación con el suministro de agua

aumentó un 1,55 %, con un crecimiento de la generación renovable del 8,3 %, mientras que la producción con derivados del petróleo se mantuvo prácticamente estable (-0,09 %). El desglose por tecnologías apunta a dónde se concentra el cambio: la eólica subió un 5,85 % y la solar fotovoltaica un 16,35 %, y entre ambas explicaron el 98,1 % de toda la generación renovable del archipiélago.

Tabla 2.3: Rasgos estructurales del sistema eléctrico canario y lectura agua-energía (síntesis)

Rasgo	Indicador/evidencia	Qué implica en operación eléctrica	Traducción directa al servicio de agua
Sistemas aislados y mallado débil	Canarias opera como seis sistemas eléctricamente aislados, de pequeño tamaño y «débilmente mallados»	Menos inercia y menos «colchón»: una indisponibilidad local puede alterar frecuencia/seguridad con rapidez	El agua depende de nodos eléctricos concretos (bombeos, ETAP/EDAR, plantas): si cae el suministro, el impacto puede ser brusco, no gradual
Escala del sistema (2023)	3.588 MW (bruta) y 3.339 MW (neta); 9.225 GWh de producción y 8.762 GWh de demanda (barras de central)	La escala es reducida frente a un sistema continental: se nota antes cualquier pérdida de generación	En hidráulica, esa «escala pequeña» significa que una perturbación eléctrica puede propagarse a la operación del agua con menos margen de maniobra
Pérdidas eléctricas (2023)	Pérdidas en transporte/distribución cuantificada; en el balance del anuario aparecen en torno a 518 GWh.	Mayor sensibilidad a cuellos de botella y a incidencias en red (lo que en un sistema grande se «diluye» aquí se siente)	Menos holgura para alimentar cargas críticas del agua en escenarios de contingencia, sobre todo si coinciden picos de demanda
Concentración territorial de potencia	Tenerife ~39,9 % y Gran Canaria ~39,3 % de la potencia instalada bruta (2023)	Las islas no capitalinas quedan con sistemas más pequeños: menos diversidad tecnológica y menos opciones de respaldo interno	Donde el sistema es más pequeño, el agua «paga» antes el fallo: menos alternativas para sostener bombeos y tratamiento
Mix tecnológico (potencia neta, 2023)	2.421 MW (productos derivados del petróleo) vs 918 MW (renovables)	Dependencia estructural de combustibles importados y de grupos térmicos para cubrir base y servicios de ajuste	El coste y la continuidad del agua (incluida la desalinización de agua de mar) quedan anclados al coste/seguridad del sistema térmico
Diferencias por tipología térmica	En el agregado destacan ciclos combinados (865 MW), concentrados en Tenerife y Gran Canaria; en no capitalinas pesan más diésel (489 MW) y turbinas de gas (521 MW)	Modularidad y respuesta rápida, pero con implicaciones de coste y exposición a combustible	En islas pequeñas, la vulnerabilidad eléctrica puede traducirse en paradas de impulsiones y afecciones a depósitos en pocas horas
Renovables instaladas (2023)	639 MW eólicos y 249 MW fotovoltaicos (potencia en inversores), más aportes menores	Mayor penetración renovable exige operación fina (reserva, regulación, seguridad) en sistemas aislados	Si la regulación no acompaña, suben los riesgos de incidencias

Fuente: elaboración propia (2026)

El enlace con el agua, aquí, casi no necesita adjetivos: con bombeos, elevaciones, tratamiento y desalinización de agua de mar repartidos por el territorio insular, la arquitectura eléctrica (aislamiento, mallado, reservas, almacenamiento) actúa como condición física del servicio hídrico. Cuando esa condición se degrada, el impacto no escala de forma proporcional; depende del diseño hidráulico, de los volúmenes almacenados y de la redundancia energética disponible (REE, 2016; CTEE, 2023).

Cualquier interrupción en el suministro puede significar dificultades en la operación de plantas de desalinización, que requieren de energía continua para funcionar eficientemente. Por tanto, es crucial considerar las «no linealidades» en esta interdependencia: los impactos no son simplemente aditivos, sino que dependen de la configuración de almacenamiento hidráulico, redundancias existentes y la capacidad de operación de equipos críticos.

El agua y la energía están, por tanto, interrelacionadas en un ciclo que debe ser planificado y optimizado de manera cohesiva, de modo que se garantice tanto un suministro eficiente de electricidad como la disponibilidad constante de agua (Canales et al., 2020). Además, es relevante considerar que las condiciones climáticas y el aumento de la demanda de agua y energía pueden intensificar estas interacciones, por lo que es necesario realizar mediciones y pronósticos adecuados que informen sobre la gestión y planificación de estos recursos (Canales et al., 2020).

Como líneas de investigación vinculadas al binomio agua–energía en Canarias, se mantiene un vacío llamativo: faltan datos integrados que conecten, con resolución suficiente, la oferta y demanda energética con los requerimientos reales del ciclo del agua (captación, impulsiones, potabilización, depuración, regeneración y desalinización de agua de mar), lo que impide cuantificar con precisión dónde se generan los cuellos de botella y qué margen operativo existe ante perturbaciones. A partir de ahí, resulta prioritaria la caracterización de interdependencias puntuales, no genéricas, en escenarios de estrés hídrico y energético (sequía prolongada, olas de calor, incidencias eléctricas, restricciones logísticas), porque el sistema no falla «en promedio», sino en nodos concretos y en ventanas temporales críticas. Se echan en falta modelos predictivos que estimen, con fronteras metodológicas claras, el consumo energético específico de la desalinización de agua de mar y del tratamiento en condiciones variables (salinidad, temperatura, ensuciamiento, recuperación, estrategias de limpieza), y que permitan separar mejoras tecnológicas de efectos coyunturales.

También queda poco explorada la gestión óptima del recurso hídrico cuando la generación renovable introduce variabilidad y rampa: no es evidente qué combinaciones de almacenamiento hidráulico, programación de bombeos y reserva eléctrica minimizan riesgo y coste sin trasladar vulnerabilidad a otros puntos del

sistema. En paralelo, el almacenamiento energético en islas requiere una evaluación comparada más fina de tecnologías emergentes (baterías, volantes de inercia, almacenamiento térmico, soluciones híbridas) bajo criterios insulares de robustez, mantenimiento y respuesta ante contingencias.

Por último, la interacción clima–energía–agua sigue siendo un terreno con demasiadas suposiciones: faltan análisis que traduzcan de manera explícita cómo la variabilidad climática (temperaturas, calmas de viento, intrusiones salinas, episodios de turbidez) altera simultáneamente la generación renovable y la eficiencia de la operación de la desalinización de agua de mar, y qué significa eso para la continuidad del servicio.

2.4. Mix energético reciente y transición en curso

La transición puede medirse por GWh y por potencia instalada, pero también por su capacidad de funcionar como sistema bajo estrés. En el caso canario, se ha defendido que alcanzar un suministro 100 % renovable no es un problema de «voluntad» ni de un único salto tecnológico, sino de coordinar red, almacenamiento, flexibilidad operativa y planificación, evitando cuellos de botella que en sistemas aislados se vuelven dominantes (Guerrero-Lemus, 2020).

En esa lógica, el almacenamiento no es un complemento; es parte del mecanismo que evita que la alta penetración renovable se traduzca en inestabilidad, vertidos o dependencia térmica en momentos críticos.

Aquí encaja bien un contrapunto sobrio: la propia discusión sobre objetivos 2040 y las barreras históricas en Canarias sugiere que el «éxito» de la transición no se juega solo en añadir MW renovables, sino en resolver fricciones administrativas, de planificación y de aceptación que terminan materializándose en retrasos de red, falta de flexibilidad o integración parcial (Escamilla-Fraile et al., 2023). Dicho de forma más áspera: si el sistema no puede absorber la variabilidad en las horas malas, el porcentaje anual es un consuelo estadístico.

En 2024, la generación renovable en Canarias alcanzó su máximo histórico: 1849 GWh, el 20,8 % del total anual (Tabla 2.4). (REE, 2025a). La eólica y la solar fotovoltaica concentraron el avance, con 1409 GWh y 405 GWh, respectivamente, también en máximos para el archipiélago (REE, 2025a).

En paralelo, la estadística regional sintetiza el mismo año con una estructura aún muy dependiente de derivados del petróleo con casi un 80 % (Instituto Canario de Estadística, 2025).

La transición también se ve en capacidad instalada. Al cierre de 2024, las renovables representaron el 28,7 % de la potencia instalada, y el incremento de

potencia renovable durante el año se apoyó, sobre todo, en nueva fotovoltaica y en menor medida en eólica. (REE, 2025a). El informe regional de sistema eléctrico de Canarias para 2024 completa la «foto» con la escala del sistema y su evolución anual, útil para entender por qué ciertos cambios porcentuales, aun siendo reales, no garantizan por sí solos una mejora operativa equivalente. (REE, 2025b).

Aquí aparece el punto incómodo, y práctico: si el objetivo es continuidad de servicios esenciales bajo perturbaciones, el porcentaje anual es un indicador necesario, pero no suficiente. La transición se juega en el terreno de la operación: puntas de demanda, estabilidad, reserva, capacidad de respuesta y robustez física de nodos críticos. Hay evidencias que obligan a bajar a ese nivel: en 2024 se alcanzó una cobertura renovable horaria del 52 % de la demanda (14 de agosto, 13:00–14:00), un hito interesante precisamente porque traslada la discusión desde «energía anual» a «prestación del sistema» en condiciones reales (REE, 2025a). La pregunta que queda flotando es menos retórica de lo que parece: ¿cuántas horas críticas pueden sostenerse con seguridad sin trasladar vulnerabilidad a otros puntos?

En sistemas aislados, el almacenamiento deja de ser un complemento y se convierte en una pieza de ingeniería de sistema. El Informe del Sistema Eléctrico (visión nacional) lo explicita al hablar de territorios aislados como Canarias: el almacenamiento «se configura como herramienta estratégica», y sitúa el bombeo reversible, con mención directa al proyecto del Salto de Chira en Gran Canaria, como solución para una integración segura y eficiente de renovables que sustituyan a fuentes fósiles (REE, 2025c).

En la misma línea, tanto Red Eléctrica como el Banco Europeo de Inversiones describen Salto de Chira como una central de bombeo reversible de 200 MW y 3,5 GWh de capacidad energética, orientada a absorber excedentes renovables y devolver energía cuando el sistema lo exige, reforzando así la seguridad de suministro en un contexto insular. (REE, 2024; European Investment Bank, 2024).

Tabla 2.4: Mix 2024 y señales operativas de transición (Canarias)

Bloque	Indicador (2024)	Valor	Lectura «operativa»
Mix de generación	Generación renovable total	1849 GWh (20,8 % del total) (REE, 2025a)	El porcentaje anual mejora, pero lo decisivo es cuántas horas y en qué franjas críticas puede sostenerse sin degradar seguridad
Mix de generación	Eólica	1409 GWh (máximo histórico) (REE, 2025a)	Aporta energía, pero la variabilidad obliga a mirar rampas y reservas si el objetivo es continuidad de servicios esenciales

2. El sistema energético en Canarias y su relación con el suministro de agua

Tabla 2.4: Mix 2024 y señales operativas de transición (Canarias)

Bloque	Indicador (2024)	Valor	Lectura «operativa»
Mix de generación	Solar fotovoltaica	405 GWh (máximo histórico) (REE, 2025a).	Refuerza el patrón diurno; la operación real depende de si hay flexibilidad para cubrir el «después»
Mix de generación	Estructura del mix (por tecnologías)	Ciclo combinado 42 %; motores diésel 21,1 %; eólica 15,8%; turbina de vapor 13,3%; resto (FV+turbina gas+hidroeólica) 7,7 % (REE, 2025a)	La transición convive con una base térmica que, en islas, sigue siendo la «red de seguridad» cuando faltan viento/sol o hay incidencias
Mix de generación	Síntesis institucional alternativa (ISTAC)	Productos petrolíferos 79,2 %; renovables 20,8 %; eólica 15,9 % del total (ISTAC, 2025) (Gobierno de Canarias)	Útil para discusión pública: confirma que el cambio es real, pero aún minoritario en términos de dependencia
Potencia instalada	Potencia total instalada	3358 MW (REE, 2025a; 2025b)	En sistemas aislados, el tamaño limita márgenes; la continuidad del agua se juega en la robustez del parque y la red
Potencia instalada	Cuota renovable en potencia	Renovables 28,7 % de la potencia instalada (REE, 2025a)	«Más MW renovables» no equivale automáticamente a «más seguridad» sin almacenamiento y control
Potencia instalada	Nueva potencia (incremento anual)	+64 MW (59 MW FV; 5 MW eólica); +7,2 % potencia renovable vs 2023 (REE, 2025a)	Señal de tracción, pero la vulnerabilidad se reduce cuando el incremento viene con capacidad gestionable (almacenamiento/reserva)
Potencia instalada	Estructura de potencia instalada (principales)	Ciclo combinado 25,8 %; eólica 19,3 %; turbina gas 15,5%; diésel 14,5 %; turbina vapor 14,4 %; FV 8,8 % (REE, 2025a)	La transición avanza, pero la foto de potencia revela que la firmeza sigue muy anclada en tecnologías térmicas
Señales operativas	Mes récord en renovables	Agosto 2024: 257 GWh renovables; 32,52 % de la generación mensual (REE, 2025a)	Esto ya es «operación»: meses con cuota alta tensionan menos el sistema si hay margen de regulación y reserva
Señales operativas	Hora récord (aporte renovable)	14/08/2024, 13:00–14:00: 633 MWh, 52 % de la demanda horaria (REE, 2025a)	Aquí se ve la transición de verdad: lo relevante es la franja de máxima demanda. Es el tipo de dato que interesa cuando hay bombeos, tratamiento o desalinización de agua de mar que no pueden «parpadear»
Señales operativas	Demanda eléctrica anual	8.896 GWh; variación +0,5 % (REE, 2025a; 2025b)	Demanda al alza: exige planificación fina si se pretende electrificar más el ciclo del agua sin aumentar fragilidad
Señales operativas	Disponibilidad de red	98,8 % (REE, 2025a)	Indicador sobrio pero importante: una transición útil para el agua necesita una red que no solo «exista», sino que esté disponible cuando toca

Fuente: elaboración propia (2026)

El Hierro es el ejemplo canario más nítido de transición «con ingeniería de sistema»: la central hidroeólica de Gorona del Viento no se limita a añadir reno-

vables, sino que introduce almacenamiento operativo mediante un esquema de bombeo–turbinaación acoplado a un parque eólico. En términos de configuración, combina 11,5 MW eólicos y una hidráulica reversible con 6 MW de bombeo y aproximadamente 11,3 MW de turbinaación, de modo que el excedente eólico se transforma en energía potencial y se recupera cuando el sistema lo necesita (IDAE, 2007). El diseño se apoya en dos depósitos; el superior, ubicado en La Caldera, se describe con una capacidad del orden de 380.000 m³, lo que ayuda a entender que aquí el «almacenamiento» no es una abstracción: es infraestructura hidráulica con límites físicos (Gorona del Viento El Hierro, 2007).

En 2024, la propia entidad publicó indicadores de desempeño que permiten bajar la discusión a magnitudes verificables: 859 horas con cobertura 100 % renovable, 6024 t de diésel no consumidas y 18.073 t de emisiones evitadas asociadas al reemplazo de generación convencional (Gorona del Viento El Hierro, 2025).

En paralelo, la estadística regional sitúa a El Hierro como la isla con mayor participación renovable en 2024 (43,7 %), una cifra coherente con el peso estructurante de la central hidroeólica en un sistema eléctrico pequeño (ISTAC, 2025).

Conviene, eso sí, resistir la tentación de extrapolar sin matices. El Hierro tiene una demanda eléctrica contenida y un esquema de generación muy particular; su éxito no prueba que «baste» con más eólica o más fotovoltaica, sino que refuerza una idea más incómoda: sin almacenamiento y control, el porcentaje anual puede crecer sin traducirse en continuidad robusta ante contingencias. En clave agua–energía, Gorona además introduce un punto técnico que suele quedar fuera del debate: incluso cuando el bombeo opera en circuito esencialmente cerrado, el sistema depende de variables hidráulicas (volúmenes útiles, evaporación, reposiciones, operación de válvulas y conducciones). Y, por la parte del agua urbana, el aprendizaje es transferible: cuando la isla depende de bombeos, tratamiento o desalinización de agua de mar, la integración renovable útil es la que viene acompañada de flexibilidad y capacidad de respuesta, no la que solo mejora el promedio anual (ISTAC, 2025; IDAE, 2024).

La conexión con el agua es directa y, si se mira con frialdad, casi física: con bombeos, elevaciones, tratamiento y desalinización de agua de mar distribuidos por el territorio, la transición eléctrica se traduce en continuidad del servicio hídrico solo si la penetración renovable viene acompañada de estabilidad, flexibilidad y capacidad de respuesta. El propio despliegue de Salto de Chira incorpora explícitamente una desalinizadora asociada al esquema del proyecto, subrayando que en Canarias el acoplamiento agua–energía no es una metáfora, sino una interdependencia operativa que conviene tratar como tal (REE, 2024a; 2024b).

2.5. Red de transporte y nodos: dónde se gana o se pierde la resiliencia

El sistema eléctrico canario no es solo generación. Es red. En la práctica, la resiliencia se decide en nodos y corredores: subestaciones, transformadores, líneas y, cuando existen, enlaces entre sistemas. Por eso tiene sentido mirar qué actuaciones se materializan, porque ahí se ve dónde el operador «compra» margen y dónde asume que no lo tiene.

El análisis aplicado a Tenerife bajo el marco regulatorio español, al discutir escenarios de integración de eólica y fotovoltaica, pone el foco en la gestión de rampas y en la operación segura del sistema; eso, trasladado a la red, equivale a admitir que ciertos puntos de transformación y ciertos corredores concentran la capacidad real de sostener el servicio (Guerrero-Lemus et al., 2015).

No es evidente que el principal riesgo sea siempre «falta de generación»; puede ser un cuello en 66–132 kV, una indisponibilidad de subestación o una limitación de reconfiguración.

Este argumento se vuelve más interesante cuando se conecta con el agua. En Tenerife se ha cuantificado el nexo agua–energía mostrando que una fracción relevante de la energía se dedica a funciones del ciclo integral del agua (abstracción, depuración, descarga al mar), y que escenarios futuros pueden tensionar esa relación (Rodríguez-Urrego et al., 2022).

En un modelo de cascada, esto no es decoración: convierte a ciertas cargas hídricas en cargas críticas y, en ocasiones, en cargas con cierta «flexibilidad» (si hay almacenamiento hidráulico suficiente), algo que el operador puede explotar... o perder si los nodos de alimentación son rígidos.

En 2024, Red Eléctrica señala un paquete de refuerzos con lectura directa de resiliencia: autorización de explotación de 18 proyectos (inversión aproximada de 111 M€) y, si se suma Salto de Chira, una inversión total anual de 210 M€ (REE, 2025).

Dentro de esas actuaciones se destacan explícitamente la subestación 220 kV Buenos Aires y la línea 220 kV Caletillas–Buenos Aires, descritas como eje fundamental para la zona metropolitana de Santa Cruz de Tenerife (REE, 2025). Esa obra no es un gesto menor: la propia nota técnica de puesta en servicio explica que el refuerzo pasa por elevar a 220 kV determinadas líneas y reconfigurar circuitos (incluyendo nuevos circuitos Buenos Aires–Caletillas), precisamente para robustecer el abastecimiento eléctrico de un área de alta criticidad urbana (REE, 2024). La documentación administrativa autonómica acompaña esa misma lógica al describir ampliaciones asociadas en Caletillas a 220 kV (Gobierno de Canarias, 2024).

El segundo ejemplo enlaza con la idea de «red como condición de transición»: la subestación 66 kV de Chío. Red Eléctrica la presenta como infraestructura estratégica para reforzar la vertiente occidental de Tenerife, facilitar mayor integración renovable y, esto es lo decisivo para el argumento, formar parte del nuevo enlace submarino que conectará Tenerife con La Gomera (REE, 2025d). En paralelo, el propio expediente autonómico de 2024 describe la nueva línea 66 kV, asociada entre la futura subestación Chío y Los Olivos, como la costura terrestre necesaria para que la interconexión sea algo más que un cable en el mar (Gobierno de Canarias, 2024).

Gran Canaria ofrece un ejemplo muy útil porque no es un proyecto «vistoso», pero sí decisivo para robustecer el esqueleto de operación: la tramitación de una línea subterránea de entrada/salida en la subestación Aldea Blanca a 66 kV (asociada al eje Barranco de Tirajana–Escobar) y la ampliación de la propia subestación Aldea Blanca a 66 kV con nuevas posiciones e interruptores. Este tipo de actuaciones, en el terreno, significa algo muy concreto: más capacidad de manobra, mejor sectorización y menos dependencia de una única configuración de red cuando hay indisponibilidades (Gobierno de Canarias, 2024a, 2024b). En clave hídrica, la lectura es inmediata: si la alimentación de bombeos o instalaciones de tratamiento depende de un nudo con poca capacidad de reconfiguración, el fallo eléctrico se convierte en fallo hidráulico, aunque el recurso exista.

En Fuerteventura, la estrategia es aún más explícita: construir un eje norte–sur. Red Eléctrica culmina en 2024 la puesta en servicio de un eje de doble circuito a 132 kV acompañado por cinco nuevas subestaciones 132/66 kV (La Oliva, Puerto del Rosario, Jares, Gran Tarajal y Matas Blancas). Se insiste en la mejora de la seguridad y calidad del suministro, que es justamente lo que falta cuando un sistema crece con ramales y sin alternativas de ruta (REE, 2024). Para el binomio agua–energía este refuerzo es casi un caso didáctico: al aumentar la robustez del eje, reduces la probabilidad de que una incidencia local deje «colgadas» estaciones de impulsión y depósitos reguladores que, por su propia lógica hidráulica, no toleran bien cortes sostenidos.

La Palma muestra el mismo argumento con otra geometría: refuerzo y reordenación en 66 kV para coser la isla con una mayor granularidad de nodos. En 2024 se sometieron a información pública tanto la Nueva Subestación Las Breñas 66 kV como el conjunto de líneas 66 kV doble circuito de entrada/salida en Las Breñas asociadas a la línea Guinchos–Valle de Aridane y a los circuitos Las Breñas–Los Guinchos y Las Breñas–Guinchos. La propia descripción administrativa deja claro que se trata de reconfigurar trayectorias y apoyos para enlazar subestaciones existentes y futuras (Gobierno de Canarias, 2024c; 2024d; Gobierno de España, 2024).

Desde la óptica de fallos en cascada, estos proyectos importan porque cambian la topología: no «añaden megavatios», pero sí reducen rigideces. En agua eso se traduce en algo menos teórico: más probabilidad de que, ante una incidencia, parte del sistema siga alimentando bombeos críticos mientras se repara el elemento dañado.

En las islas orientales, la palanca estructural ha sido la interconexión Lanzarote–Fuerteventura a 132 kV, culminada por Red Eléctrica y presentada como un refuerzo notable de la seguridad y calidad del suministro, además de un habilitador para la transición energética del subsistema conjunto (REE, 2022). Esa interconexión cambia el tipo de riesgo: donde antes había dos sistemas con márgenes estrechos, aparece la posibilidad de apoyo mutuo y de amortiguación frente a indisponibilidades locales. En paralelo, Lanzarote sigue tramitando refuerzos en 66 kV, como la ampliación de la subestación Mácher a 66 kV, que da otra pista clara: la resiliencia se trabaja donde se encuentra el cuello real, no dónde queda más bonito en un gráfico anual (Gobierno de Canarias, 2025).

La lectura hídrica es casi inmediata, si una subestación o una línea que alimenta estaciones de bombeo, depósitos reguladores o instalaciones de desalinización de agua de mar, cae (o queda restringida), el agua cae detrás. No por ausencia de recurso, sino por ausencia de energía operativa. En términos de fallos en cascada, estos refuerzos te dan «puntos de anclaje» para la plataforma: nodos donde una perturbación eléctrica puede traducirse según redundancia y almacenamiento hidráulico en pérdida rápida de servicio, o en una degradación más lenta y gestionable. Y ahí está el matiz incómodo: no es evidente que dos municipios sufran igual ante la misma incidencia si uno depende de impulsión continua y otro vive unas horas con gravedad y depósito.

Con este bloque, el enlace con la plataforma de fallos en cascada es inmediato: cada actuación define nodos, rutas alternativas y capacidad de reconfiguración, que son parámetros directamente modelizables. Lo que «paga» el sistema eléctrico (más mallado, más posiciones, más ejes, interconexión) reduce la probabilidad de que una perturbación se convierta en pérdida de servicio hídrico. Y cuando no hay amortiguación suficiente, el salto es brusco: la infraestructura de agua no falla por falta de agua, sino por pérdida de la condición energética que permite captarla, moverla, tratarla o producirla.

2.6. El nexo agua–energía en Canarias: bidireccional, pero con dirección dominante

El vínculo agua–energía es un marco bien asentado a escala global: una fracción relevante de las extracciones de agua se asocia al sector energético, y, en pa-

ralelo, el sector del agua demanda energía de forma sostenida para sostener servicios básicos.

En sistemas insulares, ese planteamiento general se «deforma» por condicionantes físicos y operativos: tamaño reducido de los sistemas, menor redundancia, topografía exigente y, en Canarias, un peso estructural de la desalinización de agua de mar y de las impulsiones. El resultado práctico es que, aun siendo bidireccional, el nexo suele tener una dirección dominante desde la electricidad hacia el agua: sin suministro eléctrico, el sistema hídrico pierde capacidad de mover, tratar y entregar el recurso, incluso cuando el agua existe en origen.

Esa dependencia energética se materializa en nodos muy concretos del ciclo integral del agua, con consumos y criticidades distintas según isla y configuración: extracción en pozos cuando aplica, bombeos de elevación y redistribución, tratamientos (potabilización y depuración), redes de distribución con impulsiones por gradiente topográfico, desalinización de agua de mar y de agua salobre en determinados casos, y regeneración de aguas (terciario, bombeos y almacenamiento asociado). En la práctica, la vulnerabilidad no depende solo del «volumen» de agua disponible, sino de la continuidad del suministro eléctrico en esos puntos; y cuando el acoplamiento es rígido (un nodo eléctrico alimenta un nodo hidráulico crítico), la interrupción puede convertirse en vía principal de propagación del fallo dentro del sistema de agua y hacia otros servicios esenciales.

Como orden de magnitud (útil para situar escala, no para cerrar un valor «actual» sin recalcular), en un análisis para Tenerife se estimó que el sector del agua podía representar en torno al 7 % del consumo energético insular en 2018 (aproximadamente 214.754 MWh). Esa cifra, leída con cuidado, es más interesante por lo que sugiere que por el número en sí: el agua no es un consumo marginal y, en un sistema eléctrico insular con márgenes operativos más estrechos, cualquier estrategia de seguridad hídrica pasa, quiera o no, por decisiones de planificación y resiliencia eléctrica.

2.7. Vulnerabilidades específicas que conectan energía y agua

2.7.1. Doble dependencia: costa + energía

En sistemas insulares, muchos de los nodos hidráulicos más sensibles se concentran en el litoral por pura lógica física y logística: captaciones costeras, desalinización de agua de mar, emisarios, estaciones de tratamiento y parte de la infraestructura asociada. Esa ubicación no es inocua. Coincide, con frecuencia, con tramos eléctricos y equipos expuestos a los mismos peligros (temporales, inunda-

ción costera, erosión, corrosión, accesos comprometidos). Se configura así una doble dependencia: el agua depende del litoral y, al mismo tiempo, depende de una alimentación eléctrica que también «vive» en ese litoral. El resultado es estructural: la estabilidad operativa queda condicionada por dos vulnerabilidades superpuestas, no por una sola.

2.7.2. Fallos en cascada

La literatura de interdependencias y, en particular, los enfoques de fallos en cascada, insiste en un punto incómodo: una perturbación localizada en un nodo energético puede degradar la integridad global del sistema y provocar impactos que exceden el área afectada. Por ejemplo, en la modelización insular aplicada a La Palma, esa idea se traduce en arquitectura y números: el modelo integra miles de nodos y tipologías de servicio, precisamente para capturar cómo un fallo en energía puede propagarse hacia agua, transporte, comunicaciones y actividades productivas. En ese mismo modelo se introduce explícitamente una parametrización que ayuda a leer la rigidez de la dependencia: la generación diésel se considera dominante (casi el 90 % en el escenario), asignando pesos relativos 0,90 (diésel) y 0,1 (renovable) a los flujos de entrada del sistema eléctrico. No es «la realidad completa» sino un esquema de dependencia para simular, pero funciona como bisturí conceptual: si el suministro eléctrico se apoya en pocos nodos críticos y la red no amortigua, el agua hereda esa fragilidad, aunque el recurso exista y aunque la infraestructura hidráulica esté técnicamente bien dimensionada.

2.7.3. Respaldo y autonomía: el margen temporal que evita el colapso

Entre el fallo instantáneo y el colapso sostenido hay una franja de tiempo, a veces breve, donde se decide casi todo. En nodos críticos (estaciones de bombeo, puntos de regulación, control y tratamiento), la presencia de grupos electrógenos o respaldo local puede evitar cortes abruptos y «comprar» margen para maniobras: completar llenados, reorganizar aportes, sostener presiones mínimas, priorizar consumos esenciales. Esa autonomía, sin embargo, no es automática ni gratuita. Depende del acceso a la instalación tras el evento, de la disponibilidad real de combustible, del mantenimiento, y de que el propio equipo de respaldo no quede dañado o aislado por fallos simultáneos de infraestructura. En entornos costeros, además, el acceso puede degradarse justo cuando más se necesita, lo que convierte el respaldo en una solución de eficacia variable.

2.8. Nodos y fallos: impacto energético en el ciclo integral del agua

En Canarias, hablar de continuidad del agua sin mirar la cadena energética es, sencillamente, incompleto (Tabla 2.5). No por una cuestión «teórica», sino por una realidad de operación: los sistemas eléctricos insulares son pequeños, aislados y comparativamente débiles en mallado, de modo que una indisponibilidad de generación o un fallo en red puede tensionar el suministro con rapidez; justo por eso, el almacenamiento y las interconexiones se presentan como palancas estructurales para reducir vulnerabilidad. En paralelo, cuando se modelan interdependencias en escenarios insulares, aparece un patrón repetido: una perturbación energética localizada puede disparar degradaciones globales si los nodos hidráulicos dependen rígidamente de un suministro eléctrico sin amortiguación suficiente (depósitos, redundancias, respaldo).

Tabla 2.5: Componentes del sistema energético y su impacto operativo en el agua (Canarias)

Componente energético	Qué puede fallar	Efecto inmediato sobre el agua	Medidas de reducción de riesgo
Generación (térmica/renovable)	Pérdida de potencia disponible, indisponibilidad de grupos, caída de frecuencia/tensión por desequilibrio	Parada o degradación de bombeos; descenso de producción en desalinización de agua de mar; limitación de tratamientos (potabilización, depuración)	Diversificación tecnológica; criterios operativos por subsistema; almacenamiento para regulación y firmeza; automatismos de reparto de carga y «servicios esenciales»
Red de transporte y subestaciones	Fallo de subestación, disparo de línea, indisponibilidad de transformación (66/132/220 kV), contingencia con gran área afectada	Zonas sin alimentación de estaciones de bombeo, depósitos reguladores, EDAM/ETAP/EDAR; pérdida brusca de presión y caudal en redes dependientes de impulsión	Refuerzo y mallado; redundancia N-1 donde sea viable; protección física y ciberseguridad; rutas alternativas; priorización de alimentación a nodos hidráulicos críticos
Distribución (MT/BT) y calidad de suministro	Microcortes, huecos de tensión, averías locales, sobrecargas	Fallos intermitentes en bombeos y control; paradas de instrumentación/telemetría; operación «a ciegas» en eventos	Mantenimiento preventivo; seccionamiento y automatización; alimentación dedicada a cargas críticas; calidad de suministro compatible con electrónica de potencia
Combustible y logística	Restricción de suministro, disrupción portuaria, problemas de almacenamiento/contratación	Menor disponibilidad térmica y riesgo de racionamiento eléctrico y, por arrastre, racionamiento hídrico indirecto	Reservas estratégicas; contratos y diversificación logística; planes de contingencia portuaria; gestión de demanda en agua y energía

2. El sistema energético en Canarias y su relación con el suministro de agua

Tabla 2.5: Componentes del sistema energético y su impacto operativo en el agua (Canarias)

Componente energético	Qué puede fallar	Efecto inmediato sobre el agua	Medidas de reducción de riesgo
Respaldo local (grupos electrógenos /UPS (SAI))	Falta de acceso, avería, combustible insuficiente, mantenimiento deficiente	Se pierde el «colchón» temporal: el nodo hidráulico cae al minuto (o a la hora) en función de su autonomía	Inventario y criticidad por instalación; pruebas periódicas con carga; combustible asegurado y rotación; accesibilidad post-evento; UPS ⁴ (SAI) para control y arranque
Almacenamiento eléctrico (bombeo/ baterías/volantes/ ultracondensadores)	Capacidad insuficiente, mala integración en operación, indisponibilidad por fallo o restricciones de red	Renovables no sostienen continuidad; mayor recorte/limitación de generación renovable y menor firmeza; vulnerabilidad del agua en episodios sin recurso renovable	Planificación por isla y por servicios; integración en despacho y control; ampliación donde aporte regulación; coordinación con almacenamiento hidráulico (depósitos)
Almacenamiento hidráulico (depósitos reguladores)	Volumen útil bajo, sectorización deficiente, pérdidas, incapacidad de maniobra	El mismo fallo eléctrico pasa de «anécdota» a «crisis» según horas de autonomía hidráulica	Aumentar volumen útil estratégico; sectorización; telecontrol y maniobras; reglas de operación en contingencia (llenado preventivo, restricciones temporales)
Centros de control/ telecomunicaciones	Pérdida de comunicaciones, fallo SCADA, ciberincidente	Operación degradada: menos capacidad de reconfigurar red, priorizar cargas y coordinar agua-energía	Redundancia de comunicaciones; ciberseguridad; procedimientos manuales; formación y simulacros conjuntos agua-energía

Fuente: elaboración propia (2026)

2.9. Referencias bibliográficas

Agencia EFE. (2025, 23 de mayo). Tenerife inicia en otoño su primer sondeo a 3 km para averiguar su potencial de geotermia. <https://efe.com/canarias/2025-05-23/tenerife-inicia-en-otono-su-primer-sondeo-a-3-km-para-averiguar-su-potencial-de-geotermia/>

Almaleh, A. (2023). Measuring resilience in smart infrastructures: A comprehensive review of metrics and methods. *Applied Sciences*, 13(11), 6452. <https://doi.org/10.3390/app13116452>

⁴ UPS (SAI): Sistema de Alimentación Ininterrumpida (en inglés, Uninterruptible Power Supply). Equipo que, mediante baterías, mantiene la alimentación eléctrica durante cortes y ayuda a estabilizar la tensión.

- Applegate, C., & Tien, I. (2019). Framework for probabilistic vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 33(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000801](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000801)
- Benítez-Cortéz, I., Justiz-Casas, R., Justiz-Esquivel, I., Prieto-Montenegro, L., Barreto-Torrella, S., & Sánchez, A. (2021). Uso racional del agua en centrales termoeléctricas. *Producción + Limpia*, 16(2), 92–111. <https://doi.org/10.22507/pml.v16n2a5>
- Bondank, E., & Chester, M. (2020). Infrastructure interdependency failures from extreme weather events as a complex process. *Frontiers in Water*, 2, 21. <https://doi.org/10.3389/frwa.2020.00021>
- Boletín Oficial del Estado. (2025). BOE-B-2025-9147: Resolución n.º DGI-104/2025 (Admisión definitiva del Permiso de Investigación «Tacande», La Palma). https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-B-2025-9147
- Buldyrev, S., Parshani, R., Paul, G., Stanley, H., & Havlin, S. (2010). Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. *Nature*, 464(7291), 1025–1028. <https://doi.org/10.1038/nature08932>
- Cabildo de La Palma. (2025). El Cabildo, a través de Sodepal, obtiene los derechos de investigación de geotermia en zonas de interés científico. <https://www.cabildodelapalma.es/es/el-cabildo-traves-de-sodepal-obtiene-los-derechos-de-investigacion-de-geotermia-en-las-zonas-de-mas>
- Canales, A., Wehncke, E., & Gudiño-Elizondo, N. (2020). Revisión de las técnicas de desalinización de agua con perspectiva de optimizar requerimiento de energía. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(4), 279–305. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-04-09>
- Chang, Y., Choi, G., Kim, J., & Byeon, S. (2018). Energy cost optimization for water distribution networks using demand pattern and storage facilities. *Sustainability*, 10(4), 1118. <https://doi.org/10.3390/su10041118>
- Comisión Nacional de Energía (CNE). (2013, 6 de junio). Informe 12/2013 de la CNE sobre la propuesta de orden por la que se establece el método de cálculo de los costes fijos y variables de la instalación de producción eléctrica hidroeléctrica de Gorona del Viento [PDF]. https://www.cnmc.es/sites/default/files/2469990_4.pdf
- Elimelech, M., & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science*, 333(6043), 712–717. <https://doi.org/10.1126/science.1200488>
- El País. (2023, 30 de julio). La Gomera se queda sin suministro eléctrico por un incidente en la central de El Palmar. <https://elpais.com/espana/2023-07-30/la-gomera-se-queda-sin-suministro-electrico-por-un-incidente-en-la-central-de-el-palmar.html>

2. El sistema energético en Canarias y su relación con el suministro de agua

- Energía Gran Canaria. (2025, 9 de octubre). Gran Canaria Geotermia inicia la fase decisiva hacia la exploración profunda. <https://www.energiagrancanaria.com/2025/10/09/gran-canaria-geotermia-inicia-la-fase-decisiva-hacia-la-exploracion-profunda/>
- Escamilla-Fraile, S. J., Ramos-Real, F. J., Calero-García, F. J., & González-Díaz, B. (2023). A review of the energy policy and energy transition objectives for 2040 in the Canary Islands (Spain). *Energies*, 16(3), 1321. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/3/1321>
- European Investment Bank. (2024, 29 de octubre). EIB approves a €300 million loan to Red Eléctrica for the construction of Salto de Chira hydroelectric power plant in the Canary Islands. <https://www.eib.org/en/press/all/2024-403-eib-approves-a-eur300-million-loan-to-red-electrica-for-the-construction-of-salto-de-chira-hydroelectric-power-plant-in-the-canary-islands>
- Feo García, J. J., et al. (2024). Cost studies of reverse osmosis desalination plants in the range of 23,000–33,000 m³/day. *Water*, 16, 910. <https://doi.org/10.3390/w16060910>
- Gobierno de Canarias. (2024, 29 de mayo). Boletín Oficial de Canarias, 105/2024: Anuncio de 21 de marzo de 2024 por el que se somete a información pública la solicitud de autorización administrativa del proyecto «Ampliación de la Subestación Caletillas a 220 kV» (Expte. SE24/002). <https://www.gobiernodecanarias.org/boc/2024/105/007.html>
- Gobierno de Canarias. (2024, 30 de octubre). Boletín Oficial de Canarias, 217/2024: Resolución por la que se autoriza la línea de transporte de energía eléctrica de doble circuito a 66 kV entre la futura subestación «Chío» y la subestación «Los Olivos». <https://www.gobiernodecanarias.org/boc/2024/217/3559.html>
- Gobierno de Canarias. (2024a, 7 de junio). Boletín Oficial de Canarias, 111/2024: Línea subterránea de transporte de energía eléctrica a 66 kV simple circuito. Entrada/salida en SE Aldea Blanca 66 kV (Expte. AT24/007). <https://www.gobiernodecanarias.org/boc/2024/111/009.html>
- Gobierno de Canarias. (2024b, 7 de junio). Boletín Oficial de Canarias, 111/2024: Ampliación de la SE Aldea Blanca a 66 kV (Expte. AT24/008). <https://www.gobiernodecanarias.org/boc/2024/111/010.html>
- Gobierno de Canarias. (2024c, 7 de junio). Boletín Oficial de Canarias, 111/2024: Nueva Subestación Las Breñas 66 kV (Expte. SE-24/007). <https://www.gobiernodecanarias.org/boc/2024/111/011.html>
- Gobierno de Canarias. (2024d, 7 de junio). Boletín Oficial de Canarias, 111/2024: Líneas aéreas/subterráneas 66 kV doble circuito... Las Breñas–Los Guinchos y conexiones asociadas. <https://www.gobiernodecanarias.org/boc/2024/111/012.html>

- Gobierno de Canarias. (2025, 3 de diciembre). Canarias lidera en Lanzarote la transición verde sanitaria con la primera climatización geotérmica de un hospital. <https://www3.gobiernodecanarias.org/noticias/canarias-lidera-en-lanzarote-la-transicion-verde-sanitaria-con-la-primera-climatizacion-geotermica-de-un-hospital-p/>
- Gobierno de Canarias. (2025, 22 de octubre). Boletín Oficial de Canarias, 209/2025: Ampliación subestación Mácher a 66 kV (Expte. AT24/038). <https://www.gobiernodecanarias.org/boc/archivo/2025/209/pda/3625.html>
- Gobierno de Canarias, Consejería de Transición Ecológica y Energía (CTEE). (2025). Anuario energético de Canarias 2023 (mayo 2025). Dirección General de Energía. <https://www.gobiernodecanarias.org/energia/descargas/SDE/Portal/Publicaciones/AnuarioEnergeticodeCanarias-2023.pdf>
- Gobierno de España. (2024, 29 de mayo). Boletín Oficial del Estado, BOE-B-2024-19576 [PDF]. <https://www.boe.es/boe/dias/2024/05/29/pdfs/BOE-B-2024-19576.pdf>
- Gorona del Viento El Hierro, S.A. (2025, 6 de mayo). Información estadística y datos. Recuperado el 27 de diciembre de 2025, de <https://www.goronadelviento.es/es/informacion-estadistica-y-datos>
- Gorona del Viento El Hierro, S.A. (2025). Parte anual de producción 2024 [PDF]. https://www.goronadelviento.es/sites/default/files/2025-01/parte_anual_contrata_2024.pdf
- Gorona del Viento El Hierro, S.A. (2025). Declaración ambiental: Periodo enero–diciembre 2024 [PDF]. https://www.goronadelviento.es/sites/default/files/2025-06/declaracion_ambiental_periodo_enero-diciembre_2024.pdf
- Goldbeck, N., Angeloudis, P., & Ochieng, W. (2019). Resilience assessment for interdependent urban infrastructure systems using dynamic network flow models. *Reliability Engineering & System Safety*, 188, 62–79. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.03.007>
- Guerrero-Lemus, R. (2020). Back in the race: Achieving 100% renewable energy in the Canary Islands. *IEEE Power & Energy Magazine*, 18(6), 64–74. <https://doi.org/10.1109/MPE.2020.3014745>
- Guerrero-Lemus, R., González-Díaz, B., Ríos, G., & Dib, R. N. (2015). Study of the new Spanish legislation applied to an insular system that has achieved grid parity on PV and wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 426–436. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.079>
- Hu, F., Yeung, C., Yang, S., Wang, W., & Zeng, A. (2016). Recovery of infrastructure networks after localised attacks. *Scientific Reports*, 6, 24522. <https://doi.org/10.1038/srep24522>

2. El sistema energético en Canarias y su relación con el suministro de agua

- Instituto Canario de Estadística (ISTAC). (2025, 29 de julio). Aumentan las energías renovables en Canarias pero la mayoría de la electricidad mantiene su origen en el petróleo. Gobierno de Canarias. <https://www.gobiernodecanarias.org/istac/.content/noticias/estadistica-energia-electrica-canarias-produccion-noticia-2024.html>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2024, 15 de febrero). El IDAE asigna a Canarias 106 millones para impulsar los primeros sondeos de geotermia profunda en España. <https://www.idae.es/noticias/el-idae-asigna-canarias-106-millones-para-impulsar-los-primeros-sondeos-de-geotermia>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2025). Programa Geotermia Profunda. Recuperado el 27 de diciembre de 2025, de <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/programa-geotermia-profunda>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2025). Central Hidro-Eólica de El Hierro «Gorona del Viento». Recuperado el 27 de diciembre de 2025, de <https://www.idae.es/conozcanos/proyectos-de-excelencia/central-hidro-eolica-de-el-hierro-gorona-del-viento>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2024, 15 de febrero). El MITECO asigna a Canarias 106 millones para impulsar los primeros sondeos de geotermia profunda en España. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/2024/febrero/el-miteco-asigna-a-canarias-106-millones-para-impulsar-los-prime.html>
- Motter, A. E., & Lai, Y.-C. (2002). Cascade-based attacks on complex networks. *Physical Review E*, 66(6), 065102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.66.065102>
- Negishi, S., & Ikegami, T. (2021). Robust scheduling for pumping in a water distribution system under the uncertainty of activating regulation reserves. *Energies*, 14(2), 302. <https://doi.org/10.3390/en14020302>
- Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR). (2023, 15 de junio). Conoce el Programa de Geotermia Profunda. <https://planderecuperacion.gob.es/noticias/conoce-programa-geotermia-profunda-plan-recuperacion-energia-prtr>
- Red Eléctrica de España (REE). (2016, octubre). Almacenamiento energético en Canarias [Díptico]. https://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/diptico_canarias_2016_esp.pdf
- Red Eléctrica de España (REE). (2022, 17 de octubre). Red Eléctrica culmina con éxito el enlace submarino a 132 kV entre Lanzarote y Fuerteventura (Nota de prensa). <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2022/10/red-electrica-culmina-con-exito-el-enlace-lanzarote-fuerteventura>

- Red Eléctrica de España (REE). (2024, 16 de mayo). Red Eléctrica pone en servicio la nueva subestación Buenos Aires 220 kV en Santa Cruz de Tenerife (Nota de prensa). <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2024/05/red-electrica-pone-en-servicio-la-nueva>
- Red Eléctrica de España (REE). (2024, 25 de enero). Salto de Chira: una herramienta estratégica para Gran Canaria (Especial). <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/especial/2024/01/salto-de-chira-una-herramienta-estrategica-para-gran-canaria>
- Red Eléctrica de España (REE). (2024, 29 de octubre). El BEI y Red Eléctrica impulsan con un préstamo de 300 millones de euros la central hidroeléctrica de bombeo reversible de Salto de Chira en Canarias (Nota de prensa). <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2024/10/el-bei-y-red-electrica-impulsan-con-un-prestamo-salto-chira>
- Red Eléctrica de España (REE). (2024, 13 de diciembre). Red Eléctrica culmina la puesta en servicio del nuevo eje de doble circuito de 132 kV en Fuerteventura (Nota de prensa). <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2024/12/red-electrica-culmina-puesta-en-servicio-nuevo-eje-doble-circuito-132kV-Fuerteventura>
- Red Eléctrica de España (REE). (2025, 9 de enero). Red Eléctrica finaliza las obras de la subestación de Chío 66 kV en Guía de Isora, estratégica para Tenerife y la interconexión con La Gomera (Nota de prensa). <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa-interconexiones-transicion-ecologica/2025/01/red-electrica-finaliza-subestacion-chio-interconexion-tenerife-gomera>
- Red Eléctrica de España (REE). (2025, 18 de marzo). La generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables en 2024 se incrementó un 8,6% en Canarias... (Nota de prensa) [PDF]. https://www.ree.es/sites/default/files/07_SALA_PRENSA/Documentos/2025/NP_Canarias.pdf
- Red Eléctrica de España (REE). (2025, marzo). Informe del Sistema Eléctrico 2024 [PDF]. https://www.sistemaelectrico-ree.es/sites/default/files/2025-03/ISE_2024.pdf
- Red Eléctrica de España (REE). (2025). El sistema eléctrico en las Islas Canarias 2024 (Informe regional) [PDF]. <https://www.ree.es/sites/default/files/publication/2025/07/downloadable/Canarias.pdf>
- Red Eléctrica de España (REE). (2024). Informe del sistema eléctrico: generación y potencia instalada (Canarias, 2024). Recuperado el 27 de diciembre de 2025, de <https://www.sistemaelectrico-ree.es/>
- Rodríguez-Urrego, D., Cañadillas-Ramallo, D., González-Díaz, B., & Guerrero-Lemus, R. (2022). Analysis of the water–energy nexus applied to an insular

2. El sistema energético en Canarias y su relación con el suministro de agua

system: Case study of Tenerife. Sustainability, 14(3), 1653. <https://doi.org/10.3390/su14031653>

RTVE.es. (2023, 30 de julio). Un apagón afecta a la isla de La Gomera. <https://www.rtve.es/noticias/20230730/apagon-gomera/2453086.shtml>

Wu, Y., Yang, S., Wu, J., & Hu, F. (2022). An interacting negative feedback mechanism in a coupled extreme weather–humans–infrastructure system: A case study of the 2021 winter storm in Texas. *Frontiers in Physics*, 10, 912569. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.912569>

Capítulo 3

Riesgos naturales en Canarias: climatología, peligros y eventos históricos

Megan Expósito Brazier

3.1. Introducción

El verano de 2025 no fue, en términos estrictos, el más caluroso jamás registrado. Y, sin embargo, en muchas regiones del planeta resultó insoportable. Olas de calor persistentes, noches que no refrescan y redes eléctricas llevadas al límite se repitieron con una familiaridad inquietante. La sensación, difícil de cuantificar, pero evidente, fue la de un sistema empujado un poco más allá de lo razonable. El informe anual de World Weather Attribution (2025) (Otto, F. et al., 2025) describe este contraste con crudeza: sin récords absolutos, el calentamiento antropogénico sigue amplificando extremos que ya no sorprenden, pero sí desgastan, erosionan y, en ocasiones, colapsan.

No ocurrió solo con el calor. Episodios de lluvias torrenciales y avenidas súbitas atravesaron cuencas aparentemente conocidas, desbordaron infraestructuras diseñadas para otro clima y dejaron tras de sí una secuencia de daños que no se limitó al cauce del río. Carreteras cortadas, estaciones de bombeo fuera de servicio, abastecimientos interrumpidos durante días. Resulta tentador pensar que el problema fue únicamente hidráulico, una cuestión de caudales extremos. La verdad es que rara vez lo es. El informe muestra cómo estos eventos funcionan como detonantes: activan vulnerabilidades preexistentes, tensan sistemas interdependientes y desencadenan fallos que se propagan mucho más allá del punto inicial del impacto.

Algo similar ocurre con las sequías. No siempre llegan de golpe. A veces se instalan despacio, casi con discreción, hasta que el déficit acumulado deja sin margen a la gestión. Embalses bajos, acuíferos sobreexplotados, restricciones tardías que generan conflicto social. Podría argumentarse que la sequía es un fenómeno conocido, incluso «natural» en muchas regiones. No es tan evidente cuando se observa cómo interactúa con sistemas energéticos dependientes del agua, con la producción agraria o con la estabilidad económica de territorios frágiles. De nuevo, el informe de World Weather Attribution insiste en este punto incómodo:

el daño no procede solo del clima, sino de la incapacidad de absorber impactos repetidos en sistemas ya estresados.

Los incendios forestales completan este paisaje de extremos. No como eventos aislados, sino como procesos encadenados. Olas de calor prolongadas, vegetación seca, viento, y una chispa, bastan para que el incendio deje de ser un problema forestal y se convierta en una crisis territorial. Cortes eléctricos preventivos que afectan a servicios esenciales, evacuaciones improvisadas, pérdidas económicas que se acumulan sin un responsable único. Y es que el fuego, cuando se mira con algo de distancia, rara vez quema solo árboles.

El informe subraya un aspecto que incomoda, pero conviene asumir: incluso allí donde existen planes de adaptación, seguros o sistemas de alerta, los límites son cada vez más visibles. No todo es adaptable. No todo es escalable. En muchos de los casos analizados, los mayores impactos no derivan de la intensidad física del evento extremo, sino de la concatenación de decisiones, omisiones y dependencias mal resueltas entre sectores críticos como agua, energía, transporte, salud, que reaccionan tarde o de forma descoordinada.

Este es el terreno en el que cobra sentido el análisis de los fallos en cascada descrita en este libro. No como una abstracción teórica, sino como una herramienta para leer la realidad reciente con algo más de precisión. Olas de calor, avenidas, sequías o incendios no actúan en compartimentos estancos. Se encadenan, se retroalimentan, se amplifican. Comprender esas secuencias: dónde empiezan, por qué se propagan, cuándo dejan de ser controlables, resulta hoy más urgente que nunca, especialmente en territorios insulares y regiones con márgenes de maniobra reducidos. Este capítulo parte de esa premisa incómoda y necesaria: el riesgo climático ya no se explica por eventos aislados, sino por sistemas que fallan en cadena cuando se les exige más de lo que pueden dar.

3.2. Climatología en Canarias

En un escenario marcado por una creciente inestabilidad climática y económica a escala global, las regiones insulares representan algunos de los territorios más expuestos y frágiles del planeta. En este contexto, las Islas Canarias destacan por la dispersión de su territorio y por su elevada dependencia del exterior, factores que intensifican los efectos de los fenómenos naturales y de las crisis globales.

El archipiélago se localiza entre las latitudes 27°38' N y 29°25' N y las longitudes 13°20' O y 18°09' O, a 95 km de la costa noroeste de África, y a aproximadamente 1400 km de distancia de la Península Ibérica. Su clima es de carácter

subtropical, aunque sometido a variaciones significativas derivadas principalmente por la influencia del anticiclón de las Azores, y de forma secundaria por la acción del frente polar y de las bajas presiones saharianas (Cruz-Pérez et al., 2025; Santamarta et al., 2022).

La influencia del anticiclón de las Azores en las islas es particularmente determinante. Durante el verano, los vientos asociados al anticiclón de las Azores predominan con una frecuencia del 90 %, mientras que en invierno se reduce hasta aproximadamente el 50 % del tiempo. Esta circulación atmosférica genera una estratificación térmica, dando lugar a una inversión de subsidencia: la capa inferior, más cercana al mar, se caracteriza por ser más húmeda y fresca, mientras que la superior es más seca y cálida. En invierno, la inversión se sitúa sobre los 1250 m s. n. m. descendiendo a los 700-800 m s. n. m. en verano (Cruz-Pérez et al., 2025; López-Villarrubia et al., 2021). Esta estratificación produce el fenómeno denominado «mar de nubes», especialmente en la vertiente norte, caracterizada por una humedad relativa alta y temperaturas más suaves (Figura 3.1). En contraste, la vertiente sur es seca, soleada y más cálida (Cruz-Pérez et al., 2025; López Díez et al., 2019).



Fuente: Expósito Brazier, M. (2025)

Figura 3.1 Mar de nubes en La Palma.

Estas diferencias se intensifican cuando se consideran también otros gradientes del medio físico, como la altitud. Las zonas costeras registran temperaturas más elevadas y menor precipitación; las medianías presentan condiciones más templa-

das y húmedas; y las cumbres un ambiente más frío, con precipitaciones menos frecuentes pero de mayor intensidad (Cruz-Pérez et al., 2025; López Díez et al., 2019). A ello se une la diversidad geomorfológica y de localización entre islas: Fuerteventura, Gran Canaria y Lanzarote, al estar más próximas al Sahara, reciben un mayor aporte de aire cálido, seco y con polvo en suspensión cuando los vientos alisios se debilitan. No obstante, su aridez no es debida solo por la cercanía al continente africano, sino también debido a su mayor antigüedad. La erosión ha reducido su altitud respecto a las islas occidentales, lo que impide la formación del mar de nubes y limita la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos, obligando a depender de otras fuentes de abastecimiento. Por su parte, las islas más occidentales, La Palma, El Hierro, La Gomera y Tenerife, presentan una cobertura nubosa más persistente, y una estacionalidad climática y de vertientes más marcada (Cruz-Pérez et al., 2025).

En cuanto al régimen térmico, Canarias disfruta en general de temperaturas suaves y moderadas, aunque diferenciadas según la orografía, la orientación y la cercanía al mar. Sin embargo, en los últimos años se han registrado episodios de temperaturas extremas que alteran los patrones habituales (López-Villarrubia et al., 2021). Un ejemplo reciente se produjo el pasado mes de noviembre de 2025, donde Tenerife alcanzó los 33°C en el Aeropuerto Norte, superando el récord previo para este mes de 31°C, registrado en 1998. A escala histórica, máximo absoluto registrado en el archipiélago corresponde al municipio de Arona, donde se alcanzaron 44 °C en agosto de 1988 (Pérez Cabello, 2016).

3.3. Tipología y distribución de peligros. Eventos históricos

Los sistemas insulares canarios han sido históricamente afectados por una amplia diversidad de desastres de origen climático, si bien en las últimas décadas se ha observado un descenso relativo en los daños personales asociados a estos fenómenos. La vulnerabilidad presenta una tendencia creciente como consecuencia del aumento de la exposición, derivado de la expansión urbana y de la ocupación intensiva del litoral. En este contexto, los daños económicos asociados a episodios de origen climático registrados entre 1996 y 2016, han supuesto un desembolso aproximado de 300 millones de euros (López Díez et al., 2018).

En este escenario de riesgo creciente, es necesario analizar la vulnerabilidad de Canarias desde una perspectiva integrada y alineada con los modelos de gestión de los riesgos naturales vigentes a escala estatal. En este sentido, la Dirección General de Protección Civil y Emergencias ha ido regulando e identificando a lo largo de los años los distintos fenómenos que pueden afectar al país, como inundaciones,

3. Riesgos naturales en Canarias: climatología, peligros y eventos históricos

maremotos, sismos, riesgo volcánico o incendios forestales, mediante distintas normas y planes (Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2025).

A su vez, en 2015, Canarias implementó el Plan Territorial de Emergencia de Protección Civil de la Comunidad Autónoma de Canarias (PLATECA), adoptando esta clasificación a su realidad insular. El plan identifica como riesgos potenciales en el archipiélago las inundaciones, movimientos sísmicos, erupciones volcánicas, riesgos asociados a fenómenos meteorológicos adversos, movimientos gravitatorios, plagas de langosta e incendios forestales (Gobierno de Canarias, 2015).

A partir de este marco general de planificación y gestión, resulta necesario descender al análisis específico de cada uno de los riesgos que afectan al archipiélago, atendiendo a su naturaleza física, a sus mecanismos de generación y a su expresión territorial.

3.3.1. Riesgos asociados a fenómenos meteorológicos adversos

Se considera fenómeno meteorológico adverso *todo evento meteorológico capaz de producir, directa o indirectamente, daños a las personas y los bienes y que, por tanto, puede producir impactos* (AEMET, 2025).

En el caso del archipiélago canario, estos fenómenos presentan una diversidad notable, condicionados por la complejidad orográfica, la influencia del Atlántico, y la variabilidad asociada a los vientos alisios, las intrusiones saharianas, y en menor medida, vientos de origen polar. Entre los eventos de mayor relevancia para la planificación y gestión del riesgo se encuentran las inundaciones, los vientos fuertes, las nevadas en cotas altas, los episodios de frío, las granizadas o heladas, los temporales costeros, las olas de calor, las intrusiones de calima y los períodos prolongados de sequía.

Inundaciones

Las inundaciones, definidas según la Resolución del 31 de enero de 1995, de la Secretaría de Estado de Interior como la *sumersión temporal de terrenos normalmente secos como consecuencia de la aportación inusual y más o menos repentina de una cantidad de agua superior a la que es habitual en una zona determinada*, fueron el primer riesgo en contar con una Directriz Básica de Protección Civil en España (BOE, 1995).

Se trata del fenómeno natural más frecuente en el país, generando escenarios de riesgo para la población y provocando daños económicos y sociales significati-

vos. Las inundaciones suelen producirse por precipitaciones «in situ»; por escorrentía y desbordamiento de cauces; o por rotura o mal funcionamiento de infraestructuras hidráulicas.

Aunque las islas estén entre los territorios de menor pluviometría de España, cuando precipita suele ser de forma torrencial, concentrado en un mismo lugar y en un corto periodo de tiempo. En el sur de Tenerife, de 38 años de registros, en 25 de esos años el día más lluvioso acumuló entre el 20 y el 40 % de la precipitación anual total, lo que evidencia que los eventos esporádicos y poco frecuentes son los responsables de la mayor parte de la lluvia registrada en las islas (López Díez et al., 2019). Los meses con mayor riesgo de sufrir inundaciones es de noviembre a marzo, con abril, septiembre y octubre siendo meses con probabilidad, pero menor riesgo (López Díez, 2020).

