Agua y cambio climático en las Islas Canarias

Juan Carlos Santamarta Cerezal
Noelia Cruz Pérez



Universidad de La Laguna

ARSINOE

AGUA Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS ISLAS CANARIAS

Este trabajo fue galardonado con el ***Premio Canarias de Economía Sostenible 2024*** *en la categoría Ciencia y Técnica ECO*

Juan Carlos Santamarta Cerezal
Noelia Cruz Pérez

AGUA Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS ISLAS CANARIAS

Agua y cambio climático en las Islas Canarias
© *Los autores*

Coordinación científica:
Dr. Juan Carlos Santamarta Cerezal
jcsanta@ull.es
Universidad de La Laguna

Edita:
Universidad de La Laguna

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Programa Marco de Investigación e Innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea, en el marco del proyecto ARSINOE (Climate-resilient regions through systemic solutions and innovations), acuerdo de subvención nº 101037424.

ARSINOE

1ª Edición: septiembre 2025
ISBN: 978-84-09-74039-0
Depósito legal: TF-361-2025
DOI: https://doi.org/10.25145/b.2025.04
Cómo citar este libro:
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

Foto de la portada Stani Klajban

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 coodinador científico de la obra

Índice de contenidos

1. AGUA Y CAMBIO CLIMÁTICO EN ISLAS 15
   1. Introducción 15
   2. Vulnerabilidad hídrica de las islas 19
   3. Agua y turismo 23
   4. Referencias bibliográficas 25

2. ANÁLISIS DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN CANARIAS 29
   1. Introducción 29
   2. El medio físico: condicionantes volcánicos e insularidad 31
   3. Caracterización hidrogeológica de Canarias 46
   4. Tipología de recursos hídricos en Canarias 62
   5. Estrategias hidráulicas tradicionales 87
   6. Agricultura y disponibilidad del agua en Canarias 96
   7. Infraestructura y gestión del agua 100
   8. Diagnóstico insular del agua en Canarias 107
   9. Impactos del cambio climático en los recursos hídricos de Canarias 151
   10. Bibliografía y referencias 154

3. PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE ALTA RESOLUCIÓN EN LAS ISLAS CANARIAS 173
   1. Modelización climática de alta resolución en territorios insulares: el caso de Canarias 173
   2. Caso de estudio: Islas Canarias 175
   3. Información meteorológica 179
   4. Aplicabilidad de la metodología FICLIMA en las Islas Canarias 182
   5. Cálculo de las proyecciones de temperatura 184
   6. Cálculo de las proyecciones de precipitación 184
   7. Cálculo de las proyecciones del índice de aridez 185
   8. Cálculo de las proyecciones del Balance hídrico 186
   9. Cálculo de las proyecciones de sequías 187
   10. Limitaciones y verificación de la metodología 188
   11. Plataforma SICMA-Canarias 189
   12. Referencias bibliográficas 191

4. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA EN LAS ISLAS CANARIAS... 195
1. Introducción: El ascenso térmico en Canarias como variable crítica del cambio climático regional... 195
2. Aumento de la temperatura media en las Islas Canarias a lo largo del siglo XXI... 197
3. Referencias bibliográficas... 201

5. PATRONES DE PRECIPITACIÓN PREVISTOS EN LAS ISLAS CANARIAS... 203
1. Introducción: El cambio en los patrones de precipitación en el contexto insular canario... 203
2. Proyección de la evolución de la precipitación media en las Islas Canarias... 205
3. Referencias bibliográficas... 210

6. PROYECCIONES DEL AUMENTO DE LA ARIDEZ EN LAS ISLAS CANARIAS... 215
1. Introducción: El índice de aridez como herramienta clave para anticipar la evolución climática en las Islas Canarias... 215
2. Tendencias del índice de aridez en el Archipiélago Canario... 217
3. Referencias bibliográficas... 222

7. RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LAS ISLAS CANARIAS AL CAMBIO CLIMÁTICO... 225
1. Introducción: El balance hídrico y su evolución en las Islas Canarias ante el cambio climático... 225
2. Proyección del balance hídrico en las Islas Canarias durante el siglo XXI... 227
3. Referencias bibliográficas... 231

8. AUMENTO DE LA SEQUÍA EN LAS ISLAS CANARIAS... 235
1. Introducción: El índice de sequía y su relevancia en las Islas Canarias... 235
2. Tendencias del índice SPEI en el Archipiélago Canario... 236
3. Referencias bibliográficas... 244

9. TRANSICIÓN HÍDRICA Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN CANARIAS: RETOS DEL SISTEMA Y RESPUESTAS TÉCNICAS... 249
1. Introducción: más allá de la escasez, una crisis de modelo... 249
2. Dependencia del agua subterránea y su sobreexplotación... 250

3. Desigualdad en el consumo y presión del modelo turístico 252
4. Infraestructuras obsoletas y pérdidas estructurales 254
5. Reutilización, desalinización de agua de mar y límites de la oferta no convencional 257
5. La gobernanza del agua en Canarias: desafíos estructurales y propuestas de mejora 259
6. Fragmentación institucional y déficit de gobernanza 263
7. Laboratorios de innovación territorial: hacia una gobernanza hídrica participativa 265
8. Cambio climático y pérdida de recarga de acuíferos 267
9. El horizonte 2040 y la titularidad del agua subterránea 283
10. El binomio agua-energía: dependencia y vulnerabilidad 286
11. Nuevos contaminantes del agua subterránea en Canarias: evidencia reciente y desafíos para la gestión 291
12. Contaminación por nitratos en Canarias: fuentes, distribución e implicaciones sanitarias 295
13. Algunas propuestas para la mejora de la gestión del agua en Canarias y escenarios futuros 297
14. Conclusión: la urgencia de actuar con ciencia, justicia y visión insular 319
15. Bibliografía y referencias 321

10. CONCLUSIONES 329

GLOSARIO 333

Capítulo 1
Agua y cambio climático en islas

Noelia Cruz Pérez

1. Introducción

Los recursos hídricos son fundamentales en los territorios insulares, los cuales suelen estar sometidos a una alta presión sobre sus recursos naturales, especialmente por tratarse tradicionalmente de destinos turísticos de gran afluencia (Cruz-Pérez & Santamarta, 2021). Esta circunstancia implica que dichos recursos sean explotados tanto por la población residente como por una población flotante que, en determinados momentos del año, puede multiplicar significativamente la demanda. Un ejemplo claro de esta situación es el caso de las Islas Canarias, donde la población local se sitúa en torno a los dos millones de habitantes, mientras que la afluencia turística puede alcanzar los quince millones de visitantes anuales.[1]

A esta presión debe sumarse la demanda del sector agrícola, históricamente uno de los mayores consumidores de agua (Cruz-Pérez et al., 2022). Nos encontramos, por tanto, ante un escenario en el que las islas deben atender una demanda hídrica creciente. El consumo doméstico medio, en las Islas Canarias, se estima en unos 150 litros por habitante y día, una cifra que puede duplicarse o incluso triplicarse en el ámbito turístico, debido a los servicios asociados que ofrecen los alojamientos, como lavanderías, spas, piscinas o campos de golf (Antonova et al., 2023).

Para satisfacer esta elevada demanda de agua, las islas disponen de diversas fuentes: acuíferos subterráneos, embalses superficiales y, especialmente, plantas desaladoras, que se han convertido en una herramienta clave. Sin embargo, la desalación presenta dos desafíos principales. Por un lado, requiere una gran cantidad de energía, que en contextos insulares suele generarse mediante la quema de combustibles fósiles, ya que el mix energético aún no es plenamente renovable debido a la insularidad y al aislamiento de los sistemas eléctricos. Por otro lado, la gestión de la salmuera —subproducto del proceso de desalación— plantea importantes retos ambientales, ya que en muchos casos es vertida directamente al mar sin ser reaprovechada.

[1] Estos datos corresponden a los arrojados por el ISTAC para el año 2023.

Con menor frecuencia, parte de la demanda se cubre mediante el uso de aguas reutilizadas. Sin embargo, esta opción sigue siendo limitada, ya sea por normativas sanitarias restrictivas o por la falta de inversión en infraestructuras para el tratamiento terciario de aguas residuales. De ahí la necesidad de avanzar hacia un modelo que cierre el ciclo del agua, fomentando la reutilización, promoviendo un uso más responsable del recurso y desarrollando infraestructuras de transporte eficientes que minimicen las pérdidas de agua en el trayecto hasta los municipios. En el caso concreto de Canarias, estas pérdidas pueden alcanzar hasta el 50 % en algunos municipios, un dato alarmante e inaceptable dadas las circunstancias (Cruz-Pérez & Santamarta, 2021).

A esta compleja situación se suma el impacto de la crisis climática, lo que obliga a una gestión aún más racional y eficiente del agua. El aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones —tendencias que ya se observan en distintas regiones del mundo— incrementan la evapotranspiración, las sequías y los niveles de aridez (Espinosa & Portela, 2020; Riedel, 2019). Estos efectos son especialmente graves en las islas, por tratarse de territorios vulnerables debido a su lejanía geográfica y a la intensa presión que sufren sobre sus recursos naturales (Ancillotto et al., 2021).

Las islas, por su propia naturaleza geográfica, representan auténticos refugios de biodiversidad. Lejos de ser territorios menores en cuanto a riqueza ecológica, funcionan como vitrinas naturales, donde se conservan y desarrollan numerosas especies endémicas, muchas de ellas únicas en el mundo. De hecho, se estima que entre las nueve regiones ultraperiféricas de la Unión Europea —entre ellas Canarias, Madeira o Azores— se concentra hasta el 80 % de toda la biodiversidad europea (Sieber et al., 2018).

Preservar esta biodiversidad no solo es una cuestión de justicia ambiental, sino también una necesidad estratégica, ya que muchas de estas especies forman parte de ecosistemas frágiles, estrechamente vinculados al equilibrio del medio natural y a la sostenibilidad del propio territorio. Proteger los recursos que las sostienen, en especial el agua, se vuelve por tanto una prioridad incuestionable.

Sin embargo, las islas comparten un rasgo estructural que condiciona su capacidad de respuesta: la lejanía intrínseca respecto al continente. Esta distancia no es solo física, también lo es en términos de accesibilidad, dependencia de suministros y capacidad de interconexión. Por ello, cada isla se ve obligada a desarrollar microsistemas autónomos, tanto en lo económico como en lo energético, lo logístico y lo medioambiental. Y en ese contexto, el manejo del agua y de la energía se presenta como uno de los mayores desafíos.

Estos dos sectores no pueden analizarse ni gestionarse por separado, ya que están profundamente interrelacionados (Santamarta et al., 2022). La producción

de agua, ya sea a través de desalación, bombeo o tratamiento, requiere una importante inversión energética, mientras que las soluciones energéticas sostenibles suelen depender del uso racional del agua y de una planificación que tenga en cuenta la disponibilidad del recurso. Es por ello que trabajar sobre ambos ámbitos de forma coordinada e integrada es esencial para avanzar hacia una mayor autonomía y soberanía insular, especialmente en un escenario global marcado por la incertidumbre climática y la creciente presión sobre los recursos naturales.

Nos encontramos inmersos en una crisis climática provocada por la emisión masiva de gases de efecto invernadero a la atmósfera, fruto principalmente de la quema de combustibles fósiles para la producción de energía y el transporte. Esta acumulación de gases ha intensificado el efecto invernadero, originando un calentamiento global que ha desencadenado una crisis climática de consecuencias potencialmente devastadoras, si no se actúa de inmediato.

En este contexto, resulta fundamental medir el impacto de las distintas actividades humanas sobre el medio ambiente y cuantificar la emisión de gases de efecto invernadero. Para ello se utiliza el concepto de huella de carbono, que será desarrollado en el epígrafe siguiente.

1.1. Huella de carbono

Precisamente porque el cambio climático se manifiesta de forma muy evidente y representa una amenaza particular para las poblaciones insulares, estas son especialmente conscientes de su influencia sobre el entorno natural y buscan activamente herramientas que les permitan adaptarse y mitigar las nuevas situaciones derivadas del mismo. Para cuantificar la evolución de la contaminación por gases de efecto invernadero y sus consecuencias en forma de cambio climático, se han ideado métodos cuantitativos como la huella de carbono y la huella hídrica.

La huella de carbono es un concepto que surgió en la década de 1990, desarrollado por los creadores de la huella ecológica, Wackernagel y Rees. Desde entonces, se comenzaron a desarrollar metodologías para su cálculo. La huella de carbono representa el volumen total de gases de efecto invernadero (GEI) generados por las actividades económicas humanas. Conocer este volumen —expresado en toneladas de CO_2 equivalente— es fundamental para poder adoptar medidas y poner en marcha iniciativas destinadas a reducirlo y/o compensarlo. Existen diversas normativas, tanto a nivel nacional como internacional, que regulan la contabilidad de las emisiones de CO_2. En el presente estudio se empleó la metodología desarrollada por el World Resources Institute y el World Business Council for Sustainable Development: el Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol).

Así, la huella de carbono actúa como un indicador del consumo de energía, productos y servicios, y se define como el volumen total de gases de efecto invernadero producido por diferentes entidades (Cruz-Pérez & Santamarta, 2021). Por otro lado, la huella hídrica es un concepto análogo, aunque centrado en el recurso agua. Esta se compone de tres elementos: el agua verde, el agua azul y el agua gris. El agua verde hace referencia al agua que retorna a la atmósfera mediante el proceso de evapotranspiración; el agua azul corresponde al volumen de agua superficial y subterránea consumida para la producción de un determinado bien o servicio; y el agua gris representa el volumen necesario para diluir el agua contaminada hasta alcanzar niveles aceptables de calidad para su recirculación (WFN, 2002).

Estas herramientas permiten evidenciar una gestión inadecuada de los recursos naturales, lo que a su vez posibilita corregir errores y hacer más eficaces las acciones encaminadas hacia la sostenibilidad.

Para calcular la huella de carbono, se abordarán los tres alcances que la componen. El alcance 1 incluye todos los litros y/o kilogramos de combustibles fósiles utilizados por la empresa objeto de estudio, tanto en vehículos como en instalaciones fijas. Además, se contabilizan por separado los diferentes tipos de combustible empleados.

El alcance 2 considera el consumo energético de la empresa, entidad o administración, expresado en kilovatios hora (kWh) anuales. Generalmente, este alcance tiende a ser el principal contribuyente a las emisiones de CO_2 en las empresas turísticas (con excepción de aquellas vinculadas directamente a la movilidad, como aerolíneas o compañías de alquiler de vehículos), debido a que las principales compañías suministradoras de electricidad en España aún no han integrado completamente las energías renovables en su mix energético. El denominado "mix energético" de un proveedor de electricidad expresa la proporción de energías renovables que se han incorporado en su forma de producir electricidad. Así, cuando el mix energético tiene un valor cero, significa que la compañía genera su energía exclusivamente a partir de fuentes renovables, mientras que un valor distinto de cero indica que se emplean combustibles fósiles en el proceso de generación.

El alcance 3, aunque no es obligatorio para el cálculo de la huella de carbono, proporciona información complementaria de gran interés sobre la empresa analizada. En este ámbito pueden contabilizarse, entre otros, los desplazamientos por motivos laborales, el transporte diario del personal, los traslados de proveedores, la gestión de residuos, así como la adquisición de productos y servicios.

Una vez seleccionados los alcances a calcular y determinado qué se incluirá en cada uno, es necesario transformar los distintos consumos en toneladas de dióxido

de carbono equivalente (tCO_2eq). Para ello, se utilizan los llamados "factores de emisión", valores publicados por fuentes oficiales —en este caso, los proporcionados por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España—, que permiten convertir las unidades de consumo en tCO_2eq, la unidad de medida empleada para cuantificar la huella de carbono.

2. Vulnerabilidad hídrica de las islas

En el marco de la Agenda 2030 —el plan de acción global impulsado por las Naciones Unidas que identifica 17 ámbitos fundamentales para el desarrollo sostenible de la humanidad— el agua ocupa un lugar prioritario. De hecho, cuenta con un Objetivo de Desarrollo Sostenible propio: el ODS 6, centrado en garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el acceso universal al saneamiento.

Este objetivo pone de relieve una realidad urgente y compleja. Tal como señala el propio documento oficial:

> *"El acceso al agua potable, el saneamiento y la higiene representan la necesidad humana más básica para el cuidado de la salud y el bienestar. Miles de millones de personas no tendrán acceso a estos servicios básicos en 2030 a menos que se cuadrupliquen los avances. El rápido crecimiento de la población, la urbanización y las crecientes necesidades en materia de agua de los sectores agrícola, industrial y energético están provocando un aumento de la demanda de agua.*
>
> *La demanda de agua ha superado el crecimiento demográfico y la mitad de la población mundial actualmente sufre una escasez de agua grave durante al menos un mes al año. Se prevé que la escasez de agua aumente con el incremento de las temperaturas globales, provocado a su vez por el cambio climático.*
>
> *Entre las medidas necesarias para garantizar el acceso universal al agua potable segura y asequible de aquí a 2030 se encuentran las inversiones en infraestructuras e instalaciones de saneamiento, la protección y el restablecimiento de los ecosistemas relacionados con el agua, así como la educación en materia de higiene. Además, la mejora del uso eficiente de los recursos hídricos es una de las claves para reducir el estrés hídrico.*
>
> *Se ha producido una evolución positiva. Entre los años 2015 y 2022, la proporción de la población mundial con acceso a servicios de agua potable gestionados de manera segura aumentó del 69 % al 73 %."*(ONU, 2015).

Aunque el texto no se refiere de forma específica a territorios insulares, sus principios y advertencias son plenamente aplicables a contextos como el de Cana-

rias. La necesidad de invertir en infraestructuras de saneamiento, por ejemplo, se vincula directamente con lo planteado anteriormente respecto a la importancia de desarrollar tratamientos terciarios que permitan la reutilización del agua. A esto se suma la urgencia de mejorar la eficiencia del ciclo integral del agua, alargando todo lo posible la vida útil de cada gota. Un principio fundamental en cualquier parte del mundo, pero especialmente crítico en las islas, donde los recursos hídricos son limitados y altamente vulnerables.

En las islas oceánicas, el agua subterránea no es solo un recurso más, es, en muchos casos, el corazón mismo de la vida insular. A diferencia de otras regiones continentales, donde los grandes ríos y embalses pueden almacenar y distribuir el recurso, en las islas la disponibilidad hídrica depende en buena parte de lo que ocurre bajo tierra (Welsh & Bowleg, 2022). Los acuíferos, alimentados por las lluvias que logran infiltrarse en el terreno, han sostenido históricamente el desarrollo agrícola, el crecimiento urbano y, más recientemente, la expansión del turismo. Y en la mayoría de los casos, su calidad es notable. Sin embargo, estos reservorios naturales enfrentan hoy una combinación de amenazas sin precedentes.

Una de las más significativas es la intrusión salina. El ascenso progresivo del nivel del mar, una de las manifestaciones más claras del cambio climático, provoca que el agua salada penetre lentamente en los acuíferos costeros (Stanic et al., 2024). Este fenómeno compromete seriamente la calidad del agua subterránea, especialmente en aquellas zonas donde se extrae mediante pozos próximos al litoral. En muchas islas, estas extracciones no solo abastecen a las poblaciones locales, sino que también permiten regar cultivos o sostener infraestructuras hoteleras. La salinización, por tanto, no es solo un problema ecológico, sino una amenaza directa para la economía y la habitabilidad de estos territorios.

A esto se suma un problema menos visible, pero igualmente preocupante: la disminución del aporte natural a los acuíferos. La lluvia, fuente principal de recarga subterránea, está íntimamente ligada al régimen climático de cada isla. En algunas latitudes, la nieve puede llegar a desempeñar un papel secundario, pero en la mayoría de los casos se evapora antes de infiltrarse, dejando a la lluvia como único mecanismo eficaz de regeneración hídrica. Lo esencial, por tanto, no es solo cuánto llueve, sino cómo llueve y cuánta de esa agua consigue penetrar en el suelo en lugar de escurrirse por la superficie o evaporarse rápidamente. Esta capacidad de infiltración depende de múltiples factores: la cobertura vegetal, el tipo de suelo, el grado de urbanización o el manejo del territorio (Roy et al., 2024).

Frente a este panorama, los modelos climáticos coinciden en proyectar una reducción significativa de las precipitaciones en amplias zonas del planeta, incluidas muchas islas (Alsumaiei & Bailey, 2018; Jeong et al., 2025). Este descenso en las lluvias compromete gravemente la sostenibilidad de los acuíferos, tanto desde

el punto de vista cuantitativo como cualitativo. Menos lluvia implica menos recarga, y una menor recarga incrementa el riesgo de sobreexplotación, degradación y, en zonas costeras, de intrusión marina.

Ante esta realidad, algunas regiones insulares han comenzado a explorar soluciones alternativas. Un ejemplo notable lo encontramos en las Islas Baleares, donde se ha empezado a implementar la técnica de recarga artificial de acuíferos. Este procedimiento consiste en introducir agua, preferentemente regenerada, en el subsuelo de manera controlada, con el fin de aumentar las reservas subterráneas y compensar la reducción del aporte natural (De Bustamante et al., 2016). La técnica es prometedora, pero no está exenta de desafíos. Por un lado, requiere una vigilancia exhaustiva de la calidad del agua que se inyecta, lo que puede encarecer notablemente las infraestructuras. Por otro, necesita dispositivos complejos de inyección directa, además de una planificación hidrológica y territorial precisa para evitar impactos indeseados (Hernández Ríos et al., 2023).

No obstante, sus ventajas son evidentes, permite recuperar acuíferos sobreexplotados, frenar la salinización en zonas costeras y asegurar una fuente estratégica de agua en un contexto donde las reservas superficiales estarán cada vez más expuestas a la evaporación, el aumento de temperatura y la proliferación de algas y contaminantes.

Por su parte, las aguas superficiales se enfrentarán a un aumento sostenido de las temperaturas, un fenómeno que tendrá consecuencias directas sobre su estabilidad y calidad. El incremento térmico favorece la evaporación, reduciendo la disponibilidad del recurso, y al mismo tiempo potencia el crecimiento de algas y microorganismos, alterando la composición del agua y dificultando su tratamiento posterior. Ante este escenario, será imprescindible mejorar las técnicas de cubrición de embalses, una medida clave para reducir la evaporación y controlar la proliferación biológica, especialmente en climas cálidos y áridos donde estos procesos pueden intensificarse (Aminzadeh et al., 2018; Lens et al., 2023).

Aunque el agua superficial representa una fuente estratégica para muchos usos, especialmente en la agricultura, en algunos contextos insulares su importancia es relativa. En el caso de las Islas Canarias, por ejemplo, las aguas superficiales tienen un peso menor frente a la dominante presencia de aguas subterráneas, que han sostenido históricamente gran parte del sistema hídrico del archipiélago.

En paralelo, otro elemento que se ha vuelto esencial para la gestión del agua en las islas es la desalinización. Este proceso, aunque tecnológicamente complejo y con un coste energético elevado, ha sido determinante para el desarrollo de numerosos territorios insulares. En algunas islas, de hecho, constituye la principal fuente de agua potable. Sin embargo, como se comentaba anteriormente, la desalinización plantea una serie de retos ambientales y energéticos que deben ser

abordados con urgencia para que su generalización no suponga un incremento desproporcionado en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Una de las claves para lograrlo reside en que estas plantas desaladoras funcionen con energía renovable, preferentemente de forma autónoma, integradas en un sistema más amplio y resiliente (Kyriakarakos et al., 2022). De ahí que se haga cada vez más relevante el papel de las comunidades energéticas, estructuras cooperativas de generación y gestión eléctrica que están ganando terreno en distintos territorios. En el caso de las islas, donde los sistemas eléctricos suelen estar aislados y ser más vulnerables, este tipo de organización energética resulta especialmente prometedor (Barone et al., 2021). No solo contribuye a reducir la huella de carbono y a avanzar hacia la soberanía energética, sino que además ofrece una mayor capacidad de respuesta ante crisis o apagones, como el que se vivió en España en abril de 2025, que dejó al descubierto la fragilidad del sistema en determinadas zonas.

Por su parte, el recurso que debería cobrar un protagonismo mucho mayor dentro del ciclo integral del agua es, sin duda, el agua regenerada. Ante un contexto de creciente escasez y presión sobre las fuentes naturales, urge invertir en estaciones de tratamiento terciario, capaces de depurar el agua residual hasta niveles que permitan su reutilización segura y eficiente. Este proceso no solo alarga la vida útil del recurso hídrico, sino que además reduce la presión sobre los acuíferos, contribuyendo a su preservación a largo plazo.

El impulso a la regeneración del agua también responde a la necesidad de minimizar la dependencia de la desalación, un proceso fundamental para muchas islas, pero que conlleva un elevado consumo energético y una importante huella ambiental si no se apoya en fuentes renovables. Aunque es cierto que el tratamiento terciario también requiere energía, esta exigencia debe asumirse dentro de una estrategia más amplia que busque el autoabastecimiento energético de las instalaciones hídricas. Cualquier infraestructura vinculada al agua debe avanzar hacia modelos más sostenibles y autónomos desde el punto de vista energético.

Además, para que toda esta gestión resulte realmente eficiente, es imprescindible que las redes de distribución de agua potable y riego se encuentren en buen estado, con sistemas modernizados que permitan minimizar las pérdidas durante el transporte. No tiene sentido invertir en nuevas tecnologías si una parte significativa del recurso se pierde por fugas o infraestructuras obsoletas.

Como se ha visto a lo largo de este apartado, generar agua potable es una tarea compleja, tanto desde el punto de vista técnico como energético. Distribuirla de manera equitativa, segura y eficaz también lo es. A ello se suma la necesidad de garantizar los caudales ecológicos, esenciales para mantener el equilibrio de los ecosistemas y evitar la sobreexplotación de los acuíferos, especialmente en un contexto de crisis climática y estrés hídrico creciente.

Por tanto, proteger el agua y asegurar su disponibilidad futura exige una visión integral, que actúe sobre todas las fases del ciclo, desde la captación y tratamiento hasta la distribución, el uso, la reutilización y la devolución al medio. Solo así será posible salvaguardar este recurso vital y garantizar el bienestar de las poblaciones que dependen de él.

3. Agua y turismo

El mundo se vio profundamente afectado por la pandemia del COVID-19 en el año 2020, y una de las respuestas más generalizadas a escala global fue la implementación del confinamiento como medida de contención (Medrano et al., 2021). Esta estrategia buscaba frenar la propagación del virus limitando el contacto interpersonal, lo que llevó a que millones de personas permanecieran encerradas en sus hogares durante semanas o meses, según el contexto de cada país.

En el caso concreto de España, el confinamiento comenzó el 14 de marzo de 2020 y se extendió durante 99 días. A su término, se inició una fase de desescalada progresiva, en la que se permitió salir de casa de forma escalonada y en franjas horarias diferenciadas por grupos de edad. Esta transición se mantuvo hasta alcanzar gradualmente una relativa normalidad en la movilidad de la población.

Estas restricciones sin precedentes en el movimiento de personas tuvieron un fuerte impacto en el sector turístico, que se paralizó casi por completo en lo que ha pasado a denominarse "turismo cero" (Kainthola et al., 2021). Un ejemplo ilustrativo de este fenómeno se observa en la isla de Tenerife, donde en marzo de 2019 funcionaban 429 establecimientos de alojamiento, mientras que para marzo de 2021 solo 138 habían reabierto sus puertas (Rodriguez & Darias, 2021). Esta caída abrupta en la llegada de turistas no solo afectó a la economía del archipiélago, sino que también tuvo un efecto colateral importante: una reducción significativa en el consumo de agua, especialmente en el sector hotelero.

Como consecuencia directa, disminuyó también el uso de combustibles y las emisiones atmosféricas, ya que la menor demanda de agua conllevó una reducción en la producción de agua desalada, proceso intensivo en consumo energético (Cruz-Pérez et al., 2022).

Cabe señalar que, en el contexto hotelero, el consumo de agua y energía representa el segundo componente más relevante de los costes operativos, solo por detrás del personal (Cruz-Pérez et al., 2021). Por ello, en un escenario global en el que mitigar el cambio climático se vuelve cada vez más urgente, resulta imprescindible incrementar la eficiencia en todos los procesos asociados a la actividad turística. Esta necesidad es aún más acuciante en territorios insulares como las

Islas Canarias, donde los recursos hídricos son limitados y, ante el avance del cambio climático, se espera una disminución y mayor irregularidad en la disponibilidad de fuentes naturales de agua (Díaz Pérez et al., 2019).

En el contexto del Archipiélago Canario, el consumo de agua vinculado a la actividad turística representa aproximadamente un 11 % del total, según datos de fuentes autonómicas oficiales. Por contraste, el sector agrícola, tradicionalmente prioritario en la gestión hídrica insular, acapara cerca del 60 % del consumo total de agua. Esta diferencia evidencia que, aunque el turismo no es el principal consumidor directo de recursos hídricos, su peso económico es sustancial: alrededor del 35 % del Producto Interior Bruto (PIB) de Canarias depende directa o indirectamente de esta actividad.

A pesar de ello, la actividad agrícola y ganadera sigue siendo fundamental en el archipiélago, un territorio que históricamente ha estado preocupado por su soberanía alimentaria y que, dadas sus características geográficas y su condición insular, no puede ni debe depender en exceso del exterior para abastecer a su población. Esta vulnerabilidad quedó especialmente patente durante la pandemia del COVID-19, cuando las cadenas de suministro se vieron seriamente afectadas, y volvió a ponerse de manifiesto durante el apagón eléctrico que sufrió España en abril de 2025, cuyo alcance e impacto eran inciertos en sus primeras horas.

Por este motivo, y aunque el sector primario es uno de los principales consumidores de agua, su papel en la estructura socioeconómica de las islas resulta vital y debe ser protegido a toda costa. Apostar por una agricultura y una ganadería sostenibles y resilientes no solo permite garantizar el acceso a alimentos locales, sino que también refuerza la autonomía e independencia de los territorios insulares frente a crisis externas, ya sean energéticas, sanitarias o logísticas.

Sin embargo, esta alta dependencia del turismo no está exenta de debate. Cada vez se alzan más voces en defensa de un modelo turístico más respetuoso con el territorio, menos intensivo en recursos y mejor integrado con las realidades ambientales, sociales y culturales de los destinos. Se aboga por un turismo más rural, responsable y sostenible, que ponga en valor los recursos locales y que genere un menor impacto en los ecosistemas insulares.

Además, diversos estudios apuntan a un fenómeno psicológico ampliamente observado: los turistas, cuando se encuentran de vacaciones, tienden a relajar su conciencia ambiental y climática (Gössling et al., 2012). Al estar fuera de su entorno habitual y sumidos en una mentalidad de ocio, el consumo de agua y energía suele incrementarse, muchas veces de manera inconsciente (Rodríguez et al., 2020). Este comportamiento puede derivar en excesos y derroches, que, si bien individuales, suman una presión considerable cuando se multiplican por millones de visitantes anuales.

En este sentido, el reto no solo radica en hacer más eficiente la infraestructura que da soporte al turismo, sino también en educar y sensibilizar al visitante, para que comprenda que la sostenibilidad del destino depende también de su comportamiento cotidiano durante la estancia. El cambio hacia un modelo turístico más equilibrado no puede ser solo técnico o institucional, sino que requiere de una transformación cultural que involucre tanto a los agentes locales como a quienes disfrutan de estos territorios.

4. Referencias bibliográficas

Alsumaiei, A. A., & Bailey, R. T. (2018). Quantifying threats to groundwater resources in the Republic of Maldives Part I: Future rainfall patterns and sea-level rise. *Hydrological Processes*, *32*(9), 1137–1153. https://doi.org/10.1002/hyp.11480

Aminzadeh, M., Lehmann, P., & Or, D. (2018). Evaporation suppression and energy balance of water reservoirs covered with self-assembling floating elements. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(7), 4015–4032. https://doi.org/10.5194/hess-22-4015-2018

Ancillotto, L., Fichera, G., Pidinchedda, E., Veith, M., Kiefer, A., Mucedda, M., & Russo, D. (2021). Wildfires, heatwaves and human disturbance threaten insular endemic bats. *Biodiversity and Conservation*, *30*(14), 4401–4416. https://doi.org/10.1007/s10531-021-02313-5

Antonova, N., Mendoza-Jiménez, J., & Ruiz-Rosa, I. (2023). Determinants of Water Consumption in Hotels: New Insights Obtained through a Case Study. *Water*, *15*(17), 3049. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w15173049

Barone, G., Buonomano, A., Forzano, C., Giuzio, G. F., & Palombo, A. (2021). Increasing renewable energy penetration and energy independence of island communities: A novel dynamic simulation approach for energy, economic, and environmental analysis, and optimization. *Journal of Cleaner Production*, *311*(April), 127558. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127558

Cruz-Pérez, N., Santamarta, J.C., Álvarez, C. (2022). *La Huella Hídrica y la Huella de Carbono en la actividad agraria de las Islas Canarias* (Universidad de La Laguna (ed.)). Universidad de La Laguna. https://doi.org/10.25145/b.2022.06

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.HuellaEco-Canarias.2021

Cruz-Pérez, Noelia, Santamarta, Juan C., Gamallo-Paz, Isabel, Rodríguez-Martín, Jesica, García-Gil, A. (2022). A comparison between carbon footprint of water production facilities in the Canary Islands : groundwater resources vs. seawa-

ter desalination. *Sustainable Water Resources Management*, *8*(121). https://doi.org/10.1007/s40899-022-00706-0

De Bustamante, I., Cabrera, M.C., Echegaray, M., Candela, L., Pérez-Barbón, A., Martínez-Hernández, V. (2016). Reutilización de aguas regeneradas en el marco de la Planificación Hidrológica. *Las Aguas Subterráneas y La Planificación Hidrológica. Congreso Hispano-Luso.*, 8.

Díaz Pérez, F. J., Chinarro, D., Guardiola Mouhaffel, A., Díaz Martín, R., & Pino Otín, M.ª R. (2019). Comparative study of carbon footprint of energy and water in hotels of Canary Islands regarding mainland Spain. *Environment, Development and Sustainability*, *21*(4), 1763–1780. https://doi.org/10.1007/s10668-018-0102-6

Espinosa, L. A., & Portela, M. M. (2020). Rainfall Trends over a Small Island Teleconnected to the North Atlantic Oscillation - the Case of Madeira Island, Portugal. *Water Resources Management*, *34*(14), 4449–4467. https://doi.org/10.1007/s11269-020-02668-4

Gössling, S., Peeters, P., Hall, C. M., Ceron, J. P., Dubois, G., Lehmann, L. V., & Scott, D. (2012). Tourism and water use: Supply, demand, and security. An international review. *Tourism Management*, *33*(1), 1–15. https://doi.org/10.1016/j.tourman.2011.03.015

Hernández Ríos, I., Cruz-Pérez, N., Chirivella-Guerra, J.I., García-Gil, A., Rodríguez-Alcántara, J.S., Rodríguez-Martín, J., Marazuela, M.A., 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

Jeong, H., Park, H. S., Kang, S. M., & Chung, E. S. (2025). The greater role of Southern Ocean warming compared to Arctic Ocean warming in shifting future tropical rainfall patterns. *Nature Communications* , *16*(1), 1–13. https://doi.org/10.1038/s41467-025-57654-4

Kainthola, S., Tiwari, P., & Chowdhary, N. (2021). Overtourism to zero tourism: Changing tourists' perception of crowding post COVID-19. *Journal of Spatial and Organizational Dynamics*, *9*(2), 115–137.

Kyriakarakos, G., Papadakis, G., & Karavitis, C. A. (2022). Renewable Energy Desalination for Island Communities: Status and Future Prospects in Greece. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(13). https://doi.org/10.3390/su14138176

Lens, J. P., Reed, L., & Peebles, R. (2023). The use of geomembranes in the storage of potable water. *E3S Web of Conferences*, *368*. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202336802010

Medrano, M., Cadenas-Sanchez, C., Oses, M., Arenaza, L., Amasene, M., & Labayen, I. (2021). Changes in lifestyle behaviours during the COVID-19

confinement in Spanish children: A longitudinal analysis from the MUGI project. *Pediatric Obesity, 16*(4), 1–12. https://doi.org/10.1111/ijpo.12731

ONU. (2015). Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. In *Resolución adoptada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015, A/RES/70/1* (p. 40). ONU.

Riedel, T. (2019). Temperature-associated changes in groundwater quality. *Journal of Hydrology, 572*(February), 206–212. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.059

Rodríguez, C., Jacob, M., & Florido, C. (2020). Socioeconomic profile of tourists with a greater circular attitude and behaviour in hotels of a sun and beach destination. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 17*(24), 1–28. https://doi.org/10.3390/ijerph17249392

Rodriguez, P. D., & Darias, A. J. R. (2021). Learning From Covid in the Canary Islands. Fishing-Tourism As a Proposal for Economic Diversification in Tenerife. *Barataria-Revista Castellano-Manchega De Ciencias Sociales, 30*, 9–29.

Roy, D. K., Leslie, D. L., Reba, M. L., Hashem, A. A., Bellis, E., & Nowlin, J. (2024). Optimizing the quantity of recharge water into a sedimentary aquifer through infiltration galleries using a surrogate assisted coupled simulation–optimization approach. *Journal of Hydrology, 635*, 131183. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131183

Santamarta, Juan C.; Calvo, Ignacio; Rodríguez-Martín, Jesica; Cruz-Pérez, N. (2022). Water status in the Canary Islands related to energy requirements. *Energy Efficiency, 15*(13), 12. https://doi.org/10.1007/s12053-021-10016-7

Sieber, I. M., Borges, P., & Burkhard, B. (2018). Hotspots of biodiversity and ecosystem services: the Outermost Regions and Overseas Countries and Territories of the European Union. *One Ecosystem*, 7–16. https://doi.org/https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e24719

Stanic, S., LeRoux, N. K., Paldor, A., Mohammed, A. A., Michael, H. A., & Kurylyk, B. L. (2024). Saltwater Intrusion Into a Confined Island Aquifer Driven by Erosion, Changing Recharge, Sea-Level Rise, and Coastal Flooding. *Water Resources Research, 60*(1), 1–22. https://doi.org/10.1029/2023WR036394

Welsh, K., & Bowleg, J. (2022). Interventions and solutions for water supply on small islands: The case of New Providence, The Bahamas. *Frontiers in Water, 4*. https://doi.org/10.3389/frwa.2022.983167

WFN. (2002). *Manual de Evaluacion HH* (p. 44). AENOR Internacional. http://waterfootprint.org/media/downloads/ManualEvaluacionHH.pdf

Capítulo 2
Análisis de los recursos hídricos en Canarias

Juan Carlos Santamarta Cerezal

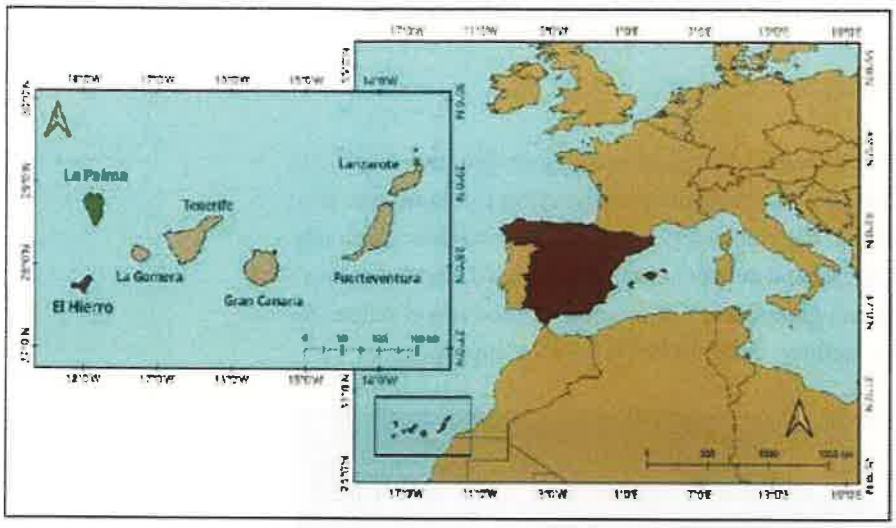
1. Introducción

Las Islas Canarias constituyen un territorio insular volcánico donde el agua, más que un recurso natural, ha sido históricamente un factor limitante para el desarrollo social, económico y ecológico. La disponibilidad, accesibilidad y calidad del agua en el archipiélago están condicionadas por una serie de factores estructurales: la insularidad, la naturaleza volcánica del sustrato geológico, la irregularidad pluviométrica y una presión demográfica y turística creciente.

Desde el punto de vista climático, Canarias se sitúa en una región subtropical dominada por la influencia de los vientos alisios y el anticiclón de las Azores. Esta configuración genera fuertes contrastes entre barlovento y sotavento, entre islas occidentales y orientales, y entre cotas altas y zonas litorales. A ello se suma una alta variabilidad interanual e intrainsular en las precipitaciones, con largos periodos secos interrumpidos por episodios de lluvia intensa que apenas contribuyen a la recarga efectiva.

En cuanto al medio físico, el origen volcánico del archipiélago se traduce en un sistema hidrogeológico complejo, con acuíferos alojados en coladas, piroclastos, niveles alterados y diques de naturaleza muy heterogénea, que condicionan la capacidad de almacenamiento, la transmisividad y la vulnerabilidad frente a la contaminación o sobreexplotación. Este sustrato también ha dificultado históricamente el desarrollo de infraestructuras convencionales de aguas superficiales (Santamarta, 2010) obligando a profundizar en el subsuelo mediante sistemas de minería hidráulica, como las galerías y los pozos (Santamarta, 2016).

La población insular ha tejido, a lo largo de siglos, un repertorio hidráulico propio para burlar la escasez (Santamarta, 2020). Destacan los enarenados, las gavias, los nateros y los bancales: sistemas que encajan captación de lluvia, conservación de suelo y manejo agrario en una misma operación (Santamarta, 2013). Muchos proceden de épocas prehispánicas o coloniales. Funcionan, además, con notable eficiencia hidrológica. El resultado es un paisaje agrícola singular, ahora sujeto a abandono o reconversión.



Fuente: elaboración propia (2023)

Figura 2.1. Localización y distribución de las Islas Canarias

La llegada de plantas desalinizadoras de agua de mar, el uso de agua regenerada y la gestión digital de la red han reducido la tensión hídrica. Sin embargo, la escasez persiste y el conflicto entre riego y turismo sigue sobre la mesa. Persisten las fricciones entre los usos agrícola, urbano y turístico, y la vulnerabilidad climática sigue latente.

Este capítulo aborda de forma integrada la geología, el clima y los sistemas hidráulicos tradicionales de Canarias, desde una perspectiva técnico-hidrogeológica adaptada al contexto insular y volcánico. Vamos a describir primero la base geológica y el marco climático; después, la tipología de acuíferos y las principales infraestructuras de captación. Se revisarán, además, los sistemas tradicionales de aprovechamiento y el encaje normativo vigente. El cierre lo ocupa el impacto previsto del cambio climático sobre la gestión insular del agua. Advierto al lector que en algunos párrafos incluiré algunas opinones personales basadas en mi experiencia profesional y académica. Con ello se busca un marco de referencia claro para comprender por qué, en un archipiélago volcánico, fragmentado y ecológicamente frágil, cada metro cúbico de agua sigue siendo estratégico.

2. El medio físico: condicionantes volcánicos e insularidad

2.1. Geodinámica y morfología de las islas

El Archipiélago Canario es el resultado de un proceso magmático oceánico sostenido durante millones de años, con etapas de construcción y colapso que han generado una topografía abrupta, discontinua y altamente contrastada. Cada isla posee una evolución volcánica distinta, condicionada por su edad, tectónica local y morfología basal. No existe una plataforma continental que suavice el relieve ni sedimentos continentales que faciliten la retención hídrica en superficie.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.2. Coladas volcánicas en la isla de La Palma

La evolución geológica e hidrogeológica del archipiélago canario está profundamente determinada por su origen volcánico. A diferencia de los sistemas continentales, que cuentan con unidades sedimentarias extensas y continuas, las islas oceánicas presentan una estructura interna dominada por coladas superpuestas (Figura 2.3), diques verticales (Figura 2.13) y fracturación anisótropa (Figura 2.16). La superposición de coladas y la presencia de diques verticales con fracturación anisótropa impiden una retención superficial eficaz y dificultan la percolación hacia niveles saturados aprovechables (González et al., 2013; Leyva et al., 2024).

Cada isla tiene una historia volcánica distinta, influida por la edad geológica—desde El Hierro, la más joven a Fuerteventura, la más antigua—, la tectónica local y la morfología de la base oceánica. Durante décadas, la hipótesis dominante sobre el origen de las Islas Canarias fue la del punto caliente o "mantle plume", que personalmente siempre he defendido, planteada inicialmente por Morgan (1971), Esta teoría proponía que una pluma térmica profunda y fija del manto habría originado el vulcanismo de Canarias, en un contexto similar al de Hawái. Sin embargo, dicha atribución se realizó de manera genérica y sin un análisis geológico detallado del archipiélago (Morgan, 1971; Burke & Wilson, 1972). Esta visión fue reforzada por décadas de investigaciones centradas en modelos de pluma, a pesar de mostrar crecientes inconsistencias internas.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.3. Series de coladas en la isla de El Hierro

Investigaciones recientes sugieren una interpretación más ajustada a la evidencia geofísica regional: una debilidad litosférica asociada a una anomalía térmica superficial dentro de la placa africana, que permitiría un ascenso magmático intermitente sin necesidad de una pluma profunda (Huppert et al., 2020; Santimano & Pysklywec, 2020; Sun et al., 2014).

Asimismo, se ha planteado una conexión geodinámica entre Canarias y las montañas del Atlas, basada en similitudes isotópicas, estructurales y petrográficas.

Esta hipótesis refuerza la idea de que ambos sistemas responden a un contexto tectónico común, vinculado a la apertura del Atlántico central (Miller et al., 2015; Bezada et al., 2014). Estas revisiones del marco geológico tienen implicaciones directas en hidrogeología y en nuestros trabajos de campo, especialmente en la interpretación de los sistemas de fractura, la distribución de diques y las propiedades térmicas del subsuelo (Páez et al., 2020; Sobradelo et al., 2011).

Desde una perspectiva hidrogeológica, el contraste entre las islas más antiguas —como Fuerteventura o Lanzarote, con estructuras erosionadas (Figura 2.4) y baja permeabilidad— y las más jóvenes —como El Hierro (Figura 2.6) o La Palma, con mayores porosidades y estructuras volcánicas activas— define un patrón espacial complejo y a veces de difícil interpretación. Los diques verticales actúan como barreras hidráulicas, mientras que la superposición de coladas de distinta permeabilidad configura un sistema altamente compartimentado (Santamarta, 2009). Esto genera un régimen hidrogeológico en mosaico, donde los acuíferos no son continuos y la respuesta frente a la recarga o la extracción resulta difícil de predecir (Leyva et al., 2024; Sobradelo et al., 2011), por eso siempre recalco que es necesario que se haga referencia al concepto de incertidumbre en esta variable.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.4. Erosión en la isla de Fuerteventura

En la actualidad, nuevos estudios geofísicos, geoquímicos y tectónicos han cuestionado seriamente el paradigma del "hotspot" y proponen una hipótesis al-

ternativa basada en un contexto litosférico debilitado dentro de la placa africana (Anguita et al., 2025), la cual considero la más acertada hasta el momento. Esta nueva perspectiva sugiere que las Canarias no se formaron por una pluma profunda ascendente, sino por un sistema de debilidad litosférica vinculado a complejas interacciones tectónicas y a un manto superior anómalo, en forma de una lámina térmica sublitosférica de origen regional. Dicha lámina podría alimentar magmatismo de forma intermitente, a través de globos térmicos que ascienden pasivamente por la astenosfera, sin necesidad de un conducto vertical continuo ni de una fuente profunda.

Además, se ha establecido una conexión genética entre las Islas Canarias y las montañas del Atlas, sustentada en similitudes isotópicas, petrogénicas y estructurales. Esta hipótesis plantea que ambas regiones están influenciadas por una misma anomalía térmica en el manto superior, relacionada con zonas antiguas de debilidad litosférica heredadas de la apertura del Atlántico medio. En consecuencia, la evolución volcánica del archipiélago debe interpretarse en el contexto más amplio de la placa Nubia y sus movimientos relativos con respecto a Iberia y Eurasia.

Este cambio de enfoque tiene implicaciones directas para la hidrogeología del archipiélago, pues redefine el marco estructural y térmico en el que se desarrollan los acuíferos volcánicos. La interpretación de los sistemas de fractura, el emplazamiento de los diques y las propiedades térmicas del subsuelo deben revisarse a la luz de esta nueva propuesta, lo cual puede mejorar la comprensión de la recarga, almacenamiento y dinámica del agua subterránea en las islas.

2.2. Climatología: régimen pluviométrico e influencia de los alisios

El régimen climático de las Islas Canarias está profundamente condicionado por la estabilidad atmosférica asociada al anticiclón de las Azores y la corriente en chorro subtropical. Los vientos alisios —corrientes de aire moderadas provenientes del noreste— constituyen el principal regulador meteorológico del archipiélago.

Estos transportan masas de aire fresco y húmedo desde el océano Atlántico, moduladas a su vez por la corriente fría de Canarias. Cuando los alisios chocan con las laderas situadas a barlovento, el ascenso forzado del aire produce una inversión térmica que mantiene nubes bajas —el conocido "mar de nubes"— (Santana-Pérez, 2008; Ritter et al., 2019).

El ascenso forzado del aire al chocar con las vertientes norte y noreste induce la condensación del vapor de agua en las medianías. De ahí nace la "precipitación horizontal": un aporte que no registran los pluviómetros, pero que sostiene la

recarga indirecta de los acuíferos y al monteverde (Ritter et al., 2015; Heredia et al., 2014).

A cotas intermedias, la vegetación intercepta la niebla y la deja percolar gota a gota. Ese riego pasivo favorece la infiltración puntual y contribuye a la resiliencia hídrica de los ecosistemas autóctonos.

La capa de inversión que imponen los alisios frena la convección: la atmósfera se estabiliza y el norte de cada isla disfruta de un clima suave y húmedo, mientras las vertientes meridionales siguen marcadas por la aridez. Cuando el patrón se rompe —por una borrasca atlántica profunda o la irrupción de aire polar— la estratificación desaparece y el ascenso convectivo se dispara; en enero de 2021, por ejemplo, Los Sauces, e la isla de La Palma llegó a registrar 95 mm en pocas horas (Santana-Pérez, 2008; Miranda et al., 2021).



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.5. Árbol Garoé y precipitación horizontal

Las precipitaciones en Canarias son escasas, irregulares y marcadamente estacionales. En buena parte del territorio la media anual no alcanza los 300 mm; en las franjas litorales de Lanzarote y Fuerteventura cae incluso por debajo de 150 mm. Los episodios intensos llegan de forma esporádica, con pulsos torrenciales que erosionan mucho y recargan poco: el agua corre rápido y apenas infiltra, un factor crítico para la planificación de obras hidráulicas y la gestión de los acuíferos (Miranda et al., 2021), además pueden crear problemas serios en infraestructuras y poblaciones aguas abajo.

En el caso de la aportación por precipitación horizontal no es uniforme; cambia con la altitud, la orientación y la densidad de la cubierta vegetal. En un transecto de la vertiente norte de Tenerife, los rendimientos a 1.000 m s.n.m. superaron en un orden de magnitud a los medidos al pie de la ladera (Heredia et al., 2014). Estos recursos hídricos han ganado importancia: se sabe ya que alimentan la recarga de los acuíferos volcánicos, sobre todo en laderas escarpadas con poca retención superficial (Ritter et al., 2015). La niebla y los estratocúmulos, por tanto, amortiguan parte del déficit pluviométrico y modulan el ciclo hidrológico insular.



Fuente: European Space Agency (ESA)

Figura 2.6. Mar de nubes en la Isla de El Hierro

Comprender a fondo estos mecanismos se ha vuelto imprescindible para anticipar cómo los cambios previstos en la circulación atmosférica —inducidos por el calentamiento global— podrían alterar de forma significativa el ciclo hidrológico en las islas, de ahí nuestra aportación con la plataforma SICMA-Canarias, como respuesta a esta necesidad de predecir los futuros impactos en la gestión del agua.

Proyecciones recientes señalan que el desplazamiento o debilitamiento del régimen alisio puede reducir la frecuencia de formación de nubes bajas, afectando

a los procesos de condensación y precipitación orográfica (Miranda et al., 2021). Esta situación plantea retos significativos para la gestión adaptativa del agua en territorios insulares, donde cada forma de entrada hídrica, por mínima que parezca, puede ser crítica.

2.3. La lluvia horizontal o de niebla

Como hemos comentado anteriormente, la precipitación de niebla o "lluvia horizontal" es un mecanismo de aporte hídrico singular, producido por el "mar de nubes" (Figura 2.7), característico de las islas volcánicas de clima subtropical, y especialmente relevante en Canarias.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.7. Dorsal de la isla y el mar de nubes en la masa forestal

Estudios pioneros realizados por ICONA[1] en los años ochenta (Santana, 2008) ya documentaban que, en zonas de monteverde y pinares del norte de Tenerife y La Palma, los valores anuales de precipitación de niebla podían superar los 1.400 mm, desde mi punto de vista son cantidades bastante elevadas, pero que

[1] El ICONA (Instituto para la Conservación de la Naturaleza) fue un organismo autónomo del Estado español creado en 1971 y adscrito al entonces Ministerio de Agricultura. Su objetivo principal era gestionar, conservar y restaurar los recursos naturales y forestales del país.

están documentados. Mediante captadores metálicos instalados en enclaves como El Asomadero, Las Lagunetas o la Cumbre Nueva, se registraron cocientes de precipitación horizontal hasta cien veces superiores a la lluvia a cielo abierto, especialmente en verano, cuando la precipitación convectiva escasea.

Investigaciones más recientes han cuantificado los mecanismos físicos que explican esta eficiencia de captación. Ritter et al. (2015) demostraron que el rendimiento de los captadores depende de variables como el número de Stokes y Reynolds de las gotas de niebla, la rugosidad de las superficies y el ángulo de incidencia del flujo.

Fernández et al. (2018), por su parte, analizaron distintas mallas y estructuras colectoras bajo condiciones reales en Canarias, encontrando que los diseños con alta adhesividad superficial y geometría optimizada incrementaban de forma sustancial la captación efectiva. Estos resultados se alinean con desarrollos tecnológicos más avanzados, como los sistemas biomiméticos descritos por Peng et al. (2015), que reproducen estructuras naturales como las espinas del cactus o la piel del escarabajo del Namib[2] para maximizar la eficiencia hidrodinámica sin requerimientos energéticos.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.8. Aprovechamiento de la precipitación horizontal debajo de un árbol en el Hierro

[2] La piel del escarabajo del desierto del Namib (Stenocara gracilipes) es un ejemplo extraordinario de adaptación biológica extrema a la aridez. Su caparazón ha evolucionado para captar agua directamente del aire, mediante un mecanismo de condensación por estructuras micro y nanotecnológicas.