La orografía y situación respecto al continente africano influyen de manera decisiva en la distribución de estos episodios. Las islas occidentales, con más precipitaciones, presentan una mayor probabilidad de sufrir episodios de este tipo, aunque las islas orientales tampoco están exentas. Al estar formadas por materiales más antiguos, son menos permeables, provocando que incluso precipitaciones moderadas puedan convertirse en inundaciones. A lo largo de los años, este fenómeno ha ocasionado pérdidas humanas y económicas importantes, lo que ha puesto de manifiesto la vulnerabilidad del archipiélago frente a estos fenómenos. Entre los eventos más significativos se encuentran (Pérez Cabello, 2016):

- Desbordamiento de un barranco en La Gomera (1910): El 24 de diciembre de ese año, una riada provocó el derrumbe de una vivienda causando la muerte de 21 personas.
- Rotura de un embalse en Gran Canaria (1934): La rotura de un embalse en San Lorenzo tras un temporal, arrasó varias casas mientras sus habitantes dormían, provocando el fallecimiento de 8 personas, 4 de ellas menores.
- Riada de Santa Cruz de Tenerife (2002): Riada muy localizada, ya que el resto de la isla permanecía con el cielo despejado. Se produjeron lluvias torrenciales de 232 L/m², dejando 8 fallecidos y 30 heridos, y causando daños a 700 viviendas, 500 locales y 1000 vehículos. La interrupción de los servicios fue generalizada, ya que el 80 % de la ciudad se quedó sin suministro eléctrico, la mitad sin agua potable y se registraron miles de cortes en las comunicaciones telefónicas. Asimismo, provocó daños estructurales en el Estanque de Fumero, obligando al desalojo de las viviendas cercanas. Este evento constituyó el mayor evento climático sufrido por un municipio, ya que los daños económicos suponían prácticamente la totalidad del presupuesto municipal (López Díez et al., 2018).

3. Riesgos naturales en Canarias: climatología, peligros y eventos históricos

- Fuertes precipitaciones en La Gomera (2005): Las lluvias intensas provocaron el desbordamiento del Barranco de La Concepción en San Sebastián, lo que ocasionó la inundación de la central de UNELCO. Como consecuencia, la isla sufrió un apagón total. Este mismo día también empezó a fallar el suministro de agua y las comunicaciones, tanto la telefonía móvil como fija, que tardaron varios días en restablecerse completamente.
- Riada en el sur de La Palma (2009): Este episodio incomunicó los municipios de Mazo y Fuencaliente. Los daños se vieron agravados por el proceso de desertificación provocado por los incendios del verano anterior, lo que incrementó la escorrentía superficial y favoreció el desbordamiento de los barrancos.
- Inundaciones de febrero (2010): En febrero de 2010 pasaron dos borrascas por las islas que causaron importantes estragos, siendo Tenerife la isla más perjudicada. En la primera borrasca, cayeron más de 250 L/m² inundando coches, establecimientos y cortando carreteras. En el caso de la segunda borrasca, la lluvia unida al viento dejó a 900.000 habitantes de la isla sin suministro eléctrico.

Tempestad ciclónica atípica (TCA)

Los temporales de viento se definen como aquellos con rachas superiores a 120 km/h, y son capaces de generar impactos significativos sobre las infraestructuras, los sistemas naturales y la seguridad de la población (López Díez, 2020).

Tienen diversos orígenes, aunque la más habitual es por la llegada de borrascas relativamente profundas. Menos habituales son los vientos por depresiones más meridionales, que, a pesar de ser poco frecuentes en la región, son potencialmente destructivos debido a la escasa adaptación de las infraestructuras a estas configuraciones atmosféricas. Asimismo, se registran episodios de vientos intensos de procedencia sahariana, que pueden dar lugar a flujos catabáticos muy fuertes, racheados, cálidos y extremadamente secos, los cuales desempeñan un papel determinante en la propagación de los incendios forestales. Además de su efecto directo sobre el territorio, los temporales de viento se encuentran estrechamente vinculados a la generación de temporales marinos, responsables de graves daños en el litoral insular (López Díez, 2020).

Desde el punto de vista estacional, el mayor riesgo de ocurrencia de temporales de viento se concentra en los meses comprendidos entre noviembre y marzo, mientras que abril y octubre presentan una probabilidad de riesgo medio (López Díez, 2020).

A pesar de no ser el origen más frecuente, las rachas máximas registradas en Canarias se asocian a la influencia de las tormentas tropicales. El episodio más significativo corresponde a la tormenta tropical Delta, que afectó a Canarias en noviembre de 2005 y constituye uno de los diez eventos naturales con mayores pérdidas económicas registradas en España. Tenerife fue la isla más afectada, registrándose una víctima mortal y dejando sin suministro eléctrico a más de 200.000 personas en el área metropolitana. Las rachas de viento superaron los 150 km/h, alcanzando valores cercanos a los 250 km/h en zonas de cumbre, lo que motivó el cierre de puertos y aeropuertos (López Díez et al., 2018). De forma similar, en 2010 la ciclogénesis asociada a la borrasca Xynthia produjo rachas de carácter huracanado, generando numerosos daños materiales y nuevos cortes en el suministro eléctrico en distintas islas.

Temporales costeros

Los temporales costeros en el archipiélago canario se encuentran, en la mayoría de los casos, estrechamente vinculados a la ocurrencia de temporales de viento. Su génesis atmosférica está asociada principalmente a la presencia de borrascas profundas, aunque también pueden originarse por procesos de sobreelevación del nivel del mar relacionados con la marea y con el mar de fondo.

En numerosos episodios, el centro de acción responsable no incide directamente sobre Canarias, sino que se localiza en latitudes muy superiores, desde donde se propagan largos trenes de oleaje hacia el archipiélago. Los fenómenos de rebase asociados al mar de fondo suelen presentar, además, un carácter muy puntual tanto en el tiempo como en el espacio, lo que incrementa su peligrosidad para las zonas costeras expuestas (López Díez, 2020).

Desde el punto de vista estacional, este tipo de episodios se concentran principalmente entre los meses de noviembre y marzo. No obstante, en determinados enclaves litorales especialmente expuestos, como Santa Cruz de Tenerife y Garachico, la mayor frecuencia de temporales costeros se registra entre los meses de junio y septiembre, coincidiendo con la incidencia de mar de fondo de origen atlántico durante el período estival (López Díez, 2020).

Entre los episodios históricos más relevantes destaca el temporal de enero de 1999, caracterizado por oleaje superior a los 5 m de altura significativa y dirección predominante del este. El temporal afectó especialmente a Santa Cruz de Tenerife, donde resultaron destruidos el paseo marítimo de San Andrés, gran parte del Muelle Sur, el muelle de la Facultad de Ciencias del Mar, el de la Escuela de Vela y el Parque Marítimo, además de producir graves afecciones en la avenida de San Andrés. En Las Palmas de Gran Canaria, el temporal causó importantes daños en

el Muelle Deportivo, y en la isla de El Hierro dañó de forma significativa el Parador Nacional de Turismo (Pérez Cabello, 2016).

Desde una perspectiva estadística, los temporales costeros constituyen el fenómeno que mayor número de siniestros ha generado en Canarias. El oleaje de mar de fondo, reforzado por tormentas tropicales, representa un riesgo especialmente relevante para las fachadas urbanas situadas frente al mar, sobretudo, teniendo en cuenta la creciente ocupación del litoral en los últimos años.

Nevadas

Las nevadas constituyen un fenómeno poco frecuente a escala insular, pero de considerable impacto en islas de elevada altitud como Tenerife y La Palma. Estas suelen estar asociadas con la entrada de masa de aire polar, favorecida por el debilitamiento del anticiclón de las Azores, y a la mayor exposición de las islas a sistemas de bajas presiones. En el caso de El Teide, se registra una media de 12,7 días al año con nieve, concentrados principalmente entre diciembre y abril, aunque se ha documentado algún caso aislado en noviembre y mayo (AEMET, 2011; Martín Moreno, 2011) (Figura 3.2).

A pesar de ser un fenómeno poco frecuente y muy localizado, las nevadas y heladas pueden generar impactos significativos en las infraestructuras de alta montaña. La acumulación de nieve y la formación de hielo provocan cortes en carrete-



Fuente: Expósito Brazier, M. (2021)

Figura 3.2 Nevada de enero de 2021 en Tenerife.

ras, interrupciones de accesos y dificultades en la prestación de servicios y suministros en altura. Un ejemplo relevante es la nevada de enero de 1979, que afectó a Gran Canaria, La Palma y Tenerife, registrándose en esta última, precipitaciones acumuladas de 957 L/m² en la estación de Izaña, con cotas de nieve excepcionalmente bajas, situadas en torno a los 1.000 m. De forma similar, en marzo de 2011 la cota descendió hasta los 800 m en Tenerife y hasta los 1.300 m en Gran Canaria, paralizando momentáneamente la actividad en localidades como Aguamansa, Vilaflor, La Esperanza, Tejeda o Valleseco (Pérez Cabello, 2016).

Granizadas, heladas y olas de frío

Los episodios de frío extremo, incluyendo heladas, granizadas y olas de frío, constituyen un riesgo relevante debido a sus impactos sobre la población agrícola y las infraestructuras (Figura 3.3). A diferencia de las heladas, que afectan principalmente a medianías y cumbres, las granizadas pueden presentarse de manera localizada incluso a cotas bajas. Este fenómeno, aunque generalmente de corta duración, puede generar pérdidas considerables en cultivos e infraestructuras vulnerables en períodos muy breves (COAG, 2024).



Fuente: Expósito Brazier, M. (2021)

Figura 3.3 Efectos de las heladas en Tenerife.

A lo largo de la historia reciente de Canarias se han registrado episodios representativos de estos fenómenos. En marzo de 2007, una Dana provocó granizadas intensas en localidades como San Lorenzo, Los Altos de Guía y Artenara en Gran Canaria, acompañadas de un importante descenso térmico. Asimismo, a diferencia de las nevadas, más restringidas a las islas occidentales y áreas de alta montaña, las granizadas pueden afectar también a islas orientales. Un ejemplo destacado tuvo lugar en Fuerteventura en 2009, cuando el granizo cubrió de blanco diversas zonas

de la isla. Este tipo de situaciones no son aisladas, ya que, en 2011, la llegada de una masa de aire frío polar produjo precipitaciones moderadas, fuertes tormentas y granizadas tanto en Lanzarote como en Fuerteventura (Pérez Cabello, 2016).

Más recientemente, durante las Navidades de 2024, La Palma registró una intensa lluvia y granizada que alcanzó espesores de hasta 20 cm, ocasionando daños significativos en cultivos e infraestructuras (Diario de Avisos, 2024). Estos eventos evidencian la variabilidad espacial y temporal de los fenómenos de frío extremo en el archipiélago y su capacidad para generar impactos relevantes incluso en zonas donde no son habituales.

Olas de calor

Canarias se caracteriza por un clima con temperaturas moderadas y una limitada amplitud térmica anual. Estas condiciones pueden verse alteradas por la intrusión de masas de aire continental procedentes del Sahara, así como por la presencia de altas presiones, que llevan a un aumento significativo de la temperatura superficial.

Estos episodios son más frecuentes durante el período estival, especialmente entre julio y septiembre, mientras que los meses de mayo, junio y octubre presentan una probabilidad de riesgo medio. Durante las olas de calor, las temperaturas máximas pueden superar los 40 °C, con mínimas nocturnas que alcanzan alrededor de 25 °C (López Díez, 2020).

Entre los eventos históricos más significativos destaca la ola de calor de 2004, que se prolongó durante cinco días y afectó a todas las islas, registrándose temperaturas superiores a 40 °C en múltiples estaciones. Este episodio provocó varios fallecidos, junto con un incremento del 9 % en el consumo eléctrico y un aumento del 50 % en la demanda de agua potable (Pérez Cabello, 2016).

Los efectos de las olas de calor no se limitan a la salud de la población, sino que generan repercusiones socioeconómicas relevantes. Entre ellas se incluyen un incremento del consumo hídrico y energético, un mayor riesgo de incendios forestales. También se producen alteraciones en el funcionamiento de los servicios y actividades habituales, como la paralización de centros educativos y la suspensión de actividades públicas.

Intrusiones de calima

Las intrusiones de aire sahariano constituyen un fenómeno recurrente en el Archipiélago Canario y generan impactos significativos sobre la visibilidad, la calidad del aire y el correcto funcionamiento de infraestructuras estratégicas como

aeropuertos y puertos (Figura 3.4). Desde el punto de vista ambiental y sanitario, estos episodios adquieren especial relevancia cuando coinciden con situaciones de calor intenso, ya que la presencia de partículas en suspensión exacerba los efectos térmicos y aumenta la vulnerabilidad de la población.

Durante las intrusiones de calima, las concentraciones de material particulado (PM) pueden mantenerse elevadas durante varios días, superando con frecuencia los límites diarios establecidos para las PM_{10} en la normativa europea (López-Villarrubia et al., 2021). Habitualmente, las intrusiones elevan las concentraciones atmosféricas hasta valores del orden de $40\text{--}90\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, mientras que los eventos que superan los $100\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ son menos frecuentes pero de mayor severidad (Rodríguez & López-Darias, 2024).

Un ejemplo reciente de la magnitud de estos episodios fue la intrusión de febrero de 2020, considerada una de las más intensas de las últimas décadas. A lo largo del mes se registraron dos eventos principales, la primera del 3 al 5 y la segunda del 22 al 29 de febrero. Este último fue especialmente significativo por coincidir con temperaturas extraordinariamente altas, condiciones propicias para incendios y fuertes rachas de viento. Entre sus consecuencias destacó un descenso de aproximadamente el 70 % en la producción solar, el cierre del espacio aéreo y marítimo y la cancelación de miles de vuelos, con el consiguiente impacto económico sobre sectores clave como el turismo y el transporte (Rodríguez & López-Darias, 2024).

El riesgo de intrusiones de calima presenta una marcada estacionalidad. Los valores más altos se concentran entre septiembre y marzo, mientras que en los meses de julio y agosto el riesgo es moderado (López Díez, 2020). Esta distribución temporal responde principalmente a los cambios en la altura de la estratificación térmica asociados al desplazamiento estacional del anticiclón de las Azores. Durante el invierno, la subsidencia anticiclónica sitúa la inversión térmica a mayor altitud, lo que favorece el transporte de partículas dentro de la capa de mezcla y permite una mayor penetración del polvo sahariano. En verano, por el contrario, la inversión se establece a cotas más bajas, de modo que el aporte de partículas se produce mayoritariamente por deposición gravitacional desde niveles superiores, afectando de manera más intensa a las áreas costeras del archipiélago.

Los impactos socioeconómicos asociados a la calima son igualmente relevantes. La reducción drástica de la visibilidad obliga en numerosas ocasiones a restringir o cerrar el espacio aéreo y, en menor medida, determinadas rutas marítimas. A ello se suman las alteraciones del tráfico terrestre, el aumento de patologías respiratorias y cardiovasculares, así como la disminución de la eficiencia en la generación de energía solar, cuya producción puede verse sensiblemente afectada por la deposición de polvo mineral procedente del Sahara (Rodríguez & López-Darias, 2024).



Fuente: Expósito Brazier, M. (2020)

Figura 3.4 Intrusión de calima en el norte de Tenerife.

Períodos prolongados de sequía

La marcada irregularidad pluviométrica del archipiélago canario convierte a la sequía en uno de los fenómenos de mayor relevancia estratégica para la gestión territorial. Más que un evento puntual, la sequía constituye un proceso persistente que compromete la disponibilidad de recursos hídricos, tensiona los sistemas de abastecimiento urbano y agrícola, y amplifica la probabilidad de incendios forestales. En términos generales, estos episodios se inician con un déficit prolongado de precipitaciones, pero su evolución y severidad están moduladas asimismo por el incremento de la temperatura, los cambios en el uso del suelo y la gestión de los recursos hídricos.

Las manifestaciones de la sequía se reflejan en múltiples componentes del sistema hidrológico. Entre las más relevantes se encuentran la reducción de la humedad del suelo, el deterioro del rendimiento de los cultivos, la disminución del caudal disponible en aguas superficiales y subterráneas y, en consecuencia, la incapacidad de satisfacer la demanda de agua. En Canarias, donde la mayor parte del territorio depende de precipitaciones irregulares y de una recarga natural limitada, estos efectos se ven intensificados tanto en términos de duración como de extensión espacial (Carrillo et al., 2023).

Las proyecciones climáticas del proyecto GENESIS anticipan una reducción progresiva de las precipitaciones y un incremento sostenido de las temperaturas a lo

largo de la segunda mitad del siglo XXI (Reyes Parrilla, 2025). Si bien las islas orientales presentan en la actualidad las condiciones más áridas del archipiélago debido a su escaso aporte pluviométrico, los escenarios futuros apuntan a un aumento sustancial del estrés hídrico en las islas occidentales, donde incluso reducciones moderadas de precipitación podrían traducirse en impactos significativos sobre los sistemas naturales y socioeconómicos (Cruz-Pérez et al., 2025; Santamarta et al., 2025).

En el ámbito socioeconómico, las sequías prolongadas repercuten de manera directa en dos sectores clave para Canarias: la agricultura y el turismo. La disminución de la disponibilidad de agua compromete la productividad agrícola, incrementa los costes de explotación y reduce la competitividad del sector. Paralelamente, la presión ejercida por la demanda turística sobre los recursos hídricos puede agravar situaciones de escasez en los periodos más críticos. Asimismo, las condiciones más cálidas y secas incrementan el riesgo de incendios forestales, generando un efecto multiplicador sobre otros riesgos ambientales.

En las islas orientales, tradicionalmente más vulnerables a la aridez (Figura 3.5), la desalinización del agua del mar se ha consolidado como una herramienta fundamental para garantizar el suministro. Sin embargo, su elevada dependencia energética y la necesidad de integrar fuentes de energía renovable para asegurar su sostenibilidad limitan su capacidad para compensar plenamente los impactos de la sequía. Además, aunque la desalinización contribuye a garantizar el abastecimiento humano, no sustituye las funciones ecológicas asociadas al agua en los ecosistemas insulares, que continúan viéndose afectados por la prolongada falta de humedad (González-Morales & Ramón-Ojeda, 2019; Cruz-Pérez et al., 2022).



Fuente: Expósito Brazier, M. (2022)

Figura 3.5 Paisaje árido en Fuerteventura.

3.3.2. Movimientos sísmicos

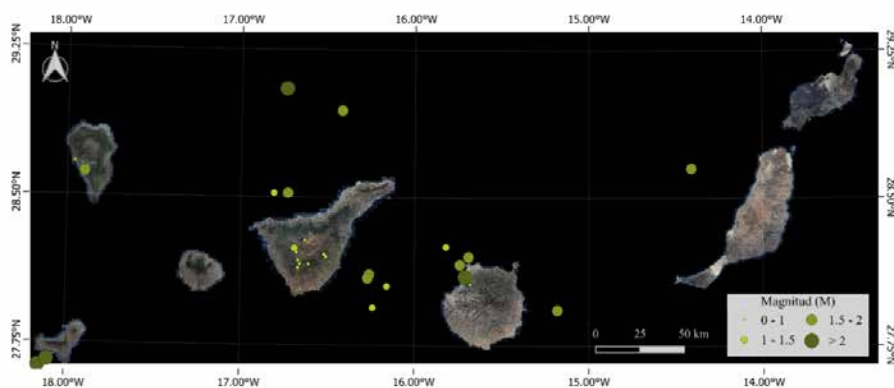
Terremotos

Los terremotos son fenómenos caracterizados por una sacudida brusca y temporal de la corteza terrestre, producido por la liberación de energía acumulada en forma de ondas sísmicas. La mayoría de los eventos sísmicos tienen su origen en la ruptura de fallas geológicas, producida por la liberación repentina de energía acumulada, que se propaga en forma de ondas sísmicas. No obstante, también pueden generarse por fricción en los bordes de placas tectónicas, por procesos asociados a la actividad volcánica, o por causas antrópicas, como detonaciones nucleares subterráneas (Gobierno de Canarias, 2015).

Desde el punto de vista de la gestión del riesgo, los terremotos constituyen un fenómeno de elevada peligrosidad potencial, ya que pueden ocasionar daños severos en infraestructuras y edificaciones, interrumpir servicios esenciales y provocar un elevado número de víctimas. En este contexto, el Plan de Protección Civil frente al riesgo sísmico fue aprobado mediante la Resolución de 5 de mayo de 1995, posteriormente ampliada por la resolución de 17 de septiembre de 2004 de la Secretaría de Estado de Interior, con el objetivo de establecer directrices para la prevención y respuesta ante este tipo de emergencias (Pérez Cabello, 2016).

Aunque dicho plan no considera al archipiélago canario como una zona de alta peligrosidad sísmica (al no haber registros ni ser previsibles sismos de intensidad igual o superior a los de grado VI), la naturaleza volcánica del archipiélago confiere al riesgo sísmico una relevancia específica (Figura 3.6). En Canarias, una parte significativa de la sismicidad tiene un origen volcánico, asociado al movimiento de magma o de fluidos en el interior de la corteza, y puede manifestarse tanto en forma aislada como en forma de enjambres sísmicos. Históricamente, los terremotos registrados han estado estrechamente ligados a episodios eruptivos, ya que todas las erupciones documentadas han sido precedidas por sismicidad perceptible por la población (López-Saavedra et al., 2023).

Por otro lado, la sismicidad de origen tectónico también está presente en el ámbito regional. Canarias se encuentra próxima al límite entre las placas Euroasiática y Africana, una de las zonas de convergencia con mayor potencial sísmico. A escala local, destaca la falla de En medio, situada entre Tenerife y Gran Canaria, con orientación NE-SO, que registra actividad sísmica frecuente. Esta estructura genera habitualmente entre 400 y 500 movimientos sísmicos anuales, en su mayoría de baja magnitud (inferior a 2.5). No obstante, en 1989 produjo su mayor evento registrado, con una magnitud de 5,2 en la escala de Richter (Galindo et al., 2021; López Saavedra, 2023).



Fuente: elaboración propia a partir de datos del IGN (2025)

Figura 3.6 Serie histórica de terremotos en Canarias, desde el 21/11/2025 al 01/12/2025.

Maremotos

Los maremotos son una serie de olas oceánicas de gran longitud de onda y largo período, capaces de propagarse a través del océano, debido al desplazamiento repentino de un volumen masivo de agua. Suelen originarse por eventos catastróficos submarinos, como terremotos, deslizamientos, erupciones volcánicas, explosiones nucleares o incluso por la colisión de objetos cósmicos (Barman, 2020).

A pesar de que en España los maremotos no constituyen un riesgo frecuente, sí pueden generar graves daños. Un ejemplo histórico es el de 1755, originado por un terremoto de magnitud 8.5 en la zona de convergencia interplaca. Provocó importantes pérdidas económicas y alrededor de 2000 fallecidos en la Península Ibérica. La creciente ocupación del litoral ha incrementado la vulnerabilidad frente a este tipo de fenómenos, motivo por el que se elaboró el Real Decreto 1053/2015, de 20 de noviembre, por el que se aprueba la Directriz básica de planificación de protección civil ante el riesgo de maremotos (BOE, 2015).

En el caso de Canarias, los registros históricos muestran que la mayor parte de los maremotos han estado asociados con terremotos. El evento de 1755, aunque menos destructivo que en la península o en Marruecos, también afectó al archipiélago, con zonas donde el agua llegó a penetrar hasta un kilómetro tierra adentro (Galindo et al., 2021).

Más recientemente, en 2020, se produjo un pequeño maremoto en La Gomera provocado por un gran desprendimiento de rocas en el litoral, generando una ola que alcanzó al pueblo de Argaga, situado a unos 200 m del punto del colapso (Galindo et al., 2021).

3.3.3. Erupciones volcánicas

Las erupciones volcánicas son eventos geológicos en los cuales productos volcánicos (sólidos, líquidos o gases) llegan a la superficie y la atmósfera terrestre (Instituto Geológico Nacional, 2025). Aunque existen definiciones más integrales como la de Borgia et al. (2010) que define los volcanes como entornos geológicos que, a cualquier escala, está caracterizado por tres elementos: magma, erupción y edificio volcánico, ya que no todas las erupciones necesariamente alcanzan la superficie.

El riesgo volcánico es la probabilidad de que haya consecuencias desastrosas como pérdidas de vidas humanas, heridos, daños a bienes, al medio ambiente, etc. debido a la interacción entre una erupción volcánica y condiciones vulnerables existentes.

En España, la única zona volcánicamente activa son las islas Canarias. Por ello, mediante la Resolución de 21 de febrero de 1996, de la Secretaría de Estado de Interior, se aprobó el plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo Volcánico (BOE, 1996; Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2013). A nivel autonómico, en Canarias se encuentra vigente el Decreto 73/2010, de 1 de julio, que aprueba el Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por riesgo volcánico en la Comunidad Autónoma de Canarias (PEVOLCA) (BOC, 2010). Entre sus medidas, el plan establece medidas preventivas para reducir la vulnerabilidad de la edificación y de otros riesgos tecnológicos que pudieran verse afectados por una erupción volcánica.

La existencia de un marco legal específico responde a la naturaleza activa de las Islas Canarias. Los registros disponibles abarcan aproximadamente los últimos 500 años, periodo en el que se documentan las denominadas erupciones históricas. En este intervalo, se han identificado 17 erupciones, localizadas en las islas de Tenerife, La Palma, El Hierro y Lanzarote, si bien en esta última no se ha registrado ninguna actividad eruptiva desde hace más de dos siglos (Troll et al., 2017).

En los últimos 150 años, las erupciones que han tenido lugar en las islas han sido el Chinyero (Tenerife, 1909), San Juan (La Palma, 1949), Teneguía (1971, La Palma), Tagoro (El Hierro, 2011), y Tajogaite (La Palma, 2021) (Figura 3.7). La duración de estos episodios ha mostrado una gran variabilidad, desde los 10 días que duró el Chinyero a los 148 días del volcán submarino Tagoro (Afonso-Carrillo, 2023). No obstante, la erupción histórica más prolongada registrada en el archipiélago fue la del Timanfaya en Lanzarote, que se extendió durante 6 años, desde 1730 a 1736, y cubriendo un cuarto de la isla (Troll et al., 2017).



Fuente: Expósito Brazier, M. (2023)

Figura 3.7 Volcán Tajogaite en La Palma.

Por todo ello, se puede considerar que las islas más occidentales presentan una mayor posibilidad de erupción, excepto en La Gomera, que es la única isla considerada volcánicamente extinta. Actualmente, se promueve la información a la población mediante jornadas y simulacros de alertas, como la ejercida en septiembre de 2025 en Garachico, para alertar a la población sobre los peligros asociados (Carracedo et al., 2007; Cabildo de Tenerife, 2025).

Entre estos peligros se incluyen los flujos de lava, caída de cenizas, movimientos sísmicos, emisiones de gases tóxicos, desprendimientos y proyección de materiales. De los eventos históricos documentados, se han registrado 25 fallecimientos, siendo la mayoría (16) atribuibles a los terremotos volcánicos durante la erupción de Siete Fuentes – Fasnía – Arafo. La segunda causa más frecuente ha sido la intoxicación por gases, seguido de otros factores como la caída de cenizas o lahares post-eruptivos (Afonso-Carrillo, 2023).

Las erupciones volcánicas no solo ponen en riesgo vidas humanas, sino también el estilo de vida y los medios de subsistencia. Esto quedó reflejando durante la erupción del Tajogaite, la más reciente de La Palma, donde los municipios de El Paso, Los Llanos de Aridane y Tazacorte fueron perjudicados (Figura 3.8). La actividad eruptiva afectó de forma severa a agricultores y ganaderos, tanto por la

sepultura por la lava de terrenos de cultivo, instalaciones y maquinaria, como por la acumulación de ceniza en explotaciones próximas al volcán (Negrín Delgado et al., 2022).



Fuente: Expósito Brazier, M. (2023)

Figura 3.8 Impacto del volcán Tajogaite sobre edificaciones residenciales.

Asimismo, numerosos vecinos se vieron afectados por la interrupción de las vías de comunicación. El corte de las carreteras que conectaban el norte y el sur del lado occidental impidió el acceso a zonas de cultivo, y dificultó el acceso a centros de trabajo y servicios esenciales. A esto se le sumaron los daños en las redes de conducción y distribución de agua, en plantas potabilizadoras y en depósitos de almacenamiento. Además, varios tramos de las infraestructuras eléctricas quedaron enterradas bajo las coladas. Esto provocó que amplias zonas del territorio quedaran sin suministro (Negrín Delgado et al., 2022).

3.3.4. Movimientos gravitatorios

Los movimientos de ladera se definen como el desplazamiento pendiente debajo de una masa de suelo, derrubio y/o roca por la acción de la gravedad. Constituyen procesos geodinámicos esenciales en el ciclo de erosión-sedimentación en zonas de montaña, así como en los entornos litoral y marino. A escala global, re-

presentan el segundo peligro natural más relevante después de las inundaciones, tanto por su frecuencia como por los daños que ocasionan (López-Davalillo, 2005).

La historia geológica de las islas está marcada por la ocurrencia de grandes deslizamientos gravitatorios que han modelado el relieve insular. Entre los ejemplos más significativos se encuentra el colapso que originó el Valle de La Orotava en Tenerife hace aproximadamente 0,54 Ma, el deslizamiento asociado al colapso de Cumbre Nueva en La Palma hace unos 566 ka o el derrumbe de El Golfo en El Hierro, considerado el colapso de flanco volcánico más reciente del archipiélago y datado entre hace 15 y 2 mil años. Estos procesos han desempeñado un papel decisivo en la configuración de los valles, acantilados y estructuras morfológicas actuales (Hunt et al., 2013; López-Saavedra et al., 2023).

Estos grandes deslizamientos han estado estrechamente vinculados a la actividad volcánica, tanto por mecanismos de intrusión magmática como por procesos de extrusión. Investigaciones recientes además sugieren que las condiciones ambientales más cálidas y húmedas pueden incrementar la susceptibilidad a estos movimientos, favoreciendo la inestabilidad de los materiales (Hunt et al., 2013).

Aparte de los grandes deslizamientos, también son frecuentes los desprendimientos de menor escala, asociados principalmente a desencadenantes naturales como terremotos, lluvias intensas o prolongadas y erupciones volcánicas. No obstante, se prevé que su frecuencia aumente en las próximas décadas debido a factores antrópicos como la deforestación, la urbanización en áreas potencialmente inestables y el aumento de lluvias torrenciales atribuido al incremento del cambio climático (López-Davalillo, 2005). Estos procesos, aunque de menor magnitud, son los que generan mayores impactos en la vida cotidiana debido a su recurrencia y a su afección directa sobre infraestructuras críticas.

El mayor impacto socioeconómico de los desprendimientos se manifiesta en los daños ocasionados a las vías de comunicación y a las conducciones subterráneas, constituyendo uno de los procesos geodinámicos que mayores pérdidas materiales produce en el archipiélago. Un ejemplo destacado es el caso de La Palma, donde más del 70 % de las indemnizaciones por el estado de las carreteras dependientes del Cabildo de La Palma, fueron a causa de desprendimientos (Gutiérrez, 2025).

3.3.5. Incendios forestales

Los incendios forestales constituyen uno de los riesgos ambientales más relevantes. Se definen como la combustión no controlada de masa forestal, cuya in-

3. Riesgos naturales en Canarias: climatología, peligros y eventos históricos

tensidad y extensión dependen de la estructura y características del combustible, así como de las condiciones meteorológicas dominantes. Los grandes incendios forestales presentan una elevada dificultad de extinción hasta que se producen cambios favorables en las condiciones meteorológicas.

En España, la gestión de este riesgo se articula a través del Real Decreto 893/2013, de 15 de noviembre, por el que se aprueba la Directriz básica de planificación de protección civil de emergencia por incendios forestales (BOE, 2013). En el caso de Canarias, el marco normativo específico está definido por el Decreto 60/2014, de 29 de mayo, por el que se aprueba el Plan Canario de Protección Civil y Atención de Emergencias por Incendios Forestales de la Comunidad Autónoma de Canarias (INFOCA) (BOC, 2014).



Fuente: Expósito Brazier, M. (2023)

Figura 3.9 Incendio en la Dorsal Noreste de Tenerife.

La creciente frecuencia y extensión de los incendios, intensificada por la expansión urbana en los entornos forestales, supone una amenaza creciente para la población, la infraestructura y el medioambiente. Actualmente las islas con mayor riesgo de incendio forestal son El Hierro, La Gomera, La Palma, Tenerife y Gran Canaria, coincidiendo con aquellas que poseen mayor masa forestal (López Díez, 2020).

El denominado «tiempo sur» asociado al desplazamiento hacia el norte del anticiclón de las Azores, genera la entrada de vientos cálidos y cargados de polvo

sahariano, incrementando la peligrosidad de los incendios forestales. Bajo estas condiciones, la capacidad de propagación del fuego aumenta debido al descenso de la humedad del combustible y al fortalecimiento del viento, que actúa como vector de ignición y transporte de pavesas (López Díez, 2020).

A estos condicionantes atmosféricos se suman factores ecológicos y antrópicos. La degradación de los ecosistemas forestales debido a la tala, roturación agrícola y posterior abandono de cultivos, ha favorecido la expansión de especies invasoras de carácter pirófito como cañas o zarzas, especialmente en cauces de barrancos que actúan como corredores lineales para la propagación del fuego. La introducción de especies exóticas altamente inflamables como el eucalipto o el pino radiata, así como la acumulación de combustible en el sotobosque, como son las acículas en el pinar canario, incrementan la severidad potencial de los incendios, siendo las masas forestales de las islas occidentales las más vulnerables.

En la mayoría de los casos la ignición tiene origen antrópico, ya sea de forma directa o indirecta, lo que subraya la importancia de la prevención, la gestión del territorio y el control de actividades en épocas críticas. Esto es especialmente importante, ya que genera grandes pérdidas económicas, ambientales, y en algunos casos, humanas (López Díez, 2020).

Uno de los eventos más severos registrados en el archipiélago fue el incendio de Gran Canaria en 2007. Este episodio coincidió con una intensa ola de calor que llevó a alcanzar el entonces máximo histórico de temperatura en la isla, registrándose 46,5 °C en Agaete el 30 de julio de ese año (Pérez Cabello, 2016). Las condiciones extremas de aquel verano propiciaron un incendio de rápida propagación y de alto impacto ambiental y socioeconómico.

Otro episodio de gran relevancia ocurrió en Tenerife en 2023 (Figura 3.9 y Figura 3.10), considerado el incendio más grave registrado en la isla en los últimos cuarenta años. El incendio permaneció activo durante dos meses hasta ser declarado extinguido y afectó a más de 15.000 ha. Aunque no se registraron víctimas ni destrucción de viviendas, los mayores impactos afectaron al medio ambiente y a infraestructuras públicas. El incendio afectó gravemente a la vegetación y fauna nativa, especialmente en espacios protegidos. Además, generó una importante emisión de CO₂ a la atmósfera y en consecuencia afectó a la recarga de acuíferos. Los daños iniciales se estimaron en más de 80 millones de euros, cifra que posteriormente ascendió a 177 millones. Solo en el municipio de Candelaria se contabilizaron alrededor de 800.000 € en reparaciones de drenajes, canalizaciones de aguas pluviales y vías agrícolas, mientras que en Fasnia fue necesario rehabilitar la balsa municipal y depósitos adyacentes. Además, se produjeron impactos significativos sobre las infraestructuras como daños en carreteras, numerosos desprendimientos y la rotura del canal de Aguamansa, que transportaba cerca de

800.000 L/h hacia el canal del Norte, afectando al suministro de agua potable en algunas zonas (Federación Española de Municipios y Provincias (FEMP), 2023).



Fuente: Expósito Brazier, M. (2023)

Figura 3.10 Incendio de 2023 visto desde El Teide.

3.4. Lecciones para la infraestructura hídrica, vulnerabilidad y criterios de evaluación

La identificación y análisis de los fenómenos climáticos adversos constituye un paso fundamental para caracterizar de manera robusta el riesgo climático insular. La comprensión integrada de estos fenómenos, apoyada en registros históricos, herramientas de análisis espacial y criterios de vulnerabilidad sectorial, permite elaborar estrategias de resiliencia adaptadas a la complejidad del territorio canario.

La vulnerabilidad se define como el grado de pérdidas provocadas en un elemento o conjunto de elementos presentes en un área por la ocurrencia del fenómeno determinado (López-Davalillo, 2005). En el contexto de las Islas Canarias, los riesgos climáticos suponen un problema crítico para las infraestructuras, como

se ha evidenciado en episodios recientes: riadas que casi rompieron presas, desbordamientos que dañaron tendidos eléctricos y dejaron a la isla sin suministro durante varios días, o incendios que afectaron canales de agua. Estas situaciones ilustran cómo un daño puntual puede tener repercusiones en múltiples sectores debido a la interconexión de las infraestructuras insulares.

El cambio climático agrava estos riesgos. Según las previsiones del AR6 del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), la temperatura global ha aumentado 1,1 °C desde la época preindustrial y se espera que alcance 1,5 °C hacia 2040, superando los 2 °C en la segunda mitad de este siglo (IPCC, 2023). Esto incrementa la frecuencia y severidad de eventos extremos como olas de calor, lluvias torrenciales o sequías. Además, el ascenso del nivel del mar proyectado afectará a infraestructuras que previamente no se consideraban vulnerables, aumentando la exposición de zonas costeras a inundaciones y erosión (López-Saavedra et al., 2021). Las proyecciones climáticas apuntan a un aumento de la variabilidad de las precipitaciones y de la frecuencia de fenómenos extremos, lo que incrementa la vulnerabilidad insular y subraya la necesidad de planificación preventiva (Reyes Parrilla, 2025; Santamarta et al., 2025).

En respuesta, en los últimos años se han implementado medidas de mitigación, como el ensanchamiento de canales de desagüe y viaductos en barrancos, así como la extensión de sistemas de drenaje pluvial en carreteras (López Díez et al., 2019). Estas acciones buscan reducir los daños provocados por riadas, aunque la exposición y fragilidad de las infraestructuras sigue siendo significativa. El impacto económico de los eventos extremos es elevado, no solo por los daños directos, sino también por los gastos indirectos asociados a la reconstrucción y adaptación posterior. Si las infraestructuras estuvieran adaptadas desde el inicio, la inversión necesaria sería únicamente la de adaptación inicial, evitando duplicar el gasto en reconstrucción.

En este contexto, herramientas como las del proyecto europeo GENESIS permiten evaluar cómo los riesgos más dañinos afectan a las infraestructuras hídricas y su interconexión, ofreciendo una perspectiva prospectiva que supera la medición de daños solo después de ocurridos. La gestión basada en la previsión posibilita reducir los impactos y orientar la toma de decisiones hacia estrategias de adaptación más eficientes y sostenibles.

3.5. Referencias bibliográficas

AEMET. (2011). *The month of May brought a late snowfall and low temperatures at Izaña – Centro De Investigación Atmosférica de IZANA*. <https://izana.aemet.es/the-month-of-may-brought-a-late-snowfall-and-low-temperatures-at-izana/>

- AEMET. (2025). *Interpretación. Agencia Estatal de Meteorología. Gobierno de España*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025. <https://www.aemet.es/es/el-tiempo/prediccion/avisos/ayuda>
- Afonso-Carrillo, J. (2023). Tajogaite. Enseñanzas de una erupción volcánica (La Palma, otoño 2021). *Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias*. https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/41454/Tajogaite._Ensenanzas_de_una_erupcion_volcanica__La_Palma__otono_2021_.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Barman, S. K. (2020). Physics of Tsunami: Generation, Propagation and Rise of the Ocean. *International Journal of Oceans and Oceanography*, 14(1 (2020)), 169–182. <https://dx.doi.org/10.37622/IJOO/14.1.2020.169-182>
- Boletín Oficial de Canarias. DECRETO 60/2014, de 29 de Mayo, Por El Que Se Aprueba El Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias Por Incendios Forestales de La Comunidad Autónoma de Canarias (INFOCA). Recuperado el 24 de noviembre de 2025, from <https://www.gobiernodecanarias.org/boc/2014/113/007.html>
- Boletín Oficial de Canarias. DECRETO 73/2010, de 1 de Julio, Por El Que Se Aprueba El Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias Por Riesgo Volcánico En La Comunidad Autónoma de Canarias (PEVOLCA). Recuperado el 5 de diciembre de 2025, de <https://www.gobiernodecanarias.org/boc/2010/140/006.html>
- Boletín Oficial Del Estado. Real Decreto 893/2013, de 15 de noviembre, Por El Que Se Aprueba La Directriz Básica de Planificación de Protección Civil de Emergencia Por Incendios Forestales. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, from <https://www.boe.es/boe/dias/2013/12/07/pdfs/BOE-A-2013-12823.pdf>
- Boletín Oficial Del Estado. Real Decreto 1053/2015, de 20 de noviembre, Por El Que Se Aprueba La Directriz Básica de Planificación de Protección Civil Ante El Riesgo de Maremotos. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de <https://www.boe.es/buscar/pdf/2015/BOE-A-2015-12570-consolidado.pdf>
- Boletín Oficial Del Estado. Resolución de 21 de Febrero de 1996, de La Secretaría de Estado de Interior, Disponiendo La Publicación Del Acuerdo Del Consejo de Ministros Por El Que Se Aprueba La Directriz Básica de Planificación de Protección Civil Ante El Riesgo Volcánico. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de [https://www.boe.es/eli/es/res/1996/02/21/\(2\)/con](https://www.boe.es/eli/es/res/1996/02/21/(2)/con)
- Boletín Oficial Del Estado. Resolución de 31 de Enero de 1995, de La Secretaría de Estado de Interior, Por La Que Se Dispone La Publicación Del Acuerdo Del Consejo de Ministros Por El Que Se Aprueba La Directriz Básica de Planificación de Protección Civil Ante El Riesgo de Inundaciones. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, from <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=-BOE-A-1995-3865>

- Borgia, A., Aubert, M., Merle, O., & van Wyk de Vries, B. (2010). What is a volcano? *What Is a Volcano?*, *The Geological Society of America*(470). [https://doi.org/10.1130/2010.2470\(01\)](https://doi.org/10.1130/2010.2470(01))
- Cabildo de Tenerife. (2025, Septiembre 16). *El Cabildo de Tenerife presenta 'EU-Modex Tenerife': El simulacro volcánico que reunirá en Garachico a más de 1.000 efectivos nacionales e internacionales*. <https://www.tenerife.es/w/el-cabildo-de-tenerife-presenta-eu-modex-tenerife-el-simulacro-volc%C3%A1nico-que-reunir%C3%A1-en-garachico-a-m%C3%A1s-de-1.000-efectivos-nacionales-e-internacionales>
- Carracedo, J. C., Pérez Torrado, F. J., & Hansen, Álex. (2007). El relieve de las Islas Canarias. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 15(2), 196–205.
- Carrillo, J., Hernández-Barrera, S., Exposito, F., Diaz, J. P., González, A., & Pérez, J. (2023). The uneven impact of climate change on drought with elevation in the Canary Islands. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 6(31). <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00358-7>
- Coordinadora de Organizaciones de Agricultores y Ganaderos de Canarias (2024). Actualidad Agrícola y Ganadera en Canarias: Las dos caras de la nevada en el norte: un regalo para las viñas, pero múltiples daños agrícolas. Recuperado de: <https://coagcanarias.com/wp-content/uploads/2025/01/NOTICIAS-28.12.2024.pdf>
- Cruz-Pérez, N., Rodríguez-Alcántara, J. S., Clavijo-Núñez, S., Paradinas-Blázquez, C., & Santamarta, J.C. (2025). Climate Projections and Temperature Evolution in the Canary Islands: High Resolution Analysis at Island Scale. *International Journal of Climatology*, 45(16), e70139. <https://doi.org/10.1002/joc.70139>
- Cruz-Pérez, N., Santamarta, J. C., Gamallo-Paz, I., Rodríguez-Martín, J., & García-Gil, A. (2022). A comparison between carbon footprint of water production facilities in the Canary Islands: Groundwater resources vs. seawater desalination. *Sustainable Water Resources Management*, 8(4), 121. <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00706-0>
- Diario de Avisos. (2024). *Lamentan los daños causados por la lluvia y el granizado en La Palma: 'Ha sido una catástrofe'*. <https://diariodeavisos.lespanol.com/2024/12/lamentan-los-danos-causados-por-la-lluvia-y-el-granizado-en-la-palma-ha-sido-una-catastrofe/>
- Dirección General de Protección Civil y Emergencias. (2013). *Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo Volcánico*. Gobierno de España. https://www.interior.gob.es/opencms/pdf/archivos-y-documentacion/documentacion-y-publicaciones/publicaciones-descargables/proteccion-civil/Plan_Estatal_Riesgo_Volcanico_126151212.pdf

- Dirección General de Protección Civil y Emergencias. *Normativa*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de <https://www.proteccioncivil.es/documentacion/normativa>
- Pérez Cabello, M. Á. (2016). *Efemérides meteorológicas en Canarias del siglo XX y XXI: Parte I - Parte VI*. *Tiempo.com | Meteored*. <https://www.tiempo.com/ram/276632/efemerides-meteorologicas-en-canarias-del-siglo-xx-y-xxi-parte-i/>
- Federación Española de Municipios y Provincias (FEMP). (2023). *Tenerife, el incendio más grave de 2023*. <https://www.femp.es/sites/default/files/multimedia/Tenerife%2C%20el%20incendio%20m%C3%A1s%20grave%20de%202023.pdf>
- Galindo, I., Romero, C., Martín-González, E., Vegas, J., & Sánchez, N. (2021). A Review on Historical Tsunamis in the Canary Islands: Implications for Tsunami Risk Reduction. *Geosciences*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/geosciences11050222>
- Gobierno de Canarias. (2015). *Plan Territorial de Emergencias de Protección Civil de la Comunidad Autónoma de Canarias (PLATECA)*. <https://www.gobierno-decanarias.org/cmsglob1/export/sites/emergencias/descargas/planes/Plateca-2015-104-2610.pdf>
- González-Morales, A., & Ramón-Ojeda, A. Á. (2019). La desalación de agua de mar en las Canarias Orientales: Los casos de Lanzarote y Fuerteventura. *Agua y Territorio / Water and Landscape*, (13), 15–26. <https://doi.org/10.17561/at.13.3722>
- Gutiérrez, M. (2025). *Casi 200 indemnizaciones en una década: La factura insular por incidentes en carreteras*. El Time. <https://eltime.es/isla-bonita/182-infraestructuras/56085-indemnizaciones-la-palma-carreteras.html>
- Hunt, J., Wynn, R. B., Talling, P. J., & Masson, D. G. (2013). Turbidite record of frequency and source of large volume (>100 km³) Canary Island landslides in the last 1.5 Ma: Implications for landslide triggers and geohazards: Record of Canary Island Landslides. *Geochemistry*, 14(7). <https://doi.org/10.1002/ggge.20139>
- Instituto Geológico Nacional. *Glosario de términos volcánicos*. Recuperado el 29 de noviembre de 2025, de <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/VLC-Glosario-Terminos-Volcanicos.pdf>
- Instituto Geográfico Nacional (IGN) (2025). Información de los últimos terremotos (último terremoto, 10 días) Recuperado el 1 de diciembre de 2025 de: <https://www.ign.es/web/vlc-ultimo-terremoto/-/terremotos-canarias/get10dias>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution*

- to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- López Díez, A. (2020). Cambio climático y fenómenos meteorológicos extremos en la Macaronesia. Evaluación, adaptación y resiliencia. Universidad de La Laguna. <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/22132>
- López Díez, A., Dorta Antequera, P., Díaz Pacheco, J., & Caraballo Acosta, O. (2018). Consecuencias de los eventos meteorológicos de rango extraordinario en Canarias: Temporales de viento, inundaciones y fenómenos costeros (1996-2016). XI Congreso de la Asociación Española de Climatología. <http://hdl.handle.net/20.500.11765/9953>
- López Díez, A., Máyer Suárez, P., Díaz Pacheco, J., & Dorta Antequera, P. (2019). Rainfall and Flooding in Coastal Tourist Areas of the Canary Islands (Spain). *Atmosphere*, 10(12), 809. <https://doi.org/10.3390/atmos10120809>
- López Saavedra, M. (2023). Multi-hazard assessment and risk management in volcanic islands [PhD Thesis, Universitat de Barcelona]. In *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. <https://www.tdx.cat/handle/10803/689533>
- López-Davalillo, J. C. G. (2005). Análisis de la vulnerabilidad por movimientos de ladera: Desarrollo de las metodologías para evaluación y cartografía de la vulnerabilidad. IGME.
- López-Saavedra, M., Martí, J., & Planagumà, L. (2023). How Effective Risk Assessment and Management Is the Key to Turning Volcanic Islands into a Source of Nature-Based Solutions. *Land*, 12(3), 686. <https://doi.org/10.3390/land12030686>
- López-Villarrubia, E., Costa Estirado, O., Íñiguez Hernández, C., & Ballester Díez, F. (2021). Do Saharan Dust Days Carry a Risk of Hospitalization From Respiratory Diseases for Citizens of the Canary Islands (Spain)? *Archivos de Bronconeumología*, 57(7), 464–470. <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2020.03.009>
- Martín Moreno, R. (2011). Snow characteristics, distribution and disappearance in a subtropical volcano (Teide, Canary Islands). 5, 75–93. <https://doi.org/doi:10.5194/tcd-5-75-2011>
- Negrín Delgado, M. I., González Rodríguez, C., & Lorente de las Casas, A. (2022). *Análisis socioeconómico de la isla de La Palma tras la erupción volcánica*.
- Otto, F., Keeping, T., Vrkic, D., Clarke, B., Barnes, C., Philip, S., Kew, S., Pinto, I., Bacher, A., Vahlberg, M., & Singh, R. (2025). *Unequal evidence and impacts, limits to adaptation: Extreme weather in 2025* (No. 79; World Weather Attribution). <https://doi.org/10.25560/126543>
- Reyes Parrilla, D. (2025). *GENESIS D1.2 Climate risk profiles to each Macaronesian island (1.0)*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17813870>

- Rodríguez, S., & López-Darias, J. (2024). Extreme Saharan dust events expand northward over the Atlantic and Europe, prompting record-breaking PM10 and PM2.5 episodes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24, 12031–12053. <https://doi.org/10.5194/acp-24-12031-2024>
- Santamarta, J. C., Rubiales, I. C., Rodríguez-Martín, J., & Cruz-Pérez, N. (2022). Water status in the Canary Islands related to energy requirements. *Energy Efficiency*, 15(2), 13. <https://doi.org/10.1007/s12053-021-10016-7>
- Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Paradinas-Blázquez, C., Prado López, C., & Galiano Sánchez, L. (2025). Escenarios locales de cambio climático en las Islas Canarias, adaptados al VI Informe del IPCC [Plataforma web]. Fundación para la Investigación del Clima; Meteogrid; Universidad de La Laguna (Proyecto ARSINOE). <https://doi.org/10.25145/o.canarias.sicma.2025>
- Troll, V. R., Carracedo, J. C., Jägerup, B., Streng, M., Barker, A. K., Deegan, F. M., Perez-Torrado, F., Rodriguez-Gonzalez, A., & Geiger, H. (2017). Volcanic particles in agriculture and gardening. *Geology Today*, 33(4), 148–154. <https://doi.org/10.1111/gto.12193>

Capítulo 4

Metodología del proyecto GENESIS para evaluar vulnerabilidad y resiliencia

Juan Carlos Santamarta Cerezal

Noelia Cruz Pérez

Jelena Koritnik

Alejandro García-Gil

4.1. Introducción y alcance del enfoque del proyecto GENESIS

El proyecto europeo GENESIS, de la convocatoria Horizonte Europa, aborda los desafíos estructurales y ambientales que afectan a las islas volcánicas mediante el desarrollo e implementación de soluciones basadas en la naturaleza (SbN) adaptadas a sus particularidades hidrogeológicas y climáticas. Entre estas soluciones se incluyen infraestructuras de infiltración, galerías secas para el drenaje de aguas de lluvia y presas subterráneas mediante la reconstrucción de diques volcánicos (cierre hidráulico/compuerta de regulación). Todas ellas están orientadas a incrementar la capacidad de almacenamiento, proteger la calidad del agua y la infraestructura hídrica crítica, y mejorar la resiliencia climática y la sostenibilidad ambiental (García-Gil et al., 2024).

El proyecto cuenta con nueve sitios demostradores en seis islas de la Macaronesia (Figura 4.1): La Palma, Gran Canaria y El Hierro (Islas Canarias, España); Faial (Azores, Portugal); Madeira (Portugal); y Santiago (Cabo Verde); y cinco sitios replicadores: Santa Maria y Graciosa (Azores, Portugal), Martinica y Guadalupe (Antillas Francesas, Francia) y Reunión (Francia). La iniciativa integra caracterización de campo, modelización hidrológica y herramientas digitales, entre ellas sistemas de monitorización inteligente y una plataforma de gemelo digital, con el objetivo de reforzar la gestión de infraestructuras y la resiliencia del sistema a largo plazo.

GENESIS desarrolla una metodología operativa para evaluar la vulnerabilidad y la resiliencia de las infraestructuras hídricas y otros servicios críticos frente a peligros naturales y antrópicos. Su objetivo es ofrecer una base científica y técnica para analizar la exposición, las interdependencias y los posibles fallos en cadena que pueden comprometer la prestación de servicios esenciales en territorios insulares, especialmente en regiones volcánicas y de limitada disponibilidad hídrica.



Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 4.1. Localización de la región de la Macaronesia y de sus archipiélagos constituyentes.

El enfoque metodológico se diseñó bajo el principio de transferibilidad, de modo que pudiera aplicarse en distintos contextos insulares, manteniendo coherencia conceptual y comparabilidad entre casos. Esta armonización permite identificar patrones comunes de vulnerabilidad y factores de resiliencia que trascienden las particularidades locales y facilitan la formulación de estrategias de adaptación a escala regional.

El proyecto presenta una evaluación de la vulnerabilidad de las infraestructuras hídricas críticas en las islas de la Macaronesia donde se encuentran los proyectos piloto (Santamarta et al., 2025). Su objetivo es identificar los nodos con mayor exposición a peligros naturales y los elementos que revelan debilidades sistémicas, con el fin de respaldar el desarrollo de estrategias de adaptación específicas. La evaluación se centra en infraestructuras claves, entre ellos plantas de desalinización de agua de mar, redes de abastecimiento y distribución de agua potable, sistemas de riego, galerías, pozos, embalses, presas y sistemas de tratamiento de aguas residuales y regeneración de aguas. Este análisis constituye un pilar esencial para el éxito del proyecto, ya que proporciona una base de evidencia sólida para diseñar e implementar soluciones basadas en la naturaleza destinadas a la adaptación climática, contribuyendo a reforzar la resiliencia de las infraestructuras hidráulicas críticas. A partir de estos datos, es posible orientar decisiones que permitan resis-

tir mejor los impactos climáticos, garantizar la continuidad del servicio y proteger a las comunidades dependientes del sistema hídrico.

Los peligros considerados en la evaluación abarcan tanto riesgos geológicos como climáticos, ya que ambos influyen directamente en la vulnerabilidad de la infraestructura hidráulica crítica. El riesgo volcánico presenta una distribución desigual en la región: mientras algunas islas registran largos periodos de inactividad, otras mantienen niveles elevados asociados al volcanismo activo y a la alta exposición poblacional (Romero Ruiz, 1991). En cuanto a la actividad sísmica, esta ha provocado desastres significativos en distintos periodos históricos, y como se mencionó anteriormente, los deslizamientos de ladera y los pequeños deslizamientos han afectado de distinta manera a las distintas islas (Caldeira et al., 2017; Hervás, 2003; Lomoschitz et al., 2002). A ello se suman los peligros climáticos, como lluvias extremas, inundaciones repentinas, olas de calor, tormentas e incendios forestales, caracterizados todos ellos por una mayor frecuencia y una distribución geográfica más amplia. La concurrencia de estos fenómenos pone de manifiesto la exposición de las infraestructuras hidráulicas a escenarios multiamenaza y a la creciente influencia del cambio climático en la región (Dorta Antequera et al., 2020).

La metodología combina tres niveles de análisis complementarios:

- 1) Evaluación sistémica, centrada en la integridad funcional de los servicios críticos (agua, energía, transporte).
- 2) Evaluación espacial, que incorpora la localización y densidad de infraestructuras críticas en entornos expuestos.
- 3) Evaluación dinámica, que explora la propagación de impactos mediante un motor de fallos en cascada, capaz de simular escenarios complejos de interrupción y recuperación.

Esta integración de niveles se apoya en un inventario geoespacial de infraestructuras críticas, construido para las islas demostradoras evaluadas. La información espacial se combina con criterios de impacto, interdependencia y redundancia, permitiendo generar indicadores compuestos de vulnerabilidad y resiliencia. El presente capítulo describe la lógica de este enfoque, sus fundamentos teóricos y los criterios operativos que guían la evaluación, así como los procedimientos utilizados para construir y validar el inventario geoespacial de infraestructuras críticas.

4.2. Enfoque por islas y comparación de sistemas insulares

La aproximación metodológica del proyecto parte de la premisa de que cada isla constituye un sistema territorial y funcional singular, caracterizado por una

alta dependencia de recursos, propios y externos, y una limitada capacidad de sustitución en caso de fallo. En consecuencia, la vulnerabilidad no se entiende sólo como exposición física, sino como fragilidad estructural del sistema insular ante perturbaciones externas o internas.

El enfoque por islas permite evaluar de manera diferenciada las infraestructuras y servicios que sostienen la seguridad hídrica, energética y social de cada territorio. En el proyecto europeo GENESIS, cada isla se considera una unidad de análisis, dentro de un marco comparativo regional. Este esquema posibilita identificar similitudes y divergencias en los patrones de vulnerabilidad, derivados tanto de las características naturales (volcanismo, clima, relieve) como de las estructuras de gobernanza y modelos de gestión de los servicios.

El proceso de trabajo siguió una secuencia metodológica homogénea:

- 1) Recopilación y validación de información básica sobre infraestructuras, redes y servicios.
- 2) Representación geoespacial de todos los elementos críticos y sus interconexiones funcionales.
- 3) Aplicación de criterios de evaluación para identificar niveles de vulnerabilidad y resiliencia.
- 4) Integración de resultados en un modelo comparativo de islas.

En esta representación conceptual, cada isla se aborda como un sistema integrado donde confluyen componentes físicos (infraestructuras, recursos), funcionales (servicios, redes) y organizativos (instituciones, planes de emergencia). Los resultados de las simulaciones permiten cuantificar el impacto potencial de perturbaciones y estimar la capacidad de recuperación del sistema, expresada como resiliencia funcional.

Este enfoque comparativo por islas ofrece una doble ventaja: primero permite normalizar indicadores para comparar territorios con diferentes escalas y niveles de desarrollo, y segundo, facilita la transferencia de buenas prácticas de resiliencia, adaptadas a contextos insulares de vulnerabilidad compartida.

El enfoque de evaluación se adapta a las particularidades de cada isla, reflejando diferencias en el entorno ambiental, la complejidad del sistema, la disponibilidad de datos y el grado de integración dentro del marco de trabajo del proyecto europeo GENESIS. En el caso de las Islas Canarias: La Palma, Gran Canaria y El Hierro, la amplia cobertura de información permitió emplear un motor de efectos en cascada para generar narrativas de vulnerabilidad basadas en distintos escenarios. Para los demás sitios demostradores: Faial (Azores), Madeira, y Santiago (Cabo Verde), las evaluaciones se apoyan en la información ambiental e infraestructural disponible, complementada con visualización cartográfica y revisión documental.

Cada evaluación desarrolla el contexto insular y las características del sistema hídrico, seguido de un análisis de las principales presiones y debilidades del sistema conforme al alcance metodológico y a los datos disponibles para cada caso.

4.3. Definición operativa de vulnerabilidad y resiliencia

La metodología del proyecto GENESIS adopta definiciones operativas de los conceptos de vulnerabilidad y resiliencia, basadas en marcos teóricos ampliamente aceptados en la gestión de riesgos y adaptación climática (Borzì, 2023; López-Saavedra et al., 2023).