Además, se ha comprobado que la eficiencia de captación varía en función de la especie vegetal. En ecosistemas expuestos a los alisios, especies como el pino canario (*Pinus canariensis*) o el brezo (*Erica arborea*) presentan tasas de captación superiores a las lauráceas del monteverde, debido a la estructura acicular de sus hojas y a su elevada densidad foliar (Fernández et al., 2018). También influye la posición en el dosel: el goteo es más intenso en las copas superiores, mientras que el sotobosque apenas recibe aportes.

Braojos (2015) estimó con su modelo para la isla de Tenerife que las zonas de cresta son las que más producción tienen, siempre que no superen los 1.500 metros sobre el nivel del mar.

Esta fuente de agua representa una fracción relevante del balance hídrico en Tenerife, especialmente en cuencas con sustratos volcánicos porosos y cobertura boscosa activa. Los captadores de lluvia horizontal pueden tener diversas funciones que incluyen además de llenar depósitos de agua para actividades forestales (restauración de espacios degradados, reforestación, incendios) pueden constituir bebederos de fauna u otros usos rurales (pequeños cultivos) (Santamarta & Seijas, 2010).

A nivel operativo, Canarias ha dado un paso relevante con la implementación del proyecto europeo LIFE NIEBLAS[3], desarrollado en la isla de Gran Canaria entre 2020 y 2025. Este proyecto ha testado sistemas pasivos de captación atmosférica de agua en el Parque Rural de Doramas, utilizando mallas de polietileno de alta densidad y estructuras modulares ligeras.

Los resultados obtenidos muestran rendimientos superiores a 8 L/m²/día en condiciones favorables de exposición y viento. Los captadores se integraron en sistemas de riego por goteo para facilitar la restauración de hábitats forestales degradados, permitiendo mantener humedad en los suelos sin necesidad de aporte externo de agua ni energía.

La guía técnica del proyecto recoge criterios detallados para la instalación, mantenimiento y replicabilidad de los sistemas, alineándose con el enfoque de Soluciones Basadas en la Naturaleza. Estas tecnologías, de bajo impacto y alta eficiencia, representan una herramienta prometedora para reforzar la resiliencia hídrica en entornos insulares de alta fragilidad ecológica, como los ecosistemas de monteverde canarios.

---

[3] "Reforestation & Climate Change Mitigation: tests, evaluation and transfer of innovative methods based on fog collection" – LIFE NIEBLAS (LIFE19 CCM/ES/001199) https://lifenieblas.com/es/el-proyecto



Fuente: Proyecto Life Nieblas

Figura 2.9. Captadores de lluvia horizontal para su uso en restauración forestal

2.4. Heterogeneidad edafológica y geológica: implicaciones sobre la escorrentía, infiltración y recarga

El suelo funciona como un cuerpo tridimensional y activo que combina tres fases inseparables: sólida, líquida y gaseosa. La fracción sólida —minerales y materia orgánica— se ordena en una malla porosa por la que circulan aire y agua. No importa solo cuánto espacio vacío exista, sino cómo se reparte y conecta; esa arquitectura controla la infiltración a lo largo del perfil edáfico (Hillel, 1980).

La textura marca la pauta. Un suelo arenoso, con predominio de macroporos, deja pasar el agua con rapidez, pero la retiene mal. En uno arcilloso ocurre lo contrario: los microporos guardan humedad, aunque ralentizan el flujo. Esa diferencia, sumada a la estructura, define la recarga efectiva y el régimen de escorrentía de cada cuenca.

La estructura, entendida como la forma y la estabilidad de los agregados, completa el panorama. Cuando los agregados son firmes, la red porosa se mantiene abierta y el agua penetra sin dificultad. Si el suelo se compacta o pierde cohesión —por laboreo intensivo, maquinaria pesada o pisoteo— el agregado colapsa, la densidad aparente aumenta y la infiltración se reduce de forma drástica. Un mis-

mo horizonte puede pasar, así, de funcionar como esponja a comportarse como una losa impermeable.

En suelos volcánicos, la mineralogía arcillosa añade otra vuelta al engranaje hidrológico. En ciertos Vertisoles, las arcillas expansivas se hinchan con la humedad; al hacerlo, obstruyen los poros y frenan la infiltración durante las primeras horas del episodio pluvial (Ben-Hur, Agassi & Shainberg, 1998). Los Andisoles responden de forma distinta. Formados sobre materiales volcánicos jóvenes, albergan productos de ordenación de corto alcance —alofana e imogolita— que propician agregados estables y una red porosa que se mantiene operativa incluso en saturación parcial (Nanzyo, Shoji & Dahlgren, 1993).

La materia orgánica refuerza esa arquitectura. Actúa como cemento natural entre partículas minerales; al mejorar la agregación, incrementa la porosidad y eleva la capacidad de infiltración. Su efecto estabilizador ha sido ampliamente descrito, también en medios volcánicos (Porta, López-Acevedo & Roquero, 2003; Emerson, 1977).

Un tercer condicionante es la repelencia al agua. Aparece tras incendios o donde se acumulan compuestos hidrófobos y limita la entrada inicial del agua de lluvia. El resultado es más escorrentía superficial y menor recarga efectiva, con impactos hidrológicos apreciables a escala de cuenca (Doerr, Shakesby & Walsh, 2000).

La lluvia aporta su propia regulación al proceso de infiltración. Su intensidad y el tamaño de las gotas definen la energía cinética que golpea el suelo. Cuando esa energía es alta, rompe agregados y genera costras superficiales; el sellado resultante reduce la entrada de agua, aumenta la escorrentía y acelera la erosión, sobre todo en laderas desnudas (Hillel, 1980).

A este efecto se suman tres moduladores ambientales. Pendiente: cuanto mayor es la inclinación, menos tiempo permanece el agua en superficie y más rápido escurre ladera abajo. Cobertura vegetal: la hojarasca atenúa el impacto de las gotas, las raíces refuerzan la estructura y la rugosidad frena el flujo, todo ello a favor de la infiltración. Uso del suelo: laboreo intensivo, urbanización o sobrepastoreo compactan el perfil, alteran la biota y reducen la materia orgánica, con la consiguiente pérdida de capacidad de absorción.

La infiltración en suelos volcánicos responde a un entramado de factores físicos, mineralógicos y ambientales. De su interacción dependen la recarga, la respuesta de las avenidas y, en última instancia, la sostenibilidad del uso del territorio.

En Canarias, la mayoría de los suelos volcánicos son jóvenes e inmaduros. Se forman sobre lapilli, escorias y cenizas recientes, y muestran una porosidad superficial notable. Esa porosidad admite una entrada de agua rápida en los primeros centímetros. Sin embargo, la retención no siempre acompaña: el perfil carece, a

menudo, de horizontes bien desarrollados o de niveles freáticos someros que detengan el avance del agua. El resultado es predecible: una parte significativa del caudal infiltrado se pierde por percolación profunda cuando no aparecen capas impermeables que actúen de barrera (Neris et al., 2012; Neris et al., 2016).

La escorrentía superficial, por lo general, es mínima. El suelo, muy poroso, absorbe casi toda la lluvia habitual. Solo cuando la precipitación se prolonga y mantiene intensidades elevadas el perfil se satura: el agua se concentra en los barrancos y circula durante unas pocas horas con carácter torrencial (Mora et al., 2015; Santamarta et al., 2020). Esos pulsos breves excavan con fuerza, sobre todo en laderas sin cobertura vegetal —tras incendios o bajo sobrepastoreo—, donde la pérdida de cohesión provoca cárcavas y rompe el ciclo natural de infiltración.

La edafología volcánica de Canarias no encaja en esquemas simplificados. Según la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), se reconocen seis órdenes principales, cada uno resultado de la edad del material parental, el grado de alteración, la mineralogía y la posición en el relieve.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.10. Suelos erosionados en la isla de La Gomera

Los Andosoles dominan en las zonas volcánicas más recientes. Se originan sobre cenizas y piroclastos poco consolidados y comparten tres rasgos físicos nota-

bles: porosidad elevada, densidad aparente baja y gran capacidad de retener agua. Su matriz mineral incluye alofana, complejos organo-minerales y vidrio volcánico en proporciones variables. Las variantes alofánicas se concentran en áreas húmedas, bajo la influencia de los alisios; las formas vítricas o no alofánicas ocupan sectores más secos o con mayor antigüedad del sustrato.

Al cambiar de altitud o vertiente la diversidad aumenta. Vertisoles —ricos en arcillas expansivas— aparecen sobre depósitos antiguos y coluvionados; su estructura se contrae o se hincha según la humedad. En ambientes áridos dominan los aridisoles, suelos frágiles, escasamente desarrollados y con poca capacidad de retención. Las zonas de medianías albergan Alfisoles, que muestran horizontes de acumulación de arcilla y reflejan una pedogénesis más avanzada.

Los Inceptisoles y Entisoles completan el mosaico. Incluyen perfiles que van desde una evolución incipiente hasta suelos sin rasgos morfológicos apreciables. Su presencia suele responder a episodios recientes de erosión, aportes coluviales o a la alteración provocada por el uso humano, de ahí su distribución irregular en el paisaje.



Fuente: LBM1948

Figura 2.11. Suelo Andosol

Conocer en detalle esta matriz edáfica es fundamental. Afecta de forma directa a la productividad agraria y a la distribución de la vegetación, pero también regula la infiltración, la recarga de los acuíferos y la respuesta del terreno frente a episodios extremos.

En un territorio insular, con recursos limitados y alta vulnerabilidad climática, el suelo no es un soporte pasivo: se convierte en una variable estratégica para la ordenación del territorio y para cualquier plan de adaptación al cambio climático.

La recarga de los acuíferos en el archipiélago resulta de una interacción compleja entre clima, geología y ocupación del suelo. Desde el punto de vista geológico, tres rasgos son determinantes: la disposición de las coladas, los diques verticales que actúan como barreras o guías de flujo y los paleosuelos poco permeables que favorecen embolsamientos interestratificados (Arata et al., 2023). A ello se suma la huella antrópica: la impermeabilización asociada a núcleos urbanos o superficies agrícolas disminuye la infiltración efectiva y distorsiona los balances naturales.

La cantidad de lluvia no se traduce, de manera lineal, en recarga utilizable. En ciertos contextos volcánicos, más del 80 % del agua infiltrada puede seguir descendiendo hasta el fondo oceánico sin ser interceptada por las captaciones actuales (Neris et al., 2012). Esa recarga no efectiva supone una pérdida estratégica, agravada por la ausencia de planes adaptados a la singularidad hidrogeológica de las islas.

En consecuencia, el conocimiento detallado de la heterogeneidad edafológica y geológica del archipiélago no solo es clave para la investigación hidrogeológica, sino también para la formulación de estrategias eficaces de gestión del agua. La zonificación de áreas potenciales de recarga, la conservación de suelos forestales y el rediseño del uso del suelo con criterios hidrológicos deben formar parte de cualquier política hídrica orientada a la sostenibilidad.

En este apartado, como titulado en ingeniería de montes, me gustaría destacar la importancia de la cubierta forestal en la gestión de los recursos hídricos de las islas. No siempre llueve sobre suelo indiferente. La cubierta forestal —cómo se gestiona, cómo se altera, cómo se regenera o se pierde— deja una huella clara en el agua que escurre por la superficie, en la que se escurre por las laderas, en lo que arrastra por los barrancos y en lo que deja atrás. Y no se trata solo de cantidades. Cuando el clima es extremo, los efectos de cada perturbación forestal se amplifican. A veces se nota enseguida: tras una tala o un incendio, el agua se desborda más sucia, más cargada de cenizas, más rápida. Otras, la diferencia es sutil y se esconde en el fondo de una corriente que arrastra siglos de sedimento.

Para entenderlo mejor, tuve la oportunidad de estudiar con Ben-Hur en el año 2010, diferentes cuencas hidrográficas bajo tres climas distintos en Europa. La conclusión era clara, cualquier perturbación en la masa forestal—incendios forestales, cortas a hecho[4], plagas, clareos...— afectaba a las aguas superficiales en calidad y cantidad.

[4] Expresión técnica utilizada en selvicultura que hace referencia a la extracción completa del arbolado de una masa forestal en una sola intervención.

En el caso de la afectación a las aguas subterráneas por perturbación en la masa forestal, podemos referenciar nuestro estudio de 2024 en la Sierra de La Culebra en Zamora[5], de Rodríguez-Jimenez et al., durante uno de los mayores incendios forestales que han ocurrido en España. Los incendios forestales alteran profundamente la dinámica hidrológica del suelo, modificando la infiltración, la escorrentía y, en ciertos casos, la calidad del agua subterránea.

La deposición de cenizas puede favorecer el arrastre de compuestos orgánicos y minerales hacia el subsuelo, especialmente en terrenos con alta permeabilidad. El incendio de Zamora ofreció un caso extremo para estudiar estas alteraciones. En el estudio, se detectó una disminución generalizada del pH, incrementos de SO_4^{2-} y NO_3^- en algunos puntos, y una reducción del HCO_3^-, probablemente asociada a procesos de oxidación de materia orgánica y lixiviación post-incendio.

A pesar de ello, la respuesta global del sistema acuífero fue relativamente estable, sugiriendo cierto grado de resiliencia frente a perturbaciones severas, aunque con impactos localizados y dependientes de la litología y la cobertura vegetal previa.

No podemos comparar los resultados de este estudio con lo que podría haber ocurrido en el acuífero insular de la isla de Tenerife, durante el incedio forestal de 2023[6], dadó que no se hizo ningún estudio al respecto.

Es necesario concluir este apartado indicando que, la recarga (o infiltración efectiva) se define como la fracción del agua infiltrada que logra superar la capacidad de retención del suelo edáfico y alcanza el nivel freático o la zona saturada del acuífero, contribuyendo así al almacenamiento subterráneo. Es fundamental diferenciarla de la infiltración total, que incluye también el agua que queda retenida en los poros del suelo para ser utilizada por la vegetación o para procesos de evaporación.

Algunos autores y documentos técnicos tienden a emplear ambos términos de forma indistinta, lo que puede inducir a errores significativos en el balance hídrico, especialmente en entornos semiáridos o con suelos de alta capacidad de almacenamiento edáfico. Por tanto, desde el punto de vista hidrogeológico, la recarga debe entenderse estrictamente como la porción de la infiltración neta que se incorpora al sistema acuífero, sobre este punto incidiré en varias partes de este capítulo.

---

[5] https://es.wikipedia.org/wiki/Incendios_de_la_sierra_de_la_Culebra_de_2022

[6] https://es.wikipedia.org/wiki/Incendio_forestal_en_Tenerife_de_2023

3. Caracterización hidrogeológica de Canarias

3.1. Estructura general de los acuíferos en medios volcánico

Los acuíferos en las Islas Canarias presentan un comportamiento hidrogeológico singular, que difiere notablemente de los modelos clásicos de sistemas porosos continuos comunes en medios continentales.

Esta diferencia responde a la combinación de una marcada heterogeneidad litológica, anisotropía hidráulica y compartimentación estructural, propias de los terrenos volcánicos insulares (Herrera & Custodio, 2014).

La alternancia de coladas de lava, depósitos piroclásticos, niveles de paleosuelo y diques subvolcánicos configura un sistema multilaminar y discontinuo, en el que el flujo del agua subterránea se ve interrumpido por barreras geológicas y canalizado a través de trayectorias preferentes no lineales (Izquierdo, 2014).

A diferencia de las cuencas continentales, donde los flujos regionales dominan la dinámica general, en Canarias el flujo subterráneo es predominantemente local o sublocal. Este se encuentra condicionado por la morfología abrupta del terreno, la tectónica reciente y la disposición de las unidades geológicas.

En palabras de Custodio, los acuíferos en medios volcánicos actúan muchas veces como capas inclinadas y diques intercalados, dificultando la caracterización y la explotación uniforme de los recursos hídricos subterráneos (Herrera & Custodio, 2014).

En islas como Tenerife y La Palma, estas condiciones se traducen en una circulación subterránea que discurre principalmente a través de coladas fisuradas, con drenaje lateral hacia la costa.

Los paleosuelos alterados, con propiedades más impermeables, suelen actuar como acuítardos, favoreciendo el almacenamiento interestratificado y una liberación lenta del agua, bien a través de surgencias naturales o mediante captaciones profundas (Izquierdo, 2014).

Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en galerías de agua (Santamarta, 2016), donde la evolución de los caudales revela tanto el carácter compartimentado del acuífero como los tiempos de respuesta prolongados a las recargas episódicas.

La modelización hidrogeológica de estos sistemas requiere enfoques específicos. El uso de técnicas geofísicas avanzadas ha permitido mejorar la delimitación de las unidades hidráulicas activas y de las barreras de flujo, arrojando luz sobre una estructura interna compleja que no se ajusta a los modelos tradicionales de acuíferos homogéneos o isotrópicos, desde mi punto de vista estas técnicas se podrían utilizar más, tal vez su elevado coste y la necesidad de personal especializado las ha limitado.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.11. Naciente en la isla de La Palma

Esta comprensión es crítica para definir reservas explotables reales, planificar nuevas captaciones y anticipar la respuesta del sistema a escenarios de cambio climático o sobreexplotación.

La gestión del agua subterránea en las Islas Canarias debe estar basada en un conocimiento profundo de su geología estructural, su comportamiento hidráulico y la evolución temporal del recurso. Por supuesto, hay que dejar de lado las especulaciones, afirmaciones sin datos ni estudios científicos, que por desgracia tenemos que lidiar día a día la comunidad científica.

La singularidad de estos acuíferos obliga a diseñar estrategias adaptadas al medio volcánico, reconociendo su alta variabilidad espacial y la importancia de considerar factores geodinámicos en cualquier política de planificación hídrica.

3.2. Acuíferos, materiales piroclásticos, diques y paleosuelos

En las islas volcánicas como las Canarias, la dinámica del agua subterránea está fuertemente condicionada por la litología y la estructura interna de los materiales que conforman el medio geológico.

Las coladas basálticas, especialmente si son recientes o se encuentran poco compactadas, pueden presentar una porosidad primaria elevada. Esta porosidad está determinada por la presencia de zonas vesiculares, la conectividad entre tubos volcánicos y la existencia de fisuración derivada de procesos de enfriamiento diferencial.

En terrenos jóvenes, como los de la isla de El Hierro, la permeabilidad puede ser muy alta, permitiendo un flujo eficaz del agua a través de conductos abiertos y redes de fracturas bien desarrolladas (Ahn et al., 2021). Esta configuración explica la capacidad de algunos sectores basálticos para transmitir grandes volúmenes de agua, con tiempos de respuesta rápidos frente a episodios de recarga.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.12. Serie de depósitos piroclásticos estratificados en el Parque Nacional del Teide

Los materiales piroclásticos (Figura 2.12), como el lapilli, cenizas o escorias, también presentan una porosidad inicial elevada, lo que les confiere un comportamiento altamente infiltrante en condiciones secas. Aún así, su compactación progresiva y los procesos de alteración reducen su transmisividad efectiva con el tiempo, un ejemplo pueden ser las ignimbritas soldadas que prácticamente son impermeables y se pueden encontrar en el sur de la isla de Tenerife.

En laderas escarpadas y sometidas a lluvias intensas, estos materiales pueden funcionar como capas de infiltración rápida, aunque cuando se saturan actúan como planos de deslizamiento, favoreciendo procesos de inestabilidad geomorfológica (Hunt et al., 2013; Hunt et al., 2014). Esta dualidad los convierte en elementos clave tanto para la recarga como para la gestión del riesgo geológico, principalmente desprendimientos, que han sido estudiados en diferentes proyectos internacionales como el MACASTAB[7] o el AGEO[8], que tuve la oportunidad de dirigir en la Universidad de La Laguna (ULL).

Los diques volcánicos (Figura 2.13), son estructuras intrusivas que se disponen verticalmente a través de las formaciones preexistentes, poseen una permeabilidad muy baja en comparación con los materiales circundantes.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.13. Dique geológico

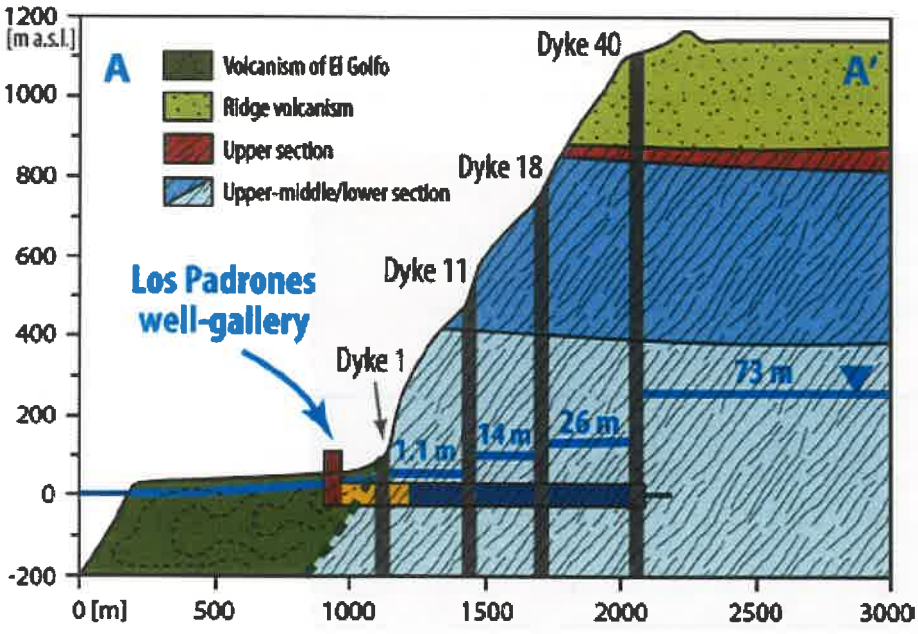
[7] El proyecto MACASTAB (acrónimo de *Macaronesia Slope Stability*), financiado por el programa INTERREG V-A MAC 2014-2020 y cofinanciado por fondos FEDER, se inició en 2017 bajo liderazgo del Gobierno de Canarias, en colaboración con expertos de Madeira, Azores y Cabo Verde https://macastab.com/

[8] El proyecto AGEO (Atlantic Platform for Geological Risk Management), financiado por el programa Interreg Atlantic Area, tuvo como objetivo mejorar la prevención y gestión de riesgos geológicos en las regiones atlánticas mediante la participación activa de la ciudadanía y el uso de infraestructuras de datos geoespaciales https://ageoatlantic.eu/

Su función hidrogeológica es, por tanto, la de barreras hidráulicas que segmentan los acuíferos, reducen la continuidad del flujo y favorecen la compartimentación del sistema. Cuando se presentan en paquetes densos, los diques pueden actuar como presas naturales subterráneas, reteniendo agua a su favor y elevando localmente el nivel freático (Hunt & Jarvis, 2017; Santamarta et al., 2023). Este efecto es particularmente visible en captaciones cercanas, donde variaciones mínimas en la litología atravesada pueden dar lugar a diferencias notables en el caudal explotable.

Los diques subverticales de baja permeabilidad actúan como auténticos diques hidráulicos que compartimentan la masa de agua subterránea, incrementan de forma escalonada los niveles piezométricos y obligan al interfaz agua dulce–agua salada a hundirse cientos de metros hacia el interior; en consecuencia, aumentan el volumen almacenado de agua dulce y generan reservas estratégicas en la zona protegida tierra adentro, mientras que, aguas abajo del primer dique, la intrusión marina resulta más probable.

El estudio de la galería de Los Padrones (Figura 2.14), en El Hierro, demuestra que bastan cuatro diques de varios metros de espesor para multiplicar por diez el gradiente hidráulico, reducir la conductividad eléctrica del agua de 1450 a 350 µS cm^{-1} y permitir caudales de explotación equivalentes al 30 % de la recarga sin salinización, siempre que la captación se ubique tras la barrera.



Fuente: Marazuela et al. (2023)

Figura 2.14. Sobreelevación del acuífero por el efecto de los diques en el acuífero de El Hierro

Estas conclusiones subrayan la importancia de cartografiar y modelizar enjambres de diques al planificar captaciones en islas volcánicas y litorales basálticos: un pozo situado en la posición adecuada puede mantener la potabilidad de sus aguas a largo plazo, mientras que otro emplazado unos cientos de metros más cerca de la costa queda condenado a la intrusión salina.

El estudio liderado por Marazuela (2023), en el que tuve oportunidad de trabajar, ofrece, por tanto, un marco práctico para optimizar la gestión del agua en archipiélagos como Canarias, Azores o Hawaii, donde la sobreexplotación y el ascenso del nivel del mar ponen en riesgo los acuíferos costeros.

Los paleosuelos alterados (Figura 2.15)—formados por capas arcillosas o niveles ricos en vidrio volcánico transformado— constituyen horizontes de baja permeabilidad. Suelen funcionar como acuíferos colgados o como capas de confinamiento, capaces de mantener presiones suficientes para dar lugar a acuíferos artesianos cuando la carga hidráulica lo permite (Custodio et al., 2015). Su comportamiento geoquímico influye en los procesos de recarga indirecta, actuando como filtros naturales que modulan la calidad y el flujo del agua (Eff-Darwich et al., 2008).

Esta diversidad litológica y estructural explica por qué dos galerías o sondeos situados a escasa distancia pueden mostrar comportamientos hidrológicos radicalmente distintos (Santamarta, 2016). La existencia o no de una capa activa de recarga, de un acuífero colgado o de una barrera estructural puede determinar la presencia de agua, su calidad y su disponibilidad temporal. En consecuencia, el análisis detallado del contexto geológico es esencial para la planificación de captaciones y la gestión eficiente del agua subterránea en medios volcánicos insulares.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.15. Coladas y paleosuelo (almagre)

3.3. Acuíferos colgados y acuíferos basales

En muchas zonas de medianías del archipiélago canario se desarrollan acuíferos colgados, sustentados por niveles impermeables locales como paleosuelos arcillosos o estratos ricos en vidrio volcánico alterado.

Estos acuíferos, de extensión y capacidad limitadas, han sido históricamente fundamentales para el abastecimiento agrícola y doméstico en entornos rurales dispersos, alimentando surgencias naturales, nacientes estacionales y pequeñas galerías excavadas a poca profundidad.

Su persistencia está asociada a condiciones morfoestructurales favorables y a una recarga localizada que depende en gran medida de las lluvias estacionales, la "lluvia horizontal" y de la cobertura vegetal, como comentamos anteriormente.

Este tipo de acuíferos también ha sido documentado en otras islas volcánicas, donde se repiten patrones litológicos y geomorfológicos similares. Estos acuíferos, al tener poco volumen almacenado y estar muy cerca de la superficie, son muy sensibles a la variabilidad climática y a la contaminación. Desde mi punto son los que primero desaparecerán con el efecto del cambio climático.

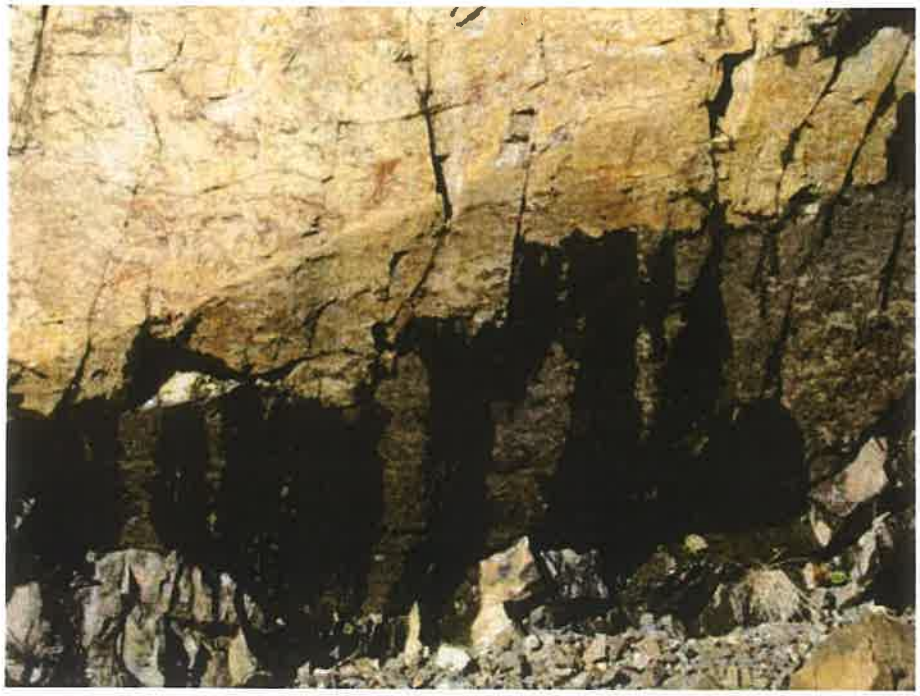
A mayor profundidad, por debajo del nivel del mar, se localizan los denominados acuíferos basales, donde el agua dulce se dispone en forma de lente flotante sobre una masa de agua salina debido a la diferencia de densidades, según el modelo teórico de Ghyben-Herzberg, sobrelevada por el efecto de los diques hasta elevadas cotas de la isla.

En las Islas Canarias este modelo idealizado rara vez se reproduce de forma completa. La intensa fracturación del medio, la presencia de tubos volcánicos y la elevada conectividad hidráulica en algunos sectores favorecen la intrusión marina en acuíferos profundos, especialmente en pozos costeros sobreexplotados o mal gestionados.

Los estudios más recientes han demostrado que la posición y estabilidad de la interfaz salina se ven afectadas no solo por la geometría del acuífero, sino también por los regímenes de bombeo, la salinidad de entrada y la anisotropía estructural del medio.

Estas variables modulan tanto la calidad del agua como la disponibilidad efectiva de recurso, lo que exige medidas de gestión adaptadas al comportamiento real del sistema.

La coexistencia de acuíferos colgados en cotas medias y acuíferos basales en niveles profundos ilustra la complejidad hidrogeológica del archipiélago. Ambos sistemas requieren enfoques diferenciados de estudio y gestión, no solo por su comportamiento hidráulico, sino también por su vulnerabilidad frente a presiones externas y cambios en el régimen climático.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.16. Afloramiento de aguas subterráneas desde acuífero colgado en lavas fracturadas

Algún autor sostiene que el acuífero basal de Tenerife no muestra un descenso significativo porque todavía existen galerías que drenan agua por gravedad a cotas relativamente elevadas. Argumento sin ninguna base científica, ni datos que lo avalen, desde mi conocimiento.

Desde esa óptica, según ese autor, la simple continuidad de caudales en diferentes captaciones subterráneas evidenciaría que el nivel freático general se mantiene estable y que la sobreexplotación habría sido sobrestimada.

Pasemos a desmontar la supuesta teoría, un examen hidrogeológico detallado revela que tal inferencia parte de una premisa equivocada: no todas las galerías drenan el acuífero basal; muchas interceptan acuíferos colgados o compartimentos producidos por diques que forman unidades hidráulicas aisladas, desconectadas del acuífero principal.

En primer lugar, los registros piezométricos históricos y las modelizaciones del Plan Hidrológico Insular de Tenerife documentan abatimientos en un rango de 650-700 m (Braojos, 2023) en los sectores más explotados durante el último siglo, con una tendencia descendente que continúa pese a la entrada de recursos externos como la desalinización de agua de mar (Cabildo de Tenerife, 2020).

Paralelamente, el inventario oficial clasifica más de 300 galerías-naciente que producen caudales pequeños (≈ 12 L s^{-1} en conjunto) y presentan una marcada dependencia de los episodios pluviométricos, rasgo típico de acuíferos colgados de escaso almacenamiento (Cabildo de Tenerife, 2020).

La razón hidrogeológica es clara, el edificio volcánico de Tenerife alberga enjambres de diques subverticales de baja permeabilidad que compartimentan la circulación subterránea, crean gradientes hidráulicos escalonados y permiten la existencia de niveles saturados locales por encima del freático regional (Marazuela et al., 2023). Cuando una galería atraviesa uno de estos compartimentos, puede mantener flujo gravitatorio, aunque aguas abajo el nivel piezométrico se haya abatido decenas de metros.

Casos análogos descritos en Hawái y Azores corroboran que la persistencia de caudales en galerías no es un indicador fiable del estado del acuífero basal (Izuka & Gingerich, 2003).

Por si eso fuera poco, los datos geoquímicos apoyan esta distinción: las galerías profundas muestran conductividades crecientes y signos de intrusión marina, mientras que muchas galerías superficiales exhiben agua de baja mineralización y tiempos de tránsito cortos, propios de sistemas colgados alimentados por recarga directa. Ignorar esta heterogeneidad conduce a diagnósticos complacientes y a sobrestimar la disponibilidad real de recursos.

3.4. Dinámica del agua subterránea: recarga, almacenamiento y descarga costera

La recarga natural proviene mayoritariamente de la infiltración de lluvia directa y, en menor medida, de la captación de nieblas y humedad atmosférica. Esta recarga es altamente variable y depende de la altitud, orientación y cobertura vegetal. La mayor parte se concentra en cotas medias-altas del norte de las islas más montañosas.

El almacenamiento es desigual. Las coladas fracturadas y niveles porosos permiten cierto grado de acumulación, pero no existe un acuífero regional continuo. Las pérdidas por percolación profunda hacia el mar son muy elevadas.

La descarga ocurre de forma natural a través de nacientes (manantiales), escorrentía subterránea costera, o por explotación mediante captaciones como galerías, pozos o sondeos.

En el caso de las galerías, la descarga puede mantenerse constante durante años si interceptan acuíferos semiconfinados o áreas de recarga activa. Pero la verdad es que, en muchas ocasiones, su agotamiento progresivo es inevitable si no existe una gestión controlada.

La estimación de la recarga natural en los acuíferos de Canarias presenta una elevada complejidad debido a la combinación de factores climáticos, geológicos y estructurales propios de los archipiélagos volcánicos. Desde mi experiencia me costaría proporcionar datos certeros sobre la estimación de la recarga en las islas por la complejidad de evaluación de la misma.

La alta porosidad inicial de los materiales piroclásticos recientes, junto con la presencia de lavas fracturadas, favorece una infiltración vertical rápida y profunda, pero sin que ello implique necesariamente una recarga efectiva hacia las unidades acuíferas explotadas.

En muchas zonas, la existencia de niveles de baja permeabilidad intercalados —como paleosuelos, coladas compactas o niveles de alteración— genera sistemas de acuíferos superpuestos, desconectados o de recarga retardada, lo que dificulta su modelización hidrológica. La escasa densidad de datos directos (sondeos de control piezométrico, balance hídrico de manantiales, seguimiento isotópico de trazadores naturales) limita la validación de los modelos de infiltración aplicados.

A ello se suma la marcada estacionalidad e irregularidad de las precipitaciones y la influencia creciente de la "lluvia horizontal" en las zonas de monteverde, una fuente de entrada hídrica poco cuantificada en los modelos convencionales, salvo en la isla de Tenerife donde se desarrolló el modelo matemático de simulación de la lluvia horizontal (MSPAN) de Braojos (2005).

Por estas razones, las tasas de recarga en Canarias deben considerarse con un margen amplio de incertidumbre, y los enfoques metodológicos deben combinar técnicas indirectas (como el análisis de balance climático, hidroquímico e isotópico) con herramientas numéricas y teledetección, tal como se viene haciendo en estudios recientes en Tenerife y Gran Canaria (Custodio et al., 2016; Cabrera et al., 2019).

Tabla 2.1. Metodología utilizada para estimar la recarga

Bloque metodológico	Técnicas aplicadas	Valoración
Balance hidrometeorológico	• Series 1934-2014 de la AEMET. • ET_0 calculada con Hargreaves (radiación incorporada) y comparación con Thornthwaite. • Tres escenarios climáticos (medio, húmedo, seco) y reserva útil RU = 0-200 mm.	La sustitución de Thornthwaite por Hargreaves elimina el sesgo frío típico de climas subtropicales húmedos y reduce la recarga bruta un 13-20 % respecto a planes anteriores.
Hidrodinámica	• Curvas de agotamiento de 187 galerías (1972-2013). • Ajustes Cooper-Jacob a tramos de recuperación tras cierre de tranques para obtener T y S indirectos (p.ej. T = 15-30 m^2/d en interiores).	Excelente aprovechamiento de un archivo de datos singular; el método es coherente con las limitaciones de aforamiento en medios volcánicos.

Tabla 2.1. Metodología utilizada para estimar la recarga

Bloque metodológico	Técnicas aplicadas	Valoración
Isótopos estables ($\delta^{18}O$, δD)	• 320 análisis (1980-2015). • Relación altitud–isótopo redefinida (gradiente $\delta^{18}O \approx -0{,}28$ ‰/100 m).	Permite delimitar alturas medias de recarga y discriminar aportes verticales vs. horizontales.
Tritio (^3H)	• Función de entrada regional GNIP ajustada ($\lambda' = 0{,}15\ a^{-1}$). • Modelo de mezcla exponencial decreciente (EM) para tiempos de residencia.	Otorga orden de magnitud (≈ 15-40 años) al tránsito por la zona no saturada; útil para contrastar balances.

Fuente: elaboración propia (2025) adaptado de Poncela (2015)

La investigación de Poncela (2015) en la isla de La Palma, que tuve el placer de dirigir y me parece uno de los mejores estudios de recarga que existen actualmente en las Islas Canarias, confirma que la recarga en acuíferos volcánicos oceánicos depende de forma decisiva del gradiente altitudinal y de la captación orográfica de nieblas, concentrándose en los pisos de cumbre y medianías donde la pluviometría efectiva resulta máxima.

El estudio demuestra que únicamente la combinación de balances hidrometeorológicos detallados, la interpretación hidrodinámica de las descargas históricas y la huella de trazadores isotópicos permite acotar la variabilidad espacial de la recarga y minimizar la incertidumbre asociada a la heterogeneidad del medio basáltico.

Los volúmenes resultantes concuerdan con los caudales explotados por galerías y captaciones, lo que refuerza la robustez de la metodología y su transferibilidad a otras islas volcánicas con problemas análogos de estimación de recursos subterráneos.

En este punto, me gustaría destacar otro de los errores que suelen comenter algunos autores al afirmar cifras de recarga sobrestimadas en las islas por no considerar la descarga de agua al océano.

Buena parte del agua infiltrada no llega a incorporarse a los sistemas de captación y termina descargándose de forma difusa en el fondo marino, un proceso hidrológico conocido como descarga subterránea al mar o SGD (Submarine Groundwater Discharge).

La descarga submarina de aguas subterráneas (SGD, por sus siglas en inglés) es el flujo de agua –dulce, salobre o marina– desde acuíferos costeros y sedimentos del fondo marino hacia el océano.

En la última década, se ha demostrado que este proceso es mucho más dinámico y extendido de lo que se suponía, con implicaciones directas en la calidad del agua costera o la productividad pesquera.

Cuatro mecanismos físicos explican la descarga submarina de aguas subterráneas (SGD) en zonas costeras. El más evidente es el gradiente hidráulico terrestre,

que empuja el agua dulce infiltrada hacia el mar, generando un flujo subterráneo descendente y constante. Otro factor importante es el efecto de las mareas: cuando la marea sube, el agua ejerce presión sobre la costa, lo que provoca una recirculación diaria del agua subterránea en los sedimentos costeros. También el oleaje y las corrientes litorales influyen; durante temporales o condiciones de oleaje fuerte, estas fuerzas pueden aumentar notablemente la entrada y salida de agua marina, activando flujos de mayor magnitud.

Un cuarto proceso es la diferencia de densidad entre el agua marina (más salina) y la dulce. Esta diferencia genera movimientos convectivos: el agua salada tiende a infiltrarse sobre la dulce, formando estructuras inestables conocidas como plumas salinas ascendentes.

Estos mecanismos no operan por separado. Se solapan, interactúan y varían según el lugar y las condiciones del momento. Por eso, los tiempos que tarda el agua en recorrer el subsuelo pueden ir desde unos minutos (como ocurre cuando predomina el oleaje) hasta miles de años en zonas donde domina la convección por densidad.

Actualmente, la combinación de datos de campo y modelos numéricos permite estimar con mayor precisión el papel que desempeña cada uno de estos procesos en distintos entornos costeros (Knee & Paytan, 2019; Burnett et al., 2006).

Tabla 2.2. Métodos actuales para medir la SGD

Herramienta	Qué mide	Mejoras recientes	Escala
Isótopos de radón (^{222}Rn) y radio (^{224}Ra, ^{223}Ra, ^{226}Ra, ^{228}Ra)	Magnitud del flujo; tiempos de residencia	Detectores y in situ y extractores por membrana; uso de ^{220}Rn para detectar focos puntuales	Metros a plataforma continental
Imágenes térmicas infrarrojas (TIR)	Localización de surgencias de aguas subterráneas	Cámaras de alta resolución montadas en drones o aviones	100–10.000 m
Tomografía eléctrica o de conductividad	Forma de la zona de mezcla entre las aguas subterráneas y las salinas del océano y vías preferentes	Sistemas de prospección marina remolcados y monitoreo en secuencia temporal	10–1.000 m
Medidores de filtración y sondas térmicas	Tasas de flujo puntuales	Sistemas automatizados para registrar flujos bidireccionales	Escala centimétrica
Trazadores orgánicos, $\delta^{15}N$/$\delta^{13}C$ en algas, Si, CH_4	Fuentes de nutrientes o carbono y vínculos ecológicos	Estudios combinados que alinean picos de trazadores con señales isotópicas o biológicas	Local

Fuente: elaboración propia (2025) adaptado de Burnett at al. (2006)

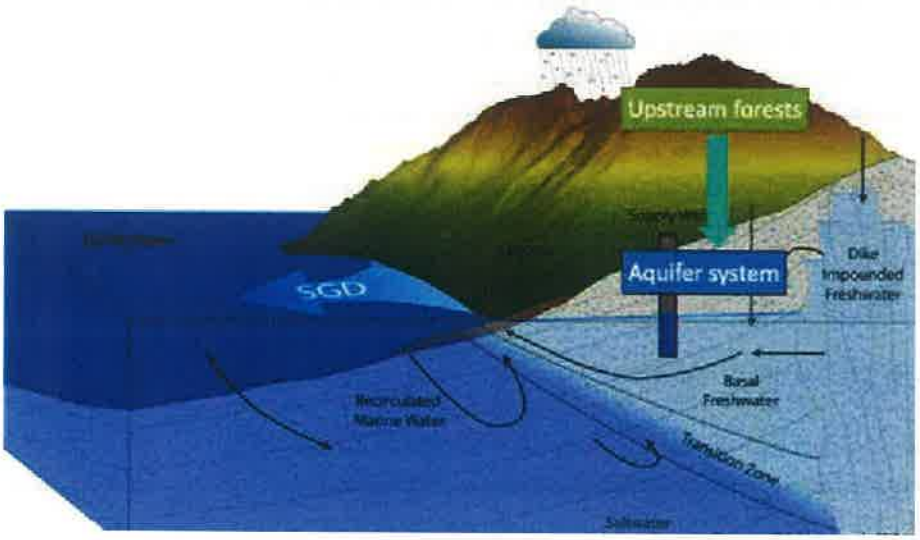
¿Disponemos de estudios de este tipo en las Islas Canarias? La respuesta es no, salvo en Tenerife. Son complejos muy costosos y requieren de personal muy especializado. La SGD en islas volcánicas oceánicas, como las Canarias, representa un proceso aún poco caracterizado a nivel regional.

En el caso de la isla de Tenerife, es posible referenciar estudios específicos como el desarrollado por López (1990), donde se construyó un modelo de flujo de agua subterránea para el Plan Hidrológico Insular, el cual ha sido objeto de sucesivas actualizaciones, siendo la última en 2016.

La SGD Incluye tanto flujos salinos recirculantes como aportes de agua dulce, y está fuertemente condicionado por factores como la geometría del acuífero, su grado de fracturación, la dinámica de recarga y la topografía costera.

Estudios numéricos basados en modelos de flujo dependiente de la densidad han demostrado que la descarga puede concentrarse en puntos específicos determinados por la estructura geológica y la acción de las mareas (Luijendijk et al., 2020).

En el caso de Canarias, salvo el comentado de Tenerife, la ausencia de investigaciones sistemáticas sobre SGD introduce un sesgo en el balance hídrico insular, ya que las metodologías convencionales tienden a omitir estas pérdidas no visibles hacia el mar, especialmente en sectores costeros con alta permeabilidad. Esto puede llevar a sobreestimar la disponibilidad real de agua subterránea, afectando negativamente la planificación y gestión del recurso.



Fuente: UHERO (2023)

Figura 2.17. Ejemplo esquemático de los mecanismos de descarga submarina de aguas subterráneas en islas volcánicas

La importancia de este fenómeno ha sido documentada en múltiples regiones volcánicas. En Hawái, la SGD tiene un papel clave en el transporte de nutrientes hacia ecosistemas costeros sensibles (Luijendijk et al., 2020), mientras que en la

isla de Jeju, Corea del Sur, constituye la vía principal de transferencia de nutrientes, materia orgánica y metales traza hacia el océano en ausencia de escorrentía fluvial (Kim et al., 2020).

Incluso en contextos continentales como el litoral del sureste de Brasil, se ha demostrado que las descargas desde acuíferos fracturados influyen en la biogeoquímica marina (Bokuniewicz, 1980).

Además, el efecto modulador de las mareas sobre estos flujos ha sido señalado como un factor crítico. Las oscilaciones mareales inducen flujos subterráneos bidireccionales en la interfaz costera, promoviendo la entrada de agua marina al subsuelo durante la pleamar y su salida durante la bajamar (Cho et al., 2019). Este intercambio pulsátil altera no solo la magnitud de la SGD, sino también su composición química, con implicaciones directas sobre la dinámica de nutrientes y metales en zonas litorales.

La omisión de este fenómeno en los modelos hidrogeológicos insulares limita la comprensión de los procesos de descarga y su repercusión ecológica.

Resulta necesario integrar de forma explícita la SGD —tanto en su componente dulce como salobre— en los modelos de balance hídrico y gestión de acuíferos en Canarias. Su cuantificación es indispensable para evitar diagnósticos erróneos de disponibilidad, mejorar la resiliencia hídrica frente al cambio climático y proteger los ecosistemas costeros ante posibles alteraciones por sobreexplotación e intrusión marina (Ibánhez et al., 2021; Gonneea et al., 2013; Sugimoto et al., 2017).

Mi consejo es desarrollar una línea de investigación en esta área, disponemos de grandes equipos de investigación oceanográfica en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC).

3.5. Vulnerabilidad natural de los sistemas insulares

Los sistemas de aguas subterráneas en islas volcánicas oceánicas, como las del archipiélago canario, presentan una elevada vulnerabilidad estructural y funcional, derivada de su configuración geológica, la limitación natural de sus reservas de agua dulce y la ausencia de una red hídrica superficial consolidada.

Esta fragilidad se explica por el origen volcánico del terreno, que da lugar a acuíferos no confinados, altamente fragmentados y con una conectividad hidráulica reducida. En Fuerteventura, por ejemplo, se han documentado formaciones geológicas complejas que dificultan los flujos subterráneos y reducen la eficiencia de los sistemas de captación (Herrera & Custodio, 2014). Situaciones similares se han identificado en otras islas volcánicas como Jeju, donde la intercalación de

capas impermeables dentro de materiales piroclásticos condiciona de forma crítica la dinámica del agua subterránea (Ahn et al., 2021).

La planificación y el seguimiento de estos sistemas se ven dificultados por su complejidad hidrogeológica, la escasa superficie de recarga disponible y la inexistencia de indicadores hidrológicos superficiales permanentes, como ríos o lagos. A diferencia de los sistemas continentales, donde los recursos hídricos superficiales complementan y regulan el sistema, en las islas el seguimiento depende exclusivamente de observaciones indirectas o perforaciones puntuales.

Robins (2013) señala que las zonas de recarga en este tipo de islas se concentran habitualmente en cotas elevadas, con fuerte pendiente, lo que limita su extensión y complica su protección frente a usos competitivos. En el caso de Jeju[9], la elevada permeabilidad del basalto favorece la infiltración rápida, pero dificulta el aprovechamiento sostenido del recurso, exacerbando los desafíos de gestión hídrica (Shin & Hwang, 2020).

En Canarias, estudios recientes subrayan las dificultades para modelar adecuadamente los acuíferos costeros debido a la heterogeneidad estructural y la escasa información piezométrica (Dumont et al., 2021).

Además, la mayoría de los acuíferos insulares son vulnerables a la sobreexplotación y a la intrusión marina. A diferencia de los continentes, donde existe un colchón hídrico más amplio y sistemas regionales confinados, en las islas el agua dulce suele flotar como una lente sobre la salada, siguiendo el principio de Ghyben-Herzberg[10].

Esto los hace especialmente sensibles a la disminución del nivel freático, como se ha documentado en islas como Hawái o Jeju, donde la extracción intensiva ha provocado aumentos significativos en la salinidad del agua subterránea (Vittecoq et al., 2019; Kim et al., 2011).

En el caso del archipiélago canario, la presencia limitada de agua dulce sobre acuíferos basales y la presión turística e industrial en zonas litorales incrementan el riesgo de salinización, especialmente bajo escenarios de variabilidad climática e intrusión marina (Shin & Hwang, 2020; Santamarta et al., 2025).

El impacto conjunto de la variabilidad climática, la topografía abrupta y la demanda creciente acentúa los riesgos sobre la cantidad y calidad del agua subterránea.

---

[9] La isla de Jeju (Jeju-do) es la isla más grande de Corea del Sur y una de sus provincias autónomas especiales. Es volcánica y está ubicada en el Mar del Sur (Mar de China Oriental), a unos 85 km al sur de la península coreana.

[10] El principio de Ghyben-Herzberg describe cómo se comporta una lente de agua dulce flotando sobre agua salada en acuíferos costeros, especialmente en islas volcánicas y zonas litorales. Es fundamental para entender la distribución vertical del agua subterránea en contextos donde existe intrusión marina.

En las Azores, Cruz et al. (2017) han identificado flujos significativos de nitrógeno hacia aguas costeras vinculados a cambios en la calidad del agua subterránea, lo que evidencia la conexión directa entre las presiones terrestres y la salud de los ecosistemas marinos. A su vez, Watson et al. (2024), García-Gil et al. (2023a, 2023b), Jiménez et al. (2024) y han demostrado cómo la actividad volcánica puede alterar la geoquímica de los acuíferos, afectando a las comunidades microbianas y, con ello, al equilibrio ecosistémico del recurso.

Desde mi punto de vista, todo ello apunta a la urgencia de integrar el conocimiento geológico, los impactos antrópicos y la evolución del clima en un enfoque de gestión que permita sostener los acuíferos insulares con rigor técnico y visión de largo plazo.

Entre los principales factores de vulnerabilidad destacan:

- Baja capacidad de regulación superficial: La práctica inexistencia de cursos de agua permanentes implica que toda la infiltración potencial debe ser almacenada y gestionada en el subsuelo. Esto limita los mecanismos naturales de recuperación rápida tras sequías.
- Alta dependencia de la recarga local: La mayoría de los acuíferos insulares dependen casi exclusivamente de la precipitación directa y, en menor medida, de la "lluvia horizontal". Al no existir aportes desde cuencas externas, cualquier alteración en los patrones de lluvia tiene efectos inmediatos en la recarga neta.
- Concentración de la demanda y sobreexplotación puntual: Las zonas urbanas, agrícolas o turísticas concentran una demanda hídrica muy superior a la recarga disponible localmente, generando conos de abatimiento y pérdida de calidad por intrusión marina o mezcla con aguas salobres.
- Intrusión salina en zonas costeras: La proximidad del mar y la elevada conductividad hidráulica de algunos materiales volcánicos facilitan la entrada de agua marina en el acuífero cuando se produce un desequilibrio en el balance entre extracción y recarga. Este fenómeno se agrava en pozos profundos mal construidos o mal gestionados y sobreexplotados.
- Contaminación difusa: El uso intensivo de fertilizantes nitrogenados en la agricultura, junto con los vertidos urbanos (en muchos casos sin depuración terciaria) y la infiltración de pesticidas, contaminantes emergentes o microplásticos, ha provocado un deterioro progresivo de la calidad del agua subterránea, con presencia frecuente de nitratos por encima de los límites establecidos para consumo humano. En el caso de los microplásticos nuestro grupo de investigación ya los ha detectado en las islas de El Hierro y La Palma, en cantidades pequeñas pero que obligan a un control de estos contaminantes.

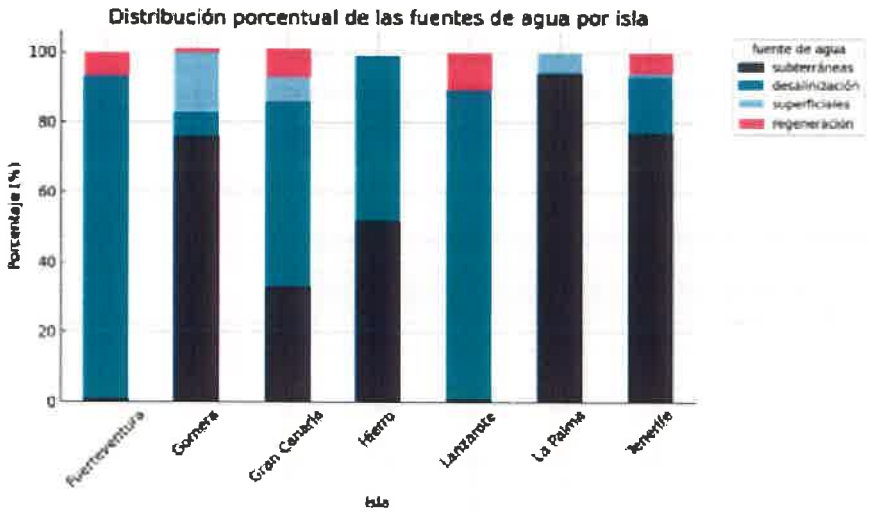
A estas presiones de origen antrópico se suma el impacto del cambio climático, que acentúa los procesos de aridificación a través de dos mecanismos principales: la reducción de la frecuencia e intensidad de los eventos de recarga significativa y el incremento de la evapotranspiración potencial asociado al aumento de temperaturas y la prolongación de los periodos secos (Santamarta et al., 2025). Ambos procesos disminuyen el volumen efectivo de infiltración hacia los acuíferos.

La combinación de estas condiciones hace que los acuíferos insulares funcionen en un régimen de alta fragilidad estructural e inercia lenta frente a las perturbaciones externas. Es fundamental avanzar en estrategias de seguimiento, modelización y gestión integrada que contemplen escenarios climáticos futuros, la reducción de presiones difusas y el fortalecimiento de las capacidades locales de gobernanza del agua.

4. Tipología de recursos hídricos en Canarias

El Archipiélago Canario, depende de una combinación diversa de fuentes hídricas para cubrir las demandas de abastecimiento, riego y uso turístico.

Estas fuentes pueden agruparse en tres grandes categorías: recursos subterráneos, aprovechamientos superficiales y recursos no convencionales, cada uno con limitaciones estructurales específicas.



Fuente: elaboración propia y datos de los PHI

Figura 2.18. Distribución porcentual de las fuentes de agua por isla

Los recursos subterráneos constituyen la principal fuente de agua, especialmente en las islas occidentales, donde se localizan los sistemas acuíferos más productivos.

Estos incluyen acuíferos colgados y basales, explotados históricamente mediante galerías, pozos profundos y sistemas de drenaje por gravedad (Santamarta et al. 2013; Cruz-Pérez et al., 2022).

Aun así, la sobreexplotación progresiva ha comprometido su sostenibilidad, especialmente en las islas orientales —Gran Canaria, Lanzarote y Fuerteventura—, donde el descenso pluviométrico y la escasa recarga han intensificado los procesos de salinización (Ruiz-García et al., 2019).

En cuanto a los recursos superficiales, su disponibilidad es escasa y extremadamente irregular. La abrupta topografía insular, combinada con un clima semiárido, impide el desarrollo de una red hidrológica permanente.

Barrancos, manantiales y embalses de pequeña escala aportan cantidades limitadas y discontinuas. Además, las tendencias observadas en las últimas décadas confirman una disminución de las precipitaciones y una alta variabilidad interanual, lo que agrava la incertidumbre asociada a estos recursos (Sánchez-Benítez et al., 2016).

La naturaleza fragmentada y permeable de los materiales volcánicos dificulta, además, el diseño de infraestructuras eficientes de captación y almacenamiento (Santamarta et al., 2022). Las presas se aterran con facilidad, reduciendo su capacidad de almacenamiento.

En este contexto, la agricultura continúa siendo el principal consumidor de agua, con valores superiores al 80 % del total en algunos sectores (Cruz-Pérez et al., 2023).

En el caso de la isla de Tenerife, estos recursos han sido analizados en el Modelo Matemático Distribuido para la simulación de la Hidrología Superficial de Tenerife (MHSup), desarrollado por Braojos (1993) y actualizado en 2019, en el marco del Plan Hidrológico Insular de Tenerife.

Tabla 2.3. Distribución porcentual de las fuentes de agua por isla en Canarias

Isla	subterráneas	desalinización	superficiales	regeneración
Fuerteventura	1%	92%	0%	7%
Gomera	76%	7%	17%	1%
Gran Canaria	33%	53%	7%	8%
Hierro	52%	47%	0%	0%
Lanzarote	1%	88%	0%	11%
La Palma	94%	0%	6%	0%
Tenerife	77%	16%	1%	6%

Fuente: elaboración propia a partir de los datos de los PHI

Frente a estas limitaciones, el archipiélago ha desarrollado una dependencia creciente de fuentes no convencionales, en particular la desalinización de agua de mar y la reutilización de aguas residuales, también denominada regeneración de aguas.

La desalinización de agua de mar constituye una alternativa estratégica, especialmente en núcleos turísticos y zonas áridas, pero presenta elevados costes energéticos y ambientales.

Su funcionamiento, ligado al uso intensivo de combustibles fósiles, genera emisiones significativas de gases de efecto invernadero y conlleva un gasto estructural superior a los 100 millones de euros anuales (Zerpa et al., 2021). Asimismo, la gestión de salmueras y otros residuos derivados del proceso sigue representando un reto pendiente para su sostenibilidad ambiental (Cruz-Pérez et al., 2022).

Por su parte, la reutilización de aguas regeneradas ofrece oportunidades claras para el cierre de ciclos y la eficiencia hídrica, aunque todavía enfrenta barreras sociales relacionadas con la percepción pública (Ávila et al., 2021).

En conjunto, el modelo hídrico canario se basa en una combinación asimétrica y vulnerable de fuentes, donde el agotamiento progresivo de los acuíferos, la escasa fiabilidad del agua superficial y los altos costes de los recursos no convencionales exigen una planificación rigurosa y multidimensional que garantice la sostenibilidad a medio y largo plazo.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.18. Presa en la isla de La Gomera

4.1. Aguas subterráneas

En el contexto del archipiélago canario, las aguas subterráneas constituyen históricamente la fuente principal de abastecimiento para los distintos usos del agua, tanto urbanos como agrícolas e industriales.

A pesar del creciente desarrollo de infraestructuras de desalinización de agua de mar y reutilización en algunas islas, se estima que alrededor del 50% del agua consumida en el conjunto del archipiélago sigue teniendo origen subterráneo, a partir de captaciones realizadas mediante galerías, pozos y sondeos (Custodio & Cabrera, 2013; Gobierno de Canarias, 2021). Quisiera aclarar que a partir de este punto vamos a dar bastantes cifras de fuentes oficiales, a veces corresponden a diferentes años y es posible que no sean todo lo exactas que se desearía, pero a efectos de órdenes de magnitud, creo que son importantes para obtener una foto del estado hídrico de las Islas.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.19. Galería en la isla de El Hierro

Este valor medio oculta fuertes diferencias entre islas. En Tenerife, La Palma o La Gomera, el porcentaje de agua de origen subterráneo supera con frecuen-

cia el 75%, en El Hierro supera el 50%, sustentado principalmente por un sistema de galerías que aprovechan la recarga directa en zonas de monte, pozos y sondeos.

Por el contrario, en islas como Gran Canaria, Lanzarote o Fuerteventura, la dependencia del acuífero se ha reducido en las últimas décadas gracias a la incorporación masiva de agua desalinizada y, en menor medida, de aguas regeneradas.

Estas diferencias reflejan tanto la diversidad geológica y climática de las islas como las estrategias insulares de gestión del recurso hídrico.

La elevada proporción de dependencia de aguas subterráneas convierte al archipiélago en un caso paradigmático dentro del ámbito europeo, y subraya la necesidad de proteger, conocer y gestionar de forma sostenible estos sistemas acuíferos, especialmente en un contexto de cambio climático y presión creciente sobre la demanda. Proyectos del programa Horizonte Europa como ARSINOE[11], NATALIE[12] o GENESIS[13], que actualmente coordino desde la Universidad de La Laguna (ULL) indiden en estos conceptos y están contribuyendo a la mejora del conocimiento de las aguas subterráneas de las Islas Canarias.

Galerías, pozos y sondeos

En el contexto hidrogeológico del archipiélago canario, caracterizado por un terreno volcánico fragmentado, la captación de aguas subterráneas ha requerido soluciones específicas adaptadas a la morfología, la litología y el régimen hídrico insular. Las tres principales tipologías utilizadas históricamente y en la actualidad son las galerías, los pozos tipo canario y los sondeos verticales profundos. Todo ello constituye un patrimonio hidráulico que hay que cuidar, incluso promocionar (Santamarta, 2017).

---

[11] ARSINOE crea un ecosistema de innovación sistémica que combina el Systems Innovation Approach (SIA) y la Climate Innovation Window (CIW) para diseñar soluciones adaptativas al cambio climático, aplicadas en nueve regiones piloto de Europa, incluyendo las Islas Canarias. https://arsinoe-project.eu/

[12] NATALIE impulsa soluciones basadas en la naturaleza para fortalecer la resiliencia al cambio climático en ocho regiones piloto europeas (incluyendo Canarias), combinando innovación técnica, normativa y participación local. https://www.natalieproject.eu/

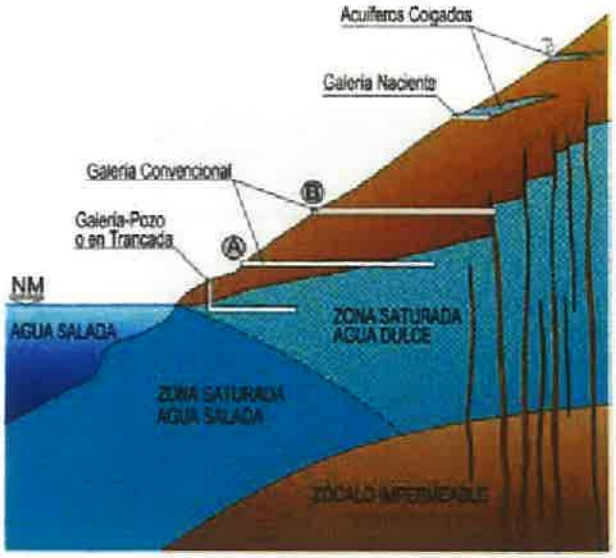
[13] GENESIS desarrolla e implementa soluciones basadas en la naturaleza (como galerías secas o diques subterráneos) para reforzar la resiliencia de infraestructuras hídricas críticas frente al cambio climático en regiones insulares, principalmente en Macaronesia. https://genesisnbs.eu/

Las galerías son obras subterráneas horizontales o subhorizontales perforadas en terrenos volcánicos, cuyo objetivo es interceptar niveles freáticos, acuíferos delimitados por diques, acuíferos colgados o zonas de recarga activa. Se trata de una técnica tradicional en Canarias —especialmente en las islas con mayor altitud y pluviometría como Tenerife o La Palma— que permite la extracción continua de agua sin necesidad de bombeo, gracias al aprovechamiento del gradiente hidráulico. La técnica de perforación que se usa mediante explosivos como la maquinaria utilizada difiere poco de la minería tradicional realizada en León o Asturias. Algunas superan los 5 km de longitud, con caudales que en su momento alcanzaron los 200 L/s (Santamarta, 2017). Hoy, muchas galerías están agotadas o presentan rendimientos muy reducidos, con calidades de agua no viables para algunos usos (Braojos, 2023). Esta técnica singular canaria que se reproduce en otras regiones como Hawái, Madeira o Sicilia (Santamarta, 2009).

En mi experiencia, su trazado responde más a la intuición del terreno que a estudios geológicos detallados, aunque terminan interceptando estructuras como diques o coladas fisuradas que actúan como guías hidráulicas naturales. Aunque su rendimiento puede ser elevado, la excavación de galerías conlleva riesgos de seguridad, ventilación y estabilidad— a lo largo de la historia, son numerosos los accidentes mortales acontecidos en Canarias en este tipo de minería—, especialmente en niveles profundos o en materiales piroclásticos poco consolidados.

Frente a esta captación horizontal, más común en islas húmedas y montañosas, las islas orientales desarrollaron otra estrategia adaptada a sus condiciones más áridas: los pozos. Los pozos tipo canario presentan una morfología intermedia entre los aljibes tradicionales y los sondeos modernos. Se excavan verticalmente mediante técnicas manuales o mixtas (manual-mecanizada). En Canarias, la profundidad de los pozos de captación varía según la tipología constructiva y las condiciones hidrogeológicas locales. Los pozos tradicionales tipo canario, excavados manualmente con diámetros de hasta 3 metros suelen alcanzar entre 10 y 50 metros, siendo excepcionales los que superan los 60 metros por razones estructurales y de seguridad (Gobierno de Canarias, 2012) lo que permite su acceso para limpieza y mantenimiento manual, así como el uso combinado de extracción por bomba o norias hidráulicas.

Estos pozos suelen construirse en niveles colgados o terrazas fluviales, y su diseño se adapta a la estructura del terreno, buscando acuíferos discontinuos o zonas de rezume. Aunque su capacidad es limitada en comparación con otras tipologías, su bajo coste y adaptabilidad los han hecho muy utilizados históricamente en islas como Lanzarote y Fuerteventura.



Fuente: Gobierno de Canarias

Figura 2.20. Diferentes sistemas de aprovechamiento de aguas subterráneas en Canarias

Con la mecanización de las perforaciones—y la especialización del personal técnico—, se han desarrollado pozos entubados y sondeos verticales de mayor profundidad, especialmente a partir de los años 60. Los pozos mecanizados perforados mediante rotopercusión[14] o circulación inversa operan habitualmente entre los 50 y los 150 metros, aunque algunos han alcanzado profundidades de hasta 300 metros para captar acuíferos confinados o basales (Gobierno de Canarias, 2012).

En el caso de los sondeos profundos, especialmente en zonas de medianías de Tenerife o Gran Canaria, se han documentado perforaciones que superan los 600 metros de profundidad, destinadas a interceptar reservas profundas o formaciones fracturadas de alta transmisividad hidráulica[15].

El aumento de profundidad también conlleva un mayor riesgo de intrusión marina[16] en acuíferos costeros, según el modelo de Ghyben-Herzberg, especial-

[14] Pozo perforado mediante técnica mecanizada de rotopercusión, que combina rotación y golpeo vertical para avanzar eficazmente en terrenos duros, especialmente en medios volcánicos.

[15] Capacidad de un acuífero para transmitir agua a través de toda su sección saturada, expresada como el producto de la conductividad hidráulica y el espesor saturado.

[16] Proceso por el cual el agua salada penetra en acuíferos costeros, desplazando o mezclándose con el agua dulce, generalmente debido a una sobreexplotación del acuífero o a una disminución de la recarga natural.

mente en islas de baja altitud como Fuerteventura o Lanzarote, donde la lámina de agua dulce es más delgada y vulnerable a sobreexplotación.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.21. Pozo canario en la isla de El Hierro

Los sondeos representan la técnica moderna de captación más extendida en el siglo XXI. Consisten en perforaciones verticales mecanizadas, de pequeño diámetro (normalmente entre 150 y 300 mm), con profundidades que pueden superar los 500 metros.

Están equipados con entubados, filtros y bombas sumergibles, lo que permite una extracción controlada y eficiente, incluso en acuíferos confinados o a gran profundidad—también son más seguros en su perforación y mantenimiento—.

En el contexto insular, los sondeos permiten alcanzar formaciones acuíferas que no son accesibles mediante galerías o pozos, aunque su rendimiento depende críticamente de una correcta caracterización geológica previa. Su impacto energético y económico es mayor, pero también lo es su capacidad de extracción. Requieren una gestión precisa para evitar fenómenos de sobreexplotación e intrusión marina.

Los pozos son más frecuentes en Gran Canaria y las islas orientales. Suelen captar acuíferos más profundos y, en algunos casos, mixtos (agua dulce-salobre).

Los sondeos profundos han permitido explorar zonas anteriormente inaccesibles, pero su eficacia depende de un conocimiento geológico preciso, que no siempre ha estado disponible.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.22. Piezómetro en la isla de La Palma

Sobreexplotación, calidad y evolución histórica

La evolución histórica del aprovechamiento de aguas subterráneas en Canarias ha estado marcada por una relación de creciente dependencia y transformación del territorio. Desde comienzos del siglo XX, y especialmente a partir del auge agrícola en las medianías, se consolidó un modelo de captación basado en pozos y galerías de agua, particularmente eficaz en el contexto geológico del archipiélago.

Esta infraestructura subterránea permitió el acceso a acuíferos alojados en coladas fisuradas, niveles de lapilli y estructuras confinadas por paleosuelos, adaptándose a la naturaleza volcánica y fragmentada del terreno (Herrera & Custodio, 2014). Entre las décadas de los años 50 y 70, se alcanzaron niveles máximos de explotación, coincidiendo con el crecimiento demográfico, la expansión de la agricultura intensiva y la irrupción del turismo como actividad económica central (Cruz-Pérez et al., 2022).

Con todo, el desarrollo intensivo de estos recursos ha conllevado consecuencias estructurales. En muchas zonas, la extracción sostenida ha superado con creces la capacidad de recarga natural, transformando los acuíferos en sistemas "minados", con descensos piezométricos acumulados superiores a los 600 metros en determinados sectores (Braojos, 2023). En islas como Gran Canaria o Tenerife, la situación se ha traducido en un agotamiento progresivo de reservas estratégicas, pérdida de surgencias naturales y un aumento del coste energético para acceder a aguas profundas.

A estos impactos físicos se suma un deterioro progresivo de la calidad del agua subterránea. La intrusión salina en acuíferos costeros, provocada por la inversión del gradiente hidráulico, se ha convertido en un problema crítico, particularmente en zonas de alta demanda o pobre gestión de la extracción.

Simultáneamente, el uso intensivo de fertilizantes en agricultura ha incrementado la presencia de nitratos en los cuerpos de agua, comprometiendo su potabilidad y su uso para riego (Marrero et al., 2015). Con los años, el agua ha ganado sales y perdido calidad. Las causas son conocidas —alteración geoquímica, bombeo excesivo— y revertir esa tendencia no será fácil (Cruz-Pérez et al., 2022).

El crecimiento urbano y la presión turística no solo han amplificado la demanda, sino que han modificado de forma estructural el patrón espacial del consumo. En Tenerife y Gran Canaria, las áreas de mayor concentración poblacional coinciden con zonas de estrés hídrico, lo que ha obligado a recurrir a fuentes alternativas como la desalinización, con sus propios impactos energéticos y ambientales (González-Delgado et al., 2021). Esta tensión entre demanda creciente y recurso finito también se observa en otros archipiélagos volcánicos como Reunión o Hawái, donde se han documentado patrones similares de sobreexplotación y conflictos por el uso del agua (Ascott et al., 2020; Zerpa et al., 2021).

En el caso particular de la isla de Tenerife, la evolución de su sistema hidrogeológico de en los últimos 150 años ilustra con claridad las consecuencias de una explotación intensiva y prolongada del recurso subterráneo sin mecanismos efectivos de regulación y planificación. Con una precipitación media anual en torno a los 806 hm^3, las estimaciones actuales indican que solo unos 271 hm^3 logran recargar efectivamente el acuífero (Braojos, 2023), lo que supone un rendimiento hídrico limitado debido a factores como la escorrentía superficial, la evapotranspiración y las pérdidas por descargas no controladas.

El desarrollo histórico de las galerías, que ha alcanzado una extensión total perforada de 1.614 km, ha provocado descensos acumulados del nivel piezométrico superiores a los 650 metros en algunas zonas clave, como el Valle de La Orotava o el flanco suroriental de la dorsal NE (Braojos, 2023). Estos descensos no solo han agotado surgencias naturales, sino que han generado intrusión mari-

na en zonas costeras y han llevado al abandono de numerosas captaciones. He trabajado en varias de estas galerías a lo largo de los años y lo que antes fluía con presión hoy apenas gotea. La diferencia no es solo de caudal: es de estrategia.

El sistema, originalmente concebido como fuente ilimitada de recursos, ha demostrado ser estructuralmente vulnerable cuando se explota por encima de su capacidad de recarga sostenible. No hay duda: el sistema no da más de sí cuando se le fuerza por encima de su capacidad.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.23. Frente de galería en la isla de La Palma

De acuerdo con las estimaciones recogidas en la segunda edición del libro Alumbramientos, agotamientos y fracasos en los 175 años de galerías de Tenerife (Braojos, 2023), el aporte subterráneo realista en un escenario de gestión conservadora se situaría en torno a los 100–110 hm^3/año, lo que contrasta con una demanda insular que ronda actualmente los 200 hm^3/año. Esta diferencia estructural no podrá resolverse con nuevas perforaciones, sino mediante la incorporación de fuentes alternativas —especialmente desalinización de agua de mar y reutilización— y una estrategia decidida de eficiencia hídrica. En mi opinión, el desarrollo intensivo de estos recursos ha producido daños estructurales que no se han corregido ni siquiera con la entrada masiva de agua desalinizada procedente del mar.

Desde mi punto de vista, la gestión futura del agua en el caso de la isla de Tenerife dependerá de la capacidad institucional para reducir la demanda mediante mejoras en el uso agrario, urbano e industrial, así como de la modernización y telecontrol de las redes, especialmente en el transporte en alta[17], donde las fugas siguen siendo significativas, sobre todo en pequeños municipios con gestión directa del agua. No es el caso de los grandes nucleos urbanos (Santa Cruz, Puerto de La Cruz, o La Laguna) donde la cuestión de las fugas de agua se tiene en cuenta de manera estricta al ser una gestión mediante concesión o mixta.

Si no se mejora de forma decidida la eficiencia en la gestión del agua, incluso las fuentes no convencionales acabarán siendo insuficientes para sostener el equilibrio hídrico en el horizonte próximo. No se trata de encontrar más agua, sino de gestionar mejor la que tenemos.

4.2. Aguas superficiales

En Canarias, el agua superficial no forma parte del paisaje cotidiano. Salvo en días de lluvia intensa, los cauces están secos y los barrancos parecen más caminos que ríos. Los sistemas de aguas superficiales en las islas volcánicas oceánicas, como el archipiélago canario, presentan rasgos específicos derivados de su origen geológico y configuración morfológica.

El relieve abrupto favorece una escorrentía rápida y concentrada, lo que da lugar a cauces efímeros con escasa capacidad de retención y una limitada presencia de ríos o lagos permanentes (García-Gil et al., 2022), salvo en el barranco de Las Angustias, en la isla de La Palma, donde hay un arroyo continuo, que es aprovechado en su totalidad para el riego agrícola.

En Canarias, la disposición radial de la red hidrográfica desde las cumbres hacia la costa promueve un drenaje eficiente. El agua corre desde la cumbre al mar con una rapidez que apenas deja margen para aprovecharla. En la mayoría de las islas, el agua superficial desaparece tan rápido como llega (Mutaqin et al., 2021; Triyono et al., 2024).

[17] Traslado de grandes volúmenes de agua desde galerías, pozos, desalinizadoras o embalses hasta los depósitos reguladores o núcleos de consumo, a través de conducciones de gran capacidad que salvan orografías complejas en un entorno insular fragmentado. Algunos canales están obsoletos por la falta de mantenimiento, con antigüedades de más de 100 años.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.24. Embalse en Gran Canaria

Las dificultades para captar y almacenar aguas superficiales en el archipiélago son múltiples. La pendiente del terreno impide la retención natural del agua, y la irregularidad climática complica aún más la disponibilidad interanual del recurso (Páez et al., 2020).

A estas limitaciones físicas se suma una creciente presión sobre el recurso hídrico, debida tanto al desarrollo urbano como al turismo. Frente a esta escasez, la población isleña ha desarrollado desde hace siglos soluciones adaptadas al medio: presas pequeñas, balsas de almacenamiento, y sistemas tradicionales como los nateros —estructuras de piedra que encauzan el agua hacia zonas de cultivo en pendiente— han permitido optimizar el aprovechamiento de las escorrentías (Ramalho et al., 2013).

En el caso de la isla de Tenerife, las aguas superficiales han sido estudiadas por el Modelo Matemático Distribuido para la simulación de la Hidrología Superficial de Tenerife (MHSup) propuesto por Braojos (1993) y revisado en 2019, siendo esta isla la más avanzada en el conocimiento de este recurso, que, aunque escaso, es necesario tener en cuenta por sus beneficios en la agricultura y por lo efectos que las avenidas pueden provocar aguas abajo (Santamarta, 2009).

Se han documentado descensos significativos en las precipitaciones medias, acompañados de un aumento de la evapotranspiración, lo que reduce la genera-

ción de escorrentía (Vittecoq et al., 2019). El cambio climático agrava esta situación. Esta tendencia tiene efectos directos sobre la agricultura de secano y la recarga indirecta de acuíferos.

En islas como Tenerife o La Palma, las diferencias microclimáticas condicionan de forma intensa la hidrología superficial, generando contrastes notables entre vertientes (García-Gil et al., 2022).

La comparación con otros archipiélagos volcánicos revela desafíos similares. En Hawái, por ejemplo, se aprovechan las estructuras de lava para crear acuíferos de almacenamiento interno, mientras que en las Azores predominan los embalses subterráneos formados por colapsos volcánicos (Pryet et al., 2012). En Reunión se han impulsado políticas de gestión integrada de cuencas que podrían servir de modelo para Canarias, especialmente en lo relativo a la retención de agua en terrenos inclinados (Attias et al., 2020).



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.25. Barranco de Las Angustias en la isla de La Palma

Escorrentía, barrancos y charcas

Los barrancos constituyen los cauces naturales por donde discurre la escorrentía cuando se producen lluvias intensas. Su capacidad de retención es mínima y el tiempo de respuesta hidrológica es muy corto.

En algunos casos, especialmente en zonas agrícolas, se han construido pequeños embalses, charcas o balsas para retener agua de escorrentía, aunque su rendimiento es limitado y depende de la intensidad de las lluvias.

La mayor parte de estas infraestructuras requieren mantenimiento continuo y están expuestas a sedimentación rápida (Santamarta, 2009).

Uso tradicional y escasa disponibilidad

Históricamente, la recogida de agua de lluvia en aljibes, cisternas y eras de recogida fue una práctica habitual, sobre todo en islas como Lanzarote, El Hierro o Fuerteventura, donde no existían fuentes subterráneas suficientes. Hoy, estos sistemas han perdido relevancia, pero representan una alternativa útil en contextos de emergencia o autoconsumo.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.26. Aljibe con superficie impermeabilizada para recogida de agua de lluvia

4.3. Aguas no convencionales

La escasez estructural de agua ha obligado a Canarias a liderar, desde hace décadas, el desarrollo de soluciones no convencionales. La combinación de desalinización y la regeneración de aguas (reutilización) permite complementar la oferta natural de recursos hídricos— aunque tenemos que valorar el coste e impacto de estos sistemas—.

Desalinización de agua de mar

La desalinización de agua de mar es una tecnología madura, ampliamente implantada en territorios insulares como Canarias, donde la disponibilidad de agua natural es limitada y las demandas urbanas o turísticas no pueden cubrirse con recursos convencionales.

Existen numerosas patentes canarias en este campo. El principio físico es sencillo: separar las sales disueltas del agua para hacerla apta para el consumo humano, riego o uso industrial. La complejidad está en hacerlo de forma eficiente, segura y con un coste razonable.

En el archipiélago, la técnica dominante es la ósmosis inversa. Se basa en aplicar presión sobre el agua marina para forzar su paso a través de una membrana semipermeable. Esta barrera permite el paso de moléculas de agua, pero retiene la mayor parte de las sales y otros solutos. El resultado es un caudal de agua desalada (permeado) y otro concentrado salino (rechazo), que debe ser adecuadamente gestionado para minimizar el impacto ambiental.

El rendimiento de estas plantas depende de múltiples factores: calidad del agua bruta—en Canarias los pozos de captación siempre están en la costa, con lo que se reduce el pretratamiento—, presión de operación, estado de las membranas, consumo energético y diseño del pretratamiento. En zonas costeras con elevada turbidez o contaminación biológica, se requiere un acondicionamiento previo que encarece el proceso. Por eso, no todas las ubicaciones son igualmente viables.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.27. Equipos de presión en una EDAM en Canarias

Desde el punto de vista energético, la desalación ha evolucionado de forma notable. Las plantas actuales pueden operar por debajo de 3 kWh por metro cúbico, especialmente cuando incorporan sistemas de recuperación de energía. Aun así, el coste eléctrico sigue representando más del 40 % del coste total del agua producida. Esto condiciona su viabilidad económica y obliga a vincular su desarrollo con fuentes renovables, especialmente en entornos insulares.

En términos de escala, existen tanto sistemas centralizados de gran capacidad como unidades móviles o modulares destinadas a abastecimientos pequeños o de emergencia. Canarias cuenta con ambos modelos. En islas como Lanzarote o Fuerteventura, más del 90 % del agua potable procede de desalinización de agua de mar. En otras, se utiliza de forma complementaria a recursos subterráneos o regenerados.

La primera planta desalinizadora de Europa destinada al uso urbano se instaló en Lanzarote en 1964, marcando un hito en la gestión de recursos hídricos en el archipiélago. Esta iniciativa pionera permitió atender las crecientes demandas de agua de una población en expansión y de un sector turístico en auge.

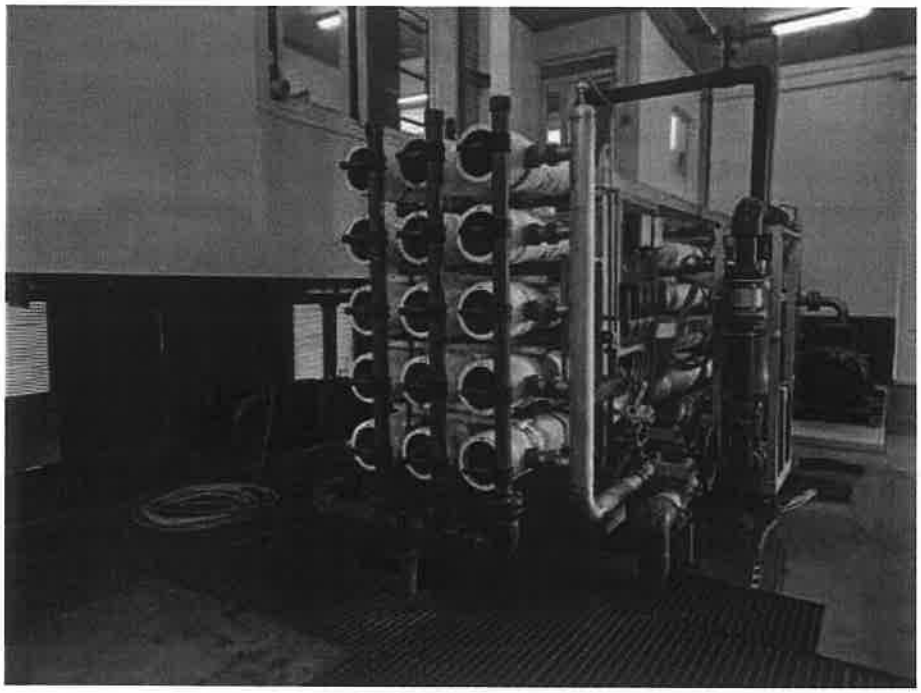
Actualmente, Canarias cuenta con más de 300 plantas desaladoras, con una capacidad de producción diaria que supera aproximadamente los 600.000 m^3. Estas instalaciones se distribuyen mayoritariamente en las islas orientales, como Lanzarote y Fuerteventura. En Gran Canaria, aproximadamente el 82% de la población se abastece de agua desalinizada.

La distribución del uso del agua desalinizada en el archipiélago es la siguiente: aproximadamente un 66% se destina al abastecimiento urbano, un 33% al riego agrícola y un 1% al consumo industrial. Este recurso se ha convertido en una fuente imprescindible para satisfacer las necesidades hídricas de más de dos millones de habitantes y de los catorce millones de turistas que visitan las islas anualmente.

Aun así, la desalinización de agua de mar, como se ha comentado, también presenta desafíos, como el elevado consumo energético y la gestión de salmueras. Estos aspectos subrayan la necesidad de continuar innovando en tecnologías más eficientes y sostenibles para garantizar la viabilidad a largo plazo de la desalinización como fuente principal de agua en Canarias.

Originalmente, los procesos térmicos consumían entre 30–40 kWh /m^3; con la adopción de ósmosis inversa, el consumo se redujo a 7–8 kWh /m^3 y actualmente ronda los 3–3,5 kWh /m^3. En Canarias, esa cifra es algo superior: en torno a 4,5–4,9 kWh /m^3, aunque algunas plantas modernas alcanzan los niveles óptimos de ~3 kWh /m^3. Anualmente, las islas consumen más de 770 GWh en desalación (≈180.000 toneladas de combustibles fósiles), generando entre 450.000 y 694.000 toneladas de CO_2 (León, Ramos-Martín, & Pérez-Báez, 2021).

Otro problema paradigmático es la salmuera residual. Cada metro cúbico desalinizada genera 1,5 m^3 de salmuera, con elevada concentración de sales, productos químicos e incluso metales pesados. En Canarias y otras regiones costeras de España, se han implementado estrategias para mitigar su impacto mediante difusores de alta dispersión, evitando alteraciones significativas en un radio de 100 m. La generación de salmuera como subproducto plantea riesgos ecológicos notables cuando se vierte al mar sin tratamiento adecuado, con potenciales efectos negativos sobre la biodiversidad marina y la alteración de hábitats costeros (Zerpa et al., 2021; Zhang et al., 2023). A ello se suma la elevada demanda energética de estas instalaciones, cuya dependencia de fuentes fósiles contribuye de manera significativa a la huella de carbono del archipiélago. Aproximadamente un 20 % del consumo energético del archipiélago es destinado a desalinizar agua de mar, frente a un 1 % a escala estatal (Elimelech & Phillip, 2011; Montesdeoca-Martínez & Velázquez, 2023). En Gran Canaria, por ejemplo, la producción de agua desalinizada consume alrededor del 10% de la energía eléctrica generada en la isla. Esta situación revela una vulnerabilidad estructural tanto en términos ambientales como de seguridad energética.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.28. Bastidor de osmosis inversa en una desalinizadora de agua de mar

Desde el punto de vista económico, la operación de las plantas supone un coste sostenido que grava tanto a las administraciones públicas como a los usuarios finales. Solo el gasto en energía supera los 100 millones de euros anuales, lo que genera tensiones en los presupuestos insulares y condiciona las políticas tarifarias del recurso (Zerpa et al., 2021; Montesdeoca-Martínez & Velázquez, 2023). Además, los costes de inversión inicial y mantenimiento de las infraestructuras desaladoras requieren estrategias de planificación e inversión rigurosas que permitan equilibrar seguridad hídrica y viabilidad financiera (Davenport et al., 2018).

La incorporación de tecnologías más eficientes ha comenzado a modificar este panorama. Sistemas de recuperación de energía y el uso combinado de fuentes renovables como la solar o la eólica han mostrado una mejora progresiva en la sostenibilidad operativa de estas instalaciones (Ahmadi et al., 2020; Heihsel et al., 2019). Esta tendencia, ya aplicada en contextos insulares como Australia o Israel, permite reducir tanto el coste energético como las emisiones asociadas, ofreciendo modelos replicables para Canarias (Fellows, 2024; Santamarta et al., 2022).

La gestión de la desalinización de agua de mar no puede desvincularse del marco normativo e institucional. Es imprescindible un enfoque de gobernanza que incorpore criterios ambientales, sociales y económicos, con mecanismos de regulación eficientes, esquemas tarifarios sostenibles y medidas estrictas de control ambiental (Padrón et al., 2022; Aende et al., 2020). En este contexto, el archipiélago canario representa un laboratorio idóneo para el análisis de modelos de gestión integrada en territorios insulares con elevada dependencia de tecnologías de producción no convencional.

Para concluir es necesario resaltar que la experiencia acumulada en desalinización ha impulsado el desarrollo de un sector económico especializado en tecnologías de tratamiento de agua. Numerosas empresas canarias operan no solo en el ámbito local, sino también en el peninsular e internacional. Este conocimiento se ha trasladado al ámbito académico, con formación específica en desalinización en las universidades canarias y centros de investigación, como las iniciativas llevadas a cabo por el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC).

Desalinización y controversia: entre la necesidad hídrica y las sospechas de mala gestión

En los últimos años, la desalinización de agua de mar, ha sido objeto de controversia pública, alimentada en parte por sospechas sobre posibles comisiones, intereses privados y falta de transparencia en los procesos de contratación y gestión.

Estas críticas han coincidido con el incremento del peso de las aguas desalinizadas en el suministro insular, especialmente en islas como Lanzarote, Fuerteven-

tura y Gran Canaria, donde constituyen entre el 75 % y el 100 % del agua disponible para abastecimiento y riego.

Sin embargo, es importante contextualizar estos debates. La desalinización no es una opción entre varias: es, en muchos territorios insulares, la única alternativa viable ante el agotamiento parcial de los acuíferos, el descenso de la recarga natural, y la imprevisibilidad creciente del régimen de lluvias vinculada al cambio climático.

Soy firme defensor del uso eficiente de las aguas subterráneas, pero hay que sumir que estas no son infinitas y debemos protegerlas, dado que son un recurso estratégico para el archipíelago, como los son en Hawai (EE.UU.).

Rechazar de forma generalizada la desalinización, sin plantear soluciones técnicas viables y sostenibles, pone en peligro tanto el abastecimiento de agua como la estabilidad económica de las islas.

Ahora bien, que la desalinización sea necesaria no exime de una exigencia rigurosa en su gestión. El sistema canario, donde conviven operadores públicos y empresas privadas, requiere un marco claro de gobernanza que garantice transparencia, concurrencia competitiva en las licitaciones, y una fiscalización efectiva de los costes reales de producción y distribución del agua. Las posibles desviaciones —comisiones, sobrecostes o adjudicaciones irregulares— deben investigarse en sede administrativa o judicial, sin debilitar el principio técnico que sustenta la necesidad de este recurso.

Asimismo, resulta clave diferenciar entre la crítica técnica legítima —como el elevado consumo energético, los impactos sobre el medio marino o los límites de las tecnologías de ósmosis inversa— y las campañas de descrédito basadas en sospechas generalizadas u otros argumentos ideológicos. El debate sobre la desalinización debe estar anclado en datos contrastables, balances energéticos, análisis de costes por metro cúbico y estudios de impacto ambiental, no en retóricas simplistas.

Así, más que atacar la desalinización de agua de mar, el verdadero reto es democratizar su gestión, mejorar su eficiencia energética, optimizar los modelos tarifarios, e integrar su desarrollo dentro de una estrategia más amplia de descarbonización, reutilización y reducción de pérdidas. El futuro del agua en Canarias no se resuelve con consignas, sino con planificación técnica, control institucional y participación ciudadana informada.

La desalinización de agua de mar se ha consolidado como una solución técnicamente madura, ambientalmente controlada y económicamente competitiva para afrontar la escasez hídrica en regiones costeras y archipiélagos como Canarias. Frente a discursos que la presentan como cara, contaminante o ineficiente, La Asociación Española de Desalación y Reutilización (AEDYR) discute esos supuestos. La asociación, indica en sus publicaciones que el coste real del agua

desalinizada oscila entre 0,5 y 1,0 €/m^3 para agua marina, y entre 0,3 y 0,5 €/m^3 para agua salobre, lo que la sitúa en rangos asumibles para el abastecimiento, la agricultura y la industria.

Además, el consumo energético se mantiene en torno a los 3 kWh/m^3. La calidad del agua producida es alta, al cumplir con las normativas europeas más exigentes, y los posibles impactos del vertido del concentrado salino se minimizan mediante sistemas de difusión, controles ambientales estrictos y una ubicación adecuada de los emisarios.

España cuenta con más de seis décadas de experiencia en la materia y lidera internacionalmente la ingeniería, operación y exportación de esta tecnología. Más del 20 % del agua desalinizada se emplea ya en agricultura, donde su uso se ha demostrado no solo viable, sino beneficioso en términos de productividad y estabilidad del recurso.

Lejos de ser un residuo, la salmuera es objeto de iniciativas de valorización energética e industrial, mientras que el proceso en sí mismo no emite CO_2 directamente.

En este contexto, la desalinización aparece como una herramienta estratégica frente a los efectos del cambio climático y la irregularidad de las precipitaciones, especialmente en territorios insulares, y ha sido reconocida como actividad alineada con la Taxonomía Verde Europea (AEDYR, 2024).

Por último, creo que es necesario aclarar que ni en los años noventa ni en la actualidad un técnico o funcionario, por muy cualificado que sea, podía modificar unilateralmente el rumbo de un Plan Hidrológico Insular. ¿Y esto por qué? desde la entrada en vigor de la Ley 12/1990, de Aguas de Canarias, los instrumentos de planificación deben ser aprobados por los Consejos Insulares de Aguas y, en última instancia, ratificados por el Gobierno de Canarias, tras un proceso colegiado que incluye informes técnicos, consultas públicas y, en su caso, debates en órganos deliberativos.

Aunque, en los años 90, aún no existía la actual Evaluación Ambiental Estratégica —obligatoria desde la transposición de la Directiva 2001/42/CE al ordenamiento español—, cualquier modificación sustancial en el origen de los recursos o en los escenarios de demanda requería una justificación técnica sólida, acompañada de informes económicos, diagnósticos ambientales y validación institucional.

La función de los técnicos ha sido y sigue siendo asesorar, coordinar, elaborar propuestas y emitir informes, pero la capacidad de decisión corresponde exclusivamente a órganos superiores de naturaleza colegiada, como las Juntas de Gobierno de los Consejos Insulares de Aguas o el propio Ejecutivo autonómico.

Pretender que una sola persona —sea funcionario, ingeniero o director técnico— pudiera alterar la orientación de un plan estratégico de tal calado es ignorar

tanto la arquitectura institucional como el sistema de garantías jurídicas que rige desde hace más de tres décadas.

Lo que sí es cierto es que, en los años 90, la desalinización del agua de mar aún no era una opción mayoritaria en los planes hidrológicos insulares, donde predominaban las aguas subterráneas como fuente principal. Cualquier intento de introducir o priorizar la desalinización frente a otros recursos requería múltiples informes y un análisis coste-beneficio respaldado por datos y previsiones de demanda.

Hoy, en pleno 2025, me resulta preocupante tener que aclarar lo obvio: las decisiones estructurales sobre el agua nunca han dependido de una sola persona. Los procedimientos existen, y aunque pueden perfeccionarse, garantizan el control, la trazabilidad y el principio de legalidad en la toma de decisiones públicas sobre un recurso esencial.

Reutilización de aguas depuradas

La reutilización de aguas residuales, también denominada regeneración de aguas, consiste en aprovechar los efluentes tratados para usos distintos del vertido, principalmente el riego agrícola, el uso urbano no potable o la recarga controlada de acuíferos. No es una técnica nueva, pero sí una pieza clave para mejorar la eficiencia del ciclo hidrológico en contextos con estrés hídrico estructural, como ocurre en Canarias.

El proceso exige varios niveles de tratamiento. Primero, se depuran las aguas residuales urbanas mediante sistemas convencionales —biológicos o físico-químicos— hasta alcanzar los requisitos básicos de vertido. Luego, para su reutilización segura, se aplican tratamientos terciarios que eliminan patógenos, nutrientes y contaminantes emergentes.

En Canarias, se emplean tecnologías como la filtración por membranas, desinfección ultravioleta o procesos avanzados de oxidación, en función del uso final y del grado de exigencia sanitaria. En Canarias, también existen pequeños sistemas naturales de depuración que tienen aguas producto relativamente viables para el uso en riego, destacan en la isla de Tenerife (Masca) o en Fuerteventura (Oasis Wildlife) ambos diseñados por el ingeniero tinerfeño José Peraza, con diferentes patentes.

La normativa que regula la calidad del agua regenerada es clara y exigente. El Real Decreto 1620/2007 en España, y el Reglamento (UE) 2020/741, establecen los parámetros microbiológicos, químicos y operativos que deben cumplirse en cada aplicación. En el caso del riego agrícola, por ejemplo, se exige una reducción significativa de Escherichia coli y sólidos en suspensión, además del control de contaminantes como pesticidas o metales traza.

En términos operativos, el sistema se basa en tres componentes inseparables: producción, almacenamiento y distribución. No basta con tratar el agua; hay que transportarla de forma segura hasta las zonas de consumo y evitar su mezcla con redes de agua potable. En muchas islas, los sistemas de riego por agua regenerada cuentan con redes específicas y balsas intermedias.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.29. Sistema de depuración y regeneración de aguas con energías renovables

Desde el punto de vista energético y económico, la regeneración es más eficiente que la desalinización de agua de mar. El coste por metro cúbico suele ser menor, sobre todo cuando el sistema está bien dimensionado y hay demanda estable. Además, reduce la presión sobre los acuíferos y limita la necesidad de captar nuevos recursos.

En Canarias, el volumen regenerado supera los 35 millones de metros cúbicos anuales, aunque su aprovechamiento aún dista del potencial disponible. Algunas estaciones depuradoras cuentan con tratamiento terciario, pero no tienen redes de distribución operativas, lo que implica que parte del agua regenerada sigue vertiéndose al mar. Resolver esta disfunción debe ser una prioridad desde mi punto de vista.

Actualmente, en torno al 32 % del caudal tratado se destina al riego (Cruz-Pérez et al., 2022). Este proceso, iniciado a finales del siglo XX, ha ido acompañado de una evolución técnica significativa que ha mejorado de forma notable la calidad del agua regenerada, permitiendo su uso en cultivos diversos (Cruz-Pérez et al., 2022).



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.30. Depuradora en la isla de Fuerteventura

Las tecnologías avanzadas, como los biorreactores de membrana o los humedales artificiales, se están incorporando progresivamente, logrando cumplir los requisitos exigidos por la normativa (Thebo et al., 2017;Reznik & Dinar, 2021). Aun asi, el seguimiento sistemático de contaminantes emergentes sigue siendo una tarea pendiente, lo que obliga a mantener sistemas de control rigurosos para garantizar la seguridad sanitaria y ambiental (Helmecke et al., 2020).

El uso agrícola del agua regenerada plantea también retos asociados a la salud pública y al medioambiente. La literatura científica ha documentado la posible presencia de patógenos y compuestos químicos que pueden transferirse a los cultivos y, por tanto, al consumidor (Arborea et al., 2017). A esto se suma el problema de la salinidad, especialmente relevante en islas como Fuerteventura o Lanzarote, donde la sensibilidad de ciertos cultivos requiere una gestión muy precisa para evitar efectos negativos en la estructura del suelo y en el rendimiento agríco-

la (Hdidou et al., 2021). Además, el manejo inadecuado del agua regenerada puede provocar acumulaciones de microcontaminantes orgánicos con consecuencias aún inciertas para la salud y los ecosistemas (Helmecke et al., 2020).

Desde el punto de vista económico, la reutilización de aguas residuales representa una alternativa viable frente a métodos de riego convencionales, especialmente en territorios con escasez estructural de agua como Canarias (Salem et al., 2020). Los costes de tratamiento y el consumo energético siguen siendo obstáculos importantes, sobre todo para pequeños productores agrícolas que no disponen de los recursos necesarios para adaptar sus sistemas (Rockey et al., 2019). Pese a ello, diversos análisis coste-beneficio señalan que, si bien las inversiones iniciales pueden ser elevadas, la reducción de la dependencia de fuentes convencionales y el aprovechamiento de nutrientes presentes en el agua residual pueden generar ahorros relevantes a medio plazo (Kalmakhanova et al., 2023).

A nivel institucional, la gestión de la reutilización en Canarias requiere una coordinación eficaz entre organismos competentes en aguas, saneamiento y agricultura. La planificación integrada, junto con incentivos claros para el uso de agua regenerada, es fundamental para superar las reticencias sociales y ampliar su implantación (Qureshi, 2020). Experiencias consolidadas en otras regiones insulares —como Baleares o Malta— ofrecen referencias valiosas. En esos casos, la combinación de marcos normativos robustos y estrategias activas de implicación ciudadana ha permitido consolidar el uso de agua regenerada en la agricultura (Helmecke et al., 2020). Canarias podría beneficiarse de estas experiencias para afianzar su propio modelo, adaptándolo a sus singularidades ambientales y administrativas.

Actualmente se está elaborando una estrategia en las Islas Canarias de reutilización del agua regenerada, que incluye tanto mejoras tecnológicas en los tratamientos como la optimización de las infraestructuras de distribución. En este marco, ya se han diseñado cuatro sistemas estratégicos insulares —dos en Gran Canaria, uno en Tenerife y uno en Lanzarote—, con la intención de llegar a doceen los próximos años. Estos sistemas servirán como modelo replicable para los consejos insulares, a fin de consolidar una red de reutilización más eficaz y con mayor calidad.

Esta planificación se alinea con el Reglamento (UE) 2020/741 sobre requisitos mínimos para la reutilización del agua, que entró en vigor en junio de 2023. Esta normativa europea establece criterios técnicos y de calidad para el uso seguro de aguas regeneradas, especialmente en el ámbito agrícola.

Más allá del incremento cuantitativo de agua regenerada, la estrategia pone el foco en cinco ejes fundamentales:

- Actualización de la planificación hidrológica insular.
- Digitalización integral del ciclo del agua.
- Incorporación de fuentes de energía renovable en las estaciones de tratamiento.
- Mitigación de pérdidas en las redes de distribución.
- Mejora de la aceptación social del uso de aguas regeneradas.

La reutilización de aguas depuradas en Canarias, lejos de ser una solución marginal, se consolida, así como una línea estratégica para la seguridad hídrica, la resiliencia frente al cambio climático y la sostenibilidad agrícola en las próximas décadas. Pero su consolidación exige abordar de forma simultánea los desafíos ambientales, sanitarios y económicos. Solo un enfoque integrado, que combine innovación tecnológica, control regulatorio y participación activa de los usuarios, permitirá aprovechar plenamente el potencial de esta fuente alternativa.

5. Estrategias hidráulicas tradicionales

La escasez estructural de agua dulce en las Islas Canarias obligó, desde época prehispánica, a desarrollar estrategias adaptativas de altísima eficiencia hídrica.

Estos sistemas tradicionales no solo respondían a las condiciones climáticas y geológicas de cada isla, sino que integraban el conocimiento local acumulado durante generaciones. Muchos de estos modelos, a pesar de su aparente simplicidad, resultan más sostenibles que varias soluciones modernas que dependen de insumos externos. Podemos afirmar que la gente aprendió a recoger, guardar y compartir el agua sin manuales ni diagnósticos, desde el terreno: ensayo, error y mucha observación.

5.1. Sistemas de captación y aprovechamiento en agrosistemas históricos

La combinación entre recogida de agua de lluvia, almacenamiento local y aplicación eficiente al cultivo dio lugar a múltiples formas de manejo del agua. Estas técnicas eran extremadamente locales. No era lo mismo cultivar en el Jable de Lanzarote que en las medianías de Teno o las laderas de La Palma. Pero todas compartían un objetivo común: minimizar la pérdida de agua y adaptarse al medio.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.31. Enarenados en La Geria, Lanzarote

El uso de aljibes, superficies de escorrentía y zanjas (eres) de infiltración no solo permitía retener el agua, sino también recargar los suelos y alimentar acuíferos someros.

En muchas ocasiones, estas prácticas se integraban en terrazas agrícolas sostenidas por muros de piedra seca (bancales), lo que limitaba la erosión y aumentaba la capacidad de retención. Los bancales han sido mucho más que una forma de ganar terreno: han frenado la erosión, guardado el agua y sostenido un paisaje que ahora se pierde.

5.2. Enarenados, nateros, gavias, bancales

Enarenados (Lanzarote, Fuerteventura): consisten en la aplicación de una capa de lapilli volcánico (picón) sobre el suelo agrícola. Este material actúa como acolchado térmico, retiene la humedad nocturna (especialmente de la "lluvia horizontal") y reduce la evaporación. En condiciones áridas, permite cultivar viñas, hortalizas o cereales con una eficiencia sorprendente. La Geria es el caso más conocido, pero existen variantes en Tinajo, Haría (Lanzarote) y zonas altas de Tuineje (Fuerteventura).



Fuente: Juan Cazorla

Figura 2.32. Nateros en el barranco Las Piletas en Lanzarote

En Lanzarote, la región de La Geria es el ejemplo más conocido de esta práctica. Aquí, los agricultores cavan hoyos cónicos en la capa de lapilli hasta alcanzar el suelo fértil, plantando las vides en su interior y protegiéndolas con pequeños muros de piedra seca. Este sistema no solo conserva la humedad del suelo, sino que también protege las plantas de los vientos alisios y de la erosión. La Geria ha sido reconocida como un paisaje agrícola único y ha recibido la distinción de Sistema Importante del Patrimonio Agrícola Mundial (SIPAM) por la FAO.

Nateros (Tenerife, La Palma): son superficies horizontales o ligeramente inclinadas, dispuestas para interceptar la escorrentía y dirigirla hacia zonas de cultivo. Aprovechan la topografía para laminar el flujo y favorecen la infiltración. Eran comunes en medianías del norte y han caído en desuso por abandono del campo y parcelación urbana. Por ejemplo, en barrancos del municipio de Los Llanos de Aridane, se hallan pequeños nateros donde antiguamente se cultivaban papas, frutales (higueras, almendros) o legumbres. En La Gomera hay una estructura similar que se denomina "lameros" que se construyen en lomos o bordes de barrancos, donde se aprovecha el agua que escurre por la ladera o que se filtra desde nacientes. Aprovechan zonas de lamido o rezume, de ahí su nombre. La diferencia entre ambos sistemas agrícolas es que los nateros se construyen directamente en el

fondo de barrancos para retener sedimentos y agua de escorrentía ocasional, los lameros se sitúan en zonas con humedad permanente o rezumante, incluso en laderas.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.33. Bancales en la isla de La Gomera

Gavias (Fuerteventura, Gran Canaria): la técnica agrícola de las gavias, desarrollada principalmente en la isla de Fuerteventura, constituye un ejemplo notable de adaptación a condiciones de extrema aridez mediante soluciones de bajo coste, elevada eficiencia y mínimo impacto ambiental. Este sistema tradicional, de origen norteafricano, se basa en la captación y aprovechamiento del agua de escorrentía superficial, a través de una red de pequeñas represas de tierra (trastones) que permiten el almacenamiento temporal del agua de lluvia y su infiltración progresiva en el suelo cultivable (Perdomo Molina, 2002).

Las parcelas o campos de cultivo se delimitan por muros de contención de tierra compactada de entre 0,5 y 1 metro de altura, diseñados para frenar el avance del agua en pendiente suave. En estos espacios se cultivan tradicionalmente cereales, legumbres y hortalizas, en una agricultura de secano altamente eficiente para el entorno insular. Además, es habitual la presencia de árboles frutales o especies resistentes, como higueras o tarajales, en los bordes del sistema, que refuerzan la estabilidad de los taludes y contribuyen a la biodiversidad local (Ciencia Canaria, 2017).

Históricamente, las gavias llegaron a ocupar más del 40 % de la superficie agrícola útil de Fuerteventura, especialmente en comarcas como Tuineje o Antigua. Su uso se intensificó durante los siglos XIX y XX como base de la autosuficiencia alimentaria en la isla, en ausencia de recursos hídricos subterráneos aprovechables (Verdeaurora, 2018).

A partir de la década de 1980, el abandono progresivo de estas estructuras, la expansión urbana y turística, y el reemplazo por sistemas de riego modernos contribuyeron a su degradación funcional y paisajística.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.34. Gavias en la isla de Fuerteventura

En Fuerteventura las podemos encontrar en los llanos de La Oliva, Tefía, Valle de Santa Inés. En el sur de Gran Canaria, aunque hay diferencias con las gavias tradicionales, en zonas como: Juan Grande, Santa Lucía de Tirajana o Agüimes, allí, las gavias se han utilizado históricamente para el cultivo de cereales (como millo o cebada), legumbres y forrajes, especialmente en áreas semiáridas con suelos arcillosos.

En la actualidad, la recuperación de las gavias se está impulsando desde varias iniciativas públicas y privadas, no solo como solución agrícola, sino también

como estrategia de conservación del suelo, lucha contra la desertificación y patrimonio agroecológico. El proyecto del Parque Agrario Las Gavias del Norte en Fuerteventura es un ejemplo reciente que busca revitalizar este sistema tradicional y ponerlo en valor en un marco de desarrollo sostenible (Diario de Fuerteventura, 2022).

Bancales (todas las islas): también conocidos como terrazas agrícolas— representan una de las soluciones más ingeniosas aplicadas históricamente en Canarias para hacer frente a la orografía abrupta y al déficit hídrico estructural. Estas estructuras no solo han permitido ampliar la superficie cultivable, sino que también cumplen funciones clave en la conservación del agua y del suelo, reduciendo la escorrentía superficial, favoreciendo la infiltración y disminuyendo los procesos erosivos.

Los bancales de Canarias constituyen un ejemplo de infraestructura verde tradicional, cuyo potencial debe ser revalorizado no solo desde la perspectiva patrimonial, sino también como herramienta de gestión hídrica y conservación del territorio.

En islas como La Gomera, los bancales alcanzan una relevancia paisajística, agrícola e identitaria sin parangón. Con aproximadamente 8.900 hectáreas de superficie abancalada en 1961, concentradas especialmente en municipios como Vallehermoso, Alajeró y Valle Gran Rey, estos sistemas fueron la base del abastecimiento alimentario local durante décadas (Romero Martín, 2020).