Vulnerabilidad se define como el grado en que un sistema puede resultar negativamente afectado ante un evento disruptivo, como resultado de la combinación de exposición, sensibilidad y capacidad de respuesta. En el contexto de infraestructuras críticas, la vulnerabilidad se asocia tanto a la localización física (exposición a peligros geológicos o hidrometeorológicos) como a la dependencia funcional de otros servicios esenciales (energía, transporte, comunicaciones).

Resiliencia, por su parte, se entiende como la capacidad del sistema para mantener o recuperar su funcionalidad tras un evento adverso. Esto implica no solo la resistencia ante el impacto inicial, sino la rapidez y eficacia del proceso de recuperación, medido a través de la restauración progresiva del servicio.

Este marco reconoce que la resiliencia no es el opuesto de la vulnerabilidad, sino una propiedad complementaria que emerge de la redundancia, la adaptabilidad y la capacidad institucional de respuesta. Así, un sistema puede ser vulnerable por tener una alta exposición física a determinados riesgos y, sin embargo, mantener una resiliencia elevada si dispone de mecanismos redundantes o alternativos de suministro (por ejemplo, desalinización de agua de mar, almacenamiento o interconexiones entre redes).

Por tanto, la definición operativa adoptada en el proyecto GENESIS enfatiza la interdependencia entre servicios críticos, entendiendo que la vulnerabilidad sistémica puede amplificarse cuando un fallo local desencadena efectos en cascada sobre otros sectores o ámbitos.

4.4. Criterios de evaluación: escala de impacto, interdependencias y redundancias

Para identificar los puntos donde convergen exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación, la evaluación metodológica incorpora la relación entre las

presiones físicas, ambientales, y las características técnicas del sistema. Este enfoque permite reconocer segmentos del sistema hídrico en los que la combinación de condiciones ambientales adversas y limitaciones operativas puede amplificar la probabilidad de interrupciones. Asimismo, allí donde existe información suficiente, se tienen en consideración las medidas de mitigación y prevención ya implementadas, especialmente en zonas costeras o en áreas expuestas a peligros compuestos, como un elemento adicional para valorar la resiliencia funcional.

La metodología llevada a cabo en el proyecto europeo GENESIS se apoya en tres grandes criterios que permiten evaluar la vulnerabilidad y la resiliencia del sistema: escala de impacto, interdependencias funcionales y redundancias y alternativas operativas (Tabla 4.1). Los tres criterios ofrecen un marco común para analizar la vulnerabilidad y la resiliencia en cada territorio insular. Su aplicación conjunta permite interpretar de forma comparativa las principales debilidades y fortalezas del sistema, así como reconocer patrones espaciales relevantes para la planificación y la gestión.

Tabla 4.1. Criterios para analizar la vulnerabilidad y resiliencia en los territorios insulares

Criterio	Qué es (definición operativa)	Clasificación
Escala de impacto	Evalúa el alcance espacial y funcional de los efectos derivados de un fallo o perturbación. Se estima combinando la magnitud del evento con la capacidad de propagación dentro de la red de infraestructuras. Este criterio se relaciona con la criticidad de cada nodo o instalación.	<i>Local</i> : afección confinada a una instalación o municipio. <i>Intermedio</i> : repercusión en varios nodos o servicios conectados. <i>Regional</i> : afección del sistema insular en su conjunto.
Interdependencias funcionales	El análisis identifica las conexiones entre los distintos servicios críticos (p. ej., agua, energía, transporte y comunicaciones). Cada tipo de interdependencia se incorpora a modelo de simulación de fallos en cascada, permitiendo estimar la propagación de interrupciones y la pérdida de servicio acumulada.	<i>Física</i> : dependencia directa del funcionamiento material (ej. bombeo eléctrico). <i>Tecnológica</i> : dependencia de sistemas de control y comunicación. <i>Geespacial</i> : proximidad o localización que puede generar vulnerabilidad compartida.
Redundancias y alternativas operativas	La existencia de infraestructuras duplicadas, rutas alternativas o capacidad de almacenamiento confiere resiliencia estructural al sistema. La ausencia de redundancias genera vulnerabilidad, mientras que su presencia incrementa la resiliencia ante fallos.	Presencia de múltiples fuentes de abastecimiento (ej. desalinización de agua de mar y agua subterránea). Interconexión de redes (capacidad de desvío de flujos). Disponibilidad de respaldo energético para infraestructuras. Planes operativos de emergencia.

Fuente: elaboración propia (2026)

4.5. Construcción del inventario geoespacial de infraestructuras críticas

La construcción del inventario geoespacial fue una tarea fundamental de la metodología del proyecto GENESIS. Su propósito es representar de manera homogénea la distribución, tipología y conectividad de las infraestructuras del sistema insular, incorporando su relación con otras infraestructuras y servicios interdependientes.

Un componente central de este trabajo ha sido la compilación, organización y representación cartográfica de la infraestructura hídrica crítica en las islas de los casos de estudio. Dado que no existían conjuntos de datos públicos georreferenciados completos disponibles, se dedicó un esfuerzo considerable a la recopilación, validación y tratamiento de la información procedente de socios institucionales, planes técnicos y fuentes espaciales accesibles. Esta tarea implicó una coordinación continua y un proceso técnico detallado, que culminó en un conjunto de datos espacialmente referenciados de las principales infraestructuras hídricas. La información recopilada, cuyo nivel de detalle varía según la disponibilidad de datos de cada isla, constituye una base fundamental para los análisis actuales y futuros del proyecto europeo GENESIS.

El proceso se desarrolló en cuatro etapas principales:

1) Identificación de tipologías de infraestructuras

Se definieron categorías comunes para todas las islas: estaciones desalinizadoras de agua de mar (EDAM), estaciones de tratamiento de agua potable (ETAP), estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), estaciones de bombeo, balsas y presas, pozos y galerías, conducciones, redes de distribución y tanquillas de reparto.

2) Recopilación de información espacial

Las fuentes incluyeron planes hidrológicos insulares, bases de datos públicas (IGN, IDECanarias, entre otras) y aportes de organismos locales de gestión. Cada infraestructura se georreferenció y se le asignaron atributos relativos a su funcionalidad.

3) Normalización y validación

Se aplicaron procesos de control de calidad para eliminar duplicidades y asegurar la coherencia interna de las capas de cada isla, integrando datos procedentes de distintas fuentes en un sistema geográfico común dentro de cada isla. Asimismo,

mo, se armonizó la terminología, categorización y simbología entre islas para permitir una lectura comparativa coherente, manteniendo en cada caso el sistema de referencia espacial más adecuado.

4) Integración en el motor de simulación

Los datos espaciales alimentaron el modelo de fallos en cascada, permitiendo la simulación de escenarios de interrupción progresiva y análisis de resiliencia.

El inventario resultante constituye un insumo esencial para comprender la configuración espacial de las infraestructuras hídricas en cada isla y para contextualizar su exposición frente a distintos tipos de peligros. Su elaboración permite visualizar la distribución, densidad y función relativa de los elementos del sistema, lo que facilita la identificación de zonas sensibles, dependencias estructurales y posibles cuellos de botella.

4.6. Síntesis y aplicabilidad del enfoque

La metodología del proyecto GENESIS proporciona un marco robusto para evaluar la vulnerabilidad y la resiliencia de sistemas insulares de agua y servicios críticos. Su valor radica en la integración de datos espaciales, funcionales y de gestión, permitiendo un diagnóstico transversal que conecta la escala técnica con la institucional.

Entre sus principales ventajas destacan:

- 1) La comparabilidad entre islas, gracias al uso de criterios uniformes.
- 2) La posibilidad de identificar dependencias críticas en los sistemas.
- 3) La incorporación de interdependencias y redundancias como factores de resiliencia.
- 4) La utilidad del inventario geoespacial como herramienta para la planificación y la priorización de inversiones.

Este enfoque metodológico es transferible a otros contextos, incluidos territorios continentales con alta complejidad de redes. Asimismo, este enfoque puede servir como referencia para la elaboración de planes de adaptación frente a los riesgos naturales, y que anticipen disrupciones en las infraestructuras.

En los capítulos dedicados a los estudios insulares (Capítulos 7, 8 y 9) se demuestran los resultados de la aplicación de esta metodología en distintos contextos, ilustrando cómo los criterios de vulnerabilidad y resiliencia permiten interpretar los patrones estructurales y funcionales de cada isla.

4.7. Referencias bibliográficas

- Borzi, I. (2023). Vulnerability assessment of water supply infrastructures through multiple indicator methodology. *Journal of Water and Climate Change*, 14(11), 3967–3984. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.148>
- Caldeira, B., Fontiela, J., Borges, J. F., & Bezzeghoud, M. (2017). Large earthquakes in the Azores. *Física de La Tierra*, 29, 29–45. <https://doi.org/10.5209/FITE.57601>
- Dorta Antequera, P., López Díez, A., Díaz Pacheco, J., Máyer Suárez, P., & Romero Ruiz, C. (2020). Turismo y amenazas de origen natural en la Macaronesia. Análisis comparado. *Cuadernos de Turismo*, 45, 61–92. <https://doi.org/10.6018/turismo.426041>
- García-Gil, A., Rodríguez-Alcántara, J. S., Cruz-Pérez, N., Marazuela, M. Á., Jiménez, J., Baquedano, C., Martínez-León, J., Gasco Caverro, S., Rodríguez-Martín, J., & Santamarta, J. C. (2024). El proyecto GENESIS: desafíos y adaptación del sector hídrico en pequeñas islas de la Macaronesia frente al cambio climático. *Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente*, 311, 28–32.
- Hervás, J. (2003). *Lessons Learnt from Landslide Disasters in Europe* (No. EUR 20558 EN; Technical Reports – Health and Consumer Protection, Safety and Security). Joint Research Centre (JRC), European Commission. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC24724>
- Lomoschitz, A., Buxó, L. P. i, Roqué, C., Belmonte, D. B. i, & Linares, R. (2002). Reconocimiento geofísico del deslizamiento de Rosiana (depresión de Tirajana, Gran Canaria). *Scientia gerundensis*, 35–50.
- López-Saavedra, M., Martí, J., & Planagumà, L. (2023). How Effective Risk Assessment and Management Is the Key to Turning Volcanic Islands into a Source of Nature-Based Solutions. *Land*, 12(3), 686. <https://doi.org/10.3390/land12030686>
- Romero Ruiz, M. C. (1991). Las manifestaciones volcánicas históricas del Archipiélago Canario. Universidad de La Laguna.
- Santamarta, J. C., Koritnik, J., Cruz-Pérez, N., & Expósito-Brazier, M. (2025). *D1.3 Critical water infrastructure's vulnerability and weaknesses assessment report*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17491717>

Capítulo 5

Motor de simulación de fallos en cascada: principios y capacidades

Mehdi Khoury

Jelena Koritnik

Noelia Cruz Pérez

Juan Carlos Santamarta Cerezal

5.1. Finalidad y alcance del motor de simulación

El análisis de la vulnerabilidad y la resiliencia de los servicios críticos en territorios insulares exige tener herramientas capaces de capturar la complejidad de los sistemas y la forma en que las perturbaciones se propagan a través de ellos. En este marco, el proyecto GENESIS incorpora un motor de simulación de fallos en cascada específicamente diseñado para representar, de manera exploratoria, cómo distintos tipos de interrupciones pueden afectar a las infraestructuras críticas y a las comunidades que dependen de ellas.

Esta herramienta se ha aplicado a tres islas de estudio: El Hierro, La Palma y Gran Canaria, seleccionadas por contar con la información necesaria para una evaluación completa y por presentar características físicas, demográficas, energéticas e hidráulicas suficientemente diferenciadas para analizar el comportamiento del método en distintos contextos insulares.

El desarrollo del motor fue diseñado por la empresa *Ramparts & Light Limited*, que lo construyó desde cero mediante un algoritmo propietario implementado en el lenguaje Rust, elegido por su énfasis en la seguridad y el rendimiento. La eficiencia en la carga y ejecución resulta esencial a la hora de modelizar fenómenos complejos, ya que permite realizar múltiples iteraciones exploratorias y visualizar rápidamente los efectos de distintas configuraciones o escenarios de peligro. El equipo de la Universidad de La Laguna (ULL) realizó el diseño hidráulico para las tres islas y la validación del sistema.

El objetivo del motor no es predecir resultados con precisión determinista, sino ofrecer una plataforma para explorar cómo se comporta el sistema ante perturbaciones, y qué elementos estructurales o funcionales pueden favorecer la propagación de fallos. En este sentido, el modelo combina fundamentos de la ciencia

de la complejidad, teoría de redes y conceptos inspirados en modelos económicos y epidemiológicos, con el fin de representar no solo las interdependencias entre infraestructuras, sino también los bucles de retroalimentación que se generan entre servicios críticos y población (Figura 5.1).



Fuente: elaboración propia (2026)

Figura 5.1. Nodos y dependencias en la plataforma de fallos en cascada del proyecto europeo GENESIS.

Estos elementos permiten analizar, de forma integrada, la relación entre tres componentes fundamentales del sistema insular:

- 1) la infraestructura física,
- 2) los servicios esenciales que la infraestructura sostiene, y
- 3) la dinámica demográfica y laboral que puede amplificar o mitigar las disrupciones.

De esta manera, el motor de simulación constituye un instrumento de gran valor para la planificación estratégica y la evaluación de riesgos, ofreciendo un espacio controlado para examinar escenarios hipotéticos, contrastar alternativas y comprender las posibles trayectorias de degradación o recuperación del sistema.

5.2. Fundamentos del motor de simulación

El motor de simulación se basa en una representación en red de las infraestructuras y servicios críticos presentes en cada isla. Cada elemento del sistema se modeliza como un nodo, mientras que las relaciones funcionales entre ellos se representan mediante enlaces que describen dependencias unidireccionales o bidireccionales. Este enfoque permite capturar la estructura del sistema de forma abstracta y, al mismo tiempo, analizar cómo la disrupción de un nodo puede repercutir en otros.

El núcleo del motor es un algoritmo propietario diseñado para identificar cómo una perturbación inicial afecta a la «salud» o integridad de un nodo y cómo dicha perturbación se transmite a través de la red generando, potencialmente, fallos en cascada. La implementación en Rust¹ aporta ventajas en términos de control de memoria, estabilidad y velocidad de ejecución, características que permiten realizar simulaciones sucesivas a gran escala con tiempos de respuesta reducidos.

La herramienta integra enfoques derivados de la ciencia de la complejidad y de la teoría de redes, que permiten representar sistemas con múltiples componentes interconectados y no lineales. Del ámbito de la modelización epidemiológica, el motor toma la idea de que un nodo afectado puede «infectar» a otros a través de sus dependencias. Del ámbito económico recupera el concepto de retroalimentación, clave para simular los efectos que la reducción de la actividad en un sector puede tener sobre el resto del sistema.

Las interdependencias entre infraestructuras críticas, como las de agua, energía, transporte y comunicaciones, constituyen uno de los pilares del modelo. La disrupción en un nodo puede afectar a la disponibilidad o capacidad operativa de los nodos dependientes, generando efectos en cadena cuya magnitud depende de la estructura y redundancia del sistema. El motor incorpora distintos tipos de dependencias, como la necesidad de energía para el funcionamiento de estaciones de bombeo, la dependencia de los sistemas de comunicación y de los servicios de emergencia del suministro eléctrico, y la localización de infraestructuras que puede provocar vulnerabilidades compartidas frente a una misma perturbación.

Además, el modelo permite explorar cómo la modificación de estas dependencias altera el comportamiento global del sistema. Por ejemplo, es posible simular qué ocurriría si un nodo crítico pudiera operar con un respaldo energético inde-

¹ Rust es un lenguaje de programación compilado. Se usa para desarrollar software robusto y rápido porque incorpora mecanismos que ayudan a evitar fallos de memoria y a mantener un rendimiento elevado; por eso es adecuado para motores de simulación con iteraciones repetidas.

pendiente, o si determinados elementos de la red fueran inmunes a ciertos tipos de interrupciones. Estas capacidades amplían el espectro de escenarios analizados y permiten evaluar, de manera exploratoria, cómo cambios puntuales en la red pueden modificar su resiliencia estructural.

Uno de los elementos más innovadores del motor es la introducción de una codependencia explícita entre los servicios críticos y la población, incorporando datos demográficos y de empleo hasta el nivel de distrito electoral. Esto permite capturar la relación bidireccional entre servicios y sociedad:

- 1) por un lado, la interrupción de servicios esenciales afecta al bienestar de la población y a la disponibilidad de mano de obra;
- 2) por otro, la reducción de la fuerza laboral repercute en la operatividad de infraestructuras críticas y en la capacidad de prestación de servicios esenciales que requieren personal especializado.

Este bucle de retroalimentación es fundamental para representar de forma más realista la dinámica de los sistemas insulares. El motor reconoce, por ejemplo, que una interrupción en el suministro energético puede provocar el cierre temporal de centros escolares, lo que afecta a la disponibilidad de trabajadores en sectores críticos; a su vez, la pérdida de personal puede impedir el restablecimiento de ciertos servicios, prolongando o amplificando la interrupción inicial.

La incorporación de esta dimensión socioeconómica aporta profundidad analítica al modelo y permite considerar, no solo las características físicas de la infraestructura, sino también la capacidad real del sistema para afrontar y superar perturbaciones, teniendo en cuenta su estructura demográfica y laboral.

5.3. Escenarios de peligros y modificadores climáticos

El motor de simulación integra una gama de escenarios de peligros que permiten analizar cómo distintos tipos de interrupciones pueden afectar a la infraestructura crítica. Para ello se utiliza como referencia la clasificación establecida por el proyecto europeo desarrollado en el marco del programa Madeira-Azores-Canarias (RIESGOMAP, 2013) que identifica seis categorías principales de peligros relevantes para territorios insulares: erupciones volcánicas, terremotos, incendios forestales, deslizamientos de ladera, inundaciones costeras e inundaciones fluviales. Estos escenarios proporcionan un conjunto de condiciones iniciales desde las cuales se puede evaluar cómo la afección de uno o varios nodos pueden repercutir en la red de servicios críticos.

5. Motor de simulación de fallos en cascada: principios y capacidades

Sobre estos escenarios base, el proyecto GENESIS introduce un conjunto de modificadores climáticos derivados de sus proyecciones internas para distintos horizontes temporales (2025, 2050, 2075 y 2100) (Reyes Parrilla, 2025). Estos modificadores representan un aumento porcentual del daño experimentado por los nodos afectados, calculado en función del número de alertas climáticas anuales asociadas a cada tipo de peligro. La lógica es sencilla: si un territorio experimenta más episodios de calor extremo, viento, tormentas o precipitaciones intensas, la probabilidad de que una infraestructura sufra daños adicionales aumenta proporcionalmente.

La forma en que estos modificadores se aplican depende del tipo de peligro considerado (Tabla 5.1). En el caso de los incendios forestales, el daño derivado del escenario base aumenta un 1 % por cada alerta de viento y por cada alerta de alta temperatura prevista para el área en cuestión. Para los deslizamientos de ladera, la modificación se basa en el número de alertas de precipitación. En el caso de las inundaciones costeras, el daño puede incrementarse por alertas de tormenta, viento y fenómenos costeros. Las inundaciones fluviales, por su parte, incorporan tanto las alertas de precipitación como las de tormenta. Por otro lado, las erupciones volcánicas y los terremotos, al no tener relación directa con el clima, no sufren estos incrementos. Este esquema permite ajustar la severidad del impacto en función de las condiciones climáticas proyectadas, ofreciendo una perspectiva exploratoria sobre cómo los cambios ambientales previstos podrían influir en la exposición y la vulnerabilidad de la infraestructura crítica.

Tabla 5.1. Esquema de los riesgos naturales y sus modificadores

Riesgo Natural	Alerta
Incendios forestales	Alertas de viento y de alta temperatura
Deslizamientos de ladera	Alertas por precipitaciones
Inundaciones costeras	Alertas de tormenta, viento y fenómenos costeros
Inundaciones fluviales	Alertas de precipitación y tormenta
Erupciones volcánicas	No aplica
Terremotos	No aplica

Fuente: elaboración propia (2026)

Una vez definidos, los escenarios pueden aplicarse a áreas específicas o a conjuntos de ellas, lo que permite observar las consecuencias de las perturbaciones tanto a escala general como en municipios concretos de la isla. El análisis se limita, en todos los casos, a las áreas identificadas como expuestas en la cartografía de distintos peligros. El modelo presenta los resultados en distintos módulos de salida: mapas geoespaciales, indicadores agregados en porcentajes, tablas de resultados socioeconómicos y salidas específicas para componentes del sistema produc-

tivo, como los cultivos. Este enfoque ofrece una visión integrada del potencial de daño bajo diferentes configuraciones de peligros y condiciones climáticas, adaptada a la complejidad de los sistemas insulares.

5.4. Capacidades exploratorias del motor

Además de modelizar la propagación de disrupciones a través de la red, el motor de simulación incorpora un conjunto de capacidades exploratorias que permiten analizar de forma más flexible cómo determinadas configuraciones o intervenciones hipotéticas modificarían el comportamiento del sistema. Estas funcionalidades no pretenden ofrecer predicciones precisas, sino ilustrar el efecto potencial de alteraciones estructurales o funcionales en las redes de servicios críticos.

Una de estas capacidades es la posibilidad de proteger determinados nodos frente a un tipo concreto de daño. Por ejemplo, un usuario puede simular qué ocurriría si una infraestructura clave, situada en un área inundable, fuera completamente inmune a los daños por inundación costera. Esta operación no implica introducir una obra o solución física real, sino examinar cómo cambiaría la dinámica de propagación del fallo si ese nodo permaneciera operativo bajo ese escenario de peligro.

Otra función relevante es la posibilidad de neutralizar los efectos de la disrupción de ciertos servicios de entrada. Esto es especialmente útil en situaciones donde una infraestructura dispone de un sistema de respaldo, como un generador autónomo que le permite seguir operando, aunque la red eléctrica experimente una interrupción. La plataforma permite definir respaldos energéticos, hídricos o de comunicaciones, de forma individual o combinada, según las capacidades reales de cada infraestructura. El motor permite representar esta condición de independencia relativa y analizar cómo afecta al conjunto del sistema: si un nodo crítico es menos vulnerable, puede actuar como amortiguador y reducir la magnitud de las cascadas de fallo.

Una característica adicional es la incorporación de capas de dependencia suplementarias, como ámbitos hidrológicos donde, por ejemplo, los embalses o depósitos dependen en mayor medida de un tipo específico de aporte, ya sea de recursos locales o de recursos procedentes de otros ámbitos. Esto permite representar, de forma exploratoria, cómo distintos patrones de dependencia pueden influir en la vulnerabilidad y en la dinámica de propagación de fallos.

Las aplicaciones del motor de simulación en El Hierro, La Palma y Gran Canaria revelan diferencias significativas en la configuración y comportamiento de las redes de servicios críticos. Cada isla presenta combinaciones particulares de

infraestructuras, dependencias y distribución espacial de la población, lo que se traduce en dinámicas de fallo específicas. El motor permite visualizar estas diferencias y evaluar cómo la estructura del sistema condiciona la forma en que las disrupciones se propagan.

Finalmente, el desarrollo de este motor representa un avance cualitativo respecto a otros prototipos exploratorios utilizados en los proyectos europeos como ARSINOE y NATALIE (ARSINOE, 2025; NatalieProject, 2023). Aunque no se trata de establecer comparaciones detalladas, el nuevo motor en lenguaje Rust ofrece mejoras en rendimiento y funcionalidades, como la reconstrucción en tiempo real de la topología de la red cuando cambia el estado operativo de los nodos. Estas capacidades abren posibilidades para análisis más ágiles y versátiles en contextos de planificación de infraestructuras y resiliencia.

5.5. Lectura de resultados y posibles aplicaciones

Los resultados generados por el motor de simulación proporcionan una visión integrada del estado del sistema bajo diferentes escenarios de perturbación. La herramienta permite visualizar el estado de los servicios críticos, identificando qué nodos mantienen su integridad, cuáles experimentan degradación y cuáles presentan fallos significativos. Esta lectura se complementa con información sobre el impacto en la población, incorporando variaciones en la disponibilidad de mano de obra y en elementos productivos como los cultivos.

La representación espacial de los resultados ofrece una interpretación detallada de los efectos geográficos de las disrupciones. Esto facilita tanto el análisis de impactos localizados como la identificación de patrones territoriales más amplios. El motor permite contrastar diferentes configuraciones de peligro y modificar variables clave para observar cómo cambia la distribución del daño, lo que resulta útil para evaluar posibles estrategias de mitigación.

Los usos incluyen tanto la preparación y continuidad del servicio, donde se busca identificar puntos críticos y anticipar posibles interrupciones del servicio, como la planificación estratégica a largo plazo, orientada a comprender las consecuencias potenciales de escenarios alternativos. Los usuarios pueden seleccionar áreas específicas, aplicar escenarios de peligro con y sin modificadores climáticos, proteger nodos, introducir respaldos, y observar cómo estas variaciones modifican la respuesta del sistema. Esta lógica exploratoria ofrece un soporte valioso para procesos de comparación estructurada de opciones que requieren evaluar múltiples escenarios.

La lectura de los resultados no implica certezas deterministas; más bien, permite comprender tendencias estructurales, puntos de fragilidad, y la forma en que

ciertos ajustes pueden modificar la trayectoria de una disrupción. Este enfoque ayuda a situar la resiliencia como propiedad emergente del sistema, dependiente tanto de la infraestructura física como de la organización funcional y la estructura demográfica.

5.6. Implicaciones para la evaluación de resiliencia

El motor de simulación de fallos en cascada desarrollado en el marco del proyecto europeo GENESIS constituye una herramienta exploratoria diseñada para analizar, de manera integrada, las interdependencias entre infraestructuras críticas, la dinámica de propagación de fallos y la interacción entre perturbaciones físicas y condiciones socioeconómicas (Santamarta et al., 2026a; 2026b; 2026c). Su incorporación permite disponer de un espacio de experimentación donde es posible observar cómo distintos escenarios de riesgo, modificaciones estructurales en la red o variaciones en las dependencias funcionales pueden alterar la respuesta del sistema insular ante una disrupción.

A diferencia de aproximaciones más estáticas, el enfoque adoptado reconoce que la vulnerabilidad y la resiliencia emergen no solo de la localización y características técnicas de las infraestructuras, sino también de su relación con otros servicios y con la estructura demográfica y laboral de la población. La posibilidad de introducir perturbaciones de distinta naturaleza, combinarlas con modificadores climáticos y estudiar su efecto acumulado contribuye a capturar, de manera aproximada, la complejidad de los sistemas insulares contemporáneos.

El conjunto de funcionalidades, protección hipotética de nodos, incorporación de respaldos, adición de capas de dependencia o aplicación de distintos escenarios de peligro, no pretende ofrecer predicciones concluyentes, sino permitir al usuario explorar cómo cambios puntuales pueden modificar trayectorias de propagación o amortiguar sus efectos. Esta capacidad resulta particularmente útil en contextos donde los recursos son limitados y la planificación requiere priorizar intervenciones que aporten un mayor impacto sobre la estabilidad del sistema.

Aunque su aplicación en el proyecto europeo GENESIS se ha centrado en las islas de El Hierro, La Palma y Gran Canaria, los principios sobre los que se basa el motor son transferibles a otros territorios que presenten estructuras de servicios críticos igualmente complejas o interdependientes. La herramienta contribuye así a una comprensión más profunda de los mecanismos que condicionan la continuidad operativa de los servicios esenciales y la capacidad de los sistemas para afrontar perturbaciones diversas.

En este capítulo se han presentado los fundamentos y capacidades del motor de simulación, que sirven como soporte metodológico para los análisis específicos desarrollados en los capítulos 7, 8 y 9. Allí se examinan las configuraciones concretas de cada isla, los nodos y servicios críticos involucrados y las dinámicas de disrupción obtenidas mediante la aplicación del modelo en contextos insulares diferenciados.

5.7. Referencias bibliográficas

- ARSINOE (2025, August). *ARSINOE Develops Digital Tools to Transform Climate Data into Actionable Knowledge*. <https://arsinoe-project.eu/arsinoe-develops-digital-tools-to-transform-climate-data-into-actionable-knowledge/>
- NatalieProject (2023, 2028). *General presentation - NATALIE*. <https://www.natalieproject.eu/case-studies/general-presentation>
- Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Koritnik, J., & Khoury, M. (2026a). *GENESIS–La Palma platform for cascading-failure simulation in water systems and critical infrastructures* [Application software]. Universidad de La Laguna. https://doi.org/10.25145/o.GENESIS_Palma.2025
- Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Koritnik, J., & Khoury, M. (2026b). *GENESIS–Gran Canaria platform for cascading-failure simulation in urban water networks and critical infrastructures* [Application software]. Universidad de La Laguna. https://doi.org/10.25145/o.GENESIS_Gran-Canaria.2025
- Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Koritnik, J., Khoury, M., & García-Gil, A. (2026c). *GENESIS–El Hierro platform for cascading-failure simulation in water–energy systems* [Application software]. Universidad de La Laguna. https://doi.org/10.25145/o.GENESIS_Hierro.2025
- Ramparts & Light Limited (2026). <https://www.rampartsandlight.com/>
- Reyes Parrilla, D. (2025). *GENESIS D1.2 Climate risk profiles to each Macaronesian island (1.0)*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17813870>
- RIESGOMAP (2013). *Prevención de riesgos naturales y tecnológicos en la planificación territorial y urbanística* (Programa MAC 2007–2013) [Dataset/service]. Gobierno de Canarias (IDE-Canarias/datos.canarias.es) https://opendata.sitcan.es/upload/seguridad/gobcan_riesgomap_memoria-metodologia.pdf

Capítulo 6

Patrones comunes de vulnerabilidad y rasgos de resiliencia en islas volcánicas

Jelena Koritnik
Megan Expósito Brazier

6.1. Características sistémicas de los territorios volcánicos insulares

Las islas volcánicas de la Macaronesia presentan una serie de rasgos estructurales que condicionan de manera decisiva su vulnerabilidad frente a perturbaciones ambientales y operativas. La combinación entre relieve abrupto, compartimentación hidrogeológica del acuífero, limitada disponibilidad de recursos y una fuerte dependencia de infraestructuras energéticas y de conducción conforma un entorno donde las tensiones sobre el sistema hídrico se manifiestan con especial intensidad. El análisis desarrollado en el proyecto europeo GENESIS revela que, pese a las diferencias de escala territorial, densidad de población y nivel de desarrollo técnico, los sistemas comparten una serie de patrones recurrentes de fragilidad, estrechamente vinculados a su origen geológico y a las dinámicas socioeconómicas asociadas.

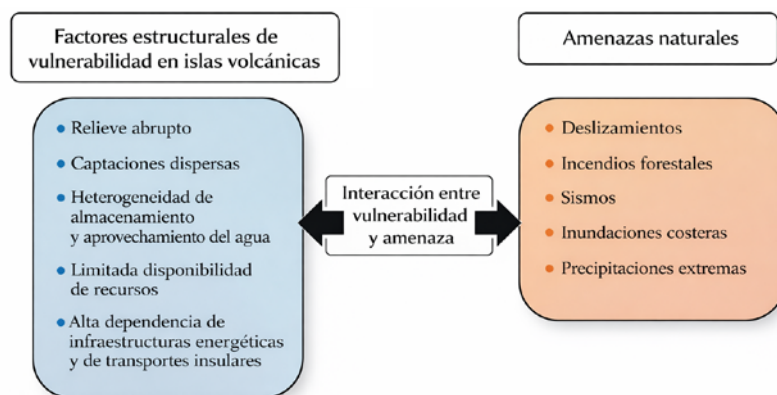
La variedad de edades geológicas y formas del relieve hace que las islas presenten condiciones muy distintas para almacenar y aprovechar el agua. En las islas más antiguas, el paisaje está más suavizado y predominan materiales menos permeables (Navarro Alvargonzález et al., 1993). En cambio, las islas más jóvenes tienen relieves abruptos y lavas basálticas muy fracturadas, lo que favorece la infiltración (Figura 6.1). Sin embargo, en estos territorios la superposición de coladas, la compartimentación interna del macizo y la descarga hacia la costa dificultan mantener un aprovechamiento estable del agua subterránea. Además, en las islas más recientes suele haber poca capacidad de almacenamiento superficial, por la escasa presencia de cuencas cerradas que puedan retener volúmenes relevantes de agua y la permeabilidad del terreno (Santamarta, 2009).



Fuente: Expósito Brazier, M. (2023)

Figura 6.1. Materiales de la última erupción de La Palma (2021).

En paralelo, la dependencia creciente hacia los sistemas de impulsión (bombes) y desalinización, introduce nuevas capas de vulnerabilidad, ya que cualquier perturbación que afecte a la energía tiene efectos inmediatos en el suministro de agua. Este contexto de fragilidad se ve reforzado por la exposición a peligros naturales, como deslizamientos de laderas, incendios forestales, sismos, inundaciones, episodios de precipitaciones extremas o erupciones volcánicas, que pueden afectar tramos críticos de conducciones, pozos, galerías, estaciones de tratamiento, depósitos, etc. Las similitudes entre las islas, pese a sus singularidades, permiten identificar tendencias regionales que se presentan a continuación (Figura 6.2), seguidas de los principales rasgos de resiliencia detectados en los sistemas.



Fuente: elaboración propia (2026)

Figura 6.2. Esquema de las características sistémicas de los territorios volcánicos insulares

6.2. Patrones comunes de vulnerabilidad

Sobreexplotación y salinización de acuíferos

La presión sobre los acuíferos es un rasgo común en muchas de las islas volcánicas analizadas en el proyecto (Carreira et al., 2010; Cruz et al., 2011; Poncela et al., 2022). La sobreexplotación responde a un desequilibrio persistente entre la disponibilidad del recurso y su demanda. Esto es particularmente acusado en territorios donde el crecimiento demográfico, la expansión urbana y la actividad turística generan incrementos sostenidos en el consumo. Esta extracción intensiva reduce los niveles piezométricos y debilita los gradientes hidráulicos naturales, favoreciendo procesos de intrusión marina, un fenómeno documentado en diversas islas del Atlántico oriental (Custodio, 2020).

En islas como La Palma, Faial o Madeira, la combinación de acuíferos fracturados, descargas costeras concentradas y explotación prolongada está asociada a un aumento en la vulnerabilidad de los sistemas subterráneos (Baptista, 2013; Freire, 2013; Poncela et al., 2022). En Santiago, las limitaciones de disponibilidad y la presión sobre pozos costeros reproducen patrones similares. Estos procesos reducen la rentabilidad hídrica de las captaciones, exigen mayores inversiones energéticas para extraer y transportar el agua y, en última instancia, condicionan la sostenibilidad operativa de los sistemas de abastecimiento (Custodio, 2020; Lobo de Pina, 2009).

El impacto de la sobreexplotación se amplifica en islas donde la recarga natural es baja o irregular. Los episodios de sequía, cada vez más intensos según las proyecciones climáticas regionales, incrementan esta presión al disminuir la capacidad de recuperación de los acuíferos entre episodios húmedos. La vulnerabilidad asociada no se limita al componente físico; también afecta a la gestión: la necesidad de recurrir a fuentes alternativas, como la desalinización o la importación energética para bombear agua desde cotas bajas. Dichas acciones pueden incrementar la dependencia del sistema y reducir su margen de maniobra ante perturbaciones externas.

Limitada capacidad de almacenamiento superficial

La geomorfología volcánica se caracteriza, en general, por una pendiente pronunciada, valles estrechos y escasa presencia de cuencas amplias capaces de retener volúmenes significativos de agua (Figura 6.3). Estas condiciones están presentes principalmente en las islas más jóvenes. En el caso de islas más antiguas, como

Fuerteventura y Lanzarote en el caso de Canarias, la reducida altitud, junto a una litología poco favorable limitada por la escasez de materiales impermeables, limita significativamente la posibilidad de embalsar las aguas de escorrentía (González-Morales & Ramón-Ojeda, 2019). Como resultado, las islas presentan una capacidad limitada para almacenar agua superficial, lo que condiciona tanto la disponibilidad como la gestión estacional del recurso (Rodríguez-Jiménez et al., 2024). Esta limitación se refleja claramente en casos como El Hierro y La Palma, donde la irregularidad climática y la escasez de almacenamiento natural obligan a depender de captaciones subterráneas, balsas artificiales o sistemas de bombeo que trasladan agua entre cotas (CIAEH, 2022; CIALP, 2023).



Fuente: Expósito Brazier, M. (2025)

Figura 6.3. Vista de pájaro del paisaje caracterizado por barrancos y pendientes pronunciadas.

En Gran Canaria, a pesar de la existencia de entre 65 y 69 grandes presas (según el criterio aplicado) (Santamarta, 2012; González González, 2013) los volúmenes útiles se han reducido con el tiempo y resultan insuficientes para cubrir la demanda actual. Esta circunstancia ha impulsado un modelo de abastecimiento basado principalmente en la desalinización, complementado por la reutilización

del recurso para riego (CIAGC, 2023). De forma similar, en Madeira y Faial, la capacidad de retención se ve condicionada por la orografía, lo que obliga a diseñar sistemas de transporte complejos que atraviesan laderas abruptas o zonas expuestas a desprendimientos.

La limitada disponibilidad de almacenamiento superficial incrementa la exposición del sistema a variaciones estacionales, ya que la falta de reservas amplifica los efectos de los periodos secos y puede obligar a las infraestructuras a operar a niveles cercanos a su límite de capacidad. Esta dependencia repercute directamente en la planificación, dado que las balsas y depósitos deben situarse en localizaciones geológicamente estables y fácilmente integrables en las redes de distribución, un requisito difícil de cumplir en territorios volcánicos caracterizados por una orografía compleja.

Dependencia energética de las impulsiones

La relación entre energía y agua es particularmente importante en las islas volcánicas, en las que la topografía y la distribución de los recursos imponen una dependencia estructural de las impulsiones. En islas como El Hierro, el suministro se sustenta ampliamente en plantas desalinizadoras situadas en la costa, desde las cuales el agua debe ser elevada a cotas medias y altas por la dispersión de la demanda. Incluso en islas donde el sistema se apoya mayoritariamente en tramos de conducción por gravedad, como La Palma, la conducción y la distribución incorporan impulsiones dependientes del suministro energético, que constituyen algunos de los tramos más críticos del sistema.

Esta dependencia introduce un factor crítico de vulnerabilidad: cualquier perturbación que afecte a la energía, ya sea por fallos internos, eventos climáticos o sobrecarga, repercute inmediatamente en el suministro de agua. La interrupción de estaciones de bombeo, plantas desalinizadoras o potabilizadoras puede desencadenar fallos en cascada que comprometen la continuidad del servicio. Además, basar el modelo energético en infraestructuras costeras, como la central térmica de Los Guinchos en La Palma (Figura 6.4), incrementa el riesgo al aumentar la exposición a peligros naturales como tormentas, oleaje extremo o inundaciones marinas, elementos que el proyecto europeo GENESIS reconoce como relevantes para el análisis territorial.



Fuente: Díaz Mesa, H. (2026)

Figura 6.4. Efectos de un temporal costero junto a la central térmica de Los Guinchos.

La dependencia energética también condiciona los costes operativos y la flexibilidad del sistema. Los cambios en la demanda o las variaciones climáticas que obligan a impulsar mayores volúmenes de agua incrementan el gasto energético y, en algunos casos, pueden tensionar redes eléctricas locales ya de por sí limitadas por su insularidad. Esta doble dependencia, del agua respecto a la energía y de la energía respecto a la infraestructura, constituye uno de los vínculos más críticos identificados en el conjunto de las islas.

Exposición a laderas inestables y peligros asociados al relieve volcánico

El relieve volcánico, generalmente caracterizado por laderas empinadas, barrancos profundos y zonas con materiales sueltos, expone a las infraestructuras hídricas a una serie de peligros geodinámicos que se repiten en toda la región de la Macaronesia. Se recogen varios ejemplos: los canales principales de conducción norte-sur en La Palma, vulnerables al atravesar laderas de barrancos escarpadas e inestables; las captaciones y conducciones emplazadas en macizos volcánicos con riesgo de desprendimientos en El Hierro (Figura 6.5); o infraestructuras que discurren por zonas de relieve muy escarpado y geología compleja en Madeira.



Fuente: Expósito Brazier, M. (2025)

Figura 6.5. Relieve de El Hierro.

Los deslizamientos de tierra constituyen uno de los peligros más recurrentes, asociados a precipitaciones intensas, a la saturación de materiales volcánicos alterados o a la erosión de taludes (Hunt et al., 2013; Leyva et al., 2023). Los daños potenciales incluyen la rotura de tuberías, la pérdida de accesibilidad a las instalaciones, interrupciones de los procesos de tratamiento o desalinización y alteraciones del entorno hidrogeológico, con efectos sobre la recarga y la estabilidad estructural de las captaciones. Asimismo, la necesidad de disponer conducciones a lo largo de barrancos y zonas geológicamente inestables condiciona las soluciones de diseño, obligando a adoptar trazados inherentemente vulnerables y difíciles de proteger frente a eventos extremos.

Otros peligros, como los incendios forestales, las tormentas intensas o los fenómenos costeros, pueden interactuar con el relieve para amplificar los impactos sobre infraestructuras sensibles. La interacción entre estos peligros naturales y la topografía volcánica refuerza la necesidad de integrar criterios geotécnicos, hidrológicos y climáticos en la planificación de redes, reconociendo que la ubicación física de las infraestructuras condiciona en gran medida su nivel de exposición.

6.3. Rasgos comunes de resiliencia

Aunque los sistemas insulares de la Macaronesia presentan múltiples elementos de fragilidad, también muestran mecanismos de resiliencia estructural y operativa que contribuyen a amortiguar las perturbaciones y a sostener la continuidad del servicio. Estos rasgos se derivan tanto de características físico-naturales propias de los medios volcánicos como de estrategias de diseño, distribución y gestión de las infraestructuras. A continuación, se presentan los identificados patrones de resiliencia más recurrentes.

Conducciones por gravedad

Una de las ventajas recurrentes en varias islas volcánicas es la presencia de tramos de conducción que operan por gravedad, lo que reduce la dependencia energética y aporta una capa adicional de estabilidad a los sistemas. En La Palma, las redes históricas de galerías y canales permiten la conducción de agua desde zonas altas hacia áreas de consumo sin necesidad de bombeo continuo, lo que disminuye la vulnerabilidad ante interrupciones eléctricas. En El Hierro, parte de la distribución aprovecha igualmente diferencias de cota, si bien combinadas con tramos que requieren bombeo. Incluso en islas con un modelo hídrico marcado por la desalinización, como Gran Canaria, existen partes de la red donde la topografía facilita la conducción gravitatoria.

Este tipo de infraestructura constituye un pilar de resiliencia, ya que permite mantener la operatividad incluso frente a fallos de servicios, como el suministro eléctrico. Los tramos por gravedad suelen presentar, además, menores costes de operación, menor riesgo de averías asociadas a equipos mecánicos y una mayor predictibilidad en el funcionamiento. Aunque no eliminan por completo la necesidad de bombeo en muchos puntos críticos, su presencia reduce la exposición general del sistema a interrupciones externas.

Compartimentación natural de acuíferos volcánicos

Los acuíferos volcánicos se caracterizan por una compartimentación estructural derivada de la superposición de coladas, la presencia de diques y filones, y los contrastes de permeabilidad generados por los distintos episodios eruptivos. Esta configuración provoca que la recarga y el almacenamiento subterráneo se distribuyan en unidades hidrogeológicas diferenciadas, que en ocasiones responden de manera independiente a las variaciones climáticas o a la extracción (García-Gil et al., 2023; Marazuela et al., 2023).

6. Patrones comunes de vulnerabilidad y rasgos de resiliencia en islas volcánicas

Si bien esta fragmentación complica el aprovechamiento del recurso y limita la predictibilidad del sistema, también introduce formas de resiliencia natural. La compartimentación reduce la probabilidad de agotamiento simultáneo de todas las unidades y, en algunos casos, permite que sectores concretos del acuífero mantengan niveles relativamente estables incluso cuando otras zonas experimentan descensos pronunciados (Marazuela et al., 2023). En términos de gestión, esta estructura favorece la diversificación de captaciones: galerías, pozos, nacientes, que pueden operar de manera alternada según las condiciones del sistema.

Además, la separación natural entre masas de agua subterránea contribuye a limitar la propagación de contaminantes o intrusiones marinas, aunque no las elimina completamente (Gastmans et al., 2016; Möller et al., 2016). La resiliencia que aporta esta compartimentación no es total, pero sí suficiente para constituir un rasgo distintivo de los sistemas volcánicos frente a otros territorios con acuíferos más uniformes.

Redundancias operativas en los sistemas de abastecimiento

El análisis muestra que, pese a las vulnerabilidades identificadas, la mayoría de los sistemas insulares cuentan con algún grado de redundancia operativa, ya sea en forma de captaciones alternativas, rutas alternativas de conducción o instalaciones con capacidad de respaldo. En La Palma, la presencia simultánea de galerías, pozos y manantiales ofrece un margen de flexibilidad al disponer de varias captaciones que pueden alternarse según las condiciones del sistema. A ello se suman elementos operativos que refuerzan la continuidad del servicio, como estaciones de bombeo dotadas de generadores de respaldo en El Hierro o depósitos de agua potable que mantienen reservas suficientes para afrontar interrupciones temporales en el suministro. En Gran Canaria, la presencia de varias plantas desalinizadoras y redes de conducción interconectadas permite derivar caudales entre zonas cuando se producen interrupciones localizadas. En Madeira y Faial, aunque la escala es menor, también existen mecanismos que permiten redistribuir flujos o alternar captaciones según la situación operativa.

Estas redundancias no eliminan la vulnerabilidad general del sistema, pero sí reducen la probabilidad de fallo total ante perturbaciones específicas. La existencia de captaciones o conducciones alternativas permite amortiguar el impacto inicial y facilita la recuperación posterior. Este tipo de configuraciones, aun cuando surgen en parte de la necesidad de adaptarse a la orografía, constituyen uno de los elementos más efectivos de resiliencia operativa observados en el conjunto de las islas.

Proximidad entre captaciones y centros de demanda

La proximidad entre captaciones de agua y centros de demanda no se considera un rasgo exclusivo de los territorios insulares, pero en islas volcánicas adquiere un interés especial debido a dos razones: la primera es que la escala territorial puede permitir que parte del abastecimiento se organice con tramos de conducción relativamente cortos, y por otra parte, esa proximidad coexiste con condicionantes topográficos y de disponibilidad de recurso que, en determinados casos, obligan a transferencias de mayor recorrido o a impulsiones dependientes del suministro eléctrico.

Históricamente, la organización territorial de la población y de la actividad económica ha dependido de la accesibilidad al agua y de la capacidad de captación y almacenamiento del recurso (Santamarta, 2013). En términos de infraestructura, ello se traduce en la existencia de situaciones en las que oferta y demanda quedan espacialmente próximas, reduciendo la longitud de ciertas conducciones, junto con otras en las que la localización efectiva del recurso (p. ej., en cotas medias-altas) obliga a conducir caudales hacia los principales núcleos de consumo, frecuentemente ubicadas en los litorales.

En el conjunto de las islas estudiadas, cuando captación/producción y demanda se sitúan a corta distancia, la red depende de menos tramos de conducción y, por tanto, disminuye la exposición del sistema a daños o a interrupciones concentradas en conducciones largas. El interés de este patrón en islas volcánicas no reside en su existencia, sino en su contraste con tramos que necesariamente atraviesan relieves abruptos o conectan ámbitos con distinta disponibilidad de recurso.

En La Palma, numerosos núcleos agrícolas y urbanos se abastecen de captaciones situadas en su entorno, pero la asimetría norte-sur en la disponibilidad de recursos hídricos, obliga a mantener conducciones de transferencia de gran longitud que atraviesan laderas inestables, rompiendo el patrón de proximidad. En Gran Canaria, parte de la demanda de medianías puede apoyarse en nacientes, galerías, pozos y presas localizados en su entorno, mientras que en los núcleos litorales la desalinización de agua de mar se sitúa próxima a los principales centros poblados; al mismo tiempo, la existencia de recursos en cotas medias-altas y su aprovechamiento histórico implica la presencia de conducciones que conectan ámbitos interiores con demandas concentradas. En El Hierro, las captaciones subterráneas y la producción por desalinización de agua de mar se sitúan en el ámbito litoral, donde se localiza también una parte relevante de la demanda; sin embargo, la presencia de asentamientos en cotas superiores y el relieve abrupto hacen necesaria la impulsión para superar desniveles importantes.

En conjunto, la proximidad entre captaciones del agua y demanda puede reducir la dependencia de conducciones de largo recorrido y, con ello, la exposición

6. Patrones comunes de vulnerabilidad y rasgos de resiliencia en islas volcánicas

a fallos concentrados en tramos extensos. No obstante, en los sistemas insulares volcánicos este rasgo coexiste con conducciones de transferencia o tramos bombeados allí donde la localización efectiva del recurso, la topografía o los desequilibrios territoriales de disponibilidad lo imponen.

Convergencias y divergencias regionales

El análisis conjunto de los sistemas hídricos insulares incluidos en el proyecto europeo GENESIS permite identificar una serie de convergencias estructurales que explican la recurrencia de ciertos patrones de vulnerabilidad y resiliencia en territorios volcánicos (Figura 6.6). A pesar de las diferencias de escala, población, grado de urbanización y nivel de desarrollo tecnológico, las islas evaluadas comparten presiones y condicionantes que derivan directamente de su configuración geológica, su aislamiento y su dependencia de recursos locales.



Fuente: elaboración propia (2026)

Figura 6.6. Análisis DAFO de vulnerabilidad y capacidad de respuesta del sistema hídrico en las Islas Canarias.

En cuanto a las vulnerabilidades, la sobreexplotación de acuíferos, la escasez de almacenamiento superficial, la fuerte dependencia energética y la exposición a laderas inestables se manifiestan de manera reiterada. Estos factores no actúan de

forma independiente; por el contrario, tienden a reforzarse mutuamente. La limitada retención superficial incrementa la dependencia de las aguas subterráneas, lo que, combinado con la irregularidad climática, favorece descensos piezométricos y, en última instancia, procesos de intrusión marina. La necesidad de impulsar agua desde cotas bajas hacia áreas de consumo dispersas incrementa la dependencia energética del sistema y su sensibilidad a interrupciones del suministro eléctrico, en un contexto en el que buena parte de la producción se concentra en plantas desalinizadoras y captaciones costeras situadas a baja cota. Por su parte, el relieve volcánico condiciona la localización de conducciones en laderas y tramos expuestos, aumentando la vulnerabilidad frente a procesos gravitacionales, especialmente en episodios de inestabilidad de ladera asociados a precipitaciones intensas.

No obstante, el análisis comparado también evidencia diferencias significativas que modulan la intensidad y expresión de estas vulnerabilidades. En El Hierro y Gran Canaria, los sistemas combinan recursos subterráneos con un peso creciente de la desalinización del agua del mar y salobre, que ha pasado a cubrir una parte sustancial de la demanda sin sustituir por completo a las captaciones subterráneas tradicionales. En contraste, La Palma se caracteriza por un sistema basado íntegramente en captaciones subterráneas, sin contribución de la desalinización de agua de mar. La capacidad de almacenamiento superficial es muy distinta entre islas como Gran Canaria, donde existen presas históricas, y otras como El Hierro, donde el almacenamiento natural y artificial es limitado, prácticamente nulo. La estructura y distribución territorial de la población y de la demanda asociada a actividades urbanas y turísticas introducen diferencias significativas en la presión ejercida sobre los sistemas hídricos, modulando la intensidad y la expresión espacial de sus vulnerabilidades.

En cuanto a los rasgos de resiliencia, también se observan patrones comunes que dotan a los sistemas de una cierta estabilidad estructural: la existencia de conducciones por gravedad, la compartimentación natural de los acuíferos, la presencia de redundancias operativas y la cercanía entre captaciones y centros de demanda. Sin embargo, su peso relativo varía entre islas. La Palma y Gran Canaria presentan redes históricas que aprovechan diferencias de cota, mientras que en El Hierro la resiliencia depende más de la diversificación de instalaciones y la interconexión de las redes. Las islas de Madeira y Faial muestran, por su parte, un equilibrio intermedio donde la combinación de topografía y captaciones múltiples aporta estabilidad dentro de un margen operativo limitado.

En conjunto, la región muestra un equilibrio precario entre fragilidades compartidas y mecanismos de amortiguación que, aunque no eliminan la vulnerabilidad inherente, contribuyen a sostener la continuidad del servicio. La identificación de estos patrones ofrece una base sólida para diseñar estrategias de gestión

adaptadas a las características territoriales de cada isla, combinando medidas estructurales, operativas y organizativas.

6.4. Implicaciones para el análisis insular y perspectivas de aplicación

Los patrones de vulnerabilidad y resiliencia descritos en este capítulo proporcionan un marco regional que ayuda a interpretar los análisis específicos presentados en los capítulos siguientes dedicados a cada isla. El objetivo no es establecer generalizaciones rígidas, sino ofrecer una lectura comparada que permita entender por qué ciertos problemas se reproducen en territorios distintos y qué factores estructurales condicionan la respuesta de los sistemas.

Desde una perspectiva metodológica, reconocer estos patrones facilita la identificación de puntos críticos recurrentes: acuíferos sometidos a presión, tramos vulnerables a deslizamientos, instalaciones energéticas determinantes para el funcionamiento del sistema hidráulico o sectores donde la proximidad entre captación y demanda reduce la exposición general. La articulación de estos elementos en un marco común favorece un análisis de las dinámicas de fallo y de los factores que influyen en la resiliencia.

Asimismo, comprender los rasgos positivos comunes permite valorar qué elementos deberían ser preservados o reforzados en cada territorio. La existencia de tramos gravitatorios, la diversificación de captaciones, la redundancia operativa o la presencia de acuíferos compartimentados son factores que contribuyen a la estabilidad del sistema y que pueden orientar estrategias de inversión o mantenimiento. Estos rasgos no constituyen una garantía absoluta, pero sí representan ventajas comparativas que pueden potenciarse en el marco de políticas de adaptación y planificación.

Por último, este capítulo proporciona el puente conceptual entre el enfoque metodológico presentado previamente y la lectura territorial detallada que se desarrolla a partir de los próximos capítulos. La identificación de vulnerabilidades y capacidades de resiliencia comunes de la infraestructura hídrica sirve como punto de referencia para interpretar las particularidades de cada isla y para situar los resultados dentro de un contexto regional más amplio. Este marco contribuye a fundamentar propuestas de gestión que sean sensibles a las diferencias locales, pero informadas por el conocimiento acumulado en territorios volcánicos de características similares.

6.5. Referencias bibliográficas

- Baptista, J. M. de L. (2013). A água na Ilha da Madeira / Water in Madeira Island. *Vegueta. Anuario de la Facultad de Geografía e Historia*, 13, 31–42.
- Carreira, P. M., Marques, J. M., Pina, A., Mota Gomes, A., Galego Fernandes, P. A., & Monteiro Santos, F. (2010). Groundwater Assessment at Santiago Island (Cabo Verde): A Multidisciplinary Approach to a Recurring Source of Water Supply. *Water Resources Management*, 24(6), 1139–1159. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9489-z>
- Consejo Insular de Aguas de El Hierro (CIAEH). (2022). *Plan Hidrológico de El Hierro: Ciclo de Planificación 2021–2027. Memoria* (p. 777). Consejo Insular de Aguas de El Hierro.
- Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria (CIAGC). (2023). *Plan Hidrológico de Gran Canaria: Ciclo de Planificación 2021–2027. Memoria* (p. 1347). Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria (CIAGC).
- Consejo Insular de Aguas de La Palma (CIALP). (2023). *Plan Hidrológico de La Palma: Ciclo de Planificación 2021–2027. Memoria* (p. 477) [Hydrological Plan]. Cabildo de La Palma.
- Cruz, J. V., Coutinho, R., Pacheco, D., Cymbron, R., Antunes, P., Freire, P., & Mendes, S. (2011). Groundwater salinization in the Azores archipelago (Portugal). *Environmental Earth Sciences*, 62(6), 1273–1285. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0615-2>
- Custodio, E. (2020). Hidrogeología y recursos de agua subterránea en formaciones e islas volcánicas: HIRAVOL. CETAQUA Barcelona. <https://doi.org/10.5821/ebook-9788498809473>
- Freire, P. A. T. (2013). Recursos hidrominerais dos Açores: Hidrogeologia e avaliação do potencial socioeconómico [Doctoral dissertation]. Universidade dos Açores.
- García-Gil, A., Poncela Poncela, R., Skupien Balon, E., Morales González-Moro, Á., Lario-Báscones, R. J., Marazuela, M. Á., Cruz-Pérez, N., & Santamarta, J. C. (2023). Heterogeneity-Driven Hydrodynamics Conditions the Hydrochemistry of Spring Water in Volcanic Islands. *Groundwater*, 61(3), 375–388. <https://doi.org/10.1111/gwat.13249>
- Gastmans, D., Hutcheon, I., Menegário, A. A., & Chang, H. K. (2016). Geochemical evolution of groundwater in a basaltic aquifer based on chemical and stable isotopic data: Case study from the Northeastern portion of Serra Geral Aquifer, São Paulo state (Brazil). *Journal of Hydrology*, 535, 598–611. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.016>

- González González, J. J. (2013). Construcción de grandes presas en las Islas Canarias. En J. C. Santamarta Cereza (Dir. y coord. ed.), *Hidrología y recursos hídricos en las islas y terrenos volcánicos: Métodos, técnicas y experiencias en las Islas Canarias* (pp. 183–198). Colegio de Ingenieros de Montes.
- González-Morales, A., & Ramón-Ojeda, A. Á. (2019). La desalación de agua de mar en las Canarias Orientales: Los casos de Lanzarote y Fuerteventura. *Agua y Territorio / Water and Landscape*, 13, 15–26. <https://doi.org/10.17561/at.13.3722>
- Hunt, J., Wynn, R. B., Talling, P. J., & Masson, D. G. (2013). Turbidite record of frequency and source of large volume (>100 km³) Canary Island landslides in the last 1.5 Ma: Implications for landslide triggers and geohazards: Record of Canary Island Landslides. *Geochemistry*, 14(7). <https://doi.org/10.1002/ggge.20139>
- Leyva, S., Cruz-Pérez, N., Rodríguez-Martín, J., & Santamarta, J. C. (2023). Classification of Risks for Landslides in Slopes and Hillsides of Volcanic Nature in Macaronesia and Their Application to the Canary Islands. *Geosciences*, 13(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/geosciences13060155>
- Lobo de Pina, A. F. (2009). Hidroquímica e qualidade das águas subterrâneas da ilha de Santiago - Cabo Verde [Doctoral dissertation]. Universidade de Aveiro.
- Marazuela, M. Á., Baquedano, C., Cruz-Pérez, N., Martínez-León, J., Laspidou, C., Santamarta, J. C., & García-Gil, A. (2023). Dyke-impounded fresh groundwater resources in coastal and island volcanic aquifers: Learning from the Canary Islands (Spain). *Science of The Total Environment*, 899, 165638. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165638>
- Möller, P., Rosenthal, E., Inbar, N., & Magri, F. (2016). Hydrochemical considerations for identifying water from basaltic aquifers: The Israeli experience. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 5, 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.016>
- Navarro Alvargonzález, A., Fernández Uría, A., & Doblas Domínguez, J. G. (1993). *Las Aguas Subterráneas en España*. IGME.
- Poncela, R., Santamarta, J. C., García-Gil, A., Cruz-Pérez, N., Skupien, E., & García-Barba, J. (2022). Hydrogeological characterization of heterogeneous volcanic aquifers in the Canary Islands using recession analysis of deep water gallery discharge. *Journal of Hydrology*, 610, 127975. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127975>
- Rodríguez-Jiménez, E., Cruz-Pérez, N., Koritnik, J., García-Gil, A., Marazuela, M. Á., & Santamarta, J. C. (2024). Revealing the impact of wildfires on groundwater quality: Insights from Sierra de la Culebra (Spain). *Chemosphere*, 365, 143375. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143375>

- Santamarta, J. C. (2013). Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos. Métodos, técnicas y experiencias en las Islas Canarias. https://oa.upm.es/19965/1/Libro_digital_AGUAS.pdf
- Santamarta, J. C., & González González, J. J. (2012). Singularidades y evolución técnica de la ingeniería de presas en las Islas Canarias. *Revista de Obras Públicas*, 159(3530), 33–50.
- Santamarta, J. C. (2009). Singularidades sobre la construcción, planificación y gestión de las obras y recursos hídricos subterráneos en medios volcánicos: Estudio del caso en las Islas Canarias occidentales (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid.

Capítulo 7

La Palma:

captaciones subterráneas, conducciones principales y continuidad del servicio

Jelena Koritnik
Juan Carlos Santamarta Cereza
Mehdi Khoury
Iván Hernández Ríos

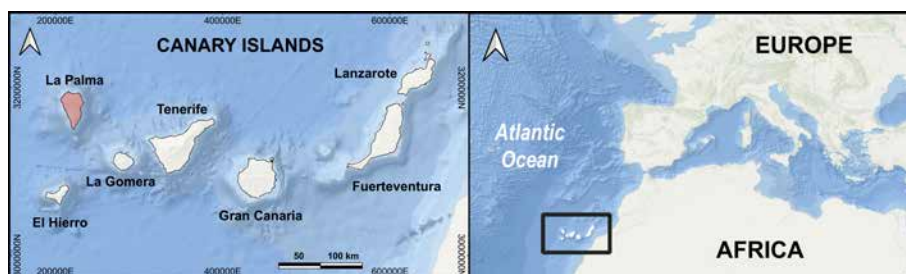
7.1. Marco físico e hidrogeológico del sistema hídrico

La Palma, la isla más noroccidental del archipiélago canario (Figura 7.1), tiene una superficie de 708 km² y una población de 85.104 habitantes (ISTAC, 2025), concentrada principalmente en las zonas costeras y en los valles centrales. La configuración hidráulica de La Palma está condicionada por un entorno físico singular, resultado de la interacción entre una topografía abrupta, una estructura volcánica interna altamente compartimentada y un régimen de recarga relativamente favorable. La isla constituye la parte emergida de un edificio volcánico que se eleva más de 6500 m desde el fondo oceánico, articulado en torno a dos grandes unidades morfoestructurales: el edificio antiguo del norte, que incluye la Caldera de Taburiente, y la dorsal activa de Cumbre Vieja, con una extensión de 21,5 km en sentido norte-sur (Carracedo, 2011). La compartimentación hidrogeológica responde a la compleja arquitectura interna del edificio volcánico, que condiciona la acumulación, la circulación y la descarga del agua subterránea, junto con el relieve insular marcado por escarpes y barrancos profundamente encajados (Poncela et al., 2022).

El clima subtropical y la marcada orografía favorecen una precipitación media anual de 628 mm, de los cuales aproximadamente el 41 % (177 hm³/año) alimenta los acuíferos de la isla (CIALP, 2023). La alternancia de coladas basálticas, depósitos piroclásticos y enjambres de diques genera una arquitectura hidrogeológica donde la permeabilidad vertical es elevada, permitiendo que la infiltración alcance con rapidez las zonas saturadas, mientras que la permeabilidad horizontal se ve interrumpida por barreras internas. En consecuencia, se generan gradientes hidráulicos pronunciados, con niveles piezométricos que alcanzan cotas superiores

a los 1800 m s. n. m., así como acuíferos confinados o semiconfinados asociados a antiguos deslizamientos masivos (Custodio, 2020).

Estas características otorgan al sistema una doble naturaleza. Por un lado, la fragmentación del acuífero limita la continuidad lateral de los flujos subterráneos y concentra la disponibilidad de recursos en determinados sectores. Por otro, esa misma compartimentación actúa como un mecanismo de resiliencia, al permitir que zonas no afectadas por presiones agrícolas, salinización o procesos volcánicos mantengan una calidad del agua elevada, apta para abastecimiento público, aun cuando otros compartimentos presentan limitaciones geológicas o geoquímicas documentadas.



Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 7.1. Localización de La Palma en el archipiélago canario y en su contexto regional.

EPSG:32628 WGS 84 / UTM 28N.

El sistema de abastecimiento que emerge de este marco físico es descentralizado y predominantemente basado en la gravedad, adaptado a la abrupta topografía y capaz de equilibrar los recursos entre zonas hidrogeológicamente dispares. La presencia de amplias zonas de recarga en las cotas elevadas, junto con la posibilidad de drenar por gravedad grandes volúmenes de agua mediante galerías, ha permitido desarrollar una infraestructura que minimiza la dependencia energética y maximiza el aprovechamiento de la recarga natural. Las demandas urbanas y agrícolas de la mitad sur de la isla se abastecen mediante una infraestructura intermunicipal de conducción hidráulica que conecta las zonas con mayor disponibilidad hídrica con las áreas deficitarias, ya sea por limitaciones de cantidad o de calidad, a través de canales, tuberías, depósitos y balsas estratégicamente situados.

El sistema hidráulico de La Palma se desarrolla en un contexto ambiental caracterizado por una elevada disponibilidad de recursos hídricos en determinadas áreas y marcados desequilibrios espaciales entre la disponibilidad, la calidad y la localización de la demanda, derivados de la complejidad geológica y geomorfológica de la isla. Este marco establece la base para comprender la organización de las infraestructuras de captación y conducción, así como las vulnerabilidades que caracterizan al sistema.

7.2. Captaciones de agua subterránea

La captación de agua en La Palma se apoya en diversas infraestructuras que incluye galerías, nacientes y pozos, integradas en un sistema que combina aportes subterráneos de distinta procedencia y de distinto comportamiento hidrogeológico.

En cuanto a las galerías, son túneles horizontales excavados en los acuíferos volcánicos con el objetivo de drenar por gravedad los compartimentos saturados, sin necesidad de bombeo en la mayor parte de las obras. Cada galería dispone de una única boca de acceso y de una configuración interna que facilita las labores de mantenimiento y ventilación. El desarrollo de las galerías de captación de agua comenzó a finales del siglo XIX, recurriendo en sus primeras etapas a la excavación manual en zonas donde la presencia de nacientes sugería la proximidad de niveles saturados (Santamarta, 2017). Con el paso del tiempo, la incorporación de explosivos permitió profundizar y prolongar su trazado, alcanzando longitudes de hasta 5-6 km en los casos más avanzados (CIALP, 2023). La producción de las galerías muestra una amplia variabilidad, desde pocos litros por segundo hasta varios cientos, determinada por la estructura volcánica que condiciona la conectividad entre compartimentos, por la recarga efectiva y por la posición de cada obra respecto a los flujos subterráneos.

Un caso particular dentro del conjunto de captaciones es el Túnel del Trasvase, inicialmente concebido como una galería transversal única, finalmente fue ejecutado con dos bocas: la Este y la Oeste, debido a la elevada magnitud de los caudales interceptados (Jiménez Sánchez et al., 2022) (Figura 7.2). Este ejemplo ilustra la alta productividad potencial de los acuíferos volcánicos de la isla y la relevancia del drenaje subterráneo como solución de aprovechamiento hidráulico.

En 2018 se contabilizaban 78 galerías activas, con un desarrollo total de 264,3 km, y en 2019 la extracción asociada a estas infraestructuras alcanzó 46,6 hm³/año. Si se consideran conjuntamente galerías y pozos de ese año, las extracciones ascendieron a un total de 66 hm³/año, equivalentes a aproximadamente el 26 % de la recarga anual de la isla (CIALP, 2023). Aunque los nacientes han perdido protagonismo desde la expansión de la red de galerías, algunos, como el de Marcos y Cordero en el norte, mantienen una aportación relevante. Los pozos, empleados mayoritariamente para riego, presentan una situación heterogénea: mientras aquellos que mantienen buena calidad continúan siendo puntos de extracción importantes, otros han sido abandonados en sectores donde la salinización, los nitratos o la contaminación de origen volcánico han deteriorado la calidad del agua.



Fuente: Santamarta, J.C. (2023)

Figura 7.2. Túnel del trasvase, ejecutado por la Dirección General de Aguas del Gobierno de Canarias, boca oeste

El sistema de captación de La Palma combina un volumen significativo de extracción con un funcionamiento predominantemente pasivo, tanto en la captación como en la conducción, basado en la interceptación gravitatoria de los flujos subterráneo y en la compartimentación hidrogeológica del edificio volcánico. Esta configuración condiciona la necesidad de articular una red de conducción intermunicipal capaz de redistribuir los recursos desde las zonas de mayor disponibilidad hacia los sectores con menor disponibilidad local o con mayores demandas.

7.3. Aprovechamientos superficiales

En La Palma, las aguas superficiales tienen un peso minoritario en el suministro (del orden del 5 % en años medios, según cómo se cierre el balance), porque su aprovechamiento es torrencial, muy variable y condicionado por la orografía de los barrancos y los arrastres sólidos. En la práctica, toda la producción superficial aprovechada se concentra en el Barranco de las Angustias, donde un sistema histórico de tomaderos (Dos Aguas, La Estrechura, La Viña y Las Casitas) deriva caudales a distintas cotas; el Tomadero de Dos Aguas (cota 420 m) es el más productivo y alimenta conducciones como el canal Dos Aguas–Los Hombres (Figura 7.3). En

7. La Palma: captaciones subterráneas, conducciones principales y continuidad del servicio

términos orientativos, el Plan Hidrológico distingue entre lo que captan los tomaderos (mezcla de escorrentía y aportes de nacientes/galerías que acaban en el cauce) y la fracción estrictamente superficial, que se estima en torno a 5 hm³/año para el conjunto de tomaderos.



Fuente: Santamarta, J.C. (2022)

Figura 7.3. Tomadero de Dos Aguas en el barranco de Las Angustias

En el noreste de la isla existen tomaderos en barrancos que derivan caudales hacia infraestructuras de almacenamiento. Un caso representativo es La Laguna de Barlovento, alimentada mediante canales desde varios tomaderos situados en barrancos del entorno (p. ej., Herradura y del Agua), con aportaciones medias del orden de 0,7 hm³/año, muy dependientes de la variabilidad climática (aproximadamente 0,5 hm³ en años secos y 1,0 hm³ en años húmedos).

7.4. Conducción y distribución: canales principales, impulsiones y redes

La conducción en alta del agua en La Palma se organiza en torno a un sistema mayoritariamente por gravedad, diseñada para desplazar los recursos desde las zonas de mayor recarga y de cotas altas, hacia sectores con menor disponibilidad local o con mayores demandas urbanas y agrícolas. Este sistema se estructura

mediante una combinación de canales abiertos (Figura 7.4), conducciones cerradas y tuberías a presión, integradas en una infraestructura de transporte hidráulico de carácter intermunicipal que permite integrar caudales procedentes de gale-rías, pozos, manantiales y embalses a lo largo de su recorrido (Figura 7.5). El sistema de conducción en alta de la isla se estructura en tres canales principales, con una función similar pero recorridos y ámbitos de servicio diferenciados:

- LP-I: discurre por la vertiente oriental y transporta caudales tanto para riego como para su transferencia hacia el sur de la isla, un ámbito donde el acuífero volcánico presenta limitaciones para la captación directa.
- LP-II: recorre la vertiente occidental, abasteciendo principalmente usos agrícolas mediante la redistribución de recursos captados en zonas con mayor disponibilidad hídrica.
- LP-III: se sitúa a cotas superiores respecto a LP-I, en la vertiente sureste, y tiene como función principal el suministro de agua de riego a áreas agrícolas situadas a mayor altitud.

Estos canales permiten la conducción intermunicipal y constituyen la base para equilibrar la disponibilidad de recursos hídricos entre zonas contrastadas. A lo largo de su trazado, los flujos provenientes de distintas captaciones se mezclan progresivamente, lo que facilita un abastecimiento continuo y una gestión integrada de los volúmenes disponibles.



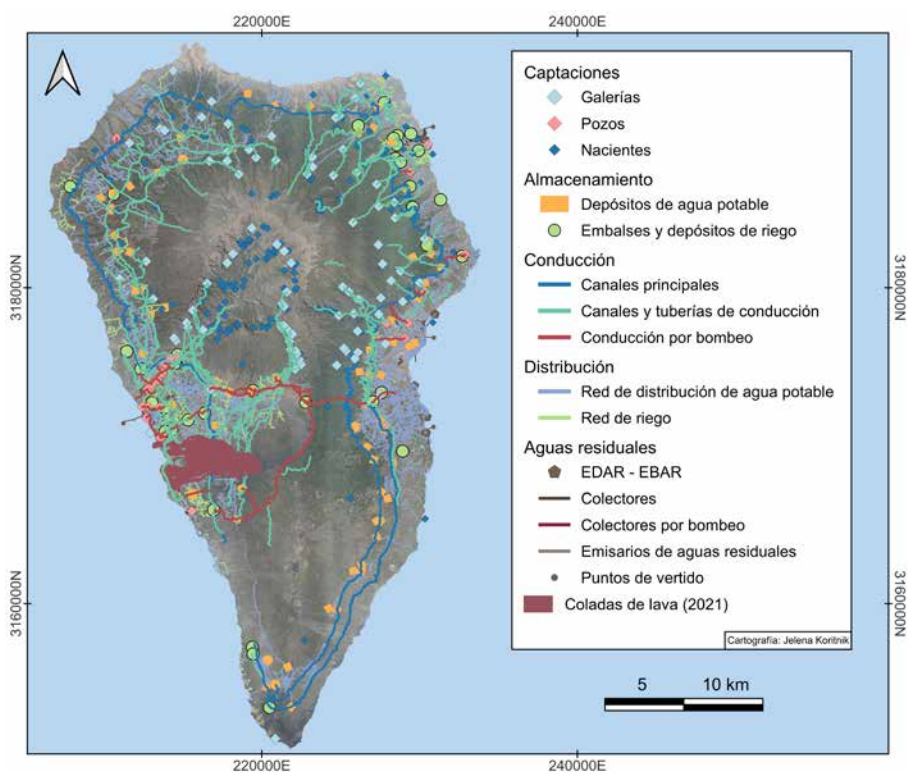
Fuente: Santamarta, J.C. (2022)

Figura 7.4. Canal en La Palma

7. La Palma: captaciones subterráneas, conducciones principales y continuidad del servicio

El sistema por gravedad se complementa con estaciones de impulsión que aseguran la transferencia del agua en aquellos tramos donde la pendiente no permite el flujo por gravedad. El principal es la estación de bombeo de Aduares, que eleva agua desde la vertiente oriental hasta Hermosilla en el oeste. Complementariamente, existen impulsiones puntuales que conectan algunos pozos costeros con los canales principales; y a su vez, existen otros puntos estratégicos de impulsión en el sistema. La relevancia operativa de la impulsión de Aduares-Hermosilla ha aumentado en los últimos años debido al descenso de los caudales en LP-III y a la necesidad de garantizar el suministro a las zonas situadas al sur de la colada del Volcán Tajogaite tras la erupción de 2021 (CILP & CIALP, 2024).

Tal como se señaló anteriormente, en la fase de conducción en alta, previa al almacenamiento, los caudales pueden circular tanto por canales abiertos como por tuberías cerradas, empleándose alguna de estas opciones según el trazado y la disponibilidad de infraestructuras en cada tramo. Estas infraestructuras pueden



Fuente: elaboración propia a partir de datos del CIALP e IDECanarias (2026)

Figura 7.5. Sistema de abastecimiento e infraestructuras hídricas de La Palma.

EPSG:32628 WGS 84 / UTM 28N.

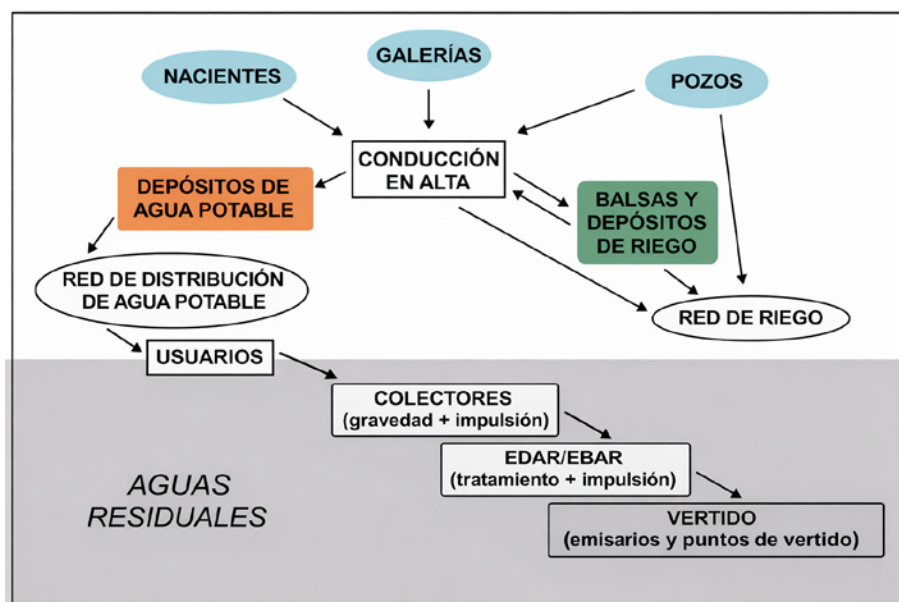
derivar caudales hacia embalses o depósitos de agua potable, en función de la organización operativa del sistema. La mayor diferenciación se produce en la distribución: las redes de consumo humano operan como sistemas independientes a partir de los depósitos de agua potable, mientras que el riego se gestiona mediante una red separada destinada a usos agrícolas. Este planteamiento permite atender simultáneamente las demandas urbanas y agrarias sin mezclar las redes de distribución.

La conducción y la distribución del agua en La Palma conforman un esquema híbrido en el que un sistema, que funciona principalmente por gravedad, se complementa con impulsiones selectivas y con una organización que integra transporte previo, almacenamiento y distribución. La mezcla progresiva de caudales en la conducción en alta previa y la posterior separación entre las redes de abastecimiento y de riego permiten redistribuir los recursos entre áreas con disponibilidades contrastadas. Esta arquitectura facilita un funcionamiento continuo del sistema, pero también concentra la dependencia en determinados tramos y nodos cuya interrupción puede comprometer la continuidad del servicio.

7.5. Factores de vulnerabilidad de la infraestructura hídrica insular

La vulnerabilidad de la infraestructura hídrica de La Palma responde a un conjunto de condicionantes ambientales y territoriales que interactúan entre sí. La distribución desigual de la precipitación y de la recarga, más elevada en las zonas de mayor altitud y en los sectores del noreste de la isla, contrasta con la localización de los núcleos de población y las principales áreas agrícolas, que se ubican en zonas con menor disponibilidad hídrica, como son las zonas centrales, litorales y sur de la isla (CIALP, 2023). Este desajuste territorial se ve intensificado por las características volcánicas del edificio. Las alineaciones de diques reducen la conectividad lateral del sistema acuífero y concentran la captación en aquellos compartimentos que presentan condiciones adecuadas de accesibilidad y calidad del agua. La necesidad de transferir volúmenes significativos desde los sectores de mayor disponibilidad hacia áreas de demanda configura un sistema en el que los corredores intermunicipales y puntos de conexión adquieren un papel estructuralmente crítico (Figura 7.6).

Las limitaciones asociadas a la calidad del agua añaden otra capa de vulnerabilidad (Jiménez Sánchez et al., 2022). En el sector sur del sistema acuífero, el desgasificado geotérmico de la erupción del volcán de La Palma, manifestado en



Fuente: elaboración propia (2026)

Figura 7.6. Esquema conceptual del modelo de la infraestructura hídrica de La Palma.

emisiones difusas de CO_2 y en un aumento de la salinidad, limita la posibilidad de aprovechamiento del recurso. Mientras, en las zonas costeras, algunos pozos empleados históricamente muestran un deterioro progresivo de la calidad por la intrusión salina. Entre el Valle de Aridane, en su sector litoral, la presión agrícola incrementa la concentración de nitratos, lo que reduce la capacidad de acuífero costero asociado para ser utilizado como fuente alternativa de abastecimiento público. Estas condiciones reducen la disponibilidad de recursos alternativos y concentran la captación en zonas de la isla que mantienen una calidad del agua más estable.

La conducción del recurso constituye un componente central de la vulnerabilidad del sistema. Este se realiza principalmente por gravedad y, aunque sea eficiente desde el punto de vista energético, depende de la integridad de los canales principales y de la continuidad de los tramos que conectan las zonas de captación con los sectores de mayor demanda. Las alteraciones de caudal en el canal LP-III y las afecciones a accesos y conducciones tras la erupción del Tajogaite en 2021 consolidaron la impulsión Aduares-Hermosilla como nodo crítico para la continuidad del suministro. La dependencia de un número reducido de nodos para mantener la conectividad aumenta el potencial de impactos sistémicos ante interrupciones locales.

Además, las características geomorfológicas de la isla introducen un factor adicional de vulnerabilidad en el sistema. Los deslizamientos y caídas de rocas son procesos recurrentes, favorecidos por la combinación de pendientes pronunciadas, barrancos profundamente incisos y materiales volcánicos poco consolidados (Leyva et al., 2023, 2024). Los tramos que atraviesan laderas inestables o discurren por taludes con escaso soporte son sensibles a estas perturbaciones, que pueden interrumpir la conducción del recurso y restringir el acceso para operaciones de mantenimiento. El impacto de una interrupción en la red depende del grado de redundancia existente en cada tramo, ya que la pérdida de un punto de paso puede aislar temporalmente a los sectores abastecidos a través de él, incluso cuando existan recursos disponibles en otras zonas de captación.

La actividad volcánica aporta un contexto adicional de exposición. La erupción de Cumbre Vieja en 2021 generó emisiones significativas de CO_2 y SO_2 , así como alteraciones hidroquímicas en ciertos sectores del sistema acuífero volcánico cercanos a la fisura eruptiva (García-Gil et al., 2023a; García-Gil et al., 2023b; Jiménez et al., 2024). Aunque las captaciones empleadas para el abastecimiento no experimentaron daños directos, la colada modificó los accesos, enterró conducciones y obligó a reorganizar el suministro en el sector suroccidental de la isla (Koritnik et al., 2025). Este episodio evidenció la sensibilidad del sistema a la pérdida de infraestructura lineal y a las restricciones temporales de movilidad operativa, incluso cuando la calidad intrínseca de las unidades de captación permanecía estable.

La ubicación de determinadas infraestructuras críticas, como instalaciones energéticas u otros activos de apoyo en zonas costeras, genera una vulnerabilidad indirecta adicional. Estas infraestructuras pueden verse afectadas durante episodios extremos, como tormentas costeras, o necesitar un mayor mantenimiento debido a sufrir una mayor corrosión. Esto puede tener repercusiones en el funcionamiento del sistema hídrico, aun cuando las conducciones principales no han sufrido daños directos. Esta interdependencia refuerza la importancia de considerar el emplazamiento de activos críticos en el análisis de vulnerabilidad insular.

Las vulnerabilidades descritas surgen de la interacción entre condicionantes hidrogeológicos, limitaciones en la calidad del agua, dependencias estructurales y la exposición espacialmente diferenciada a procesos naturales y volcánicos. La continuidad del abastecimiento requiere preservar los sectores de captación de mayor calidad, mantener operativos los corredores que equilibran la asimetría norte-sur en la disponibilidad del recurso hídrico y gestionar de manera integrada los riesgos geomorfológicos, volcánicos y costeros que caracterizan el territorio insular.

7.6. Modelo de fallos en cascada: estructura y criterios

El modelo de fallos en cascada desarrollado para La Palma permite representar, de forma integrada, las interdependencias entre los servicios críticos del territorio y los mecanismos mediante los cuales una perturbación localizada puede propagarse a lo largo de la red insular. Se trata de un software de simulación capaz de capturar tanto la complejidad de la infraestructura física como la lógica funcional que vincula energía, agua, transporte, comunicaciones, actividades productivas y gestión ambiental (Santamarta et al., 2026).

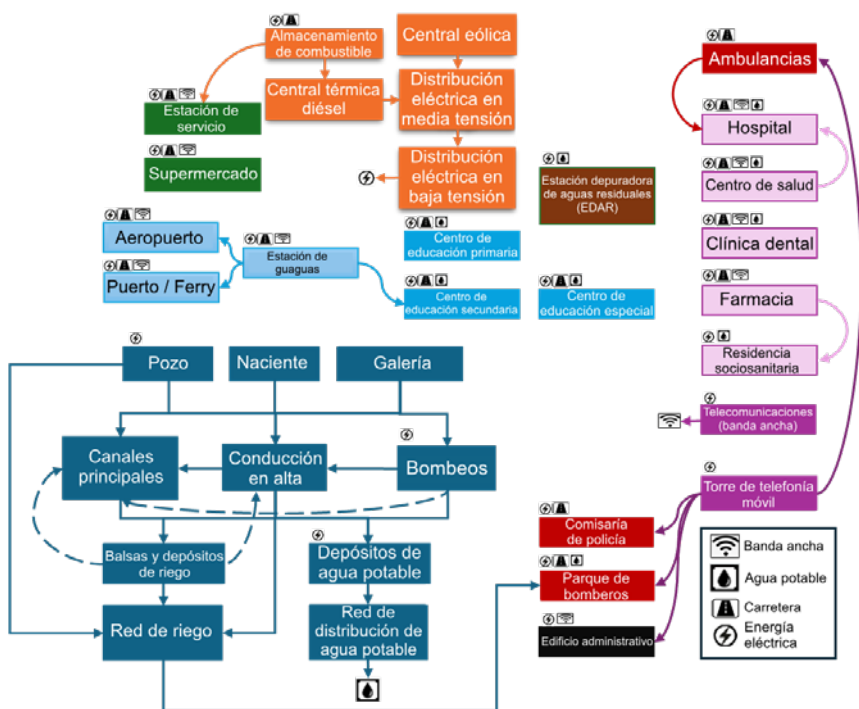
Con un total de 2454 nodos, el modelo incorpora 37 tipos de servicios críticos interdependientes, representativos de los principales dominios funcionales del sistema insular. En particular, se representan los sectores de energía y agua a lo largo de sus fases de generación o captación, conducción, almacenamiento y suministro, así como sus interacciones con el riego, el transporte y otros servicios esenciales que dependen de ellos (Figura 7.7). La escala y heterogeneidad del sistema permiten evaluar la forma en que un fallo localizado puede derivar en disrupciones sucesivas, afectando no solo a la capacidad operativa de un sector concreto, sino también a los nodos que dependen directa o indirectamente de él. En el dominio agrario, el modelo integra aproximadamente 51.450 parcelas, lo que permite cuantificar el efecto de la pérdida de funcionalidad sobre la superficie cultivada y sobre los sectores agrícolas dependientes del agua distribuida por las principales conducciones.

Desde el punto de vista energético, el modelo reproduce la configuración actual del sistema insular. La elevada dependencia de la generación eléctrica mediante grupos electrógenos diésel (90 %) se incorpora explícitamente al modelo, mediante la asignación de elevados pesos de criticidad a los nodos de suministro diésel de la red de distribución en media tensión. La contribución renovable, que representa únicamente un 10 % de la energía insular, también se integra en los pesos de entrada de los nodos eléctricos. Así, los flujos procedentes de nodos renovables y diésel reciben pesos relativos de 0,10 y 0,90; respectivamente. Esta ponderación refleja el orden de magnitud de la dependencia energética del sistema y condiciona la forma en que un fallo en el sistema eléctrico puede afectar a los servicios que requieren alimentación continua.

En cuanto a la modelización del agua, se incluyen 12 tipos de nodos críticos, considerando la infraestructura de abastecimiento y la de riego. La criticidad de los nodos vinculados a los embalses de riego y, de forma equivalente, a los canales de transporte principales y conducciones secundarias, se determina en función del ámbito hidrológico en el que se encuentran. En el caso de La Palma, esta lógica territorial permite reflejar el carácter estructuralmente crítico de los tres canales

principales (LP-I, LP-II y LP-III), de cuya funcionalidad depende la redistribución insular del recurso. La separación operativa entre las redes finales de agua potable y las de riego queda igualmente representada mediante rutas independientes de distribución, evitando solapamientos en los tramos terminales de servicio y permitiendo identificar de forma diferenciada los puntos vulnerables de cada subsector.

Estas interacciones se integran en el modelo mediante una red de dependencias funcionales que vincula los 37 tipos de nodos, definiendo para cada infraestructura un umbral operativo condicionado por los servicios de los que depende. A partir de esta estructura es posible identificar nodos clave, cuellos de botella y mecanismos de propagación de fallos, que sustentan los escenarios examinados a continuación.



Fuente: elaboración propia (2026)

Figura 7.7. Esquema simplificado de dependencias funcionales entre los nodos de infraestructura crítica en La Palma.

7.7. Resultados de los escenarios de simulación

Los escenarios de las simulaciones permiten evaluar cómo distintos fenómenos naturales pueden desencadenar perturbaciones prolongadas en los servicios críticos.

7. La Palma: captaciones subterráneas, conducciones principales y continuidad del servicio

cos de La Palma a través de rutas de propagación no evidentes a simple vista. La estructura del modelo, descrita en el apartado anterior, hace posible cuantificar no solo el daño directo producido por un evento localizado, sino también los efectos indirectos asociados a la pérdida de servicios esenciales cuya interrupción repercute sobre otros sectores dependientes. A continuación, se sintetizan los resultados de una selección de escenarios, presentados con el objetivo de ilustrar distintas posibilidades de análisis del modelo.

Inundación costera en Breña Alta, Breña Baja y Santa Cruz de La Palma

Este escenario simula una inundación que afecta al área costera de Breña Alta, Breña Baja y Santa Cruz de La Palma (Figura 7.8). La relevancia de este experimento radica en que los depósitos de combustible asociados al sistema de generación diésel, responsables del 90 % de la energía que abastece a la isla, se encuentran



Fuente: elaboración propia (2025)

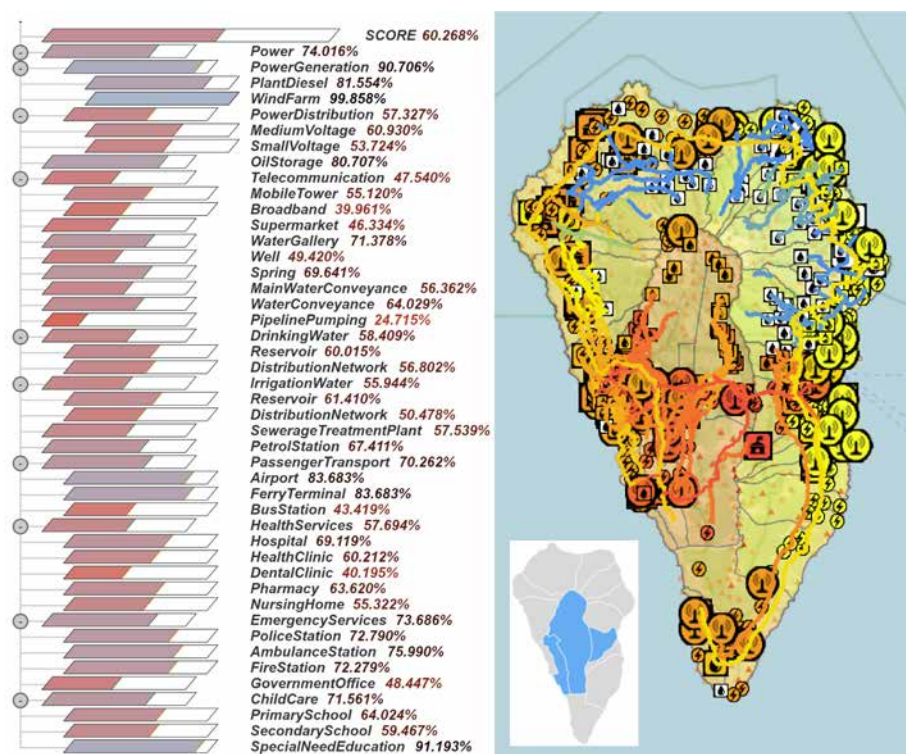
Figura 7.8. Comparación de los efectos simulados de una inundación costera en Breña Alta, Breña Baja y Santa Cruz de La Palma: escenario sin protección de los 19 tanques de combustible críticos (izquierda) y escenario con protección frente a daños por inundación (derecha).

concentrados en estos municipios. La afección directa a estos tanques desencadena un conjunto de fallos interdependientes que se propagan más allá del ámbito litoral inicial, comprometiendo servicios clave para el funcionamiento del territorio.

El experimento incorpora además una variante donde se protegen 19 tanques de combustible críticos frente a la inundación. La comparación entre ambos escenarios permite evaluar el efecto de medidas preventivas sobre nodos de alta centralidad, mostrando que la protección selectiva de infraestructuras críticas reduce la propagación del fallo y la degradación funcional de otros servicios principales (Figura 7.8).

Incendios forestales bajo condiciones climáticas del proyecto GENESIS proyectadas para 2100

El segundo experimento analiza los mecanismos de propagación de los impactos derivados de incendios forestales que se han simulado en El Paso, Breña Alta y Los Llanos de Aridane para el año 2100 (Figura 7.9).



Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 7.9. Incendios forestales simulados, con representación de la integridad de los servicios críticos y de las infraestructuras afectadas más allá del área directamente impactada.

7. La Palma: captaciones subterráneas, conducciones principales y continuidad del servicio

Como se indicó previamente, este escenario permite la incorporación de proyecciones climáticas para el año 2100, incluyendo alertas de viento y de altas temperaturas, que incrementan en un 1 % el daño acumulado en cada nodo ya afectado. Esta combinación reproduce condiciones futuras en las que episodios de calor y viento pueden amplificar la vulnerabilidad de la infraestructura insular.

Los resultados muestran que, aunque el daño directo se concentra en las zonas de incendio, las perturbaciones se propagan a través de la red, afectando a sectores alejados del área inicialmente impactada (Figura 7.9). La representación conjunta de la integridad por servicio y de las infraestructuras afectadas permite visualizar esta propagación en cascada y la magnitud de los efectos indirectos.

Erupción volcánica de escala insular

El tercer experimento analiza el comportamiento del sistema ante un escenario de erupción volcánica de escala insular. El modelo diferencia entre daños directos, asociados a la afectación física de nodos localizados en áreas expuestas a la actividad eruptiva, y daños indirectos, derivados de la interrupción de servicios esenciales, en particular del riego, cuya pérdida tiene repercusiones relevantes sobre otros componentes del sistema.

Se ha evaluado la afectación que podría tener este escenario en el sector agrario (Figura 7.10). Los resultados muestran que los daños indirectos, asociados principalmente a la interrupción del servicio de riego, multiplican la superficie afectada respecto al daño directo inicial. Este comportamiento es característico de sistemas en los que el componente hídrico posee un papel estructural en la sostenibilidad agrícola.

Crop Type ↑↓	Area (m²) ↓↑	Starting integrity ↑↓	Integrity after cascading failure ↑↓
Platanera	26,761,245	50.2%	22.1%
Aguacate	10,872,876	49.8%	21.2%
Viña	8,792,181	42.9%	18.5%
Barbecho	4,443,153	44.9%	21.8%
Huerta Limpia	2,398,780	47.4%	21.6%
Almendro	1,716,105	50.9%	24.0%
Citricos	1,554,240	45.4%	20.4%
Tagasaste	1,549,673	48.5%	18.8%
Templado Otras Mezclas	1,390,610	49.0%	22.9%
Papa	1,023,718	47.0%	21.5%
Hortaliza Otras Mezclas	853,273	49.2%	20.6%
Subtropicales Otras Mezclas	811,345	52.6%	22.3%
Mango	562,924	54.0%	20.6%
Templado Pepita	341,677	55.5%	25.0%
Huerto Familiar	302,971	51.1%	21.3%

Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 7.10. Efectos simulados de una erupción volcánica insular sobre los cultivos: comparación entre daños directos y daños indirectos derivados de la pérdida del servicio de riego.

La dimensión social del impacto se analiza mediante la estimación del número de personas vulnerables, que incluye a la población menor de 5 años y a la mayor de 85, expuestas a la pérdida de servicios críticos. La interrupción acumulada de servicios esenciales amplifica el riesgo para estos grupos, que dependen de manera más intensa del acceso continuo a infraestructuras sanitarias, energéticas y de abastecimiento (Figura 7.11).

Service	People Facing 10-50% Service Loss	People Facing (+50%) Service Loss
Pharmacies	3537 (4.2%)	2803 (3.4%)
Hospitals	1533 (1.8%)	4807 (5.8%)
Health Clinics	3473 (4.2%)	2867 (3.4%)
Dental Practices	802 (1.0%)	5538 (6.6%)
Bus Transport	6340 (7.6%)	0 (0.0%)
Mobile Telecommunication	2526 (3.0%)	3814 (4.6%)
Clean Water	412 (0.5%)	5928 (7.1%)
Power	3209 (3.8%)	3131 (3.8%)

Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 7.11. Población vulnerable (menor de 5 años o mayor de 85) expuesta a pérdidas de servicios críticos en un escenario de erupción volcánica insular.

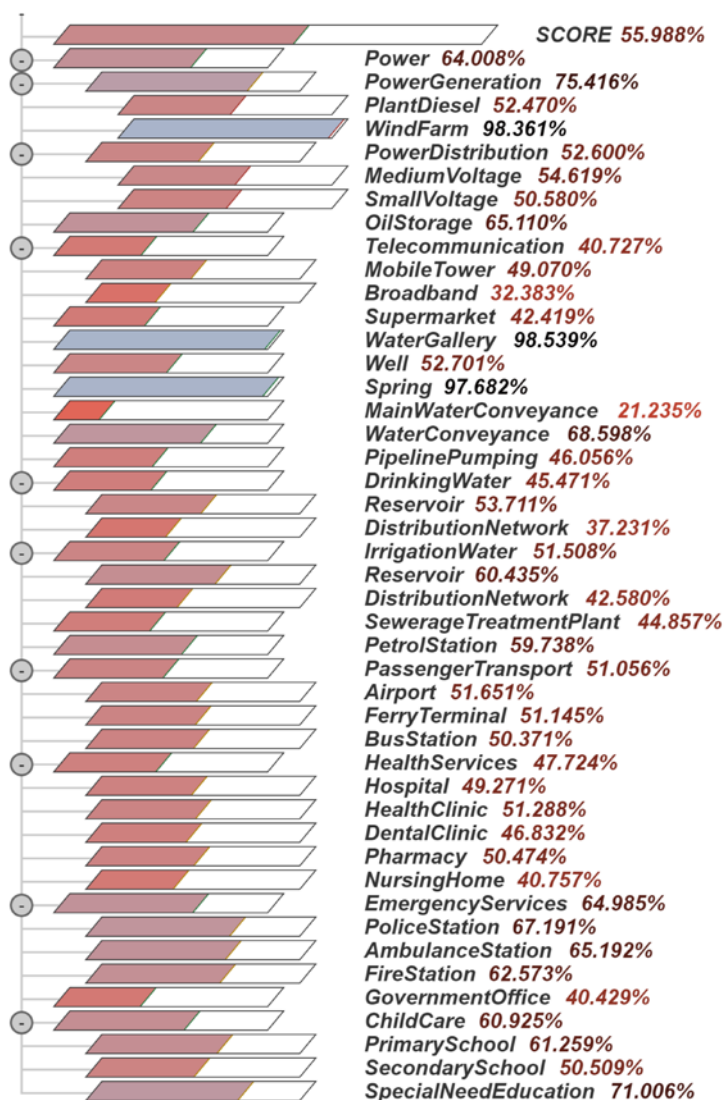
Finalmente, el análisis de los porcentajes de integridad funcional permite evaluar el grado de disrupción en cada uno de los 37 tipos de servicios críticos del modelo. La degradación simultánea de varios sectores refleja la naturaleza sistémica del impacto y la dependencia mutua entre componentes clave del territorio (Figura 7.12).

7.8. Síntesis operativa y conclusiones

El sistema hídrico de La Palma se articula en torno a una red descentralizada y mayoritariamente por gravedad, que integra galerías, pozos, nacientes, canales de conducción intermunicipal, redes de distribución, depósitos de agua potable con cloración y depósitos y embalses de riego. Esta estructura, adaptada al relieve pronunciado y a la compartimentación propia del edificio volcánico, permite equilibrar recursos entre zonas con condiciones hidrogeológicas contrastadas y sostener el abastecimiento urbano y agrícola.

A pesar de la recarga favorable y de la generalmente buena calidad del agua, persisten limitaciones que condicionan el funcionamiento del sistema (Poncela et al., 2022). La presencia de CO₂ difuso en los sectores meridionales, los incremen-

7. La Palma: captaciones subterráneas, conducciones principales y continuidad del servicio



Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 7.12. Porcentajes de integridad funcional de los servicios críticos simulados en un escenario de erupción volcánica de escala insular.

tos de salinidad en pozos costeros y las concentraciones elevadas de nitratos en el acuífero costero del Valle de Aridane restringen la viabilidad de explotar captaciones locales en determinadas áreas (Jiménez Sánchez et al., 2022). Este mosaico geológico y geoquímico obliga a recurrir a transferencias de agua desde compartimentos no afectados, reforzando el papel de los corredores intermunicipales como infraestructura estructural del sistema.

La compartimentación hidrogeológica, resultado de alineaciones de diques y variaciones en la permeabilidad, funciona simultáneamente como fuente de heterogeneidad y como mecanismo de resiliencia, ya que la existencia de múltiples unidades de captación favorece la redundancia operativa. A ello se suma la capacidad de almacenamiento en depósitos de agua potable, que asegura varios días de autonomía, así como la presencia de embalses de riego que aportan flexibilidad adicional en la gestión de la demanda agrícola.

No obstante, varios factores introducen vulnerabilidades significativas. Las infraestructuras situadas en laderas inestables o próximas a barrancos presentan una exposición elevada a deslizamientos y caídas de rocas. La actividad volcánica, como evidenció la erupción de 2021, puede modificar accesos, comprometer tramos de conducción y generar alteraciones hidroquímicas locales. La dependencia de un número limitado de nodos críticos para mantener la conectividad incrementa el riesgo de efectos sistémicos cuando se produce la pérdida de un punto de paso. A estos condicionantes se suma la ubicación costera de ciertos servicios energéticos, cuya afección puede propagarse al conjunto del sistema hídrico aun cuando las infraestructuras principales permanezcan intactas.

El análisis espacial integrado con el modelo de fallos en cascada permitió identificar cómo estos factores se traducen en patrones de disrupción a escala insular. En el escenario de inundación costera, el daño a los tanques de combustible asociados a la generación diésel, responsable del 90 % de la electricidad insular, desencadenó propagaciones amplias, mientras que la protección de 19 depósitos críticos redujo de forma sustancial la disrupción del servicio. En el escenario de incendios forestales, las alertas de viento y temperatura proyectadas para 2100 amplificaron los daños indirectos, con impactos que se extendieron más allá de las áreas directamente afectadas. En el escenario eruptivo insular, la pérdida del servicio de riego incrementó de manera notable el daño indirecto sobre los cultivos, y generó una disminución generalizada de la integridad funcional de los servicios críticos, con repercusiones especiales sobre los grupos poblacionales más vulnerables.

En síntesis, la organización del sistema hídrico de La Palma combina infraestructuras adaptadas al terreno, redundancia hidrogeológica y una conducción intermunicipal capaz de sostener tanto el abastecimiento como las elevadas demandas de riego de la isla. Sin embargo, esta arquitectura sigue expuesta a riesgos multiamenaza, a la dependencia mutua entre servicios esenciales y a presiones sectoriales que pueden amplificar la disrupción durante episodios extremos. El análisis integrado confirma que la continuidad del abastecimiento requiere salvar las zonas de captación de mayor calidad, reforzar la protección de nodos críticos, incorporar criterios de peligrosidad en la planificación operativa y consolidar una coordinación más estrecha entre servicios interdependientes.

7.9. Referencias bibliográficas

- Cabildo Insular de La Palma (CILP) (2025). *Consejo Insular de Aguas de La Palma* (CIALP). <https://lapalmaaguas.com/>
- Cabildo Insular de La Palma (CILP), & Consejo Insular de Aguas de La Palma (CIALP). (2024). Convocatoria de primera sesión de la mesa de la sequía de la isla de la palma. Año 2024: Análisis de la situación actual y propuesta de actuaciones en el sistema hidráulico insular para hacer frente a escenarios de dificultad en el suministro de agua a los diversos usos demandantes. <https://lapalmaaguas.com/wp-content/uploads/2024/02/240219-informe-mesa-sequia.pdf>
- Carracedo, J. C. (2011). Geología de Canarias I: Origen, evolución, edad y volcanismo. Editorial Rueda.
- Consejo Insular de Aguas de La Palma (CIALP). (2023). *Plan Hidrológico de La Palma: Ciclo de Planificación 2021–2027. Memoria* (p. 477). Cabildo de La Palma.
- Custodio, E. (2020). Hidrogeología y recursos de agua subterránea en formaciones e islas volcánicas: HIRAVOL. CETAQUA Barcelona. <https://doi.org/10.5821/ebook-9788498809473>
- García-Gil, A., Jiménez, J., Gasco Caveró, S., Marazuela, M. Á., Baquedano, C., Martínez-León, J., Cruz-Pérez, N., Laspidou, C., & Santamarta, J. C. (2023). Effects of the 2021 La Palma volcanic eruption on groundwater resources (part II): Hydrochemical impacts. *Groundwater for Sustainable Development*, 23, 100992. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100992>
- García-Gil, A., Jiménez, J., Marazuela, M. Á., Baquedano, C., Martínez-León, J., Cruz-Pérez, N., Laspidou, C., & Santamarta, J. C. (2023). Effects of the 2021 La Palma volcanic eruption on groundwater resources (part I): Hydraulic impacts. *Groundwater for Sustainable Development*, 23, 100989. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100989>
- Gobierno de Canarias. (2025). *Infraestructura de Datos Espaciales de Canarias (IDECanarias)*. IDECanarias. <https://www.idecanarias.es/content/idecanarias>
- Jiménez, J., Gasco Caveró, S., Marazuela, M. Á., Baquedano, C., Laspidou, C., Santamarta, J. C., & García-Gil, A. (2024). Effects of the 2021 La Palma volcanic eruption on groundwater hydrochemistry: Geochemical modelling of endogenous CO₂ release to surface reservoirs, water-rock interaction and influence of thermal and seawater. *Science of The Total Environment*, 929, 172594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172594>
- Jiménez Sánchez, J., Meléndez Asensio, M. L., Peinado Parra, T., Fernández Jurado, M. de los Á., Mejías Moreno, M., Marrero Díaz, R., Ballesteros Navarro,

- B. J., & Camuñas Palencia, C. (2022). *Memoria final del contrato de apoyo tecnológico al Consejo Insular de Aguas de La Palma para la valoración de la posible afección del volcán de Tajogaite a las masas de agua subterránea de la demarcación hidrográfica de La Palma* (p. 237). Instituto Geológico y Minero de España (IGME); Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC); Ministerio de Ciencia e Innovación; Consejo Insular de Aguas de La Palma.
- Koritnik, J., Cruz-Pérez, N., García-Gil, A., & Santamarta, J. C. (2025). Impacts of the 2021 La Palma volcanic eruption on drinking water quality (Canary Islands, Spain). *Natural Hazards*, 121(18), 22151–22182. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07682-6>
- Leyva, S., Cruz-Pérez, N., Rodríguez-Martín, J., & Santamarta, J. C. (2023). Classification of Risks for Landslides in Slopes and Hillsides of Volcanic Nature in Macaronesia and Their Application to the Canary Islands. *Geosciences*, 13(6), 6. <https://doi.org/10.3390/geosciences13060155>
- Leyva, S., Cruz-Pérez, N., & Santamarta, J. C. (2024). Refinement of the volcanic slope rating approach for determining slope stability in volcanic rocks of the Canary Islands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(15), 5133–5145. <https://doi.org/10.1002/esp.6022>
- Poncela, R., Santamarta, J. C., García-Gil, A., Cruz-Pérez, N., Skupien, E., & García-Barba, J. (2022). Hydrogeological characterization of heterogeneous volcanic aquifers in the Canary Islands using recession analysis of deep water gallery discharge. *Journal of Hydrology*, 610, 127975. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127975>
- Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Koritnik, J., & Khoury, M. (2026). GENESIS–La Palma platform for cascading-failure simulation in water systems and critical infrastructures [Application software]. Universidad de La Laguna. https://doi.org/10.25145/o.GENESIS_Palma.2025
- Santamarta Cerezal, J. C. (2017). Tratado de minería de recursos hídricos en islas volcánicas oceánicas. Colegio Oficial de Ingenieros de Minas del Sur de España. <https://oa.upm.es/47880/>

Capítulo 8

Gran Canaria: obras hidráulicas, desalinización, regeneración de aguas y fallos en cascada

Megan Expósito Brazier

Jelena Koritnik

Mehdi Khoury

Noelia Cruz Pérez

Juan Carlos Santamarta Cerezal

8.1. Contexto climático, hidrogeológico y marco general

Gran Canaria es la tercera isla más grande en extensión del archipiélago canario, con una superficie aproximada de 1560 km² y una altitud máxima de 1956 m s. n. m. en el Morro de la Agujereada (Figura 8.1). Es además la segunda isla más poblada, después de Tenerife, ascendiendo a 870.608 habitantes en 2025, un 40 % de la población total del archipiélago (INE, 2025). Su relevancia demográfica se ve reforzada por su condición de ser uno de los principales destinos turísticos de España, con más de 4,7 millones de visitantes registrados en 2024 (Turismo de Gran Canaria, 2024).



Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 8.1. Localización de Gran Canaria en el archipiélago canario y en su contexto regional.
EPSG: 32628 WGS 84 / UTM 28N.

La estructura socioeconómica insular está fuertemente condicionada por el turismo, especialmente en los espacios litorales, lo que incrementa la presión sobre los recursos en estas zonas. La agricultura también tiene cierto peso económico, aunque ha disminuido progresivamente. Esta actividad sigue desempeñando un papel relevante en las áreas rurales, principalmente en las llanuras bajas y en sectores costeros, donde predominan cultivos de regadío como el plátano, el tomate y la papa (CIAGC, 2023).

El clima de Gran Canaria está determinado por su proximidad al ambiente árido sahariano y por la acción moderadora de los vientos alisios. Estos vientos, junto al relieve de la isla, generan un aporte heterogéneo de precipitaciones, favorece una mayor precipitación en las vertientes septentrionales, mientras que las zonas meridionales permanecen áridas (Custodio et al., 2016). Debido a esto, la precipitación media anual presenta una elevada variabilidad altitudinal y espacial, con valores de 100 mm en la zona litoral del sur y registros que pueden alcanzar los 1000 mm en cotas intermedias expuestas a los vientos alisios, condicionando de forma directa los procesos de recarga y la disponibilidad de agua subterránea (Custodio et al., 2016).

En cuanto a las temperaturas, estas se mantienen templadas durante todo el año en las zonas costeras, mientras que en las cumbres se registran descensos térmicos significativos, sobre todo en los meses más fríos, donde puede nevar ocasionalmente (Custodio et al., 2016). Debido a su cercanía con el continente africano, la isla se ve afectada con frecuencia por intrusiones de polvo sahariano, conocidas como calima. Estos episodios depositan cantidades significativas de silicatos, cuarzo y carbonatos sobre los suelos, influyendo de manera apreciable en los procesos edáficos y en la hidrogeoquímica insular (Custodio, 2020).

Gran Canaria se formó a partir de una prolongada actividad volcánica iniciada en el Mioceno Medio, hace aproximadamente 14 millones de años, que incluyó múltiples fases constructivas alternadas con intensos procesos erosivos. Esta evolución dio lugar a una estructura volcánica compleja e intensamente erosionada, caracterizada por una red de profundos barrancos de disposición radial y por la preservación de superficies volcánicas originales en áreas no afectadas por grandes deslizamientos.

La actividad volcánica alcanzó su máximo entre hace 10 y 4 millones de años, aunque se han registrado erupciones de menor entidad hasta hace unos 2000 años (Custodio, 2020). Estos procesos generaron una gran heterogeneidad estratigráfica, con la superposición de unidades volcánicas de distinta permeabilidad que condicionan el flujo subterráneo. Esta arquitectura geológica favorece la formación de acuíferos colgados en zonas elevadas, frecuentemente separados del acuífero principal por decenas o incluso cientos de metros (García-Gil et al., 2023).

Esta complejidad hidrogeológica del sistema se ve asimismo agravada por la baja infiltración de las precipitaciones. Estimaciones históricas indican que, para una precipitación media anual del orden de 300 mm, aproximadamente el 65 % se pierde por evapotranspiración, el 16 % por escorrentía superficial y en torno al 19 % contribuye a la recarga subterránea (Cabrera & Custodio, 2013; Custodio, 2020). La mayoría de los suelos de la isla presentan permeabilidades moderadas a elevadas, favoreciendo la infiltración en los acuíferos. Sin embargo, algunas zonas costeras están afectadas por riesgos locales de intrusión marina asociados a la sobreexplotación de las aguas subterráneas (Custodio, 2020).

Para luchar contra la escasez hídrica, la isla ha desarrollado una extensa y diversa red de infraestructuras para asegurar el suministro urbano, agrícola y energético. Este sistema combina históricamente la explotación de aguas subterráneas con la integración de recursos no convencionales (desalinización y regeneración de aguas), junto con una vasta red de presas y balsas.

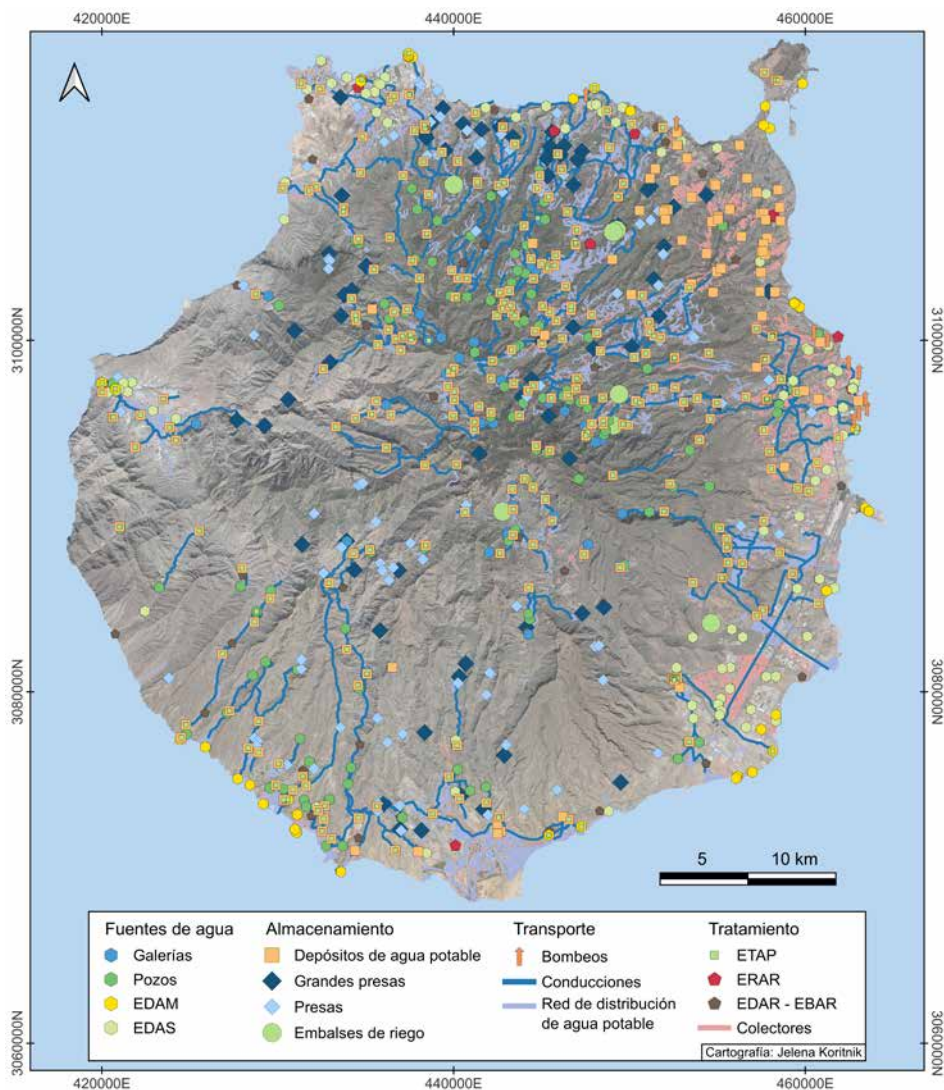
8.2. La evolución de las captaciones hídricas: del agua subterránea a la no convencional

Tradicionalmente, el suministro de agua en Gran Canaria se basó en la explotación de agua subterránea, extraída a través de una densa red de pozos y galerías horizontales. Sin embargo, décadas de extracción intensiva generaron una sobreexplotación histórica de los acuíferos. Esta presión ha provocado una amenaza persistente de salinización de los acuíferos costeros.

El sistema de abastecimiento de Gran Canaria refleja siglos de adaptación a una pluviometría escasa e irregular. Desde la conquista, la isla ha desarrollado una red hidráulica extensa y diversa, que incluye presas, embalses, estanques, pozos, galerías, acueductos, conducciones, túneles de trasvase, plantas desalinizadoras y estaciones de tratamiento (CIAGC, 2023) (Figura 8.2). Estas infraestructuras buscan garantizar el suministro urbano, agrícola e industrial, combinando la extracción de aguas subterráneas, el almacenamiento superficial y, más recientemente, recursos no convencionales para atender demandas crecientes y diversificadas.

El agua subterránea ha sido históricamente el pilar del sistema insular. Aproximadamente 15.000 hectáreas de regadío dependen casi por completo de este recurso (Cabrera & Custodio, 2013; Custodio, 2020). La extracción se realiza principalmente mediante pozos y galerías horizontales que captan acuíferos elevados por diques volcánicos, en coherencia con la estructura geológica de la isla. Estos sistemas integran ingeniería forestal, prácticas históricas y estrategias de

manejo de tierras semiáridas orientadas a optimizar la disponibilidad de agua para la agricultura (Santamarta et al., 2014). Sin embargo, el uso intensivo ha reducido las reservas en torno a 2 km³ (Custodio, 2020).



Fuente: elaboración propia a partir de datos CIAGC e IDECanarias (2026)

Figura 8.2. Sistema de abastecimiento e infraestructuras hídricas de Gran Canaria.

EPSG:32628 WGS84 / UTM 28N

A partir de la década de 1960, el aumento de la demanda del agua subterránea, asociado al desarrollo agrícola, la expansión urbana, el turismo y la industria,

8. Gran Canaria: obras hidráulicas, desalinización, regeneración de aguas y fallos en cascada

condujo a una sobreexplotación que provocó descensos significativos en los niveles piezométricos, especialmente en zonas costeras con mayor riesgo de intrusión marina (Custodio, 2020; Hernández Ríos et al., 2023). En 1997 existían 1337 puntos de captación en uso, cifra que descendió a 805 en 2010, de un total registrado de unos 3640. En 2015, la extracción subterránea rondaba los 50 hm³ anuales, con aportaciones menores de manantiales. Con el tiempo, la proporción de recursos renovables en la extracción total ha aumentado, aunque a finales de los años noventa más de la mitad de las reservas evaluadas (2125 hm³) habían sido consumidas (Custodio, 2020).

Para compensar el déficit hídrico y la sobreexplotación del acuífero, la isla ha incrementado drásticamente el uso de recursos hídricos no convencionales, siendo la desalinización de agua de mar la solución principal para el suministro urbano. La regeneración de aguas es otro pilar fundamental que proporciona un alto nivel de resiliencia climática frente a la sequía, especialmente para el sector agrícola.

La evolución de la desalinización

En cuanto a las fuentes no convencionales, la desalinización se ha convertido en un componente clave de la estrategia hídrica insular, apoyando los objetivos del Plan Hidrológico de incrementar los recursos urbanos, mejorar la eficiencia de las redes, reducir pérdidas y consumos no facturados y asegurar un suministro fiable (CIAGC, 2023).

Esta infraestructura ha crecido de forma sostenida en Gran Canaria, con instalaciones frecuentemente agrupadas en «complejos desalinizadores» que reúnen varias plantas en un mismo emplazamiento. Estos complejos integran instalaciones pertenecientes a distintas entidades, con tecnologías diversas y orientadas a distintos usos. La primera planta desalinizadora de la isla se instaló en 1970 para abastecer a la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria, con una capacidad inicial de 18.000 m³/día. Desde entonces, la capacidad conjunta de las plantas que abastecen la isla ha aumentado hasta 229.184 m³/día (CIAGC, 2023).