La construcción de bancales implicó una inversión significativa de trabajo manual, especialmente entre las décadas de 1950 y 1970, coincidiendo con el auge del minifundismo y los sistemas de medianería.

El abandono de estos sistemas, derivado de la terciarización económica, el envejecimiento demográfico y la emigración, está provocando una pérdida acelerada de este paisaje cultural de alto valor (Romero et al., 2019).

Más allá de su función agrícola, los bancales son considerados hoy elementos patrimoniales, soporte de identidad colectiva, y testimonio de un conocimiento campesino transmitido entre generaciones. Este legado está en riesgo: estudios recientes muestran cómo el desarraigo familiar, la globalización y el crecimiento del turismo residencial están debilitando la "apropiación social del paisaje", entendida como el vínculo emocional y cultural con estos espacios (Romero Martín, 2020).

Además del valor cultural y paisajístico, los bancales juegan un papel ambiental clave en la gestión del agua en zonas de pendiente. Actúan como barreras físicas que ralentizan el flujo de agua de lluvia, permitiendo su absorción por los suelos y reduciendo así el riesgo de erosión e inundaciones. En el contexto actual de cambio climático y aumento de la irregularidad pluviométrica, su recupera-

ción podría contribuir a mejorar la resiliencia[18] hidrológica de muchas cuencas insulares.

5.3. Patrimonio hidráulico y resiliencia agrícola

Estos sistemas, además de su función productiva, conforman un patrimonio hidráulico de enorme valor cultural. Son testimonio de una relación íntima entre el agua, el suelo y el conocimiento campesino. Cada acequia, cada cantonera, cuenta una historia. No son solo piedras y cemento: son la memoria de cómo el agua permitió cultivar barrancos, sostener pueblos y crear paisaje en las islas.

En muchos casos, han sido declarados bienes de interés cultural o incluidos en catálogos etnográficos. Su recuperación o adaptación puede ofrecer soluciones valiosas frente a los retos actuales de desertificación, pérdida de suelo fértil y abandono rural. Desde mi punto de vista este patrimonio no es una reliquia, sino una infraestructura viva que puede contribuir a la adaptación al cambio climático, está bien desarrollada. Hay una perspectiva moderna sin caer en la nostalgia.

La resiliencia de estos modelos no radica solo en su baja demanda de agua, sino en su capacidad de operar sin energía externa, sin redes complejas y con materiales locales. Y es que, en un contexto de cambio climático e incertidumbre hídrica, esta autonomía vuelve a adquirir relevancia.

5.4. Comparación con sistemas internacionales similares

Varias de estas estrategias tienen paralelismos con técnicas desarrolladas en otras regiones áridas o insulares:

- Los enarenados recuerdan a los acolchados volcánicos de Japón o a los cultivos en lava del Vesubio.
- Las gavias se parecen a las jessour tunecinas o a los tabias marroquíes.
- Los nateros tienen analogías funcionales con los waru-waru andinos o los zai del Sahel.

[18] Es la capacidad de un sistema, comunidad o individuo para resistir, adaptarse y recuperarse frente a perturbaciones, crisis o cambios adversos, manteniendo sus funciones esenciales y evolucionando cuando es necesario. En el caso del recursos hídrico, es la capacidad de un sistema de gestión del agua para garantizar el abastecimiento frente a sequías, contaminación o sobreexplotación.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.35. Estructuras de cultivos en el desierto del Negev en Israel, similares a las gavias de Fuerteventura

Los enarenados tradicionales de Lanzarote, con su capa de picón que retiene humedad y reduce la evaporación, recuerdan a los acolchados volcánicos usados en horticultura en zonas insulares de Japón, o incluso a los viñedos cultivados sobre antiguas coladas del Vesubio. En todos los casos, se aprovecha la naturaleza porosa y térmica de los materiales volcánicos para sostener cultivos en entornos hostiles.

Las gavias guardan notables similitudes con las jessour del sur de Túnez o las tabias marroquíes: todas ellas son expresiones locales de una misma lógica agrícola ancestral basada en aprovechar la escorrentía en entornos áridos.

Los nateros canarios presentan analogías funcionales con los waru-waru andinos o los zal del Sahel: todos son sistemas agrícolas tradicionales diseñados para captar, infiltrar y conservar el agua, y mejorar así la producción en condiciones de escasez o irregularidad hídrica.

Tabla 2.4. Tabla comparativa de sistemas agrícolas tradicionales de captación y conservación de agua

Sistema tradicional	Región / País	Clima / Entorno	Función principal	Técnica y materiales	Analogías funcionales
Nateros	Islas Canarias (La Palma, Tenerife, El Hierro)	Subhúmedo – volcánico	Captación de escorrentía difusa, infiltración y retención hídrica en bancales	Parcelas deprimidas en zonas de rezumes o escorrentía, muros de contención	*Zai* (Sahel), *waru-waru* (Andes)
Gavias	Islas Canarias (Lanzarote, Fuerteventura)	Árido – volcánico	Captación de escorrentía concentrada y retención de suelos fértiles	Campos llanos con taludes de contención y pequeñas presas de tierra	*Jessour* (Túnez), *tabias* (Marruecos)
Enarenados	Lanzarote (Canarias)	Árido – volcánico	Reducción de evaporación, retención de humedad, mejora térmica	Capa de picón (lapilli volcánico) sobre suelos cultivables	Acolchados volcánicos (Japón), cultivos en lava (Vesubio)
Jessour	Sur de Túnez (Matmata)	Árido – montañoso	Retención de agua y suelo mediante terrazas	Muros de piedra en cascada que frenan escorrentía en laderas	*Gavias* canarias
Tabias	Marruecos (Atlas suroriental)	Árido – semiárido	Microcuencas de recogida de agua y conservación de suelos	Parcelas con muros bajos, recogida lateral de escorrentía	*Gavias, zai*
Zai	Sahel (Burkina Faso, Níger, Mali)	Árido – sabana	Captación puntual de agua y nutrientes para árboles y cultivos	Hoyos individuales con compost para retener escorrentía y fertilidad	*Nateros* (captación y retención en microzonas)
Waru-waru	Andes (Perú, Bolivia)	Frío – altiplano	Protección contra heladas, almacenamiento de agua, regulación térmica	Camellones elevados con canales laterales	*Nateros* (función agrohidrológica integrada)
Acolchados volcánicos	Japón (Kyushu)	Húmedo subtropical – volcánico	Protección térmica y control de humedad en cultivos hortícolas	Grava o ceniza volcánica como cobertura de suelo	*Enarenados* canarios
Cultivos en lava	Italia (Vesubio)	Mediterráneo – volcánico	Agricultura sobre coladas con retención natural de humedad	Viñedos y frutales plantados en grietas o suelos sobre lava	*Enarenados* (uso de substrato volcánico para retención hídrica)

Fuente: elaboración propia

Estos paralelismos no son casuales. Surgen de contextos donde el agua es limitada, el suelo frágil y el conocimiento local indispensable. Canarias comparte esa lógica de escasez creativa que ha permitido, históricamente, producir alimento en condiciones extremas.

6. Agricultura y disponibilidad del agua en Canarias

Sin agua no hay agricultura, y en Canarias el agua ha sido siempre más voluntad que certeza. Regar ha exigido ingenio, riesgo y, cada vez más, energía. La agricultura en las Islas Canarias ha atravesado una evolución compleja, condicionada por la escasez de recursos naturales, la fragmentación territorial y la transformación progresiva de sus estructuras sociales y productivas.

Las prácticas de los antiguos pobladores de las islas, centradas en el cultivo de cebada, millo y la ganadería extensiva, respondían a una lógica de subsistencia adaptada a las condiciones agroclimáticas locales.

La conquista castellana en el siglo XV introdujo una nueva racionalidad económica que transformó el paisaje agrario: cultivos de exportación como la caña de azúcar marcaron el inicio de una agricultura mercantil, orientada al comercio atlántico (Castilla-Beltrán et al., 2021).

A lo largo del siglo XX, el proceso de modernización —especialmente en el ámbito del riego, la mecanización y la gestión de cultivos— consolidó la transición hacia un modelo intensivo en insumos y centrado en producciones como el plátano, el tomate y, en menor medida, la viña (Santamarta et al., 2023).



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.36. Cultivo de millo en el norte Tenerife

La caracterización estructural del sector revela fuertes contrastes entre islas, regímenes de propiedad fragmentados y una dependencia casi absoluta del riego. Cerca del 50 % del agua disponible en el archipiélago se destina a la agricultura, lo que obliga a sistemas de alta eficiencia en un entorno marcado por la irregularidad pluviométrica y la limitada capacidad de embalse natural (Cruz-Pérez et al., 2023).

En este contexto, el desarrollo del riego localizado ha permitido una gestión más racional del recurso, especialmente en cultivos exigentes como el plátano (Santamarta et al., 2023). Las diferencias interinsulares son notables: mientras en las islas orientales predominan cultivos enarenados y técnicas de ahorro extremo, en las occidentales las explotaciones suelen estar más integradas en redes de riego colectivo, muchas veces gestionadas por comunidades de regantes (Mesa et al., 2023). En el sur de Tenerife, donde apenas llueve 150 mm al año, hay fincas de plátanos que se riegan exclusivamente con agua desalinizada transportada desde bastantes kilómetros. En contraste, en el norte, algunas fincas, aún se riega por gravedad, como hace 50 años.

Desde el punto de vista socioeconómico, el sector agrario conserva un peso estratégico. Aporta empleo directo e indirecto, mantiene el tejido rural y contribuye de forma sustancial a las exportaciones regionales, especialmente hacia la Península y la Unión Europea. Productos como el plátano canario, el tomate de exportación y los vinos con denominación de origen no solo generan ingresos, sino que configuran parte de la identidad cultural de las islas (Schmitz et al., 2017; Mesa et al., 2023). En muchas comarcas, la actividad agrícola es el eje que vertebra la cohesión social y la ocupación del territorio.

Con todo, el sector se enfrenta a un conjunto de retos estructurales que comprometen su sostenibilidad. La escasez de agua, intensificada por el cambio climático, limita la planificación agraria a medio plazo. Las proyecciones regionales anticipan un incremento de las temperaturas medias, una reducción en las precipitaciones y un aumento de la frecuencia e intensidad de los periodos secos (Beguería et al., 2025; Santamarta et al., 2025). A esto se suman otros factores críticos: la fragmentación parcelaria, el agotamiento de suelos, el envejecimiento de la población agraria y la creciente competencia por el uso del suelo con el turismo y la urbanización costera (Schmitz et al., 2017; Weiser et al., 2021).

El marco institucional juega un papel determinante. La Política Agraria Común (PAC) y el programa POSEI permiten amortiguar parcialmente los sobrecostes estructurales derivados de la insularidad y la lejanía, e impulsan medidas orientadas al fomento de prácticas sostenibles y a la modernización de las explotaciones.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.37. Cultivo de piña en la isla de El Hierro

La eficacia de estas herramientas depende de su articulación con la planificación regional y local, y de su capacidad para adaptarse a escenarios de presión creciente sobre los recursos naturales (Cruz-Pérez et al., 2023; Santamarta et al., 2022).

El futuro de la agricultura en Canarias está necesariamente vinculado a una transición agroecológica. Estrategias como la diversificación de cultivos, el impulso de la agricultura ecológica, la reutilización de aguas residuales, el uso de tecnologías digitales y la integración de principios de economía circular constituyen líneas de acción prioritarias. La resiliencia frente al cambio climático y la reducción de la huella hídrica y energética deben formar parte de una nueva cultura agraria adaptada al contexto insular (Weiser et al., 2021; Mesa et al., 2023).

Frente a un entorno cambiante y altamente vulnerable, la agricultura canaria solo podrá sostenerse mediante modelos innovadores que combinen eficiencia, sostenibilidad y arraigo territorial. Más que repensar el modelo agrícola, deberíamos empezar por preguntarnos qué tipo de agricultura es compatible con el agua que realmente tenemos.

La agricultura en las Islas Canarias mantiene una vinculación estructural con la disponibilidad de recursos hídricos. Su evolución histórica no puede enten-

derse sin considerar las limitaciones impuestas por la geología volcánica, el régimen pluviométrico irregular y la fragmentación territorial. Como hemos visto en el anterior apartado, los sistemas agrícolas tradicionales se forjaron en este contexto, integrando prácticas de manejo del agua que permitieron sostener la producción en condiciones de alta variabilidad climática. El uso de acequias, surcos y cantoneras refleja una adaptación precisa a la escasez, orientada a maximizar la captación y distribución de caudales superficiales y subálveos (Cruz-Pérez et al., 2022).

Los principales cultivos actuales —plátano, tomate, vid, aguacate y hortalizas— presentan demandas hídricas diferenciadas. El plátano, en particular, impone requerimientos elevados que tensan la disponibilidad de agua en las islas occidentales, especialmente durante los periodos de sequía prolongada (Santamarta et al., 2023). Esta presión sobre el recurso ha motivado una revisión de las estrategias de riego, con el objetivo de asegurar la sostenibilidad productiva frente a un escenario climático cada vez más adverso (Shoman & Bughdady, 2018). Esto nos sitúa ante una pregunta incómoda: ¿cómo sostener cultivos intensivos con agua que no existe? —o que tendremos que producir de manera industrial —.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.38. Plataneras en bancales en la isla de La Palma

La escasez hídrica, agravada por el cambio climático, constituye una amenaza directa para la viabilidad agrícola en el archipiélago. La irregularidad de las lluvias y el aumento de la aridez han incrementado la exposición de las zonas rurales, donde gran parte de la renta depende de la producción agrícola (Duvat et al., 2017). Frente a ello, la reutilización de aguas depuradas y la desalinización de agua de mar se han convertido en estrategias complementarias para reforzar la oferta. Su integración exige controles de calidad rigurosos y una planificación que considere los costes energéticos y los impactos ambientales asociados (Santamarta et al., 2022).

Desde el punto de vista institucional, el papel de las comunidades de regantes sigue siendo clave para garantizar el reparto equitativo del recurso en el medio rural. Las decisiones en materia de tarificación, subsidios al agua agrícola y regulación del acceso son determinantes para la sostenibilidad del sistema productivo. La gobernanza hídrica, en este sentido, debe articularse desde una lógica territorial que reconozca la especificidad de las islas, la heterogeneidad de los sistemas de riego y la coexistencia de múltiples usos en competencia (García-Rodríguez, 2016).

A medio plazo, las proyecciones climáticas indican una intensificación del estrés hídrico en el archipiélago. La modernización de las infraestructuras de riego, la diversificación de fuentes no convencionales y la mejora en la gestión de la demanda aparecen como ejes fundamentales para mantener la viabilidad agrícola sin comprometer los objetivos de sostenibilidad. El riego localizado ha demostrado su eficacia, pero sigue infrautilizado en muchas zonas con mayor estrés hídrico. En este contexto, la innovación no puede prescindir del conocimiento local, ni de una lectura crítica del modelo agrícola vigente (Duvat et al., 2017; Dechmi et al., 2004).

7. Infraestructura y gestión del agua

La gestión del agua en Canarias no puede entenderse sin considerar la fragmentación territorial, la presión urbana y turística, la dependencia de fuentes subterráneas y la fuerte asimetría entre oferta y demanda. No me quiero olvidar de la cultura y patrimonio hidráulico en las islas. La infraestructura hidráulica se ha construido históricamente desde lo local, con una lógica insular, y solo más recientemente ha incorporado criterios de planificación integral. Cada isla ha construido su propio puzle hidráulico, a veces con piezas que no encajan. El resultado es un sistema eficaz, pero frágil, y muy dependiente de la energía.

7.1. Red hidráulica, almacenamiento y distribución

La red de infraestructuras hidráulicas de Canarias constituye un sistema complejo, altamente fragmentado y en buena parte resultado de iniciativas privadas históricas.

En su conjunto, esta red está compuesta por más de 1.300 galerías, cerca de 3.000 pozos y sondeos, así como centenares de estaciones desalinizadoras de agua de mar, estaciones desalobradoras de aguas subterráneas, depuradoras, balsas de regulación, conducciones, estaciones de bombeo y depósitos de almacenamiento.

A diferencia de otros territorios donde la planificación hídrica ha sido centralizada, en Canarias el desarrollo de esta infraestructura responde a una acumulación progresiva de soluciones parciales, muchas de ellas impulsadas por comunidades de aguas, cooperativas agrícolas o promotores individuales desde finales del siglo XIX.

En el caso de Gran Canaria, los datos históricos del Plan Hidrológico Insular y del estudio SPA/69/515 (FAO, 1975) identificaban ya a mediados del siglo XX más de 1.800 pozos ejecutados, cifra que ha sido confirmada por inventarios posteriores. Una revisión más reciente del Plan Hidrológico de Gran Canaria estima que existen 2.692 captaciones de aguas subterráneas, de las cuales 2.387 estarían actualmente en uso (Canarias7, 2019). Solo en municipios como La Aldea, Telde o Agüimes se concentran centenares de pozos operativos (González Gonzálvez, 2023).

En Tenerife, las cifras oficiales sitúan el número de pozos y sondeos registrados en torno a las 900 unidades, además de más de 1.050 galerías activas distribuidas principalmente en las vertientes norte y sur de la isla (CIATF, 2022; Braojos, 2023). El resto de las islas —incluyendo La Palma, El Hierro, La Gomera o Lanzarote— suman varias centenas más, completando un escenario de alta densidad de infraestructuras subterráneas, muchas de las cuales presentan problemas de envejecimiento, escasa digitalización o baja eficiencia energética.

Este modelo, basado históricamente en la iniciativa privada y en la explotación intensiva de los acuíferos, ha permitido garantizar el abastecimiento humano y agrícola en un territorio insular y fragmentado, pero plantea hoy graves desafíos de eficiencia, sostenibilidad y gobernanza. En el contexto actual de cambio climático, agotamiento de reservas subterráneas y transición hacia modelos circulares del agua, se hace imprescindible una planificación más coordinada, con herramientas de control público, inventarios actualizados y sistemas inteligentes de gestión. No basta con tener redes y depósitos: lo importante es cómo se diseñan, quién los mantiene y si responden al modelo de gestión que queremos como sociedad.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.39. Distribución de agua en el sur de la isla de Tenerife

En islas como Tenerife o La Palma, el agua subterránea captada por gravedad mediante galerías ha permitido el abastecimiento a núcleos urbanos y agrícolas, en algunos casos, sin necesidad de bombeo, lo que reduce el coste energético. Pero hay otros casos, como en la isla de Tenerife, que la mayoría de las galerías productivas han quedado por debajo de la cota de los canales principales de distribución (400-600 metros sobre el nivel del mar), por lo que hay que bombear hacia estas cotas, con el consecuente coste energético. Las que quedan por encima, son las galerías de la zon de Las Cañadas, que si bien no hace falta bombear la calidad del agua que extraen exige una serie de tratamientos con el consecuente consumo energético. La falta de regulación intermedia y de conectividad entre cuencas o comarcas impide una redistribución eficiente en situaciones de escasez o sobrecarga.

La red insular se completa con depósitos intermedios, muchas veces obsoletos o sobredimensionados, balsas agrícolas de gestión colectiva o individual, estaciones de tratamiento y conducciones a presión.

En zonas turísticas, como el sur de Gran Canaria o Lanzarote, la red incluye también plantas desalinizadoras y ramales de agua regenerada. Una buena gestión del agua no se mide por los kilómetros de tubería instalados, sino por su capacidad de garantizar agua segura, suficiente y equitativa. Y eso, en Canarias, aún no está resuelto.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.40. Canal excavado en roca en la isla de Tenerife

7.2. Planificación hidrológica y demarcaciones

Canarias constituye una de las pocas regiones europeas cuyo territorio completo se encuentra dentro de una demarcación hidrográfica insular. Cada isla es una unidad de gestión, lo que permite una planificación descentralizada, pero también conlleva retos específicos. Gestionar el agua en Canarias no es cuestión de más normas: es cuestión de que las que hay funcionen con la realidad fragmentada y desigual de las islas.

La planificación hidrológica en Canarias se enmarca en la aplicación de la Directiva 2000/60/CE, conocida como Directiva Marco del Agua (DMA), que establece un marco comunitario para la protección y gestión sostenible de las aguas en la Unión Europea. Esta directiva introduce ciclos de planificación de seis años, con el objetivo de alcanzar el buen estado ecológico y químico de las masas de agua.

En Canarias, la gestión del agua se organiza en siete Demarcaciones Hidrográficas, coincidentes con las islas principales: Lanzarote (incluyendo La Graciosa), Fuerteventura, Gran Canaria, Tenerife, La Gomera, La Palma y El Hierro. Esta

singularidad está reconocida en el ordenamiento jurídico nacional a través del Texto Refundido de la Ley de Aguas (TRLA) y por los propios Planes Hidrológicos Insulares (PHI), que actúan como instrumentos clave de planificación. Cada una cuenta con un Consejo Insular de Aguas, adscrito al respectivo Cabildo Insular, que ejerce las funciones de organismo de cuenca, conforme a la Ley 12/1990, de 26 de julio, de Aguas de Canarias. Esta estructura descentralizada implica la elaboración de planes hidrológicos específicos para cada demarcación, así como la coordinación con el Gobierno de Canarias y la Consejería competente en materia de aguas. En Canarias, cada isla planifica su agua por separado. Lo que suena a autonomía, a veces es aislamiento. Y en cuestiones hídricas, planificar sin mirar al vecino no siempre da buenos resultados.

Cada PHI incluye un diagnóstico de la disponibilidad de recursos, un análisis de presiones, objetivos ambientales, programas de medidas y mecanismos de participación. Aun asi, en la práctica, su implementación depende en gran medida de los Consejos Insulares de Aguas, que tienen competencias plenas en materia de autorización, concesiones y control del dominio público hidráulico. Tener siete PHI implica siete modelos, siete prioridades y, a menudo, siete velocidades. A la larga, eso compromete una visión estratégica del agua en el archipiélago.

El primer ciclo de planificación hidrológica en Canarias experimentó retrasos significativos, con la aprobación de los planes en 2015, lo que conllevó un procedimiento de infracción por parte de la Comisión Europea. El segundo ciclo (2015-2021) fue aprobado entre 2018 y principios de 2019, incorporando las recomendaciones de la Comisión y adaptándose a las particularidades insulares, como la escasez de masas de agua superficiales continentales y la predominancia de aguas subterráneas y costeras.

Actualmente, se encuentra en ejecución el tercer ciclo de planificación (2021-2027), con la aprobación de los planes hidrológicos correspondientes. Por ejemplo, el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de Gran Canaria fue aprobado por el Decreto 370/2023, de 18 de septiembre. Estos planes incluyen programas de medidas orientados a mejorar el estado de las masas de agua, considerando aspectos como la gestión de recursos hídricos, la protección de ecosistemas acuáticos y la adaptación al cambio climático.

La planificación hidrológica en Canarias también se articula con otras directivas europeas, como la Directiva 2007/60/CE, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, y la Directiva 2008/56/CE, por la que se establece un marco de acción comunitaria para la política del medio marino. Estas normativas complementan la DMA y exigen la elaboración de planes específicos, como los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación y los Programas de Medidas Marinas,

que deben coordinarse con los planes hidrológicos para garantizar una gestión integrada del agua.

A pesar de los avances en la planificación hidrológica, Canarias enfrenta desafíos significativos, como la necesidad de mejorar la eficiencia en el uso del agua, fortalecer las redes de control y seguimiento del estado de las masas de agua, y fomentar la participación pública en la toma de decisiones. Además, es crucial abordar los efectos del cambio climático, que pueden intensificar fenómenos extremos como sequías e inundaciones, y afectar la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos. Desde mi punto de vista, sin visión de conjunto, corremos el riesgo de tener siete estrategias inconexas frente a un solo problema: la sostenibilidad del agua en Canarias.

7.3. Las Comunidades de Agua en Canarias

Las comunidades de aguas son una figura singular del derecho canario, con profundas raíces históricas que se remontan al siglo XV, en el contexto de la colonización y el reparto de tierras y recursos promovido por los Reyes Católicos. Inicialmente constituidas como heredamientos para garantizar el abastecimiento a los ingenios azucareros, estas entidades evolucionaron con el tiempo hasta convertirse en organizaciones privadas de captación, distribución y gestión de aguas subterráneas, fundamentalmente a través de galerías y pozos. Esta figura jurídica nació como respuesta adaptativa a la escasez estructural de agua dulce, al carácter eminentemente insular del territorio y a una realidad hidrogeológica dominada por acuíferos volcánicos y escasa escorrentía superficial (Neto et al., 2017; Godden et al., 2011).

A diferencia de las comunidades de regantes, que se basan en concesiones sobre aguas públicas, las comunidades de aguas en Canarias gestionan recursos hídricos de titularidad privada, un hecho excepcional en el contexto español. Esta característica responde al régimen especial de propiedad sobre el agua derivado de las concesiones reales y el dominio alodial de los bienes otorgados durante la conquista, como ya apuntaron Guimerá Peraza (1952) y más recientemente Cobo Ortegano (2016). Esta estructura horizontal y cooperativa permite ajustar el reparto según la demanda, la disponibilidad estacional y las características del sistema de captación, casi siempre basado en galerías o pozos. En términos institucionales, constituye un modelo de gobernanza adaptativa: descentralizado, resiliente y profundamente arraigado en el contexto territorial (Akamani, 2023; Araral & Wang, 2013).

Desde el punto de vista jurídico, estas comunidades fueron dotadas de personalidad jurídica con la Ley de Heredamientos de Aguas del Archipiélago Canario de 1956. Sin embargo, su naturaleza jurídica sigue siendo objeto de debate, situándose en una zona intermedia entre la comunidad de bienes, la sociedad civil

y figuras asociativas "sui generis". Esta ambigüedad ha generado históricamente cierta inseguridad jurídica, especialmente en el ámbito tributario, como demuestra el análisis fiscal contenido en la Ley 19/1994 de modificación del Régimen Económico y Fiscal de Canarias y su Disposición Adicional Tercera, que las reconoce como entidades sujetas y exentas del Impuesto de Sociedades, siempre que el agua sea destinada al riego de explotaciones agrícolas.

En la práctica, estas comunidades constituyen la base organizativa del sistema tradicional de aprovechamiento de aguas subterráneas en las islas. Muchas de ellas han sido responsables de la perforación de galerías, instalación de redes de distribución y regulación del uso del agua entre sus miembros. La gestión se realiza a través de juntas rectoras y acuerdos internos, manteniendo una autonomía funcional notable. Su actividad ha sido clave en el desarrollo agrícola de zonas como el norte de Tenerife o el interior de Gran Canaria, y aún hoy siguen siendo actores fundamentales en el sistema hidráulico insular.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 2.41. Sociedad de aguas río Badajoz en Güimar

La coexistencia de estas comunidades con los Consejos Insulares de Aguas, creados tras la Ley de Aguas de 1990, ha generado una configuración mixta que articula competencias públicas y privadas en la gestión del ciclo del agua. Los Consejos —órganos técnico-administrativos— ejercen funciones de planificación, control y autorización, mientras que las Comunidades mantienen la titularidad

de buena parte de las infraestructuras de captación, especialmente en las islas con mayor dependencia de aguas subterráneas. Esta dualidad ha sido funcional, pero no exenta de tensiones: los problemas de sobreexplotación, la opacidad en la información sobre caudales y el retraso en la digitalización de registros son déficits estructurales que limitan su integración plena en los esquemas modernos de gestión (Hill, 2013; Timmerman et al., 2017; Özerol et al., 2018).

En el actual escenario de cambio climático, presión turística y transición hídrica, el papel de las Comunidades de Agua se encuentra en un punto de inflexión. Su capacidad de adaptación dependerá de su apertura a nuevas formas de gobernanza híbrida, en las que se incorporen tecnologías emergentes (como la telegestión), mecanismos de transparencia, y una planificación coordinada con otras fuentes de suministro, como la desalinización de agua de mar. No puede olvidarse que, en muchos casos, estas entidades han demostrado una notable eficiencia operativa en contextos de extrema escasez, pero también que su viabilidad futura exige una revisión profunda de sus estructuras y su encaje dentro de la planificación hidrológica insular (Watts et al., 2015; Yasin et al., 2020; Oberlack, 2016).

En un contexto de creciente complejidad en la gestión de los recursos hídricos, el papel de estas entidades debe ser revalorizado. No sólo representan una forma de gobernanza colectiva del agua en territorios fragmentados y con recursos limitados, sino que su experiencia acumulada, su conocimiento del medio y su estructura operativa pueden ser claves para avanzar hacia modelos más sostenibles de uso del agua en Canarias.

8. Diagnóstico insular del agua en Canarias

Hablar del agua en Canarias en singular es un error. Cada isla tiene su propia historia, sus propios problemas... y sus propias soluciones. La evaluación de los recursos hídricos en Canarias exige un enfoque insularizado. Las diferencias geomorfológicas, climáticas y estructurales entre islas son tan marcadas que cualquier intento de diagnóstico conjunto requiere, como paso previo, una descripción sintética que permita establecer comparaciones sin perder el rigor analítico. Este apartado responde a esa necesidad. No sustituye los análisis individuales, los prepara.

El estudio se basa en los Planes Hidrológicos de Demarcación vigentes (2021-2027), con especial atención a la información validada sobre disponibilidad de recursos, estructura de fuentes, patrones de consumo y estado de las masas de agua. La lectura cruzada de estos documentos permite construir una visión regional, al tiempo que identifica líneas de fractura entre modelos hídricos insulares. Como crítica, ha sido complicado comparar las islas en base a los datos existentes

en cada PHI, algunos corresponden a otros años, por lo que se ha hecho un esfuerzo en homogeneizar los resultados.

Se ha seguido una estructura homogénea en todos los casos: primero se contextualiza la demanda con variables socioeconómicas, luego se define el marco geológico-climático, se describen las fuentes disponibles, se desglosan los usos sectoriales, se valora el estado de los acuíferos y se resumen los principales retos.

Este esquema revela patrones comunes y singularidades. En el extremo oriental, Lanzarote y Fuerteventura dependen casi por completo de la desalinización, con una reutilización creciente pero aún parcial. En el centro, Gran Canaria y Tenerife operan con sistemas mixtos sometidos a tensión estructural. Al oeste, La Palma, El Hierro y La Gomera conservan una base hídrica subterránea, aunque condicionada por la recarga y la salinidad.

La seguridad hídrica en Canarias no se define por el volumen disponible, sino por la capacidad de modular fuentes y consumos en un escenario de alta vulnerabilidad climática y presión territorial creciente. A partir de esta premisa, el análisis insular ofrece claves operativas para orientar la planificación futura sobre bases técnicas y adaptativas. Si algo enseña el análisis isla por isla que vamos a estudiar a continuación, es que no hay una única respuesta al problema del agua en Canarias. Pero sí hay una constante: la urgencia de actuar antes de que la singularidad se convierta en emergencia.

Los siguientes apartados integran información de los últimos PHI aprobados, depurada mediante recursos digitales de consulta y análisis documental. Interpretaciones y conclusiones del autor.

8.1. Disponibilidad y usos del agua en las Islas Canarias

El sistema hídrico del Archipiélago Canario se articula en torno a una oferta compleja, donde convergen fuentes convencionales —acuíferos y escorrentía— con tecnologías de producción industrial como la desalinización de agua de mar y la reutilización de aguas. La distribución territorial y sectorial de estos recursos responde tanto a factores hidrogeológicos como a condicionantes socioeconómicos.

Para caracterizar este esquema con precisión, se han compilado los datos más recientes de los planes hidrológicos insulares vigentes (2021-2027), organizados en dos tablas diferenciadas: una para las fuentes y otra para los usos.

La primera tabla (2.4) recoge la disponibilidad anual por isla, en hectómetros cúbicos y en porcentaje relativo. Se observa una marcada heterogeneidad: desde los modelos hídricos insulares más autosuficientes, apoyados casi exclusivamente en aguas subterráneas (La Palma, La Gomera), hasta territorios donde la práctica totalidad del recurso depende de la desalinización de agua de mar (Lanzarote, Fuerteventura). En todos los

casos, la regeneración de aguas mantiene un peso creciente, aunque todavía limitado por la capacidad de tratamiento terciario y la extensión de las redes específicas.

Tabla 2.4. Oferta de agua en hectómetros cúbicos en las Islas Canarias en diferentes años según los PHI vigentes (2021-2027)

Fuente/Isla	Hierro	Palma	Gran Canaria	Tenerife	Gomera	Fuerte-ventura	Lanzarote	Total
Subterráneas	2,12	60,8	55,7	150,0	6,8	1,0	0,6	277.02
Superficiales	0,0	3,7	11,0	2,0	1,5	0,0	0,0	18.2
Desalinización	1,9	0,0	88,1	31,0	0,6	73,7	38,6	233.9
Regeneración	0,02	0,0	12,8	12,0	0,1	5,4	4,7	35.02
Total	4,04	64,5	167,6	195,0	9,0	80,1	43,9	564.14

Fuente: elaboración propia y PHI vigentes

La segunda tabla (2.5) sintetiza la demanda bruta por sectores: agricultura, abastecimiento urbano, turismo e industria/otros. Aunque el patrón general confirma la primacía del regadío —especialmente en las islas occidentales—, se aprecia un aumento sostenido del consumo urbano y turístico, con especial intensidad en las islas orientales y en núcleos costeros de alta densidad. Estas cifras no incluyen el volumen de agua no registrada (fugas, consumos no facturados), ni el que circula fuera del sistema público, como ocurre con ciertas desalinizadoras privadas en régimen de autoservicio.

Ambas tablas deben leerse como una radiografía operativa del sistema, útil para identificar desequilibrios, evaluar la presión sobre las fuentes y orientar las decisiones de planificación. No reflejan el balance neto —es decir, la diferencia entre recarga natural y extracciones— ni integran aún indicadores de calidad, pero sí permiten establecer la arquitectura básica sobre la que se apoya la seguridad hídrica del Archipiélago.

Tabla 2.5. Consumo de agua por sector en hectómetros cúbicos en las Islas Canarias en diferentes años según los PHI vigentes (2021-2027)

Uso/Isla	Hierro	Palma	Gran Canaria	Tenerife	Gomera	Fuerte-ventura	Lanzarote	Total por sector
Agricultura	1,9	69,1	48,0	92,0	5,0	4,8	6,1	226,9
Urbano	1,59	8,8	71,1	65,0	2,6	17,4	14,9	181,39
Industrial	0,1	0,5	16,9	19,0	0,7	2,5	1,6	41,3
Turístico	0,0	1,3	18,6	15,0	0,8	6,2	8,4	50,3
Total por isla	3,59	79,7	154,6	191,0	9,1	30,9	31,0	499,89

Fuente: elaboración propia y PHI vigentes

Las tablas elaboradas a partir de los datos insulares consolidados ofrecen una imagen precisa y coherente del sistema hídrico canario. El volumen total movilizado —564 hectómetros cúbicos (hm^3) por año en la tabla de fuentes y 499 hm^3 en la de usos— se ajusta al orden de magnitud esperado según los planes hidrológicos en vigor. Es necesario aclarar por qué ambas cifras no coinciden exactamente y qué elementos explican la diferencia.

En primer lugar, el volumen de agua no registrada no aparece reflejado en la tabla de usos. Este concepto agrupa las pérdidas reales en las redes de distribución, los consumos no facturados, los errores de medición y las fugas no localizadas. Aunque no constituye un uso en sí mismo, representa un volumen significativo del agua puesta en red. En los planes hidrológicos insulares se estima entre un 10 % y un 12 % del total movilizado, con variaciones notables entre islas. Ese volumen, al no imputarse a ningún sector específico en las tablas, explica buena parte de la diferencia entre el total de fuentes y el total de usos.

En segundo lugar, conviene tener en cuenta que algunos consumos —especialmente en el sector turístico— no quedan completamente reflejados en las estadísticas públicas. En islas como Lanzarote, Fuerteventura o Gran Canaria existen instalaciones hoteleras y urbanizaciones que operan con sistemas de producción propios (desalinización autónoma, captación privada), sin integrarse en la red insular. Estos volúmenes, aunque significativos, no siempre figuran en los registros oficiales de demanda sectorial, y por tanto no aparecen sumados en la tabla de usos.

También es importante considerar que no todas las fuentes de agua contabilizadas en la tabla se destinan directamente a los sectores finales. Parte del agua regenerada, por ejemplo, se produce, pero no llega a ser reutilizada por falta de red terciaria o de demanda efectiva. En sentido inverso, ciertos usos —como la industria o los servicios portuarios— pueden consumir agua fuera del sistema de contabilización insular convencional, lo que introduce pequeñas asimetrías.

En resumen, las diferencias entre el volumen total ofertado y el distribuido por sectores no indican un error, sino que reflejan la estructura real del sistema: parte del agua movilizada se pierde antes de llegar al consumidor final, otra se produce sin ser utilizada, y otra se consume sin ser registrada. Por ello, el análisis riguroso del sistema hídrico insular requiere distinguir entre disponibilidad técnica, aprovechamiento efectivo y contabilización estadística. Las tablas proporcionan una base sólida para ese análisis, siempre que se complementen con una lectura crítica de las pérdidas, los autoservicios y los desfases operativos.

Las tablas de fuente de agua predominante por isla (2.6) y sector de consumo dominante (2.7) ofrecen una lectura sintética del sistema hídrico insular, útil para detectar patrones estructurales y priorizar actuaciones. Aunque simplifican la rea-

lidad al destacar solo la variable mayoritaria, permiten identificar el tipo de dependencia hídrica y la lógica de demanda que prevalece en cada isla.

La primera tabla muestra la fuente dominante por isla. En cinco de las ocho islas analizadas (La Palma, La Gomera, El Hierro, Tenerife y Gran Canaria), el recurso mayoritario sigue siendo el agua subterránea, extraída principalmente mediante galerías, pozos y manantiales. Esta primacía convive con un peso creciente de la desalinización de agua de mar, que ya ha desplazado al acuífero como fuente principal en Lanzarote y Fuerteventura. En estas dos islas, la escasa recarga y la baja productividad del subsuelo han consolidado un modelo estructurado en torno a plantas de ósmosis inversa. La regeneración, aunque relevante en términos estratégicos, no es aún la fuente dominante en ningún territorio, pero sí alcanza cifras operativas destacadas en las islas más tensionadas.

La segunda tabla indica el sector dominante en el consumo de agua. La agricultura encabeza la demanda en cinco islas, con una proporción que en algunos casos (La Palma, El Hierro) supera el 50 % del volumen total. Este patrón obedece tanto a la extensión del regadío como a la intensidad hídrica de determinados cultivos —como el plátano o el aguacate—, y a una menor presión urbana en comparación con los entornos metropolitanos. En el extremo opuesto, Fuerteventura y Lanzarote presentan un claro predominio del consumo urbano, estrechamente vinculado a la actividad turística. Gran Canaria, con un peso relativo elevado del abastecimiento y de la demanda industrial, refleja un modelo más diversificado, propio de una economía insular más compleja.

Tabla 2.6. Fuente del agua preferente y temas críticos respecto el agua en cada isla canaria según el PHI vigente (2021-2027)

Isla	Patrón dominante	Apuntes críticos
Tenerife 195 hm³	77 % subterráneo, 16 % desalinización	Índice de explotación próximo a 1; dependencia creciente de EDAM en Sur.
Gran Canaria 168 hm³	53 % desalinización, 33 % subterráneo	Modelo mixto tensionado por coste energético.
Fuerteventura 80 hm³	92 % desalinización	Red con pérdidas > 30 %; resiliencia condicionada a estabilidad eléctrica.
Lanzarote 44 hm³	88 % desalinización	Vulnerable a averías; fugas elevadas y regeneración aún escasa.
La Palma 65 hm³	94 % subterráneo	Balance holgado, pero con foco de sobreexplotación en Valle de Aridane.
El Hierro 4 hm³	52 % subterráneo, 47 % desalinización	Sistema estable; riesgo local de intrusión en El Golfo.
La Gomera 9 hm³	77 % subterráneo	Manantiales costeros con salinidad creciente; reutilización incipiente.

Fuente: elaboración propia y PHI vigentes

La combinación de ambas tablas permite inferir el tipo de vulnerabilidad principal en cada isla: déficit estructural de recurso (orientales), sobreexplotación puntual del acuífero (occidentales con alta demanda agrícola), o tensión operativa ligada a la distribución (caso de Tenerife). Esta clasificación no sustituye al análisis cuantitativo detallado, pero ofrece un marco de interpretación ágil para la planificación hídrica insular.

Tabla 2.7. Demanda dominante en las Islas Canarias según el PHI vigente (2021-2027)

Isla	Demanda dominante	
Tenerife	Agricultura (48 %)	Urbanos 34 % con alta presión turística; industria 10 %.
Gran Canaria	Urbano-servicios (46 %)	Agricultura 31 %, turismo 12 %; pérdidas 16 %.
La Palma	Agricultura (87 %)	Abastecimiento 11 %; turismo marginal.
Hierro	Agricultura (53 %)	Urbano 44 %; equilibrio ajustado.
Gomera	Agricultura (55 %)	Urbano 29 %; fugas 18 %.
Fuerteventura	Urbano (56 %)	Turismo 20 %; agricultura 15 % con agua regenerada.
Lanzarote	Urbano+turismo (75 %)	Agricultura 20 %; fugas 23-26 %.

Fuente: elaboración propia y PHI vigentes

Pasemos a analizar la situación hidráulica de cada isla, con sus singularidades.

8.2. La isla de Tenerife

Tenerife concentra casi un millón de habitantes y genera el mayor PIB del archipiélago, apoyado en un turismo que supera los cinco millones y medio de visitantes anuales. La agricultura, aunque aporta apenas el 2 % del PIB, mantiene casi 19.000 ha cultivadas—con el plátano como monocultivo dominante—y es el sector que más agua demanda.

Tabla 2.8. Datos socioeconómicos de la isla de Tenerife

Indicador (último dato disponible)	Valor
Población residente (2024)	955.063 hab.
PIB insular (2024, precios corrientes)	≈ 25.000 M €
PIB per cápita	≈ 26.000 €

Tabla 2.8. Datos socioeconómicos de la isla de Tenerife

Indicador (último dato disponible)	Valor
Estructura económica	Servicios 78 % · Construcción 11 % · Industria 6 % · Primario 2 %
Llegadas turísticas (2023)	5,6 M de visitantes
Superficie cultivada total (2023)	18.738 ha
Principales usos agrícolas	Plátano (> 60 % SAU), papa, vid, aguacate

Fuente: elaboración propia (2025) a partir del PHI

Contexto geológico-climático

Tenerife es un edificio volcánico poligénico (edad > 12 Ma) con estratovolcanes superpuestos y una depresión central (Las Cañadas) que hoy ocupa el Teide. La litología dominante son coladas basálticas permeables, intercaladas con niveles piroclásticos y diques subverticales que generan un acuífero insular único de tipo fisural, con una superficie piezométrica en domo y drenaje radial.

- Precipitación: gradiente altitudinal 115 mm a^{-1} (costa) → 820 mm a^{-1} (vertiente N alta); media insular 520 mm a^{-1} Tenerife.
- "Lluvia horizontal" (nieblas orográficas) relevante (> 200 mm a^{-1}) entre 600-1.400 m s.n.m., vital para la recarga en laderas N.
- ETP elevada (1.000-1.400 mm a^{-1} en medianías) condiciona una recarga efectiva media de 135-300 mm a^{-1} en zonas altas Tenerife.

Fuentes de agua disponible

La tabla 2.9 muestra con claridad que Tenerife mantiene una dependencia estructural del agua subterránea, que sigue representando casi el 80 % del recurso movilizado. A pesar del aumento progresivo de fuentes no convencionales, la base del sistema hídrico sigue siendo el acuífero fisural, con sus limitaciones: descenso piezométrico sostenido, salinización en zonas costeras y menor rendimiento en galerías profundas. La planificación reconoce esta fragilidad, pero la sustitución no es inmediata ni homogénea.

La desalinización de agua de mar aporta unos 31 hm^3 anuales. El crecimiento ha sido notorio en las últimas dos décadas, especialmente en el sur y suroeste de la isla, donde la presión turística y residencial supera la capacidad natural de recarga. La mayor parte de estas plantas son privadas o semi-privadas, con una producción no siempre integrada en la red insular.

El volumen de agua regenerada, algo superior a 12 hm^3, aún es modesto, pero su papel es estratégico. La mayor parte se destina al riego agrícola y al mantenimiento de campos de golf. Es también la única fuente con potencial real de expansión sin sobrecargar el balance hídrico, si se consolidan las inversiones en terciarios y en infraestructuras de distribución.

Las aguas superficiales no tienen una función estructural. La escorrentía, irregular y vinculada a episodios extremos, se gestiona de forma puntual mediante pequeñas presas o balsas, más como regulación auxiliar que como fuente primaria. La red de balsas y depósitos —en manos de BALTEN y algunas comunidades— es clave para mezclar orígenes, mejorar la eficiencia operativa y evitar pérdidas.

La tabla refleja una transición aún incompleta hacia un modelo diversificado. La presión sobre los acuíferos no ha cesado, pero se ha desacoplado parcialmente del crecimiento de la demanda gracias al refuerzo de la desalinización de agua de mar y, en menor medida, de la reutilización. El reto está en asegurar su integración operativa y ambiental, más allá del balance volumétrico.

Tabla 2.9. Fuentes de agua en la isla de Tenerife

Recurso (2016)	$hm^3\ a^{-1}$	% total	Notas clave
Aguas subterráneas (galerías, pozos, nacientes)	150	78 %	Descenso 30 % 1985-2016; salinización creciente
Desalinización de agua de mar (EDAM)	31	16 %	37 EDAM (6 públicas / resto autoservicio turístico-urbano)
Agua regenerada (ERA)	12	6 %	Uso prioritario agrícola y riego de golf
Escorrentía superficial almacenada	< 2	–	Barrancos efímeros; 275 balsas de riego (BALTEN)

Fuente: elaboración propia (2025) a partir del PHI

Consumos por sector

El reparto del agua en Tenerife revela un patrón clásico, pero no por ello menos crítico. La agricultura sigue siendo el principal consumidor, con cerca del 50 % del total, aunque su protagonismo se va reduciendo. El plátano domina, sobre todo en el norte y en la franja costera occidental, pero la superficie cultivada ha caído y el riego localizado se ha generalizado. No hay tanto agua como antes, ni se puede regar igual. Aun así, el campo absorbe casi la mitad del recurso, en un contexto donde muchas explotaciones siguen dependiendo de galerías con caudales cada vez más erráticos.

El abastecimiento urbano, que incluye tanto consumo doméstico como servicios e infraestructuras públicas, representa un tercio del total. No es solo cuestión

de habitantes: la población flota con el turismo, y ese efecto amplifica la demanda en zonas como Adeje o Arona, donde se combinan hoteles, urbanizaciones y campos de golf en régimen intensivo. En verano —y cada vez más fuera de temporada— la presión sobre las redes es muy superior a la que reflejan las cifras medias anuales.

El turismo, por sí solo, ya roza el 8 % del consumo. Puede parecer poco, pero hay que leerlo bien: no incluye todas las externalidades que genera. Las desalinizadoras privadas, los sistemas de climatización o el mantenimiento de jardines no siempre figuran en las estadísticas oficiales, aunque consumen de la misma red de recursos.

En la categoría "industria y otros" se agrupan consumos heterogéneos, pero relevantes: parques industriales, centrales térmicas, plantas de tratamiento. Suponen el 10 % y, en algunos municipios, llegan a pesar más que la agricultura. Además, muchas de estas instalaciones no devuelven el agua al sistema: la utilizan, la alteran y la desechan.

En la tabla (2.10) se refleja un sistema hídrico altamente tensionado, donde el reparto no siempre responde a criterios de eficiencia, y donde los consumos no se comunican entre sí. Cada sector funciona con lógicas distintas, con tarifas, redes y operadores separados. Ese aislamiento dificulta las decisiones estratégicas: no es lo mismo ahorrar un hectómetro en el norte agrícola que en el sur turístico. Y, sin embargo, el agua es la misma.

Tabla 2.10. Usos del agua en la isla de Tenerife

Uso	Demanda bruta ($hm^3\ a^{-1}$)	%	Tendencia
Agricultura	92	48 %	Caída superficie de platanera, aumento riego localizado
Abastecimiento urbano	65	34 %	Crecimiento moderado (+población, turismo)
Turismo (hoteles + extrahotelero)	15	8 %	Alta intensidad en comarcas S-SW
Industria / energía / otros	19	10 %	Centrales térmicas y parques industriales costeros

Fuente: elaboración propia (2025) a partir del PHI

Estado aguas subterráneas

Cuantitativo

Cuantitativamente, el sistema insular presenta una situación de equilibrio muy ajustado, cuando no directamente tensionado. El índice de explotación global se

sitúa en 0,96 (dato de 2019), El índice de explotación global en la práctica significa que se extrae casi todo lo que se recarga. Este indicador —cociente entre las extracciones anuales y la recarga disponible— es una medida sintética del nivel de presión al que está sometido un acuífero. Un valor superior a 1 indica sobreexplotación neta: se saca más agua de la que entra. Cuando el valor se acerca peligrosamente a 1, como ocurre en Tenerife, el sistema pierde margen de regulación natural, los descensos piezométricos se intensifican y el riesgo de deterioro cualitativo, como la salinización, se multiplica. También hay que tener en cuenta la descarga mareal, como se ha comentado en apartados anteriores.

Cuatro de las masas de agua subterránea (MASb) están ya en mal estado cuantitativo, y los descensos piezométricos no son teóricos: en numerosos pozos de la vertiente sur y del valle de La Orotava se registran caídas sostenidas de entre 0,5 y 1 metro por año.

El balance histórico confirma esa fragilidad. En el periodo 1925–2012, la recarga media estimada fue de 249 hm^3 anuales, mientras que las extracciones máximas superaron los 250–260 hm^3 en varios años consecutivos. No es una sobreexplotación estructural, pero sí una presión recurrente que roza el umbral de sostenibilidad.

Cualitativo

Desde el punto de vista cualitativo, el deterioro avanza más lento, pero avanza. En las MASb costeras del sur y en el propio valle de La Orotava, las concentraciones de cloruros superan con frecuencia los 500 mg/L, una señal clara de intrusión marina, agravada por el descenso piezométrico y por captaciones demasiado profundas o mal gestionadas.

En paralelo, los niveles de nitratos han convertido al valle de La Orotava en zona vulnerable, tras superar los 50 mg/L establecidos como umbral (Decreto 54/2020). El origen, en este caso, no admite mucha discusión: prácticas agrícolas intensivas, fertilización sin control efectivo y falta de seguimiento en el uso de agua regenerada.

En cuanto a contaminantes emergentes, no se dispone aún de una red de control consolidada, pero se han detectado compuestos trazadores en algunas captaciones cercanas a estaciones depuradoras. El Plan Hidrológico incorpora por primera vez un programa piloto de seguimiento (2022–2025) para evaluar su presencia y evolución. No hay alarma, pero sí razones para actuar antes de que el problema escale.

Cuestiones importantes y retos de futuro

Tenerife afronta un escenario en el que asegurar el agua no basta: hay que garantizarla, descarbonizarla y distribuirla mejor. La seguridad hídrica ya no puede

depender exclusivamente del subsuelo. El descenso sostenido de los alumbramientos subterráneos, especialmente en galerías, obliga a reforzar las conexiones entre fuentes no convencionales. La interconexión entre plantas desalinizadoras, estaciones depuradoras y redes insulares no es solo una opción técnica; es la condición para que el sistema siga funcionando cuando el clima, la demanda o la energía se desvíen del guion. Y es que, si el agua viene del mar o de la depuradora, conviene que no lo haga con una huella de carbono inadmisible. En esto, las energías renovables ya no son un añadido, sino parte del núcleo operativo.

Otro frente que requiere atención inmediata es el control de la salinización. En determinadas zonas del sur y en valles como La Orotava, los acuíferos costeros están en equilibrio precario. La recarga artificial, poco explorada en la isla, podría ofrecer una vía realista para proteger el recurso. Pilotar sistemas de recarga gestionada (MAR) con agua regenerada, previamente tratada mediante ósmosis inversa, permitiría reforzar el nivel piezométrico y frenar la intrusión salina. Eso sí, se necesita modelar con precisión la interfaz salobre-dulce para evitar efectos indeseados. No es una solución rápida, pero sí una de las pocas técnicamente viables. El proyecto europeo NATALIE durante su ejecución (2024-2028) está explorando introducir pilotos de recarga de acuíferos en la isla de Fuerteventura, lo cual puede ser una de las soluciones para reducir la intrusión marina en los acuíferos costeros.

El cierre del ciclo urbano del agua sigue siendo una tarea pendiente. La Directiva Marco del Agua y la Directiva sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas de la Unión Europea —cuyo nombre completo es Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991— obligan a recoger, tratar y controlar adecuadamente las aguas residuales generadas en las aglomeraciones urbanas. Esta normativa exige, como mínimo, un tratamiento biológico (secundario) y, en zonas sensibles, un tratamiento terciario que elimine nutrientes como nitrógeno y fósforo. Cumplir con estos estándares implica, en el caso de Tenerife, terminar las redes separativas, completar los tratamientos avanzados en las EDAR existentes y reducir de forma drástica los vertidos al mar. Pero más allá del cumplimiento normativo, está el principio de circularidad. Valorización de lodos, recuperación de nutrientes, reducción de contaminantes emergentes... todo eso forma parte del mismo esfuerzo: pasar de tratar aguas residuales a gestionarlas como un recurso regenerado.

El cambio climático no es un escenario hipotético. Las proyecciones apuntan a una caída del 10 % en la precipitación y un aumento de la temperatura media de +1,5 °C antes de 2050. Eso significa más evaporación, menos recarga y mayor presión sobre el balance. El Plan de Sequía debe dejar de ser un documento reactivo para convertirse en un instrumento dinámico, revisado con frecuencia, que

incorpore umbrales de alerta, planes de contingencia y medidas estructurales. También implica proteger ecosistemas particularmente sensibles, como los humedales costeros, que actúan como amortiguadores en episodios de tormenta o intrusión marina.

La gobernanza del agua necesita un cambio de escala. No se puede planificar un sistema de abastecimiento distribuido con tarifas que no reflejen ni los costes reales ni el valor ambiental del recurso. Hace falta una tarificación escalonada, transparente y tecnológicamente trazable. Y también un paso adelante en la integración de las comunidades de aguas privadas: no como meros usuarios, sino como gestores activos. Sin esa participación efectiva, hablar de eficiencia o sostenibilidad seguirá siendo un ejercicio retórico.

8.3. Isla de Gran Canaria

Gran Canaria tiene 875.205 habitantes y es el segundo motor económico del archipiélago. Con algo más de 4,3 millones de turistas anuales, el sector servicios domina el PIB (≈ 77 %), mientras que la agricultura apenas supera el 1 % de la riqueza insular, aunque mantiene unas nueve mil hectáreas activas —plátano y hortaliza bajo invernadero en la costa norte; tomate, papaya y cultivos forrajeros hacia el sur—. La tabla siguiente resume los principales datos socio-económicos.

Tabla 2.11. Datos socioeconómicos de Gran Canaria

Indicador (último dato disponible)	Valor
Población residente (2024)	875.205
PIB insular (2018, precios corrientes)	17.300 M €
PIB per cápita (estim.)	≈ 20.000 €
Estructura económica	Servicios 77 % · Construcción 5 % · Industria 7 % · Primario 1 %
Llegadas turísticas (2023)	4,3 M visitantes
Superficie cultivada total (2024)	9.211 ha
Principales usos agrícolas	Plátano, tomate, hortaliza, papaya

Fuente: elaboración propia (2025)

Contexto geológico-climático

Gran Canaria es un estratovolcán en escudo de 14 Ma, formado por tres grandes etapas eruptivas. Una corona permeable de lavas basálticas jóvenes cubre for-

maciones traquítico-fonolíticas más compactas; el resultado es un acuífero fisural único, en domo, con drenaje radial subterráneo hacia la costa.

- Precipitación: gradiente 115 mm a^{-1} (costa S) → 900 mm a^{-1} (cumbre NW); media insular 520 mm a^{-1}.
- Niebla orográfica: hasta 180 mm a^{-1} entre 600–1.200 m s.n.m., clave para la recarga en el norte.
- ETP: 950–1.350 mm a^{-1}; la recarga efectiva raramente supera 120–150 mm a^{-1} fuera de la dorsal húmeda.

Fuentes de agua disponibles

La tabla 2.12 revela, en apenas cuatro filas, una realidad mucho más compleja: Gran Canaria se abastece ya de un mosaico hídrico con pesos muy desiguales. Más de la mitad del recurso –88 hm^3 al año, nada menos– nace literalmente del Atlántico, pasa por membranas de ósmosis y llega a la red a costa de un pulso eléctrico que aún depende en gran parte del gasoil y el ciclo combinado. Esa columna –"Desalinización EDAM, 53 %"– sintetiza dos décadas de transición acelerada: de galerías y pozos a plantas desalinizadoras de agua de mar.

En segundo lugar, los 55 hm^3 de aguas subterráneas son la memoria viva de la isla. Representan un tercio del total, pero pesan mucho más en la cultura hidráulica y en la economía de medianías. El problema es que cada metro cúbico nuevo se extrae de mayor profundidad, con menor rendimiento y mayor salinidad. La tabla lo advierte con esa nota breve: "captaciones cada vez más profundas". En otras palabras: la factura climática y química de seguir bombeando crece cada año.

La regeneración ocupa la tercera fila –12,8 hm^3– y, aunque su proporción sea todavía modesta, es el comodín del sistema. La mayoría sale de diez depuradoras con terciario y viaja a cultivos y campos de golf. No quita sed a la población, pero descarga al acuífero, reduce vertidos y abre la puerta a la recarga gestionada. Además, es la única fuente que puede ampliarse sin perforar ni desalinizar agua de mar: basta con mejorar redes y tratamientos.

Por último, las aguas superficiales reguladas suman 11 hm^3, un 7 % que parece residual, pero funciona como "batería hidráulica" de las zonas altas de la isla. Las 67 presas construídas en los barrancos almacenan escorrentías irregulares que, de otra forma, acabarían en el mar en cuestión de horas.

Mirada en conjunto, la tabla cuenta una historia de diversificación forzada: la isla ya no confía en una única fuente y, con todo, sigue atrapada en la tensión entre coste energético, seguridad hídrica y calidad ambiental. El reto es afinar esa mezcla hasta que el sistema sea flexible de verdad y, al mismo tiempo, viable en términos de carbono y economía local.

Tabla 2.12. Fuentes de agua en Gran Canaria

Recurso (2019)	$hm^3 a^{-1}$	% total	Notas clave
Desalinización EDAM	88,1	53 %	46 plantas; motor energético-hídrico del sistema
Aguas subterráneas	55,7	33 %	Captaciones cada vez más profundas
Agua regenerada ERA	12,8	8 %	10 EDAR producen terciario; uso agrícola y golf
Aguas superficiales reguladas	11	7 %	67 presas; régimen muy irregular

Fuente: elaboración propia (2025) y PHI

Consumos por sector

La tabla 2.13 de consumos por sector pinta un retrato nítido de cómo —y para quién— fluye el agua en Gran Canaria. El bloque doméstico y de servicios públicos, con 71 hm^3 (42 %), encabeza la lista. A primera vista parece razonable para casi 900.000 habitantes; aun así, los datos de pérdidas rondan el 16 %. En otras palabras, casi uno de cada seis litros se escapa antes de llegar al grifo, un lujo difícil de sostener cuando la desalinización marca la mitad del suministro.

La agricultura aún reclama 48 hm^3 (29 %), aunque la superficie regada se ha reducido y el riego localizado gana terreno. El campo insular atraviesa una transición silenciosa: menos tomate de exportación, más cultivos de rotación corta y una lógica de supervivencia que combina pozos antiguos con riego de regenerada en las fincas que pueden permitírselo. El agua sigue siendo vital, pero el patrón de demanda se mueve y, con él, la presión sobre el acuífero.

En tercer lugar, aparece el turismo, con 11,8 hm^3 (7 %). Cifra engañosamente modesta: muchas desalinizadoras privadas abastecen hoteles y complejos sin pasar por la estadística pública, y su consumo se dispara en temporada alta. Además, la huella hídrica turística no se limita a las habitaciones; incluye climatización, spa, lavandería y jardines tropicales que crecen donde el clima natural es casi desértico.

El sector industrial y energético, 16,9 hm^3 (10 %), es más heterogéneo de lo que el número sugiere. Las centrales térmicas de Jinámar y Arinaga consumen agua para enfriamiento y purga, mientras que los polígonos litorales la usan tanto en procesos como en redes contra incendios. Buena parte de esta demanda no retorna al sistema: se evapora, se incorpora a productos o se descarga con carga contaminante.

Por último, el uso recreativo —golf y parques temáticos— suma 6,8 hm^3 (4 %). Parece la pieza pequeña del puzle, pero juega un papel estratégico al absor-

ber agua regenerada que, de otro modo, iría al mar. No alivia la sed urbana, pero aligera la factura ambiental y libera metros cúbicos subterráneos para otros fines.

Leída en conjunto, la tabla revela un sistema hídrico tensionado y plural, donde cada sector tira de redes distintas, con tarifaciones y calidades dispares. El reto insular no es sólo producir más agua, sino engranar consumos y fuentes para que cada litro —ya cueste energía, recuperación o ingeniería— encuentre el destino más eficiente antes de volver, idealmente, al ciclo.

Tabla 2.13. Consumos por sector en Gran Canaria

Uso	Demanda bruta ($hm^3\ a^{-1}$)	%	Tendencia
Hogares + servicios públicos	71,1	46 %	Eficiencia moderada; pérdidas ≈ 16 %
Agricultura	48,0	31 %	Reducción de regadío tradicional; riego localizado gana terreno
Turismo	11,8	7 %	EDAM privadas integradas en complejos hoteleros
Industria / energía / otros	16,9	11 %	Centrales térmicas de Jinámar y Arinaga, parques industriales
Recreativo (golf, parques)	6,8	4 %	Cobertura casi íntegra con regenerada

Fuente: elaboración propia (2025) y PHI

En total, el sistema distribuye unos 167,6 $hm^3\ a^{-1}$, con una ratio insular cercano a 492 $L\ hab^{-1}$ día cuando se computa la población equivalente turística.

Estado de las aguas subterráneas

Cuantitativo

El PHI asume que solo ≈ 20 % de la lluvia (82 $hm^3\ a^{-1}$) alcanza el acuífero por infiltración directa. Las extracciones declaradas (≈ 56 $hm^3\ a^{-1}$) llevan el índice de explotación insular a 0,68, con disparidad interna: la MASb ES70GC004, Esta roza 0,9 (mal estado), mientras que las del noroeste se mantienen < 0,4. Los descensos piezométricos más acusados se concentran en los frentes costeros SE y SW, con caídas de 0,3–0,7 $m\ a^{-1}$.

Cualitativo

La salinización es el problema dominante: en varias MASb litorales los cloruros se sitúan entre 700 y 1.500 $mg\ L^{-1}$, triplicando el umbral para agua de consu-

mo. Los nitratos muestran medias de 78 mg L^{-1}, con superaciones puntuales de 300 mg L^{-1} en zonas agrícolas intensivas (plátano-invernadero). El programa piloto 2022-2025 vigila compuestos farmacéuticos y PFAS en pozos cercanos a EDAR, aunque por ahora las detecciones son aisladas.

Cuestiones importantes y retos de futuro

Gran Canaria ya no se pregunta de dónde saldrá el agua, sino cuánta energía costará producirla. La isla vive pegada a sus desalinizadoras de agua de mar y, con ellas, a una factura eléctrica que no deja de crecer. Por eso el plan apuesta fuerte: 90 MW de fotovoltaica y eólica dedicados en exclusiva a las EDAM antes de 2030, con la meta de rebajar en un tercio las 279 kt CO_2 que hoy acompañan cada hectómetro cúbico industrial. La lógica es simple: si no baja la huella de carbono, la seguridad hídrica se convierte en un lujo difícil de pagar.

El siguiente paso consiste en mezclar inteligentemente las fuentes. La idea es inyectar agua regenerada, pulida con ósmosis inversa, en las medianías del noreste. Esa recarga gestionada sostendría los niveles y, de paso, activaría la red de balsas que corona la isla. Otra manera de decirlo: aprovechar cada gota que ya tenemos antes de seguir perforando el subsuelo.

Los modelos costeros —especialmente en las masas ES70GC004 y ES70GC006— dibujan una intrusión salina que puede avanzar doscientos metros tierra adentro en apenas veinte años si las captaciones litorales no dejan de extraer agua al ritmo que lo están haciendo actualmente. Frenarla exige reducir bombeos, pero también elevar la presióna otras fuentes de agua; de ahí la urgencia de la recarga artificial.

El cierre del ciclo urbano se mueve en la misma dirección. Cumplir la Directiva 91/271/CEE obliga a subir del 62 % al 90 % la cobertura de tratamientos terciarios antes de 2027.

El clima tampoco da tregua. Los escenarios regionales hablan de un 12 % menos de lluvia y +1,3 °C hacia mitad de siglo. El Plan de Sequía ya incorpora umbrales móviles: si las presas bajan de 20 hm^3 o la producción de EDAM no cubre la punta estival, se activan restricciones y trasvases internos.

Queda la gobernanza. El Cabildo impulsa una tarifa escalonada: 0,75 €/m^3 doméstico básico, 1,20 €/m^3 para el turismo. Además, todos los pozos y desalinizadoras deberán enviar datos en tiempo real antes de 2028. Sin transparencia —y sin que cada quien pague lo que realmente cuesta su agua— la sostenibilidad seguirá siendo, a la fuerza, un eslogan.

8.4. Isla de La Palma

La Palma ronda los 88.000 habitantes y, a diferencia de las islas capitalinas, mantiene un tejido productivo dominado por el sector primario. El turismo apenas rebasa los 230.000 visitantes anuales —muy lejos de los grandes polos—, de modo que la presión demográfica estacional resulta moderada. La agricultura, sin embargo, conserva cerca de 11.000 ha, con el plátano como cultivo estrella y el aguacate y la viña en claro ascenso.

Tabla 2.14. Datos socioeconómicos de la isla de La Palma

Indicador (último dato disponible)	Valor
Población residente (2021)	87.730 hab.
PIB insular (estim. 2023)	≈ 1.750 M €
PIB per cápita	≈ 20.000 €
Estructura económica	Servicios 73 % · Construcción 5 % · Industria 3 % · Primario 4 %
Llegadas turísticas (2023)	233.000 visitantes
Superficie cultivada total (2023)	10.936 ha
Principales usos agrícolas	Plátano (≈ 60 % SAU), aguacate, viña, hortícola bajo invernadero

Fuente: elaboración propia (2025)

Contexto geológico-climático

La Palma es el edificio volcánico más joven del archipiélago occidental (1,8 Ma). Presenta una dorsal central escarpada —Cumbre Vieja— y la Caldera de Taburiente, con lavas basálticas muy permeables que descansan sobre traquitas y fonolitas más compactas. La dorsal central encauza la recarga hacia una corona de galerías radiales, configurando un único acuífero insular intensamente drenado por gravedad.

La Palma constituye un laboratorio natural para estudiar la circulación de agua en medios volcánicos jóvenes. Con 709 mm a^{-1} de precipitación media y un gradiente altitudinal que supera los 2.400 m en apenas 28 km, la isla combina abundancia potencial y fuerte irregularidad temporal. El balance 1951-2020 indica que un 48 % de la lluvia se evapora y alrededor del 41 % penetra en el subsuelo (≈ 177 hm^3 a^{-1}) (PHI 2025). La erupción de Tajogaite, en 2021, alteró ese equilibrio: sepultó captaciones, selló drenajes naturales y añadió un flujo difuso de CO_2 que ya es rastreable en varias galerías occidentales (IGME, 2023).

- Precipitación media: 709 mm a^{-1} (1940-2012).
- Máximos > 1.800 mm a^{-1} a sotavento de la caldera; mínimos < 200 mm en la costa SW.
- Lluvia horizontal: hasta 150 mm a^{-1} entre 600-1.200 m s.n.m.
- ETP: 900-1.200 mm a^{-1}, que restringe la recarga efectiva a 150-180 mm a^{-1} en las zonas húmedas.
- La recarga efectiva ronda 150-180 mm a^{-1} en los pisos húmedos.
- La recarga media calculada por el modelo SIMPA (1980-2020) alcanza 175 hm^3 a^{-1}. La descarga natural al mar se estima en 110 hm^3 a^{-1}; el resto emerge en nacientes de medianías o se extrae artificialmente.

Fuentes de agua disponibles

La matriz hídrica de La Palma mantiene un perfil excepcionalmente natural dentro del contexto canario. Más del 96 % del agua movilizada procede de aguas subterráneas, ya sea por captación directa (pozos y galerías) o mediante surgencias naturales (nacientes), lo que convierte a la isla en el último gran bastión de aprovechamiento hidrogeológico clásico en el Archipiélago. Esta proporción, sostenida en el tiempo, se explica por la alta capacidad de recarga del acuífero fisural insular, favorecida por una combinación singular de pluviometría elevada, topografía escarpada y litologías volcánicas jóvenes con porosidad efectiva.

En segundo lugar, se registra una aportación minoritaria pero relevante de aguas superficiales reguladas, que alcanzan el 4 % del volumen total. Esta fuente proviene principalmente de escorrentías retenidas en infraestructuras como la Balsa de Barlovento o el barranco de Las Angustias. Aunque su papel es auxiliar, permite modular la disponibilidad durante los picos de demanda agrícola o amortiguar déficits temporales en zonas concretas.

El uso de agua desalinizada es casi inexistente, limitado a una única mini-planta en Los Cancajos, con producción puntual y sin impacto estructural en el sistema. Su presencia adquiere valor estratégico como respaldo ante eventos extremos, como se comprobó tras la erupción de Tajogaite en 2021.

Por último, la reutilización de aguas depuradas es nula en términos operativos. El volumen regenerado declarado es cero, aunque ya se han iniciado planes para dotar a la comarca occidental de sistemas terciarios. Esto representa una línea de mejora prioritaria, no tanto por urgencia hídrica —la isla dispone de margen volumétrico—, sino por adaptación normativa y reducción de presiones sobre las masas subterráneas más sensibles.

En conjunto, el sistema hídrico palmero destaca por su elevada autosuficiencia natural, pero esta fortaleza no debe ocultar sus vulnerabilidades: la concentración

espacial del aprovechamiento, la dependencia de un acuífero intensamente drenado y la ausencia, aún, de un circuito funcional de agua regenerada que permita cerrar el ciclo.

Tabla 2.15. Fuentes de agua en la isla de La Palma

Recurso (2020/21)	$hm^3\ a^{-1}$	%	Notas clave
Aguas subterráneas (pozos + galerías + nacientes)	60,8	96 %	Captaciones radiales; vertientes y Valle de Aridane las más productivas
Aguas superficiales reguladas	3,7	4 %	Barranco de Las Angustias, Balsa de Barlovento
Desalinización de agua de mar	0,0003	≈ 0 %	Mini-planta Los Cancajos; uso puntual
Agua regenerada	0	0 %	Tercio norte sin EDAR terciarias; pilotaje en Los Llanos 2025

Fuente: elaboración propia (2025) y PHI

Consumos por sector (2021)

Tabla 2.16. Consumo del agua en la isla de La Palma

Uso	Demanda ($hm^3\ a^{-1}$)	%	Tendencia
Agricultura	69,1	86,7 %	Plátano y aguacate; riego localizado en expansión
Abastecimiento urbano	8,8	11 %	Población dispersa; pérdidas ≈ 15 %
Industria	0,5	0.6 %	Pequeña agro-industria y empaquetado
Usos recreativos	1,3	1.6 %	Turismo rural, senderismo, balnearios

Fuente: elaboración propia (2025) y PHI

La agricultura concentra la práctica totalidad de la demanda hídrica, con casi 70 hectómetros cúbicos anuales. Este valor sitúa al sector agrario como el eje del sistema insular. El uso principal se destina al riego de platanera, seguido por aguacate, viña y hortícolas de invernadero, con progresiva incorporación del riego localizado. A pesar de cierta modernización en la técnica de aplicación, el volumen global permanece elevado, lo que sugiere que el ahorro por eficiencia ha sido compensado por la ampliación de superficie cultivada o el aumento de dotaciones unitarias. Este predominio del regadío, sustentado mayoritariamente por aguas subterráneas, condiciona de forma directa la presión sobre las masas de agua, en especial en el Valle de Aridane, donde el índice de explotación se aproxima al umbral de sobreexplotación.

El uso industrial del agua es escaso, limitado a empaquetado agrícola, pequeñas instalaciones agroalimentarias y servicios auxiliares. Este bajo consumo es

consistente con la reducida base industrial insular y no supone una presión significativa sobre el sistema hídrico. Conviene vigilar la calidad de los retornos asociados, especialmente en instalaciones cercanas a zonas de recarga o manantiales.

La actividad turística en La Palma tiene una huella hídrica contenida. Con apenas 230.000 visitantes anuales, y un modelo centrado en turismo rural y senderismo, la demanda de agua para este uso se mantiene muy por debajo de la media insular. Los balnearios, casas rurales y pequeñas explotaciones vinculadas al ecoturismo apenas alteran el equilibrio global. Aun así, la previsión de crecimiento moderado del sector sugiere la necesidad de integrar criterios de eficiencia y reutilización en las futuras dotaciones turísticas, especialmente en zonas costeras con acuíferos vulnerables.

Estado de las aguas subterráneas

Cuantitativo

La Palma dispone, sobre el papel, de unos 253 hm^3 anuales de agua, pero solo extrae 66 hm^3. El índice de explotación medio, por tanto, se queda en 0,26: holgado a escala insular. La foto cambia en detalle: la masa Valle de Aridane-Tazacorte opera en 0,70, rozando el "mal estado" y avisando de que la seguridad hídrica del oeste depende de unas fuentes de agua que ya dan señales de fatiga.

Cualitativo

El problema se desplaza hacia la costa suroeste. Allí, los cloruros superan con frecuencia los 600 mg L^{-1}, síntoma inequívoco de intrusión marina. Los nitratos, en cambio, rara vez pasan de 25 mg L^{-1} salvo en las parcelas más intensivas del valle.

Cuestiones importantes y retos de futuro

El volcán de Cumbre Vieja borró en pocas semanas lo que costó décadas excavar: pozos, tuberías y bocas de riego en el Valle de Aridane quedaron bajo varios metros de lava. Desde entonces, la isla juega sin red. Urge duplicar la interconexión norte-sur –túnel de trasvase y refuerzo de las aducciones de El Paso.

Implantar el terciario en las depuradoras. Hoy, la depuración avanzada es anecdótica. La meta, ambiciosa pero posible, pasa por subir del 0 % al 60 % en 2030. Prioridad absoluta para las EDAR de Barlovento-La Grajera y Los Llanos. Con el terciario operativo, el agua regenerada alimentará riego y, a medio plazo, los primeros proyectos de recarga artificial.

Adaptación climática, el Plan de Sequía incorpora umbrales dinámicos basados en caudal de nacientes (< 200 L s^{-1}) y volumen útil en embalses (< 2 hm^3).

Gobernanza pluricomunitaria. La Palma es un mosaico de 460 comunidades que manejan más de 600 captaciones. Para que el tablero sea legible, habrá que digitalizar caudalímetros y publicar datos en tiempo real. Además, una tarifa única de 0,50 €/m^3 –con recargo de 0,15 €/m^3 donde la extracción esté en zonas sobre explotadas–. Sin transparencia, cualquier discurso de sostenibilidad seguirá siendo papel mojado.

8.5. Isla de Fuerteventura

Fuerteventura mantiene una población relativamente baja, pero su actividad turística es constante y de gran intensidad a lo largo del año. Sus algo más de 127.000 residentes conviven con una afluencia anual que ronda los 2,5 millones de visitantes, atraídos por un litoral casi ininterrumpido de playas y condiciones perfectas para el windsurf. El tejido productivo gira, por tanto, en torno al sector servicios; la agricultura apenas ocupa superficies dispersas de papas, tomates de exportación residual y cada vez más fincas de aloe y olivar. Aun así, el campo mantiene cierto peso social en las medianías y sostiene buena parte de la demanda de agua regenerada. La tabla siguiente resume la fotografía socio-económica actual.

Tabla 2.17. Aspectos socioeconómicos en la isla de Fuerteventura

Indicador (último dato disponible)	Valor
Población residente (2024)	127.043 hab.
PIB insular (estim. 2023)	≈ 1.900 M €
PIB per cápita (estim.)	≈ 15.000 €
Estructura económica	Servicios 77 % · Construcción 6 % · Industria 3 % · Primario 1 %
Llegadas turísticas (2023)	2,5 M visitantes
Superficie cultivada total (2023)	≈ 2.150 ha
Principales usos agrícolas	Tomate, aloe, olivar, forraje caprino

Fuente: elaboración propia (2025)

Contexto geológico-climático

Fuerteventura es la isla más antigua del archipiélago canario desde el punto de vista geológico. Con una edad estimada superior a los 20 millones de años, y

desde entonces ha sido intensamente erosionada. La morfología actual es el resultado de un relieve muy suavizado, con altitudes modestas (máx. 807 m en el Pico de la Zarza) y amplias llanuras estructurales. Las litologías predominantes incluyen basaltos antiguos, materiales traquíticos, depósitos piroclásticos muy alterados y, en menor proporción, intrusiones fonolíticas y filonianas.

La estructura hidrogeológica resultante es poco favorable a la acumulación de agua subterránea. Domina un sistema de acuíferos fisurales discontinuos, con escasa capacidad de almacenamiento, baja transmisividad y salinidad elevada, especialmente en los sectores costeros. En el interior, algunas zonas muestran cierta permeabilidad secundaria en coladas fracturadas o en zonas de contacto entre unidades geológicas, pero los caudales son exiguos y muy vulnerables a la explotación.

Desde el punto de vista climático, Fuerteventura presenta un régimen árido a hiperárido, con una precipitación media anual inferior a 100 mm, que en muchos años no supera los 50 mm en zonas bajas. Las lluvias son escasas, muy irregulares y concentradas en episodios puntuales de origen frontal o convectivo. La influencia de los alisios se percibe en forma de humedad ambiente, pero la "lluvia horizontal" apenas tiene relevancia hidroclimática, al faltar la altitud y vegetación necesarias para su aprovechamiento. La evapotranspiración potencial (ETP) oscila entre 1.300 y 1.700 mm/año, lo que impide una recarga efectiva salvo en episodios excepcionales.

En conjunto, el déficit hídrico estructural de Fuerteventura es el más severo del archipiélago. El binomio de una geología antigua y poco permeable con un clima extremadamente seco configura un escenario en el que la recarga natural es casi nula y la dependencia de fuentes no convencionales resulta ineludible. La isla no tiene márgenes hídricos; tiene que fabricarlos.

Fuentes de agua en la isla de Fuerteventura

La matriz hídrica de Fuerteventura depende casi por completo del mar. La desalinización de agua marina aporta cerca de 69 hectómetros cúbicos al año, lo que equivale al 87 % del volumen total movilizado. En la práctica, se trata de la única fuente capaz de garantizar el suministro urbano y turístico bajo condiciones aceptables de seguridad hídrica. Este modelo se estructura en torno a seis plantas principales, localizadas en Puerto del Rosario, Corralejo, Gran Tarajal y Morro Jable. Sin embargo, la producción no siempre se traduce en disponibilidad efectiva. Las deficiencias persistentes en las redes insulares —con pérdidas aún relevantes— condicionan el acceso real al recurso, especialmente en áreas rurales y sectores periféricos de la isla.

Tabla 2.18. Fuentes de agua en la isla de Fuerteventura (2019)

Recurso	Volumen (hm³/año)	% del total	Notas clave
Desalinización de agua de mar (EDAM)	68,9	87 %	Fuente estructural; seis plantas operativas.
Desalalinización de agua salobre	4,8	6 %	Instalaciones pequeñas y dispersas, uso mixto.
Agua regenerada (ERA)	5,3	7 %	Reutilizada principalmente en agricultura y zonas verdes.
Aguas subterráneas (pozos y sondeos)	< 1	< 1 %	Recurso marginal por baja calidad o salinidad elevada.
Aguas superficiales (presas, escorrentía)	≈ 0	0 %	Sin regulación superficial efectiva; escorrentía efímera e impredecible.

Fuente: elaboración propia (2025) y PHI

En segundo término, la desalinización de agua salobre, con algo menos de 5 hectómetros cúbicos anuales, conserva una cierta utilidad local, sobre todo en zonas interiores donde las captaciones subterráneas presentan valores de conductividad elevados, pero aún dentro de umbrales aprovechables. Se trata de instalaciones de pequeña escala, en su mayoría de titularidad privada o comunitaria, con un papel claramente complementario y sin relevancia estructural en el sistema insular.

La reutilización de aguas depuradas continúa en expansión, aunque con ritmos desiguales según el municipio. Se regeneran en torno a 5,3 hectómetros cúbicos al año, destinados en su mayor parte al riego agrícola, el mantenimiento de zonas verdes y campos de golf. Su aportación tiene un efecto directo sobre la demanda: permite liberar recursos de calidad potable y contribuye a minimizar los vertidos costeros. El desafío principal es doble: mejorar la calidad del tratamiento y extender las redes terciarias hasta los principales núcleos de consumo no potable.

El papel de las aguas subterráneas es actualmente muy limitado. El acuífero de Fuerteventura, con un grado elevado de salinización y escasa capacidad de almacenamiento, apenas aporta caudales estables. Allí donde lo hace, los volúmenes disponibles requieren tratamiento adicional o se restringen a usos muy específicos. En cuanto a las aguas superficiales, su contribución es prácticamente nula. Con una pluviometría media inferior a los 100 mm anuales, solo cuando llueve se aprovecha algo de escorrentía en las gavias o algunas charcas aisladas. Las escasas presas de materiales sueltos existentes funcionan como depósitos de regulación más que como infraestructuras de captación activa.

Consumo por sector de agua en la isla de Fuerteventura

Tabla 2.19. Consumo del agua en la isla de Fuerteventura (2019)

Uso	Demanda bruta (hm³/año)	% del total	Tendencia
Abastecimiento urbano	17,4	56 %	Ligero crecimiento por turismo residencial y población flotante.
Turismo (alojativo + actividades)	6,2	20 %	Alta intensidad en zonas costeras; uso concentrado en sur y norte.
Agricultura	4,8	15 %	Uso estabilizado, ligado a agua regenerada y cultivos forrajeros o leñosos.
Industria / energía / otros usos	2,5	9 %	Parques industriales, plantas de tratamiento y usos institucionales dispersos.

Fuente: elaboración propia (2025) y PHI

El patrón de consumo de agua en Fuerteventura refleja con nitidez la centralidad del abastecimiento urbano y la presión sostenida del turismo sobre un sistema hídrico altamente dependiente de recursos no convencionales. Más de la mitad de la demanda insular (56 %) corresponde al suministro urbano, que incluye tanto el consumo doméstico como el asociado a equipamientos públicos, comercio y servicios. La población empadronada, sin embargo, no explica por sí sola este volumen. El efecto acumulado de la población flotante —turismo residencial, alquiler vacacional y desplazamientos estacionales— genera una demanda constante incluso en los meses de menor actividad.

El turismo alojativo y recreativo absorbe otro 20 % del consumo insular, concentrado territorialmente en los ejes costeros del norte (Corralejo, Cotillo) y del sur (Morro Jable, Costa Calma). En estos núcleos, las plantas desalinizadoras operan con alta exigencia durante los picos de ocupación. A diferencia de otras islas donde parte de la demanda turística queda diluida dentro del consumo urbano, en Fuerteventura la huella hídrica del sector es más visible y específica. Infraestructuras como hoteles, piscinas, campos de golf o sistemas de refrigeración intensifican el consumo unitario por visitante.

La agricultura representa un 15 % del total. Aunque su peso es menor que en otras islas, mantiene un papel activo. El riego se nutre de aguas regeneradas, salobres tratadas y, de forma puntual, agua desalinizada. Se orienta principalmente a cultivos forrajeros vinculados a la ganadería caprina, explotaciones de aloe vera y, más recientemente, plantaciones de olivo. Es un sector con mejoras claras en eficiencia hídrica, pero dependiente del coste energético y de la estabilidad del recurso disponible.

El bloque industrial, energético y de otros usos representa un 9 %. Abarca consumos dispersos, aunque relevantes: parques industriales (El Matorral, La Hondura), infraestructuras portuarias, plantas de tratamiento, edificios institucionales o actividades recreativas no turísticas. Su retorno al sistema es escaso, y en muchos casos no reciclado, lo que obliga a valorar su impacto no solo en términos de volumen, sino también de presión estructural sobre el sistema.

En conjunto, Fuerteventura opera con un sistema hídrico tensionado. La demanda avanza a mayor ritmo que la capacidad efectiva de producción o distribución. El desafío no se limita a mantener el suministro, sino a hacerlo bajo criterios de sostenibilidad, eficiencia y resiliencia en un contexto climático cada vez más restrictivo.

Estado de las aguas subterráneas

Cuantitativo

Las aguas subterráneas han dejado de ser una fuente estructural en Fuerteventura desde hace décadas. La sobreexplotación histórica de pozos y sondeos, especialmente intensa durante el siglo XX, provocó un descenso sostenido del nivel freático. Este deterioro se vio agravado por la escasa capacidad de recarga del sistema insular, condicionado por la baja pluviometría, la alta permeabilidad y la falta de retención edáfica. En la actualidad, el volumen disponible es reducido y su aprovechamiento, cada vez más marginal.

Los aprovechamientos activos se concentran en las cuencas del sur (Jandía, Gran Tarajal) y del centro-este (Antigua, Tuineje), aunque los caudales son muy bajos y presentan alta variabilidad. Según el Plan Hidrológico de Demarcación 2021–2027, el índice de explotación global es bajo, pero esta condición no refleja equilibrio hidrogeológico, sino abandono. Se extrae poco porque el recurso restante ha perdido funcionalidad. Algunas masas, como Gran Tarajal o el sector norte de la isla, han sido clasificadas en riesgo de no alcanzar el buen estado cuantitativo. El descenso piezométrico continúa, aunque con menor intensidad desde la expansión de la desalinización, que ha reducido la presión sobre el acuífero.

Cualitativo

En términos cualitativos, la salinización constituye el principal problema. En muchas captaciones —tanto costeras como interiores— se registran concentraciones de cloruros superiores a 500 mg/L, y en varios casos superan los 1.500 mg/L,

lo que las sitúa dentro del rango de aguas salobres. Esta situación limita su uso directo para riego o abastecimiento, salvo que se apliquen tratamientos específicos. El fenómeno obedece a una combinación de factores: la intrusión marina progresiva y la disolución natural de materiales evaporíticos presentes en unidades geológicas antiguas del subsuelo.

Respecto a los nitratos, los niveles son en general moderados, aunque se detectan superaciones puntuales del umbral de 50 mg/L en zonas agrícolas con uso intensivo de fertilizantes nitrogenados. No se ha declarado ninguna zona vulnerable a nitratos en la isla, si bien el plan insular reconoce la necesidad de reforzar los programas de vigilancia y trazabilidad de usos agrícolas.

En cuanto a contaminantes emergentes, la evaluación aún es incipiente. No existe una red sistemática de seguimiento, aunque el documento de planificación prevé su incorporación en futuras campañas de control. Las captaciones cercanas a puntos de vertido sin depuración —todavía presentes en algunos núcleos urbanos— representan un posible vector de entrada de compuestos farmacéuticos o químicos industriales si no se corrige la situación actual.

En conjunto, el estado de las aguas subterráneas es deficiente, no tanto por sobreexplotación reciente como por un deterioro acumulado que la isla no ha conseguido revertir. La recuperación exigiría inversiones prolongadas, elevada complejidad técnica y una rentabilidad incierta. Por todo ello, el futuro hídrico de Fuerteventura se apoya en la desalinización, la reutilización y la mejora de la eficiencia, no en el bombeo subterráneo.

Cuestiones importantes y retos de futuro

Fuerteventura ha alcanzado un punto de inflexión en su modelo hídrico. La dependencia de fuentes no convencionales ya no es una decisión estratégica, sino una condición estructural. La discusión se traslada al terreno operativo: cómo garantizar la continuidad del sistema, reducir su vulnerabilidad energética y cerrar las brechas aún abiertas en el ciclo del agua.

La seguridad hídrica depende casi por completo de la desalinización de agua de mar, una solución efectiva pero expuesta a riesgos relevantes. No se trata solo de costes económicos: cualquier fallo en la producción o en la red de transporte puede afectar a núcleos poblacionales enteros. En este contexto, el plan insular establece como prioridad la instalación de 45 MW de energía renovable dedicada exclusivamente al ciclo del agua antes de 2030. El objetivo es doble: reducir la exposición a los picos de demanda eléctrica de las EDAM y disminuir una huella de carbono que ya supera las 180.000 tCO_2 anuales. A ello se suma la necesidad

urgente de digitalizar la red de distribución y de contener las pérdidas, que aún superan el 30 % en algunos tramos.

Otro eje crítico es la reutilización. Pese al crecimiento del volumen regenerado, su integración efectiva en la demanda no potable sigue siendo parcial. Las infraestructuras terciarias no cubren toda la superficie agrícola y faltan conexiones clave entre las EDAR y las zonas de cultivo. Proyectos como la conducción Gran Tarajal–Llanos de la Higuera o la valorización de efluentes en el entorno de Puerto del Rosario no son accesorios; son condiciones necesarias para liberar agua potable y estabilizar el sistema.

La contaminación difusa por nitratos representa una amenaza emergente. Aunque los niveles actuales no superan los umbrales críticos, persiste una incertidumbre significativa sobre su origen. No se ha determinado con claridad si responde al uso intensivo de fertilizantes, a la falta de saneamiento adecuado o a una combinación de ambos. Por ello, el Consejo Insular ha priorizado el diseño de una red de control más densa y específica antes de activar medidas correctoras de gran escala que podrían resultar ineficientes o injustificadas.

Desde el punto de vista ambiental, el estado cualitativo del acuífero solo mejorará si se reducen las extracciones residuales en zonas sensibles. Los modelos hidrogeológicos prevén un avance de la cuña salina de entre 100 y 200 metros hacia el interior en las próximas dos décadas, con mayor intensidad en las masas de Gran Tarajal y La Hondura. En respuesta, se propone la clausura progresiva de pozos obsoletos y su sustitución por aportes de agua desalinizada.

A nivel operativo, el control del recurso sigue siendo limitado. Numerosas extracciones —especialmente en explotaciones privadas de pequeña escala— carecen de sistemas de medición o transmisión telemática. La planificación insular propone actuar sobre tres ejes: instalar caudalímetros en origen, sectorizar redes y ajustar la oferta a la demanda real, no estimada. Mientras estas medidas no se generalicen, la persistencia de cortes no será excepcional.

La gobernanza también necesita adecuarse al sistema actual. La tarifa hídrica base (0,65 €/m³ en el consumo urbano) no refleja ni el coste ambiental ni el diferencial energético respecto a otras islas. El Consejo Insular estudia incorporar un recargo específico para grandes consumidores —en particular, el sector turístico— vinculado a su huella de carbono, así como implantar un sistema de trazabilidad digital que permita conocer consumos reales, detectar fugas y reforzar la transparencia. En un contexto de escasez estructural, desconocer el destino del recurso resulta más costoso que producirlo.

Por último, la gestión del riesgo climático exige avanzar en medidas de regulación y almacenamiento. Aunque el Plan de Gestión del Riesgo de Inundaciones (PGRI) incorpora un enfoque integral, todavía faltan soluciones concretas. Allí

donde las condiciones hidrogeológicas lo permitan, se plantea explorar proyectos piloto de recarga dirigida o almacenamiento subterráneo (MAR) para aprovechar de forma puntual los excedentes que puedan generar episodios extremos.

Tabla 2.20. Actuaciones propuestas para la mejora de la gestión del agua en la isla de Fuerteventura

Eje	Actuaciones destacadas 2021-27	Inversión prevista*
Producción	• Ampliación EDAM Corralejo (→ 15.000 m³/d) • Nueva EDAM Sur (hasta 15.000 m³/d)	62 M €
Almacenamiento	40+ nuevos depósitos: La Herradura (+25.000 m³), Bayuyo, Cruce La Araña, etc.	37 M €
Transporte/Distribución	Impulsión EDAM-Puerto del Rosario → La Herradura (DN 800), sectorización redes, renovación Lajares-El Roque...	59 M €
Control & gestión	Telemetría, detección de fugas isla completa	1,8 M €

Fuente: elaboración propia (2025) y PHI

8.6. Isla de Lanzarote

Lanzarote supera ya los 160.000 habitantes y recibe más de 3,4 millones de turistas al año, la isla carece de recursos hídricos naturales apreciables: llueve poco, los barrancos son efímeros y los escasos acuíferos están muy mineralizados. Su economía —cimentada en el turismo y los servicios— opera sobre la certidumbre de que la desalinización y, en menor medida, la reutilización cubrirá cualquier demanda.

Tabla 2.21. Datos socioeconómicos de Lanzarote

Indicador (último dato disponible)	Valor
Población residente (2024)	163.230 hab
PIB insular (2023, precios corrientes)	≈ 4.100 M €
PIB per cápita	≈ 25.000 €
Estructura económica	Servicios 83 % · Construcción 6 % · Industria 7 % · Primario < 1 %
Llegadas turísticas (2024)	3.406.911 visitantes
Superficie cultivada total (2023)	3.887 ha (75 % viñedo)
Principales usos agrícolas	Viña, batata, cebolla, aloe, hortícola bajo invernadero

Fuente: elaboración propia (2025)

Contexto geológico-climático

Lanzarote es el extremo oriental del archipiélago, de relieve suave y litología basáltica porosa sobre un basamento compacto de edad miocena. La pluviosidad media apenas roza 150 mm a^{-1} y la evaporación potencial supera los 1.400 mm a^{-1}; la recarga natural efectiva es, por tanto, insignificante. Los pocos niveles acuíferos —Peñas del Chache y Tahíche-Teguise— presentan transmisividades modestas y salinidad de partida elevada. En el macizo de Famara es el único donde existen galerías en la isla, pero con unos contenidos salinos que les hace incompatibles para cualquier uso, dado que drenan un acuífero muy fósil y prácticamente sin recarga.

Fuentes de agua disponibles

Dependencia absoluta de la desalación: nueve de cada diez litros que entran en la red provienen del mar.

Tabla 2.22. Fuentes de agua de la isla de Lanzarote

Recurso (2022)	$hm^3 a^{-1}$	%	Notas clave
Desalinización EDAM	38,6	88 %	5 plantas públicas (INALSA) + 12 privadas; consumo eléctrico 4,1 kWh m^{-3}
Agua regenerada	4,7	11 %	Tres EDAR con terciario; red morada en Tías-Yaiza y Arrecife
Aguas subterráneas	0,6	< 2 %	Captaciones históricas en Guatiza-Mala; hoy uso agrícola marginal
Aguas superficiales	≃ 0	–	Presas de jable colmatadas; escorrentía puntual

Fuente: elaboración propia (2025) y PHI

Consumos por sector (2022)

El reparto de consumos en Lanzarote muestra un perfil nítidamente dominado por el binomio abastecimiento urbano–turismo, con la agricultura relegada a un papel residual y la industria concentrada en usos logísticos vinculados a los puertos y a la zona de Montaña Blanca.

Abastecimiento urbano (incluye población residente + servicios públicos). Con algo menos de la mitad del volumen total, este bloque crece de forma lineal con la expansión residencial en los cinturones de Arrecife, Playa Honda y Costa Teguise. La dotación doméstica bruta ronda 220 L hab^{-1} día, valor razonable para un clima hiperárido, aunque con fugas en red que oscilan entre el 23 % y

el 26 % según el tramo. El Plan Hidrológico fija el objetivo de bajar a 15 % en 2027 mediante sectorización, renovación de tubería de fibrocemento y telemetría continua.

Turismo alojativo y recreativo. En torno a un tercio del consumo insular. La intensidad varía por núcleo: en Puerto del Carmen la demanda unitaria se sitúa en 410 L plaza^{-1} día (piscinas, riego ornamental, spa…), mientras que en Costa Teguise baja a 350 L. El turismo sustenta, de hecho, la producción base de las EDAM de Janubio y Punta de Los Vientos; cualquier pico de ocupación se traduce en sobrepresión eléctrica y, si coinciden vientos racheados o averías, en cortes puntuales.

Agricultura. un 20 % del total, concentrado en regadíos localizados de papa, vid volcánica (La Geria que ya hemos hablado anteriormente) y algo de aloe vera en Yaiza y Tinajo. El sector usa de forma creciente agua regenerada terciaria procedente de la EDAR de Arrecife; aun así, persiste cierta dependencia de agua desalinizada, lo que eleva el coste de producción en explotaciones de pequeña escala.

Industria y otros usos. El volumen es mínimo, pero no trivial: parques industriales de Playa Honda y Puerto Naos, plantas de hielo y lavado de pescado, y demandas del aeropuerto de Guacimeta. Estos consumos no retornan al ciclo y deben contabilizarse como extracción neta.

Tabla 2.23. Consumos por sector en la isla de Lanzarote (2022)

Uso	Demanda bruta (hm³ a⁻¹)	%	Tendencia
Abastecimiento urbano + servicios	14,9	48 %	Pérdidas altas (≈ 46 % agua no registrada)
Turismo	8,4	27 %	597 L por plaza y día; EDAM hoteleras integradas
Agricultura	6,1	20 %	Viñedo en jable, riego complementario por goteo
Industria y otros	1,6	5 %	Desalación, puertos y parques industriales

Fuente: elaboración propia (2025) y PHI

El consumo per cápita efectivo se sitúa en 461 L hab^{-1} día^{-1} al incluir la población turística equivalente, muy por encima de la media canaria.

Lanzarote no corre riesgo de déficit volumétrico mientras la capacidad de las desalinizadoras se mantenga por encima de la curva de demanda y el mix eléctrico soporte la carga. El cuello de botella es operativo: fugas, bombeos redundantes y, sobre todo, la volatilidad turística.

Reducir pérdidas y cerrar el ciclo con más agua regenerada permitirían desplazar hasta 2–3 $hm^3\ a^{-1}$ del consumo actual de desalinizada. A largo plazo, la resiliencia pasa por hibridar la producción con renovables firmes, flexibilizar la tarifa para penalizar consumos en punta turística y blindar la red con telemetría que anticipe fugas antes de que el agua, desalinizada y cara, se pierda bajo el suelo.

Estado de las aguas subterráneas

Cuantitativo

La lluvia apenas deja huella en el subsuelo lanzaroteño. La recarga natural se mueve por debajo de los 2 hm^3 al año; una cifra simbólica frente a las grandes cifras de la desalinización. Las extracciones agrícolas y el pequeño abastecimiento rural suman 0,6 hm^3, un volumen que, en términos insulares, parece inocuo, pero que en zonas concretas —Guatiza-Teguise, por ejemplo— supera la entrada y deja un descenso piezométrico de unos veinte centímetros cada año. No es un desplome dramático, aunque sí la señal de que incluso un uso marginal resulta insostenible cuando la naturaleza aporta tan poco.

Cualitativo

Aquí el problema cambia de cara: la salinidad manda. Los cloruros oscilan entre 700 y 1.200 mg/L, los sulfatos van altos y la conductividad rebasa con holgura los 3 mS/cm en buena parte de los sondeos. Los nitratos —40-60 mg/L en pozos puntuales— aparecen donde hay mucho abonado, pero no marcan la pauta: el verdadero escollo es la mezcla de sales que arrastra el viento y la evaporación, no los fertilizantes. Por ahora, los análisis no muestran contaminantes emergentes.

Aunque las extracciones subterráneas "oficiales" se limitan hoy a 0,6 hm^3/año, los descensos en Guatiza-Teguise siguen marcando ≈ 0,2 m/año. Con balances tan exiguos, basta un pequeño sobre-bombeo local para invertir el gradiente y forzar la intrusión salina. El PHI describe este fenómeno en los pocos sondeos activos: cloruros entre 700 y 1.200 mg/L y conductividades superiores a 3 mS cm^{-1}, valores muy por encima de los límites de potabilidad.

Esa salinidad —junto con sulfatos altos y algo de nitrato puntual— restringe el agua disponible a riego muy controlado o usos industriales no sensibles. Para consumo humano habría que aplicar ósmosis inversa o mezclas tan altas de desalinizada que la idea de "abastecerse del acuífero" pierde sentido operativo y económico.

En el caso de Timanfaya es un campo de lavas muy joven (erupciones 1730-1736 y 1824) formado por coladas basálticas escoriáceas superpuestas a antiguos paleosuelos y niveles traquíticos menos permeables. La lluvia media en la zona se mueve en torno a 120 mm a^{-1} y la ETP rebasa los 1.300 mm a^{-1}; la recarga natural estimada en el Plan Hidrológico de Lanzarote (PHI 2021-2027) es prácticamente nula (< 2 % de la precipitación). No hay barrancos ni galerías que sugieran un flujo subterráneo significativo (Consejo Insular de Aguas de Lanzarote, 2023).

Entre 2016 y 2020 circularon en la prensa insular varias noticias que hablaban de un "gran embalse subterráneo", de entre 12 y 17 hm^3, oculto bajo las coladas de Timanfaya. La hipótesis, recogida en un informe interno del Consorcio del Agua, se apoyaba en dos premisas: primero, que las lavas históricas habrían sellado un antiguo sustrato arcillo-traquítico poco permeable; segundo, que la lluvia caída desde las erupciones de 1730-1736 se habría ido acumulando en esa depresión basal durante casi tres siglos.

Sin embargo, ni el Plan Hidrológico de Lanzarote ni los estudios hidrogeológicos de referencia respaldan la existencia de ese lago freático.

Las prospecciones sísmicas y gravimétricas llevadas a cabo describen más bien una masa fisurada y discontinua, compatible con pequeños volúmenes de agua, pero no con un reservorio continuo.

Incluso en el escenario más optimista —suponer que bajo Timanfaya existiera un embalse subterráneo continuo de 15 hm^3 de agua dulce y de calidad aceptable— el hallazgo difícilmente alteraría la balanza hídrica insular. Lanzarote produce hoy más de 23 hm^3 al año solo para cubrir abastecimiento doméstico y turístico; si añadimos agricultura y usos industriales, la oferta de agua son aproximadamente más de 30 hm^3 anuales. Eso significa que el hipotético lago freático, bombeado a pleno rendimiento, no llegaría a cubrir seis meses de consumo —y eso sin descontar las inevitables mermas de explotación, las pérdidas en red o la necesidad de reservar un volumen mínimo para evitar intrusión salina.

En otras palabras, aun existiendo, aquel "gran embalse" no daría ni para un año de servicio y dejaría a la isla de nuevo a merced de la desalinización al término de la campaña.

La magnitud de la brecha entre recursos naturales y demanda real confirma que Lanzarote depende estructuralmente del agua producida, no del agua infiltrada, y que cualquier reserva subterránea eventual solo funcionaría como colchón de emergencia, nunca como fuente base de suministro.

Por último, Timanfaya es Parque Nacional desde 1974; cualquier captación supondría una afección directa al valor geológico y a la Red Natura 2000. Incluso si el acuífero existiera, la compatibilidad legal y social sería mínima.

Cuestiones importantes y retos de futuro

Dependencia externa. Sin recursos superficiales y con infiltraciones limitadas, la seguridad hídrica descansa en plantas de ósmosis inversa vulnerables a fallos energéticos y a la volatilidad del precio del kWh.

Almacenamiento corto. Los depósitos insulares sólo garantizan 2,8 días de abastecimiento medio; cualquier avería prolongada tensiona el servicio.

Escenario climático. Las proyecciones indican lluvias más escasas y eventos extremos más frecuentes, con mayor evaporación. El margen operativo se estrechará todavía más.

Concentración turística. Municipios como Tías o Yaiza soportan puntas de consumo muy superiores a la población de derecho; buena parte de los complejos hoteleros opera en régimen de autoservicio, fuera de la red insular.

Pérdidas en red. El 51 % del agua que entra en distribución no se factura: fugas, fraudes o medición deficiente elevan los costes energéticos y la huella de carbono sin aportar servicio público.

Sector agrario. El regadío —limitado, pero socialmente estratégico— recibe dotaciones medias de 2.330 m^3 ha-año; la modernización de conducciones y la extensión de agua regenerada son claves para su viabilidad.

Saneamiento desigual. Arrecife dispone de red casi completa, pero en núcleos interiores persisten fosas y emisarios sin depuración terciaria.

Vertidos pendientes de regularización. El 69 % de los puntos de descarga al mar carece de autorización vigente; la masa costera "Este de Lanzarote" concentra 26 de esos puntos.

Salmueras y contaminantes emergentes. La coexistencia de múltiples desalinizadoras pequeñas multiplica los vertidos de salmueras; los datos sobre contaminantes emegentes son aún escasos, lo que dificulta la evaluación ecológica real.

Hábitats dependientes. Lagunas costeras, saladares y acuíferos litorales sostienen especies endémicas sensibles a la sobre explotación del acuífero y a la intrusión marina.

Objetivos de conservación. La red Natura 2000 cubre el 69 % de la isla; las necesidades hídricas de sus hábitats requieren cuantificación rigurosa para integrar caudales ambientales en la planificación.

Recuperación insuficiente. Las tarifas actuales no internalizan el coste ambiental ni el energético completo; el turismo en autoservicio abona electricidad, pero elude cánones de extracción y vertido.

Coordinación dispersa. Gobierno autonómico, Cabildo, ayuntamientos, consejos insulares y comunidades de usuarios comparten competencias sin un órgano

estable de decisión técnica; esto retrasa autorizaciones y dificulta la fiscalización de datos.

Zonas potencialmente inundables. Los barrancos secos pueden concentrar escorrentías torrenciales; la integración del Plan de Gestión del Riesgo de Inundación con el Plan Hidrológico aún es incipiente.

Brecha de información. Faltan series meteorológicas completas, registros de extracción en tiempo real y un sistema geográfico único accesible a todas las administraciones.

Retos prioritarios:

- Reducir pérdidas a menos del 25 % mediante sectorización, telegestión y renovación de tuberías.
- Diversificar el mix: más regeneración para riego y usos urbanos no potables, y desalinización vinculada a renovables para amortiguar la factura energética.
- Refuerzo del almacenamiento con nuevos depósitos estratégicos y acuerdos de interconexión entre centros productores.
- Finalizar el censo de vertidos y exigir pretratamientos que faciliten la reutilización segura.
- Implantar cánones ambientales y tarifas por bloques que penalicen el sobreconsumo, incluidos los autoservicios turísticos.
- Consolidar un sistema insular de información del agua que alimente la planificación con datos verificados y abiertos.
- Evaluar caudales ecológicos y planes de gestión de hábitats para garantizar la compatibilidad entre producción, abastecimiento y conservación.

La isla ha demostrado capacidad técnica para producir agua donde la naturaleza no la aporta. El paso siguiente exige eficiencia, control y transparencia: cada metro cúbico desalinizada debe llegar a destino con el menor coste energético y el mayor retorno social. Sólo así Lanzarote podrá sostener su economía, proteger sus ecosistemas y adaptarse a un clima cada vez más incierto.

8.7. Isla de El Hierro

La población de derecho alcanzó los 11.806 habitantes en 2024 (ISTAC) con un marcado envejecimiento demográfico. El 78 % de la población ocupada se concentra en el sector servicios, mientras que la agricultura y la pesca representan todavía el 11 % y siguen siendo determinantes para el paisaje rural, centradas en

cultivos de plátano, piña tropical y viña en pequeñas explotaciones familiares. El PIB insular depende cada vez más del turismo de naturaleza (buceo y senderismo), lo que induce picos estacionales de demanda de agua en las zonas costeras orientales (La Restinga, Tamaduste). El peso insular sobre la economía canaria se mantiene en torno al 0,5 % del PIB regional, con un PIB per cápita de 15.934 € (2020). Tomando como referencia el PIB regional de 54.279 M € en 2023, el PIB insular se estima en ≈ 270 M €.

Tabla 2.24. Aspectos socioeconómicos en la isla de El Hierro

Indicador (último dato disponible)	Valor
Población residente (2024)	11.806 hab
PIB insular (estim. 2023)	≈ 270 M €
PIB per cápita (2020)	15.934 €
Estructura económica	Servicios 74,3 % · Construcción 7,6 % · Industria 6,0 % · Primario 12,1 %
Llegadas de pasajeros (2022)	274.000 aéreos · 171.000 marítimos
Superficie cultivada total (2023)	≈ 1.400 ha (piña ≈ 130 ha, plátano ≈ 400 ha, viña ≈ 200 ha)

Fuente: elaboración propia (2025)

Contexto geológico-climático

El Hierro constituye el edificio volcánico más joven (≈ 1 Ma) del sector occidental. Tres dorsales radiales configuran una topografía en tobas basálticas altamente permeables que descansan sobre lavas almohadilladas de menor conductividad. La altitud culmina en el pico de Malpaso (1.501 m s.n.m.). La pluviometría anual oscila entre < 150 mm en La Restinga y > 900 mm en las vertientes de barlovento, con gradientes altitudinales acusados y episodios torrenciales invernales, con una evapotranspiración potencial media de 750–900 mm. Las temperaturas medias oscilan entre 15 °C (cumbres) y 22 °C (litoral). La recarga efectiva se ha estimado entre el 10 y el 25 % de la precipitación, concentrándose en las zonas altas de las dorsales gracias a la fuerte porosidad primaria de los basaltos fisurados. La recarga efectiva se concentra en las cotas intermedias, donde la nube horizontal aporta hasta 120 mm a^{-1}

Fuentes de agua disponibles

La recarga neta, dominada por infiltración orográfica y lluvia horizontal, aporta unos 11,6 hm^3 a^{-1} a los tres acuíferos insulares. La extracción consolidada (≈ 2

$hm^3\ a^{-1}$) mantiene el índice de explotación global en 0,17, claramente holgado. Solo el Valle de El Golfo roza la franja de estrés (0,50) debido a su baja superficie de recarga y al bombeo intensivo para riego.