En la actualidad, Gran Canaria cuenta con 17 plantas desalinizadoras registradas, organizadas en complejos situados en zonas costeras y urbanas estratégicas. Estas plantas producen agua para abastecimiento urbano, agricultura, industria y turismo. Aunque las cifras de consumo son difíciles de precisar debido a la complejidad del mercado, estimaciones de 2006 indican el siguiente reparto: 48,6 hm³/año para abastecimiento urbano (68 %), 10 hm³/año para turismo (10 %), 7,3 hm³/año para agricultura (10 %), 5 hm³/año para industria (7 %) y volúmenes marginales para usos recreativos (CIAGC, 2023).

El papel de las presas y las balsas

Debido a las escasas precipitaciones, los recursos superficiales son limitados. El uso de aguas superficiales depende de los caudales estacionales de los barrancos, captados mediante presas, tomas de tubería o embalses artificiales (Santamarta et al., 2014).

Gran Canaria concentra un número excepcional de grandes presas para su superficie; al menos 65 superan los 15 m (Santamarta Cerezal & González González, 2012), y existe un conjunto adicional cuya cifra varía según el criterio de clasificación y el inventario considerado. Estas están destinadas a retener caudales en barrancos con una altura superior a 15 metros o una capacidad mayor de 100.000 m³.

El mayor número de presas (88,5 %) se encuentra en los municipios de Artenara, Tejeda, Mogán, San Bartolomé de Tirajana y Santa Lucía, mientras que el 11,5 % restante se encuentran ubicadas en el norte, donde la permeabilidad del terreno y los patrones de precipitación difieren. Esta diferencia es debida a que en el norte los suelos son más permeables, y la función de las presas ahí es regular escorrentías para uso agrícola, mientras que en el sur a pesar de tener menor precipitación, aprovechan terrenos de baja permeabilidad para lograr mayores volúmenes de almacenamiento (CIAGC, 2025).

La altura media de las presas es de 32 metros y tienen una capacidad media de 1,3 millones de m³, aunque la mayor es la presa de Soria, con 120 metros de altura y 32 hm³ de capacidad. A pesar de su tamaño, dicha presa nunca ha vertido y solo ha llegado a llenarse por debajo de la mitad de su capacidad (CIAGC, 2025).

Esta escasez va en incremento, ya que en los últimos 15 años las presas de Gran Canaria han sufrido una disminución significativa del agua almacenada debido a la reducción de las precipitaciones. En septiembre de 2025, el volumen almacenado en los embalses públicos gestionados por el CIAGC era tan solo del 4,21 %, concentrándose la mayor parte en dos embalses (El Mulato y La Gambuesa) (CIAGC, 2025). La estrategia de adaptación adoptada para compensar esta escasez ha sido la movilización de agua regenerada para riego en zonas tradicionalmente abastecidas por los embalses.

A pesar de que las presas aporten menos del 10 % de las necesidades hídricas anuales en un año promedio, constituyen la principal fuente fiable para la agricultura en algunas cuencas, como La Aldea. Además, los embalses de Chira y Soria son elementos fundamentales del sistema reversible hidroeléctrico proyectado para funcionar como «batería» del sistema eléctrico insular, proporcionando regulación, estabilidad y apoyo a la energía renovable (CIAGC, 2025).

Además, las presas desempeñan un papel crucial en la mitigación del riesgo de inundaciones y en la reducción de pérdidas de escorrentía hacia el mar. No obs-

tante, necesitan mantenimiento y modernización, que sumado a la baja rentabilidad de los volúmenes regulados, les enfrenta a crecientes desafíos por el endurecimiento de las normas de seguridad y los requisitos de planificación de emergencias, lo que añade presiones técnicas y financieras (CIAGC, 2025).

Regeneración de aguas

En Gran Canaria, según la *Guía de Análisis de Vulnerabilidad en el Ciclo Industrial del Agua* (Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) & Gobierno de Canarias, 2023), se han identificado numerosos sistemas interconectados de reutilización de agua regenerada, con diferentes fuentes y varios sistemas locales pequeños y aislados.

La principal fuente de agua regenerada es la EDAR y estación de regeneración de Barranco Seco, con una capacidad real de producción de 700-800 m³/h, produciendo 4,5 millones de metros cúbicos de agua regenerada para riego. Desde esta instalación, el agua regenerada se distribuye hacia el este y el sur, así como hacia el área central (Tafira) y al norte de la isla. A lo largo de toda la red de conducción y almacenamiento de agua regenerada se incorporan aportes adicionales de otras EDAR, como la del Sureste de Gran Canaria. En áreas territoriales específicas existen asimismo otros sistemas locales de reutilización, más o menos aislados, como los de Guía-Gáldar y Agaete, en el noroeste de la isla.

El riego con agua regenerada es una herramienta clave para incrementar la resiliencia de la isla frente al cambio climático. Tras el prolongado período de sequía que atraviesa, esta infraestructura se ha consolidado como un elemento estratégico para mantener la sostenibilidad del sector primario y reforzar la soberanía alimentaria insular. Su uso reduce la dependencia de los recursos hídricos convencionales en la agricultura, permitiendo que estos aporten principalmente al sector urbano (Cabildo de Gran Canaria, 2025).

8.3. Factores de vulnerabilidad de la infraestructura hídrica insular

Las infraestructuras hídricas de Gran Canaria están expuestas a múltiples vulnerabilidades derivadas de su entorno natural, sus características geológicas, sus limitaciones técnicas y su contexto socioeconómico.

El clima semiárido de la isla y la irregularidad de las precipitaciones generan situaciones de escasez hídrica, dando lugar a un ciclo del agua insostenible sin la integración de agua no convencional (Cruz-Pérez et al., 2022; Hernández Ríos et al., 2023). Aunque las condiciones climáticas no reducen directamente las reservas

subterráneas, la escasa recarga unida a la elevada demanda, incrementan el desequilibrio entre la disponibilidad y el consumo (CIAGC, 2023).

Los acuíferos de Gran Canaria se encuentran sometidos a un fuerte estrés derivado de una sobreexplotación histórica. A finales de los años noventa, más del 50 % de las reservas subterráneas habían sido extraídas (Custodio, 2020). La explotación intensiva provoca descensos piezométricos, así como incrementos de salinidad, de niveles de flúor en aguas de medianías e intrusión marina en zonas costeras (Santamarta et al., 2014). Esta intrusión es especialmente acusada en el norte (Guía-Gáldar), el este (Telde) y el sureste (Vecindario-Juan Grande) de la isla (Custodio, 2020). El agotamiento de los acuíferos ha alcanzado niveles en los que la recuperación natural, incluso si cesara la extracción, requeriría décadas o incluso un siglo. Estas condiciones aumentan la vulnerabilidad frente a nuevas degradaciones y procesos de salinización.

En cuanto a las presas de la isla, estas afrontan desafíos asociados al envejecimiento de las estructuras y a la necesidad de un mantenimiento continuo, implementándose nuevos estándares técnicos de seguridad para garantizar su integridad durante toda su vida útil (CIAGC, 2025). Sumado a esto, la infraestructura hidráulica presenta vulnerabilidad adicional por su dispersión en terrenos abruptos, la baja rentabilidad asociada a los reducidos volúmenes que almacenan, el difícil acceso, el mantenimiento insuficiente y la alta densidad de población aguas abajo. No obstante, sin estas presas se perderían volúmenes significativos de agua hacia el mar y aumentaría el riesgo de inundaciones en los barrancos.

Asimismo, Gran Canaria continúa sin alcanzar los objetivos de la Directiva Marco del Agua en materia de aguas subterráneas, incluyendo la prevención de contaminación, el equilibrio entre extracción y recarga y la reversión de tendencias negativas derivadas de actividades humanas (Hernández Ríos et al., 2023). Sin reformas sustanciales en política y gestión, la isla seguirá enfrentándose a importantes obstáculos para una gestión sostenible de los recursos hídricos.

8.4. Modelo de fallos en cascada: estructura y criterios de simulación

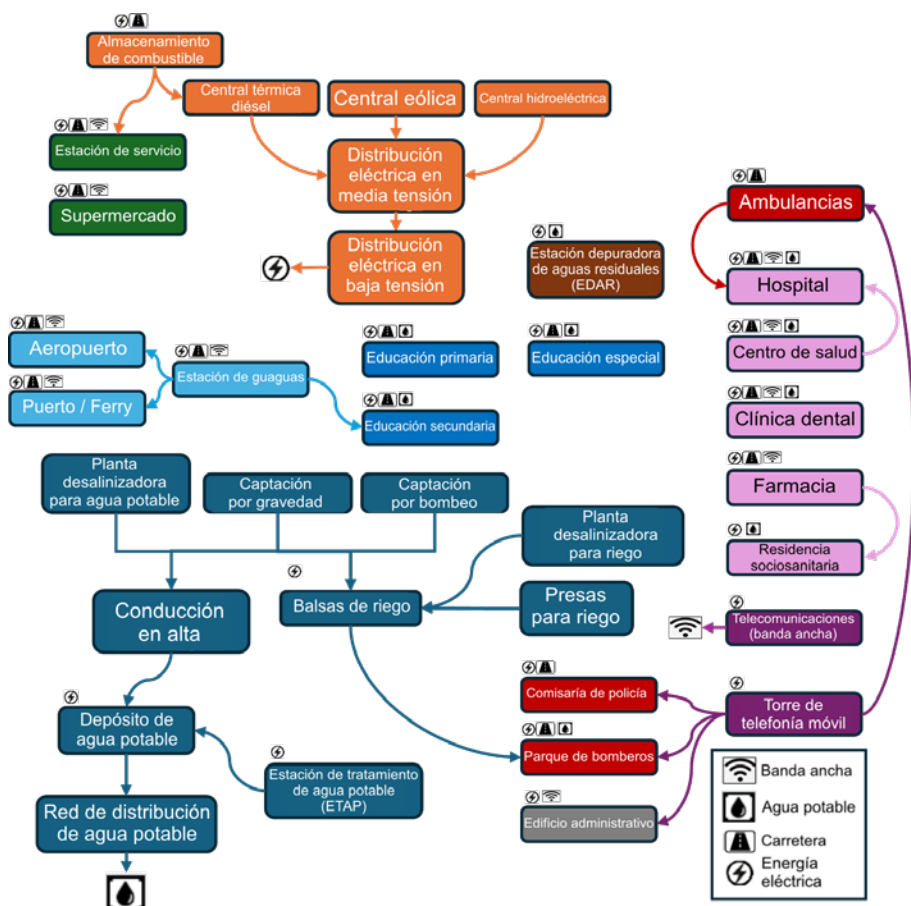
El modelado de fallos en cascada de infraestructuras críticas, realizado bajo el proyecto europeo GENESIS, ha permitido evaluar la propagación de daños en el sistema hídrico de Gran Canaria al simular eventos extremos y proyectar condiciones climáticas futuras (Santamarta et al., 2026).

El modelo consideró 6115 nodos y 36 tipos de infraestructuras interdependientes, entre las que se encuentran los sectores energético, hídrico, transporte, educación, seguridad y salud, entre otros (Figura 8.3).

8. Gran Canaria: obras hidráulicas, desalinización, regeneración de aguas y fallos en cascada

Energéticamente, el modelo toma en cuenta los generadores diésel, que en la isla aportan el 74 % de la energía, la generación eólica aportando 17,5 % y la generación solar que aporta un 8,5 %. Estos porcentajes se reflejan en los pesos asignados a los nodos de distribución eléctrica en media tensión, de 0,74, 0,175 y 0,085; respectivamente. A través de esta ponderación, se muestra el modo en que una interrupción del sistema eléctrico puede repercutir en los servicios.

A diferencia de La Palma y El Hierro, debido a ser una isla de mayor escala en cuanto a la población, infraestructura y orografía, se tenía información menos actualizada de las infraestructuras hídricas, por lo que el modelo es ligeramente más general que para las otras dos islas.



Fuente: elaboración propia (2026)

Figura 8.3. Esquema simplificado de dependencias funcionales entre los nodos de infraestructuras críticas de Gran Canaria.

Se consideraron 11 tipos de nodos críticos relacionados con el agua, incluyendo la estación depuradora. Hay una separación clara entre las redes de distribución de agua potable y las de riego. Para esta última, para estimar la integridad de los cultivos, se consideró que estas dependen principalmente de los embalses de riego, ya que, aunque las principales infraestructuras de agua regenerada están identificadas, aún no se han integrado en detalle en el estudio de fallos en cascada y podrían incorporarse en el futuro cuando se disponga de información más detallada.

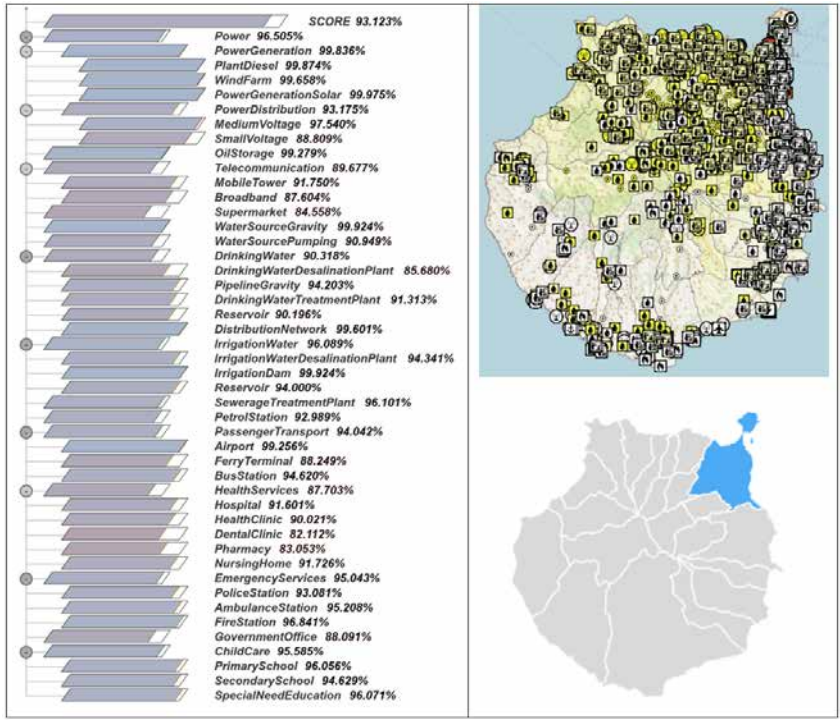
8.5. Resultados de los escenarios de simulación

Los escenarios de simulación desarrollados para la isla de Gran Canaria permiten evaluar cómo perturbaciones naturales de distinta naturaleza pueden afectar a la integridad funcional de los servicios críticos y, por extensión, a la población, la actividad económica y los sistemas agrícolas. A continuación, se presentan los resultados correspondientes a dos escenarios: inundación costera en la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria con condiciones climáticas proyectadas para 2100, y una comparativa del efecto de incendios forestales de alcance insular en 2050 frente a 2100.

Inundación costera en Las Palmas de Gran Canaria bajo condiciones climáticas proyectadas para 2100

Se simuló un escenario de inundación costera altamente localizada en la principal zona urbana de Las Palmas de Gran Canaria, bajo la proyección climática del proyecto GENESIS para el año 2100 (Figura 8.4). En esta franja litoral se encuentran infraestructuras críticas como las plantas desalinizadoras de agua de mar, cuya vulnerabilidad a la intrusión marina y al impacto de tormentas, provoca su afección directa y la generación de una serie de fallos en cascada. Los resultados de la simulación recogidos en la Figura 8.4, muestran que, pese a la concentración espacial del daño inicial, los efectos se propagan ampliamente a través de los servicios interdependientes. El mapa de las infraestructuras afectadas permite visualizar que, aunque el impacto se generase al noreste de la isla, los efectos de los fallos en cascada llegan hasta el sur de la isla.

8. Gran Canaria: obras hidráulicas, desalinización, regeneración de aguas y fallos en cascada



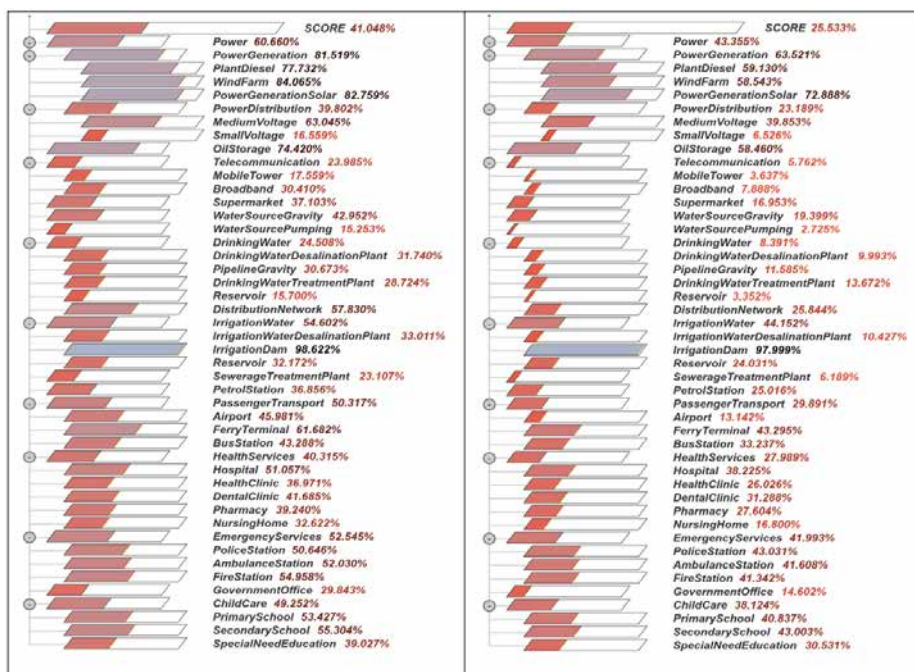
Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 8.4. Resultados de la simulación de una inundación en la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria (izquierda), mapa de las infraestructuras afectadas tras la simulación (derecha superior) y mapa de la zona de afección directa (inferior derecha).

Incendios forestales en toda la isla (Comparativa 2050 vs. 2100)

El segundo experimento analiza los efectos de incendios forestales de alcance insular, en dos escenarios climáticos diferentes: 2050 y 2100.

La simulación, reflejada en la Figura 8.5, muestra una diferencia significativa en la integridad de las infraestructuras críticas de la isla según el horizonte temporal considerado, siendo los impactos considerablemente distintos si los incendios se produjeran en 2050 frente al 2100. Esto es debido a que, el aumento de la frecuencia de alertas de altas temperaturas y de alertas de viento en el escenario climático de 2100, hacen que estos incendios tengan una mayor intensidad. Esto subraya cómo el cambio climático no solo causa daños directos, sino que actúa como amplificador de los impactos de otros peligros naturales, como los incendios forestales, a través de modificadores climáticos clave, entre ellos el aumento de la temperatura y la intensificación del viento.



Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 8.5. Comparación de los efectos simulados de incendios forestales en la isla: escenario en 2050 (izquierda) y escenario en 2100 (derecha).

8.6. Síntesis operativa y conclusiones

El sistema hídrico de Gran Canaria se enfrenta a una demanda elevada en un territorio densamente poblado, con una intensa actividad turística y una recarga natural limitada. El abastecimiento se sostiene mediante una combinación de recursos subterráneos, almacenamiento superficial y recursos no convencionales como la desalinización de agua del mar y salobre, y la regeneración de aguas.

El agua subterránea continúa desempeñando un papel esencial, especialmente para la agricultura. Sin embargo, ha sido objeto de una explotación intensiva que ha agotado más del 50 % de las reservas y ha favorecido la intrusión marina en zonas costeras. La recarga por precipitación resulta insuficiente para permitir su recuperación, mientras la extracción continuada ha provocado un deterioro progresivo de la calidad del recurso.

El almacenamiento superficial del agua, mediante infraestructuras como presas, desempeña un papel clave en la mitigación de pérdidas de escorrentía en la isla. Sin embargo, el envejecimiento de las estructuras, las limitaciones derivadas del relieve y el aumento de las exigencias regulatorias plantean desafíos operativos significativos. La desalinización se ha consolidado como una fuente principal para

el abastecimiento urbano y turístico, pero presenta vulnerabilidades asociadas a su elevada dependencia energética y a su exposición costera.

En resumen, Gran Canaria ha logrado diversificar sus fuentes hídricas, pero su dependencia de la desalinización y la complejidad de sus interconexiones la exponen a vulnerabilidades sistémicas críticas ante los escenarios climáticos futuros.

Los escenarios de simulación desarrollados con el motor de fallos en cascada de GENESIS demuestran que incluso eventos localizados, como una inundación costera en Las Palmas de Gran Canaria, pueden desencadenar una serie de fallos en otras infraestructuras, debido al alto grado de interdependencia entre servicios. El escenario de incendios forestales para 2050 y 2100 evidencia un incremento significativo a futuro, impulsado principalmente por el efecto acumulativo de alertas de alta temperatura y viento. Estos resultados subrayan la necesidad de una planificación integrada, un análisis del riesgo informado teniendo en consideración el clima, e inversiones específicas orientadas a reforzar la resiliencia del sistema.

8.7. Referencias bibliográficas

- Cabildo de Gran Canaria. (2025). El Cabildo da un paso más en su estrategia de riego agrícola en Gran Canaria con el nuevo depósito de aguas regeneradas de El Fondillo. *Cabildo de Gran Canaria*. <https://cabildo.grancanaria.com/web/portal/w/el-cabildo-da-un-paso-m%C3%A1s-en-su-estrategia-de-riego-agr%C3%ADcola-en-gran-canaria-con-el-nuevo-dep%C3%B3sito-de-aguas-regeneradas-de-el-fondillo>
- Cabrera, M. D. C., & Custodio, E. (2013). Hidrogeología y terrenos volcánicos. In J. C. Santamarta Cerezal (Ed.), *Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos. Métodos, técnicas y experiencias en las Islas Canarias* (pp. 65–92). Colegio de Ingenieros de Montes.
- Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria. (2025). *Volúmenes de las presas* [Data set]. <https://www.aguasgrancanaria.com/presas/volumenes.php>
- Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria (CIAGC). (2025). *Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria*. Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria. Retrieved 4 May 2025, from <https://www.aguasgrancanaria.com/>
- Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria (CIAGC). (2023). *Plan Hidrológico de Gran Canaria: Ciclo de Planificación 2021–2027. Memoria* (p. 1347). Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria (CIAGC).
- Cruz-Pérez, N., Santamarta, J. C., Gamallo-Paz, I., Rodríguez-Martín, J., & García-Gil, A. (2022). A comparison between carbon footprint of water production facilities in the Canary Islands: Groundwater resources vs. seawater desalination. *Sustainable Water Resources Management*, 8(4), 121. <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00706-0>

- Custodio, E. (2020). Hidrogeología y recursos de agua subterránea en formaciones e islas volcánicas: HIRAVOL. CETAQUA Barcelona. <https://doi.org/10.5821/ebook-9788498809473>
- Custodio, E., Cabrera, M. D. C., Poncela, R., Puga, L.-O., Skupien, E., & Del Villar, A. (2016). Groundwater intensive exploitation and mining in Gran Canaria and Tenerife, Canary Islands, Spain: Hydrogeological, environmental, economic and social aspects. *Science of The Total Environment*, 557–558, 425–437. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.038>
- García-Gil, A., Poncela Poncela, R., Skupien Balon, E., Morales González-Moro, Á., Lario-Báscones, R. J., Marazuela, M. Á., Cruz-Pérez, N., & Santamarta, J. C. (2023). Heterogeneity-Driven Hydrodynamics Conditions the Hydrochemistry of Spring Water in Volcanic Islands. *Groundwater*, 61(3), 375–388. <https://doi.org/10.1111/gwat.13249>
- Hernández Ríos, I., Cruz-Pérez, N., Chirivella-Guerra, J. I., García-Gil, A., Rodríguez-Alcántara, J. S., Rodríguez-Martín, J., Marazuela, M. Á., & Santamarta, J. C. (2023). Proposed recharge of island aquifer by deep wells with regenerated water in Gran Canaria (Spain). *Groundwater for Sustainable Development*, 22, 100959. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100959>
- Instituto Nacional de Estadística (INE). Cifras oficiales de población de los municipios españoles en aplicación de la Ley de Bases del Régimen Local (Art. 17). Las Palmas: Población por municipios y sexo: 2025. Recuperado de: <https://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=2889&L=0>
- Instituto Tecnológico de Canarias (ITC), & Gobierno de Canarias. (2023). *Guía sobre análisis de vulnerabilidad en el ciclo industrial del agua*. https://www.itc-canarias.org/web/images/pdfs/Publicaciones/MACCLIMA_-_Guia_sobre_analisis_de_vulnerabilidad_ciclo_industrial_del_agua.pdf
- Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Koritnik, J., & Khoury, M. (2026). GENESIS–Gran Canaria platform for cascading-failure simulation in urban water networks and critical infrastructures [Application software]. Universidad de La Laguna. https://doi.org/10.25145/o.GENESIS_Gran-Canaria.2025
- Santamarta, J. C., Lario-Bascones, R. J., Rodríguez-Martín, J., Hernández-Gutiérrez, L. E., & Poncela, R. (2014). Introduction to Hydrology of Volcanic Islands. *IERI Procedia*, 9, 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.ieri.2014.09.053>
- Santamarta, J. C., & González González, J. J. (2012). Singularidades y evolución técnica de la ingeniería de presas en las Islas Canarias. *Revista de Obras Públicas*, 159(3530), 33–50.
- Turismo de Gran Canaria. Informes y estadísticas: Informes de coyuntura [Internet]. Turismo de Gran Canaria – Área profesional. Recuperado el 18 de mayo de 2025 de: <https://www.grancanaria.com/turismo/area-profesional/informes-y-estadisticas/informes/>

Capítulo 9

El Hierro: seguridad de suministro e integridad operativa de un sistema hídrico energéticamente dependiente

Juan Carlos Santamarta Cerezal

Jelena Koritnik

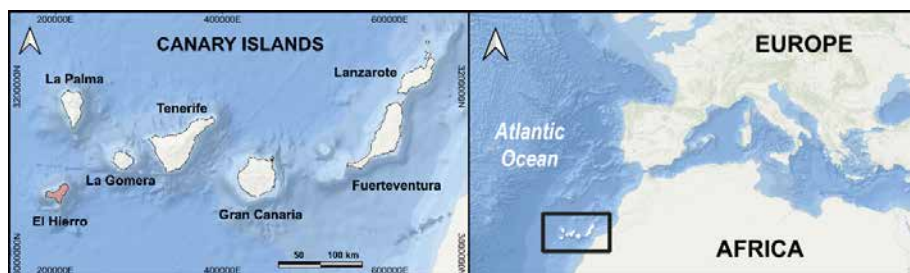
Mehdi Khoury

Noelia Cruz Pérez

Alejandro García Gil

9.1. Contexto físico, hidrogeológico y evolución del abastecimiento

El Hierro es la isla más joven del archipiélago canario, con una antigüedad aproximada de 1,12 Ma y una superficie de 268,71 km². Es la isla más occidental y de menor extensión, caracterizada por un relieve volcánico abrupto que culmina en los 1501 m del Pico de Malpaso (Figura 9.1). Su población, 11.786 habitantes (INE, 2024) distribuidos entre Valverde, Frontera y El Pinar, mantiene un patrón rural y disperso, heredado de un territorio históricamente marcado por la escasez hídrica y la limitada conectividad insular.



Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 9.1. Localización de El Hierro en el archipiélago canario y en su contexto regional.

EPSG:32628 WGS 84 / UTM 28N

El clima subtropical oceánico presenta temperaturas moderadas y un régimen pluviométrico muy irregular, con la mayor parte de las precipitaciones concentradas entre octubre y abril. La precipitación media anual se sitúa en torno a 400 mm, si bien presenta un acusado gradiente altitudinal, con valores inferiores a 150 mm en las zonas costeras y superiores a 700 mm en el altiplano de Nisdafe y otras zonas elevadas (CIAEH, 2022). Esta marca heterogeneidad condiciona la recarga efectiva de los acuíferos y, en consecuencia, la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos.

El marco geológico está definido por un sistema de tres rifts y por sucesivos colapsos gravitacionales de gran magnitud; morfológicamente, estos procesos han generado flancos arqueados, acantilados escarpados y amplias depresiones costeras (Troll & Carracedo, 2016). Entre ellos destaca el deslizamiento de El Golfo, cuya prolongación submarina supera los 3000 m de profundidad y tiene una superficie de 1500 km². La actividad volcánica reciente confirma la vigencia del sistema, como muestra la erupción submarina de 2011–2012 en las proximidades de La Restinga (Pérez et al., 2012).

Las características hidrogeológicas (Custodio, 2020) están condicionadas por una recarga efectiva limitada: se estima que de los $9,5 \times 10^7$ m³ de precipitación anual, solo alrededor del 27 % se infiltra en los acuíferos, mientras el resto se pierde



Fuente: Santamarta, J.C. (2022)

Figura 9.2. Familias de diques en el golfo de Frontera y campos de cultivo de piñas tropicales

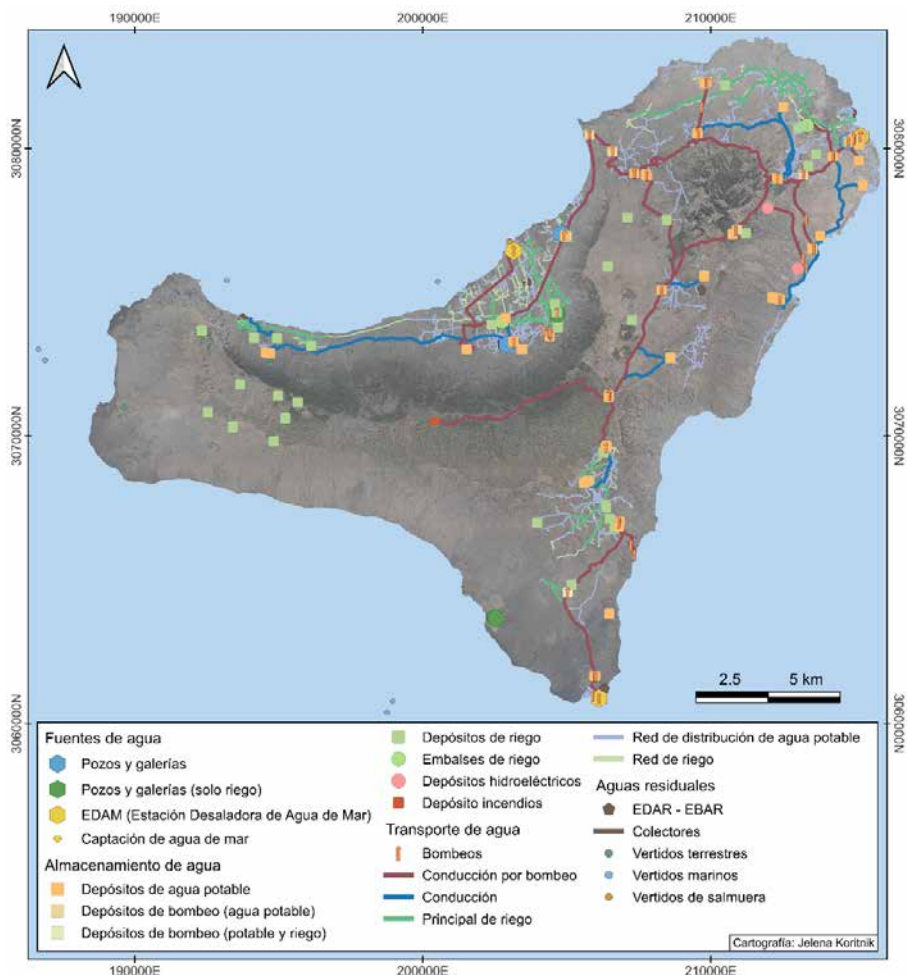
por escorrentía y evaporación. Predominan los acuíferos libres asociados al edificio de El Golfo (545-175 ka) y a los materiales volcánicos relacionados, caracterizados por permeabilidades elevadas, en contraste con los materiales más antiguos y compactados del complejo de Tiñor (1,12 – 0,88 Ma), que presentan una menor capacidad de almacenamiento y transmisión del agua subterránea (Troll & Carracedo, 2016). Los diques volcánicos (Figura 9.2) desempeñan un papel dual en el funcionamiento hidrogeológico de la isla, actuando tanto como barreras como conductos, lo que da lugar a patrones de flujo subterráneo complejos y heterogéneos. Asimismo, la ausencia de niveles continuos de baja permeabilidad impide el desarrollo de manantiales o de almacenamiento superficial duradero, lo que mantiene al agua subterránea como el principal recurso natural disponible (Marazuela et al., 2023).

La calidad del agua subterránea está condicionada por la intrusión marina en sectores vulnerables, la disolución de CO₂ endógeno y los aportes de nitratos relacionados con el uso agrícola, junto con una interacción agua–roca marcada por los gradientes geoquímicos del edificio volcánico (Marazuela et al., 2025). En determinadas áreas del noreste y del oeste de la isla, donde se registran emisiones difusas de CO₂ de origen volcánico, las aguas subterráneas presentan valores de pH más bajos y con concentraciones elevadas de bicarbonato. Esta interacción entre gases volcánicos y el sistema acuífero subraya la necesidad de una monitorización hidrogeoquímica continuada en estos sectores, especialmente en el contexto de sistemas volcánicos activos.

La evolución histórica del abastecimiento refleja estas limitaciones naturales. Durante décadas, las comunidades rurales complementaron la escasa disponibilidad subterránea con captación de agua de lluvia y almacenamiento en cisternas y depósitos, mientras los primeros pozos costeros producían caudales reducidos y, con frecuencia, salobres. La apertura de pozos más profundos, como Agua Nueva en el valle de El Golfo, evidenció la posibilidad de acceder a recursos de mayor calidad y favoreció el desarrollo de nuevas captaciones y obras hidráulicas a mediados del siglo XX (CIAEH, 2025). En la actualidad, el sistema insular integra este legado con infraestructuras modernas, en un contexto donde la desalinización adquiere una importancia creciente, en respuesta a las limitaciones hidrogeológicas de la isla.

9.2. Infraestructura hídrica y componentes del abastecimiento

El sistema de abastecimiento de El Hierro combina extracción subterránea, desalinización del agua de mar, conducción a través de la red insular y una serie de depósitos de almacenamiento repartidos por la isla (Figura 9.3). La heterogeneidad hidrogeológica condiciona la configuración y el rendimiento de estas infraestructuras.



Fuente: elaboración propia a partir de datos CIAEH e IDECanarias (2026).

Figura 9.3. Sistema de abastecimiento e infraestructuras hídricas de El Hierro.

EPSG:32628 WGS 84 / UTM 28N.

La captación subterránea incluye galerías convencionales, pozos simples, pozos con galería de fondo y galerías en trancada¹ (Figura 9.4) Según el Plan Hidrológico de 1999, la isla contabilizaba 49 estructuras de captación, de las cuales solo cinco estaban operativas, con una extracción conjunta de 2,2 hm³/año frente a una recarga estimada de 27 hm³/año (Custodio, 2020). La fuente más productiva

¹ Galería en trancada: galería de captación excavada en rampa descendente desde la costa hasta interceptar el acuífero, normalmente seguida de un tramo horizontal para captar el agua que se extrae mediante bombeo, en los casos estudiados.

es el pozo-galería de Los Padrones (Figura 9.5) ejecutado por la Dirección General de Aguas del Gobierno de Canarias, con una producción de $1,1 \text{ hm}^3/\text{año}$. Está formado por un pozo de 52 m y una galería de 1011 m, que intercepta materiales asociados al volcanismo de rift y unidades del edificio de El Golfo, afectadas por un sistema de diques con orientación NE-SW. También destaca el pozo-galería de Tamaduste (105 m de profundidad y 600 m de galería) (Figura 9.6) y, entre las captaciones privadas, el pozo de La Frontera ($700.000 \text{ m}^3/\text{año}$; 235 m de profundidad), el pozo-galería de Tigaday ($220.000 \text{ m}^3/\text{año}$; 275 m de profundidad con galerías de 160 m y 113 m) y la galería inclinada de Tacorón ($100.000 \text{ m}^3/\text{año}$; 1510 m de longitud) (CIAEH, 2025). Los antiguos pozos costeros mostraron de forma recurrente calidades inadecuadas. Por su parte, los nacientes naturales aportan caudales muy reducidos, limitados a usos locales.



Fuente: Santamarta, J.C. (2024)

Figura 9.4. Galería en trancada, en la zona sur de la isla de El Hierro, se puede apreciar la rampa de bajada y la bocamina.

La desalinización del agua de mar constituye un componente crítico para la seguridad hídrica insular, dada la vulnerabilidad del recurso subterráneo y la recurrencia de procesos de salinización, que afectan a su disponibilidad y calidad. La isla dispone de varias plantas de ósmosis inversa: Los Cangrejos en Valverde ($1800 \text{ m}^3/\text{día}$ en 2019), La Restinga en El Pinar ($1000 \text{ m}^3/\text{día}$ en 2013) y la

planta de El Golfo en La Frontera (1300 m³/día en 2012). En conjunto producen unos 6500 m³/día, equivalentes a aproximadamente 2,34 hm³/año, con ampliaciones previstas para incrementar esta capacidad (CIAEH, 2025).



Fuente: Santamarta, J.C. (2024)

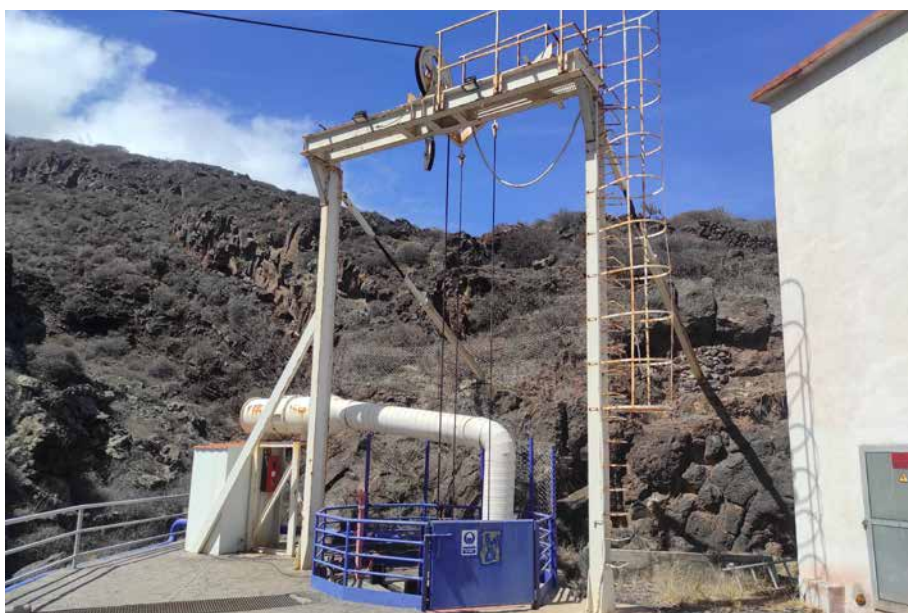
Figura 9.5. Pozo-galería de Los Padrones, ejecutado por la Dirección General de Aguas, al fondo se puede observar la caña del pozo de 52 metros y el elevador.

La conducción del agua se organiza mediante una red insular de conducción que permite trasladar el recurso desde las captaciones hasta las áreas de demanda distribuidas por la isla, fundamentalmente mediante impulsión (Figura 9.3). El agua procedente de captaciones subterráneas y de plantas de desalinización del agua de mar se conduce hacia depósitos de regulación y distribución mediante conducciones presurizadas y tramos por gravedad, con estaciones de bombeo capaces de elevar el agua desde el nivel del mar hasta cotas superiores a 1000 m, alcanzando presiones de operación de hasta 50 kg/cm² (CIAEH, 2022).

La infraestructura de almacenamiento comprende depósitos de distribución, balsas, estanques y pequeñas presas integradas en la red de transporte, con funciones de regulación, apoyo al riego, industria y extinción de incendios (CIAEH, 2025). La capacidad municipal asciende a 26.452 m³ en Valverde (33 depósitos), 7005 m³ en La Frontera (8 depósitos) y 6429 m³ en El Pinar (10 depósitos). Para usos agrícolas, industriales y de emergencia, Valverde cuenta con tres balsas y una presa (587.000 m³), La Frontera con una balsa, siete tanques y diversas infraes-

estructuras privadas (335.500 m^3), y El Pinar con tres tanques de riego y dos de extinción (15.800 m^3). Estas instalaciones se sitúan a distintas cotas, alcanzando altitudes próximas a 1365 m s. n. m.

La gestión de las aguas residuales se resuelve mediante redes unitarias en núcleos determinados y varias estaciones de tratamiento basadas en aireación prolongada. Las plantas principales incluyen las de Valverde ($600 \text{ m}^3/\text{día}$; $20.735 \text{ m}^3/\text{año}$), La Restinga ($300 \text{ m}^3/\text{día}$) y Frontera ($300 \text{ m}^3/\text{día}$, con reutilización para riego), complementadas por instalaciones menores en El Majano, Tamaduste y Pozo de La Salud (CIAEH, 2025). El efluente tratado se infiltra habitualmente mediante zanjas de infiltración, mientras que los asentamientos dispersos recurren a pozos de absorción.



Fuente: Santamarta, J.C. (2025)

Figura 9.6. Pozo-galería en el Tamaduste

9.3. Limitaciones y condicionantes del sistema hídrico insular

La infraestructura hídrica de El Hierro está condicionada por un contexto geológico y geomorfológico complejo, propio de una isla volcánica joven. La estructura insular, organizada en torno a las principales alineaciones de rift, la compartimentación del acuífero por diques y la presencia de grandes deslizamientos gravitacionales, limita la continuidad y la capacidad de los sistemas subterráneos.

El relieve abrupto y la inestabilidad de determinadas formaciones volcánicas incrementan la exposición de las infraestructuras de abastecimiento situadas en laderas y zonas próximas a áreas inestables, como El Golfo y Las Playas (Custodio, 2020).

Desde el punto de vista hidrogeológico, la elevada permeabilidad de los materiales volcánicos contrasta con una capacidad de recarga limitada, lo que dificulta la gestión sostenible del agua subterránea (Figura 9.7). Las extracciones se ven frecuentemente afectadas por procesos de salinización, especialmente en pozos costeros donde la intrusión marina se manifiesta mediante conos salinos ascendentes. El bombeo continuado intensifica este proceso, favoreciendo una evolución hidroquímica desde aguas bicarbonatadas-sódicas hacia cloruradas-sódicas, indicativa de una creciente influencia marina (Custodio, 2020). El pozo-galería de Los Padrones constituye una excepción, gracias al control activo del nivel piezométrico que evita la intrusión marina.



Fuente: Santamarta, J.C. (2021)

Figura 9.7. Presa de Tefirabe (El Mocanal, El Hierro). Pequeña presa de mampostería concebida para laminar escorrentías y apoyar el abastecimiento, hoy sin lámina de agua por la escasa aportación superficial en su cuenca.

En determinados sectores, la calidad natural del agua se ve además condicionada por salinidades elevadas y por aportes geogénicos de CO_2 que modifican la composición hidroquímica (Marazuela et al., 2025). Los estudios isotópicos indican una recarga concentrada entre 800 y 1400 m s. n. m., con sistemas regionales de renovación lenta y fuerte interacción agua-roca, frente a sistemas locales con respuestas más rápidas (Poncela & Skupien, 2016). Esta heterogeneidad complica

la gestión conjunta de cantidad y calidad, especialmente en periodos de sequía o incremento de la demanda.

La desalinización de agua de mar resulta esencial para complementar los recursos locales, pero introduce dependencias técnicas y operativas relevantes. Las plantas desalinizadoras, situadas en el litoral para facilitar la captación, están expuestas a procesos costeros y dependen de forma continuada del suministro eléctrico. De manera complementaria, la conducción insular del agua requiere bombeos a grandes desniveles, reforzando la dependencia energética del sistema. Aunque las estaciones de impulsión disponen de generadores diésel para contingencias, su eficacia está condicionada por la accesibilidad y el contexto operativo durante emergencias. A ello se suma la dispersión territorial de estaciones de bombeo, conducciones y depósitos, que introduce condicionantes adicionales en la gestión del sistema bajo escenarios de perturbación.

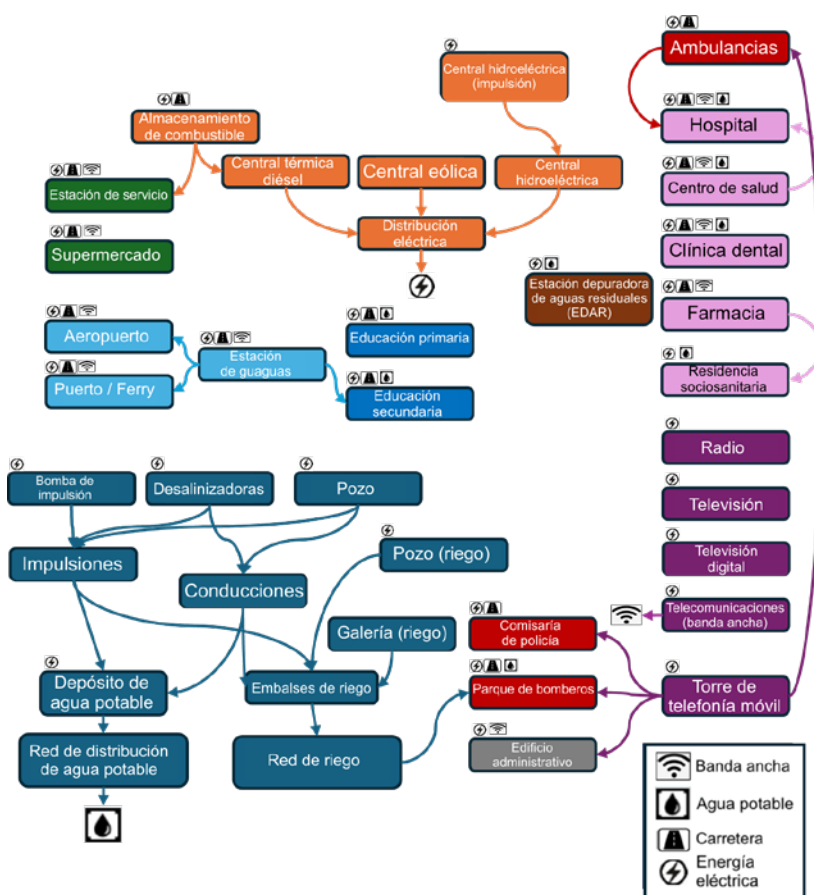
La combinación de condicionantes geológicos, hidrogeológicos y operativos define un sistema cuya fiabilidad depende de la anticipación de inestabilidades del terreno, del seguimiento de la disponibilidad de recursos subterráneos, de una elevada capacidad operativa y de la gestión de infraestructuras dispersas y de su envejecimiento a lo largo del tiempo. Este marco refuerza la necesidad de estrategias integradas que articulen la operación cotidiana con la adaptación a los riesgos naturales y a las limitaciones sociotécnicas propias del abastecimiento insular.

9.4. Modelo de fallos en cascada: estructura y criterios de simulación

El modelo de fallos en cascada desarrollado para El Hierro permite representar de forma integrada las interdependencias entre los servicios críticos insulares y la manera en que una perturbación localizada puede propagarse a lo largo de la red de infraestructura. Se trata de un software de simulación que reproduce tanto la configuración física de los sistemas como la lógica funcional que articula energía, agua (en sus componentes de abastecimiento urbano y riego), transporte y servicios esenciales, ofreciendo una visión sistémica de las vulnerabilidades operativas de la isla (Santamarta et al., 2026).

El modelo incorpora un total de 823 nodos distribuidos en 39 tipos de servicios críticos interdependientes (Figura 9.8). Su escala y heterogeneidad permiten evaluar la propagación de fallos más allá del punto de origen, así como cuantificar los efectos sobre sectores sensibles, incluido el dominio agrario, donde se consideran aproximadamente 18.000 parcelas. Esta resolución espacial y funcional es esencial para analizar la pérdida de operatividad en infraestructuras cuya prestación depende de cadenas de servicio complejas.

La configuración energética de El Hierro se integra explícitamente en el modelo mediante la asignación de pesos de criticidad acordes con la participación relativa de cada fuente en la generación eléctrica insular. Las energías renovables aportan aproximadamente el 46 % del suministro, con un 41 % procedente de parques eólicos y un 5 % de generación hidráulica asociada al sistema de bombeo-turbinado, mientras que el 54 % restante proviene de grupos electrógenos diésel. Estas proporciones se reflejan en los pesos asignados a los nodos de distribución eléctrica: las entradas desde nodos eólicos, hidráulicos y diésel reciben pesos relativos de 0,41, 0,05 y 0,54, respectivamente. Esta ponderación reproduce la estructura real del sistema energético y determina la forma en que un fallo eléctrico puede repercutir en servicios dependientes de alimentación continua.



Fuente: elaboración propia (2026)

Figura 9.8. Vista simplificada de las dependencias funcionales entre los 39 tipos de nodos de infraestructura crítica en El Hierro.

El dominio hídrico incorpora 11 tipos de nodos críticos, incluyendo captaciones, desalinización, conducciones e impulsiones, almacenamiento y redes de distribución de agua potable y de riego. La asignación de criticidad refleja la dependencia funcional de cada tramo respecto a sus servicios de entrada. Para las conducciones gravitatorias, los pesos de entrada vinculados a plantas de desalinización y pozos son del 63 % y del 37 %, respectivamente. En impulsiones, la distribución de pesos entre desalinización, pozos y estaciones de bombeo es del 31,5 %, 18,5 % y 50 %. En el caso de los embalses de riego, los pesos asociados a pozos de riego, galerías, conducciones e impulsiones se estiman en 4 %, 29 %, 11,17 % y 55,83 %, respectivamente.

El modelo de El Hierro no distingue de manera estructural entre redes para agua potable y para riego, dado que ambas se canalizan a lo largo de los mismos corredores hidráulicos que atraviesan el relieve insular, ya sea mediante tramos en gravedad o mediante impulsión (Figura 9.9). La separación completa entre sistemas se establece a partir del tratamiento y desinfección del agua destinada al consumo humano, manteniendo rutas de distribución independientes a partir de ese punto.



Fuente: Santamarta, J.C. (2023)

Figura 9.9. Cultivos de platanera en invernadero en el sur de la isla de El Hierro abastecidos por aguas subterráneas

El conjunto del modelo sintetiza estas relaciones mediante una red de dependencias funcionales en la que cada infraestructura posee un umbral de operatividad condicionado por los servicios de los que depende. Esta representación permite identificar nodos de alta centralidad, cuellos de botella y trayectorias plausibles de propagación de fallos, constituyendo la base analítica de los escenarios que se examinan en el apartado siguiente.

9.5. Resultados de los escenarios de simulación

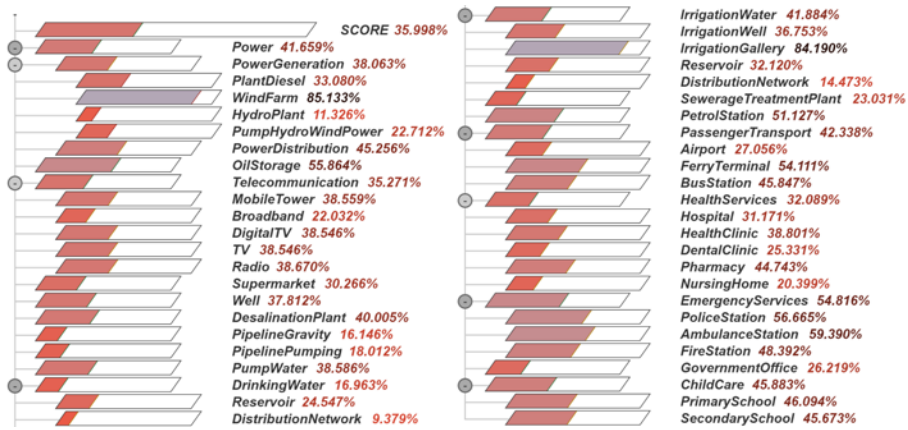
Los escenarios de simulación desarrollados para El Hierro permiten evaluar cómo perturbaciones naturales de distinta naturaleza pueden afectar a la integridad funcional de los servicios críticos y, por extensión, a la población, la actividad económica y los sistemas agrícolas. A continuación, se presentan los resultados correspondientes a dos escenarios: un terremoto de alcance insular y una serie de deslizamientos en la región de Frontera asociados a las proyecciones climáticas del proyecto GENESIS para el año 2100. En ambos casos, la visualización generada por el motor de simulación de fallos en cascada permite analizar de manera integrada la pérdida de servicio, la propagación de los fallos y los impactos indirectos sobre la estructura socioeconómica insular.

Terremoto de alcance insular

El primer escenario representa los efectos de un terremoto que afecta a todo el territorio insular. La perturbación inicial desencadena pérdidas de funcionalidad en diversos servicios críticos, cuya magnitud se expresa mediante indicadores de integridad calculados por la plataforma de simulación. Los resultados presentan, por un lado, un indicador global de integridad del sistema insular, calculado como la media no ponderada de los valores de integridad de las distintas categorías de servicio, y, por otro, el porcentaje de integridad por categoría, definido este último como la suma de los servicios efectivamente producidos por todos los nodos de cada grupo en relación con su capacidad máxima conjunta (Figura 9.10).

Para evaluar los impactos sociales indirectos, el modelo estima el número de progenitores afectados por la pérdida de servicio en los centros educativos (Figura 9.11). La simulación diferencia entre padres/madres en familias monoparentales y en familias pluriparentales, dada la distinta capacidad de reorganización de cuidados ante el cierre escolar.

9. El Hierro: seguridad de suministro e integridad operativa de un sistema hídrico energéticamente dependiente



Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 9.10. Integridad funcional simulada de los servicios críticos ante un terremoto de alcance insular en El Hierro.

Service	Parents Facing 10-50% Service Loss	Parents Facing (+50%) Service Loss
Primary School	96,503 (0.9%)	130,592 (1.2%)
Secondary School	0 (0.0%)	227,094 (2.0%)
Special Education	0 (0.0%)	0 (0.0%)

Service	Parents Facing 10-50% Service Loss	Parents Facing (+50%) Service Loss
Primary School	273,389 (2.4%)	1179,67 (10.4%)
Secondary School	0 (0.0%)	1453,059 (12.9%)
Special Education	0 (0.0%)	0 (0.0%)

Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 9.11. Estimación del número de progenitores afectados por la pérdida de servicio en centros educativos, diferenciando hogares monoparentales (arriba) y pluriparentales (abajo).

Asimismo, la plataforma cuantifica el número de personas que se enfrentan a situaciones de pérdida crítica de servicios, aquellas en las que la funcionalidad cae por debajo del 50 %, proporcionando una visión agregada del alcance social de la perturbación (Figura 9.12). En términos económicos, la interrupción de los servicios educativos también afecta a la disponibilidad de la fuerza laboral, dado que parte de las personas trabajadoras no puede acudir a sus puestos de trabajo. La simulación estima la reducción de disponibilidad por tipo de actividad productiva, permitiendo identificar los sectores más sensibles a este mecanismo indirecto (Figura 9.13).

Infraestructura hídrica de las Islas Canarias: riesgos naturales y fallos en cascada

Service	People Facing (+50%) Service Loss
Pharmacies	11.298 (100.0%)
Hospitals	11.298 (100.0%)
Health Clinics	11.298 (100.0%)
Dental Practices	11.298 (100.0%)
Bus Transport	11.298 (100.0%)
Mobile Telecommunication	11.298 (100.0%)
Clean Water	11.298 (100.0%)
Power	11.298 (100.0%)
Total Population	11.298

Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 9.12. Población expuesta a pérdidas críticas de servicio superiores al 50 %.

Industry	Workforce (Current / Initial)	Availability (%)
O Administración Pública y defensa; Seguridad social obligatoria	696 / 769	90.81%
I Hostelería	529 / 588	90.03%
P Educación	438 / 478	91.67%
Q Actividades sanitarias y de servicios sociales	353 / 387	91.22%
G Comercio al por mayor y al por menor; reparación de vehículos de motor y motocicletas	323 / 361	89.60%
H Transporte y almacenamiento	230 / 250	91.92%
F Construcción	185 / 206	90.01%
A Agricultura; ganadería; silvicultura y pesca	156 / 177	88.11%
S Otros servicios	133 / 144	92.03%
M Actividades profesionales; científicas y técnicas	77 / 84	91.71%
T Actividades de los hogares como empleadores de personal doméstico y como productores de bienes y servicios para uso propio	77 / 84	91.46%
C Industria manufacturera	75 / 84	89.38%
K Actividades financieras y de seguros	74 / 83	88.67%
N Actividades administrativas y servicios auxiliares	57 / 63	90.41%
J Información y comunicaciones	38 / 44	87.10%
E Suministro de agua; actividades de saneamiento; gestión de residuos y descontaminación	34 / 37	92.95%
D Suministro de energía eléctrica; gas; vapor y aire acondicionado	20 / 21	92.93%
U Actividades de organizaciones y organismos extraterritoriales	5 / 5	92.96%
B Industrias extractivas	0 / 0	0.00%
L Actividades inmobiliarias	0 / 0	0.00%
R Actividades artísticas; recreativas y de entretenimiento	0 / 0	0.00%
Total	7005	

Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 9.13. Impacto del cierre de centros educativos en la disponibilidad de la fuerza laboral por sector en un escenario de terremoto insular en El Hierro.

Finalmente, se consideran los efectos indirectos sobre la agricultura. La pérdida de integridad en los sistemas de riego se traduce en daños significativos sobre los cultivos, cuantificados en términos de superficie afectada (Figura 9.14).

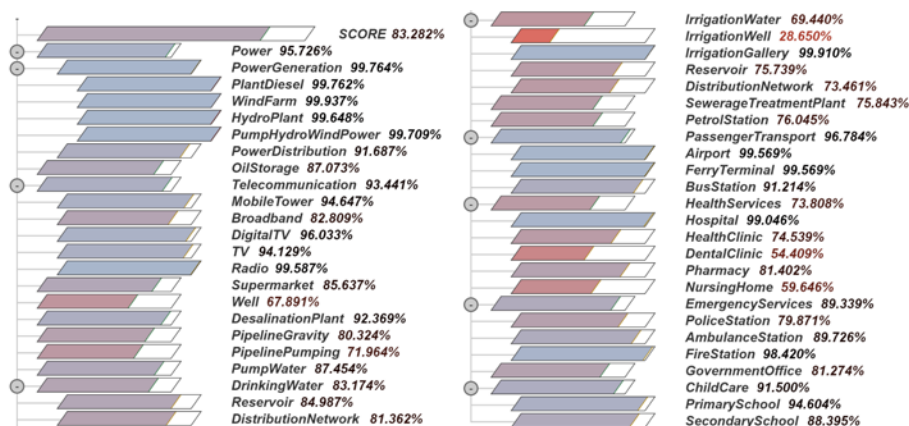
Crop Type	Area (m²)	Starting Integrity	Integrity after cascading failure
Piña	1,258,558	33.8%	4.4%
Papaya	3,808	48.6%	6.5%
Tagasaste	73,226	35.3%	5.6%
Templado Otras Mezclas	734,240	33.1%	5.1%
Hortaliza Otras Mezclas	243,427	33.4%	5.0%
Millo	66,757	36.3%	5.6%
Batata	3,398	66.0%	9.7%
Almendro	234,331	33.2%	5.3%
Papa	181,191	34.7%	5.3%
Otras Forrajeras	37,717	66.0%	9.5%
Viña	2,550,964	37.8%	5.4%
Cereal Otros	605,127	33.3%	5.3%
Mango	226,610	38.1%	5.1%
Citricos	74,109	34.9%	4.8%
Subtropicales Otras Mezclas	260,138	33.8%	4.6%
Aromáticas	337	66.0%	10.2%

Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 9.14. Efectos del terremoto sobre una parte de los cultivos, con daños indirectos muy significativos asociados a la pérdida de riego.

Deslizamientos en la región de Frontera con proyección climática 2100

El segundo escenario analiza la ocurrencia de deslizamientos en el golfo de Frontera bajo un contexto de incremento de perturbaciones ligado a la proyección climática del proyecto GENESIS para 2100. En este escenario, el modelo incorpora el efecto de alertas de precipitación, que añaden un 1 % de daño adicional por alerta prevista a los nodos ya afectados, reflejando así una intensificación progresiva de la perturbación. La evaluación de la integridad funcional por servicio permite comparar el grado de afectación entre categorías y entender cómo la combinación de inestabilidad de laderas y condiciones climáticas más adversas compromete la prestación de servicios críticos (Figura 9.15).



Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 9.15. Impactos simulados de deslizamientos en el golfo de Frontera bajo la proyección climática GENESIS de 2100, reflejando la contribución acumulada de las alertas de precipitación sobre la pérdida de servicio.

9.6. Conclusiones operativas para la resiliencia

El sistema hídrico de El Hierro refleja las limitaciones propias de una isla volcánica joven: recarga natural reducida, marcada heterogeneidad espacial de la disponibilidad de recursos y un relieve abrupto condicionado por las principales alineaciones estructurales (zonas de rift) y por la presencia de diques que compartimentan el acuífero. Estas condiciones restringen tanto la disponibilidad como la calidad del agua subterránea, afectada por la intrusión marina en captaciones costeras y por condicionantes geoquímicos asociados a la presencia de CO₂ endógeno. Asimismo, las infraestructuras se encuentran expuestas a vulnerabilidades asociadas a la inestabilidad de las laderas. La transición desde soluciones históricas de baja capacidad hacia un sistema apoyado en captaciones más profundas (sistemas pozo-galería), desalinización de agua de mar, y una red de conducción con impulsiones a cotas elevadas, aunque ha permitido aliviar algunas de estas limitaciones, ha reforzado dependencias técnicas y, en particular, energéticas.

La explotación del agua subterránea continúa condicionada por la recarga natural limitada y por el deterioro de la calidad en captaciones costeras, debido a la intrusión marina (salinidad) y, en algunos sectores, a aportes geogénicos que afectan a parámetros específicos del agua. La protección operativa de captaciones estratégicas, como el pozo-galería de Los Padrones, requiere de un control continuo del nivel piezométrico con el fin de prevenir procesos de in-

trusión marina. En paralelo, la desalinización de agua de mar adquiere un peso creciente en el abastecimiento insular, pero su funcionamiento depende de una disponibilidad energética estable y de la integridad de instalaciones localizadas en el litoral. Por otro lado, aunque las estaciones de bombeo disponen de generadores diésel para situaciones de contingencia, su efectividad se ve limitada por problemas de accesibilidad y por las condiciones operativas durante episodios adversos.

La conducción del agua, tanto para abastecimiento como para riego, se apoya en una red de conducciones frecuentemente dispuestas a lo largo de corredores hidráulicos, por gravedad o impulsados, que atraviesan el relieve insular. Esta configuración resulta eficiente desde el punto de vista operativo, pero concentra la exposición del sistema frente a perturbaciones que afectan a estos ejes estratégicos. La dispersión poblacional obliga, además, al despliegue de infraestructuras como depósitos, estaciones de bombeo y conducciones en zonas topográficamente complejas, lo que incrementa su exposición a procesos de inestabilidad de ladera. A ello se le suma el envejecimiento progresivo de estas infraestructuras, puede intensificar su fragilidad estructural y requerir intervenciones de mantenimiento en terrenos difíciles.

Los experimentos de fallos en cascada, basados en 823 nodos y 39 tipos de servicios críticos interdependientes, ilustran estas vulnerabilidades de forma integrada. En el escenario de terremoto insular, la pérdida de integridad funcional afectó de forma simultánea a múltiples categorías de servicio, generando impactos indirectos asociados al cierre de centros educativos y una reducción significativa de la disponibilidad laboral, además de provocar daños sustanciales sobre los cultivos como consecuencia de las interrupciones en el riego. En el escenario de deslizamientos en el golfo de Frontera, agravados por alertas de precipitación previstas en la proyecciones climáticas del proyecto GENESIS para 2100, los fallos locales se intensificaron progresivamente, afectando a los sectores del transporte, energía y otros que se encuentran concentrados en zonas geológicamente inestables.

Los resultados evidencian que la resiliencia del sistema hídrico de El Hierro depende de la protección y el seguimiento continuo de las fuentes más estratégicas y productivas, de la capacidad operativa del sistema y de las infraestructuras situadas en áreas de riesgo y de la coordinación funcional entre los sistemas de agua y energía bajo condiciones de perturbación. En un contexto caracterizado por recursos limitados y por la recurrencia de peligros naturales, el fortalecimiento de estas dimensiones constituye un requisito fundamental para sostener la funcionalidad del sistema, tanto frente a restricciones de largo plazo como ante disrupciones súbitas.

9.7. Referencias bibliográficas

- Consejo Insular de Aguas de El Hierro (CIAEH). (2022). *Plan Hidrológico de El Hierro: Ciclo de Planificación 2021–2027. Memoria* (p. 777). Consejo Insular de Aguas de El Hierro.
- Consejo Insular de Aguas de El Hierro (CIAEH). (2025). *CIAEH - Infraestructuras*. Consejo Insular de Aguas de El Hierro. <https://www.aguaselhierro.org/infraestructuras/>
- Custodio, E. (2020). Hidrogeología y recursos de agua subterránea en formaciones e islas volcánicas: HIRAVOL. CETAQUA Barcelona. <https://doi.org/10.5821/ebook-9788498809473>
- Gobierno de Canarias. (2025). *Infraestructura de Datos Espaciales de Canarias (IDECanarias)*. IDECanarias. <https://www.idecanarias.es/content/idecanarias>
- Marazuela, M. Á., Baquedano, C., Cruz-Pérez, N., Martínez-León, J., Laspidou, C., Santamarta, J. C., & García-Gil, A. (2023). Dyke-impounded fresh groundwater resources in coastal and island volcanic aquifers: Learning from the Canary Islands (Spain). *Science of The Total Environment*, 899, 165638. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165638>
- Marazuela, M. Á., Jiménez, J., Baquedano, C., Martínez-León, J., Gasco-Cavero, S., Cruz-Pérez, N., Santamarta, J. C., & García-Gil, A. (2025). Hydrogeological and hydrochemical processes affecting groundwater quality on volcanic islands: Insights from El Hierro (Canary Islands, Spain). *Journal of Hydrology*, 654, 132874. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132874>
- Pérez, N. M., Padilla, G. D., Padrón, E., Hernández, P. A., Melián, G. V., Barrancos, J., Dionis, S., Nolasco, D., Rodríguez, F., Calvo, D., & Hernández, Í. (2012). Precursory diffuse CO₂ and H₂S emission signatures of the 2011–2012 El Hierro submarine eruption, Canary Islands. *Geophysical Research Letters*, 39(16). <https://doi.org/10.1029/2012gl052410>
- Poncela, R., & Skupien, E. (2016). *Caracterización hidroquímica e isotópica ambiental de las aguas subterráneas del Valle de El Golfo (Isla de El Hierro)* (No. HR-132-8-CM; Plan Hidrológico de El Hierro, p. 131). Dirección General de Aguas, Gobierno de Canarias.
- Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Koritnik, J., Khoury, M., & García-Gil, A. (2026). GENESIS–El Hierro platform for cascading-failure simulation in water–energy systems [Application software]. Universidad de La Laguna. https://doi.org/10.25145/o.GENESIS_Hierro.2025
- Troll, V. R., & Carracedo, J. C. (2016). Chapter 2 – The Geology of El Hierro. In V. R. Troll & J. C. Carracedo (Eds), *The Geology of the Canary Islands* (pp. 43–99). Elsevier. 10.1016/B978-0-12-809663-5.00002-5

Capítulo 10

Infraestructura costera y dependencia energética: el talón de Aquiles

Jelena Koritnik

Noelia Cruz Pérez

Megan Expósito Brazier

Juan Carlos Santamarta Cerezal

10.1. Concentración de nodos críticos en el litoral

En las islas volcánicas, el ámbito litoral se configura como el espacio donde convergen buena parte de las funciones esenciales del sistema hídrico. Es aquí donde se concentran las plantas desalinizadoras para la producción de agua potable, donde se explotan las captaciones del acuífero costero, y donde se localizan las correspondientes estaciones de impulsión. Esta concentración, junto con la elevada densidad de población y la intensa actividad económica en el litoral, genera un patrón territorial en el que numerosos nodos críticos coinciden espacialmente. Esta configuración, derivada de condicionantes técnicos y de la propia estructura socioeconómica, convierte al litoral en un componente crítico del abastecimiento insular (Santamarta, Rodríguez-Martín, et al., 2022).

En islas como Gran Canaria y El Hierro, donde la disponibilidad de recursos hídricos naturales es limitada y está marcada por una gran variabilidad espacial, la desalinización se ha consolidado como uno de los pilares fundamentales del sistema de abastecimiento. Las plantas desalinizadoras se emplazan inevitablemente en la costa, junto a las infraestructuras de captación y vertido, lo que permite reducir las pérdidas de carga y minimizar la complejidad técnica del sistema. Incluso en territorios que no dependen de la desalinización, como La Palma, una parte significativa de las captaciones subterráneas y de los tramos estratégicos de la red se localizan en sectores costeros, donde las condiciones geomorfológicas y de accesibilidad facilitan el aprovechamiento del recurso (Cruz-Pérez & Santamarta, 2021; Cruz-Pérez et al., 2022).

El litoral adquiere asimismo un papel estratégico en el ámbito energético, estrechamente vinculado al funcionamiento del sistema hídrico insular. Las centrales térmicas se localizan mayoritariamente en la costa (Figura 10.1), debido tanto

a la necesidad de disponer de grandes volúmenes de agua para los procesos de refrigeración, y a que son zonas estratégicas respecto a la entrada del combustible vía marítima (Instituto Catalán de Energía, 2025).



Fuente: Ortofoto territorial de alta resolución (GRAFCAN, 2026)

Figura 10.1. Centrales térmicas de Gran Canaria (izquierda), El Hierro (centro) y La Palma (derecha).

En este contexto, destacan instalaciones como la Central Térmica de Jinámar, situada en la costa oriental de Gran Canaria, que cumple una función dual al producir energía eléctrica y abastecer de agua potable mediante procesos de desalinización de agua de mar (Padrón, 2024). De forma análoga, la Central Térmica de Los Guinchos, ubicada en el entorno litoral junto la entrada de la capital palmera, constituye el principal nodo energético de La Palma. Esta instalación, junto con su infraestructura de almacenamiento de combustible asociada, garantiza el suministro eléctrico de la isla, consolidando la importancia del litoral para estas infraestructuras (Fernández Arozena, 2025).

Esta concentración funcional aumenta la vulnerabilidad del sistema, dado que una proporción significativa del abastecimiento depende de un conjunto reducido de infraestructuras costeras, cuya interrupción puede propagarse rápidamente hacia el interior del territorio. El litoral se configura, por tanto, como un espacio crítico cuyo diseño, protección y capacidad de recuperación condicionan de manera directa la continuidad del suministro en las islas.

10.2. Exposición directa a temporales y procesos marinos

La dinámica costera de las islas volcánicas presenta una combinación de factores: oleaje energético, mareas de gran amplitud, temporales recurrentes y episodios de inundación litoral, que ejerce una presión constante sobre las infraestructuras costeras (Região Autónoma da Madeira, 2003). Las plantas desalinizadoras de agua de mar, las captaciones litorales y los sistemas de toma y pretratamiento se encuentran particularmente expuestos a estos procesos, lo que condiciona su funcionamiento y eleva los riesgos asociados a su operación.

En el caso de las plantas de desalinización, los temporales pueden afectar a las conducciones submarinas, alterar la calidad del agua captada o interrumpir el funcionamiento de los sistemas de filtrado y pretratamiento. Los elementos expuestos, incluidos los emisarios y las estructuras de protección, pueden sufrir daños que requieren intervenciones rápidas y precisas, las cuales se ven dificultadas en condiciones adversas. En islas como Gran Canaria o El Hierro, donde la desalinización abastece a los principales núcleos urbanos y turísticos, esta exposición adquiere relevancia particular.

Asimismo, las captaciones litorales como pozos costeros, presentan vulnerabilidad a fenómenos como la intrusión marina asociada a descensos piezométricos, así como a oscilaciones mareales y episodios de sobrepresión marina que pueden afectar puntualmente al equilibrio hídrico, especialmente en contextos de elevada explotación. Las fluctuaciones bruscas del nivel piezométrico, así como los procesos erosivos que afectan a captaciones o infraestructuras asociadas, pueden alterar tanto la calidad como la disponibilidad del recurso, obligando a ajustar el funcionamiento de la red o a recurrir a fuentes alternativas cuando estas se encuentran disponibles (Cruz et al., 2011; Custodio et al., 2016).

La interacción entre las infraestructuras costeras y los procesos marinos presenta un carácter recurrente y, en ciertos casos, resulta difícil de evitar. La vulnerabilidad del litoral como espacio funcional no depende únicamente de la intensidad de los temporales, sino también de la necesidad de garantizar una operación continua en condiciones ambientales cambiantes. La exposición directa de estos nodos críticos convierte su diseño, mantenimiento y protección en elementos esenciales para la resiliencia del sistema.

10.3. Dependencia energética de las estaciones de bombeo

La operación cotidiana del sistema hidráulico en las islas volcánicas depende, en muchas ocasiones, directamente de la disponibilidad de energía (Santamarta,

Rubiales, et al., 2022). Esta relación resulta especialmente crítica en los nodos litorales, donde una parte significativa del agua, ya sea procedente de plantas de desalinización o de captaciones costeras, requiere impulsión hacia cotas medias y altas mediante estaciones de bombeo. La topografía abrupta, caracterizada por desniveles pronunciados y una dispersa ocupación del territorio en zonas elevadas, obliga a diseñar redes de impulsión que requieren de un suministro eléctrico continuo y estable, consolidando así la interdependencia entre los sistemas hídricos y energéticos.

En islas como El Hierro, esta dependencia es particularmente evidente. Aun concentrándose las principales captaciones y la producción por desalinización en los núcleos costeros, el abastecimiento de asentamientos dispersos en cotas medias y altas requiere la impulsión de agua desde el litoral para salvar desniveles pronunciados. En estas condiciones, cualquier corte eléctrico puede traducirse de forma inmediata en una reducción de la capacidad de distribución. De forma análoga, en Gran Canaria la creciente importancia de la desalinización en los centros urbanos del litoral implica que cualquier alteración en el suministro energético afecte no solo a la producción de agua, sino también al funcionamiento de los sistemas de impulsión y redistribución necesarios para el equilibrio del abastecimiento insular.

Incluso en islas donde la conducción por gravedad desempeña un papel relevante, como La Palma, existen tramos del sistema asociados a estaciones de impulsión que resultan esenciales para el funcionamiento del sistema hídrico. Estas impulsiones permiten la redistribución de caudales entre zonas de la isla con distinta disponibilidad de recurso o demanda, como el sistema de impulsión Aduares–Hermosilla, así como las elevaciones de aportes procedentes de pozos costeros productivos hacia los canales principales que abastecen zonas sin recursos locales suficientes. La dependencia de las impulsiones en un suministro energético continuo adquiere un significado particular en la isla, dado que el principal punto de almacenamiento de combustible, necesario para la generación eléctrica insular (90 % del mix energético), se encuentra también en el litoral, reforzando la sensibilidad del sistema frente a perturbaciones que afecten a la zona costera (Figura 10.2).

En este contexto, la elevada interdependencia entre infraestructuras costeras y la disponibilidad hídrica, refuerza la vulnerabilidad en los territorios insulares. No obstante, esta relación puede mitigarse parcialmente mediante mejoras tecnológicas orientadas a la eficiencia. En este sentido, la planta DESALRO 2.0 en Gran Canaria, se ha destacado recientemente como una de las instalaciones de desalinización con menor consumo energético a nivel global, reduciendo la dependencia energética del proceso y fortaleciendo la resiliencia del sistema de abastecimiento (ITC, 2025).



Fuente: Díaz Mesa, H. (2026)

Figura 10.2. Central térmica de Los Guinchos, La Palma.

De forma complementaria, en la Macaronesia se han desarrollado iniciativas orientadas a desacoplar la producción de agua de la disponibilidad energética convencional. Un ejemplo es la instalación de una planta de desalinización alimentada mediante energías renovables en la isla de Maio, en Cabo Verde, en el marco del proyecto DESAL+. Aunque esta planta sea de escala reducida, evidencia la viabilidad de garantizar el abastecimiento de agua potable sin dependencia directa del combustible ni del sistema eléctrico insular (Desalination Lab DESAL+, 2021; Revista Técnica de Medio Ambiente, 2021).

En sistemas donde la infraestructura hídrica y energética convergen en el litoral, la energía constituye una condición estructural para el funcionamiento del sistema hídrico insular, de modo que cualquier interrupción del suministro puede desencadenar fallos rápidos y generalizados. Esta dependencia no se limita a la operación de equipos mecánicos, sino que condiciona la robustez operativa del sistema, al afectar directamente a la producción, la impulsión y la redistribución del agua cuando se producen alteraciones simultáneas en el litoral y en el suministro eléctrico.

10.4. Requisitos de respaldo: generación y redes protegidas

Para mitigar la fragilidad operativa derivada de la dependencia energética, diversos nodos críticos disponen de sistemas de generación de respaldo que permiten mantener su funcionamiento durante interrupciones puntuales del suministro eléctrico. En algunas islas, como El Hierro, estas medidas incluyen la presencia de generadores autónomos en estaciones de impulsión estratégicas, capaces de sostener el servicio durante intervalos acotados. Esta capacidad de respaldo proporciona un margen temporal que puede resultar decisivo para evitar interrupciones abruptas o para completar el llenado de depósitos que actúan como reservas de seguridad.

La efectividad de estas soluciones depende, no obstante, de factores operativos que pueden verse comprometidos durante eventos adversos. La accesibilidad a las instalaciones, la disponibilidad de combustible y la vulnerabilidad física de los propios generadores o de las redes eléctricas asociadas condicionan su eficacia real. En situaciones de impacto severo, el acceso a determinadas instalaciones puede verse limitado por desprendimientos, daños o el deterioro de infraestructuras viaarias, retrasando o dificultando el mantenimiento necesario.

Más allá de los sistemas individuales de respaldo, la protección de las redes eléctricas que suministran energía a las infraestructuras constituye un elemento clave para la resiliencia. El refuerzo estructural en áreas expuestas, la instalación de dispositivos de protección frente a sobrecargas o el establecimiento de rutas alternativas de alimentación eléctrica contribuyen a reducir el riesgo de interrupciones prolongadas. En paralelo, los depósitos interiores proporcionan una capacidad limitada pero significativa de amortiguación, permitiendo sostener el abastecimiento durante periodos cortos mientras se restablece la operación normal.

Aunque estas medidas no eliminan la vulnerabilidad inherente asociada a la dependencia energética y a la localización costera, sí permiten limitar el impacto de fallos puntuales y mejorar la capacidad de recuperación del sistema. Su eficacia depende, en gran medida, de la integración de criterios preventivos y de un mantenimiento continuo adaptado a las particularidades del entorno insular.

10.5. El talón de Aquiles: doble dependencia del litoral y de la energía

La interdependencia entre exposición costera y dependencia energética constituye uno de los rasgos estructurales que definen la vulnerabilidad del sistema hídrico en las islas volcánicas en general. La necesidad de situar en el litoral las infraestructuras esenciales para la producción y captación de agua, unida a la de-

pendencia funcional de estaciones de bombeo alimentadas por redes eléctricas sensibles a los mismos peligros, genera una doble dependencia que condiciona la estabilidad del conjunto. Asimismo, en un escenario de reducción progresiva de las precipitaciones y, por tanto, de disminución de la recarga de los recursos hídricos subterráneos y superficiales, la desalinización se coloca como un componente cada vez más relevante para garantizar la disponibilidad de agua potable en los sistemas insulares. Sin embargo, un incremento de la dependencia de este recurso no convencional implica, de forma paralela, un aumento de la vulnerabilidad del sistema, dada su elevada demanda energética y localización costera (Cruz-Pérez et al., 2022).

Esta vulnerabilidad no deriva de decisiones puntuales, sino de las propias características del entorno insular: la disponibilidad limitada de recursos, la topografía abrupta y la concentración de población y actividad en el ámbito litoral. En este contexto, la resiliencia no depende únicamente de la robustez de las infraestructuras críticas, sino de la coordinación de medidas preventivas, del mantenimiento continuo, de la redundancia energética y de la capacidad de amortiguación mediante almacenamiento interior. La planificación estratégica que integre criterios de seguridad hídrica y energética resulta fundamental para garantizar la continuidad del abastecimiento en escenarios adversos y minimizar el impacto de perturbaciones simultáneas sobre la población y los sectores productivos. En este marco, la continuidad de las inversiones en iniciativas orientadas a mejorar la eficiencia energética y a integrar fuentes renovables resulta fundamental para reducir la interdependencia entre los sectores hídrico y energético y, con ello, reforzar la resiliencia operativa de las islas. Estas medidas de respaldo y protección no eliminan la vulnerabilidad inherente asociada a la localización costera ni a la dependencia energética, pero sí permiten limitar el impacto de fallos puntuales y mejorar la capacidad de recuperación del sistema.

La comprensión de este «talón de Aquiles» estructural resulta esencial para orientar intervenciones que refuercen la estabilidad del sistema. Los capítulos siguientes desarrollan los distintos componentes de esta respuesta, desde soluciones basadas en procesos naturales hasta mejoras en gobernanza, operación e infraestructuras, que permitirán afrontar de manera más robusta los desafíos presentes y futuros.

10.6. Referencias bibliográficas

- Cruz, J. V., Coutinho, R., Pacheco, D., Cymbron, R., Antunes, P., Freire, P., & Mendes, S. (2011). Groundwater salinization in the Azores archipelago (Portugal). *Environmental Earth Sciences*, 62(6), 1273–1285. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0615-2>
- Cruz Pérez, N., & Santamarta, J. C. (2021). *La huella ecológica del agua en las Islas Canarias*. Universidad de La Laguna. <https://doi.org/10.25145/b.HuellaEcoCanarias.2021>
- Cruz-Pérez, N., Santamarta, J. C., Gamallo-Paz, I., Rodríguez-Martín, J., & García-Gil, A. (2022). A comparison between carbon footprint of water production facilities in the Canary Islands: Groundwater resources vs. seawater desalination. *Sustainable Water Resources Management*, 8(4), 121. <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00706-0>
- Custodio, E., Cabrera, M. D. C., Poncela, R., Puga, L.-O., Skupien, E., & Del Villar, A. (2016). Groundwater intensive exploitation and mining in Gran Canaria and Tenerife, Canary Islands, Spain: Hydrogeological, environmental, economic and social aspects. *Science of The Total Environment*, 557–558, 425–437. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.038>
- Desalination Lab DESAL+. (2021). *El sistema de desalación autónoma instalado por DESAL+ en la isla de MAIO es reconocido con el premio Greening The Islands 2021*. <https://www.desalinationlab.com/el-sistema-de-desalacion-autonoma-instalado-por-desal-en-la-isla-de-maio-es-reconocido-con-el-premio-greening-the-islands-2021/>
- Fernández Arozena, J. (2025, 8 de mayo). La Palma: hora de decidir su futuro energético. El Time. <https://www.eltiempo.es/opinion/53327-futuro-energetico-opinion-jose-arozena.html>
- GRAFCAN - Gobierno de Canarias. (2025). *Ortofoto aérea de Gran Canaria* [Ortofoto] <https://visor.grafcan.es/>
- Instituto Catalán de Energía. (2025). *Las centrales térmicas convencionales*. gencat. http://icaen.gencat.cat/es/energia/formes/electricitat/tecnologies/centrals_convencionals/
- ITC. (2025). *Instituto Tecnológico de Canarias - Canarias entra en el mapa mundial de la desalación con la planta de menor consumo energético*. <https://www.itccanarias.org/web/es/actualidad/noticias/canarias-entra-en-el-mapa-mundial-de-la-desalacion-con-la-planta-de-menor-consumo-energetico>
- Padrón, A. (2024, March 15). *La chimenea de la Central de Jinámar desaparecerá antes del verano sin voladura*. Cadena SER. <https://cadenaser.com/cana->

rias/2024/03/15/la-chimenea-de-la-central-de-jinamar-desapareciera-antes-del-verano-sin-voladura-ser-las-palmas/

Região Autónoma da Madeira. (2003). *Plano Regional da Água da Região Autónoma da Madeira: Relatório Técnico – Versão para Consulta Pública* (p. 328) [PRAM]. Secretaria Regional do Ambiente e dos Recursos Naturais. https://ifcn.madeira.gov.pt/images/Doc_Artigos/Divulgacao/publicacoes/livros/PRAMRelTec.pdf

Revista Técnica de Medio Ambiente. (2021). *Una desaladora solar suministra agua a habitantes de la isla de Maio gracias a la cooperación canaria*. <https://www.retema.es/actualidad/una-desaladora-solar-suministra-agua-habitantes-is-la-maio-gracias-cooperacion-canaria>

Santamarta, J. C., Rodríguez-Martín, J., Poncela, R., Fontes, J. C., Lobo De Pina, A., & Cruz-Pérez, N. (2022). Integrated Water Resource Management in the Macaronesia. *International Review of Civil Engineering (IRECE)*, 13(4), 290. <https://doi.org/10.15866/irece.v13i4.21523>

Santamarta, J. C., Rubiales, I. C., Rodríguez-Martín, J., & Cruz-Pérez, N. (2022). Water status in the Canary Islands related to energy requirements. *Energy Efficiency*, 15(2), 13. <https://doi.org/10.1007/s12053-021-10016-7>

Capítulo 11

Soluciones basadas en la naturaleza (SbN) adaptadas a islas volcánicas

Juan Carlos Santamarta Cereza

Megan Expósito Brazier

Jelena Koritnik

Noelia Cruz-Pérez

11.1. Enfoque general y papel de las SbN en islas volcánicas

Las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) son, según la Comisión Europea, *intervenciones inspiradas y respaldadas por procesos naturales que aportan beneficios ambientales, sociales y económicos mientras refuerzan la resiliencia territorial* (European Commission, 2025). En territorios volcánicos insulares, esta definición adquiere un matiz operativo concreto: las SbN no reemplazan las infraestructuras convencionales de captación, impulsión o desalinización, sino que actúan sobre el balance hídrico en puntos donde la intervención directa sobre el acuífero o la escorrentía puede contribuir a reducir presiones estructurales.

En las islas volcánicas existe un amplio abanico de SbN potenciales, aplicables a distintos sectores y escalas. Entre ellas, se incluyen el aprovechamiento de la energía geotérmica, la gestión del suelo orientada a prácticas de agricultura sostenible, así como la utilización del suelo y del paisaje para fortalecer la resiliencia de los ecosistemas mediante la reducción del riesgo de inundaciones, la mitigación de la erosión o la mejora de la recarga de acuíferos (López-Saavedra et al., 2023).

En este contexto, las soluciones basadas en la naturaleza constituyen un conjunto de intervenciones particularmente relevantes para aumentar la resiliencia de los sistemas hídricos insulares, mediante el aprovechamiento y restauración de procesos naturales. No obstante, el número de SbN implementadas en territorios volcánicos sigue siendo limitado y presenta una elevada variabilidad, condicionada por factores sociales, económicos y políticos, así como por la percepción del riesgo y el grado de aceptación por parte de la población local (López-Saavedra et al., 2023).

Si bien las SbN ofrecen un marco prometedor para aumentar la resiliencia hídrica, su aplicación en islas volcánicas responde a limitaciones específicas del

territorio. La conductividad hidráulica (K) de los materiales basálticos, con conductividades hidráulicas que pueden superar 10^{-3} m/s en coladas fracturadas, acelera el tránsito del agua hacia el mar. La capacidad natural de almacenamiento superficial es escasa: salvo embalses contruidos, el territorio no retiene volúmenes significativos (Santamarta, 2009). La irregularidad pluviométrica concentra la mayor parte de la precipitación anual en pocos eventos, con pérdidas rápidas por escorrentía. A esto se suma una demanda creciente (agrícola, urbana, turística) que presiona acuíferos ya comprometidos por descensos piezométricos o intrusión salina en zonas costeras (Braojos, 2023).

El cambio climático, como así prevén las proyecciones climáticas para las Islas Canarias del proyecto ARSINOE (Santamarta et al., 2026), actuarán como amplificadores: reduciendo la recarga media, intensificando los eventos extremos y acortando las ventanas de aprovechamiento. En este contexto, las SbN ofrecen intervenciones de bajo consumo energético orientadas a captar, infiltrar o retener agua antes de que abandone el sistema. Su eficacia, sin embargo, depende de condiciones locales: litología, pendiente, régimen de lluvias, calidad del agua de entrada; que deben verificarse caso a caso.

La importancia de estas soluciones deriva de su capacidad para incrementar la retención y regulación del recurso, proteger la calidad del agua subterránea y reducir la presión sobre fuentes convencionales altamente vulnerables. Su diseño requiere un conocimiento detallado del funcionamiento hidrogeológico, así como de la interacción entre usos del suelo, precipitaciones, infiltración y calidad de las aguas. Por ello, las SbN se conciben como medidas complementarias que refuerzan la infraestructura existente y no como sustitutos de los sistemas convencionales de extracción, almacenamiento y transporte

El proyecto europeo GENESIS ha definido un marco para la Macaronesia centrado en cinco tipologías principales:

1. Diques subterráneos: retención de flujos en acuíferos basálticos mediante barreras impermeables. En Canarias también se denominan «tranques de galería» que se llevan más de 100 años usando en las islas.
2. Galerías filtrantes: captación gravitacional en medios altamente permeables, también denominadas en Canarias galerías de agua.
3. Captación de lluvia: sistemas extensivos de aprovechamiento pluvial.
4. Recarga gestionada e infiltración: direccionamiento de agua hacia sectores del acuífero con mayor capacidad de almacenamiento.
5. Restauración de humedales: mejora de la regulación hidrológica y la calidad del agua.

11. Soluciones basadas en la naturaleza (SbN) adaptadas a islas volcánicas

Estas tipologías se integran con herramientas de monitorización inteligente y un gemelo digital que permite evaluar su comportamiento y ajustar la operación. El objetivo no es maximizar la implementación de SbN, sino identificar dónde cada tipología aporta beneficio neto sin generar efectos adversos sobre el sistema.

11.1.1. Encaje conceptual: SbN estrictas y medidas complementarias

Conviene precisar que no todas las intervenciones aquí descritas encajan de forma pura en la definición canónica de SbN. Las galerías filtrantes, por ejemplo, son infraestructuras construidas (túneles perforados en el terreno volcánico) que aprovechan procesos naturales (flujo gravitacional, filtración en medio poroso) pero no restauran ecosistemas ni incorporan diversidad biológica. Su inclusión en el marco del proyecto GENESIS responde a un criterio funcional: operan con bajo consumo energético, dependen del comportamiento natural del acuífero y complementan otras SbN estrictas como la recarga gestionada.

Esta distinción importa para evitar confusiones en la planificación: una galería filtrante no genera los mismos co-beneficios ambientales que un humedal restaurado, pero ambas pueden formar parte de un esquema integrado donde cada pieza cumple una función específica.

11.2. Diques subterráneos y regulación del flujo en acuíferos basálticos

Los diques volcánicos (intrusiones subverticales de baja permeabilidad que atraviesan las secuencias de lavas y piroclastos) constituyen una solución basada en la naturaleza de tipo geológico para la gestión del agua subterránea en islas volcánicas, aunque rara vez se conceptualizan explícitamente como tal. El estudio de Marazuela et al. (2023) demuestra, mediante datos hidrogeológicos e hidroquímicos de la galería Los Padrones (El Hierro, Canarias) y modelización numérica 2D, que estos diques compartimentan el acuífero, elevan el gradiente hidráulico más de un orden de magnitud respecto a zonas sin diques y deprimen la interfaz salina tierra adentro.

La reconstrucción con cierres de hormigón armado de esos diques una vez perforados por una galería permite acumular agua como si fuera un depósito subterráneo permitiendo la regulación de caudales del mismo. En acuíferos volcánicos, la alta permeabilidad de las coladas basálticas y la presencia de discontinuidades (diques volcánicos naturales, paleocauces, contactos litológicos) generan

trayectorias preferentes de flujo que pueden aprovecharse para crear almacenamientos subterráneos controlados (Santamarta et al., 2017a). Esta tipología de cierre hidráulico (Figura 11.1), incluida entre las SbN promovidas por el proyecto GENESIS, es particularmente relevante en islas donde la escasez de almacenamiento superficial limita la regulación natural del sistema.

Los beneficios potenciales incluyen un aumento de la resiliencia frente a sequías prolongadas, la reducción de la dependencia de recursos energéticamente intensivos y una mayor estabilidad del sistema frente a presiones climáticas futuras. No obstante, su implementación exige evaluar riesgos asociados a posibles modificaciones del régimen piezométrico, así como el seguimiento de la salinidad y otros parámetros hidroquímicos para evitar efectos indeseados sobre la calidad del agua, especialmente en acuíferos costeros expuestos a intrusión marina.

Condiciones de aplicabilidad

Un dique subterráneo solo es eficaz si se cumplen tres condiciones:

- 1) Existencia de un sustrato impermeable o de baja permeabilidad a profundidad alcanzable, que actúe como base del almacenamiento. Sin esta barrera inferior, el agua infiltrada escapa por debajo de la estructura.
- 2) Flujo subterráneo concentrado y cuantificable. La construcción de un dique en una zona de flujo difuso genera poca retención efectiva. La caracterización previa debe identificar gradientes piezométricos, direcciones de flujo y caudales estimados.
- 3) Distancia suficiente a la costa o a zonas con riesgo de intrusión salina. Un dique que eleve el nivel freático en un acuífero costero puede modificar el equilibrio con la cuña salina; si la elevación es insuficiente o la geometría desfavorable, el efecto neto puede ser neutro o incluso contraproducente (Marazuela et al., 2023).

Criterios operativos

La variable de control principal es el nivel piezométrico aguas arriba del dique. El diseño debe definir:

- 1) Nivel máximo admisible.
- 2) Nivel mínimo operativo: por debajo del cual el almacenamiento deja de ser funcional para los usos previstos.
- 3) Tasa de extracción compatible: el volumen que puede captarse sin agotar la reserva en periodos secos.

11. Soluciones basadas en la naturaleza (SbN) adaptadas a islas volcánicas

La monitorización debe incluir piezómetros aguas arriba y aguas abajo, con registro continuo o al menos quincenal (Tabla 11.1). La conductividad eléctrica es un indicador indirecto de posibles cambios en la mezcla con aguas más salinas.



Fuente: Santamarta, J.C. (2026)

Figura 11.1. Cierre hidráulico en la isla de El Hierro

Tabla 11.1. Modos de fallo, indicadores de alerta y medidas de mitigación

Modo de fallo	Indicador de alerta	Mitigación
Filtración por la base o los flancos	Nivel piezométrico que no responde al cese de extracciones	Inyección de lechada, extensión del anclaje al sustrato impermeable
Modificación del equilibrio salino en acuíferos costeros	Aumento de conductividad en piezómetros de control	Reducción de extracciones, evaluación de la posición de la cuña salina
Afección a captaciones de terceros aguas abajo	Descenso de caudales en pozos o galerías existentes	Compensación, rediseño del régimen de operación

Fuente: elaboración propia (2026)

11.3. Galerías filtrantes: captación controlada y regulación en medios altamente permeables

Las galerías filtrantes constituyen una solución tradicional en sistemas volcánicos que, en el marco del proyecto GENESIS, se considera una SbN por su capacidad para facilitar la captación de caudales en zonas de alta permeabilidad sin necesidad de bombeo continuo. Estos túneles, excavados en materiales volcánicos, permiten interceptar flujos subterráneos con un coste energético reducido y con una influencia directa en la regulación del acuífero, especialmente en zonas de tránsito rápido (Figura 11.2).

En las islas de la Macaronesia, la aplicación de galerías filtrantes requiere tener en cuenta condiciones hidrogeológicas complejas, como la heterogeneidad litológica o la presencia de estructuras volcánicas que definen trayectorias preferentes de flujo. Además, pueden producirse episodios de gases volcánicos o de variaciones térmicas que requieren medidas de seguridad y sistemas de ventilación adecuados durante su construcción o mantenimiento, tal y como se ha documentado en diferentes túneles y galerías de Madeira (Brum da Silveira et al., 2010) o Canarias (Santamarta, 2017b).

La utilidad de estas soluciones radica en su integración con sistemas gravitacionales y en su contribución a aumentar la disponibilidad del recurso sin incrementar la demanda energética. Asimismo, su diseño modular permite combinarlas con otras SbN, como la recarga gestionada, facilitando un esquema de gestión integrado que mejora la estabilidad del acuífero y reduce la presión sobre pozos someros o fuentes costeras vulnerables.

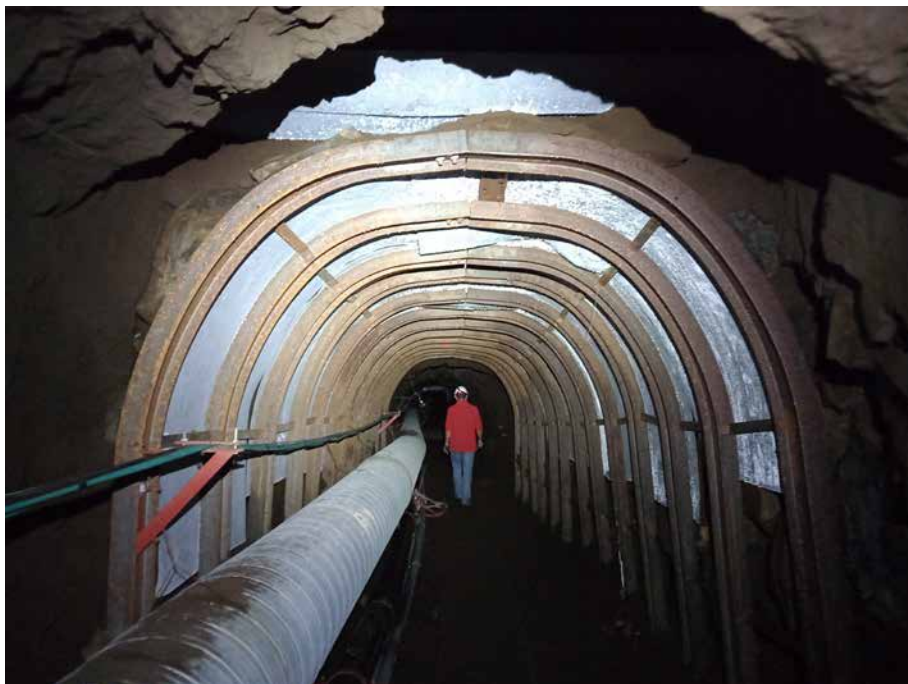
Condiciones de aplicabilidad

Las galerías filtrantes son viables cuando:

- 1) El gradiente topográfico permite conducción gravitacional desde la zona de captación hasta el punto de entrega. Si la galería termina en una cota inferior al uso previsto, se requiere impulsión y la ventaja energética se pierde. En la isla de Tenerife algunas galerías han quedado debajo de la cota de los canales principales de distribución y deben bombear a cotas superiores sus caudales.
- 2) Existe un nivel freático estable o predecible en la cota de excavación. Las galerías que atraviesan zonas vadosas sin alcanzar el acuífero saturado captan solo infiltración directa, con caudales muy variables. Por ejemplo, las galerías que captan agua de acuíferos colgados.

11. Soluciones basadas en la naturaleza (SbN) adaptadas a islas volcánicas

- 3) La calidad del agua interceptada es compatible con el uso previsto. En zonas con emisiones de CO_2 volcánico u otros gases, el agua puede presentar acidez elevada, concentraciones de metales o temperaturas que requieren tratamiento o limitan su aplicación.



Fuente: Santamarta, J.C. (2026)

Figura 11.2. Sección de una galería con refuerzos estructurales en tramos inestables

Criterios operativos

La variable de control es el caudal de salida, que refleja el estado del acuífero aguas arriba. Un descenso sostenido indica agotamiento de la reserva o interferencia con otras captaciones (Tabla 11.2). El seguimiento debe incluir:

- 1) Aforo continuo o semanal en la boca de la galería.
- 2) Conductividad y temperatura como indicadores de cambios en la procedencia del agua.
- 3) Control de gases (CO_2 principalmente) en galerías con riesgo volcánico, especialmente durante trabajos de mantenimiento.

Tabla 11.2. Modos de fallo, indicadores de alerta y medidas de mitigación

Modo de fallo	Indicador de alerta	Mitigación
Colapso parcial de la galería	Reducción brusca del caudal, aparición de turbidez	Inspección, entibación, refuerzo de tramos inestables (figura 11.2)
Obstrucción por sedimentos o precipitados	Descenso gradual del caudal sin cambios piezométricos	Limpieza periódica, instalación de decantadores
Emisión de gases peligrosos	Detección de $\text{CO}_2 > 0,5 \%$ o $\text{H}_2\text{S} > 10 \text{ ppm}$ en el aire	Ventilación forzada, restricción de acceso, protocolos de seguridad
Interferencia con otras captaciones	Descenso de niveles en pozos o galerías vecinas	Coordinación de explotación, reducción de extracciones
Deterioro de la calidad por intrusión de aguas superficiales	Aumento de turbidez tras lluvias, presencia de coliformes	Sellado de fracturas, protección de la zona de recarga

Fuente: elaboración propia (2026)

Las galerías no restauran ecosistemas ni incorporan biodiversidad; son infraestructuras construidas. Su inclusión en el marco del proyecto GENESIS se justifica por su dependencia de procesos naturales (flujo gravitacional, filtración en medio poroso fracturado) y por su bajo consumo energético comparado con pozos de bombeo o sondeos. El beneficio ambiental es indirecto: al reducir la necesidad de extracciones motorizadas, disminuyen la huella de carbono del sistema hídrico.

11.4. Captación de lluvia y soluciones extensivas de aprovechamiento

La captación de lluvia consiste en captar, almacenar y utilizar la precipitación antes de que se convierta en escorrentía. En islas volcánicas con lluvias concentradas en pocos eventos intensos, esta estrategia permite aprovechar volúmenes que de otro modo se perderían rápidamente.

En el marco del proyecto GENESIS, la captación de lluvia se concibe como una solución flexible que puede aplicarse tanto en entornos urbanos como rurales. Su implantación puede abarcar desde pequeños sistemas de recogida en cubiertas, depósitos modulares y canalizaciones asociadas a equipamientos comunitarios, hasta infraestructuras de mayor escala que integren balsas de almacenamiento, dispositivos de retención superficial o áreas acondicionadas para la infiltración. Este enfoque permite incrementar la disponibilidad de agua para usos domésticos, agrícolas o de emergencia, al tiempo que reduce la demanda sobre acuíferos sometidos a presión creciente.

11. Soluciones basadas en la naturaleza (SbN) adaptadas a islas volcánicas

La eficacia de estas soluciones depende de una adecuada planificación territorial que tenga en cuenta factores como la intensidad y distribución espacial de las lluvias, la capacidad de infiltración de los suelos volcánicos y la integración con sistemas de distribución existentes. En zonas donde las lluvias torrenciales pueden generar escorrentías de alta energía, la captación controlada contribuye además a reducir el riesgo de erosión y a mejorar la gestión de avenidas, actuando como medida de regulación adicional (Tabla 11.3).

Condiciones de aplicabilidad

La captación de lluvia es útil cuando:

- 1) La precipitación media anual es suficiente para generar volúmenes aprovechables. En zonas con menos de 250 mm/año, el coste de la infraestructura puede superar el beneficio. En zonas con más de 600 mm/año y eventos concentrados, el potencial es alto.
- 2) Existe superficie de captación disponible: cubiertas de edificios, explanadas, laderas acondicionadas. La calidad del agua depende del material de la superficie y de la contaminación atmosférica.
- 3) El uso previsto tolera la calidad del agua captada. El agua de lluvia recogida en cubiertas puede contener partículas, metales de la corrosión o contaminantes depositados. Para riego o recarga, los requisitos son menores.

En islas más secas como Fuerteventura y Lanzarote, donde la media anual puede estar por debajo de 250 mm/año, hay un matiz importante: no todo depende de «cuánta» lluvia cae, sino de cómo cae y de si existe una forma barata y robusta de capturarla. Ahí encajan *las gaviás*, un sistema tradicional de cosecha de agua de escorrentía: se conducen las avenidas cortas de barrancos y laderas hacia recintos agrícolas ligeramente aterrazados, donde el agua se lamina, se infiltra y recarga humedad en el suelo (y, en parte, el subsuelo). Con pocas tormentas bien aprovechadas se puede sostener cultivo de secano mejorado, reducir erosión y retener sedimentos fértiles. No es una infraestructura «de lujo»: funciona porque usa gravedad, tierra y mantenimiento local. Su límite es conocido: si los episodios se vuelven más raros o más violentos, o si falta conservación (roturas de diques, colmatación, pérdida de tomas), el rendimiento cae. Aun así, en escenarios de lluvias escasas y concentradas, las gaviás siguen siendo una solución insular muy propia: baja tecnología, alta adaptación al pulso irregular de la lluvia.

Criterios operativos

Las variables de control son:

- 1) Volumen almacenado respecto a la capacidad del depósito y la demanda prevista.
- 2) Calidad del agua: turbidez, pH, conductividad, presencia de contaminantes específicos según el uso.
- 3) Eficiencia de captación: relación entre precipitación caída y volumen efectivamente almacenado, descontando pérdidas por evaporación, rebose o derivación.

Tabla 11.3. Modos de fallo y mitigación en la captación de agua de lluvia

Modo de fallo	Indicador de alerta	Mitigación
Rebose por capacidad insuficiente	Pérdida de volumen durante eventos intensos	Ampliación de almacenamiento, derivación a infiltración
Contaminación del agua almacenada	Turbidez elevada, presencia de patógenos, olores	Pretratamiento: filtración inicial, desvío de la primera escorrentía (first flush diverter) y tratamiento posterior
Proliferación de mosquitos	Presencia de larvas en depósitos abiertos	Cubrición, mallas, tratamiento biológico
Deterioro estructural del depósito	Fugas, grietas, corrosión	Inspección periódica, reparación, sustitución
Dependencia excesiva en años secos	Almacenamiento insuficiente para cubrir demanda	Dimensionamiento para escenarios de sequía, fuentes alternativas

Fuente: elaboración propia (2026)

La captación de lluvia constituye una línea de actuación especialmente relevante en islas volcánicas sometidas a una elevada variabilidad pluviométrica y con escasa capacidad natural de almacenamiento superficial. La irregularidad estacional, caracterizada por periodos de precipitaciones intensas seguidos de intervalos secos prolongados, limita la retención natural del recurso y acentúa la necesidad de sistemas complementarios que permitan aprovechar eficazmente los episodios de lluvia cuando estos se producen.

También este puede alimentar sistemas de recarga gestionada: en lugar de almacenar el agua en depósitos superficiales, se dirige hacia zonas de infiltración que recargan el acuífero. Esta combinación reduce pérdidas por evaporación y aprovecha la capacidad de almacenamiento subterráneo, pero requiere que el agua captada tenga calidad compatible con la recarga y que la zona de infiltración esté correctamente caracterizada.

11.5. Recarga gestionada e infiltración en suelos volcánicos

La recarga gestionada, junto con los sistemas de infiltración, constituye una de las SbN con mayor potencial para reforzar la disponibilidad de agua en islas volcánicas, especialmente en contextos donde el agotamiento progresivo de los acuíferos y la presión por la demanda exigen incrementar el almacenamiento subterráneo.

La recarga gestionada consiste en dirigir agua (de lluvia, de escorrentía tratada o de otras fuentes) hacia el acuífero de forma controlada, incrementando el almacenamiento subterráneo. En medios basálticos, la alta permeabilidad facilita la infiltración, pero también acelera el tránsito: el agua puede atravesar la zona no saturada en horas o días, lo que exige diseñar la intervención para que el agua alcance sectores del acuífero donde permanezca almacenada.

El proyecto europeo GENESIS identifica esta tipología como una línea prioritaria para aumentar la resiliencia frente a escenarios de estrés hídrico futuro, así como para mejorar la estabilidad del sistema ante sequías prolongadas. Su aplicación requiere un análisis detallado de la geología, la hidroquímica y la dinámica piezométrica, con el fin de evitar efectos indeseados como la movilización de sales, el ascenso de frentes salinos en zonas costeras o la infiltración hacia niveles someros susceptibles a contaminación puntual.

La recarga gestionada puede combinarse con la captación de lluvia, sistemas de drenaje sostenible, áreas de retención temporal y pequeñas obras de regulación superficial. Estas intervenciones, además de incrementar el volumen almacenado, pueden mejorar la calidad del agua al favorecer procesos naturales de filtración y atenuación. La integración con sistemas de monitorización continua resulta esencial para evaluar el comportamiento del acuífero, detectar tendencias relevantes en parámetros como la salinidad o los nitratos y ajustar la operación de manera dinámica (Tabla 11.4).

Condiciones de aplicabilidad

La recarga gestionada es viable cuando:

- 1) La calidad del agua de recarga es compatible con el acuífero receptor. Infiltrar agua con alta carga de sedimentos colmata los poros; infiltrar agua con nitratos o contaminantes orgánicos puede degradar la calidad del acuífero.
- 2) La zona de infiltración está suficientemente alejada de fuentes de contaminación y de la cuña salina en acuíferos costeros. La recarga en posiciones inadecuadas puede empujar agua dulce hacia el mar o movilizar contaminantes.

Criterios operativos

- 1) Tasa de infiltración: medida en $\text{m}^3/\text{día} \cdot \text{m}^2/\text{día}$, debe mantenerse dentro de un rango que evite la colmatación (límite superior) y garantice un aporte significativo (límite inferior).
- 2) Calidad del agua de entrada: turbidez $< 10 \text{ NTU}^1$ para evitar colmatación rápida; conductividad y composición química compatibles con el acuífero.
- 3) Respuesta piezométrica: el nivel en piezómetros de control debe mostrar elevación durante la recarga y descenso controlado en periodos de extracción.

Tabla 11.4. Modos de fallo y mitigación en la recarga de acuíferos

Modo de fallo	Indicador de alerta	Mitigación
Colmatación de la superficie de infiltración	Reducción de la tasa de infiltración $> 50 \%$	Escarificado, retirada de capa colmatada, pretratamiento del agua
Movilización de sales o contaminantes del suelo	Aumento de conductividad o concentración de nitratos en piezómetros	Reducción de la tasa de recarga, cambio de fuente de agua
Ascenso del frente salino en acuíferos costeros	Aumento de cloruros en pozos de control	Reubicación de la zona de recarga, aumento de la distancia a la costa
Saturación excesiva con surgencias	Aparición de nacientes, encharcamiento	Reducción del volumen recargado, instalación de drenajes
Contaminación del acuífero por agua de mala calidad	Detección de patógenos, compuestos orgánicos o metales	Suspensión de la recarga, tratamiento previo obligatorio

Fuente: elaboración propia (2026)

11.6. Restauración de humedales y mejora de la calidad del agua

La restauración de humedales se incluye entre las SbN identificadas por el proyecto europeo GENESIS por su potencial para mejorar la regulación hidrológica y la calidad del agua en contextos con limitadas superficies naturales de retención. La restauración de humedales implica recuperar o crear áreas de reten-

¹ NTU (Nephelometric Turbidity Unit): la unidad que se usa para expresar la turbidez del agua, es decir, lo «turbia» o «clara» que está. Se obtiene midiendo con un equipo cuánto se dispersa un haz de luz al atravesar el agua por culpa de partículas en suspensión (arcillas, limo, materia orgánica, etc.). Más NTU = agua más turbia. En España, el RD 3/2023 fija para turbidez (UNF) 0,8 a la salida de ETAP/depósito de cabecera.

11. Soluciones basadas en la naturaleza (SbN) adaptadas a islas volcánicas

ción temporal de agua con vegetación asociada, que mejoran la regulación hidrológica y la calidad del agua mediante procesos naturales de filtración, sedimentación y biodegradación.

En islas volcánicas, donde los humedales son escasos y a menudo han sido alterados por la ocupación del territorio, estas intervenciones pueden desempeñar un papel relevante en la reducción de sedimentos, la atenuación de contaminantes y la moderación de las descargas hacia cauces o zonas costeras.

El restablecimiento de áreas húmedas permite reforzar procesos naturales de depuración asociados a la vegetación y a la interacción entre agua y sedimentos, generando beneficios tanto para la protección de los ecosistemas como para la estabilidad del sistema hídrico. En sectores donde la erosión o las avenidas son recurrentes, los humedales actúan como zonas de amortiguación que disminuyen la velocidad del flujo y contribuyen a una gestión más equilibrada de la escorrentía (Tabla 11.5).

Condiciones de aplicabilidad

Los humedales restaurados aportan beneficio cuando:

- 1) Existe espacio disponible en zonas bajas del territorio donde el agua tiende a acumularse de forma natural o puede conducirse sin impulsión.
- 2) El régimen hidrológico permite mantener niveles de agua suficientes para sostener vegetación hidrófila durante la mayor parte del año. Un humedal que se seca completamente durante meses pierde funcionalidad y puede convertirse en fuente de polvo o de emisiones.
- 3) Los usos del suelo circundantes son compatibles. Un humedal rodeado de agricultura intensiva con aplicación de fertilizantes y pesticidas puede recibir cargas contaminantes que superen su capacidad de depuración.

Criterios operativos

- 1) Nivel de agua: debe mantenerse en un rango que sostenga la vegetación objetivo sin generar encharcamientos excesivos ni pérdidas por evaporación superiores al aporte.
- 2) Calidad del agua de salida: si el humedal se diseña para depuración, deben monitorizarse parámetros como DBO, nitratos, fosfatos y sólidos en suspensión a la entrada y salida.
- 3) Estado de la vegetación: cobertura, diversidad de especies, presencia de especies invasoras.

Tabla 11.5. Modos de fallo y mitigación en la restauración de humedales y mejora de la calidad del agua

Modo de fallo	Indicador de alerta	Mitigación
Deseccación por déficit de aporte	Descenso del nivel, estrés de la vegetación	Aporte complementario, rediseño del balance hídrico
Colmatación por exceso de sedimentos	Reducción de la lámina de agua, pérdida de volumen útil	Dragado selectivo, pretratamiento del agua de entrada
Eutrofización	Proliferación de algas, reducción del oxígeno disuelto	Control de aportes de nutrientes, cosecha de biomasa
Invasión por especies exóticas	Dominancia de una especie, pérdida de diversidad	Erradicación temprana, gestión activa de la vegetación
Emisión de metano en condiciones anaerobias	Olor a sulfhídrico, burbujas en superficie	Mantenimiento de niveles de agua que eviten anoxia prolongada

Fuente: elaboración propia (2026)

Los humedales restaurados generan co-beneficios que otras SbN no aportan: hábitat para fauna, valor paisajístico, regulación microclimática. Sin embargo, su capacidad de almacenamiento es limitada comparada con acuíferos o embalses, y su eficacia depuradora depende del tiempo de residencia del agua, si el flujo es demasiado rápido, los procesos naturales no completan su función.

En islas volcánicas con topografía abrupta, las ubicaciones aptas para humedales son escasas y suelen competir con otros usos del suelo. La planificación debe evaluar si el beneficio hídrico y ambiental justifica la ocupación de superficie en cada caso concreto.

Su integración dentro de un conjunto más amplio de SbN permite complementar actuaciones de captación de lluvia, recarga gestionada e infiltración, creando sistemas multifuncionales que mejoran la seguridad hídrica y promueven beneficios ambientales adicionales. La restauración de humedales requiere, sin embargo, un análisis detallado de la geomorfología local, la disponibilidad de espacio y la compatibilidad con los usos del suelo existentes.

11.7. Integración con gemelo digital y monitorización inteligente

La integración de las SbN con herramientas de monitorización inteligente y con un gemelo digital constituye uno de los elementos diferenciales del enfoque desarrollado en el proyecto GENESIS. La monitorización inteligente y el gemelo digital no son SbN en sí mismos, sino herramientas que habilitan la operación adaptativa de las SbN y del sistema hídrico en su conjunto. Su valor reside en

convertir datos en decisiones: sin una conexión clara entre lo que se mide y lo que se hace, la monitorización es solo registro histórico.

Estas tecnologías permiten vincular procesos naturales: captación, infiltración, retención y mejora de la calidad del agua; con sistemas de observación continua, de manera que las intervenciones puedan evaluarse y ajustarse en tiempo real. La disponibilidad de datos actualizados sobre niveles piezométricos, conductividad, turbidez, caudales o parámetros meteorológicos habilita un seguimiento más preciso del comportamiento del sistema y facilita la detección temprana de tendencias relevantes.

El gemelo digital actúa como una plataforma que integra información ambiental, hidrológica y operativa, permitiendo simular distintos escenarios y anticipar respuestas frente a variaciones climáticas o cambios en la demanda. En el ámbito de las SbN, esta herramienta permite evaluar la eficacia de diques subterráneos, la evolución del almacenamiento asociado a la recarga gestionada, los efectos de la captación de lluvia o el papel regulador de humedales restaurados. La combinación de monitorización continua y modelización proporciona, además, una base sólida para la toma de decisiones en materia de gestión adaptativa y planificación territorial (Tabla 11.6).

Tabla 11.6. Parámetros de monitorización inteligente y decisiones operativas habilitadas en SbN (gemelo digital GENESIS)

Parámetro	Ubicación típica	Decisión que habilita
Nivel piezométrico	Piezómetros aguas arriba/abajo de diques, zonas de recarga	Ajustar tasa de extracción, activar/desactivar recarga, detectar tendencias de agotamiento
Conductividad eléctrica	Pozos costeros, salida de galerías, sobre todo en galerías en trancada	Detectar intrusión salina incipiente, modificar régimen de bombeo
Turbidez	Entrada a zonas de recarga, salida de captaciones	Suspender recarga si supera umbral, activar pretratamiento
Caudal	Bocas de galerías, salidas de humedales, puntos de derivación	Verificar funcionamiento, detectar obstrucciones, calcular balances
Temperatura	Galerías, zonas de recarga	Identificar anomalías, evaluar mezcla de aguas de distinta procedencia
Concentración de gases (CO ₂ , H ₂ S)	Interior de galerías, zonas de trabajo	Activar ventilación, restringir acceso, proteger personal

Fuente: elaboración propia (2026)

11.7.1. El gemelo digital como plataforma de simulación

El gemelo digital integra datos de monitorización con modelos hidrogeológicos y operativos. Su utilidad principal no es «replicar la realidad», tarea imposible con precisión completa, sino permitir simulaciones de tipo «qué pasaría si»:

- ¿Qué ocurre si se incrementa la recarga un 20 % durante tres meses?
- ¿Cómo responde el nivel piezométrico si se detiene la extracción en un pozo durante una sequía?
- ¿Cuánto tarda en recuperarse el acuífero tras un episodio de intrusión salina?

Estas simulaciones informan decisiones de planificación y operación, pero no las sustituyen. El modelo tiene incertidumbres (parámetros estimados, simplificaciones de la geometría, datos de entrada con errores) que deben comunicarse junto con los resultados.

11.7.2. Limitaciones y riesgos de la monitorización

La monitorización genera costes de instalación, mantenimiento, transmisión de datos y análisis. Un sistema con muchos sensores que no se mantienen o cuyos datos no se procesan es peor que uno más sencillo pero funcional (Figura 11.3). El diseño debe responder a preguntas concretas:



Fuente: Santamarta, J.C. (2026)

Figura 11.3. Instalación de un sensor multiparamétrico en un pozo-galería de la isla de El Hierro

11. Soluciones basadas en la naturaleza (SbN) adaptadas a islas volcánicas

- ¿Qué decisión tomamos si este sensor detecta una anomalía?
- ¿Quién recibe la alerta y en qué plazo debe actuar?
- ¿Qué hacemos si el sensor falla o transmite datos erróneos?

Sin respuestas claras a estas preguntas, la monitorización es un gasto, no una inversión.

Finalmente, el uso de sensores y sistemas de transmisión remota facilita la observación de zonas de difícil acceso, como conducciones subterráneas, áreas de infiltración o sectores costeros expuestos. Esta capacidad es especialmente relevante en islas con topografía abrupta y redes distribuidas en entornos frágiles, donde las operaciones de mantenimiento pueden verse condicionadas por la accesibilidad. Así, la integración entre SbN, monitorización inteligente y gemelo digital configura un marco operativo que refuerza la resiliencia del sistema y mejora su capacidad de respuesta ante condiciones cambiantes.

11.8. Ruta de implantación en la Macaronesia

La implantación de SbN en islas volcánicas no es un proceso lineal ni replicable sin adaptación. Cada isla presenta condiciones hidrogeológicas, climáticas y de gobernanza distintas. Por lo tanto se requiere un proceso escalonado que combine el análisis hidrogeológico, la planificación territorial y la integración tecnológica. En primer lugar, es necesario realizar una caracterización detallada del medio físico, identificando zonas con potencial para la captación de lluvia, la recarga gestionada, la construcción de cierres hidráulicos o la restauración de humedales. Esta fase inicial incluye el estudio de estructuras volcánicas, permeabilidad, niveles piezométricos, riesgos geodinámicos y parámetros de calidad.