La capacidad de desalinización instalada cubre el 25 % de la demanda agrícola de un año seco extremo; su ampliación (dos EDAM portátiles contratadas en 2024) reforzará la garantía frente a episodios prolongados de alisio débil.

Tabla 2.25. Fuentes de agua en la isla de El Hierro

Recurso (2021)	$hm^3\ a^{-1}$	%	Comentarios
Aguas subterráneas (pozos, galerías, manantiales)	2,12	52 %	Extracción concentrada en Los Padrones y Valle de El Golfo. Tres masas basálticas bien individualizadas. Extracción: 1,71 hm^3 (Valle de El Golfo), 0,10 hm^3 (Valverde-Zona Oriental), 0,14 hm^3 (El Julán); índice de explotación medio 0,17, con valor pico 0,50 en El Golfo
Desalinización de agua de mar	1,90	46 %	Dos EDAM costeras y varias potabilizadores portátiles cubren la punta de demanda y garantizan la continuidad en sequía
Agua regenerada	0,02	1 %	Reutilización agrícola estable desde 2018; margen de crecimiento limitado por falta de redes separativas

Fuente: elaboración propia (2025) y Consejo Insular de Aguas de El Hierro

Consumos por sector

Tabla 2.26. Consumo de agua en la isla de El Hierro (2021)

Sector	Demanda ($hm^3\ a^{-1}$)	% sobre el total	Origen dominante	Comentarios operativos
Agrario	1,90	52,9 %	Subterránea (1,40 hm^3) + desalada (0,25 hm^3) + regenerada (0,02 hm^3)	412 ha de riego localizado; predominio de piña tropical, hortaliza bajo invernadero y forraje
Urbano-doméstico	1,59	44,3 %	Desalada (0,85 hm^3) + subterránea (0,66 hm^3)	Tres núcleos principales; pérdidas de red ≈ 22 % según auditoría 2022
Industrial y servicios	0,10	2.8 %	Subterránea (0,06 hm^3) + desalada (0,02 hm^3)	Pequeña agro-industria exportadora; un matadero y planta de empaquetado

Fuente: elaboración propia (2025) y Consejo Insular de Aguas de El Hierro

Estado de las aguas subterráneas

Cuantitativo

La estabilidad piezométrica registrada entre 2017 y 2021 —con oscilaciones inferiores a ±0,2 m y sin evidencia de abatimiento sistemático— coincide plenamente con los datos recogidos por la red de control del acuífero insular desplega-

da por el proyecto europeo ARSINOE. Esta red monitoriza en continuo (cada dos horas) parámetros clave como nivel freático, conductividad eléctrica y temperatura del agua subterránea, proporcionando una serie temporal de alta resolución. Los resultados confirman un comportamiento estable del sistema hidrogeológico, al menos en las zonas instrumentadas, lo que valida tanto la estimación del índice de explotación como la interpretación de la presión hídrica actual como moderada. Este seguimiento instrumental refuerza la capacidad de alerta temprana ante posibles desequilibrios y representa una base sólida para la planificación adaptativa a medio plazo.

Cualitativo

Estado químico general: las tres masas subterráneas cumplen los umbrales de la DMA para cloruros, nitratos y metales; se clasifican en "buen estado químico" (2021).

Intrusión marina: el acuífero de El Golfo presenta conductividades > 1,5 mS cm^{-1} en la franja de 0-50 m s.n.m.; la cuña salina permanece estacionaria gracias al gradiente descendente del cono de descarga y al aporte continuo de agua desalinizada que sustituye parte de las extracciones.

Nutrientes: los nitratos rara vez superan 15 mg L^{-1}, salvo en pie de monte oriental donde el abonado de fincas forrajeras genera pulsos > 25 mg L^{-1} tras lluvias otoñales.

Cuestiones importantes y retos de futuro

La isla de El Hierro mantiene, en términos generales, una posición hidrológica estable. La combinación de baja presión demográfica, elevada cobertura por desalinización por agua de mar y un índice de explotación subterránea inferior al 0,20 genera un contexto de aparente resiliencia. Este colchón hídrico permite atender la demanda agrícola y urbana en condiciones ordinarias, con cierta holgura incluso ante episodios secos moderados.

Con todo, el análisis técnico revela vulnerabilidades concretas que exigen intervención. La más significativa se localiza en el Valle de El Golfo, cuya dependencia casi exclusiva del acuífero costero lo expone a intrusión marina. Basta un descenso piezométrico puntual de 3 a 4 metros para permitir el avance de la cuña salina, por lo que urge ensayar programas de recarga gestionada mediante inyección de excedentes invernales en zonas altas de la dorsal.El proyecto GENESIS, continuará hasta el 2028 los trabajos comenzados por el proyecto europeo ARSINOE en la caracterización del acuífero de El Golfo y en particular de sus captaciones más importantes, para el control de la intrusión marina.

Pese a que la situación actual del acuífero del Valle de El Golfo es funcional, su carácter estratégico y la creciente presión sobre sus recursos aconsejan una evaluación más detallada de su potencial a medio plazo. Sería conveniente promover nuevas prospecciones hidrogeológicas, especialmente orientadas a identificar zonas con capacidad de almacenamiento y recarga sostenida.

Por tanto, convendría estudiar la viabilidad de ejecutar nuevas obras de captación subterránea en forma de pozos-galería de drenaje, similares al sistema de Los Padrones. Este tipo de infraestructura permite interceptar flujos subhorizontales en zonas basálticas profundas con un coste energético contenido. Cualquier intervención de este tipo debe estar precedida de un estudio hidrogeológico específico que combine sondeos exploratorios, análisis piezométrico y caracterización geoquímica.

Además, el uso de técnicas geofísicas no invasivas —como los sondeos magnetotelúricos[19]— permitiría modelizar la geometría del acuífero, delimitar posibles barreras internas y estimar el volumen útil almacenado. Esta aproximación integrada facilitaría una planificación racional de nuevas captaciones, evitando interferencias con el gradiente natural de descarga y reduciendo el riesgo de salinización inducida.

Explorar el subsuelo de El Golfo con criterios científicos y herramientas modernas no sólo ampliaría el conocimiento hidrogeológico insular, sino que permitiría incorporar nuevas fuentes de agua de forma controlada, segura y compatible con la protección de las reservas actuales.

En paralelo, el 22 % de pérdidas en red representa una ineficiencia estructural que debe corregirse. La sectorización hidráulica y la telemetría de cabeceras permitirían recuperar más de 0,5 $hm^3\ a^{-1}$ sin necesidad de nuevas obras de captación. Esta actuación, además, es fácilmente financiable con los mecanismos de canon ya vigentes.

En cuanto a la diversificación de fuentes, se recomienda reforzar la capacidad de desalinización en los extremos insulares —La Restinga y Puerto de La Estaca— para garantizar suministro en escenarios de sequía prolongada. El margen de mejora en reutilización también es notable: pasar de los actuales 0,02 a 0,15 $hm^3\ a^{-1}$ cubriría el 8 % de la demanda agrícola del Golfo, reduciendo la extracción en zonas sensibles.

La interacción agua–energía no puede quedar al margen. El sistema hidroeólico de Gorona del Viento requiere mantener una lámina estable de 0,25 hm^3;

[19] Los sondeos magnetotelúricos (MT) son una técnica geofísica que permite estudiar el interior de la Tierra (hasta varios kilómetros de profundidad) sin necesidad de perforar, aprovechando variaciones naturales del campo eléctrico y magnético del planeta.

afinar los ciclos de turbinado e integración con la red insular puede generar sinergias relevantes en la gestión hídrica.

El marco institucional exige una gobernanza técnica más coordinada. Tres ayuntamientos y el Cabildo insular operan unas 120 captaciones, pero sin un sistema unificado de control. Integrar los caudalímetros en un portal público y aplicar una tarificación volumétrica única (0,70 €/m³, con posibles modulaciones por eficiencia) facilitaría la planificación, promovería el ahorro y reforzaría la equidad.

En síntesis, El Hierro dispone de recursos suficientes, pero la garantía hídrica futura dependerá de avanzar decididamente en tres frentes: modernizar las redes, activar la recarga artificial y ampliar la reutilización. La sostenibilidad ya no depende de encontrar más agua, sino de gestionar mejor la que ya se tiene.

8.8. Isla de La Gomera

La Gomera es pequeña en superficie, pero posee una economía que combina agricultura tradicional, empleo público y un turismo sosegado que crece con el senderismo y el alojamiento rural. Su población apenas sobrepasa los veintidós mil habitantes, sin grandes oscilaciones estacionales; en cambio, el flujo de visitantes —todavía lejos de las cifras masivas de otras islas— roza ya los setecientos mil viajeros al año, una magnitud considerable para la escala gomera. El PIB insular ronda los 410 M €, con un peso del sector servicios que supera el 80 %. La agricultura mantiene algo menos de 3.000 ha cultivadas, repartidas en terrazas fértiles de platanera, frutales subtropicales y viñedo. La tabla siguiente resume estos datos socio-económicos.

Tabla 2.27. Datos socio-económicos de la isla de La Gomera

Indicador (último dato disponible)	Valor
Población residente (2024)	22.436 hab.
PIB insular (2019)	≈ 411 M €
PIB per cápita (2020)	≈ 15.400 €
Estructura económica	Servicios 83 % · Construcción 5 % · Industria 3 % · Primario 4 %
Llegadas turísticas (2024)	703.000 visitantes
Superficie cultivada total (2023)	≈ 2.900 ha
Principales usos agrícolas	Plátano, mango-papaya, viña, hortaliza de bancal

Fuente: elaboración propia (2025)

La combinación de un relieve abrupto —con la Caldera de Garajonay como núcleo nuboso— y un turista que busca rutas verdes dibuja un panorama donde la presión hídrica no procede de la masa, sino de la orografía y la dispersión. Esa es la clave para entender por qué cada litro de agua, aunque parezca abundante en las cumbres, llega con dificultad a los bancales costeros y a los alojamientos rurales diseminados.

Contexto geológico-climático

La Gomera es un edificio volcánico antiguo, no activo—las últimas lavas datan de hace unos 2 Ma— modelado desde entonces por una erosión incansable que ha excavado barrancos profundos y dejado al descubierto una intrincada red de diques radial-concéntricos. La isla carece de caldera colapsada como Tenerife o Gran Canaria; en su lugar, el corazón geomorfológico es la meseta de Garajonay, coronada a 1.487 m y tapizada por laurisilva, auténtica "máquina" de captación de humedad.

Desde el punto de vista hidrogeológico, domina un acuífero fisural discontinuo. Las coladas basálticas, muy alteradas, alternan con paleosuelo arcilloso y niveles piroclásticos poco permeables que fraccionan el flujo vertical. El resultado es una sucesión de lentes colgadas y pequeños manantiales que drenan rápidamente hacia los barrancos. No existe un nivel freático insular único: cada cuenca funciona casi como un sistema independiente con tiempos de tránsito cortos.

El clima refuerza esa fragmentación. La vertiente norte, expuesta al alisio, recibe la mayor parte de la lluvia y de la lluvia horizontal:

- Precipitación media: 850 mm a^{-1} en la dorsal de Garajonay; < 200 mm a^{-1} en la costa sur.
- Lluvia horizontal (nieblas estratificadas): hasta 300 mm a^{-1} entre 600–1.200 m s.n.m., captada por el dosel de la laurisilva.
- Evapotranspiración potencial: 900–1.100 mm a^{-1}; el gradiente térmico aísla zonas húmedas de otras semiáridas.

Este contraste altitudinal y pluviométrico genera una recarga muy focalizada —fundamentalmente en la corona forestal— y explica por qué los manantiales costeros del sur presentan salinidad creciente y caudales cada vez más irregulares.

Fuentes del agua en la isla de La Gomera

La tabla 2.28 confirma que La Gomera todavía vive, sobre todo, del agua que se obtiene de su propio interior. Las captaciones subterráneas —manantiales, po-

zos, sondeos y galerías— aportan algo menos de siete hectómetros al año, prácticamente el ochenta por ciento de todo el caudal movilizado.

Las presas de cabecera, quince en activo y una decena con capacidad marginal, completan la ecuación. Juntas almacenan apenas un millón y medio de metros cúbicos en un año medio —lo justo para amortiguar un invierno seco y garantizar el riego escalonado de las huertas de bancal —. Su papel es estratégico, no volumétrico: recogen las avenidas que de otro modo se perderían por los barrancos.

La desalinización de agua de mar entra en escena de forma modesta, pero reveladora. Dos pequeñas plantas privadas suman poco más de medio hectómetro: una abastece a un complejo hotelero y al campo de golf de Tecina; la otra, a la naviera y al casco de San Sebastián en picos de demanda.

La reutilización es testimonial por el momento: cien mil metros cúbicos al año, procedentes de tertiarios piloto en Valle Gran Rey y un proyecto rural en Alajeró. El volumen es testimonial, pero marca el camino. Cada metro cúbico regenerado que riega un platanal es un metro cúbico subterráneo que no se bombea, un gasto energético que se evita y un vertido que ya no alcanza la costa. En un territorio sin margen hídrico, ese metro cúbico vale el doble.

Tabla 2.28. Fuentes de agua de la isla de La Gomera (2019)

Recurso	$hm^3\ a^{-1}$	% del total	Notas clave
Aguas subterráneas (sondeos, pozos, galerías, manantiales)	6,8	75 %	Captaciones dispersas; 74 aprovechamientos activos → nivel piezométrico en descenso ligero; principal soporte del abastecimiento urbano y del riego tradicional
Aguas superficiales embalsadas (presas de cabecera)	1,5	17 %	26 presas públicas; las cinco mayores (Amalahuigue, La Encantadora, Mulagua, Chejelipes, La Palmita) concentran el 68 % de la capacidad
Desalinización de agua de mar (EDAM de autoservicio)	0,6	7 %	Plantas privadas de pequeña escala (Hotel Jardín Tecina y Fred. Olsen) orientadas a usos turísticos y golf, pero decisivas como respaldo en San Sebastián y Playa Santiago
Agua regenerada (ERA)	≈ 0,1	1 %	Caudal aún testimonial; primeras líneas terciarias en Valle Gran Rey y proyectos EDAR rurales en marcha

Fuente: Elaboración propia (2025) y PHI

Consumos por sector en la isla de La Gomera

El reparto de la demanda confirma un patrón hidráulico típico de islas medias, aunque con singularidades gomeras. La agricultura absorbe algo más de la mitad del recurso (5 hm^3). No se trata de regadíos extensivos, sino de bancales escalonados, regados casi en su totalidad por goteo. Esa modernización ha recortado el

consumo unitario, pero la platanera —cultivo dominante— sigue siendo demandante hídricamente y muy sensible a la salinidad. La presión resultante se concentra en valle Hermigua, Valle Gran Rey y las terrazas del norte, donde los manantiales deben cubrir picos estacionales que duplican el caudal de base.

El abastecimiento urbano consume 2,6 hm^3, cerca del 30 % del total. El dato es razonable para veintidós mil habitantes y varios núcleos dispersos, pero la eficiencia de la red tiene margen de mejora: las fugas se sitúan en torno al 18 %. Cada punto porcentual que se reduzca equivale, en la práctica, a un ahorro de cuarenta mil metros cúbicos; volumen que podría derivarse a reforzar reservas en el estiaje o a aliviar la extracción en pozos costeros.

El turismo, con 0,8 hm^3 (9 %), presenta un consumo unitario alto—alojamientos con piscina, lavanderías y servicios de restauración intensos—pero distribuido en pocos focos: San Sebastián, Valle Gran Rey y Playa Santiago. Esa concentración facilita la planificación de fuentes no convencionales (por ejemplo, ofrecer agua regenerada a campos de golf y jardines en lugar de potable).

El bloque industria-energía-otros suma 0,7 hm^3. Son caudales discontinuos vinculados a pequeñas industrias alimentarias, puertos y dependencias públicas. Su relevancia está en la escasa tasa de retorno al sistema: el agua se consume y no se recircula, por lo que esas captaciones equivalen a extracciones netas.

En conjunto, la demanda gomera ronda los 9 hm^3 anuales, cifra ajustada a la oferta natural y al aporte de embalses. El sistema funciona, pero con pocas reservas operativas. Cualquier desviación —un invierno seco, un pico turístico inesperado o un fallo en la infraestructura— puede desestabilizar el balance. De ahí la importancia estratégica de minimizar pérdidas y ampliar la reutilización avanzada antes de plantear nuevas perforaciones o captar caudales de crecida que casi nunca se repiten.

Tabla 2.29. Consumo de agua de la isla de La Gomera (2019)

Uso	Demanda bruta ($hm^3\ a^{-1}$)	% del total	Notas clave
Agricultura	5,0	55 %	Riego de platanera en bancales del norte y medianías; goteo generalizado
Abastecimiento urbano	2,6	29 %	13 municipios, red con fugas ≈ 18 %; presión estival moderada
Turismo (alojativo + servicios)	0,8	9 %	Hoteles y apartamentos en Valle Gran Rey, San Sebastián y Playa Santiago
Industria / energía / otros servicios	0,7	7 %	Pequeña agro-industria, puertos, centros públicos dispersos

Fuente: Elaboración propia (2025) y PHI

Estado de las aguas subterráneas

Cuantitativo

El estado cuantitativo en términos globales La Gomera no extrae aguas subterráneas por encima de sus posibilidades. Las extracciones declaradas (≈ 6,8 hm^3 a-1) suponen poco más de un tercio de la recarga estimada —unos 18 hm^3 a-1 según el balance SIMPA[20]—, de modo que el índice de explotación insular ronda 0,35.

En la masa ES70LG004 (Valle Gran Rey-Argaga) el indicador sube hasta 0,65 y los niveles piezométricos caen entre 0,20 y 0,40 m por año desde 2015, señal de una presión local que la red de control califica ya de "riesgo de no alcanzar el buen estado cuantitativo". El resto de masas se mueve entre 0,20 y 0,45, con descensos más suaves (≤ 0,10 m a-1) o fases de estabilización cuando la pluviosidad invernal acompaña.

Cualitativo

En relación al estado cualitativo, la calidad presenta luces y sombras. En los manantiales de cumbre y medianías los cloruros oscilan entre 50 y 150 mg L^{-1}, valores aptos para consumo sin mezcla. La fotografía cambia en la franja litoral sur-suroeste: pozos de Playa de Santiago y Charco del Conde registran puntas de 600-850 mg L^{-1}, clara evidencia de intrusión marina favorecida por bombeos continuados y baja recarga directa. Los nitratos se mantienen, en general, por debajo de 25 mg L^{-1}; las superaciones puntuales —hasta 60 mg L^{-1}— se concentran en bancales de platanera con fertilización intensiva y escaso lavado del suelo. Todavía no se han detectado concentraciones preocupantes de contaminantes emergentes, aunque el PHI ha iniciado un muestreo piloto para PFAS[21] y fármacos en pozos próximos a EDAR y vertidos costeros.

En síntesis, el acuífero gomero goza de buena salud a escala insular, pero arrastra fragilidades muy localizadas: descenso sostenido y salinización progresiva en la costa SW y, en menor medida, en la desembocadura del barranco de Hermigua.

---

[20] SIMPA es el acrónimo de Sistema Integrado de Modelización Precipitación-Aportaciones, una herramienta desarrollada por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (Ministerio para la Transición Ecológica, España). Su propósito es estimar, con base mensual y en malla de 1 × 1 km, el balance hídrico natural de cualquier cuenca o demarcación, incluidas las islas.

[21] Los PFAS: Per- and polyfluoroalkyl substances (sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas). Son contaminantes emergentes persistentes en el medio ambiente, de preocupación creciente por su toxicidad y bioacumulación.

La receta pasa por limitar extracciones costeras, reforzar el riego con agua embalsada o regenerada y vigilar, con analíticas frecuentes, la deriva química que marca la frontera entre agua dulce y agua que empieza a saber a mar.

Cuestiones importantes y retos de futuro

Garantizar el agua en La Gomera pasa, primero, por blindar la captación natural de la corona de laurisilva. Los manantiales del Parque Nacional de Garajonay mantienen su caudal gracias a la niebla orográfica; cualquier alteración del dosel —como por ejemplo un incendio forestal— se traduce en un descenso inmediato de la descarga base.

El Cabildo y el Organismo Autónomo de Parques deben coordinar planes de silvicultura preventiva y, cuando proceda, de restauración hidrológica de barrancos cabeceantes para evitar pérdidas súbitas de caudal.

En las redes de distribución el reto es doble. Por un lado, renovar tramos de fibrocemento envejecido cuyo rendimiento hidráulico cae año tras año; por otro, sectorizar y telemedir para bajar las fugas por debajo del 10 %. Los caudalímetros inteligentes permitirán localizar roturas en tiempo real y ajustar la cloración a un caudal efectivo, no nominal.

La calidad química exige vigilancia. La intrusión salina avanza silenciosa en pozos costeros de Valle Gran Rey y Playa de Santiago: cloruros por encima de 600 mg L^{-1} marcan el límite de potabilidad sin mezcla. Frenar ese avance depende de reducir bombeos sostenidos y, cuando sea viable, de inyectar excedentes invernales o efluentes terciarios pulidos en zonas de transición. Para hacerlo con seguridad se necesitan modelos numéricos finos de la interfaz dulce-salada y, sobre todo, controles analíticos regulares.

El cambio climático complica el tablero. Los escenarios regionales hablan de un 8 % menos de lluvia y +1 °C de temperatura media hacia 2050. El resultado inmediato será una ventana de recarga más corta y eventos de lluvia más concentrados. El Plan de Sequía ya establece que, si los caudales de los manantiales principales caen por debajo de 120 L s^{-1} o el nivel útil de las presas baja del 25 %, se activarán restricciones y se priorizará el agua regenerada para riego.

En relación a la gobernanza. La isla suma cerca de doscientas comunidades de agua con derechos históricos. Integrar esa pluralidad en un sistema digital de cuotas y tarifas transparentes es vital para recuperar costes y evitar conflictos. El borrador de ordenanza propone una tarifa base de 0,55 €/m^3, con recargo del 20 % cuando la extracción se realice en masas catalogadas como "en riesgo". El reto no es técnico, es cultural: pasar de la fuente comunal al caudalímetro inteligente sin perder la cohesión social que ha hecho posible regar en bancales verticales durante cinco siglos.

9. Impactos del cambio climático en los recursos hídricos de Canarias

Canarias ya está notando el cambio climático en sus fuentes de agua. Llueve menos, más irregular, y los acuíferos no se recargan como antes. No es futuro: es ahora. En las últimas cinco décadas, Canarias ha registrado un cambio climático tangible.

Los datos observacionales revelan un aumento sostenido de las temperaturas medias, especialmente durante los meses cálidos, acompañado de una mayor demanda evaporativa atmosférica. Entre 1961 y 2013, estudios como el de Vicente-Serrano et al. (2016) constataron un incremento significativo en la evapotranspiración potencial, vinculado a la disminución de la humedad relativa y al ascenso térmico. Al mismo tiempo, se han documentado alteraciones en los patrones de precipitación, con una disminución progresiva del volumen anual acumulado y una concentración estacional más irregular. Este doble efecto —más calor y menos lluvia— ha modificado de forma medible el balance hídrico insular (Herrera & Custodio, 2014).

Las consecuencias sobre la recarga de los acuíferos son evidentes. En un sistema donde la mayoría del recurso hídrico proviene de la infiltración natural en medios volcánicos de alta permeabilidad, cualquier variación en la lluvia o en la temperatura altera la dinámica de recarga. La combinación de una menor pluviometría con una mayor evapotranspiración reduce la fracción de agua que alcanza el nivel freático. Esto no solo merma el volumen disponible, sino que altera el comportamiento hidrogeológico de las masas de agua subterránea, que presentan una alta inercia y una respuesta retardada ante los cambios climáticos (Engott et al., 2017; Luoma & Okkonen, 2014).

Los modelos climáticos regionalizados —incluidos los derivados del IPCC y de simulaciones específicas para el archipiélago— proyectan un escenario de intensificación de las condiciones actuales: mayor aridez, incremento en la frecuencia e intensidad de sequías y reducción progresiva del recurso disponible (Assefa & Woodbury, 2013).

Estos modelos han sido actualizados con una resolución mayor en la plataforma SICMA con proyecciones hasta 2100 y resoluciones de 100 x100 metros (Santamarta et al., 2025). A esto se suman fenómenos indirectos como la elevación del nivel del mar, que amenaza con incrementar la intrusión salina en los acuíferos costeros ya sobreexplotados. En zonas como el sureste de Tenerife o el litoral de Fuerteventura, este proceso podría comprometer la disponibilidad de agua dulce si no se adoptan medidas preventivas (Herrera & Custodio, 2014).

La creciente vulnerabilidad del sistema hídrico canario no se limita a la oferta. También se prevé un aumento de la presión sobre la demanda. Sectores clave como la agricultura, el turismo y el abastecimiento urbano competirán por un recurso cada vez más escaso, con el consiguiente riesgo de conflictos sectoriales. La agricultura, en particular, se verá expuesta a un escenario crítico si no se adapta a fuentes no convencionales o a estrategias de eficiencia (Luoma & Okkonen, 2014).

Ante este contexto, las estrategias de adaptación no son opcionales. Soluciones como la reutilización de aguas depuradas, la desalinización de agua de mar, la recarga artificial de acuíferos y la aplicación de infraestructuras basadas en la naturaleza deben integrarse de forma urgente en los instrumentos de planificación hidrológica.

En paralelo, se requiere una mejora sustancial en la gestión de la demanda, con políticas de eficiencia, tarifas progresivas y participación activa de los usuarios (Castillo et al., 2021). La combinación de técnicas tradicionales —como la captación de niebla o el almacenamiento en balsas— con tecnologías avanzadas y modelos predictivos permitirá transitar hacia un sistema hídrico más resiliente, capaz de absorber los impactos climáticos sin comprometer la sostenibilidad de los usos (Alonso-Pérez et al., 2021). Si no adaptamos ya nuestra gestión del agua al clima que viene, la planificación se volverá ficción. En Canarias, la sostenibilidad hídrica será climática o no será.

Aunque esto se analizará en profundidad en capítulos posteriores, las proyecciones climáticas para Canarias apuntan a un escenario de creciente tensión hídrica (Santamarta et al., 2025). La combinación de un descenso sostenido en las precipitaciones, el aumento de la temperatura media y la mayor frecuencia de eventos extremos impacta directamente en la disponibilidad, la calidad y la estabilidad del recurso agua. Y es que, en un sistema insular ya frágil, incluso pequeñas alteraciones en el balance hídrico pueden desencadenar efectos significativos.

9.1. Tendencias observadas en precipitación, temperatura y recarga

Desde finales del siglo XX, se ha registrado una tendencia al descenso de la precipitación media anual en la mayor parte del archipiélago, con valores especialmente bajos en zonas orientadas al sur y en cotas bajas. Este descenso no ha sido uniforme, pero sí persistente en el tiempo. A ello se suma un aumento progresivo de la temperatura media, que ya supera los +1,5 °C en algunas estaciones del interior insular respecto a las medias de referencia (1961–1990).

Estos dos factores —menos lluvia y más evaporación— implican una reducción neta de la recarga natural de los acuíferos. En muchas zonas, especialmente

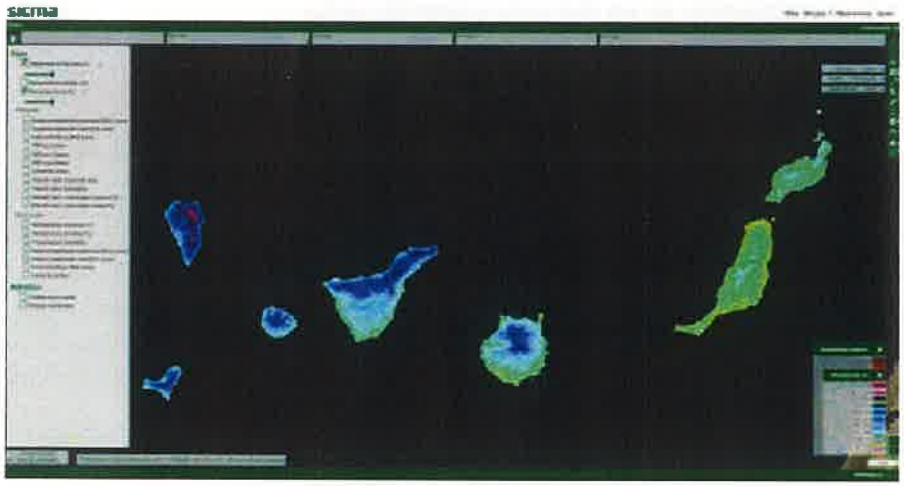
en las medianías, se ha observado un descenso sostenido de los niveles piezométricos, incluso en periodos donde la demanda no se ha incrementado. La razón es simple: se infiltra menos y se evapotranspira más.

9.2. Proyecciones climáticas en Canarias (modelos regionales)

Los modelos regionales de cambio climático aplicados al ámbito canario, como los elaborados por AEMET, el IPCC o el proyecto SICMA-Canarias (Santamarta et al., 2025), coinciden en señalar tres tendencias clave para el horizonte 2040–2100:

- Reducción del volumen total de precipitación: hasta un 20 % en escenarios pesimistas (RCP8.5), especialmente en primavera y otoño.
- Aumento de la temperatura media anual: entre 2 y 4 °C, con mayor incidencia en las islas centrales y occidentales.
- Mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos: olas de calor, lluvias torrenciales y sequías prolongadas.

Estos cambios afectarán de forma desigual a las islas. Las zonas más expuestas son aquellas que dependen de la recarga orográfica (como el norte de Tenerife o La Palma), las que no cuentan con alternativas tecnológicas (El Hierro, La Gomera) o aquellas donde el uso agrícola intensivo y el turismo coinciden (sur de Gran Canaria, Lanzarote).



Fuente: SICMA CANARIAS https://canarias.sicma.red/ Santamarta et al. (2025)

Figura 2.42. Plataforma de consulta de los escenarios locales de cambio climático en las Islas Canarias, adaptados al VI Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)

9.3. Efectos sobre acuíferos, cultivos y demanda hídrica

Acuíferos

La recarga de los acuíferos depende en gran medida de la lluvia efectiva y del mantenimiento de las zonas de infiltración. El retroceso de la vegetación potencial, los incendios forestales y el sellado del suelo por urbanización reducen aún más esa capacidad de recarga. Además, la intensificación de sequías favorece la intrusión marina en acuíferos costeros, lo que compromete la calidad del agua incluso en zonas con reservas aparentes.

Cultivos

El estrés hídrico se traslada directamente al sector primario. Menos agua disponible, más competencia por el recurso y mayor salinidad del agua de riego provocan descensos de productividad, abandono de tierras y pérdida de resiliencia en los sistemas agrícolas tradicionales. Los cultivos de exportación, intensivos en agua, como el plátano o el aguacate, se ven particularmente afectados.

Demanda hídrica

La presión sobre el recurso se incrementa. No solo por el aumento de la evapotranspiración, sino porque la demanda no desciende: el turismo se mantiene, las áreas urbanas crecen, y las necesidades agrícolas siguen siendo altas. La brecha entre oferta y demanda tiende a ampliarse, con mayor dependencia de fuentes no convencionales (desalinización, regeneración) y mayor coste energético asociado.

10. Bibliografía y referencias

AEDYR. (2024). 10 certezas sobre desalación de agua. Asociación Española de Desalación y Reutilización. https://aedyr.com/diez-certezas-desalacion-agua/

Aende, A., Gardy, J., & Hassanpour, A. (2020). Seawater desalination: A review of forward osmosis technique, its challenges, and future prospects. Processes, 8(8), 901. https://doi.org/10.3390/pr8080901

Aguas de las Cuencas de España (ACUAES). (2021). Sistema de depuración y reutilización de aguas residuales del Oeste de Tenerife. https://www.acuaes.com/

Ahmadi, E., McLellan, B., Mohammadi-Ivatloo, B., & Tezuka, T. (2020). The role of renewable energy resources in sustainability of water desalination as a

potential freshwater source: An updated review. Sustainability, 12(13), 5233. https://doi.org/10.3390/su12135233

Ahn, U. S., Koh, D.-C., Heo, J., Cho, B.-W., Kim, T., & Yum, B.-W. (2021). Conceptualizing a multi-layered shingle aquifer model based on volcanic stratigraphy and water inflow to lava caves in Jeju Island, Korea. Hydrological Processes, 35(8), e14316. https://doi.org/10.1002/hyp.14316

Akamani, K. (2023). The roles of adaptive water governance in enhancing the transition towards ecosystem-based adaptation. Water, 15(13), 2341. https://doi.org/10.3390/w15132341

Alonso-Pérez, S., López-Solano, J., Rodríguez, L., & Márquez-Martinón, J. (2021). Evaluation of the tourism climate index in the Canary Islands. Sustainability, 13(13), 7042. https://doi.org/10.3390/su13137042

Anguita, F., Fernández, C., Márquez, Á., León, R., & Casillas, R. (2025). The Canary hotspot revisited: Refutation of the Hawaii paradigm and an alternative, plate-based hypothesis. Earth-Science Reviews, 261, 105038. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.105038

Araral, E. and Wang, Y. (2013). Water governance 2.0: a review and second generation research agenda. Water Resources Management, 27(11), 3945-3957. 10.1007/s11269-013-0389-x

Arata, Y., Gomi, T., Sidle, R., Saito, H., & Wang, G. (2023). Soil-water response in a volcanic ash hillslope affected by fissures and microtopographic changes caused by the Kumamoto earthquake, in Japan. Hydrological Processes, 37(8). https://doi.org/10.1002/hyp.14947

Arborea, S., Giannoccaro, G., Gennaro, B., Iacobellis, V., & Piccinni, A. (2017). Cost–benefit analysis of wastewater reuse in Puglia, southern Italy. Water, 9(3), 175. 10.3390/w9030175

Assefa, K. and Woodbury, A. (2013). Transient, spatially varied groundwater recharge modeling. Water Resources Research, 49(8), 4593-4606. 10.1002/wrcr.20332

Attias, E., Thomas, D., Sherman, D., Ismail, K., & Constable, S. (2020). Marine electrical imaging reveals novel freshwater transport mechanism in Hawai'i. Science Advances, 6(48). 10.1126/sciadv.abd4866

Ávila, D., Marichal, G., Quiza, R., & Luis, F. (2021). Prediction of wave energy transformation capability in isolated islands by using the Monte Carlo Method. Journal of Marine Science and Engineering, 9(9), 980. 10.3390/jmse9090980

Beguería, S., Trullenque-Blanco, V., Vicente-Serrano, S., & Hidalgo, J. (2025). Aridity on the rise: spatial and temporal shifts in climate aridity in spain (1961–2020). International Journal of Climatology, 45(6).10.1002/joc.8775

Ben-Hur, M., Agassi, M., & Shainberg, I. (1998). Water, aggregate stability and erosion. In M. Sumner (Ed.), Handbook of Soil Science (pp. A-21–A-29). CRC Press.

Ben-Hur, M., Fernandez, C., Sarkkola, S., & Santamarta Cerezal, J. C. (2010). Overland Flow, Soil Erosion and Stream Water Quality in Forest Under Different Perturbations and Climate Conditions. En Forest Management and the Water Cycle : An Ecosystem-Based Approach (pp. 263-289). Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9834-4_15

Bezada, M., Humphreys, E. D., & Schmandt, B. (2014). Piecewise delamination of Moroccan lithosphere from beneath the Atlas Mountains. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 15(4), 975–985. https://doi.org/10.1002/2013GC005059

Bokuniewicz, H. J. (1980). Groundwater seepage into Great South Bay, New York. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 10(5), 437–444. https://www.whoi.edu/science/MCG/groundwater/pubs/PDF/Bokuniewicz%20ECSS.pdf

Braojos Ruiz, J. J. (2023). Alumbramientos, agotamientos y fracasos en los 175 años de historia de las galerías de Tenerife (2ª ed.). Santa Cruz de Tenerife: Consejo Insular de Aguas de Tenerife, Cámara Insular de Aguas de Tenerife, Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas de Santa Cruz de Tenerife. https://www.aguastenerife.org/images/pdf/Libros/ALUMBRA,AGOTA%20y%20FRACASOS_OK_2aEdi-VDigCopia.pdf

Braojos Ruiz, J. J. (2019). 100 años de la hidrología superficial de Tenerife y su simulación mediante un modelo matemático distribuido. Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATF)

Braojos Ruiz, J. J. (2015). La nube, el pino y la otra lluvia: Una metodología para evaluar el potencial de captación de agua de niebla y su aprovechamiento (340 pp.). Cabildo Insular de Tenerife. ISBN 978-84-1501-211-5

Braojos, J. J. (2005). Modelo Matemático Distribuido para la simulación de la Lluvia Horizontal. Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATF). Documento técnico para implementación en el MHSup. No publicado.

Braojos, J. J. (1993). Modelo Matemático Distribuido para la simulación de la Hidrología Superficial de Tenerife (MHSup) (versión revisada 2019). Plan Hidrológico Insular de Tenerife. Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATF). Documento interno no publicado.

Burke, K., & Wilson, J. T. (1972). Is the African plate stationary? Nature, 239(5371), 387–390.

Burnett, W. C., Bokuniewicz, H., Huettel, M., Moore, W. S., & Taniguchi, M. (2006). Groundwater and pore water inputs to the coastal zone. Biogeochemistry, 77(3), 373–414. 10.1023/B:BIOG.0000006066.21240.53

Cabildo de La Palma. (2024). Informe de coyuntura turística 2023. https://fedepalma.net/wp-content/uploads/2023/08/T026.23.2_FEDEPALMA_-_Informe_de_coyuntura_La-Palma-2T2023.pdf

Cabildo de Tenerife – Consejo Insular de Aguas. (2023, septiembre). Plan Hidrológico Insular de Tenerife: Demarcación Hidrográfica de Tenerife, tercer ciclo (2021–2027) [Memoria]. Consejo Insular de Aguas de Tenerife. https://www.aguastenerife.org/index.php?Itemid=1673&id=294

Canarias7. (2019, 10 de febrero). La revisión del Plan Hidrológico cuenta 2.387 captaciones en uso en Gran Canaria. Recuperado de https://www.canarias7.es

Castilla-Beltrán, A., de Nascimento, L., Fernández-Palacios, J. M., Whittaker, R. J., Willis, K. J., Edwards, M., & Nogué, S. (2021). Anthropogenic transitions from forested to human-dominated landscapes in southern Macaronesia. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 118(40), e2022215118. https://doi.org/10.1073/pnas.2022215118

Castillo, J. L. U., Ramos Leal, J. A., Martínez Cruz, D. A., Cervantes Martínez, A., & Marín Celestino, A. E. (2021). Identification of the dominant factors in groundwater recharge process, using multivariate statistical approaches in a semi-arid region. Sustainability, 13(20), 11543. https://doi.org/10.3390/su132011543

Cho, H.-M., Kim, T.-H., Moon, J.-H., Song, B.-C., Hwang, D.-W., Kim, T., & Im, D.-H. (2021). Estimating submarine groundwater discharge in Jeju volcanic island (Korea) during a typhoon (Kong-rey) using humic-fluorescent dissolved organic matter–Si mass balance. Scientific Reports, 11, 941. https://doi.org/10.1038/s41598-020-79381-0

CIATF – Consejo Insular de Aguas de Tenerife. (2022). Memoria de actuaciones y estadísticas hidráulicas de Tenerife. Santa Cruz de Tenerife: Cabildo de Tenerife.

Ciencia Canaria. (2017, noviembre 29). Las gavias, un tesoro en la tierra de Fuerteventura y Lanzarote. https://www.cienciacanaria.es/secciones/a-fondo/865-las-gavias-un-tesoro-en-la-tierra-de-fuerteventura-y-lanzarote

Cobo Ortegano, C. V. (2016). Fiscalidad de las Comunidades de Aguas Canarias (Trabajo Fin de Grado). Universidad de La Laguna. https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/3018/FISCALIDAD%20DE%20LAS%20COMUNIDADES%20DE%20AGUAS%20CANARIAS.pdf?sequence=1

Consejo Insular de Aguas de Tenerife. (diversos años). Planes Hidrológicos Insulares de Tenerife: Ciclos de planificación 1998–2009, 2010–2015, 2016–2021 y 2022–2027. Santa Cruz de Tenerife: CIATF. https://www.aguastenerife.org/

Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria. (2023). Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de Gran Canaria. Ciclo 2021-2027 (Memoria y Anejos). Las Palmas de Gran Canaria: CIAGC.

Consejo Insular de Gran Canaria. (2024). Estrategia Energética e Hídrica de Gran Canaria 2024-2030. Las Palmas de Gran Canaria: Cabildo de Gran Canaria.

Consejo Insular de Aguas de El Hierro. (2023). Plan Hidrológico Insular de El Hierro. 3.er ciclo 2021-2027. Valverde: Cabildo de El Hierro.

Consejo Insular de Aguas de Fuerteventura. (2023). Plan Hidrológico Insular de Fuerteventura. 3.er ciclo 2021-2027. Puerto del Rosario: Cabildo de Fuerteventura.

Consejo Insular de Aguas de La Gomera. (2023). Plan Hidrológico Insular de La Gomera. 3.er ciclo 2021-2027. San Sebastián de La Gomera: Cabildo de La Gomera.

Consejo Insular de Aguas de Lanzarote. (2023). Plan Hidrológico Insular de Lanzarote. 3.er ciclo 2021-2027. Arrecife: Cabildo de Lanzarote.

Consejo Insular de Aguas de La Palma. (2023). Plan Hidrológico Insular de La Palma. 3.er ciclo 2021-2027. Santa Cruz de La Palma: Cabildo de La Palma.

Cruz, J. V., Andrade, C., Pacheco, D., Mendes, S., & Cymbron, R. (2017). Nitrates in groundwater discharges from the Azores Archipelago: Occurrence and fluxes to coastal waters. Water, 9(2), 125. https://doi.org/10.3390/w9020125

Cruz-Pérez, N., Santamarta, J. C., García-Gil, A., Rodríguez-Martín, J., Miralles-Wilhelm, F., Hernández-Alemán, A., & Aldaya, M. M. (2022). Water footprint of the water cycle of Gran Canaria and Tenerife (Canary Islands, Spain). Water, 14(6), Article 934. https://doi.org/10.3390/w14060934

Cruz-Pérez, N., Santamarta, J. C. & Álvarez-Acosta, C. (2023). Water footprint of representative agricultural crops on volcanic islands: the case of the Canary Islands. Renewable Agriculture and Food Systems, 38, e36. https://doi.org/10.1017/S1742170523000303

Cruz-Pérez, N., Santamarta, J.C., J., 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).

Custodio, E., & Cabrera, M. C. (2013). The Canary Islands. En E. López-Gunn, H. Dumont, & F. Villarroya (Eds.), Re-thinking water and food security: Fourth World Centre Water and Food Series (pp. 219–237). CRC Press. https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/b13078-21/the-canary-islands-emilio-custodio-m%C2%AA-carmen-cabrera

Custodio, E., Cabrera, M. 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, econo-

mic and social aspects. Science of The Total Environment, 557–558, 425–437. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.038

Custodio, E., Cabrera, M., Poncela, R., Cruz-Fuentes, T., Naranjo, G., & Miguel, L. (2015). Comments on uncertainty in groundwater governance in the volcanic Canary Islands, Spain. Water, 7(6), 2952-2970. https://doi.org/10.3390/w7062952

Davenport, D., Deshmukh, A., Werber, J., & Elimelech, M. (2018). High-pressure reverse osmosis for energy-efficient hypersaline brine desalination: current status, design considerations, and research needs. Environmental Science & Technology Letters, 5(8), 467-475. https://doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00274

Diario de Fuerteventura. (2022, noviembre 15). Fuerteventura contará con un Parque Agrario: Las Gavias del Norte. https://diariodefuerteventura.com/noticia/fuerteventura-contar%C3%A1-con-un-parque-agrario-las-gavias-del-norte

Dumont, M., Reninger, P., Aunay, B., Pryet, A., Jougnot, D., Join, J., ... & Martelet, G. (2021). Hydrogeophysical characterization in a volcanic context from local to regional scales combining airborne electromagnetism and magnetism. Geophysical Research Letters, 48(12). https://doi.org/10.1029/2020GL092000

Doerr, S. H., Shakesby, R. A., & Walsh, R. P. D. (2000). Soil water repellency: Its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. Earth-Science Reviews, 51(1–4), 33–65. https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00011-8

Dóniz Páez, F. J., & García-Cacho, L. (2020). Diversity of volcanic geoheritage in the Canary Islands, Spain. Geosciences, 10(10), 390. https://doi.org/10.3390/geosciences10100390

Eff-Darwich, A., Coello, J., Viñas, R., Soler, V., Martín-Luis, M. C., Farrujia, I., Quesada, M. L., & de la Nuez, J. (2008). Underground temperature measurements as a tool for volcanic activity monitoring in the island of Tenerife, Canary Islands. Pure and Applied Geophysics, 165(1), 135–145. https://doi.org/10.1007/s00024-007-0284-6

El Confidencial. (2023, 28 de septiembre). El problema del agua: la receta de Canarias para intentar esquivar la sequía. https://www.elconfidencial.com/espana/islas-canarias/2023-09-28/grave-problema-agua-canarias_3761467/

Elimelech, M. and Phillip, W. (2011). The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment. Science, 333(6043), 712-717. https://doi.org/10.1126/science.1200488

Emerson, W. W. (1977). Physical properties and structure. In J. S. Russell & E. L. Greacen (Eds.), Soil Factors in Crop Production in a Semi-Arid Environment (pp. 78–104). University of Queensland Press.

Engott, J. A., Johnson, A. G., Bassiouni, M., Izuka, S. K., & Rotzoll, K. (2017). Spatially distributed groundwater recharge for 2010 land cover estimated using a water-budget model for the Island of O'ahu, Hawai'i (Scientific Investigations Report 2015–5010, versión 2.0, diciembre 2017). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/sir20155010

FAO. (1975). Proyecto SPA/69/515: Recursos de agua en las Islas Canarias. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Fellows, C. (2024). What does the seawater desalination industry need from polymer scientists? Polymer International, 74(2), 87-94.10.1002/pi.6721

Fernandez, D., Torregrosa, A., Weiss-Penzias, P., Zhang, B., Sorensen, D., Cohen, R., ... & Bowman, M. (2018). Fog water collection effectiveness: mesh intercomparisons. Aerosol and Air Quality Research, 18(1), 270-283. 10.4209/aaqr.2017.01.0040

Fujita, K., Shoji, J., Sugimoto, R., Nakajima, T., Honda, H., Takeuchi, M., ... & Taniguchi, M. (2019). Increase in fish production through bottom-up trophic linkage in coastal waters induced by nutrients supplied via submarine groundwater. Frontiers in Environmental Science, 7.10.3389/fenvs.2019.00082

Fundación Centro de la Cultura Popular Canaria & Fundación Global Nature. (2025). Manual técnico de captación de nieblas. Proyecto LIFE NIEBLAS: adaptación al cambio climático mediante tecnologías de recolección de agua atmosférica para la restauración ecológica. Gobierno de Canarias – LIFE Programme. https://www.lifenieblas.com

García-Gil, A., Jimenez, J., Marazuela, M. Á., Baquedano, C., Martínez-León, J., Cruz-Pérez, N., Laspidou, C., & Santamarta, J. C. (2023a). Effects of the 2021 La Palma volcanic eruption on groundwater resources (part I): Hydraulic impacts. Groundwater for Sustainable Development, 23. https://doi.org/10.1016/J.GSD.2023.100989

García-Gil, A., Jimenez, J., Gasco Cavero, S., Marazuela, M. Á., Baquedano, C., Martínez-León, J., Cruz-Pérez, N., Laspidou, C., & Santamarta, J. C. (2023b). Effects of the 2021 La Palma volcanic eruption on groundwater resources (part II): Hydrochemical impacts. Groundwater for Sustainable Development, 23. https://doi.org/10.1016/J.GSD.2023.100992

García-Gil, A., Poncela, R., Balon, E., González-Moro, Á., Lario-Báscones, R., Marazuela, M., ... & Santamarta, J.C. (2022). Heterogeneity-driven hydrodynamics conditions the hydrochemistry of spring water in volcanic islands. Ground Water, 61(3), 375-388. https://doi.org/10.1111/gwat.13249

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. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2024.143375

George, C., Moore, W., White, S., Smoak, E., Joye, S., Leier, A., ... & Wilson, A. (2020). A new mechanism for submarine groundwater discharge from continental shelves. Water Resources Research, 56(11). https://doi.org/10.1029/2019WR026866

Gobierno de Canarias. (1990). Ley 12/1990, de 26 de julio, de Aguas de Canarias. Boletín Oficial de Canarias, nº 96, de 3 de agosto de 1990. https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1990-23087

Gobierno de Canarias. (2011). Manual técnico de galerías: criterios para su diseño, construcción y conservación (1.ª ed.). Dirección General de Aguas, Consejería de Obras Públicas, Vivienda y Aguas.

Gobierno de Canarias. (2012). Manual técnico de pozos: criterios para su diseño, ejecución y conservación (1.ª ed.). Dirección General de Aguas, Consejería de Obras Públicas, Vivienda y Aguas.

Gobierno de Canarias. (2015). Decreto 165/2015, de 3 de julio, por el que se aprueba la Instrucción de Planificación Hidrológica para las Demarcaciones Hidrográficas Intracomunitarias de la Comunidad Autónoma de Canarias. Boletín Oficial de Canarias, 131.

Gobierno de Canarias. (2021). Plan Hidrológico de Demarcación de Canarias. Ciclo de planificación 2021–2027. Dirección General de Aguas. https://www.gobiernodecanarias.org/aguas

Gobierno de Canarias. (2023). Depuración y reutilización de aguas residuales. Recuperado de https://www.gobiernodecanarias.org/medioambiente/materias/calidad-del-agua/el-agua-en-canarias/contaminacion-agua/depuracion-y-reutilizacion-de-aguas-residuales/

Gobierno de Canarias. (2023, noviembre 10). El Gobierno de Canarias diseña nuevos planes para aumentar el uso del agua regenerada en las islas. Noticias. Recuperado de https://www3.gobiernodecanarias.org/noticias/el-gobierno-de-canarias-disena-nuevos-planes-para-aumentar-el-uso-del-agua-regenerada-en-las-islas/

Gobierno de Canarias, Dirección General de Protección de la Naturaleza. (2023). REDEXOS – Red de Control y Seguimiento de los Ecosistemas Marinos y Litorales de Canarias. Informe 2018-2022. Santa Cruz de Tenerife: Gobierno de Canarias.

Gobierno de Canarias. (s.f.). Desaladora. CanariWiki. https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/wiki/index.php?title=Desaladora

Gobierno de Canarias. (s.f.). La planificación hidrológica en Canarias. Dirección General de Aguas. https://www.gobiernodecanarias.org/aguas/planificacion/

Gobierno de España. (2006). Ley 9/2006, de 28 de abril, sobre evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente. Boletín Oficial del Estado, nº 102, de 29 de abril de 2006. https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2006-7775

Gobierno de España. (2007). Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. Boletín Oficial del Estado, nº 176, de 24 de julio de 2001.https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2001-14276

Godden, L., Ison, R., & Wallis, P. (2011). Water governance in a climate change world: appraising systemic and adaptive effectiveness. Water Resources Management, 25(15), 3971-3976. https://doi.org/10.1007/s11269-011-9902-2

Gonneea, M., Mulligan, A., & Charette, M. (2013). Climate-driven sea level anomalies modulate coastal groundwater dynamics and discharge. Geophysical Research Letters, 40(11), 2701-2706. 10.1002/grl.50192

González Gonzálvez, J. J. (2023). Casas de máquinas y pozos en Gran Canaria: curiosidades sobre las captaciones subterráneas. Iagua. https://www.iagua.es/blogs/jaime-j-gonzalez-gonzalvez/casas-maquinas-y-pozos-gran-canaria-curiosidades-captaciones

González, P. J., Einarsson, P., & Fernández, J. (2013). Magma storage and migration associated with the 2011–2012 El Hierro eruption: Implications for crustal magmatic systems at oceanic island volcanoes. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(8), 4361–4377. https://doi.org/10.1002/jgrb.50289

Guimerá Peraza, M. (1952). Algunos aspectos de los heredamientos y comunidades de aguas. Santa Cruz de Tenerife: [s.n.].

Hdidou, M., Necibi, M., Labille, J., Hajjaji, S., Dhiba, D., Chehbouni, A., ... & Roche, N. (2021). Potential use of constructed wetland systems for rural sanitation and wastewater reuse in agriculture in the moroccan context. Energies, 15(1), 156. 10.3390/en15010156

Heihsel, M., Ali, S., Kirchherr, J., & Lenzen, M. (2019). Renewable-powered desalination as an optimisation pathway for renewable energy systems: the case of australia's murray–darling basin. Environmental Research Letters, 14(12), 124054. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab57ab

Helmecke, M., Fries, E., & Schulte, C. (2020). Regulating water reuse for agricultural irrigation: risks related to organic micro-contaminants. Environmental Sciences Europe, 32(1). 10.1186/s12302-019-0283-0

Heredia, U., López, R., Collada, C., Emerson, B., & Gil, L. (2014). Signatures of volcanism and aridity in the evolution of an insular pine (*Pinus canariensis* chr. sm. ex dc in buch). Heredity, 113(3), 240-249. 10.1038/hdy.2014.22

Herrera, C. and Custodio, E. (2014). Groundwater flow in a relatively old oceanic volcanic island: the Betancuria area, Fuerteventura island, Canary Islands, Spain. The Science of the Total Environment, 496, 531-550. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.063

Hill, M. (2013). Adaptive capacity of water governance: cases from the Alps and the Andes. Mountain Research and Development, 33(3), 248. 10.1659/MRD-JOURNAL-D-12-00106.1

Hillel, D. (1980). Fundamentals of Soil Physics. Academic Press.

Hong, W., Lepland, A., Himmler, T., Kim, J., Chand, S., Sahy, D., ... & Knies, J. (2019). Discharge of meteoric water in the eastern norwegian sea since the last glacial period. Geophysical Research Letters, 46(14), 8194-8204. 10.1029/2019GL084237

Hunt, J. E., & Jarvis, I. (2017). Prodigious submarine landslides during the inception and early growth of volcanic islands. Nature Communications, 8, Article 2061. https://doi.org/10.1038/s41467-017-02100-3

Hunt, J., Talling, P., Clare, M., Jarvis, I., & Wynn, R. (2014). Long-term (17 ma) turbidite record of the timing and frequency of large flank collapses of the Canary Islands. Geochemistry Geophysics Geosystems, 15(8), 3322-3345. 10.1002/2014GC005232

Hunt, J., Wynn, R., Talling, P., & Masson, D. (2013). Multistage collapse of eight western Canary Island landslides in the last 1.5 ma: sedimentological and geochemical evidence from subunits in submarine flow deposits. Geochemistry Geophysics Geosystems, 14(7), 2159-2181. https://doi.org/10.1002/ggge.20138

Hurlbert, M. (2009). The adaptation of water law to climate change. International Journal of Climate Change Strategies and Management, 1(3), 230-240. 10.1108/17568690910977456

Ibánhez, J., Álvarez-Salgado, X., Nieto-Cid, M., & Rocha, C. (2021). Fresh and saline submarine groundwater discharge in a large coastal inlet affected by seasonal upwelling. Limnology and Oceanography, 66(6), 2141-2158. https://doi.org/10.1002/lno.11733

Instituto Geográfico Nacional & Agencia Estatal de Meteorología. (2023). Escenarios de cambio climático regionalizados para Canarias (versión 6.2). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Recuperado de https://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/GUIA_ESCENARIOS_CANARIAS_6_2.pdf

Instituto Tecnológico de Canarias. (2014-2020). Plan de ecogestión en la producción y distribución de agua de Canarias. Recuperado de https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Caso-de-Canarias-Ingenio-e-innovacion-en-la-cadena-de-valor-del-agua.pdf

Instituto Tecnológico de Canarias. (s.f.). DESALRO 2.0. Recuperado de https://www.itccanarias.org/web/es/actividad/proyectos/desalro-2-0

Instituto Canario de Estadística (ISTAC). (2024). Estadísticas sociodemográficas de la isla de La Palma 2023. Gobierno de Canarias. Recuperado de https://www.gobiernodecanarias.org/istac

Izquierdo, Tatiana (2014). Conceptual hydrogeological model and aquifer system classification of a small volcanic island (La Gomera; Canary Islands). Publicado en Catena 114, 119-128. https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.11.006

Izuka, S. K. & Gingerich, S. B. (2003). Summary of the hydrology of the Hawai'i volcanic aquifer system. U.S. Geological Survey. https://pubs.usgs.gov/pp/1412a/report.pdf

Jiménez, J., Gasco Cavero, 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

Johnson, A., Glenn, C., Burnett, W., Peterson, R., & Lucey, P. (2008). Aerial infrared imaging reveals large nutrient-rich groundwater inputs to the ocean. Geophysical Research Letters, 35(15). 10.1029/2008GL034574

Kalmakhanova, M., Tuesta, J., Malakar, A., Gomes, H., & Snow, D. (2023). Wastewater treatment in central asia: treatment alternatives for safe water reuse. Sustainability, 15(20), 14949. https://doi.org/10.3390/su152014949

Kamo, T. and NISHI, R. (2018). Estimation of groundwater discharge in a sandy beach; an example of Fukiagehama, Kagoshima prefecture, Japan. Coastal Engineering Proceedings, (36), 34. 10.9753/icce.v36.currents.34

Kao, R., Zavialov, P., & Ding, C. (2013). Investigation and assessment of submarine groundwater discharge of ping-tung nearshore area in southwestern Taiwan. Irrigation and Drainage, 62(S1), 10-17. 10.1002/ird.1789

Kim, G., Kim, J., & Hwang, D. (2011). Submarine groundwater discharge from oceanic islands standing in oligotrophic oceans: implications for global biological production and organic carbon fluxes. Limnology and Oceanography, 56(2), 673-682. https://doi.org/10.4319/lo.2011.56.2.0673

Knee, K. L., & Paytan, A. (2019). Submarine groundwater discharge: A source of nutrients, metals, and pollutants to the coastal ocean. Frontiers in Environmental Science, 7, 141. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374711-2.00410-1

Lecher, A. and Mackey, K. (2018). Synthesizing the effects of submarine groundwater discharge on marine biota. Hydrology, 5(4), 60. https://doi.org/10.3390/hydrology5040060

Leon, F., Ramos-Martin, A., & Perez-Baez, S. O. (2021). Study of the ecological footprint and carbon footprint in a reverse osmosis seawater desalination plant. Membranes, 11(6), 377. https://doi.org/10.3390/membranes11060377

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

López, L. (1990). Modelo de flujo de agua subterránea de la isla de Tenerife (última revisión en 2016). SURGE S.A. Informe técnico para el Plan Hidrológico Insular de Tenerife. Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATF). Documento no publicado.

Luijendijk, E., Gleeson, T., Moosdorf, N., Hartmann, J., & Fan, Y. (2020). Global coastal groundwater discharge estimated from hydrological simulations. Nature Communications, 11, Article 1260. 10.1002/2014GL061574

Luoma, S. and Okkonen, J. (2014). Impacts of future climate change and baltic sea level rise on groundwater recharge, groundwater levels, and surface leakage in the Hanko aquifer in southern Finland. Water, 6(12), 3671-3700. 10.3390/w6123671

Marazuela, M. A., 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

Marrero, R., Alcalá, F., Pérez, N., López, D., Melián, G., Padrón, E., … & Padilla, G. (2015). Aquifer recharge estimation through atmospheric chloride mass balance at las Cañadas Caldera, Tenerife, Canary Islands, Spain. Water, 7(5), 2451-2471. 10.3390/w7052451

Merino Fernández, D. (2025, 11 de enero). Se cumplen 60 años desde que Lanzarote consiguiera agua potable con la primera desalinizadora de Europa. La Voz de Lanzarote. https://www.lavozdelanzarote.com/ekonomus/economia/se-cumplen-60-anos-lanzarote-consiguiera-agua-potable-con-primera-desalinizadora-europa_231946_102.html

Mesa, D., Devaux, A., & Galarreta, J. (2023). Ancient potato varieties of the Canary Islands: their history, diversity and origin of the potato in europe. Potato Research, 67(3), 963-994. 10.1007/s11540-023-09672-2

Miller, M. S., Garnero, E. J., & West, M. E. (2015). Imaging Canary Island hotspot material beneath the lithosphere of Morocco and southern Spain. Earth and Planetary Science Letters, 431, 186–194. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.09.026

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2025). Planes hidrológicos vigentes (2022-2027).

Miranda, J., Lehmann, M., Saurer, M., Altman, J., & Treydte, K. (2021). Insight into Canary Island pine physiology provided by stable isotope patterns of water and plant tissues along an altitudinal gradient. Tree Physiology, 41(9), 1611-1626. 10.1093/treephys/tpab046

Montesdeoca-Martínez, F. and Velázquez, S. (2023). Integration of a geothermal plant in a system with high renewable energy penetration for desalination plant self-consumption. Journal of Marine Science and Engineering, 11(2), 353. 10.3390/jmse11020353

Mora, J., Armas-Herrera, C., Guerra, J., Arbelo, C., Rodríguez-Rodríguez, A., & Pino, J. (2015). A comparative study of long-term effects on fire-affected volcanic soils in two different ecosystems in the Canary Islands. Land Degradation and Development, 27(5), 1489-1500. https://doi.org/10.1002/ldr.2458

Morgan, W. J. (1971). Convection plumes in the lower mantle. Nature, 230, 42–43.

Mutaqin, B., Marfai, M., Hadmoko, D., Lavigne, F., Faral, A., Wijayanti, H., ... & Riasasi, W. (2021). Geomorphology of the small island of Tidore and Hiri (North Maluku, Indonesia). E3s Web of Conferences, 325, 03012. 10.1051/e3sconf/202132503012

Nanzyo, M., Shoji, S., & Dahlgren, R. A. (1993). Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science, 21, 189–207.

Neris, J., Santamarta, J., Doerr, S., Prieto, F., Agulló-Pérez, J., & García-Villegas, P. (2016). Post-fire soil hydrology, water erosion and restoration strategies in andosols: a review of evidence from the Canary Islands (Spain). Iforest - Biogeosciences and Forestry, 9(4), 583-592. 10.3832/ifor1605-008

Neris, J., Tejedor, M., Fuentes, J., & Jiménez, C. (2012). Infiltration, runoff and soil loss in andisols affected by forest fire (Canary Islands, Spain). Hydrological Processes, 27(19), 2814-2824. https://doi.org/10.1002/hyp.9403

Neto, S., Camkin, J., Fenemor, A., Tan, P., Baptista, J., Ribeiro, M., ... & Elfithri, R. (2017). OECD principles on water governance in practice: an assessment of existing frameworks in Europe, Asia-Pacific, Africa and South America. Water International, 43(1), 60-89. 10.1080/02508060.2018.1402650

Oberlack, C. (2016). Diagnosing institutional barriers and opportunities for adaptation to climate change. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 22(5), 805-838. 10.1007/s11027-015-9699-z

Özerol, G., Kruijf, J., Brisbois, M., Flores, C., Deekshit, P., Girard, C., ... & Schröter, B. (2018). Comparative studies of water governance: a systematic

review. Ecology and Society, 23(4). https://doi.org/10.5751/ES-10548-230443

Padrón, I., García, M., Marichal, G., & Ávila, D. (2022). Wave energy potential of the coast of el Hierro Island for the exploitation of a wave energy converter (WEC). Sustainability, 14(19), 12139. 10.3390/su141912139

Páez, F., Beltrán-Yanes, E., Becerra-Ramírez, R., Pérez, N., Hernández, P., & Hernández, W. (2020). Diversity of volcanic geoheritage in the Canary Islands, Spain. Geosciences, 10(10), 390. https://doi.org/10.3390/geosciences10100390

Peng, Y., He, Y., Yang, S., Ben, S., Cao, M., Li, K., ... & Jiang, L. (2015). Magnetically induced fog harvesting via flexible conical arrays. Advanced Functional Materials, 25(37), 5967-5971. 10.1002/adfm.201502745

Perdomo Molina, A. C. (2002). El sistema de cultivo en "gavias" de Fuerteventura (Islas Canarias – España): la gestión del agua en un espacio árido. En J. Palerm (Ed.), Antología sobre pequeño riego. Riego no convencional (Vol. III, pp. 161–185). México: Colegio de Postgraduados.

Poncela Poncela, R. (2015). Hidrogeología del sistema acuífero volcánico de La Palma (Islas Canarias) [Tesis doctoral, Universidad de Alicante] http://hdl.handle.net/10045/52878

Porta, J., López-Acevedo, M., & Roquero, C. (2003). Edafología para la agricultura y el medio ambiente (4ª ed.). Mundi-Prensa.

Pryet, A., d'Ozouville, N., Violette, S., Deffontaines, B., & Auken, E. (2012). Hydrogeological settings of a volcanic island (San Cristóbal, Galápagos) from joint interpretation of airborne electromagnetics and geomorphological observations. Hydrology and Earth System Sciences, 16(12), 4571-4579. https://doi.org/10.5194/hess-16-4571-2012

Qureshi, A. (2020). Challenges and prospects of using treated wastewater to manage water scarcity crises in the Gulf Cooperation Council (GCC) countries. Water, 12(7), 1971. 10.3390/w12071971

Ramalho, R., Quartau, R., Trenhaile, A., Mitchell, N., Woodroffe, C., & Ávila, S. (2013). Coastal evolution on volcanic oceanic islands: a complex interplay between volcanism, erosion, sedimentation, sea-level change and biogenic production. Earth-Science Reviews, 127, 140-170. 10.1016/j.earscirev.2013.10.007

Reznik, A. and Dinar, A. (2021). Local conditions and the economic feasibility of urban wastewater recycling in irrigated agriculture: lessons from a stochastic regional analysis in California. Applied Economic Perspectives and Policy, 44(4), 2115-2130. 10.1002/aepp.13198

Ritter, A., Regalado, C., & Guerra, J. (2015). Quantification of fog water collection in three locations of Tenerife (Canary Islands). Water, 7(7), 3306-3319. https://doi.org/10.3390/w7073306

Ritter, A., Regalado, C., & Guerra, J. (2019). The impact of climate change on water fluxes in a macaronesian cloud forest. Hydrological Processes, 33(22), 2828-2846. https://doi.org/10.1002/hyp.13523

Robins, N. (2013). A review of small island hydrogeology: progress (and setbacks) during the recent past. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 46(2), 157-165. https://doi.org/10.1144/qjegh2012-063

Rockey, N., Bischel, H., Kohn, T., Pecson, B., & Wigginton, K. (2019). The utility of flow cytometry for potable reuse. Current Opinion in Biotechnology, 57, 42-49. 10.1016/j.copbio.2018.12.009

Romero Martín, L. E. (2020). Los bancales como señas de identidades de los gomeros: una mirada al territorio. En J. M. Palerm Salazar (Coord.), Bancales: señas de identidad. Congreso Mundial ITLA 2019, Declaración de La Gomera (pp. 127–134). Gobierno de Canarias, Canarias Cultura en Red, Observatorio del Paisaje de Canarias. ISBN: 978-84-7985-430-0.

Romero, L. E., Cordero, A. I. H., Cordero, A. S., Negrín, C. V., & Salazar, J. M. P. (2019). Terraced Landscapes in the Canary Islands: La Gomera, "The Terrace Island". In World Terraced Landscapes: History, Environment, Quality of Life (pp. 97–118). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96815-5_7

Ruiz-García, A., Carrascosa-Chisvert, M., Mena, V., Souto, R., Rodríguez, J., & Nuez, I. (2019). Groundwater quality assessment in a volcanic mountain range (south of Gran Canaria island, Spain). Water, 11(4), 754. 10.3390/w11040754

Santamarta, J. C., & Rodríguez Martín, J. (2020). Los procesos de planificación hidrológica en la península ibérica e islas en un contexto de cambio climático. Colegio de Ingenieros de Montes. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/790935.pdf

Santamarta, J. C. (2010). 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. https://oa.upm.es/3389/

Santamarta, J. C. (2013). Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos: Métodos, Técnicas y Experiencias en las Islas Canarias. Colegio de Ingenieros de Montes. https://oa.upm.es/19965/1/Libro_digital_AGUAS.pdf

Santamarta, 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/

Santamarta, J. C. (2017). Minería del agua en islas y terrenos volcánicos: Análisis hidrológico en explotaciones en la zona sureste de la isla de Tenerife, islas Canarias (Tesis doctoral). Universidad de León. https://hdl.handle.net/10612/7041

Santamarta, J. C. (2020). El aprovechamiento tradicional de las aguas subterráneas en las Islas Canarias. Fundación CajaCanarias. https://dialnet.unirioja.es/descarga/libro/778000.pdf

Santamarta, J. C., & Seijas Bayón, J. (2010) Fundamentos y tecnologías para la captación y uso del agua procedente de la lluvia horizontal en los montes canarios. Revista Montes 100:15-21.

Santamarta J.C., Rubiales, I., Rodríguez-Martín, J., & Cruz-Pérez, N. (2022). Water status in the Canary Islands related to energy requirements. Energy Efficiency, 15(2). 10.1007/s12053-021-10016-7

Santamarta, J. C., Neris, J., Fontes, J. C., Poncela, R., Rodríguez-Martín, J., & Cruz-Pérez, N. (2022). Hydrological Parameters of Volcanic Soils: Analysis and Interpretation in the Canary Islands. International Review of Civil Engineering, 13(6), 474-481.https://doi.org/10.15866/irece.v13i6.21592

Santamarta, J.C., Cruz-Pérez, N., Rodríguez-Martín, J., Beltrán, R., Gracia, M., & García-Gil, A. (2022). Ecological transition in a world heritage city: the case of San Cristóbal de La Laguna (Canary Islands). Environmental Progress & Sustainable Energy, 41(6). 10.1002/ep.13957

Santamarta, J.C., Gutiérrez, L., Lario-Báscones, R., Rodríguez-Martín, J., & Cruz-Pérez, N. (2023). Geotechnical aspects of drilling and excavation of volcanic terrain for groundwater exploitation. Rem - International Engineering Journal, 76(2), 203-210. 10.1590/0370-44672021760027

Santamarta, J.C., Machín, N., & Cruz-Pérez, N. (2023). Irrigation efficiency in banana crops in the Canary Islands. The Open Agriculture Journal, 17(1). 10.2174/18743315-V16-E221226-2022-49

Santamarta, J.C., Molina, A., Moreno, F., Rodríguez-Martín, J., & Cruz-Pérez, N. (2022). Water harvesting strategies for agriculture in the Canary Islands. Human Ecology Review, 27(2), 131-144. 10.22459/HER.27.02.2022.07

Santana Pérez, L. M. (2008). La precipitación de niebla en Tenerife. Cabildo de Tenerife.Agrocabildo.https://www.agrocabildo.org/publica/analisisclimatico/precipitacion_en_niebla.pdf

Santimano, T., & Pysklywec, R. N. (2020). The influence of lithospheric mantle scars and rheology on intraplate deformation and orogenesis: Insights from tectonic analog models. Tectonics, 39(5). https://doi.org/10.1029/2019TC005841

Sawyer, A., Michael, H., & Schroth, A. (2016). From soil to sea: the role of groundwater in coastal critical zone processes. Wiley Interdisciplinary Reviews Water, 3(5), 706-726. 10.1002/wat2.1157

Schmitz, M., Arnaiz-Schmitz, C., Herrero-Jáuregui, C., Rodríguez, P., Matos, D., & Pineda, F. (2017). People and nature in the Fuerteventura biosphere reserve (Canary islands): socio-ecological relationships under

climate change. Environmental Conservation, 45(1), 20-29. doi:10.1017/S0376892917000169

Schopka, H. and Derry, L. (2012). Chemical weathering fluxes from volcanic islands and the importance of groundwater: the hawaiian example. Earth and Planetary Science Letters, 339-340, 67-78. 10.1016/j.epsl.2012.05.028

Shin, J. and Hwang, S. (2020). A borehole-based approach for seawater intrusion in heterogeneous coastal aquifers, eastern part of Jeju island, Korea. Water, 12(2), 609. 10.3390/w12020609

Sobradelo, R., Martí, J., & Sparks, R. S. J. (2011). Volcanic hazard assessment for the Canary Islands (Spain) using extreme value theory. Natural Hazards and Earth System Science, 11(10), 2741–2753. https://doi.org/10.5194/nhess-11-2741-2011

Soil Survey Staff, (1999); Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys: Washington, D.C., N.R.C.S. USDA, 869 pp.

Sugimoto, R., Kitagawa, K., Nishi, S., Honda, H., Yamada, M., Kobayashi, S., ... & Tominaga, O. (2017). Phytoplankton primary productivity around submarine groundwater discharge in nearshore coasts. Marine Ecology Progress Series, 563, 25-33. 10.3354/meps11980

Sun, D., Tkalčić, H., & Reading, A. M. (2014). Hot upwelling conduit beneath the Atlas Mountains, Morocco. Geophysical Research Letters, 41(22), 8037–8044. https://doi.org/10.1002/2014GL061884

Sánchez-Benítez, A., García-Herrera, R., & Vicente-Serrano, S. (2016). Revisiting precipitation variability, trends and drivers in the Canary Islands. International Journal of Climatology, 37(9).3565-3576. 10.1002/joc.4937

Thebo, A., Drechsel, P., Lambin, É., & Nelson, K. (2017). A global, spatially-explicit assessment of irrigated croplands influenced by urban wastewater flows. Environmental Research Letters, 12(7), 074008. 10.1088/1748-9326/aa75d1

Timmerman, J., Matthews, J., Koeppel, S., Valensuela, D., & Vlaanderen, N. (2017). Improving governance in transboundary cooperation in water and climate change adaptation. Water Policy, 19(6), 1014-1029. 10.2166/wp.2017.156

Triyono, T. and Makarim, S. (2024). Small island morphometry analysis with remote sensing and GIS methods on the Satonda volcanic island. Bio Web of Conferences, 106, 04003. 10.1051/bioconf/202410604003

Unión Europea. (2020). Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de mayo de 2020 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua. Diario Oficial de la Unión Europea, L 177/32. https://www.boe.es/doue/2020/177/L00032-00055.pdf

Unión Europea. (1991). Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, relativa al tratamiento de las aguas residuales urbanas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, L 135, 30/05/1991, 40–52. Recuperado de https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:31991L0271

University of Hawai'i Economic Research Organization (UHERO). (2023). Submarine groundwater discharge: Updates on its measurement techniques, geophysical drivers, magnitudes and effects. https://uhero.hawaii.edu/submarine-groundwater-discharge-updates-on-its-measurement-techniques-geophysical-drivers-magnitudes-and-effects/

Varouchakis, E. A., et al. (2022). Spatiotemporal Geostatistical Analysis of Groundwater Level in Aquifer Systems of Complex Hydrogeology. Water Resources Research, doi:10.1029/2021WR029988.

Verdeaurora. (2018, 27 de febrero). La importancia de las Gavias en Fuerteventura. Verdeaurora Bio Farm. https://verdeaurora.com/la-importancia-de-las-gavias-en-fuerteventura/

Vicente-Serrano, S., Azorín-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., Kenawy, A., Martín-Hernández, N., Peña-Gallardo, M., ... & Tomás-Burguera, M. (2016). Recent changes and drivers of the atmospheric evaporative demand in the Canary Islands. Hydrology and Earth System Sciences, 20(8), 3393-3410. https://doi.org/10.5194/hess-20-3393-2016

Vittecoq, B., Reninger, P., Lacquement, F., Martelet, G., & Violette, S. (2019). Hydrogeological conceptual model of andesitic watersheds revealed by high-resolution heliborne geophysics. Hydrology and Earth System Sciences, 23(5), 2321-2338. 10.5194/hess-23-2321-2019

Watson, S., Arisdakessian, C., Petelo, M., Keliipuleole, K., Tachera, D., Okuhata, B., ... & Frank, K. (2024). Groundwater microbial communities reflect geothermal activity on volcanic island. Geobiology, 22(2). 10.1111/gbi.12591

Watts, G., Battarbee, R., Bloomfield, J., Crossman, J., Daccache, A., Durance, I., ... & Wilby, R. (2015). Climate change and water in the UK – past changes and future prospects. Progress in Physical Geography Earth and Environment, 39(1), 6-28. https://doi.org/10.1177/0309133314542957

Weiser, F., Sauer, A., Gettueva, D., Field, R., Irl, S., Vetaas, O., ... & Beierkuhnlein, C. (2021). Impacts of forest fire on understory species diversity in canary pine ecosystems on the island of La Palma. Forests, 12(12), 1638. https://doi.org/10.3390/f12121638

Wilson, J. T. (1963). A possible origin of the Hawaiian Islands. Canadian Journal of Physics, 41(6), 863–870.

Zerpa, F., Martín, A., & Báez, S. (2021). Study of the ecological footprint and carbon footprint in a reverse osmosis sea water desalination plant. Membranes, 11(6), 377. https://doi.org/10.3390/membranes11060377

Zhang, Y., Xiao, Y., Xian, X., Wan, K., Yu, X., & Ye, C. (2023). Genotoxicity and health risk of seawater desalination based on reverse osmosis: a case study of two seawater desalination plants in Zhoushan, China. Water, 15(13), 2470. https://doi.org/10.3390/w15132470

Capítulo 3
Proyecciones climáticas de alta resolución en las Islas Canarias

César Paradinas Blázquez
Juan Carlos Santamarta Cerezal
Noelia Cruz Pérez
Susana Clavijo Núñez

1. Modelización climática de alta resolución en territorios insulares: el caso de Canarias

El Archipiélago Canario, paradigma de islas volcánicas oceánicas por su origen y formación, presentan una morfología y geología peculiar, con islas que van desde 1 a más de 25 millones de años de antigüedad, lo que las dota de una enorme variedad de relieves. Esto, unido a una posición geográfica especial en el noreste del Atlántico Tropical, a escasos 100 km de la árida costa del Sáhara pero bajo el influjo de los alisios del Anticiclón de las Azores, otorga a las Islas Canarias una de las mayores variabilidades microclimáticas del mundo, tanto entre islas como dentro de las mismas. Esta particularidad, origen de una inmensa riqueza paisajística y de biodiversidad, las hace también padecer una alta sensibilidad frente a los cambios climáticos. El diseño de estrategias sostenibles de adaptación requiere por tanto de la caracterización a alta resolución de su clima y la modelización precisa de sus variaciones e impactos sobre sus recursos hídricos. En este contexto, la adaptación de escala de los modelos climáticos a la micro realidad de un entorno insular tan complejo como el canario es una exigencia. En este sentido, la técnica de reducción de escala estadística FICLIMA (Ribalaygua et al, 2013), adaptada a los escenarios más recientes del proyecto CMIP6, se ha consolidado como una herramienta de gran valor para la generación de proyecciones climáticas de alta resolución. Esta metodología permite representar, siempre que se cuente con una densa red de observaciones (como por fortuna es el caso de Canarias), de forma detallada los patrones de temperatura y precipitación a escalas espaciales del orden de hasta 100x100 metros, una resolución importante para la planificación hídrica.

El enfoque propuesto parte del reconocimiento de que las islas volcánicas presentan respuestas climáticas e hidrológicas diferenciadas debido a su singular configuración geológica, lo que aquí se suma a la diferenciada distribución de climas

por zonas. Los regímenes de meteorización dominantes, asociados a materiales volcánicos jóvenes con alta conductividad hidráulica, afectan de forma decisiva a las tasas de recarga de los acuíferos y, por tanto, a la disponibilidad de agua subterránea. Esta dinámica es especialmente relevante en el marco del método FICLIMA que integra datos climáticos observados, incluyendo los reanálisis ERA5 y ERA5-Land para verificar y posteriormente mejorar y validar las proyecciones generadas. Esta combinación de modelización y verificación empírica refuerza la fiabilidad del sistema y su capacidad para representar con fidelidad las condiciones climáticas locales.

A partir de estas proyecciones de alta resolución, generadas a escala diaria para cada punto considerado en el análisis, pueden derivarse indicadores hidrológicos clave como el índice de aridez (IA), el balance hídrico o el índice SPEI (Vicente-Serrano et al., 2010), fundamentales para anticipar escenarios de estrés hídrico. El índice de aridez, por ejemplo, permite identificar las zonas con mayor vulnerabilidad climática frente a la disminución de las precipitaciones y el aumento de la demanda atmosférica de agua (Polson et al., 2016; Iles et al., 2013). Estos indicadores resultan imprescindibles en la elaboración de estrategias de gestión integrada del agua, particularmente en contextos expuestos tanto a fenómenos naturales extremos, como las erupciones volcánicas, como a presiones de origen antrópico.

La aplicación de FICLIMA en la modelización climática de alta resolución proporciona un marco metodológico robusto para analizar el futuro del recurso hídrico en las Islas Canarias. Esta aproximación permite generar información crítica para responsables públicos, ingenieros y expertos en planificación hídrica, facilitando el diseño de políticas de adaptación ajustadas a la complejidad climática e hidrológica de los sistemas insulares volcánicos. A medida que los escenarios climáticos mejoran en resolución y coherencia gracias al desarrollo del CMIP6, el perfeccionamiento continuo de las metodologías de reducción de escala será esencial para responder con eficacia a los desafíos que enfrenta la gestión del agua en estas regiones especialmente vulnerables.

A través de esta metodología, se han generado proyecciones a escala diaria para hasta 723 ubicaciones de precipitación y 280 de temperatura, espacializadas con parámetros geográficos en promedios para tres horizontes temporales (2021-2050, 2041-2070 y 2071-2100) y cuatro escenarios de emisiones (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5), sobre los que se han construido indicadores derivados como el índice de aridez, el balance hídrico y el índice SPEI. Estas variables permiten evaluar con precisión los impactos esperados del cambio climático sobre la disponibilidad de agua, la intensidad de la sequía y los procesos de desertificación.

La integración de estas proyecciones en la plataforma SICMA-Canarias facilita el acceso público a los datos en alta resolución, permitiendo su consulta por

isla, municipio o punto georreferenciado. Esta herramienta se configura como un recurso estratégico para planificadores, gestores del agua y responsables públicos, al ofrecer una visión detallada y prospectiva del comportamiento climático del archipiélago. En consecuencia, la metodología desarrollada no solo mejora la comprensión científica del cambio climático en Canarias, sino que refuerza su capacidad de adaptación frente a escenarios cada vez más inciertos y exigentes.

2. Caso de estudio: Islas Canarias

La región de la Macaronesia incluye las Islas Canarias, Madeira, Azores, Cabo Verde y las Islas Salvajes (estas últimas no habitadas), territorios que presentan características geográficas y aspectos climáticos únicos. Los recursos hídricos se ven gravemente amenazados en estos grupos de islas (Santamarta et al., 2022), pues la mayoría dependen de las precipitaciones y se enfrentan a retos adicionales con fuentes de agua dulce limitadas para satisfacer la creciente demanda por el crecimiento de la población, el turismo y la agricultura. La disponibilidad de agua en la región de la Macaronesia suele variar en función de la topografía, el clima y la respectiva gestión de los recursos. El agua subterránea se sitúa como recurso esencial, principalmente en las Islas Canarias y Cabo Verde, donde los acuíferos son la principal fuente de agua potable (Van der Velde, 2006).

En concreto, el Archipiélago Canario está compuesto por ocho islas: El Hierro, La Palma, La Gomera, Tenerife, Gran Canaria, Fuerteventura, Lanzarote y La Graciosa. Situadas en el océano Atlántico, a unos 100 km al noroeste de la costa africana (ver Figura 3.1), es la comunidad autónoma más meridional de España. Estas islas son de origen volcánico y, a excepción de La Gomera, siguen siendo volcánicamente activas, teniendo la erupción más reciente en La Palma en 2021 (García-Gil et al., 2023).

Con una longitud de 18 a 13° O y una latitud de 27 a 29° N, las Islas Canarias están situadas en una zona climática subtropical, caracterizada por temperaturas suaves y estables durante todo el año (Herrera et al., 2001). La temperatura media anual en las islas suele oscilar entre los 18°C y los 24°C. En el caso de las precipitaciones, son muy variables y siguen claros patrones estacionales. La mayor parte de las precipitaciones se producen durante los meses de otoño e invierno, entre octubre y marzo; es entonces cuando las tormentas atlánticas afectan a la región (Cropper & Hanna, 2013; Werth et al., 2021). El resto de los meses la precipitación se reduce a prácticamente cero al ascender las altas presiones de latitud y quedar el archipiélago bajo el influjo permanente de la dorsal anticiclónica africana, destacando sólo el aporte de lluvia horizontal por retención de humedad en

zonas puntuales expuestas al alisio. Las precipitaciones anuales oscilan entre menos de 150 mm en las zonas costeras meridionales de las islas orientales, las cuales son más áridas, y más de 1.000 mm en las medianías de las islas más occidentales (Cruz-Pérez et al., 2024).



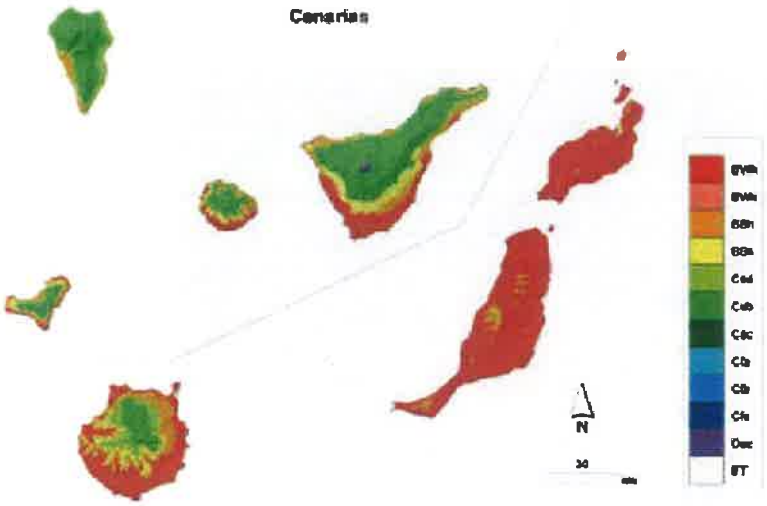
Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 3.1. Ubicación de las islas que conforman el Archipiélago Canario

A pesar de tener un clima generalmente estable y seco debido a la influencia de los vientos alisios y del sistema de alta presión de las Azores (Herrera et al., 2001), el clima en todo el archipiélago es muy diverso. Las diferencias significativas de temperatura, humedad y precipitaciones en distancias cortas son el resultado de diversos factores como la topografía, la altitud y la orientación de las islas. Esto da lugar a numerosos microclimas, que van desde climas áridos y desérticos en Lanzarote, Fuerteventura y las partes meridionales de las islas occidentales hasta climas subtropicales y húmedos en las laderas septentrionales de las islas occidentales (Bechtel, 2016).

Según la clasificación climática de Köppen, estos climas pueden dividirse en tres tipos climáticos principales (Figura 3.2): climas áridos (clima B) en las islas orientales más cercanas al Sáhara (Lanzarote, Fuerteventura y Gran Canaria), así como en las zonas de menor altitud y sotavento de las islas occidentales; climas templados

(clima C) en las islas occidentales con mayor rango altitudinal; y clima continental (clima D) en las zonas de mayor altitud alrededor del Teide (Söllheim et al., 2024).



Fuente: Andrés Chazarra Bernabé (2012)

Figura 3.2. Clasificación climática de Köppen-Geiger en el Archipiélago de Canarias, contenido en el informe "Atlas climático de los Archipiélagos de Canarias, Madeira y Azores" de la Agencia Estatal de Meteorología de España y el Instituto de Meteorología de Portugal

De forma similar, según el índice de aridez, las islas orientales (Lanzarote y Fuerteventura) se clasifican como áridas y semiáridas. Las islas occidentales experimentan una gama más amplia de regímenes, desde áridos a húmedos. Los regímenes semiáridos siguen siendo predominantes en la mayoría de las islas occidentales, excepto en La Palma, donde predominan los climas subhúmedos y húmedos (Corral Quintana et al., 2015).

El cambio climático, especialmente las variaciones en los patrones de temperatura y precipitación, está provocando una tendencia progresiva hacia un clima árido en las Islas Canarias (Carrillo et al., 2023; Vara et al., 2020). Desde principios del siglo XX, la región ha experimentado una drástica reducción de las precipitaciones, registrándose en varios estudios una disminución del 20% en las últimas dos décadas (Carrillo et al., 2023; Expósito et al., 2015). Mientras tanto, los niveles de calor han aumentado considerablemente; con incrementos de temperatura más significativos durante la noche (Bechtel, 2016). Así, la tasa de evaporación en esta zona también ha aumentado y los recursos hídricos están más estresados (Hanz et al., 2022; Weiser et al., 2021).

Según las proyecciones, se prevé que estos cambios en las precipitaciones y la temperatura se acentúen hacia finales del siglo XXI, sobre todo en escenarios con mayores concentraciones de gases de efecto invernadero (Expósito et al., 2015). Estas alteraciones de la temperatura y las precipitaciones afectan directamente a los niveles de aridez de las islas, así como al balance hídrico y los procesos de sequía.

Para abordar las cuestiones mencionadas, y en consonancia con la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea, las Islas Canarias han puesto en marcha una planificación hidrológica integral a través de los Planes Hidrológicos Insulares, que sirven como piedra angular de la gestión de los recursos hídricos. Estos planes, revisados cada seis años, examinan el estado hidrológico y las tendencias futuras de cada isla (Santamarta et al., 2022). Su principal objetivo es garantizar que el suministro de agua actual y futuro satisfaga las necesidades de la sociedad, tanto en lo que respecta a la cantidad como a la calidad.

Por lo tanto, las estructuras de gobernanza del agua y los marcos reguladores desempeñan un papel clave a la hora de facilitar una gestión eficaz del agua y los esfuerzos de conservación en las Islas Canarias (Rodríguez-Urrego et al., 2022). La Ley Canaria de Aguas 12/1990 otorgó a cada isla autonomía sobre su sistema hidrológico, permitiendo la gestión, organización y planificación a través de su propio Consejo Insular de Aguas (Rodríguez-Urrego et al., 2022). Para hacer frente a los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, estas políticas deberían integrar estrategias de adaptación al clima (Schmitz et al., 2017). Para ello, es necesario conocer cómo van a evolucionar los distintos indicadores climáticos en las Islas Canarias, considerando las variaciones existentes a lo largo del territorio.

En este sentido, las siguientes secciones del capítulo presentan la metodología seguida para analizar la evolución de distintas variables climáticas a lo largo del siglo XXI en las Islas Canarias. En primer lugar, se presenta la información meteorológica empleada y la aplicabilidad de la metodología en las Islas Canarias. Los escenarios climáticos se generaron utilizando primero una metodología de reducción de escala estadística denominada FICLIMA (método estadístico de dos pasos por análogos y funciones de transferencia regresivas) y una posterior distribución espacial de resultados.

A continuación, se recoge el procedimiento para analizar la temperatura y la precipitación, como variables directas en torno a las que se han construido otros indicadores. A raíz de los resultados obtenidos para ambas variables, se calculan otras tres variables: el índice de aridez, el balance hídrico y la sequía.

Para proyectar escenarios climáticos futuros para las Islas Canarias, se han seleccionado tres horizontes temporales: a corto plazo (2021-2050), a medio

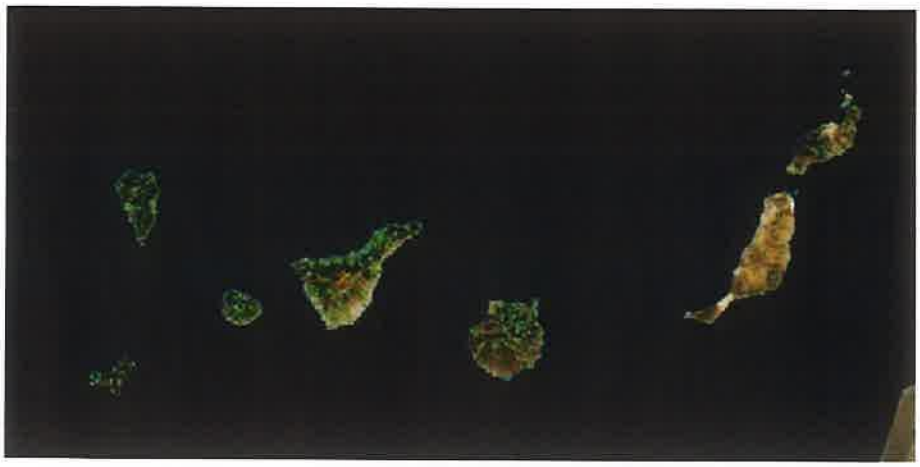
plazo (2041-2070) y a largo plazo (2071-2100). La línea base histórica cubre el periodo de 30 años comprendido entre 1985 y 2014; en línea con el final del experimento histórico de los modelos climáticos del CMIP6 utilizados, que cierran su "pasado" en 2014 e inician en 2015 las simulaciones. Los cambios futuros se han analizado en base a cuatro escenarios propuestos por el Sexto Informe de Evaluación (AR6) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), e incorporados en los experimentos del CMIP6. Los datos climáticos provistos por los hasta 10 modelos utilizados se han tratado mediante *downscaling* estadístico incorporando observaciones meteorológicas históricas en la zona, con el fin de trabajar con datos locales y acotados. Todos los análisis espaciales posteriores se han desarrollado con alta resolución (100 x 100 metros).

El uso de datos climáticos con dicha precisión permite tener en cuenta las especificidades locales, contribuyendo a una mejor comprensión de la evolución de los indicadores presentados bajo la influencia del cambio climático. A raíz de estos resultados, puede desarrollarse un análisis más efectivo de las implicaciones de estos cambios sobre la agricultura, la biodiversidad, el suministro de agua y los asuntos humanos en el archipiélago.

3. Información meteorológica

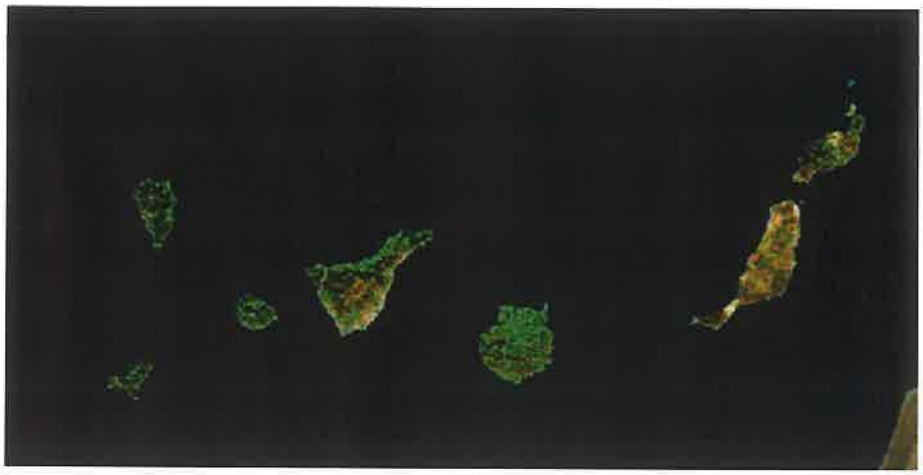
Los datos históricos, recogidos mediante observaciones y datos de reanálisis climático, se utilizan para verificar los modelos climáticos y alimentar los procedimientos estadísticos de reducción de escala. La presente metodología utiliza las observaciones meteorológicas y la información climática como fuentes de datos.

En primer lugar, se recopilaron las observaciones meteorológicas disponibles para todas las Islas Canarias. En particular, se analizaron las variables de temperatura y precipitación, a partir de las cuales se calculan otros indicadores climáticos. Para ello fue necesario crear una base de datos exhaustiva con observaciones meteorológicas de larga duración (idealmente 30 años o, a efectos de verificación, al menos 2.000 registros). La metodología ha utilizado información de varias estaciones meteorológicas de cada isla del archipiélago. Tenerife cuenta con el mayor número de estaciones meteorológicas con datos de temperatura que contribuyen a este estudio, con un total de 140 estaciones de temperatura válidas (Figura 3.3). En el caso de las observaciones de precipitación, la isla de Gran Canaria es la que cuenta con un mayor número de estaciones útiles para el análisis, con un total de 372 estaciones (Figura 3.4).



Fuente: SICMA-Canarias (2025)

Figura 3.3. Ubicación de las estaciones meteorológicas de las que se han obtenido registros de temperatura



Fuente: SICMA-Canarias (2025)

Figura 3.4. Ubicación de las estaciones meteorológicas de las que se han obtenido registros de precipitación

La información climática sirve como fuente complementaria a las observaciones meteorológicas, proporcionando datos que ayudan a compensar la falta de registros en zonas donde no se dispone de mediciones directas. Esta información ofrece una amplia cobertura espacial, facilitando el tratamiento y la gestión de los datos en todo el archipiélago. En este contexto, se han empleado Sistemas de Información Geográfica (SIG) estáticos, datos de reanálisis y modelos climáticos. En

primer lugar, utilizando diferentes plataformas SIG, se han obtenido capas de datos relacionados con la nubosidad mensual, la humedad relativa y las características topográficas, entre otros.

El reanálisis climático integra modelos meteorológicos numéricos con observaciones asimiladas para representar las condiciones climáticas recientes. Se estiman variables atmosféricas como la temperatura, la presión y el viento, así como factores de superficie como la precipitación, la humedad del suelo, la altura de las olas y la temperatura de la superficie del mar. Este proyecto utiliza los reanálisis ERA5 y ERA5-Land, que proporcionan datos horarios desde 1950 hasta la actualidad. Se obtuvieron capas de datos para variables a diferentes altitudes, incluidas la humedad relativa y la precipitación.

Por último, se incluye el uso de los modelos CMIP6 mencionados en el AR6 del IPCC, integrando en el marco analítico las últimas Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (*Shared Socioeconomic Pathways*, SSP). El uso de estos modelos supone un salto en la información disponible para Canarias y un enriquecimiento en todas las futuras estrategias de adaptación y mitigación que puedan darse en el archipiélago. Para asegurar una evaluación exhaustiva de la incertidumbre, se han incorporado 10 modelos CMIP6 a escala diaria. Esta selección proporciona datos suficientes para cuantificar la incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas. Dadas las distintas características de cada modelo, se llevó a cabo una evaluación rigurosa de su rendimiento y de la documentación disponible para identificar los modelos más adecuados para las Islas Canarias.

Tras la evaluación del rendimiento de los modelos basada en el Error Medio Absoluto (MAE, por sus siglas en inglés) y el sesgo mensual, se descartan un modelo para precipitación y otro para temperatura. La propuesta final de modelos se muestra en la Tabla 3.1. Una vez validados, se calculan proyecciones climáticas para cada uno de los modelos. Además, se incluyen la mediana y los cuantiles (10-90%) para conocer mejor y reducir la incertidumbre, mejorando la comprensión de los climas futuros para lugares específicos.

Tabla 3.1. Resultados de validación de los modelos CMIP en Canarias

Modelos	Centro Responsable	Validación precipitación	Validación temperatura
ACCESS-CM2	Australian Community Climate and Earth System Simulator (ACCESS), Australia	Aceptado	Aceptado
BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center (BCC), China Meteorological Administration, China.	Aceptado	Aceptado
CanESM5	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CC-CMA), Canadá.	No aceptado	Aceptado

CMCC-ESM2	Centro Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC).	Aceptado *	No aceptado
CNRM-ESM2-1	CNRM (Centre National de Recherches Meteorologiques), Meteo-France, Francia.	Aceptado	Aceptado
EC-EARTH3	EC-EARTH Consortium	Aceptado	Aceptado
MPI-ESM1-2-HR	Max-Planck Institute for Meteorology (MPI-M), Germany.	Aceptado	Aceptado
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute (MRI), Japan.	Aceptado	Aceptado
NorESM2-MM	Norwegian Climate Centre (NCC), Norway.	Aceptado	Aceptado
UKESM1-0-LL	UK Met Office, Hadley Centre, United Kingdom.	Aceptado	Aceptado

*Los resultados no son tan eficientes como los arrojados por el resto de los modelos, pero se emplean al entrar en los límites de la validación.

Fuente: elaboración propia (2025)

4. Aplicabilidad de la metodología FICLIMA en las Islas Canarias

En este trabajo se ha utilizado la metodología FICLIMA introducida por Ribalaygua et al. (2013). El *downscaling* estadístico presenta grandes ventajas en la predicción regional y local generada a partir de la climática global, como el bajo coste computacional. La estratificación por análogos da una respuesta adecuada para enfrentar los problemas causados por la variabilidad climática dentro de los ambientes insulares.

La metodología FICLIMA es un proceso en dos etapas que comprende una estratificación por análogos inicial seguida de un análisis de regresión en función de la variable, introduciendo según el caso funciones de transferencia y tratamientos ajustando con otros predictores que permite corregir el mayor problema de los procesos estadísticos, la estacionariedad, pudiendo considerar la señal real del cambio climático en cada modelo y variable a futuro. Esta técnica ha demostrado ser extremadamente eficaz en muchos estudios nacionales e internacionales previos realizados por otros autores (Monjo et al., 2016).

Con el fin de adaptar la metodología FICLIMA al contexto de Canarias, se realiza un análisis del comportamiento espacial del clima canario desde el inicio de cada serie de datos, generando un clima base durante el periodo 1985 a 2014. Se aplicó un algoritmo de Regresión Geográficamente Ponderada (GWR) para integrar los datos topográficos y climáticos con las observaciones meteorológicas, optimizando la extrapolación de las condiciones climáticas locales a través de

cada isla. Se realizaron un total de 25 pruebas por isla para variables climáticas clave (temperatura máxima y mínima, así como precipitaciones). Los resultados se sometieron a una rigurosa evaluación de la calidad no sólo mediante análisis estadísticos, sino también aplicando el extenso conocimiento del clima canario del equipo con chequeos espaciales y visuales a escala anual, mensual y estacional; asegurando que cada espacialización recogía los comportamientos particulares del clima en cada isla. Las variables analizadas para cada isla se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Selección de capas para la caracterización espacial de cada una de las distribuciones climáticas canarias

Isla	Variable climática	Capas topográficas y climáticas utilizadas
La Palma	Temperatura máxima	altitud, distcost, pendiente, norte, este, nubosidad
	Temperatura mínima	altitud, distcost, pendiente, norte, este, nubosidad
	Precipitación	altitud, distcost, norte, este, nubosidad, Temperatura de Superficie Terrestre, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
El Hierro	Temperatura máxima	altitud, distcost, pendiente, nubosidad
	Temperatura mínima	altitud, distcost, pendiente, nubosidad
	Precipitación	altitud, pendiente, norte, este, nubosidad
La Gomera	Temperatura máxima	altitud, pendiente, norte, nubosidad
	Temperatura mínima	altitud, pendiente, norte, nubosidad
	Precipitación	altitud, pendiente, norte, nubosidad
Tenerife	Temperatura máxima	altitud, pendiente, norte, nubosidad
	Temperatura mínima	altitud, pendiente, norte, nubosidad
	Precipitación	altitud, pendiente, norte, nubosidad
Gran Canaria	Temperatura máxima	altitud, distcost, pendiente, norte, nubosidad
	Temperatura mínima	altitud, distcost, pendiente, norte, nubosidad
	Precipitación	altitud, distcost, pendiente, norte, nubosidad
Fuerteventura	Temperatura máxima	altitud, nubosidad
	Temperatura mínima	altitud, nubosidad
	Precipitación	altitud, distcost, norte, este, nubosidad
Lanzarote	Temperatura máxima	altitud, distcost, norte, este, nubosidad
	Temperatura mínima	altitud, distcost, norte, este, nubosidad
	Precipitación	altitud, pendiente, nubosidad

Fuente: elaboración propia (2025)

5. Cálculo de las proyecciones de temperatura

El primer paso de la metodología FICLIMA se basa en un enfoque de estratificación por análogos. Este método supone que patrones atmosféricos análogos (predictores) dan lugar a efectos locales análogos (predictandos). En concreto, se seleccionaron los días que más se parecían al día objetivo que se iba a reducir. La similitud entre dos días cualesquiera se cuantificó mediante el uso de tres ventanas sinópticas anidadas (ponderadas de forma diferente) y cuatro campos atmosféricos a gran escala, empleándose una distancia pseudoeuclidiana para medir la disparidad entre los campos a gran escala utilizados como predictores. Para cada predictor, se calculó la distancia euclidiana ponderada y posteriormente se estandarizó sustituyéndola por el percentil más cercano de una población de referencia de distancias euclidianas ponderadas correspondientes a ese predictor específico (Ribalaygua et al., 2013). Además, en la primera etapa de estratificación por análogos se incorporó la influencia no lineal de otros factores meteorológicos significativos, como la nubosidad, las precipitaciones y la velocidad del viento en la baja troposfera.

En el segundo paso, se realizó un análisis de regresión lineal múltiple para el conjunto seleccionado de los días más análogos, aplicado individualmente a cada estación y a cada día objetivo. A partir de un conjunto de predictores potenciales, el modelo de regresión lineal identificó los que mostraban la correlación más alta, utilizando un enfoque por pasos que alternaba entre la selección hacia delante y hacia atrás.

6. Cálculo de las proyecciones de precipitación

El primer paso para la predicción de las precipitaciones coincide con el empleado para la temperatura. Se trata de un método de estratificación analógica en el que se determinan los días con patrones atmosféricos globales, predictores, similares a los del registro observados localmente, predictandos. El método asume que condiciones atmosféricas similares conducen a efectos locales similares y utiliza una ponderación de distancias euclidianas entre análogos sobre tres ventanas sinópticas y cuatro campos a gran escala. Esto pondera bastante bien las relaciones no lineales entre patrones atmosféricos y locales.

La segunda etapa, que es fundamental, se centra específicamente en la simulación de las precipitaciones. Esta etapa consiste en utilizar un subconjunto de días «problema» (m) identificados como los más similares al día objetivo sobre la base de la primera etapa de la metodología. Para simular la precipitación, el método

selecciona los días (m) con las puntuaciones de similitud más altas y aplica una serie de reglas definidas.

Inicialmente, se obtiene una estimación aproximada de la precipitación del día objetivo promediando las cantidades de precipitación de los días análogos. A continuación, estos días se clasifican y ordenan en función de sus estimaciones de precipitación. El último paso consiste en asignar las cantidades de precipitación a los días clasificados, garantizando que la metodología no sólo capta los niveles medios de precipitación, sino que también representa eficazmente los extremos climáticos y su variabilidad temporal.

7. Cálculo de las proyecciones del índice de aridez

El índice de aridez (IA) se calcula en función de la precipitación (Pr) y la evapotranspiración (ETo), tal y como se muestra en la Ecuación 3.1. Esta fórmula se ha aplicado directamente a cada punto de malla tratado en las Islas Canarias. Cuanto más se acerca el IA a 0, más árido es el lugar, mientras que valores superiores a 1 corresponden a una mayor humedad.

Ecuación 3.1

$$AI = \frac{Pr}{ET_o}$$

Para calcular la aridez ha sido necesario, en primer lugar, calcular las variables precipitación y temperatura. Una vez obtenidos los resultados, es posible calcular la variable evapotranspiración y, por último, el índice de aridez. En la sección siguiente se exponen los fundamentos del método.

7.1. Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ETo)

Para el cálculo de esta variable, se decidió utilizar el modelo «Penman-Monteith FAO98». En él se incluyen todos los flujos de intercambio de energía en la interfase suelo-atmósfera, incluyendo el cambio de estado del agua de líquido a vapor, ya sea directamente por evaporación en el suelo o por transpiración en las plantas (Ecuación 3.2 y Ecuación 3.3). Utilizando esta ecuación, ha sido posible introducir un coeficiente de corrección para ajustar el término Rn a la topografía real, teniendo en cuenta la pendiente del terreno y su orientación, factores críticos en el cálculo de la ETo real de una zona.

Ecuación 3.2

$$ET_o = \frac{0{,}408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T+273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0{,}34 \cdot u_2)}$$

Ecuación 3.3

$$R_n = \left(1 - \alpha\right) \cdot \frac{2 + \alpha \cdot (1 - \text{coscos } p)}{2} \cdot R_s \cdot \frac{s_n}{sh_n \cdot \text{coscos } p} - R_{ol}$$

Donde:

- ET_0 = evapotranspiración de referencia (mm/día). La evapotranspiración de la superficie de un cultivo hipotético de 0,12 m de altura, 70 s/m de resistencia y 0,23 de albedo
- Δ = pendiente de la curva de tensión de vapor saturado (kPa/°C)
- R_n = radiación solar neta sobre la superficie (MJ/m2 día)
- G = flujo de calor hacia el suelo (MJ/m2 día)
- γ= constante psicrométrica (kPa/ °C)
- T = temperatura media del aire (°C)
- u_2 = velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)
- e_a = presión de vapor real (kPa)
- e_s = presión de vapor saturado (kPa)
- s_n = incidencia solar
- sh_n = incidencia solar normalizada

8. Cálculo de las proyecciones del Balance hídrico

El cálculo del balance hídrico se desarrolló de forma simplificada, en función de la precipitación y la evapotranspiración (Ecuación 3.4). Así, si el suelo pierde toda su reserva, el balance hídrico toma el valor 0. Además, los ajustes de regresión afinan las estimaciones de precipitación generando valores de precipitación diaria basados en análogos históricos. El estudio también simula los episodios de precipitaciones extremas, que son fundamentales para comprender el impacto de las sequías y las inundaciones en el balance hídrico de las islas. Al tener en cuenta tanto el momento como la magnitud, la metodología FICLIMA aumenta la precisión de las proyecciones pluviométricas. Por último, los procesos de validación abordan las incertidumbres inherentes a las proyecciones climáticas, garantizando que los modelos se mantengan alineados con la diversidad del terreno y los microclimas de las Islas Canarias.