A continuación, deben desarrollarse evaluaciones funcionales que determinen la viabilidad técnica de cada intervención, su compatibilidad con infraestructuras existentes y su potencial para integrarse en la operación cotidiana del sistema. La disponibilidad de datos y la calidad de la información, incluida la monitorización histórica, los registros meteorológicos y los mapas hidrogeológicos, condicionan la profundidad del análisis y la selección final de medidas.

La tercera fase implica la integración con plataformas de modelización y monitorización, permitiendo simular diferentes configuraciones, evaluar escenarios climáticos y analizar el comportamiento del sistema ante cambios en la demanda o en las condiciones extremas. Esta etapa es esencial para ajustar el diseño y garantizar que las SbN se incorporen de forma coherente al conjunto del sistema hídrico.

Finalmente, la implantación requiere un despliegue progresivo, comenzando por actuaciones piloto o sectores estratégicos que permitan validar resultados y adaptar el modelo a las particularidades de cada isla. El proceso incluye la formación de operadores, la coordinación entre administraciones y la creación de mecanismos de seguimiento que aseguren la continuidad del funcionamiento y la integración con otras herramientas de gestión.

Fase 1: Caracterización y diagnóstico

- Recopilación de información existente: mapas hidrogeológicos, series de precipitación, inventarios de captaciones, datos de calidad.
- Identificación de vacíos de información críticos.
- Campañas de campo para caracterizar zonas candidatas: geofísica, piezometría, aforos, muestreo hidroquímico.

Criterio de avance: no se pasa a la siguiente fase sin un modelo conceptual del sistema hídrico que identifique flujos principales, zonas de recarga/descarga y limitaciones de calidad.

Fase 2: Evaluación de viabilidad

- Análisis de cada tipología de SbN frente a las condiciones locales.
- Identificación de ubicaciones candidatas con sus condicionantes.
- Estimación de costes, beneficios y riesgos.
- Consulta con operadores, administraciones y usuarios.

Criterio de avance: selección de 2–3 actuaciones prioritarias con justificación técnica y acuerdo institucional.

Fase 3: Diseño e integración con monitorización

- Diseño de detalle de las actuaciones seleccionadas.
- Definición de la red de monitorización asociada: ¿qué se mide?, ¿dónde?, ¿con qué frecuencia?, ¿quién analiza los datos?
- Integración con el gemelo digital o con sistemas de gestión existentes.

Criterio de avance: proyecto ejecutable con presupuesto, cronograma y protocolo de seguimiento.

11. Soluciones basadas en la naturaleza (SbN) adaptadas a islas volcánicas

Fase 4: Ejecución piloto y validación

- Construcción o implementación de las actuaciones.
- Periodo de prueba con monitorización intensiva.
- Ajuste de parámetros operativos según respuesta observada.

Criterio de avance: funcionamiento estable durante al menos un ciclo hidrológico completo (12–18 meses).

Fase 5: Escalado y mantenimiento

- Extensión a otras ubicaciones si los resultados son positivos.
- Establecimiento de rutinas de mantenimiento y actualización del sistema de monitorización.
- Revisión periódica del modelo de gestión.

Las soluciones basadas en la naturaleza ofrecen un marco de intervención capaz de reforzar la seguridad hídrica en islas volcánicas sometidas a presiones crecientes por la demanda, la variabilidad climática y la limitada capacidad de almacenamiento superficial. Su implementación permite aprovechar procesos naturales para incrementar la disponibilidad, mejorar la calidad y reducir la vulnerabilidad del sistema, especialmente en territorios donde la geomorfología y la estructura hidrogeológica condicionan de forma severa la captación y la distribución del recurso.

La integración de estas medidas con sistemas de monitorización y gemelos digitales amplía su potencial, al permitir una gestión adaptativa basada en información continua y en la evaluación dinámica de escenarios. Este enfoque sitúa a las SbN como un componente estratégico dentro de la planificación hídrica insular, complementando infraestructuras convencionales y aumentando la resiliencia operativa.

11.9. Cierre: límites y decisiones pendientes

Las SbN no son una solución universal para la escasez hídrica en islas volcánicas. Su aportación es incremental: pueden mejorar el balance hídrico, pero no compensan déficits estructurales derivados de demandas que superan la capacidad de recarga natural. Tampoco eliminan la necesidad de infraestructuras convencionales (desalinización, bombeos, redes de conducción y distribución) que seguirán siendo el soporte principal del abastecimiento.

Su valor reside en tres ámbitos: (1) reducción de la dependencia energética al aprovechar flujos gravitacionales e infiltración natural; (2) mejora de la resiliencia frente a eventos extremos al incrementar el almacenamiento subterráneo y la capacidad de regulación; (3) generación de co-beneficios ambientales, especialmente en el caso de humedales restaurados.

Las decisiones pendientes para consolidar este enfoque incluyen:

- Definir umbrales operativos específicos para cada tipología y cada isla, basados en datos locales y no en valores genéricos de la literatura.
- Establecer protocolos de mantenimiento que aseguren la funcionalidad a largo plazo, con asignación clara de responsabilidades y recursos.
- Evaluar la interacción entre SbN y otras captaciones para evitar conflictos por el recurso o afecciones no previstas a terceros.
- Comunicar los límites de estas soluciones a decisores y usuarios, evitando expectativas desproporcionadas.

El marco del proyecto GENESIS aporta metodología y casos piloto. La consolidación de las SbN como componente estable de la gestión hídrica insular dependerá de la capacidad de las administraciones y operadores para integrar estas intervenciones en su práctica cotidiana, con recursos sostenidos y criterios técnicos rigurosos.

11.10. Referencias bibliográficas

- Brum da Silveira, A., Madeira, J., Ramalho, R., Fonseca, P., & Prada, S. (2010). Notícia Explicativa da Carta Geológica da Ilha da Madeira na escala 1:50 000, Folhas A e B. Funchal, Madeira, Portugal. Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais, Região Autónoma da Madeira & Universidade da Madeira. 47 p.
- Custodio Gimena, E., & Santamarta, J. C. (2020). Recarga de acuíferos en un contexto de cambio climático. En J. C. Santamarta Cerezal & J. Rodríguez Martín, Los procesos de planificación hidrológica en la península ibérica e islas en un contexto de cambio climático (pp. 59-82). Colegio de Ingenieros de Montes.
- European Commission. (2025). *Nature-based solutions*. Research and Innovation. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/environment/nature-based-solutions_en
- European Commission. (2025, June 17). Geologically Enhanced Nature-based Solutions for climate change resiliency of critical water Infrastructure (GENE-

- SIS) (Grant agreement ID: 101157447) [Project fact sheet]. CORDIS - EU research results. <https://doi.org/10.3030/101157447>
- López-Saavedra, M., Martí, J., & Planagumà, L. (2023). How Effective Risk Assessment and Management Is the Key to Turning Volcanic Islands into a Source of Nature-Based Solutions. *Land*, 12(3), 686. <https://doi.org/10.3390/land12030686>
- Marazuela, M. Á., Baquedano, C., Cruz-Pérez, N., Martínez-León, J., Laspidou, C., Santamarta, J. C., & García-Gil, A. (2023). Dyke-impounded fresh groundwater resources in coastal and island volcanic aquifers: Learning from the Canary Islands (Spain). *Science of the Total Environment*, 899. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.165638>
- Santamarta, J.C., Hernández, & Rodríguez-Losada. (2017a). Volcanic dikes engineering properties for storing and regulation of the underground water resources in volcanic islands. En *Volcanic Rock Mechanics: Rock Mechanics and Geo-engineering in Volcanic Environments* (pp. 95-98). CRC Press.
- Santamarta, J. C. (2009). Singularidades sobre la construcción, planificación y gestión de las obras y recursos hídricos subterráneos en medios volcánicos: Estudio del caso en las Islas Canarias occidentales. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. <https://oa.upm.es/id/eprint/3389>
- Santamarta, J. C. (2017b). Tratado de minería de recursos hídricos en islas volcánicas oceánicas [Archivo Digital UPM]. Colegio Oficial de Ingenieros de Minas del Sur de España. <https://oa.upm.es/47880/>

Capítulo 12

Lecciones aprendidas en sistemas hídricos insulares: vulnerabilidad estructural, gobernanza y datos

Juan Carlos Santamarta Cerezal

Noelia Cruz Pérez

Jelena Koritnik

12.1. Introducción: qué significa aprender de un proyecto como GENESIS

Este capítulo no pretende resumir lo que ya se ha expuesto en los capítulos anteriores. Su objetivo es diferente: extraer las lecciones que emergen cuando se confronta un marco metodológico con la realidad operativa de tres sistemas hídricos insulares (La Palma, Gran Canaria y El Hierro) y se intenta construir, desde cero, una representación funcional de sus interdependencias y vulnerabilidades.

Las lecciones que aquí se presentan no son principios abstractos. Son conclusiones derivadas de dificultades concretas: datos que no existían o no estaban disponibles, supuestos que hubo que revisar, patrones de fallo que emergieron de las simulaciones y no habían sido anticipados, y limitaciones institucionales que condicionaron el alcance del análisis. En cada caso, se explicita qué esperábamos encontrar, qué encontramos realmente, y qué implicaciones tiene esa diferencia para futuros proyectos o para la gestión cotidiana.

La estructura del capítulo organiza las lecciones en cuatro bloques temáticos: vulnerabilidad estructural, gobernanza y coordinación, datos e información, y prioridades de inversión. El capítulo cierra con una reflexión sobre la transferibilidad del enfoque a otros archipiélagos.

12.2. Vulnerabilidad estructural de los sistemas hídricos insulares

Los sistemas hídricos insulares analizados en el marco del proyecto europeo GENESIS presentan un conjunto de vulnerabilidades que no corresponden, en general, a fallos puntuales ni a eventos excepcionales, sino a condicionantes estructurales derivados de la configuración física del territorio, al diseño histórico de las infraestructuras y a las interdependencias operativas que articulan los sistemas hídricos en su conjunto (Figura 12.1). Estas vulnerabilidades adquieren especial relevancia en contextos de presión energética, climática o territorial.

La insularidad y la orografía compleja provocan la concentración espacial de infraestructuras críticas del sistema hídrico, como plantas desalinizadoras de agua de mar, determinadas captaciones e infraestructuras energéticas asociadas. Esta concentración se localiza mayoritariamente en el litoral, incrementando su exposición a riesgos de origen marino, meteorológico y energético. La imposibilidad práctica de desplazar estas infraestructuras fuera de la franja costera, junto con la necesidad de garantizar su conexión con redes interiores de distribución, configura un patrón de vulnerabilidad estructural, especialmente acusado en escenarios de aumento de la energía del oleaje y de mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos.

A esta exposición se le añade la elevada dependencia energética inherente a gran parte de los sistemas hídricos insulares. El transporte del agua mediante bombeo para salvar desniveles acusados, así como los procesos de desalinización, potabilización y tratamiento, dependen directamente de la estabilidad del suministro eléctrico. En islas con sistemas de generación energética limitados y con infraestructuras eléctricas igualmente concentradas o expuestas, cualquier perturbación en el suministro puede traducirse de manera inmediata en restricciones de producción, distribución o afección a la calidad del agua, amplificando el impacto de eventos que, en origen, son ajenos al sector hídrico.

Otro rasgo estructural relevante es la configuración lineal de las redes de transporte hidráulico. En los territorios volcánicos analizados, estas infraestructuras deben atravesar laderas abruptas, materiales geológicos heterogéneos y zonas con elevada susceptibilidad a procesos geodinámicos activos. Las conducciones que conectan las áreas de captación, producción o almacenamiento con los principales núcleos de demanda, suelen discurrir por tramos con accesibilidad limitada y elevada exposición a deslizamientos, desprendimientos o deformaciones del terreno. La afección de uno de estos tramos puede comprometer de manera desproporcionada el funcionamiento del sistema, especialmente en aquellas redes que carecen de redundancia funcional. Asimismo, la gestión del recurso se desarrolla en sistemas cerrados, con una capacidad limitada para compensar déficits y con

márgenes de maniobra reducidos ante perturbaciones simultáneas. Esta condición provoca que cualquier disrupción relevante pueda ser un potencial desencadenante de fallos en cascada.

El almacenamiento, mediante depósitos para el agua potable, presas y depósitos para el riego, constituye uno de los pocos elementos del sistema hídrico que amortiguan las vulnerabilidades estructurales descritas. Sin embargo, en numerosos territorios el dimensionado y la distribución de estas reservas responden a criterios históricos u operativos que no siempre consideran escenarios de disrupción prolongada ni la concurrencia de fallos múltiples. Cuando el volumen de almacenamiento resulta insuficiente, presenta limitaciones operativas o fallos de distribución, la capacidad del sistema para absorber perturbaciones se reduce significativamente, incrementando la probabilidad de interrupciones generalizadas del suministro.



Fuente: elaboración propia (2026)

Figura 12.1. Esquema de vulnerabilidades estructurales.

Los análisis realizados ponen de manifiesto que determinadas limitaciones en la articulación institucional y en la integración de la información disponible pueden influir en la capacidad de interpretar el comportamiento de las infraestructuras hídricas bajo condiciones de estrés. En los casos analizados, la coexistencia de criterios técnicos no homogéneos entre los organismos gestores, junto con una disponibilidad desigual de inventarios y registros operativos, dificulta la identificación de los elementos más sensibles del sistema y la interpretación conjunta de los resultados. Estos factores no son, por sí mismos, la causa directa de las disrupciones observadas, pero sí condicionan la forma en que se evalúan y gestionan las respuestas ante perturbaciones de origen natural, climático o tecnológico.

12.3. Lección 1: La vulnerabilidad no es el evento: es la configuración

Expectativa inicial

Al inicio del análisis se asumía que los fallos en cascada se activarían, sobre todo, por eventos extremos de alta intensidad: erupciones, deslizamientos de gran entidad, temporales costeros severos. La hipótesis era directa: a mayor magnitud del evento, mayor probabilidad de colapso y mayor extensión del impacto.

Hallazgo

Las simulaciones del proyecto GENESIS introdujeron un matiz incómodo: la magnitud del evento no explica por sí sola la disrupción. Eventos de intensidad moderada pueden producir interrupciones extensas cuando inciden en nodos o tramos con alta centralidad funcional (y, por tanto, con baja sustituibilidad operativa).

Los siguientes ejemplos son resultados del modelo bajo supuestos y datos de partida especificados; se aportan como orden de magnitud para discusión técnica. En La Palma, un deslizamiento localizado en el tramo de conducción entre Dos Aguas y Las Manchas, sin ser excepcional desde el punto de vista geológico, podía interrumpir el suministro a aproximadamente el 60 % de la vertiente oeste durante un período estimado de 72 a 96 horas. La duración no depende únicamente del daño, sino también de la accesibilidad, la capacidad de aislamiento hidráulico y la disponibilidad de alternativas temporales.

En El Hierro se observa un patrón análogo: la pérdida de la estación de bombeo de Tacorón, aun sin afección directa a la planta de desalinización de agua de mar, comprometía la distribución hacia el sur de la isla. En términos de sistema, el punto crítico no es la planta en sí, sino el elemento que articula la transferencia y la presión en la red.

Implicación

La vulnerabilidad estructural se concentra menos en la probabilidad de ocurrencia de un evento extremo y más en la configuración: concentración de funciones críticas en pocos nodos, corredores únicos de conducción, escasez de rutas redundantes y dependencia de elementos con capacidad limitada de operación en modo degradado.

Esto desplaza el criterio de inversión. No siempre es eficiente reforzar de forma homogénea activos dispersos; podría ser más determinante reducir la criticidad de un nodo o tramo (redundancia, by-pass, sectorización, capacidad de aislamiento, suministro de respaldo) que aumentar resistencias puntuales sin alterar la topología funcional del sistema. No es una regla universal, depende del inventario real y de las maniobras disponibles, pero cambia la jerarquía de prioridades.

12.4. Lección 2: La dependencia energética es el multiplicador oculto

Expectativa inicial

Se partía de un hecho conocido: el sistema hídrico depende del suministro eléctrico, sobre todo en bombeos y en la desalinización de agua de mar. Aun así, la dependencia se estaba tratando como si fuese casi lineal. Con energía disponible, el sistema funciona; sin energía, se detiene. Un esquema binario, útil para explicarlo, pero incompleto para gestionarlo.

Hallazgo

El análisis mostró que la relación agua–energía se comporta más bien como un multiplicador no lineal de la vulnerabilidad. No falla «un equipo»: se encadena una secuencia, y la velocidad de propagación es alta.

En Gran Canaria, las simulaciones de fallo eléctrico generalizado describieron un colapso por etapas. Primero quedan fuera de servicio las plantas de desalinización de agua de mar situadas en costa (responsables de alrededor del 85 % del agua potable urbana). A continuación, se comprometen las estaciones de bombeo que permiten el bombeo hacia medianías. Después, caen los sistemas de presurización que sostienen la distribución municipal. La pérdida generalizada de servicio aparece en 4–6 horas, no en días. Ese intervalo no responde solo a «no hay electricidad», sino a la falta de capacidad de operación en modo degradado, al consumo de presiones residuales y al agotamiento del almacenamiento operativo disponible.

En El Hierro, donde la central hidroeléctrica de Gorona del Viento introduce una resiliencia potencial, el comportamiento también fue restrictivo bajo escenarios combinados. Las simulaciones indicaron que un fallo simultáneo de la interconexión con la central térmica de Llanos Blancos reducía la autonomía del sistema hídrico a menos de 8 horas. El matiz es relevante: la resiliencia teórica del mix

energético no se traduce automáticamente en continuidad de servicio si los puntos de enlace, control y respaldo no están dimensionados para sostener la operación hidráulica en emergencia.

Implicación

Los planes de contingencia hídrica no pueden formularse al margen de los planes de contingencia energética. No es una recomendación genérica; es una condición operativa en sistemas insulares. La resiliencia hídrica descansa, al menos, en tres componentes que conviene tratar como un paquete:

- 1) Respaldo energético en infraestructuras críticas (grupos electrógenos, baterías, renovables con almacenamiento), con criterios explícitos de autonomía, priorización de cargas y mantenimiento.
- 2) Protocolos de coordinación agua–energía durante emergencias: quién decide, con qué información, y en qué secuencia se energizan activos críticos (producción, elevación, presurización, control).
- 3) Almacenamiento de agua tratada suficiente para cubrir el tiempo realista de recuperación eléctrica, no el deseable. Y aquí aparece la pregunta que conviene dejar abierta: ¿el almacenamiento actual cubre horas, o realmente cubre escenarios de recuperación imperfecta y escalonada?

12.5. Lección 3: Las conducciones lineales son el eslabón más frágil

Expectativa inicial

La atención se dirigía, de forma casi natural, a los activos de mayor complejidad técnica: plantas de desalinización de agua de mar, estaciones de tratamiento, sistemas de control y telemando. La hipótesis era sencilla: más complejidad implica más puntos de fallo y, por tanto, mayor vulnerabilidad.

Hallazgo

El comportamiento observado en las tres islas introduce otra jerarquía. Los elementos que concentraron mayor riesgo operativo fueron, de manera recurrente, las conducciones de transporte en tramos únicos, es decir, corredores con baja sustituibilidad y capacidad limitada de aislamiento o desvío.

En La Palma, el Canal General del Norte y las conducciones que atraviesan Cumbre Vieja acumulan, según el modelo de centralidad empleado, aproximadamente el 45 % del riesgo total del sistema. No es un riesgo «tecnológico» en sentido estricto; es un riesgo de topología y exposición territorial: cuando el tramo falla, el sistema pierde capacidad de redistribución.

En El Hierro, el anillo de distribución insular, concebido para aportar redundancia, revela dos tramos críticos: la pérdida de continuidad en esos puntos no degrada el servicio de forma gradual, lo segmenta. La isla queda dividida en sectores con operación hidráulica prácticamente independiente, y las posibilidades de compensación entre zonas se reducen de forma brusca.

En Gran Canaria, las impulsiones desde la costa hacia medianías cruzan barrancos con historial de inestabilidad y, además, con accesos limitados para intervención. Aquí el riesgo no está tanto en la estación en sí, sino en el tiempo y la dificultad de reposición del corredor cuando el terreno impone condiciones.

Implicación

La protección de conducciones críticas tiende a ofrecer una relación coste–beneficio más favorable que la protección distribuida de numerosos activos menores, sobre todo cuando los tramos únicos gobiernan la continuidad del servicio. Esto no equivale a «abandonar» los sistemas complejos; implica aceptar que, si la conducción falla, la robustez de la planta aporta poco.

La prioridad estratégica pasa por identificar y reducir los cuellos de botella: estabilización de taludes en puntos de exposición, sistemas de detección temprana de deformaciones, mejoras de acceso y logística de reparación y, cuando sea viable, opciones de redundancia parcial (by-pass, sectorización, duplicación selectiva). No es evidente que siempre se pueda, pero sí parece difícil justificar una estrategia de resiliencia que no empiece por esos tramos.

12.6. Lección 4: El almacenamiento es el único amortiguador real

Expectativa inicial

Se daba por hecho que la redundancia operativa (fuentes alternativas, rutas paralelas, maniobras de sectorización) bastaría para absorber disrupciones puntuales. La idea era razonable: si un elemento falla, se conmuta el flujo y el sistema sigue, aunque sea en un régimen menos eficiente.

Hallazgo

Las simulaciones matizaron esa confianza. La redundancia solo funciona si existe margen temporal para activarla. Sin almacenamiento intermedio, la disrupción se propaga aguas abajo con muy poca amortiguación; la red no «espera», simplemente se queda sin presión o sin caudal en cuestión de horas.

En La Palma, los depósitos municipales muestran una autonomía media de 12–18 horas bajo demanda normal. Cuando se aplican restricciones, por ejemplo, reduciendo o interrumpiendo suministro agrícola, esa autonomía puede estirarse hasta 24–36 horas. El punto no es solo la cifra: es la sensibilidad del sistema a la demanda y a la capacidad real de redistribuir volúmenes entre sectores.

En El Hierro, el depósito de San Andrés (4000 m³) aparece como la única reserva operativa con entidad para abastecer a alrededor del 70 % de la población. Eso introduce una dependencia poco visible en condiciones normales: el sistema puede tener redundancias «en el papel», pero el colchón se concentra en un único punto.

En Gran Canaria, el patrón es distinto pero el efecto se parece. La desigualdad territorial del almacenamiento genera «zonas de sombra»: áreas donde la autonomía cae por debajo de 6 horas. No es un fallo espectacular, pero sí un fallo rápido, y eso cambia por completo la ventana de decisión para activar alternativas.

Implicación

La resiliencia, en la práctica, se apoya en la capacidad de almacenamiento operativo: no el almacenamiento total en embalses o en acuíferos, sino el volumen de agua tratada disponible para distribución inmediata y con capacidad real de entrega (presión, sectorización, control). Convertirlo en indicador no es un capricho; es una forma de medir cuánto tiempo tiene el sistema para reaccionar antes de que la disrupción se convierta en pérdida de servicio.

Los planes de inversión deberían trabajar con umbrales mínimos de autonomía, por ejemplo 48 horas, y priorizar las zonas que no los alcanzan. No es evidente que el umbral deba ser idéntico en toda la isla: depende de accesibilidad, tiempo de reposición, exposición a eventos y capacidad de operación en emergencia. Pero sin un umbral explícito, la «redundancia» se queda demasiado cerca de una declaración de intenciones.

12.7. Gobernanza fragmentada como amplificador del riesgo sistémico

La gestión de las infraestructuras hídricas en territorios insulares se articula en un marco institucional complejo, en el que concurren múltiples organismos con competencias diferenciadas en planificación, operación, energía, protección civil y control ambiental. Esta configuración no implica necesariamente disfunciones en sí misma, pero sí introduce condicionantes relevantes para la gestión integrada de sistemas altamente interdependientes, con márgenes de maniobra reducidos y espacialmente restringidos.

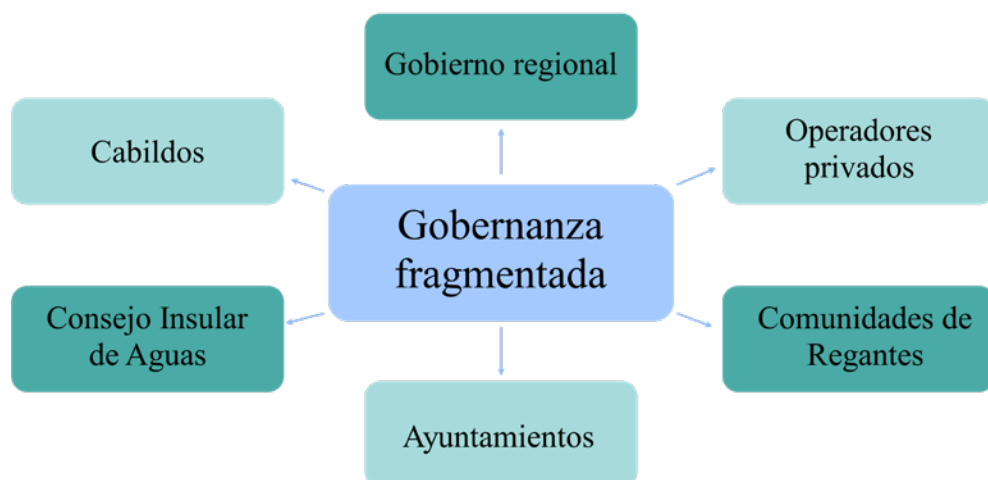
En el caso de Canarias, esta complejidad se ve reforzada por un trasfondo histórico singular en la asignación y propiedad del recurso hídrico. Desde los siglos XVI y XVII, el agua ha sido un bien estratégico, gestionado de forma diferenciada según la disponibilidad insular. En islas como Tenerife, La Palma y Gran Canaria, que disponían de mayores recursos, la jurisdicción de realengo permitió a la Corona y a la figura del Adelantado de Canarias otorgar derechos sobre el agua y la tierra. Por el contrario, en Fuerteventura, Lanzarote, La Gomera y El Hierro, las islas del señorío, este recurso era más escaso por lo que el agua se consideró bien común. Estas cesiones evolucionaron en el tiempo hacia formas de gestión colectiva, como las comunidades de regantes que regularon el uso del agua en ámbitos rurales. Hasta la aprobación de la Ley 12/1990 de Aguas, la mayor parte de las captaciones permanecían en manos privadas. Con esta norma, el agua pasó a considerarse un bien de interés general, y se crearon los Consejos Insulares de Agua como órganos de planificación y gestión. No obstante, pese a su carácter de dominio público, este recurso sigue siendo gestionado por las Comunidades de Aguas hasta 2040 (Santamarta & Cruz-Pérez, 2025). De forma análoga, las infraestructuras de transporte, en particular los canales, mantienen en muchos casos un régimen de propiedad privada basado en acciones, donde cada participación otorga el derecho a un volumen determinado de agua. Esta estructura híbrida de titularidades dificulta el acceso a información homogénea, y condiciona la gestión integrada del recurso (Díaz Cruz, 2013; Mesa Delgado, 2019; Santana Mayor, 2022; Suárez Moreno, 2009).

Asimismo, la fragmentación competencial entre diversos organismos se traduce en la coexistencia de procedimientos, escalas de actuación y criterios técnicos que no siempre están alineados entre sí. Esta situación puede dificultar la construcción de una visión compartida del funcionamiento del sistema, especialmente cuando es necesario evaluar la criticidad relativa de infraestructuras, coordinar medidas preventivas o interpretar los efectos combinados de perturbaciones que

afectan simultáneamente a distintos servicios esenciales. La gobernanza actúa, así como un marco que condiciona la forma en que la información se produce, se comparte y se incorpora a los procesos de toma de decisión.

La fragmentación de competencias puede amplificar el riesgo sistémico. En estas islas, conviven sistemas de propiedad pública/privada, comunidades de usuarios de agua y títulos híbridos, lo que complica aún más la gobernanza y la capacidad de respuesta ante crisis (Petzold, 2015) (Figura 12.2). Así mismo, las referencias legales y administrativas pertinentes deben ser consultadas para evaluar la evolución del marco normativo hasta el 2040, ya que este se refiere a la adaptación continua de la política de gestión del agua.

Los resultados del proyecto europeo Genesis muestran que la coordinación interinstitucional adquiere especial relevancia en contextos de estrés operativo o de emergencia, donde la rapidez en el intercambio de información, la claridad en la asignación de responsabilidades y la coherencia de los protocolos de actuación resultan determinantes. En ausencia de mecanismos estables de cooperación o de procedimientos previamente acordados, la respuesta puede verse limitada por retrasos, solapamientos o vacíos operativos, incluso cuando las capacidades técnicas existen de forma individual en las distintas entidades implicadas. Este fenómeno se observa, por ejemplo, en la gestión de la red de distribución, donde se estiman mermas del orden del 10 %, asociadas en parte a la falta de claridad sobre la responsabilidad de intervención entre titulares públicos y privados.



Fuente: elaboración propia (2026)

Figura 12.2. Mapa de organismos involucrados en materias de agua en Canarias.

La falta de criterios homogéneos en aspectos como el inventariado de infraestructuras, la caracterización de su estado operativo o la evaluación de su exposición a peligros dificulta la integración de la información en herramientas analíticas comunes. Aunque esta heterogeneidad no impide el análisis, sí condiciona su comparabilidad y la interpretación conjunta de resultados, especialmente en enfoques orientados a identificar patrones sistémicos o a priorizar intervenciones a escala insular. Por tanto, la capacidad de gestionar el riesgo sistémico asociado a la infraestructura hídrica depende, en parte, de la existencia de marcos institucionales que faciliten la cooperación, la interoperabilidad de la información y la coherencia entre planificación, operación y respuesta ante perturbaciones. Estas cuestiones se abordan con mayor detalle en las secciones siguientes, centradas en los datos y en las prioridades operativas derivadas del análisis.

La lectura institucional e histórica anterior no es un marco «de fondo». En sistemas insulares con alta interdependencia como agua, energía, protección civil, operación diaria, ese marco termina comportándose como una variable operativa: condiciona qué se conoce del sistema, con qué calidad se conoce y, sobre todo, quién puede activar decisiones cuando el margen temporal se estrecha. Dicho de otra forma, la vulnerabilidad no solo se acumula en nodos hidráulicos o tramos únicos; también se acumula en los puntos donde la información se fragmenta, los incentivos no coinciden y la responsabilidad queda repartida.

De ahí se derivan las dos lecciones siguientes aprendidas en este proyecto. La primera (lección 5) aborda cómo la fragmentación institucional y competencial, lejos de ser neutral, introduce fricciones muy concretas en el inventariado, en la caracterización del estado operativo y en la coordinación durante emergencias, con efectos directos sobre la estimación del riesgo y sobre la capacidad de respuesta. La segunda (lección 6) desciende un nivel más: explica por qué esa fragmentación no es simplemente un problema organizativo contemporáneo, sino la expresión de un legado de titularidades y derechos (acciones, canales, comunidades) que sigue determinando decisiones, costes y tiempos de implementación. No es evidente dónde termina la gobernanza y empieza la hidráulica; en Canarias, a menudo operan como una sola cosa.

12.8. Lección 5. La fragmentación institucional no es neutral

Expectativa inicial

Se conocía la complejidad del marco institucional del agua en Canarias: Consejos Insulares, Comunidades de Aguas, operadores municipales, titulares priva-

dos de canales. Aun así, esa complejidad se trataba como un condicionante de contexto, algo relevante para interpretar el territorio, pero no como una variable con capacidad de alterar el propio análisis de vulnerabilidad.

Hallazgo

Durante el proyecto, la fragmentación institucional dejó de ser un telón de fondo y se convirtió en un factor operativo. Apareció, de forma repetida, en tres frentes muy concretos.

En primer lugar, el inventario geoespacial exigió una reconstrucción por agregación. Solo en La Palma fue necesario consultar más de 15 fuentes distintas, con criterios de codificación incompatibles y grados de actualización desiguales. Infraestructuras críticas (canales privados, captaciones gestionadas por comunidades de regantes) no constaban en registros públicos accesibles, o aparecían sin trazabilidad suficiente para su integración directa.

En segundo lugar, la caracterización del estado operativo dependió de información incompleta y, en ocasiones, de aproximaciones indirectas. Un indicador básico como las mermas en redes de distribución ofrece un ejemplo claro: las estimaciones oscilan entre el 8 % y el 25 % según la fuente consultada, sin una metodología común de medición, ni condiciones de referencia comparables. No es evidente qué parte de esa variabilidad responde a diferencias reales y cuál es un efecto de cómo se está midiendo (o de cómo se está declarando).

En tercer lugar, los protocolos de coordinación en emergencia mostraron vacíos funcionales en las entrevistas realizadas. La asignación de responsabilidades entre organismos públicos y titulares privados no siempre está definida con precisión, especialmente en infraestructuras de transporte con propiedad mixta. En escenarios de respuesta rápida, esa ambigüedad se traduce en retrasos, solapamientos o decisiones conservadoras, incluso cuando existen capacidades técnicas disponibles.

Implicación

La gobernanza fragmentada no solo complica el análisis; tiende a amplificar el riesgo operativo porque condiciona la calidad del dato, la velocidad de decisión y la coherencia de la respuesta. Las inversiones en coordinación, protocolos compartidos, inventarios unificados, interoperabilidad de información, reglas claras de responsabilidad en activos mixtos, tienen un retorno difícil de cuantificar con métricas convencionales. Podría argumentarse, sin embargo, que su impacto práctico supera al de muchas inversiones físicas dispersas, sobre todo cuando el fallo se propaga más rápido que la capacidad institucional de reaccionar.

12.9. Lección 6: El legado histórico condiciona el presente más de lo esperado

Expectativa inicial

Se conocía el trasfondo histórico de la gestión del agua en Canarias: realengo y señorío, consolidación de comunidades de regantes, transición al dominio público con la Ley 12/1990. Pero ese legado se colocaba, casi por inercia, en la parte «cultural» del problema: útil para entender cómo hemos llegado aquí, poco útil para decidir qué hacer mañana en una emergencia o qué inversión priorizar.

Hallazgo

El legado no es un apunte de archivo. En Tenerife y La Palma, el régimen de acciones sobre canales hace que infraestructuras que hoy funcionan como piezas críticas del sistema estén repartidas entre múltiples titulares privados. Cada acción no es simbólica: es un derecho sobre un volumen de agua. Y ahí aparece la fricción: el activo es común, los incentivos no siempre lo son.

El mantenimiento y la modernización de esas infraestructuras dependen de acuerdos entre titulares con intereses heterogéneos, ritmos distintos y, a veces, horizontes temporales incompatibles. Resulta tentador pensar que «si es crítico, se arregla» y listo. No es tan evidente cuando la decisión no está concentrada en un único operador, sino distribuida en un mosaico de derechos.

A esto se suma una transición institucional que aún no termina de cerrarse. La previsión de completar la gestión pública en 2040 introduce un intervalo largo (tres décadas desde el presente marco) donde conviven reglas antiguas con exigencias actuales de resiliencia. Ese tramo intermedio genera incertidumbre: quién asume costes, quién decide prioridades, qué ocurre cuando el interés sistémico choca con el interés particular (Santamarta & Cruz-Pérez, 2025).

Implicación

Una estrategia de resiliencia que trate el sistema como puramente técnico se queda corta. El sistema es sociotécnico: conducciones, instalaciones de tratamiento de aguas y depósitos, sí; pero también propiedad, derechos, incentivos y capacidad real de ejecutar acuerdos. Ignorar esa estructura suele llevar a soluciones que «funcionan» en el papel y se diluyen en la implementación.

Podría argumentarse que el primer trabajo no es solo identificar nodos críticos, sino identificar nodos de decisión: dónde se producen cuellos de botella administrativos o de coordinación, qué actores deben alinearse, qué mecanismos permiten repartir costes y beneficios sin convertir cada intervención en una negociación interminable. Si eso no se resuelve, el riesgo no desaparece; simplemente se desplaza hacia el punto más difícil de modelizar: la gobernanza.

12.10. Datos, preparación de inventarios y monitorización: de la brecha informativa al fallo operativo

La disponibilidad, estructura y coherencia de la información condicionan de manera directa las posibilidades de análisis y apoyo a la toma de decisiones en relación con la infraestructura hídrica insular. En los territorios estudiados, la información existente sobre infraestructuras, estado operativo y variables de funcionamiento presenta niveles desiguales de detalle, actualización y accesibilidad, lo que influye en la capacidad de construir representaciones integradas del sistema y de evaluar su comportamiento ante situaciones de estrés.

La elaboración de inventarios geoespaciales ha evidenciado que la ausencia de criterios homogéneos de codificación, clasificación y caracterización limita la comparación entre elementos y dificulta la identificación sistemática de puntos sensibles. Un inventario incompleto o heterogéneo no impide el análisis, pero condiciona su alcance, ya que restringe la posibilidad de evaluar relaciones funcionales, dependencias críticas o concentraciones de riesgo a partir de una base común. En este sentido, los inventarios no son solo herramientas descriptivas, sino también ayudan en la interpretación de la exposición y la relevancia operativa de cada componente dentro del conjunto de datos.

A la limitación de datos se le suma la fragmentación de los sistemas de registro y seguimiento. Los datos hidrológicos, operativos, energéticos o de calidad del agua suelen gestionarse a través de plataformas independientes, con resoluciones temporales y coberturas espaciales variables. Esta dispersión dificulta la lectura conjunta de la información y reduce la capacidad de detectar de forma temprana desviaciones relevantes o comportamientos anómalos que puedan anticipar fallos operativos. Hay monitorización, pero su integración es parcial, lo que limita su potencial analítico y operativo.

La falta de información integrada puede retrasar la identificación de infraestructuras críticas, dificultar la priorización de actuaciones o limitar la capacidad de evaluar escenarios complejos en los que concurren múltiples perturbaciones.

En este contexto, los déficits de datos y de monitorización actúan como un factor que condiciona la anticipación y la respuesta operativa, especialmente en sistemas donde los márgenes de maniobra son reducidos y las interdependencias entre infraestructuras son elevadas.

Desde esta perspectiva, los datos, los inventarios y la monitorización no son un fin en sí mismos, sino un componente instrumental que, en su conjunto, delimitan el grado de conocimiento operativo disponible. Su nivel de desarrollo influye en la robustez de los análisis y en la capacidad de traducir la información existente en decisiones coherentes, cuestión que resulta particularmente relevante al abordar las prioridades de intervención y operación derivadas del análisis de vulnerabilidad.

El uso de tecnologías como SCADA y redes de telemetría es esencial para una gestión eficiente del agua y para fortalecer la resiliencia operativa de las infraestructuras de agua. Los modelos de «gemelos digitales» pueden potenciar la capacidad de análisis y predicción, contribuyendo a la resiliencia en la infraestructura hídrica (Nguyen et al., 2021).

En este punto conviene desplazar el foco. El problema ya no es únicamente qué infraestructuras son críticas, sino qué información permite reconocerlas a tiempo y con qué grado de confianza. En los sistemas insulares analizados, la brecha informativa no se limita a «falta de datos»: aparece como inventarios incompletos, codificaciones incompatibles, plataformas que no dialogan y series operativas que no se pueden leer como un único sistema. El resultado no es solo incertidumbre analítica; es pérdida de capacidad operativa cuando la perturbación exige rapidez.

Las dos lecciones siguientes se apoyan en esa constatación. La primera (Lección 7) muestra que el inventario no actúa como un paso previo neutral: introduce, corrige y a veces redefine el propio diagnóstico de vulnerabilidad. La segunda (Lección 8) aborda un punto menos evidente: la monitorización puede existir y, aun así, no generar anticipación, porque la telemetría fragmentada produce señales locales, no lectura sistémica.

12.11. Lección 7: El inventario no es un paso previo: es parte del análisis

Expectativa inicial

Se asumía que la construcción del inventario geoespacial sería una fase preliminar relativamente mecánica: reunir datos existentes, georreferenciarlos y volcar-

los en una estructura común. Trabajo necesario, sí, pero subordinado al «análisis real», que vendría después.

Hallazgo

La práctica desmintió ese encuadre. La elaboración del inventario consumió aproximadamente el 40 % del esfuerzo total en las fases iniciales y, al mismo tiempo, produjo información crítica que no estaba disponible por otras vías. No fue una tarea de ordenación; fue una fase de descubrimiento, con efectos directos sobre el diagnóstico de vulnerabilidad.

El proceso de inventario obligó a:

- Localizar infraestructuras no documentadas, con especial incidencia en captaciones privadas y tramos de conducción en desuso parcial, pero todavía operativos en periodos concretos.
- Contrastar registros con realidad operativa, detectando discrepancias entre capacidad nominal y capacidad efectivamente disponible (depósitos con volúmenes teóricos que no se corresponden con el uso real, por limitaciones de operación, configuración, deterioro o restricciones).
- Hacer visibles dependencias no explicitadas, incluyendo conexiones entre sistemas que no figuraban en la documentación técnica, pero que condicionan tanto la propagación de fallos como las posibilidades de conmutación.
- Caracterizar accesibilidad de activos críticos por primera vez de forma sistemática, un factor que raramente aparece en bases de datos, pero que gobierna tiempos de reparación y viabilidad de respuesta.
- No es evidente, por tanto, que el inventario sea «previo» al análisis. En varios puntos, el inventario definió qué era analizable y qué conclusiones podían sostenerse sin sobreinterpretación.

Implicación

El inventario geoespacial no es un prerrequisito administrativo; funciona como infraestructura de conocimiento. Los organismos gestores que no disponen de inventarios actualizados, georreferenciados y estructurados quedan limitados a evaluaciones parciales, con sesgos por omisión difíciles de detectar a posteriori. En ese contexto, la inversión en inventarios debe tratarse como infraestructura crítica de información, no como gasto corriente. El retorno no se mide solo en orden documental; se mide en capacidad de identificar criticidad real, priorizar intervenciones y reducir incertidumbre operativa cuando el sistema deja de comportarse como «normal».

12.12. Lección 8: La monitorización existe, pero no está integrada

Expectativa inicial

Se esperaba encontrar un escenario polarizado: o bien sistemas de monitorización avanzados (SCADA), telemetría en tiempo real, alarmas estructuradas, o bien una ausencia casi total de datos operativos. En ambos casos, el diagnóstico sería relativamente directo: hay capacidad de observación o no la hay.

Hallazgo

La realidad resultó más ambigua y, por ello, más difícil de gestionar. Existen sistemas de monitorización en infraestructuras principales, plantas de desalinización de agua de mar, estaciones de bombeo, depósitos de cabecera, pero funcionan como sistemas cerrados. Cada operador observa su activo con criterios propios, con resoluciones temporales distintas y con umbrales de alarma que responden a objetivos locales (producción, presión, continuidad de servicio en un ámbito concreto). El problema aparece cuando el sistema se mira como conjunto: falta una capa de integración que permita reconstruir estados globales, identificar dependencias operativas y detectar patrones anómalos que atravesasen varias infraestructuras a la vez.

Esa fragmentación tiene un efecto práctico. La monitorización informa de «lo que le pasa a cada pieza», pero rara vez permite anticipar «lo que le va a pasar al sistema». En las tres islas estudiadas, la capacidad de anticipar fallos en cascada basándose en datos de monitorización es muy limitada: cuando el problema se identifica con claridad, a menudo ya ha cruzado varios puntos de la red. No es un fallo de sensores, es un fallo de lectura sistémica.

Implicación

Incrementar telemetría puede aportar mejoras marginales, pero su rendimiento es bajo si no se acompaña de integración de datos y de capacidad analítica transversal. La monitorización aislada tiende a generar respuestas locales; la resiliencia requiere coordinación y priorización a escala de sistema. En este marco, los modelos de gemelo digital promovidos en el proyecto GENESIS solo adquieren valor operativo si se alimentan con datos en tiempo real representativos del sistema completo, interoperables, comparables y con semántica común. Con fragmentos aislados, el gemelo se convierte en una representación incompleta: útil para describir, insuficiente para anticipar y apoyar decisiones bajo estrés.

12.13. Prioridades operativas y estrategias de inversión para la protección de las infraestructuras hídricas

Debido a la exposición a fenómenos naturales, la elevada dependencia operativa y la capacidad limitada de respuesta de los sistemas analizados, resulta necesario priorizar un conjunto de medidas orientadas a reducir el riesgo de fallo. En este sentido, las inversiones adquieren un papel clave en la estabilidad funcional de las infraestructuras hídricas insulares, especialmente en aquellos ámbitos donde la vulnerabilidad estructural es más acusada.

Los objetivos operacionales como la protección física, el acceso a fuentes auxiliares, el almacenamiento reforzado y el monitoreo deben basarse en evidencias obtenidas de contextos similares en islas o utilidades costeras (Betzold, 2015; Passos et al., 2024). La inversión en capacidad de reserva de energía y tecnologías renovables también es esencial para asegurar la continuidad de los servicios en situaciones de emergencia (Rodríguez-Urrego et al., 2023; Ali et al., 2020). Los datos sobre pérdidas por fugas y agua no contabilizada deben ser respaldados por informes confiables para garantizar la precisión de las afirmaciones hechas en el contexto (Espada et al., 2015).

Una de las principales prioridades operativas debe enfocarse en la protección de la desalinización allí donde constituye un componente esencial del abastecimiento a la población. La localización costera de las plantas desalinizadoras, condicionada a su función, junto con su elevada dependencia energética, implica que su continuidad operativa dependa tanto de la integridad física de los emplazamientos como de la fiabilidad de las conexiones eléctricas asociadas. En este contexto, las inversiones orientadas a mejorar la protección física, el acceso operativo y la robustez de los suministros auxiliares se identifican como elementos relevantes para reducir la sensibilidad del sistema ante perturbaciones de origen marino o energético.

También debería considerarse prioritaria la mejora de la capacidad de almacenamiento de las reservas de agua potable y de riego, ya que estas infraestructuras desempeñan un papel clave como elementos de amortiguación frente a interrupciones temporales en la producción o el transporte. Allí donde el almacenamiento resulta insuficiente o está desigualmente distribuido, la capacidad de sostener el servicio ante incidencias simultáneas se ve limitada. Las actuaciones sobre el almacenamiento deberían considerar no solo un incremento de capacidad, sino además reforzar estructuralmente los depósitos, mejorar la accesibilidad e incorporar sistemas de monitorización que permitan una gestión más informada de los volúmenes disponibles.

Asimismo, las conducciones que atraviesan laderas de barrancos con elevada pendiente o terrenos potencialmente inestables son uno de los elementos más vulnerables del sistema y requieren una atención prioritaria. En los sistemas ana-

lizados, determinados tramos de transporte concentran una parte significativa del riesgo operativo debido a su exposición a procesos geodinámicos y a la escasa existencia de rutas alternativas. Las intervenciones orientadas a mejorar la estabilidad y a reforzar la detección temprana de anomalías en estos tramos, reducen la probabilidad de interrupciones con efectos extensivos sobre el sistema.

Otros elementos que, tras el análisis realizado, se consideran vitales para el funcionamiento correcto del sistema son el respaldo energético, la telemetría y el control de parámetros operativos y de calidad. El respaldo energético resulta especialmente crítico en aquellas infraestructuras con una elevada dependencia suministro eléctrico, ya que cualquier fallo en este, puede provocar la interrupción del suministro. En estos casos, la estrategia de inversión debería orientarse a la implantación de sistemas de respaldo, como generadores auxiliares o soluciones basadas en energías renovables, que permitan garantizar una autonomía de la infraestructura de varias horas o días. Por otra parte, la telemetría y control de parámetros, permiten disponer de información en tiempo real, condicionando directamente la capacidad de respuesta ante incidencias. El seguimiento continuo de variables como niveles, presiones, caudales, salinidad o nitratos no elimina el riesgo de fallo, pero mejora la capacidad de anticipación y de ajuste operativo en contextos de elevada incertidumbre.

A partir de este punto, el debate deja de ser «qué medidas son razonables» (protección física, almacenamiento, respaldo energético, telemetría, refuerzo de conducciones) y pasa a ser otro, más exigente: dónde colocarlas y con qué lógica de priorización. Porque casi todo lo anterior es defendible en abstracto; lo difícil es evitar que se convierta en un catálogo de actuaciones bienintencionadas, repartidas por equidad territorial o por inercia administrativa, sin alterar de verdad el comportamiento del sistema cuando aparece una perturbación.

Además, no todas las inversiones tienen el mismo rendimiento. En redes insulares con tramos únicos, dependencias energéticas y almacenamiento desigual, pequeñas decisiones pueden dominar el resultado: un punto de bombeo sin respaldo, un acceso que retrasa 48 horas una reparación, una interconexión que permite mover volúmenes entre depósitos que ya existen. Resulta tentador pensar que la resiliencia se gana principalmente con nuevas grandes infraestructuras; no es evidente si eso es lo más eficiente cuando el fallo se propaga por unos pocos cuellos de botella.

La lección 9 recoge precisamente ese desplazamiento: del «más inversión» al «mejor posicionamiento de la inversión». El análisis de sensibilidad del modelo no solo identifica qué activos son críticos, sino qué intervenciones, a veces modestas, cambian de forma desproporcionada el nivel de servicio y los tiempos de recuperación.

12.14. Lección 9. Las intervenciones pequeñas en los puntos correctos superan a las grandes inversiones dispersas

Expectativa inicial

Se asumía que elevar la resiliencia exigiría, casi por definición, inversiones de gran escala: nuevas plantas de desalinización de agua de mar, depósitos de gran capacidad, conducciones alternativas de largo recorrido. Es una intuición frecuente: si el sistema es vulnerable, la respuesta será necesariamente «más infraestructura».

Hallazgo

El análisis de sensibilidad del modelo de fallos en cascada introdujo una lectura menos intuitiva. En determinados contextos, intervenciones modestas aplicadas sobre nodos o tramos con alta criticidad, generan mejoras desproporcionadas en continuidad de servicio y tiempos de recuperación. No porque «lo pequeño» sea mejor por principio, sino porque el comportamiento del sistema está gobernado por pocos puntos donde se concentran funciones críticas y no existe sustituibilidad real.

Los ejemplos son ilustrativos y, además, comparables entre islas:

- El Hierro. La instalación de un generador de respaldo de 200 kW en la estación de bombeo de Tacorón (inversión estimada: 80.000–120.000 €) reduce el impacto de un fallo eléctrico general sobre la zona sur en torno a un 65 % (Santamarta et al., 2026a). La mejora no proviene de aumentar capacidad, sino de evitar la pérdida abrupta de una función de transferencia que no tiene alternativa operativa inmediata.
- La Palma. La mejora de accesos a dos tramos críticos del Canal General (inversión estimada: 300.000–400.000 €) reduce el tiempo medio de reparación de 96 a 36 horas (Santamarta et al., 2026b). El salto es relevante porque actúa sobre un determinante que suele quedar fuera de los diseños: la accesibilidad y la logística de intervención condicionan la duración real del fallo más que la magnitud del daño.
- Gran Canaria. La interconexión de dos depósitos municipales adyacentes que hoy operan de forma independiente (inversión estimada: 150.000 €) duplica la autonomía de suministro para aproximadamente 15.000 habitantes (Santamarta et al., 2026c). No se añade volumen nuevo: se habilita

una maniobra que convierte almacenamiento existente en almacenamiento útil cuando la red entra en modo degradado.

En conjunto, estos casos sugieren una pauta: cuando el sistema está dominado por cuellos de botella, la inversión con mayor retorno no siempre es la más visible, sino la que reduce la criticidad funcional en puntos concretos (respaldo, accesos, interconexiones, sectorización, capacidad de aislamiento).

Implicación

Los planes de inversión deberían apoyarse en análisis de criticidad y sensibilidad, complementados con criterios de equidad y viabilidad administrativa (Tabla 12.1). La equidad importa, pero no sustituye al diagnóstico: invertir de forma dispersa puede producir mejoras marginales, mientras que actuar sobre un nodo crítico cambia el rendimiento global del sistema. En términos prácticos, un euro colocado en el punto correcto puede equivaler a varios euros distribuidos sin jerarquía, sobre todo cuando el objetivo es sostener servicio y acortar tiempos de recuperación bajo perturbación.

Tabla 12.1 Prioridades de inversión derivadas del análisis GENESIS.

Infraestructura	Estrategia de inversión	Prioridad	Horizonte
Respaldo energético en nodos críticos	Generadores auxiliares o sistemas fotovoltaicos con baterías en estaciones de bombeo y desalinizadoras principales	CRÍTICA	0-2 años
Protección de conducciones críticas	Estabilización de taludes en barrancos, sistemas de alerta temprana por deformación, mejora de accesos para reparación	CRÍTICA	1-3 años
Ampliación de almacenamiento operativo	Nuevos depósitos en zonas con autonomía inferior a 24 horas; interconexión de depósitos existentes	ALTA	2-5 años
Integración de sistemas de monitorización	Plataforma unificada de visualización; protocolos de intercambio de datos entre operadores; alertas automatizadas	ALTA	1-3 años
Protección física de desalinizadoras	Refuerzo frente a oleaje extremo; redundancia en tomas de agua de mar; protección de equipos eléctricos	MEDIA	3-7 años
Inventario geoespacial unificado	Actualización continua; integración de todas las fuentes; acceso compartido entre organismos	MEDIA	Continuo

Fuente: elaboración propia (2026)

12.15. Transferibilidad del enfoque y condiciones para su replicación en otros archipiélagos

Transferir marcos de riesgo entre islas suena tentador: «si funcionó allí, que funcione aquí». El problema es que las islas no comparten un único guion de peligros. En un archipiélago el riesgo dominante puede ser el incendio forestal; en otro, el oleaje extremo; en otro, la sequía; y en algunos, el volcán aparece y lo cambia todo. Si mezclamos esos regímenes como si fueran equivalentes, el método sigue «pareciendo» correcto, pero la lectura se desajusta. Por eso, la replicación de estrategias exige mínimos previos: datos suficientes, capacidad de gobernanza y una calibración local que no sea cosmética (Nguyen et al., 2021; Espada et al., 2015). Además, la identificación de vulnerabilidades específicas pesa más que la adopción de recetas generales, aunque a veces se venda al revés (Tai et al., 2014).

Dicho esto, el enfoque aplicado en el proyecto GENESIS no depende de una isla concreta. Es un esquema que, con ajustes razonables, puede trasladarse a otros territorios insulares si comparten rasgos físicos y operativos comparables. La transferencia no consiste en copiar soluciones, sino en replicar una forma de mirar el sistema: inventario geoespacial, caracterización de peligros, evaluación de vulnerabilidad, e interpretación de interdependencias entre infraestructuras y población. Ahí está el núcleo, y ese núcleo es portable.

Los resultados apuntan a que el enfoque gana utilidad cuando se dan condiciones estructurales parecidas: relieve pronunciado, almacenamiento superficial limitado, dependencia de infraestructuras lineales de transporte, y activos cuya localización viene impuesta por la función (plantas de bombeo y desalinizadoras costeras, impulsiones hacia medianías, corredores de conducción atravesando laderas de barranco). En esos escenarios, identificar nodos críticos, tramos sensibles y dependencias operativas ofrece un marco de trabajo que ayuda a ordenar decisiones, incluso antes de discutir cuál será la solución técnica final.

Ahora bien, conviene poner límites por delante, no al final. Primero, los datos. El método puede arrancar con inventarios parciales e ir creciendo, pero necesita una base mínima: infraestructura georreferenciada, peligros relevantes y distribución de población y actividad en el área de estudio. Sin esa tríada, el sistema queda mal representado y la propagación de disrupciones se vuelve una conjetura más que un resultado. No es un matiz metodológico; es un techo duro para lo que puede afirmarse.

Segundo, el régimen de peligro y la configuración energética no se pueden «importar» desde Canarias como si fueran constantes. El proyecto GENESIS integra perturbaciones volcánicas, sísmicas, deslizamientos, inundaciones marinas y

meteorológicas, e incendios. En otros territorios, el motor puede ser distinto: ciclones tropicales, sequías prolongadas, erosión extrema, o combinaciones que no se parecen. Y, además, el vínculo agua–energía cambia con la arquitectura del sistema eléctrico, el grado de interconexión, la penetración de renovables y la disponibilidad de respaldo. Si no se calibra localmente, el análisis puede describir el sistema, pero no explicar cómo falla en condiciones reales.

Tercero, la gobernanza. La aplicabilidad práctica del enfoque depende de algo prosaico: que alguien pueda actualizar inventarios, compartir datos y sostener el uso de herramientas analíticas sin que cada intercambio se convierta en una negociación. Donde hay competencias fragmentadas, titularidades mixtas o mecanismos débiles de interoperabilidad, el método puede quedarse en «ejercicio de proyecto» y no convertirse en rutina operativa. En esos casos, quizá haya que aceptar una fase previa: armonización de criterios, acuerdos interinstitucionales, y fortalecimiento de capacidades técnicas. No es la parte vistosa, pero sin eso el sistema vuelve a quedarse ciego.

Con todo, la experiencia del proyecto GENESIS permite leer este enfoque como un marco adaptable para entender vulnerabilidad estructural y apoyar decisiones bajo incertidumbre. Su valor no está en prometer conclusiones universales, sino en obligar a conectar piezas que suelen analizarse por separado: datos, infraestructura, energía, peligros y población. Y si se aplica con honestidad (reconociendo condiciones y límites), ayuda a evitar el error más común en islas: diseñar resiliencia para un único tipo de estrés, cuando el sistema, en realidad, cae por acumulación de tensiones.

Ese es, en el fondo, el punto que conviene fijar antes de seguir: lo transferible no es el mapa, es la brújula. El proyecto GENESIS ofrece una forma de leer sistemas hídricos insulares bajo estrés, pero no garantiza que esa lectura produzca las mismas respuestas en otro archipiélago. El método puede viajar; los resultados, casi nunca viajan intactos. Y cuando se intenta trasladarlos «tal cual», el riesgo no es académico: se prioriza mal, se invierte donde no toca, se protege lo visible y se deja expuesto lo que realmente gobierna el fallo.

Por eso, más que hablar de replicación directa, conviene hablar de transferibilidad condicionada. La experiencia acumulada sugiere que un análisis de vulnerabilidad solo se vuelve operativo si, antes, se comprueba que existen tres mínimos: datos suficientes para representar el sistema, un régimen de peligros correctamente calibrado y una estructura institucional capaz de traducir el diagnóstico en decisiones sin que se diluya en el proceso.

Con esta precaución como marco, se introduce la lección 10, que resume la idea central: el método es transferible; los resultados, no.

12.16. Lección 10. El método es transferible; los resultados, no

Expectativa inicial

Se esperaba que el enfoque desarrollado en el proyecto GENESIS pudiera replicarse de forma relativamente directa en otros archipiélagos con rasgos parecidos. La intuición era comprensible: si la estructura física se parece, el patrón de criticidad debería parecerse también.

Hallazgo

La transferibilidad es real, pero no automática. El marco metodológico (inventario geoespacial, caracterización de interdependencias, simulación de fallos en cascada) puede aplicarse a cualquier sistema insular. Lo que no es transferible, salvo por analogía muy prudente, son los resultados concretos: qué nodos aparecen como críticos, qué escenarios disparan impactos dominantes, qué inversiones ofrecen mayor retorno. Todo eso está gobernado por el contexto local.

En la práctica, la aplicabilidad del enfoque queda condicionada por tres factores que funcionan como umbrales. Si no se alcanzan, el modelo se puede ejecutar, pero su valor operativo se reduce y la incertidumbre deja de ser marginal.

Disponibilidad mínima de datos

Sin un inventario georreferenciado básico de infraestructuras, el análisis no arranca. El método admite aplicaciones incrementales y no exige exhaustividad desde el primer día, pero sí requiere, al menos, la localización y la caracterización funcional de los nodos principales: producción, transporte, bombeo, almacenamiento y puntos de maniobra. De lo contrario, la criticidad se desplaza hacia lo que está mejor documentado, no hacia lo que realmente gobierna el sistema.

Calibración del régimen de peligros

El proyecto GENESIS integra amenazas volcánicas, sísmicas, deslizamientos, inundaciones costeras y meteorológicas, e incendios forestales. Otros archipiélagos pueden estar dominados por peligros distintos (ciclones tropicales, sequías prolongadas, erosión costera extrema, combinaciones con otra dinámica temporal) y eso obliga a recalibrar probabilidades, intensidades, escalas y mecanismos de daño. El marco aguanta, pero el «motor» del riesgo cambia. Mantener la calibración

original por comodidad produce una lectura elegante y, a la vez, poco representativa.

Capacidad institucional para convertir resultados en decisiones

Un modelo de vulnerabilidad no tiene valor por su coherencia interna, sino por su capacidad de orientar decisiones bajo presión: prioridades de inversión, protocolos, redundancias, niveles mínimos de servicio. En contextos con gobernanza muy fragmentada o sin mecanismos estables de intercambio de información, el resultado puede quedarse en diagnóstico académico.

Implicación

La replicación del enfoque del proyecto GENESIS debería comenzar con una verificación realista de estas tres condiciones, incluso si el objetivo final es ambicioso. En muchos casos, la secuencia lógica no es «modelizar primero y ya mejoraremos después», sino al revés: construir un inventario mínimo, armonizar criterios y flujos de datos, definir coordinación y responsabilidades, y solo entonces ejecutar análisis de vulnerabilidad con expectativas operativas razonables. Podría parecer más lento, pero evita un error clásico: disponer de un modelo sofisticado que no puede sostenerse en el tiempo, o que produce recomendaciones difíciles de implementar en el terreno.

12.17. Conclusiones finales

Las diez lecciones presentadas en este capítulo convergen en una conclusión que trasciende los aspectos técnicos: la resiliencia de los sistemas hídricos insulares no es un estado que se alcanza mediante inversiones puntuales, sino un proceso continuo de adaptación que requiere conocimiento actualizado del sistema, capacidad de anticipación y coordinación efectiva entre actores.

El proyecto GENESIS ha demostrado que es posible construir representaciones operativas de sistemas complejos, simular trayectorias de fallo y recuperación, e identificar intervenciones de alto impacto. Pero también ha revelado que el principal obstáculo para la resiliencia no es técnico: es la fragmentación de información, la descoordinación institucional y la ausencia de marcos compartidos de decisión.

En un contexto donde el cambio climático estrecha márgenes y aumenta la frecuencia de condiciones exigentes, la pregunta relevante no es si los sistemas

hídricos insulares pueden resistir eventos extremos, sino si las instituciones que los gestionan pueden aprender, adaptarse y cooperar a la velocidad que las circunstancias exigen.

Las lecciones aquí expuestas no pretenden cerrar ese debate. Pretenden abrirlo con una base de evidencia más sólida.

12.18. Referencias bibliográficas

- Comunidad Autónoma de Canarias. (1990, 26 de julio). Ley 12/1990, de Aguas (BOE-A-1990-23087). *Boletín Oficial del Estado*, 224. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1990-23087>
- Díaz Cruz, P. L. (2013). El agua en Canarias: Una aproximación historiográfica. *Vegueta. Anuario de la Facultad de Geografía e Historia*, 13, 43–64.
- Espada Jr., R., Apan, A., & McDougall, K. (2015). Vulnerability assessment and interdependency analysis of critical infrastructures for climate adaptation and flood mitigation. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 6(3), 313–346. <https://doi.org/10.1108/IJDRBE-02-2014-0019>
- Mesa Delgado, A. (2019). La propiedad privada del agua en Tenerife. Historia de cómo unos pocos juegan con un bien básico. Universidad de La Laguna. <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/15551>
- Nguyen, H. A., Zhang, C., Qi, Q., & Pham, B. T. (2021). Enhancing Water Supply Resilience in a Tropical Island via a Socio-Hydrological Approach: A Case Study in Con Dao Island, Vietnam. *Water*, 13(18), 2573. <https://doi.org/10.3390/w13182573>
- Passos, M., Barquet, K., Kan, J., Destouni, G., & Kalantari, Z. (2024). Flood resilience assessment of interconnected critical infrastructures. <https://doi.org/10.31223/x5p11b>
- Betzold, C. (2015). Adapting to climate change in small island developing states. *Climatic Change*, 133(3), 481–489. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1408-0>
- Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Koritnik, J., Khoury, M., & García-Gil, A. (2026a). GENESIS–El Hierro platform for cascading-failure simulation in water–energy systems [Application software]. Universidad de La Laguna. https://doi.org/10.25145/o.GENESIS_Hierro.2025
- Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Koritnik, J., & Khoury, M. (2026b). GENESIS–La Palma platform for cascading-failure simulation in water systems and critical infrastructures [Application software]. Universidad de La Laguna. https://doi.org/10.25145/o.GENESIS_Palma.2025

- Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Koritnik, J., & Khoury, M. (2026c). GENESIS–Gran Canaria platform for cascading-failure simulation in urban water networks and critical infrastructures [Application software]. Universidad de La Laguna. https://doi.org/10.25145/o.GENESIS_Gran-Canaria.2025
- Santana Mayor, Z. E. (2022). Las aguas terrestres en Canarias: Dominio público, derecho transitorio y comunidades de aguas. Universidad de La Laguna. <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/29335>
- Santamarta, J. C., & Cruz Pérez, N. (2025). Agua y cambio climático en las Islas Canarias. Universidad de La Laguna. <https://doi.org/10.25145/b.2025.04>
- Suárez Moreno, F. (2009). El agua en Canarias. Asociación Cultural Revista Digital BienMeSabe.org. <http://www.bienmesabe.org/noticia/2009/Julio/el-agua-en-canarias.html>
- Tai, K., Kizhakkedath, A., Lin, J., Tiong, R., & Sim, M. (2014). Identifying extreme risks in critical infrastructure interdependencies. <https://doi.org/10.14453/isngi2013.proc.44>

Capítulo 13:

Guía de uso de la plataforma de fallos en cascada para la planificación

Megan Expósito Brazier

Jelena Koritnik

Mehdi Khoury

13.1. Introducción

A la luz de lo expuesto en los capítulos anteriores, las islas se encuentran en una situación de elevada vulnerabilidad frente a los fallos en cascada, derivados de la fuerte interconectividad y dependencia entre sus infraestructuras críticas. La concurrencia de riesgos naturales y la limitada capacidad de sustitución de los sistemas insulares, incrementan la probabilidad de que una perturbación inicial se propague a otros sectores, amplificando sus efectos.

En este contexto, el presente capítulo tiene como objetivo describir el funcionamiento del software desarrollado para evaluar la respuesta de las infraestructuras ante distintos escenarios de simulación. La herramienta permite analizar el comportamiento dinámico de los sistemas interconectados frente a distintos eventos naturales como terremotos, inundaciones costeras y de lluvias torrenciales, erupciones volcánicas, incendios forestales o deslizamientos de ladera, considerando distintos horizontes temporales. De este modo, el capítulo se concibe como una guía para la comprensión y aplicación del modelo en la evaluación de los fallos en cascada.

La plataforma de simulación a la que se hace referencia en este capítulo se facilita únicamente a entidades autorizadas mediante los correspondientes convenios/licencias del proyecto. Esta obra no incorpora ni distribuye software ni credenciales de acceso. El presente capítulo describe la lógica de uso y lectura de resultados para usuarios autorizados, y remite a la documentación de instalación y operación incluida en el paquete entregado por convenio.

13.2. Primeros pasos

La plataforma se organiza en una carpeta denominada como la isla de estudio (La Palma, Gran Canaria o El Hierro) (Santamarta, et al. 2026a; 2026b; 2026c).

Esta carpeta incluye 2 subdirectorios, correspondientes al entorno del servidor (*server*) y otra al entorno de cliente (*client*), así como un bloc de notas con el enlace a la plataforma web.

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
client	12/02/2026 10:26	Carpeta de archivos	
server	12/02/2026 10:26	Carpeta de archivos	
Isla	12/02/2026 10:18	Documento de tex...	1 KB

Figura 13.1 Carpetas.

A continuación, se describen los pasos necesarios para la puesta en marcha de la plataforma:

- 1) Acceder a la carpeta correspondiente al servidor (*server*).
- 2) **Ejecutar la aplicación.** Su nombre será diferente dependiendo de la isla:
 - a) El Hierro: cf_07_0_eh
 - b) Gran Canaria: cf_07_0_gc
 - c) La Palma: lp_1_2

incremental	19/06/2025 9:54	Carpeta de archivos	
.cargo-lock	19/06/2025 9:54	Archivo CARGO-L...	0 KB
cf_0_7_0_eh.d	24/06/2025 10:19	Archivo D	1 KB
cf_0_7_0_eh	24/06/2025 10:19	Aplicación	6.167 KB
cf_0_7_0_eh.pdb	24/06/2025 10:19	Archivo PDB	3.804 KB

Figura 13.2 Archivo ejecutable en la carpeta *server*.

- 3) Al ejecutarlo, aparecerá una ventana emergente solicitando permisos de acceso a la aplicación. Seleccionar la opción *permitir*.
- 4) Se abrirá una nueva ventana, como la que se muestra a continuación. Es importante **mantener esta ventana abierta** y continuar con el siguiente paso.



Figura 13.3 Ejecución de la aplicación de la carpeta del servidor.

13. Guía de uso de la plataforma de fallos en cascada para la planificación

5) Acceder a la carpeta correspondiente al cliente (*client*).

6) Ejecutar el archivo **RebexTinyWebServer**.

wwwroot	01/07/2025 11:45	Carpeta de archivos	
RebexTinyWebServer	13/03/2025 14:49	Aplicación	3,288 KB
RebexTinyWebServer.exe.config	01/07/2025 10:30	Archivo CONFIG	3 KB
server-certificate	01/07/2025 10:16	Certificado de seg...	2 KB

Figura 13.4 Archivo ejecutable en la carpeta *client*.

7) Se abrirá una nueva ventana. Pulsar **Start** y, posteriormente, **Permitir**.

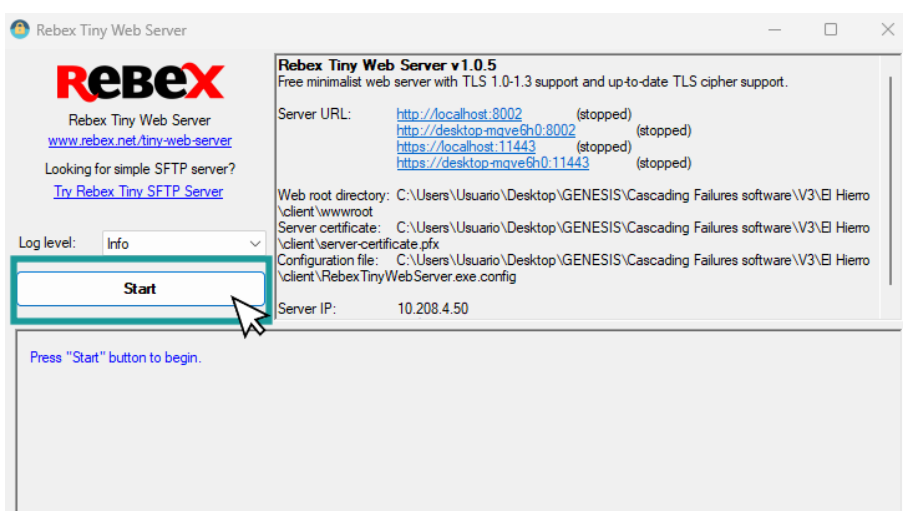


Figura 13.5 Ejecución de la aplicación de la carpeta del cliente

8) Una vez completados estos pasos, se podrá acceder a la plataforma mediante el enlace que se encuentra en el **bloc de notas** (archivo .txt). Para ello, copiar el enlace en su navegador (Google Chrome, Microsoft Edge, ...)

Server → Client → Enlace

RESUMEN

- (1) Ejecutar la aplicación de la carpeta *server*
- (2) Ejecutar el archivo RebexTinyWebServer de la carpeta *client*
- (3) Abrir el enlace en el *bloc de notas*

- 9) Usar la plataforma para generar las distintas simulaciones (toda la información en el apartado 13.4).
- 10) Para finalizar el uso de la plataforma, bastará con cerrar las ventanas del navegador y de la aplicación **client**. Adicionalmente, en **Rebex Tiny Web Server** se deberá pulsar la opción **Stop** y, a continuación, cerrar la ventana del servidor.

De forma ocasional, si se detecta que la plataforma presenta tiempos de carga elevados o un funcionamiento lento, se recomienda **eliminar la memoria caché** del navegador.

En el caso de utilizar el navegador Google Chrome, el procedimiento es el siguiente:

- Acceder al menú situado en los tres puntos ubicados en la parte derecha de la barra superior del navegador.
- Seleccionar la opción Eliminar datos de navegación.
- Marcar únicamente la opción Archivos e imágenes almacenados en caché.
- Confirmar la eliminación de los datos seleccionados.

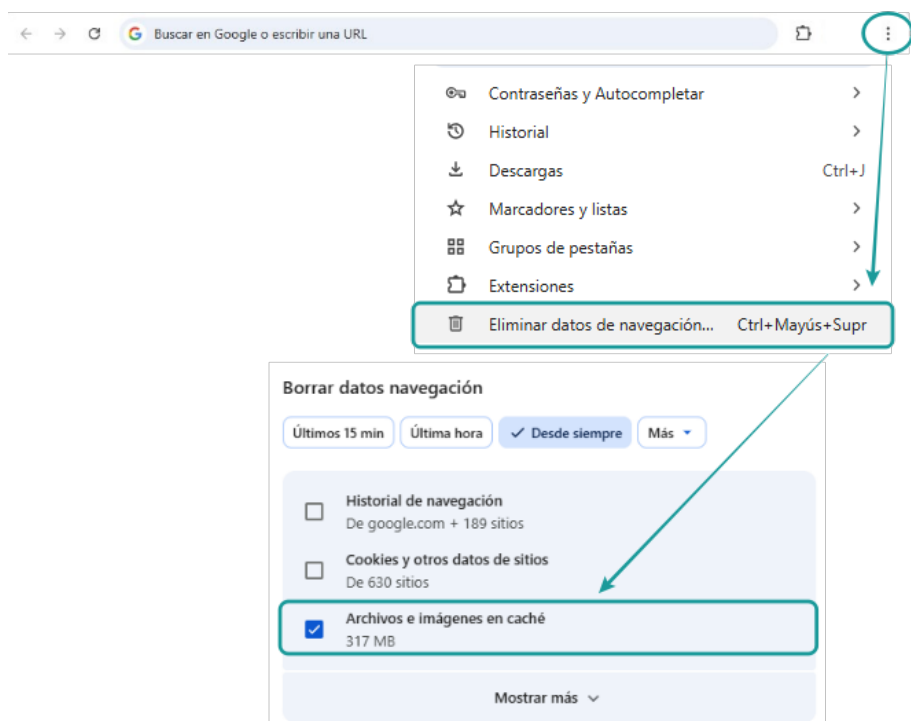


Figura 13.6 Esquema de cómo borrar el caché del navegador.

13. Guía de uso de la plataforma de fallos en cascada para la planificación

Esta acción puede contribuir a mejorar el rendimiento y la carga de la plataforma.

13.3. Aplicación

La interfaz de la plataforma de simulación de fallos en cascada se presenta como se muestra a continuación.



Figura 13.7 Interfaz de la plataforma (ej. El Hierro).

Su diseño se organiza en distintos paneles, en los cuales se podrá modificar el escenario elegido, y se mostrará la información sobre su estado y comportamiento. A continuación, se indica el papel de cada panel:

Critical Services:

Este panel permite visualizar la integridad estructural de las infraestructuras críticas, agrupadas según el sector al que pertenecen (energía, telecomunicaciones,

transporte, etc.). Proporciona una visión sintética del estado global de los servicios esenciales.

El porcentaje total mostrado en la parte superior (SCORE) representa la integridad global del sistema, calculada como la media de los porcentajes de integridad de cada uno de los sectores considerados.

Infrastructures:

En este apartado se muestra la información detallada de cada nodo (infraestructura). Inicialmente, la integridad de todos los nodos se establece en 100 %. Tras la ejecución de cada simulación, este panel refleja el grado de afectación de las infraestructuras.

Asimismo, este panel permite modificar las características de cada nodo, incluyendo:

- La opción de proteger la infraestructura (*shield*), evitando que se vea afectada por la simulación
- La asignación de sistemas de respaldo (*backup*), que pueden corresponder, según el tipo de infraestructura a, energía, agua o conectividad 6G
- La posibilidad de alterar manualmente la integridad de las infraestructuras seleccionadas sin necesidad de ejecutar un escenario de riesgo natural. Esto permite analizar la propagación de fallos en cascada de forma más localizada y analizar la respuesta del resto del sistema.

Map:

Este panel permite visualizar de forma espacial el impacto de una simulación sobre los distintos nodos del sistema. Incluye funciones como la selección de infraestructuras por áreas geográficas, lo que permite visualizarlos en el panel de *Infrastructures*. Asimismo, permite la exportación del mapa resultante en formato pdf.

Workforce:

Muestra cómo los distintos sectores laborales se verían afectados tras una simulación, permitiendo evaluar los impactos indirectos asociados a la disponibilidad de servicios e infraestructuras.

Population:

Representa el impacto de la simulación en el acceso de la población a determinados servicios. El análisis se divide por grupos poblacionales, incluyendo pobla-

ción general, vulnerable, personas con bajos recursos y familias con hijos menores de 12 años, tanto monoparentales como pluriparentales.

- Impacto de la población por tipo de servicio: aquí se indica qué porcentaje de la población total verá una afección en servicios como farmacias, hospitales, transporte público, etc.
- Impacto por servicio en la población vulnerable: indica el porcentaje de menores de 5 y mayores de 85 años afectados por la pérdida de dichos servicios.
- Impacto del servicio en población empobrecida: incluye a la población con ingresos por unidad familiar menores de 5000€, considerando los mismos servicios.
- Impacto en educación para familias monoparentales con hijos menores de 12 años: cobertura de educación primaria, secundaria y educación especial.
- Impacto en educación para familias pluriparentales con hijos menores de 12 años: igual cobertura que en el caso anterior.

Crops:

Este panel permite analizar cómo los cultivos de la isla se ven afectados tras la ejecución de una simulación, proporcionando una estimación del impacto en el sector agrícola.

Scenarios:

Apartado destinado a la selección y configuración de los escenarios de simulación.

13.4. Preparación de escenarios

La plataforma de fallos en cascada desarrollada (Ramparts & Light Limited, 2026) en el marco de este trabajo con la Universidad de La Laguna, permite simular cómo las perturbaciones externas afectan a los servicios esenciales de una isla y cómo dichas perturbaciones pueden propagarse a través de la red. Para utilizarla en procesos de planificación, el primer paso consiste en definir escenarios de entrada que representen condiciones plausibles de riesgo, exposición o cambios operativos.

Los escenarios se construyen a partir de seis tipos de perturbación derivados del proyecto europeo RIESGOMAP (2013): erupciones volcánicas, terremotos,

incendios forestales, deslizamientos, inundaciones costeras e inundaciones pluviales. Cada perturbación puede aplicarse sobre áreas específicas o sobre la totalidad de la isla, según el objetivo del análisis. A estos escenarios base se añaden modificadores climáticos que incrementan el daño en función del número anual de alertas registradas para precipitaciones, viento, altas temperaturas, tormentas o avisos costeros (Reyes Parrilla, 2025). Estos incrementos porcentuales permiten introducir en la simulación los efectos progresivos del cambio climático sobre la frecuencia e intensidad de los peligros.

La preparación de escenarios incluye asimismo la selección de nodos críticos que se quieren proteger o analizar bajo condiciones específicas. La plataforma permite explorar qué ocurriría si determinadas infraestructuras quedaran protegidas frente a un tipo de daño, si otras dispusieran de respaldo energético o si ciertos nodos pudieran cambiar de función para sostener el sistema. Este conjunto de opciones facilita construir escenarios comparativos que orienten la toma de decisiones sobre inversión, mantenimiento y planificación.

A continuación, se describe el procedimiento para la preparación de los distintos escenarios:

1) Acceso a la configuración de escenarios:

Para visualizar los distintos escenarios, es necesario acceder a la pestaña *Scenarios*, donde se podrá seleccionar:

a) Selección del escenario RIESGOMAP

En este apartado se debe elegir el tipo de riesgo natural a simular. La plataforma permite analizar los siguientes eventos:

- Incendios forestales (*forest-fires*)
- Deslizamientos de ladera (*landslides*)
- Erupciones volcánicas (*volcanic-eruptions*)
- Inundaciones costeras (*coastal-floods*)
- Inundaciones por lluvias torrenciales (*fluvial-floods*)
- Terremotos (*earthquakes*)

b) Horizonte temporal de análisis

En este apartado se selecciona el año para el cual se desean visualizar los efectos de la simulación. Los horizontes temporales disponibles son 2025, 2050, 2075 y

2100. Estos horizontes temporales aplican la metodología del proyecto GENESIS, que incorpora un incremento del 1 % de daño anual asociado a alertas previstas (Reyes Parrilla, 2025). En caso de no seleccionar ningún horizonte temporal, la simulación se ejecutará de forma predeterminada, sin aplicar modificadores por alertas.

Cabe destacar que los escenarios de erupciones volcánicas y terremotos no están incluidos en las previsiones de la metodología del proyecto GENESIS.

c) Ámbito municipal de estudio

En este apartado se definen los municipios de la isla para los que se desea analizar el impacto de la simulación. La selección se realiza haciendo clic sobre el nombre del municipio, mientras que para deseleccionar se deberá pulsar nuevamente sobre el mismo. Para analizar el impacto en la totalidad de la isla, debe utilizarse la opción *Select all*.

Los municipios resaltados se muestran resaltados en color azul en el mapa situado junto al listado municipal, mientras que los que no están seleccionados, estarán en color gris.

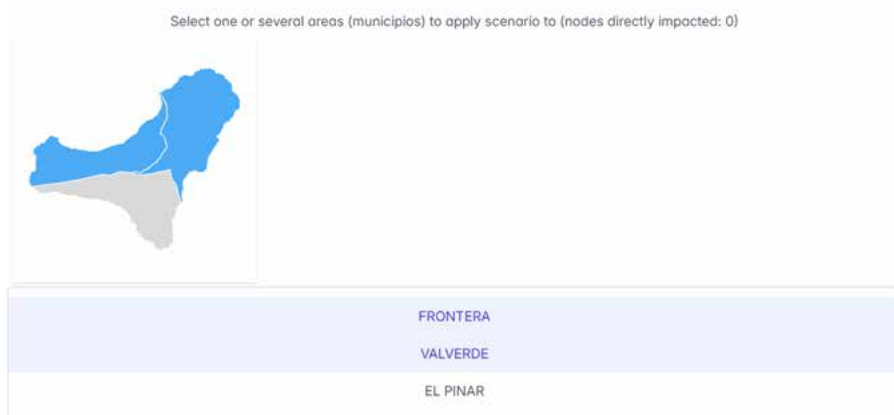


Figura 13.8 Ejemplo de selección de dos municipios para la simulación: Frontera y Valverde.

2) Ejecución de la simulación:

Una vez definido el escenario deseado, debe hacerse clic en *RUN* para ejecutar la simulación.

3) Procesamiento y visualización de resultados:

Tras iniciar la simulación, aparecerá un indicador de carga en la parte superior de la interfaz. Cuando dicho indicador desaparezca, los resultados estarán disponibles para su análisis y visualización en los distintos paneles de la plataforma.

4) Reinicio y configuración de nuevos escenarios:

Para preparar un nuevo escenario de simulación, seleccione la opción *RESET* y repita el proceso siguiendo los pasos descritos anteriormente.

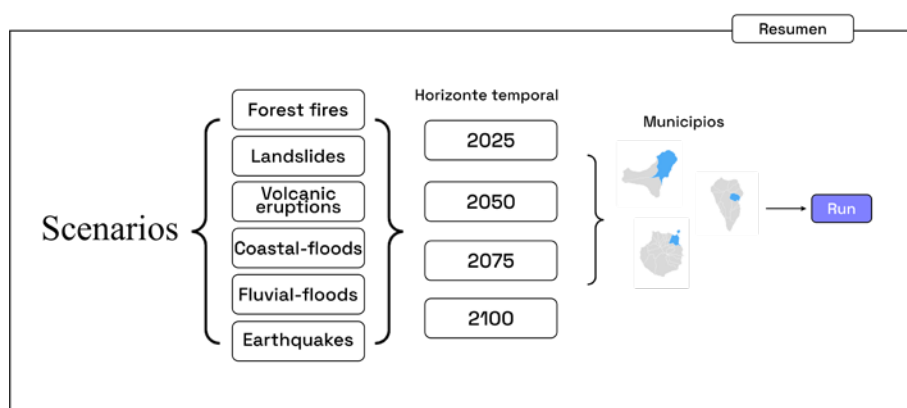


Figura 13.9 Esquema básico del proceso de preparación de escenarios en la plataforma.

13.5. Interpretación de los resultados

Una vez ejecutada la simulación, la plataforma muestra los resultados a través de los distintos paneles, permitiendo analizar de forma detallada el impacto del escenario seleccionado sobre las infraestructuras, la población y los sectores productivos. A continuación, se detallan los paneles y la información que proporcionan:

Critical Services:

Tras la simulación, se muestra el **porcentaje de integridad final** de cada sector de infraestructura crítica, así como la total de la isla. Esto permite identificar cuáles son los sectores más afectados en el escenario seleccionado y evaluar la resiliencia general del sistema ante la disrupción considerada.

Infrastructure:

En este apartado se analiza el comportamiento de cada infraestructura de manera individual, evaluando su grado de afectación tras la simulación. La representación de los resultados facilita la identificación de nodos críticos y la estimación de su vulnerabilidad relativa dentro del sistema.

- En este panel los nodos pueden ordenarse según su nivel de integridad mediante las flechas situadas en la columna *Integrity*, de menor a mayor. Esto resulta especialmente útil para identificar casos donde un nodo mantiene integridad total (p.ej. 100 %) pero presenta un nivel de *output* bajo como consecuencia de las interdependencias con otros nodos afectados.
- Si un nodo presenta un alto nivel de afectación, se puede aplicar un *shield* para simular qué ocurriría si esa infraestructura no se viera afectada, evaluando la respuesta del sistema ante esta modificación. Para ello, se debe seleccionar el recuadro de la columna *shield* de la infraestructura deseada, y ejecutar nuevamente la simulación (*RUN*).
- Asimismo, se puede analizar la efectividad de añadir un *backup*, observando cómo mejoraría la respuesta del nodo frente a la interrupción. Para ello se debe elegir el backup deseado y darle nuevamente a *RUN*.

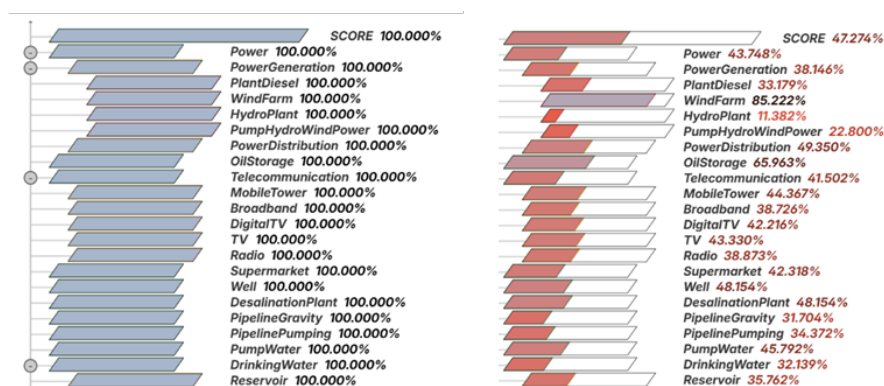


Figura 13.10 Comparación de integridad sobre los distintos sectores antes de una simulación y después.

Map:

Una vez ejecutado el escenario, la plataforma genera mapas de criticidad que sintetizan el estado de los servicios esenciales tras la perturbación inicial. Estos

mapas representan, a escala de nodo, la degradación funcional producida por el impacto directo del peligro y por la propagación a través de interdependencias. El resultado final refleja no solo la exposición del sistema, sino también su capacidad de absorber impactos sin provocar fallos generalizados.

La interpretación de los mapas requiere distinguir entre:

- **Daño directo**, asociado al impacto del peligro sobre el nodo (por ejemplo, una infraestructura costera afectada por inundación litoral).
- **Daño por interdependencias**, que aparece cuando la degradación de un nodo afecta a otro que depende de él (por ejemplo, una estación de bombeo sin energía que provoca fallos en depósitos de agua situados arriba).
- **Efectos sobre la población y el empleo**, derivados de la codependencia entre servicios esenciales y disponibilidad de fuerza laboral, modelada mediante la estructura demográfica por áreas estadísticas.

Los mapas permiten identificar zonas donde la pérdida de un nodo clave desencadena fallos sucesivos. Estos patrones resultan esenciales para anticipar problemas de accesibilidad, interrupciones del suministro, impactos sobre sectores económicos o dificultades para la recuperación post-evento. La lectura adecuada de la criticidad ofrece, por tanto, un diagnóstico visual que integra factores físicos, operativos y sociales.

Workforce:

Los resultados asociados al sector laboral pueden visualizarse de dos formas complementarias. La primera es mediante una tabla numérica, organizada en varias columnas:

- **Industry:** indica el sector laboral considerado
- **Workforce (Current/Initial):** el número de trabajadores que serían afectados tras la simulación en relación con el total inicial
- **Availability:** representa la disponibilidad de trabajadores en ese sector, expresado en porcentaje

De forma complementaria, estos mismos datos se representan mediante un gráfico, lo que facilita una interpretación visual del impacto de la simulación sobre la disponibilidad de la fuerza laboral en los distintos sectores.

Chart of workforce availability by industry

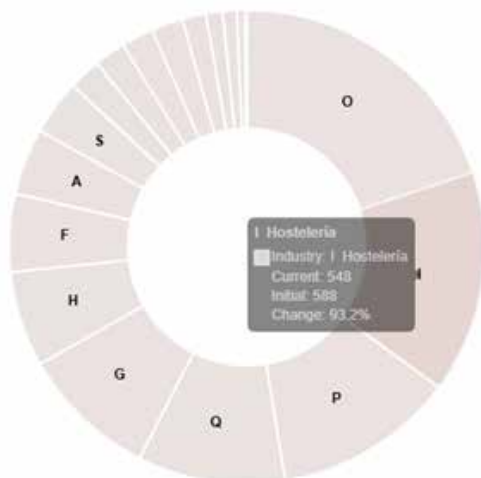


Figura 13.11 Ejemplo de gráfico con disponibilidad de los trabajadores.

Population:

Este panel muestra el impacto de la disrupción sobre la población, indicando tanto los sectores de población afectados como el grado de afectación asociado. Los resultados se presentan diferenciando entre la población que pierde entre un 10 % y un 50 % del acceso a un determinado servicio y aquella que pierde más del 50 % del acceso. Esta desagregación permite evaluar la severidad del impacto sobre la población y distinguir entre afectaciones leves, moderadas y severas.

Crops:

En este apartado se muestra el área total de cada tipo de cultivo presente en la isla, así como su nivel de integridad antes y después de la disrupción. El área del cultivo es referida al total de la isla, mientras que la integridad inicial es específica de la zona de estudio.

Adicionalmente, el panel incluye una gráfica que permite visualizar la distribución espacial de los cultivos y su grado de afectación tras la simulación. Dicha gráfica se encuentra dividida en secciones según el área que abarcan los cultivos y emplea una codificación por colores para representar su integridad final: tonos más oscuros o intensos indican un menor nivel de integridad, mientras que tonos más claros corresponden a valores de integridad más elevados. Esta representación facilita la identificación visual de las zonas y cultivos más afectados por el escenario analizado.



Figura 13.12 Ejemplo de gráfico de distribución de los cultivos por área e integridad en un escenario de deslizamientos de ladera en Valverde.

13.6. Priorización de nodos e identificación de medidas preventivas

La priorización de nodos se basa en la combinación de tres criterios fundamentales:

- Centralidad funcional, que mide el papel del nodo dentro de la red y su capacidad de afectar a otros
- Exposición y sensibilidad, derivadas de la peligrosidad aplicada en el escenario
- Impacto esperado sobre población y empleo, resultado de la codependencia modelada.

Los nodos que concentran valores elevados en estos tres aspectos se consideran críticos prioritarios. La plataforma permite examinar cómo su degradación altera la red y qué medidas podrían reducir la propagación del daño. Entre las opciones disponibles se encuentran:

- Protección frente a un tipo específico de perturbación (por ejemplo, evitar el daño por inundación costera en una planta de desalinización).
- Introducción de respaldo energético para reducir la dependencia de redes eléctricas vulnerables.

13. Guía de uso de la plataforma de fallos en cascada para la planificación

- Ajuste de parámetros funcionales para simular cambios de rol en nodos estratégicos.
- Análisis de la capacidad de otras infraestructuras para absorber funciones en caso de fallo.

Este enfoque permite identificar intervenciones preventivas de alto impacto, al señalar dónde conviene invertir en refuerzos estructurales, mejorar accesos para mantenimiento, instalar generadores auxiliares o mejorar la monitorización. Asimismo, ayuda a delimitar medidas contingentes, útiles para sostener la operación durante la recuperación post-evento.

13.7. Ejemplos reproducibles por isla

La plataforma ha sido aplicada a tres estudios insulares completos (La Palma, El Hierro y Gran Canaria), lo que permite reproducir casos con características diferenciadas y extraer lecciones adaptadas a cada contexto.

La Palma

La simulación de un episodio de inundación en *Breña Alta* se realiza aplicando el escenario *Coastal-floods* para el horizonte temporal 2025 en dicho municipio. Con estos parámetros, se observa que, de producirse la disrupción en el contexto presente, la integridad global del sistema se reduciría al 52,29 %, principalmente debido a la afectación de la Central Térmica de Los Guinchos. Aunque el evento se circunscribe espacialmente a una zona concreta, la cadena de fallos en cascada resultante desencadenaría impactos a escala insular, dada la elevada dependencia de los distintos sectores respecto al suministro energético de esta instalación. En consecuencia, la simulación evidencia que estos nodos presentan una alta vulnerabilidad frente a escenarios de inundación, al propiciar la propagación del daño a lo largo de toda la isla.

En cuanto a los principales canales de transferencia y las captaciones costeras, estos se configuran como nodos donde el daño puede propagarse hacia zonas interiores. Los mapas evidencian que perturbaciones en tramos de ladera o pozos de bombeo situados en cotas bajas generan efectos en cadena sobre depósitos y sectores urbanos dependientes de redistribución interior.

El Hierro

En un escenario de *deslizamiento de ladera* en *Valverde* para el horizonte temporal 2025, la simulación muestra un nivel de integridad del 61,87 % en las infraestructuras de la isla. El evento genera un impacto particularmente relevante en el sector energético, dada la presencia de la central hidroeléctrica de La Gorona, responsable de una parte sustancial del suministro eléctrico insular.

En relación con las infraestructuras hidráulicas, el modelo resalta la función estratégica de las impulsiones que trasladan el agua desde las captaciones costeras hacia las cotas más elevadas. La pérdida de estaciones de bombeo críticas, condicionada por el relieve interior, desencadena fallos en cascada que comprometen tanto la continuidad del suministro como la actividad laboral de diversos sectores productivos.

Gran Canaria

En un escenario de *deslizamiento de ladera* en *Las Palmas de Gran Canaria* para el año 2025, la simulación evidencia una afectación especialmente significativa en el sistema de impulsión de agua. La presencia simultánea de plantas de desalinización en zonas costeras, presas y redes interiores condicionadas por gradientes topográficos genera patrones de criticidad más complejos. Las simulaciones permiten observar cómo fallos en la producción costera se combinan con vulnerabilidades en conducciones interiores, configurando escenarios donde la redundancia y el almacenamiento son determinantes.

Estos ejemplos muestran cómo la plataforma puede emplearse para estudiar distintos tipos de perturbaciones y diseñar respuestas adaptadas a la configuración territorial y operativa de cada isla. Su reproducibilidad permite actualizar los análisis a medida que cambian las condiciones de riesgo, la disponibilidad de datos o el estado de las infraestructuras.

13.8. Consideraciones finales para la planificación estratégica

La plataforma de fallos en cascada constituye una herramienta que traslada la evaluación de vulnerabilidad a un entorno operativo capaz de simular escenarios complejos y comparar alternativas. Su uso en la planificación permite identificar los nodos donde una intervención preventiva o un refuerzo estructural tienen mayor capacidad de reducir la propagación del daño. Asimismo, proporciona un marco para evaluar escenarios futuros, integrar modificadores climáticos y com-

prender cómo distintos peligros pueden interactuar con las características propias del sistema hídrico insular.

Los capítulos anteriores han mostrado que la resiliencia depende de factores que abarcan desde la gobernanza y los inventarios hasta el diseño estructural y la disponibilidad de energía. La plataforma sintetiza estos elementos en un entorno analítico que facilita priorizar inversiones, orientar medidas de adaptación y diseñar estrategias de contingencia de acuerdo con los riesgos predominantes en cada territorio. De este modo, se convierte en un puente entre la evaluación técnica y la toma de decisiones estratégicas en contextos sometidos a condiciones cada vez más exigentes.

13.9. Referencias bibliográficas

- Ramparts & Light Limited* (2026). <https://www.rampartsandlight.com/>
- Reyes Parrilla, D. (2025). *GENESIS D1.2 Climate risk profiles to each Macaronesian island (1.0)*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17813870>
- RIESGOMAP (2013). *Prevención de riesgos naturales y tecnológicos en la planificación territorial y urbanística* (Programa MAC 2007–2013) [Dataset/service]. Gobierno de Canarias (IDE-Canarias/datos.canarias.es) https://opendata.sit-can.es/upload/seguridad/gobcan_riesgomap_memoria-metodologia.pdf
- Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Koritnik, J., & Khoury, M. (2026a). *GENESIS–La Palma platform for cascading-failure simulation in water systems and critical infrastructures* [Application software]. Universidad de La Laguna. https://doi.org/10.25145/o.GENESIS_Palma.2025
- Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Koritnik, J., & Khoury, M. (2026b). *GENESIS–Gran Canaria platform for cascading-failure simulation in urban water networks and critical infrastructures* [Application software]. Universidad de La Laguna. https://doi.org/10.25145/o.GENESIS_Gran-Canaria.2025
- Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Koritnik, J., Khoury, M., & García-Gil, A. (2026c). *GENESIS–El Hierro platform for cascading-failure simulation in water–energy systems* [Application software]. Universidad de La Laguna. https://doi.org/10.25145/o.GENESIS_Hierro.2025

Conceptos clave y terminología del sistema hídrico bajo fallos en cascada

Jelena Koritnik
Megan Expósito Brazier

G.1 Alcance y criterios del glosario

El presente glosario no tiene como objetivo ofrecer un diccionario exhaustivo ni una recopilación académica estándar de definiciones. Su función es fijar el significado operativo de los términos clave utilizados a lo largo del libro, evitando ambigüedades y lecturas inconsistentes entre capítulos.

El contenido del libro se articula en torno a sistemas insulares, infraestructuras críticas y servicios esenciales, en particular el ciclo integral del agua, sometidos a condiciones de aislamiento, dependencia energética y estrés climático. En este contexto, muchos conceptos habituales en la literatura técnica (resiliencia, vulnerabilidad, seguridad de suministro, sostenibilidad, transición energética) adquieren matices específicos que conviene explicitar. Por ello, las definiciones incluidas en este glosario responden a los siguientes criterios:

- Son operativas, es decir, están formuladas para describir cómo funciona realmente el sistema bajo condiciones normales y, sobre todo, bajo perturbaciones.
- Reflejan el uso efectivo de los términos dentro del libro, no necesariamente su definición más amplia o genérica en otros ámbitos.
- Priorizan conceptos relacionados con interdependencias, fallos en cascada, continuidad del servicio y capacidad de recuperación, frente a enfoques sectoriales aislados.
- Evitan deliberadamente formulaciones normativas o retóricas cuando estas no aportan claridad técnica.

El glosario debe leerse, por tanto, como una herramienta de cierre conceptual: no introduce ideas nuevas, pero fija el marco desde el cual deben interpretarse los capítulos precedentes.

G.2 Glosario de términos (orden alfabético)

Acuífero basal

Sistema acuífero principal en islas volcánicas, generalmente continuo y de gran extensión, que actúa como reserva estratégica de agua subterránea. Su explotación y estado condicionan la seguridad hídrica a largo plazo y presentan una alta sensibilidad a la sobreexplotación y a la intrusión salina.

Almacenamiento hidráulico

Capacidad de retener agua en depósitos, embalses o infraestructuras equivalentes con el fin de desacoplar temporalmente la captación, el tratamiento o la producción de agua de su distribución. En contextos insulares, constituye uno de los principales mecanismos de amortiguación frente a fallos energéticos u operativos.

Capacidad de amortiguación

Habilidad de un sistema para absorber perturbaciones sin pérdida inmediata del servicio. En el ciclo integral del agua, depende fundamentalmente de volúmenes almacenados, redundancias de alimentación y flexibilidad operativa, más que de la disponibilidad instantánea del recurso.

Continuidad del servicio

Capacidad de un sistema para mantener la prestación efectiva del servicio (abastecimiento, saneamiento, depuración) en condiciones de estrés. No equivale a disponibilidad de recurso, sino a operatividad sostenida.

Dependencia energética del agua

Relación estructural por la cual la captación, tratamiento, distribución y depuración del agua requieren suministro eléctrico continuo. En sistemas insulares, esta dependencia es directa y dominante, especialmente cuando existe desalinización de agua de mar.

Desalinización de agua de mar

Proceso industrial de producción de agua potable a partir de agua marina mediante tecnologías como ósmosis inversa. En islas, constituye una fuente estra-

tégica, pero introduce una fuerte dependencia energética y una elevada sensibilidad a interrupciones eléctricas.

Escenario de estrés

Situación caracterizada por la concurrencia de factores adversos (sequía, ola de calor, fallo eléctrico, incidencia logística, erupción volcánica) que tensionan simultáneamente varios componentes del sistema, revelando vulnerabilidades no visibles en condiciones normales.

Fallos en cascada

Proceso mediante el cual un fallo inicial en un componente del sistema provoca una secuencia de fallos secundarios en otros componentes interdependientes, amplificando el impacto inicial. En el contexto del libro, describe la propagación de perturbaciones entre energía, agua e infraestructuras críticas.

Infraestructura crítica

Instalación, red o activo cuya indisponibilidad compromete gravemente la seguridad, la salud o el bienestar de la población. En el ámbito hídrico insular, incluye estaciones de bombeo, plantas de tratamiento, desalinizadoras y nodos eléctricos asociados.

Interdependencia funcional

Relación bidireccional o asimétrica entre sistemas por la cual el funcionamiento de uno depende del estado operativo del otro. El nexo agua-energía en islas se caracteriza por una interdependencia funcional rígida, con escaso margen de sustitución.

Nodo crítico

Elemento del sistema cuya indisponibilidad tiene un impacto desproporcionado sobre la continuidad del servicio. Puede ser hidráulico (bombeo, depósito clave) o energético (subestación, línea de alimentación).

No linealidad del impacto

Propiedad de los sistemas complejos por la cual el efecto de una perturbación no es proporcional a su magnitud. Un mismo fallo puede resultar irrelevante o

crítico según el estado previo del sistema (almacenamiento, redundancia, demanda).

Recarga efectiva

Fracción de la precipitación que se incorpora de forma real al sistema acuífero y queda disponible para explotación futura. En islas volcánicas, está condicionada por litología, pendiente, uso del suelo y variabilidad climática.

Red débilmente mallada

Configuración de red eléctrica o hidráulica con escasas alternativas de circulación, donde la pérdida de un elemento reduce drásticamente la capacidad de maniobra y recuperación.

Redundancia activable

Propiedad operativa de un sistema que garantiza su sustitución funcional efectiva ante perturbaciones, mediante recursos alternativos con capacidad disponible, conectividad efectiva, calidad aceptable, accesos y personal operativos.

Resiliencia operativa

Capacidad de un sistema para mantener o recuperar rápidamente la prestación del servicio tras una perturbación. Se diferencia de la resiliencia conceptual o estratégica en que se mide en tiempos, volúmenes y continuidad real.

Servicio esencial

Servicio cuya interrupción prolongada genera impactos sociales y económicos severos. El abastecimiento de agua potable es un servicio esencial cuya continuidad depende de factores energéticos, hidráulicos y organizativos.

Sistema aislado

Sistema sin interconexión funcional con otros de mayor escala, incapaz de recibir apoyo externo inmediato en caso de fallo. Esta condición define tanto los sistemas eléctricos como hídricos insulares.

Umbral de operatividad

Nivel mínimo de funcionamiento por debajo del cual el sistema deja de prestar el servicio de forma aceptable. En el agua, suele estar asociado a presión mínima, calidad o continuidad temporal.

Vulnerabilidad estructural

Grado en que el diseño físico y organizativo del sistema lo hace sensible a perturbaciones previsibles. No depende solo de eventos extremos, sino de decisiones de planificación, redundancia y operación.

G.3 Acrónimos y siglas

ACS: Agua Caliente Sanitaria

BESS: Battery Energy Storage System

CIAEH: Consejo Insular de Aguas de El Hierro

CIAGC: Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria

CIALP: Consejo Insular de Aguas de La Palma

CILP: Cabildo Insular de La Palma

CTEE: Consejería de Transición Ecológica y Energía

EDAM: Estación Desaladora de Agua de Mar

EDAR: Estación Depuradora de Aguas Residuales

ETAP: Estación de Tratamiento de Agua Potable

IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

INE: Instituto Nacional de Estadística

ISTAC: Instituto Canario de Estadística

REE: Red Eléctrica de España

SWAC: Seawater Air Conditioning

FICHAS DE LOS AUTORES



Juan Carlos Santamarta Cereza

Doctor Ingeniero de Montes
Universidad de La Laguna

Breve trayectoria profesional

Ingeniero de Montes por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Graduado en Ingeniería Civil (ULPGC), Ingeniero en Recursos Energéticos (UJA) e Ingeniero Técnico de Minas por la UPM. Doctor en Ingeniería Hidráulica y Energética (UPM) en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos y doctor, con mención internacional, en Geología Aplicada y Ambiental por la Universidad de León en la Escuela Técnica y Superior de Ingenieros de Minas. Actualmente es Catedrático de la Universidad de La Laguna y miembro asociado de la Real Academia de Ingeniería de España (RAI).

Su ámbito de trabajo son los recursos hídricos en sistemas insulares, la ingeniería geológica y el medio ambiente donde ha publicado extensamente, con 35 libros técnicos y científicos, 110 capítulos de libros y 141 artículos científicos y de divulgación científica y técnica, más de 100 aportaciones a congresos nacionales e internacionales, además de ser el editor responsable de la serie «Hydrogeology» para la editorial Springer. Como investigador, ha liderado 43 proyectos de gran envergadura de I+D+i, incluidos tres del programa Horizonte Europa, Erasmus+ e Interreg y participado en 57 proyectos de investigación, así como coordinador de 67 informes técnicos en empresas. También es un docente, con más de 30 asignaturas diferentes impartidas, 165 seminarios y más de 150 cursos técnicos dirigidos en diversas universidades nacionales e internacionales. Desde el año 2010 dirige el grupo de investigación INGENIA (Ingeniería Geológica, Innovación y Aguas).

Fue Decano del Colegio Oficial de Ingenieros de Montes en Canarias durante 12 años y actualmente es miembro del grupo de trabajo de hidrogeología en Naciones Unidas (UN-Water) y de la World Federation of Engineering Organizations (WFEO) donde ha sido su representante en materia de recursos hídricos en diferentes reuniones ante la ONU.

A nivel profesional, trabajó para diferentes empresas punteras de ingeniería nacionales e internacionales, en consultoría y dirección de proyectos para ingeniería y Administraciones Públicas: asesor científico en planificación hidrológica de Canarias (2º ciclo 2015–2021; 3º ciclo 2021–2022), campañas de muestreo y evaluación cuantitativa y cualitativa de aguas subterráneas (Canarias, 2018), planificación de recursos hídricos subterráneos (Guinea Ecuatorial, 2016–2017) y asesoría a ABAQUA en infraestructuras del ciclo integral del agua (Baleares, 2020–2021). Coordinación de trabajos con C.H. del Duero y C.H. del Ebro.

Entre sus reconocimientos, destacan la Medalla de Honor al Mérito Académico (2023), el Premio de Investigación de Canarias en Ingeniería Civil (2018), Premio Canarias de Economía Sostenible (2024), Premio José Belinchón (2024), y varios galardones internacionales y nacionales por excelencia docente, internacionalización e innovación, como el Premio a la Innovación Docente Universitaria (2012), menciones de calidad en 2011, 2013 y 2015. Premio del Consejo Social de la Universidad de La Laguna a la mejor práctica en Internacionalización en el año 2022 y el premio a la Excelencia en la Internacionalización en 2021. Recientemente, fue finalista en los premios ICE International Award 2024 y quedó clasificado entre los 10 mejores profesores universitarios de España en dos ocasiones, en 2023 (cuarta posición) y en 2024 (quinta posición).

Situación profesional actual y contacto

Catedrático de Universidad
Universidad de La Laguna
E-mail: jcsanta@ull.es



Noelia Cruz Pérez

Doctora en Desarrollo Regional
Universidad de La Laguna

Breve trayectoria profesional

Doctora Cum Laude en Desarrollo Regional por la Universidad de La Laguna, donde recibió el Premio Extraordinario de Doctorado por su tesis sobre la evaluación de la huella ambiental de infraestructuras hidráulicas y portuarias. Es Ingeniera Civil, de Edificación y Agrícola, con una sólida formación en ingeniería y una amplia experiencia en proyectos vinculados al agua y al desarrollo sostenible. Su ámbito de trabajo abarca la gestión de recursos hídricos en sistemas insulares, la gestión energética y la huella de carbono aplicada a sectores clave de las islas, como la producción de agua potable, el tratamiento de aguas residuales, el turismo y la agricultura.

Ha publicado ampliamente en estos campos, con un total de 10 libros, 21 capítulos de libro, 38 contribuciones a congresos y 80 artículos científicos. Ha participado en numerosos proyectos de investigación nacionales e internacionales financiados por programas como H2020, INTERREG y ERASMUS+, centrando su labor en el desarrollo de soluciones innovadoras para mitigar los efectos del cambio climático, fomentar la transición hacia una economía circular e implementar soluciones basadas en la naturaleza para mejorar la gestión del ciclo del agua en Canarias.

Actualmente, forma parte del Comité de Agenda 2030 y del Comité de Personas Expertas para el Cambio Climático que asesora al Gobierno de Canarias, contribuyendo activamente a la implementación de políticas sostenibles en el archipiélago.

Situación profesional actual y contacto

Profesora Ayudante Doctora
Universidad de La Laguna
E-mail: ncruzper@ull.edu.es



Jelena Koritnik

Investigadora
Universidad de La Laguna

Breve trayectoria profesional

Investigadora predoctoral en la Universidad de La Laguna y miembro del grupo de investigación INGENIA (Ingeniería Geológica, Innovación y Aguas). Es graduada en Geología y Máster Universitario en Geología Ambiental (*magna cum laude*) por la Universidad de Zagreb. Cuenta con una formación orientada al análisis de procesos geológicos y ambientales, la dinámica costera y la interpretación de sistemas naturales en el contexto del cambio climático, apoyada en metodologías avanzadas de análisis y observación. Actualmente cursa el Doctorado en Desarrollo Regional, centrando su investigación en la calidad y problemática de las aguas de abastecimiento en Canarias y sus implicaciones para el desarrollo insular. Su trabajo integra el análisis de sistemas hídricos en islas volcánicas y su relación con los recursos naturales, las infraestructuras críticas y la sostenibilidad territorial.

Cuenta con experiencia en distintos contextos europeos (Austria, Croacia, Chequia, Portugal y España), donde ha trabajado en el análisis ambiental mediante geoinformática, teledetección, LiDAR, geoestadística y cartografía aplicada, así como en iniciativas vinculadas a la sensibilización ambiental y la educación en sostenibilidad. Ha participado activamente en proyectos europeos y programas de cooperación académica, como ERASMUS+, proyectos de investigación aplicada, y el proyecto europeo GENESIS. Su perfil investigador se caracteriza por la integración de geociencia cuantitativa, análisis espacial y estudios sobre recursos hídricos en islas volcánicas, con una orientación aplicada a la sostenibilidad y la adaptación al cambio climático.

Situación profesional actual y contacto

Investigadora
Universidad de La Laguna
E-mail: jkoritnik@ull.edu.es



Mehdi Khoury

Doctor en informática / inteligencia artificial (IA)
Ramparts & Light Ltd

Breve trayectoria profesional

Mehdi Khoury es Doctor en informática e inteligencia artificial y cuenta con una sólida trayectoria profesional de más de 25 años como programador y más de una década como científico postdoctoral. A lo largo de su carrera, ha explorado diversos campos de investigación postdoctoral, abarcando desde la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, Abarca un abanico amplio de enfoques y aplicaciones: desde la ciencia de la complejidad y el análisis de redes para evaluar la resiliencia de infraestructuras, hasta el estudio de redes metabólicas y la propagación de enfermedades. Incluye también herramientas de comunicación y apoyo a decisiones, como visualizaciones interactivas y el desarrollo de videojuegos serios. En el ámbito ambiental, integra el nexo agua-energía-tierra-alimentos-clima, la aplicación de soluciones basadas en la naturaleza para reducir el riesgo de inundaciones y la economía circular del agua, incluida la simbiosis industrial.

La amplitud de disciplinas que Mehdi ha abarcado le ha permitido descubrir los vínculos que existen entre ellas y orientarlas hacia un propósito más grande. Su búsqueda culminó en el hallazgo de un campo de investigación verdaderamente multidisciplinar: el agua. Esta trayectoria se asemeja a un proceso de cristalización que le llevó a consolidar su trabajo diverso en un modelo coherente para comprender y anticipar el fallo en cascada de servicios críticos de infraestructura y mejorar su resiliencia.

Actualmente, Mehdi Khoury inicia una nueva etapa como director ejecutivo y fundador de Ramparts & Light Ltd, donde se dedica a ofrecer soluciones técnicas para anticipar el fallo en cascada de los servicios críticos de infraestructura en el contexto del cambio climático. Además, su trabajo busca abordar los retos de la participación de los agentes implicados mediante herramientas digitales innovadoras, como los videojuegos serios, con el objetivo de fortalecer la preparación y la respuesta ante emergencias.

Situación profesional actual y contacto

Director ejecutivo, líder técnico

Ramparts & Light Ltd

E-mail: mehdi.khoury@rampartsandlight.com



Megan Expósito Brazier

Investigadora
Universidad de La Laguna

Breve trayectoria profesional

Estudiante de Doctorado en Desarrollo Regional por la Universidad de La Laguna, graduada en Ciencias Ambientales y con un Máster en Energías Renovables, Cambio Climático y Desarrollo Sostenible. Cuenta con experiencia profesional en distintos ámbitos del sector ambiental, tanto en trabajos de gabinete, como de campo y laboratorio.

Su interés científico se centra en la gestión de los recursos naturales y la transición hacia prácticas sostenibles que integren la sociedad con el medioambiente. En este marco, muestra un especial interés en la mitigación del cambio climático y el desarrollo sostenible en territorios insulares.

Actualmente trabaja como investigadora en el proyecto de investigación GENESIS y continúa su formación con el objetivo de contribuir a la implementación de soluciones innovadoras y basadas en la naturaleza para los retos ambientales a los que se enfrentan las islas.

Situación profesional actual y contacto

Investigadora
Universidad de La Laguna
E-mail: mexposito@ull.edu.es



Alejandro García Gil

Doctor en Geología
Universidad de Zaragoza

Breve trayectoria profesional

Doctor en Geología por la Universidad de Zaragoza, Alejandro García Gil es Científico Titular del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), organismo del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Ha desarrollado una sólida trayectoria científica en el ámbito de la hidrogeología y la geotermia, tanto somera como profunda, con especial énfasis en el estudio de sistemas hidrogeológicos en rocas volcánicas.

Su ámbito de trabajo se centra en la caracterización y modelización de la circulación de fluidos y el transporte de calor en medios volcánicos complejos, abordando problemáticas clave como la gestión sostenible del agua, el aprovechamiento geotérmico y la adaptación al cambio climático en sistemas insulares. Ha trabajado en centros de investigación nacionales e internacionales y actualmente coordina el grupo de investigación Sistemas Hidrogeológicos y Geotérmicos Avanzados, desde el que lidera y coordina proyectos europeos y nacionales vinculados a la transición energética y la resiliencia hídrica.

Ha publicado ampliamente en estos campos, siendo autor principal del libro *Shallow Geothermal Energy: Theory and Application* y autor de más de 90 artículos científicos en revistas internacionales de alto impacto. Su investigación ha contribuido al avance del conocimiento y al desarrollo de metodologías innovadoras aplicadas a la hidrogeología de islas volcánicas, con especial relevancia en el contexto de Canarias, y a la integración de la geotermia como tecnología clave para sistemas energéticos bajos en carbono.

Situación profesional actual y contacto

Científico Titular
Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC)
E-mail: a.garcia@igme.es



Iván Hernández Ríos

Ingeniero Técnico de Obras Públicas
Máster en Tecnología y Gestión del Agua

Breve trayectoria profesional

Iván Hernández Ríos es Ingeniero Técnico de Obras Públicas, con especialidad en Hidrología, y Máster en Tecnología y Gestión del Agua. Su trayectoria profesional se ha desarrollado principalmente en el ámbito de la consultoría e ingeniería aplicada a estudios y proyectos hidráulicos, hidrología, planificación territorial y urbanismo, con especial foco en contextos insulares.

Cuenta con 10 años de experiencia en la gestión del agua, principalmente en la isla de La Palma, (Canarias, España) y ha orientado su actividad al análisis y desarrollo de soluciones técnicas vinculadas a la gestión sostenible de los recursos hídricos y la adaptación al cambio climático.

En el ámbito de la investigación y la cooperación europea, participa como gestor del proyecto europeo GENESIS, centrado en el desarrollo e implementación de soluciones basadas en la naturaleza para mejorar la resiliencia climática de infraestructuras hídricas críticas en la Macaronesia y otras regiones ultraperiféricas europeas. Asimismo, es presidente de la Asociación para la Investigación de la Macaronesia (AIM), desde donde impulsa iniciativas de investigación y divulgación orientadas a fortalecer la capacidad científica y técnica de los territorios insulares.

Situación profesional actual y contacto

Presidente

Asociación para la Investigación de la Macaronesia, AIM

Gestor Proyecto Europeo GENESIS

E-mail: director@aimacaronesia.eu

Infraestructura hídrica de las Islas Canarias: riesgos naturales y fallos en cascada

La disponibilidad del agua parece garantizada... hasta que el sistema se rompe. En Canarias, ese momento revela lo que casi nunca se ve: una red extensa y fragmentada, sometida a una presión constante, construida en un territorio de fuertes pendientes y accesos complejos, expuesto a riesgos que rara vez actúan por separado: inundaciones, incendios forestales, desprendimientos de rocas y fenómenos costeros, entre otros.

Galerías, pozos y sondeos; conducciones, depósitos y estaciones de bombeo; plantas de tratamiento y, en varias islas, desalinización de agua de mar forman un conjunto interdependiente. El agua llega porque hay energía, porque se puede operar y mantener, y porque existe capacidad de respuesta cuando algo falla.

Este libro propone mirar el agua como lo que realmente es en un archipiélago: un servicio crítico. No se limita a describir obras; explica cómo se sostiene la continuidad y por qué una incidencia local, un corte eléctrico, una avería, un acceso bloqueado o un episodio extremo en costa, puede propagarse hasta tensionar el suministro y complicar la recuperación. El cambio climático estrecha márgenes y aumenta la probabilidad de impactos simultáneos, haciendo más frecuente lo que antes parecía excepcional.

A partir de la metodología aplicada del proyecto europeo GENESIS, el libro ofrece una lectura operativa del sistema hídrico canario: identifica interdependencias, permite ensayar escenarios de disrupción y recuperación y ayuda a comparar medidas antes de ejecutarlas. No promete certezas. Aporta criterio.

Será especialmente útil para quienes planifican, gestionan y operan el agua en islas: técnicos del ciclo integral, consejos insulares y administraciones locales, responsables de explotación y mantenimiento, consultorías y direcciones técnicas, así como perfiles de energía vinculados al suministro. También para protección civil, ordenación del territorio e infraestructuras críticas, y para equipos de investigación que necesiten pasar del diagnóstico a prioridades concretas. En el fondo, está escrito para una pregunta práctica: dónde intervenir para que una mejora pequeña evite una pérdida grande de servicio.