Ecuación 3.4

$$WB_m = WB_{m-1} + Pr_m - ETo_m$$

WB_m representa el balance hídrico de un mes determinado (m), mientras que Pr_m y ETo_m corresponden a la precipitación total y a la evapotranspiración de referencia del mismo periodo, respectivamente. Además, WB_{m-1} denota el balance hídrico registrado en el mes anterior.

Esta metodología es especialmente adecuada para las Islas Canarias, donde los patrones climáticos únicos y la evolución de la demanda de agua plantean retos constantes. El método capta las variaciones microclimáticas evaluando los cambios en las precipitaciones desde las zonas costeras hasta las zonas más elevadas; identifica los patrones climáticos extremos, como las sequías prolongadas o las precipitaciones intensas que amenazan los recursos hídricos; y proporciona información para futuras estrategias de gestión del agua. Mediante la integración de técnicas avanzadas de modelización climática, este enfoque permite a las partes interesadas anticipar y mitigar los efectos del cambio climático en el balance hídrico de la región, garantizando la sostenibilidad y la resiliencia a largo plazo de los sistemas hídricos de las Islas Canarias.

9. Cálculo de las proyecciones de sequías

Con el fin de evaluar la magnitud del riesgo de sequía en cada isla del archipiélago, se hace uso del Índice de Precipitación y Evapotranspiración Estandarizado (*Standardised Precipitation and Evapotranspiration Index*, SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010). El SPEI es una métrica robusta que permite integrar tanto la precipitación como las demandas atmosféricas de agua, estimada a través de la evapotranspiración potencial. Este índice se obtiene como la diferencia entre la precipitación mensual y la evapotranspiración potencial, estimada mediante el método de Hargreaves (Hargreaves & Allen, 2003), facilitando así el seguimiento detallado de la disponibilidad de agua a través de diversas escalas temporales. De este modo, la utilización del SPEI facilita la caracterización de la sequía meteorológica e hidrológica, proporcionando así una perspectiva global de la disponibilidad de agua.

En función del valor SPEI, se aplican las siguientes categorías de clasificación climática.

Tabla 3.3. Clasificación climática en función del Índice de Evapotranspiración de Precipitaciones Estandarizado (SPEI)

Clasificación climática SPEI	Umbrales
Extremadamente húmedo	SPEI ≥ 2.0
Muy húmedo	1.50 ≤ SPEI < 2.00
Moderadamente húmedo	0.50 ≤ SPEI < 1.50
Normal	-0.50 ≤ SPEI < 0.50
Moderadamente seco	-1.50 ≤ SPEI < -0.50
Sequedad severa	-2.00 ≤ SPEI < -1.50
Extremadamente seco	SPEI < -2.00

Fuente: elaboración propia (2025)

El análisis se realizó utilizando escalas temporales de 3 y 12 meses, con el objetivo de delinear la sequía meteorológica a corto y largo plazo, respectivamente. Este enfoque metodológico facilitó la identificación de patrones espaciales y temporales en la evolución del estrés hídrico dentro del archipiélago. La selección del SPEI como indicador se basa en su capacidad para reflejar alteraciones en el balance hídrico bajo condiciones climáticas variables, lo que lo convierte en un instrumento adecuado para la evaluación de las ramificaciones del cambio climático sobre la disponibilidad de recursos hídricos y la facilitación de la planificación del uso del suelo y la gestión del agua.

10. Limitaciones y verificación de la metodología

La metodología FICLIMA ofrece un marco robusto para la proyección climática, abordando los retos clave que plantea la no estacionariedad en las relaciones predictor-predicho debido al cambio climático. Uno de los principales puntos fuertes es su capacidad para simular precipitaciones extremas, captando una variabilidad a menudo subestimada por los métodos tradicionales de reducción de escala. Esta capacidad es fundamental para gestionar los riesgos de inundaciones y sequías en regiones vulnerables.

A diferencia de los modelos puramente empíricos, FICLIMA aprovecha las relaciones físicas, lo que aumenta su fiabilidad para futuros escenarios climáticos. Sin embargo, su dependencia de los datos históricos limita su capacidad de predicción más allá del rango observado en ausencia de una densidad de observaciones suficientemente representativa del clima local.

Referente a la presente investigación, el rendimiento del método se evaluó comparando las series temporales observadas y las simuladas por el reanálisis ERA5-Land para un periodo de referencia histórico (1985-2014).

En cuanto a la validación de los modelos CMIP6, se utilizaron dos métodos. Las estadísticas clave para un modelo incluyen el sesgo medio y la desviación estándar, calculados como el error total medio entre estaciones y variables climáticas. Una elevada dispersión del sesgo puede distorsionar la variabilidad regional y dar lugar a representaciones climáticas poco realistas.

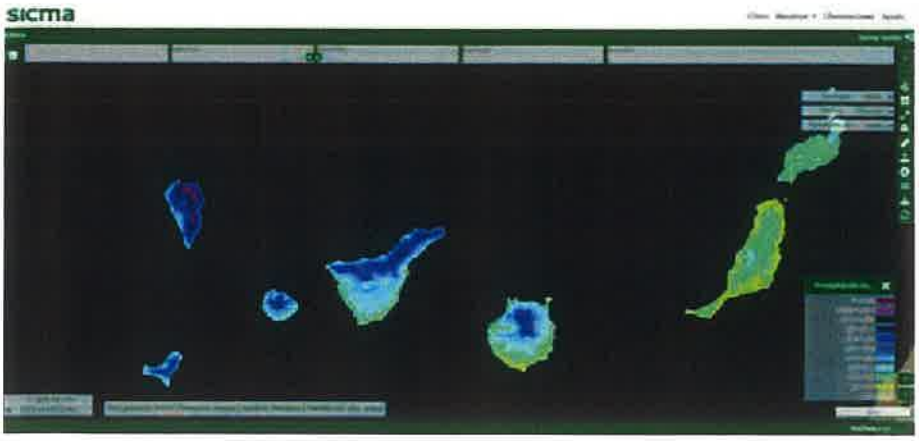
El error medio absoluto (MAE) (Stauffer & Seaman, 1990) y el error medio relativo (MRE) sirvieron como métricas clave para la mayoría de las variables climáticas, ofreciendo una medida primaria de la eficacia del método a la hora de replicar la variabilidad meteorológica diaria. Posteriormente, se empleó la prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS) para evaluar la significación estadística de las distribuciones de probabilidad simuladas en comparación con las distribuciones observadas (Marsaglia et al., 2003). Además, se aplicó la prueba KS para determinar la eficacia de la corrección del sesgo (Yu et al., 2006), garantizando así una evaluación exhaustiva del rendimiento global del método.

11. Plataforma SICMA-Canarias

Todos los resultados y datos derivados de la presente investigación están disponibles en la plataforma SICMA-Canarias (Santamarta et al., 2025). Se trata de un visor de consulta de proyecciones locales de cambio climático en las Islas Canarias con una alta resolución (100x100 metros), empleando escenarios adaptados al Sexto Informe del IPCC.

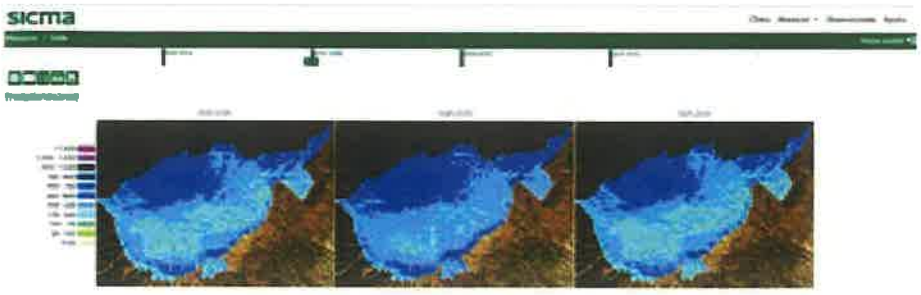
La plataforma permite visualizar distintas variables y su evolución según diferentes escenarios socioeconómicos y cuatro periodos temporales. En concreto, se puede consultar el periodo de referencia (1985-2014), el futuro próximo (2021-2050), el futuro medio (2041-2070) y el futuro lejano (2071-2100). En la Figura 3.5 se muestra un ejemplo de consulta en dicha plataforma.

El visor permite consultar tanto las variables directas de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación; así como las variables derivadas como son la evapotranspiración potencial, la evapotranspiración real, el balance hídrico, SPEI, el índice de aridez e indicadores relativos a las olas de calor. Adicionalmente, es posible obtener los resultados para cada una de las islas, municipios, los Parques Nacionales de las Islas Canarias (Figura 3.6) o para coordenadas concretas.



Fuente: SICMA-Canarias (2025)

Figura 3.5. Consulta en la plataforma SICMA- Canarias de la precipitación media anual en las Islas Canarias bajo el escenario climático intermedio SSP2-4.5



Fuente: SICMA-Canarias (2025)

Figura 3.6. Consulta en la plataforma SICMA-Canarias de la evolución de la precipitación media anual en el Parque Nacional del Teide

A través de esta plataforma se espera facilitar la toma de decisiones en la gestión hídrica, potenciando estrategias sostenibles, integrales y adaptativas que garanticen el suministro de agua en los distintos sectores de las Islas Canarias. Una ventaja significativa que presenta SICMA-Canarias es la posibilidad de disponer públicamente de indicadores climáticos en alta resolución, obteniendo variables meteorológicas locales y patrones extremos en contextos como el del Archipiélago Canario donde existen grandes variaciones a pequeña escala.

12. Referencias bibliográficas

Bechtel, B. (2016). The climate of the Canary Islands by annual cycle parameters. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 41, 243–250. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B8-243-2016

Carrillo, J., Hernández-Barrera, S., Expósito, F. J., Díaz, J. P., González, A., & Pérez, J. C. (2023). The uneven impact of climate change on drought with elevation in the Canary Islands. Npj Climate and Atmospheric Science, 6(1). https://doi.org/10.1038/s41612-023-00358-7

Corral Quintana, S., Legna Verna, C., Tejedor Salguero, M., Jimenez Mendoza, C. C., Díaz Peña, F., Rivero Ceballos, J. L., Hernández Hernández, J., Romero-Manrique de Lara, D., & Legna-de la Nuez, D. (2015). Dealing with desertification in the Canary Islands: a strategic planning methodology for complex problematiques. *ARETHUSE Scientific Journal of Economics and Business Management*, *2*, 33–54. https://www.researchgate.net/publication/280841026

Cropper, T., & Hanna, E. (2013). An Analysis of the Climate of Macaronesia, 1865–2012. *International Journal of Climatology*. doi:10.1002/joc.3710

Expósito, F. J., González, A., Pérez, J. C., Díaz, J. P., & Taima, D. (2015). High-resolution future projections of temperature and precipitation in the Canary Islands. Journal of Climate, 28(19), 7846–7856. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0030.1

García-Gil, A., Jimenez, 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/https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100989

Hanz, D. M., Cutts, V., Barajas-Barbosa, M. P., Algar, A. C., Beierkuhnlein, C., Fernández-Palacios, J. M., Field, R., Kreft, H., Steinbauer, M. J., Weigelt, P., & Irl, S. D. H. (2022). Climatic and biogeographical drivers of functional diversity in the flora of the Canary Islands. *Global Ecology and Biogeography*, *31*(7), 1313–1331. https://doi.org/10.1111/geb.13507

Hargreaves, G. H., & Allen, R. G. (2003). History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 129(1), 53–63. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:1(53)

Herrera, R. G., Puyol, D. G., Martín, E. H., Presa, L. G., & Rodríguez, P. R. (2001). Influence of the North Atlantic oscillation on the Canary Islands precipitation. *Journal of Climate*, *14*(19), 3889–3903. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<3889:IOTNAO>2.0.CO;2

Monjo, R. (2016). Measure of rainfall time structure using the dimensionless n-index. Climate Research, 67(1), 71–86. https://doi.org/10.3354/cr01359

Ribalaygua, J., Torres, L., Pórtoles, J., Monjo, R., Gaitán, E., & Pino, M. R. (2013). Description and validation of a two-step analogue/regression downscaling method. *Theoretical and Applied Climatology*, 114, 253–269. https://doi.org/10.1007/s00704-013-0836-x

Rodríguez-Urrego, D., Cañadillas-Ramallo, D., González-Díaz, B., & Guerrero-Lemus, R. (2022). Analysis of the Water-Energy Nexus Applied to an Insular System: Case Study of Tenerife. Sustainability. https://doi.org/10.3390/su14031653

Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Paradinas Blázquez, C., Prado López, C., & Galiano Sánchez, L. (2025). Local climate change scenarios in the Canary Islands, adapted to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [Web platform]. Climate Research Foundation, Meteogrid, University of La Laguna. ARSINOE Project https://doi.org/10.25145/o.canarias.sicma.2025

Santamarta, Juan C., Rodríguez-Martín, Jesica, Poncela, Roberto, Fontes, Jose C., Lobo de Pina, Antonio, Cruz-Pérez, N. (2022). Integrated Water Resource Management in the Macaronesia. International Review of Civil Engineering (I.RE.C.E.), 13(4), 8. https://doi.org/10.15866/irece.v13i4.21523

Schmitz, M. F., Arnaiz-Schmitz, C., Herrero-Jáuregui, C., Díaz, P., G. Matos, D. G., & Pineda, F. D. (2017). People and Nature in the Fuerteventura Biosphere Reserve (Canary Islands): Socio-Ecological Relationships Under Climate Change. Environmental Conservation. https://doi.org/10.1017/s0376892917000169

Söllheim, Á. L. L., Suarez, P. M., & Hernández, F. G. (2024). The digital climate atlas of the Canary Islands: A tool to improve knowledge of climate and temperature and precipitation trends in the Atlantic islands. *Climate Services, 34*. https://doi.org/10.1016/j.cliser.2024.100487

Van der Velde, M. (2006). *Agricultural and climatic impacts on the groundwater resources of a small island: measuring and modelling water and solute transport in soil and groundwater on Tongatapu*. Université catholique de Louvain.

Vara, A., Gutiérrez, C., González-Alemán, J., & Gaertner, M. (2020). Intercomparison study of the impact of climate change on renewable energy indicators on the mediterranean islands. Atmosphere, 11(10), 1036. https://doi.org/10.3390/atmos11101036

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. Journal of Climate, 23(7), 1696–1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

Weiser, F., Sauer, A., Gettueva, D., Field, R., Irl, S., Vetaas, O., ... & Beierkuhnlein, C. (2021). Impacts of forest fire on understory species diversity in canary pine ecosystems on the island of la palma. Forests, 12(12), 1638. https://doi.org/10.3390/f12121638

Werth, S., Meidl, P., & Scheidegger, C. (2021). Deep Divergence Between Island Populations in Lichenized Fungi. *Scientific Reports*. doi:10.1038/s41598-021-86448-z

Capítulo 4
Evolución de la temperatura en las Islas Canarias

Noelia Cruz Pérez
Susana Clavijo Núñez
Juan Carlos Santamarta Cerezal

1. Introducción: El ascenso térmico en Canarias como variable crítica del cambio climático regional

La temperatura es uno de los indicadores climáticos más estables y fiables para evaluar la evolución del cambio climático a escala regional. Su tendencia sostenida al alza, observada durante las últimas décadas, refleja de forma directa la intensificación del forzamiento radiativo global y, en el caso de regiones insulares, anticipa efectos desproporcionados sobre sistemas naturales y humanos. En territorios volcánicos oceánicos como las Islas Canarias, esta variable adquiere una especial relevancia por su incidencia sobre la evapotranspiración, la recarga de acuíferos, la biodiversidad y la habitabilidad en zonas urbanas.

La evolución prevista de la temperatura en el Archipiélago Canario constituye una variable clave para comprender los impactos del cambio climático sobre los sistemas hidrológicos, la estabilidad de los ecosistemas y la salud y seguridad de las poblaciones. Las proyecciones basadas en modelos CMIP6 regionalizados muestran diferencias térmicas notables entre islas, influenciadas por su topografía específica, gradientes altitudinales y particularidades climáticas. Aunque algunos estudios permiten trabajar con resoluciones muy finas, como 100x100 metros, es importante matizar que esta escala no es generalizable a todos los análisis derivados de los modelos CMIP6, y que su aplicabilidad debe evaluarse caso por caso (Hanz et al., 2023; Irl et al., 2020).

Los recientes resultados obtenidos en las proyecciones térmicas para Canarias muestran incrementos significativos en todos los escenarios y horizontes temporales analizados. Para finales del siglo XXI, bajo el escenario más desfavorable (SSP5-8.5), se estiman aumentos medios de temperatura de entre 3,5 y 4,4 °C, especialmente en las islas occidentales. Aunque Lanzarote y Fuerteventura muestran incrementos algo menores, esto se debe a su menor altitud y mayor influencia de los vientos alisios y del océano Atlántico. Estas diferencias subrayan la necesi-

dad de desagregar espacialmente los análisis climáticos y de implementar medidas de adaptación ajustadas a cada isla.

Los incrementos de temperatura esperados pueden traducirse en una reducción de los recursos hídricos disponibles de forma natural, como consecuencia combinada del calentamiento y de una probable disminución de la precipitación. A medida que aumentan las temperaturas, también lo hacen las tasas de evapotranspiración, lo que agrava el déficit hídrico en un contexto ya caracterizado por la escasez estructural (Cruz-Pérez et al., 2023). Este fenómeno tiene consecuencias tanto ecológicas como sectoriales. Por ejemplo, muchas especies endémicas insulares, con nichos climáticos estrechos y escasa capacidad de desplazamiento altitudinal, se verán especialmente afectadas, incrementando el riesgo de pérdida de biodiversidad (Hanz et al., 2023). Este riesgo pone de relieve la necesidad de estrategias de gestión integrada del agua que consideren tanto las proyecciones climáticas como las respuestas ecológicas esperadas, especialmente en el ámbito agrícola, principal demandante del recurso hídrico en las islas (Cruz-Pérez et al., 2023; Santamarta et al., 2023).

Los análisis comparativos entre islas evidencian disparidades en la respuesta térmica que se corresponden con diferencias geográficas y ecológicas. Las islas de mayor altitud, por ejemplo, registran tasas de calentamiento distintas a las islas bajas, lo que implica impactos diferenciados en la distribución de especies, en la zonación de ecosistemas y en la funcionalidad de los servicios ecosistémicos (Irl et al., 2020; Price et al., 2018). En este marco, los factores socioeconómicos también juegan un papel crucial. Sectores como el turismo y la agricultura, altamente dependientes de condiciones climáticas estables y disponibilidad hídrica fiable, serán especialmente sensibles a estas alteraciones. En consecuencia, las políticas públicas deberán priorizar prácticas agrícolas sostenibles, capaces de incrementar la resiliencia frente a la variabilidad climática y al mismo tiempo proteger la biodiversidad y los medios de vida rurales (Godenau et al., 2022).

Esta capacidad de diagnóstico localizado es esencial para integrar el cambio climático en la planificación territorial, el diseño de infraestructuras críticas y la protección de espacios naturales. La aplicación de métodos estadísticos de validación, como el error absoluto medio (MAE), el error relativo medio (MRE) y la prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS), permite evaluar con precisión la calidad del modelo. Estos análisis cuantitativos aumentan la fiabilidad de los resultados obtenidos y justifican su uso como soporte técnico sólido en procesos de planificación y toma de decisiones.

La compleja interacción entre el ascenso térmico proyectado en Canarias, la fragilidad de sus recursos hídricos y la sensibilidad de sus ecosistemas exige una revisión urgente de las estrategias de gestión. Será necesario integrar el cambio

climático en la planificación hidrológica, la conservación ecológica y las políticas sectoriales, incorporando escenarios climáticos, respuestas ecológicas y condicionantes socioeconómicos. Solo así se podrán diseñar iniciativas de adaptación eficaces, ajustadas al contexto local y capaces de anticipar los impactos esperados sobre los sistemas naturales y humanos.

2. Aumento de la temperatura media en las Islas Canarias a lo largo del siglo XXI

A continuación, se presentan los resultados de las proyecciones de evolución de la temperatura en las Islas Canarias. Para su representación se ha utilizado una estrategia de tres periodos temporales: corto plazo (2021-2050), medio plazo (2041-2070) y largo plazo (2071-2100). Los resultados de cada una de las siete islas estudiadas se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Evolución prevista de la temperatura media en las Islas Canarias

	2041-2070				2071-2100			
	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
La Palma	1,4	1,7	2,0	2,3	1,6	2,4	3,4	4,2
El Hierro	1,4	1,7	2,0	2,3	1,6	2,4	3,4	4,2
La Gomera	1,5	1,8	2,1	2,4	1,7	2,5	2,5	4,4
Tenerife	1,4	1,7	2,0	2,2	1,6	2,4	3,3	4,2
Gran Canaria	1,3	1,7	1,9	2,2	1,5	2,3	3,2	4,0
Fuerteventura	1,2	1,5	1,7	1,9	1,3	2,0	2,9	3,5
Lanzarote	1,1	1,4	1,6	1,8	1,3	1,9	2,7	3,4

Fuente: elaboración propia (2025)

Respecto a la isla de La Palma, se esperan incrementos de la temperatura media que oscilarán entre 1,7-2,3 °C a mediados de siglo y entre 2,4-4,2 °C a finales de siglo bajo los escenarios socioeconómicos SSP2-4.5 y SSP5-8.5 respectivamente. Se prevén grandes aumentos significativos en todos los escenarios y horizontes temporales, que serán peores cuanto más se avance en el tiempo.

El caso de El Hierro presenta resultados similares, pues también se espera que los aumentos medios de temperatura oscilen entre 1,7-2,3 °C a mediados de siglo y entre 2,4-4,2 °C a finales de siglo según los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5

respectivamente. De este modo, se prevén grandes aumentos significativos en todos los escenarios y horizontes temporales.

En cuanto a la variable temperatura en La Gomera, se esperan incrementos de la temperatura media en valores similares a los de sus islas vecinas de El Hierro o La Palma, oscilando entre 1,8- 2,4 °C a mediados de siglo, y entre 2,5- 4,4 °C a finales de siglo bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 respectivamente. El aumento de la temperatura será significativo en todos los escenarios y horizontes temporales analizados, con resultados más graves conforme se avance en el presente siglo.

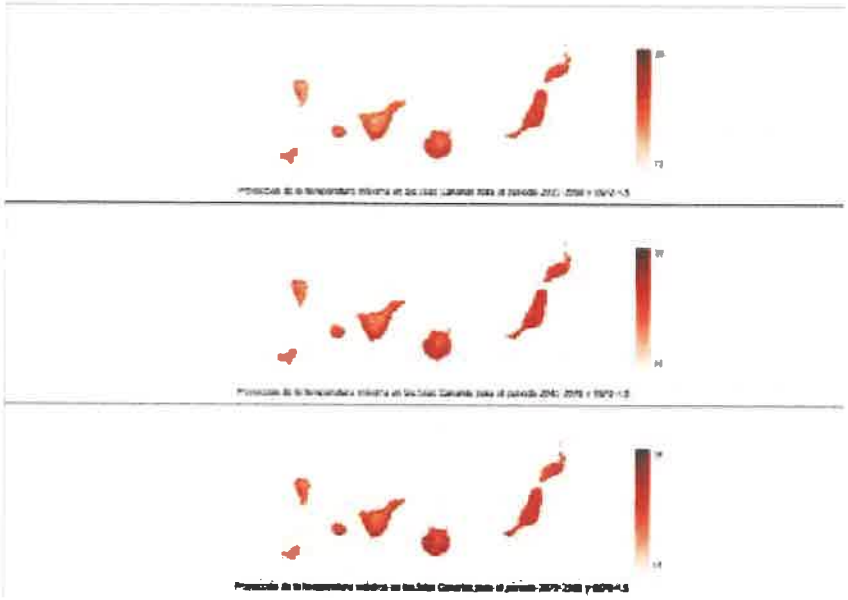
Tenerife presenta incrementos de temperatura media que oscilan en valores similares a los del resto de las islas occidentales, con incrementos entre 1,7-2,2 °C a mediados de siglo, y entre 2,4- 4,2 °C a finales de siglo según los escenarios climáticos SSP2-4,5 y SSP 5-8,5 respectivamente.

En el caso de Gran Canaria, se esperan incrementos de temperatura media que oscilarán en valores similares a los de la provincia occidental, debido principalmente a su orografía aún abrupta, con valores que oscilarán entre 1,7- 2,2 °C a mediados de siglo considerando los valores medios representados en los escenarios futuros, y entre 2,3-4,0 °C a finales de siglo según los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 respectivamente.

Fuerteventura es la isla más cálida de todas, con una media de 20,3 °C. Este hecho influye en los resultados, ya que se espera que el aumento medio de la temperatura sea menor que en la provincia occidental y Gran Canaria, debido principalmente a su orografía más llana, que permite que los vientos alisios y las aguas frías tengan una mayor influencia. Los cambios oscilarán entre 1,5-1,9 °C a mediados de siglo y entre 2,0-3,5 °C a finales de siglo en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 respectivamente.

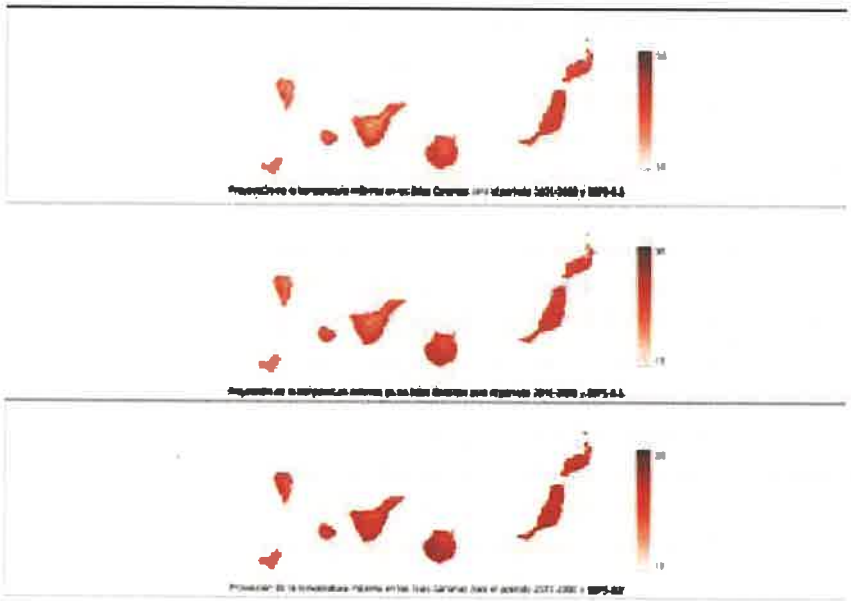
Lanzarote presenta resultados similares a Fuerteventura, presentando una orografía llana y una gran influencia de los vientos alisios. Los cambios oscilan entre 1,4-1,8 °C a mediados de siglo, y entre 1,9-3,4 °C a finales de siglo según los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 respectivamente. Se trata, por tanto, de la isla que presenta el menor aumento de temperatura del archipiélago.

Estas variaciones se representan a continuación en la Figura 4.1 y la Figura 4.2, representando la evolución de la temperatura máxima en las siete islas de estudio a través de los tres periodos temporales analizados y el escenario socioeconómico intermedio (SSP2-4.5) y el escenario más pesimista (SSP5-8.5).



Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 4.1. Evolución de la temperatura máxima en las Islas Canarias en los tres periodos climáticos analizados y el escenario SSP2-4.5

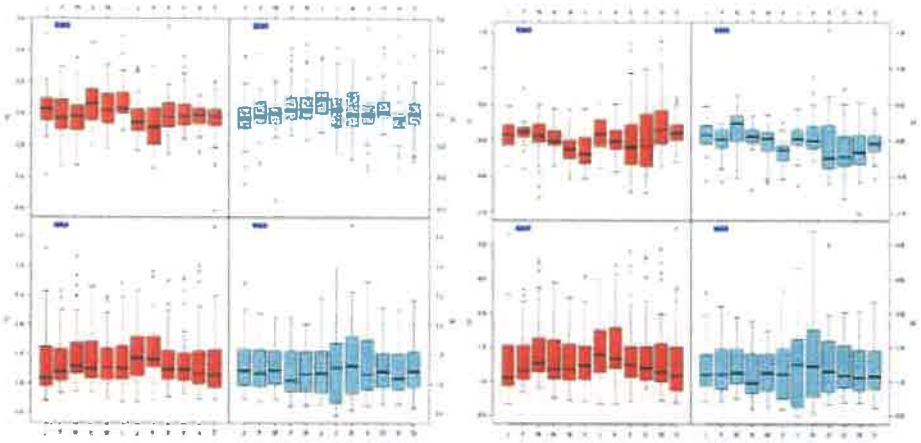


Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 4.2. Evolución de la temperatura máxima en las Islas Canarias en los tres periodos climáticos analizados y el escenario SSP5-8.5

Adicionalmente, cabe destacar los resultados positivos en relación con la verificación de la metodología. Tal como se presenta en la metodología, se han calculado diferentes indicadores y pruebas estadísticas como el error medio absoluto (MAE), el error medio relativo (MRE) o la prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS). El enfoque en la verificación diaria es crucial, ya que demuestra la capacidad de la herramienta para simular cambios con precisión, reflejando las conexiones físicas subyacentes entre predictores y predictandos.

La Figura 4.3 muestra un ejemplo de los resultados de verificación relativos a la temperatura en Tenerife. La figura muestra los resultados de la verificación de las temperaturas máximas (rojo) y mínimas (azul) tras el cálculo de los estadísticos BIAS (fila superior) y MAE (fila inferior), antes (imagen izquierda) y después (imagen derecha) de la corrección.



Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 4.3. Resultados de las estadísticas BIAS y MAE para todas las estaciones consideradas en Tenerife

Los resultados obtenidos son coherentes con proyecciones a mayor escala, como las realizadas en la región de la Macaronesia, donde varios estudios concluyen un aumento significativo de la temperatura en un futuro a medio y largo plazo. Las investigaciones estiman las magnitudes del calentamiento para el periodo 2071-2100 entre 0,8-3,0 °C por encima de la temperatura media de 1976-2005 (Cropper, 2015). El impacto en la región de la Macaronesia será grave, afectando a los ecosistemas insulares, al estrés hídrico, al desarrollo de una agricultura sostenible y a la salud humana.

En el caso de las Islas Canarias, investigaciones previas han concluido que el aumento de temperatura para 2100 estaría en el rango de 0,96±0,13 °C a

2,68±0,23 °C (Cropper, 2013). Otros métodos predicen resultados más severos, con un cambio medio para el periodo 2070-2099 y RCP8.5 de 4,0 ± 0,5 °C como temperatura máxima y de 4,4 ± 0,4 °C para la temperatura mínima (Pérez et al., 2022). Estudios basados en datos de la AEMet, estiman que el incremento de la temperatura máxima en Canarias estaría entre 1,9 °C (para un escenario RCP 4,5) y 3,4 °C (RCP 8,5) a finales de siglo (Dorta Antequera et al., 2018).

En general, los resultados obtenidos concuerdan con los rangos propuestos, obteniéndose proyecciones más severas en algunos casos. Se esperan subidas significativas en todos los escenarios y horizontes temporales para las siete islas, peores cuanto más avanzamos en el futuro. Los mayores incrementos medios de temperatura se dan en la isla de La Gomera, con resultados muy similares al resto de las islas occidentales. Lanzarote presenta los menores incrementos de todas las islas, debido principalmente a su orografía más llana, que permite una mayor influencia de los vientos alisios y de las aguas frías. Estas características son similares en Fuerteventura, presentando resultados aproximados.

Estos resultados presentan importantes novedades, en primer lugar, porque se presentan para cada una de las Islas Canarias con una resolución alta que permite analizar las variaciones en ubicaciones concretas. Existen muy pocas referencias sobre cómo evolucionará la temperatura en el Archipiélago Canario y aún menos sobre cómo evolucionará en cada isla. Hay que tener en cuenta que la diferenciación por islas es muy importante ya que cada una de ellas tiene un clima y una orografía particular. La resolución espacial tan detallada que se ha conseguido (100 m x 100 m) permite incorporar en el análisis las variedades orográficas y climáticas, pudiendo crear planes y estrategias adaptadas a cada isla e incluso a cada municipio. Además, la metodología utilizada ha sido verificada con diferentes métodos estadísticos, presentando una incertidumbre muy baja en cuanto a la predicción del incremento de temperatura.

3. Referencias bibliográficas

Cruz-Pérez, N., Cerezal, J., & Álvarez-Acosta, C. (2023). Water footprint of representative agricultural crops on volcanic islands: the case of the Canary Islands. Renewable Agriculture and Food Systems, 38. https://doi.org/10.1017/s1742170523000303

Cropper, T. (2013). The weather and climate of Macaronesia: Past, present and future. *Weather, 68*(11), 300–307. https://doi.org/10.1002/wea.2155

Cropper, T. (2015). *Climate change across the Macaronesian Geographical Region, 1850-2100*. University of Sheffield.

Dorta Antequera, P., López Díez, A., & Díaz Pacheco, J. (2018). The global warming in the southeast region of the North Atlantic Ocean. The case of Canary Islands. State of the art and further perspectives. Cuadernos Geograficos, 57(2), 27–52. https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v57i2.5934

Godenau, D., Martín-Rodríguez, G., González-Gómez, J., & Hernández, J. (2022). Food consumption in the canary islands: nutritional implications of food imports and local production. BMC Public Health, 22(1). https://doi.org/10.1186/s12889-022-12805-w

Hanz, D., Cutts, V., Barbosa, M., Algar, A., Beierkuhnlein, C., Collart, F., … & Irl, S. (2023). Effects of climate change on the distribution of plant species and plant functional strategies on the canary islands. Diversity and Distributions, 29(9), 1157-1171. https://doi.org/10.1111/ddi.13750

Irl, S., Obermeier, A., Beierkuhnlein, C., & Steinbauer, M. (2020). Climate controls plant life-form patterns on a high-elevation oceanic island. Journal of Biogeography, 47(10), 2261-2273. https://doi.org/10.1111/jbi.13929

Pérez, J. C., Expósito, F. J., González, A., & Díaz, J. P. (2022). Climate projections at a convection-permitting scale of extreme temperature indices for an archipelago with a complex microclimate structure. *Weather and Climate Extremes, 36*(100459). https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100459

Price, J., Otto, R., Sequeira, M., Kueffer, C., Schaefer, H., Caujapé-Castells, J., … & Fernández-Palacios, J. (2018). Colonization and diversification shape species–area relationships in three macaronesian archipelagos. Journal of Biogeography, 45(9), 2027-2039. https://doi.org/10.1111/jbi.13396

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 Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (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

Santamarta, J.C., Machín, N., & Cruz-Pérez, N. (2023). Irrigation efficiency in banana crops in the Canary Islands. The Open Agriculture Journal, 17(1). https://doi.org/10.2174/18743315-v16-e221226-2022-49

Capítulo 5
Patrones de precipitación previstos en las Islas Canarias

Juan Carlos Santamarta Cerezal
Noelia Cruz Pérez
Susana Clavijo Núñez

1. Introducción: El cambio en los patrones de precipitación en el contexto insular canario

La precipitación constituye la principal entrada del ciclo hidrológico en sistemas insulares volcánicos como el Archipiélago Canario. Su distribución, cantidad y estacionalidad determinan no solo la disponibilidad de agua superficial y subterránea, sino también la viabilidad de los sistemas agrícolas, la dinámica de los ecosistemas y la exposición al riesgo hídrico. En este contexto, la evolución futura de la precipitación bajo escenarios de cambio climático adquiere una relevancia crítica para la planificación adaptativa.

Las proyecciones sobre la evolución de la precipitación en las Islas Canarias, basadas en modelos climáticos regionalizados de alta resolución (CMIP6), muestran una notable variabilidad espacial, condicionada tanto por factores climáticos como por las características geográficas del archipiélago. Mientras algunas zonas, como el sureste de Lanzarote, podrían registrar episodios puntuales de incremento de precipitaciones extremas, otras, especialmente los sectores septentrionales de Tenerife y Gran Canaria, presentan una clara tendencia descendente. Esta heterogeneidad subraya la complejidad de los regímenes pluviométricos en Canarias, donde los patrones de precipitación responden de forma muy desigual entre islas e incluso entre vertientes dentro de la misma isla (Sánchez-Benítez et al., 2016; Suárez et al., 2017).

La influencia orográfica sobre la distribución de las precipitaciones es un elemento determinante. Las islas que interceptan los alisios experimentan lluvias más intensas en las laderas de barlovento debido a la elevación forzada del aire húmedo, mientras que las zonas de sotavento sufren una marcada reducción de las precipitaciones, lo que genera diferencias hidrológicas sustanciales (Suárez et al., 2017; Cruz-Pérez et al., 2022). Esta asimetría se refleja con claridad en la gestión de los recursos hídricos, ya que las regiones meridionales suelen recibir precipita-

ciones muy escasas, dificultando la recarga de acuíferos y acentuando el estrés hídrico local (Naranjo et al., 2015).

A este patrón estructural se suma una tendencia emergente: el aumento de la concentración y variabilidad de la precipitación diaria. En otras palabras, llueve menos días al año, pero los eventos son más intensos e irregulares. Esta dinámica complica la planificación hidráulica y reduce la eficiencia de captación de agua en superficie. Mientras que las proyecciones de temperatura presentan una mayor fiabilidad, las predicciones de precipitación arrastran mayores incertidumbres debido a la alta variabilidad atmosférica en entornos insulares (Weiser et al., 2021; Bechtel, 2016; Serrano-Notivoli et al., 2017; Carrillo et al., 2023).

Los recientes modelos climáticos utilizados en el marco del CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6), adaptados a escala insular mediante herramientas de alta resolución como SICMA-Canarias (Santamarta et al., 2025), proyectan una reducción progresiva de las precipitaciones acumuladas anuales en gran parte del archipiélago. Esta disminución es especialmente significativa en los escenarios más pesimistas (SSP5-8.5) y afecta de forma desigual a las distintas islas, siendo más pronunciada en las islas orientales y en las regiones de baja altitud. Aunque los descensos absolutos pueden parecer moderados (del orden de 10 a 50 mm), su impacto relativo sobre islas con escasos aportes actuales, como Lanzarote o Fuerteventura, equivale a reducciones del 20-30 % del total anual.

Además de la disminución de los totales pluviométricos, las proyecciones indican una alteración en los patrones temporales de la lluvia: se espera una mayor irregularidad estacional, un aumento en la frecuencia de eventos extremos (lluvias torrenciales seguidas de periodos prolongados de sequía) y un desplazamiento en los regímenes orográficos. Esta combinación de factores genera un escenario más volátil, donde la captación, almacenamiento y gestión del agua resultan más complejas, y donde la amenaza de erosión, escorrentía superficial e infrautilización hídrica se intensifica.

Por último, se debe considerar la incertidumbre inherente a las proyecciones de precipitación, mayor que en el caso de la temperatura, debido a la complejidad de los procesos atmosféricos involucrados. No obstante, la convergencia de múltiples modelos, tanto regionales como globales, permite afirmar con suficiente grado de confianza que Canarias se enfrenta a una reducción de la pluviometría y a una intensificación de la irregularidad climática, lo que obliga a revisar las bases hidrológicas de su actual planificación territorial y sectorial.

Las implicaciones de este cambio climático sobre la disponibilidad de agua son directas. Se prevé una reducción en la recarga de acuíferos, motivada no solo por el descenso de la precipitación total, sino también por el aumento de la evapotranspiración. Algunos estudios indican que solo una fracción mínima del agua

de lluvia llega a infiltrarse de manera efectiva en el sistema subterráneo, lo que podría comprometer gravemente la sostenibilidad del abastecimiento (Cruz-Pérez et al., 2022; Marrero et al., 2015). En este escenario, el riesgo de sequía se intensifica, lo que exige replantear las políticas de gestión y adoptar enfoques adaptativos basados en una planificación hidrológica prospectiva.

Comprender esta interacción entre dinámica atmosférica, relieve insular y diferenciación territorial es fundamental para diseñar estrategias eficaces de gestión del agua en Canarias. El desarrollo de sistemas predictivos más robustos, combinados con herramientas de gestión flexible, permitirá mitigar los impactos asociados a estos cambios climáticos, garantizando la seguridad hídrica tanto para los ecosistemas como para las comunidades humanas (Fan et al., 2015; Jackson et al., 2023).

2. Proyección de la evolución de la precipitación media en las Islas Canarias

En la Tabla 5.1 se presentan los resultados para cada una de las siete islas estudiadas. En concreto, se presentan los resultados de los cuatro escenarios socioeconómicos analizados en los rangos de futuro próximo (2021-2050), medio (2041-2070) y largo plazo (2071-2100).

Tabla 5.1. Evolución prevista de la precipitación anual acumulada para Canarias en milímetros

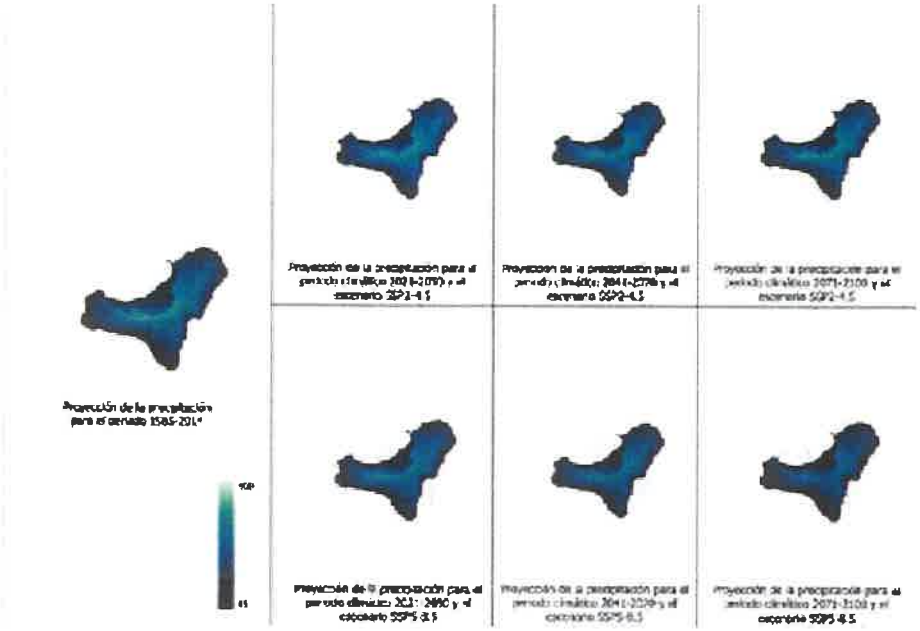
	2021-2050				2041-2070				2071-2100			
	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
La Palma	22	14	5	10	17	4	7	4	12	9	9	-16
El Hierro	19	-1	1	3	7	-7	-3	-21	0	-8	-22	-46
La Gomera	12	4	-4	1	4	-13	-12	-14	4	-14	-25	-44
Tenerife	13	7	-6	0	2	-5	-14	-14	-3	-6	-18	-34
Gran Canaria	8	1	-9	-6	-4	-10	-17	-17	-4	-16	-25	-52
Fuerteventura	3	0	-7	-7	-7	-8	-12	-15	-7	-11	-19	-30
Lanzarote	3	3	-6	-2	-4	-7	-12	-13	-4	-12	-22	-31

Fuente: elaboración propia (2025)

Cabe destacar cómo las diferentes capas de datos utilizadas están disponibles en la plataforma de acceso público SICMA-Canarias (Santamarta et al., 2025).

En el caso de la isla de La Palma, la precipitación acumulada anual no muestra cambios significativos hacia el futuro. Siendo La Palma la isla más húmeda (529 mm de media), aparecen pequeños aumentos (+10mm) o disminuciones a lo largo de las escalas temporales analizadas. Sin embargo, La Palma es la única isla en la que los cambios en la precipitación oscilan entre ligeros aumentos y disminuciones, sin una concordancia fuerte en los cambios proyectados.

El Hierro presenta una reducción moderada de las precipitaciones anuales en los peores escenarios (Figura 5.1). Se trata de una isla moderadamente húmeda (347 mm de media), y los cambios previstos son mínimos hasta el medio plazo, con reducciones moderadas (-20/-40 mm) en los peores escenarios para finales de siglo.



Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 5.1. Evolución de la precipitación en la isla de El Hierro

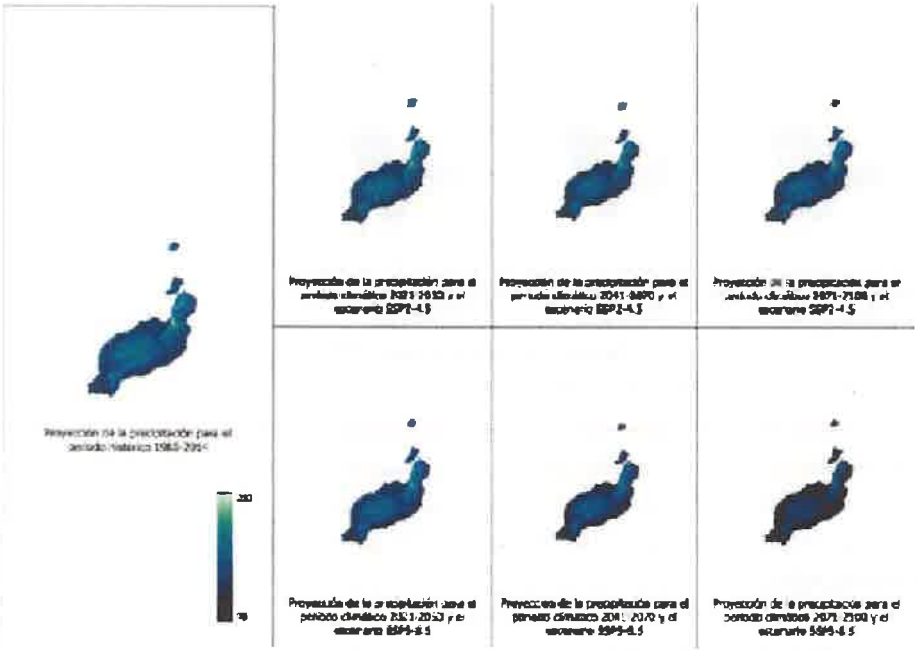
La Gomera tiene un clima moderadamente húmedo para las Islas Canarias, similar al de El Hierro (341 mm de media), y los cambios previstos son mínimos hasta mediados de siglo, con reducciones moderadas (-10/-40 mm) en los peores escenarios para finales del presente siglo.

Tenerife tiene un clima moderadamente húmedo, especialmente en la mitad norte (377 mm de media), y los cambios previstos son mínimos hasta mediados de siglo, con reducciones moderadas (-14/-34 mm) en los peores escenarios para finales de siglo.

En el caso de Gran Canaria, cabecera de las provincias orientales, presenta un clima más seco, especialmente en su mitad sur, con precipitaciones medias inferiores a 300 mm (297 mm de media). Los cambios previstos son pequeños hasta medio plazo, con reducciones moderadas a notables (-16/-52 mm) en los peores escenarios para finales de siglo.

En Fuerteventura, la precipitación acumulada anual muestra cambios significativos hacia el futuro. Fuerteventura es la isla más seca de todo el archipiélago, con sólo 106 mm de media, debido principalmente a su topografía llana. Los cambios previstos en este caso son moderados, considerando la media anual, con reducciones de hasta -15/-30 mm (igual a -30%) en los peores escenarios para finales de siglo. Esta reducción es consistente en todos los escenarios y significativa bajo el escenario climático SSP5-8.5 a finales de siglo.

Lanzarote es una de las islas más secas de todo el archipiélago (por detrás de Fuerteventura), con sólo 135 mm de media, debido principalmente a su topografía plana. Los cambios previstos en este caso son igualmente moderados, considerando la media anual, con reducciones de hasta -22/-31 mm (equivalente a un -30%) en los peores escenarios para finales de siglo (Figura 5.2).



Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 5.2. Evolución de la precipitación en la isla de Lanzarote

Los resultados obtenidos en las Islas Canarias concuerdan con estudios previos en regiones más amplias. Se evidencia cómo los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos de la región de la Macaronesia son profundos. Las proyecciones indican una reducción de las precipitaciones totales, cambios en la distribución estacional y un aumento de la frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos, como las sequías (Tung, 2001; Xu et al., 2019). Madeira y las Azores siguen recibiendo precipitaciones considerables; sin embargo, los cambios en la distribución de las precipitaciones pueden alterar la recarga de las aguas subterráneas y degradar la calidad del agua (Santamarta Cerezal & Goulart Fontes, 2013). Esto subraya la necesidad de implementar estrategias de gestión adaptativas para garantizar el uso sostenible de los recursos hídricos (Abogrean, 2015). En el caso de Cabo Verde, que ya sufre escasez crónica de agua, investigaciones previas muestran cómo se enfrenta a una mayor vulnerabilidad debido al cambio climático (Ruan et al., 2021).

En el caso de las Islas Canarias, otros estudios (Bechtel, 2016; Carrillo et al., 2023; Expósito et al., 2015) indican que están experimentando una disminución de las precipitaciones anuales y un aumento de las temperaturas medias, tendencia especialmente pronunciada en las zonas de mayor altitud. Estas variaciones pueden provocar cambios drásticos en los regímenes de precipitaciones, desde sequías hasta episodios extremos de lluvias e inundaciones. Estudios recientes y modelos climáticos indican que el sistema pluviométrico de Canarias podría sufrir cambios significativos en las próximas décadas, especialmente a lo largo del siglo XXI (Carrillo et al., 2023; Expósito et al., 2015).

Los modelos climáticos sugieren que, aunque las precipitaciones totales en Canarias pueden disminuir, la probabilidad de aguaceros intensos y frecuentes podría aumentar. Este aumento incrementa el riesgo de inundaciones y erosión del suelo (Frauendorf et al., 2020). Los impactos pueden variar entre las islas orientales y occidentales, y se espera que las occidentales sufran efectos más pronunciados debido a sus características geográficas y a su proximidad a las trayectorias de las tormentas (Wilcox et al., 2017).

Analizando cada una de las islas, cabe destacar cómo La Palma, la isla más lluviosa (529 mm de media), presenta los resultados más difíciles de contrastar en este estudio. No se esperan cambios significativos en la precipitación anual, con una pequeña fluctuación (+10 mm). Esto puede deberse a que la orografía de la isla hace más complejas las estimaciones futuras, siendo además una de las islas más lluviosas del Archipiélago (Sosa-Guillén et al., 2024).

Tenerife, El Hierro y La Gomera podrían experimentar reducciones moderadas de las precipitaciones, sobre todo en los escenarios extremos (Araya-Osses et al., 2020). Los resultados de la presente investigación coinciden con los de estu-

dios anteriores. Para las islas occidentales de El Hierro, La Gomera y Tenerife, este estudio concluye reducciones moderadas de las precipitaciones en los peores escenarios, de -10 mm a -40 mm. Así, las islas más húmedas muestran cambios mínimos o fluctuantes.

Los resultados obtenidos en las islas orientales también concuerdan con estudios anteriores. En Gran Canaria, que tiene un clima más seco, se prevén disminuciones moderadas, especialmente en las regiones meridionales, con una disminución prevista de -52 mm para finales de siglo (Ostermöller et al., 2021), lo que coincide con los resultados obtenidos, con reducciones de las precipitaciones anuales de entre -16 y -52 mm. Investigaciones anteriores han sugerido que las reducciones más significativas se producirán en Fuerteventura y Lanzarote, siendo probable que Fuerteventura se enfrente a una disminución de hasta el 30% a finales de siglo, lo que hará que estas islas sean especialmente vulnerables a la escasez de agua (Kreienkamp et al., 2020). El método FICLIMA presenta resultados similares, ya que las proyecciones prevén reducciones moderadas de las precipitaciones en ambas islas, con una disminución de alrededor del 30% a finales de siglo.

Según el Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC, aunque los modelos climáticos han mejorado significativamente en la predicción de las temperaturas, la precipitación sigue siendo más difícil de proyectar debido a su variabilidad y a la complejidad de los procesos atmosféricos implicados. Estudios previos en las Islas Canarias concluyeron que, en general, las simulaciones tienden a subestimar la precipitación observada y a sobreestimar la velocidad media del viento (Sosa-Guillén et al., 2024). Sin embargo, los modelos coinciden en que el calentamiento climático aumentará la gravedad de las precipitaciones extremas en casi todas partes, así como la evaporación del suelo, lo que agravará las sequías. A pesar de la gran irregularidad de las precipitaciones y de la variabilidad topográfica de Canarias, los resultados presentados, así como estudios previos, sugieren un cambio en los patrones de circulación y una disminución de la precipitación total durante las próximas décadas (López Díez et al., 2016; Máyer Suárez et al., 2015).

Las tendencias pluviométricas observadas en las Islas Canarias coinciden con los patrones observados en otros ecosistemas insulares afectados por el cambio climático. En varias regiones del Océano Pacífico, las precipitaciones están disminuyendo (Taylor & Kumar, 2016) y su variabilidad está aumentando, de forma similar a las tendencias en las Islas Canarias. Las islas mediterráneas, como Grecia e Italia, también están experimentando una reducción de las precipitaciones, y las previsiones apuntan a un aumento de la frecuencia y la gravedad de las sequías (Duong, 2023). Las islas tropicales del Caribe se enfrentan a retos similares, con una disminución de las precipitaciones y una mayor vulnerabilidad a los fenómenos meteorológicos extremos, lo que se ha relacionado con un mayor riesgo de

escasez de agua (Ramseyer y Miller, 2023). Estas tendencias ponen de manifiesto la vulnerabilidad de los ecosistemas insulares al cambio climático y la creciente necesidad de estrategias adaptativas de gestión del agua.

La incertidumbre en torno a las predicciones de precipitaciones complica aún más la disponibilidad de agua y las prácticas agrícolas en las Islas Canarias y otras regiones insulares (Dorta Antequera et al., 2018). La variabilidad de los modelos climáticos da lugar a previsiones contradictorias, lo que plantea retos para la gestión de los recursos hídricos y la planificación a largo plazo (Tabari et al., 2016). Esto es particularmente crucial para sectores como la agricultura, donde los patrones de precipitación impredecibles complican la selección de cultivos y la planificación agrícola, afectando potencialmente a la seguridad alimentaria y los medios de vida. Esta cuestión es especialmente crítica en las zonas áridas, donde la agricultura depende en gran medida de la constancia de las precipitaciones (Ribes et al., 2022).

En este sentido, incorporar la participación comunitaria y los conocimientos tradicionales es crucial para desarrollar estrategias de adaptación eficaces. Involucrar a las comunidades locales en las decisiones de gestión del agua, combinando al mismo tiempo los conocimientos tradicionales con las prácticas modernas, mejora la resiliencia de los sistemas hídricos y garantiza que las soluciones sean culturalmente apropiadas (Olmo et al., 2021). Estos enfoques basados en la comunidad no sólo fomentan la creación de estrategias de gestión del agua sostenibles y adaptadas al contexto, sino que también promueven un sentido de propiedad y responsabilidad entre las poblaciones locales (Yandri et al., 2020; Nhemachena et al., 2020).

3. Referencias bibliográficas

Abogrean, E. M. (2015). Determination the Concentrations of Heavy Metals in Seawater Intake of Desalination Plant. *Jmset.* doi:10.59743/jmset.v1i1.139

Araya-Osses, D., Casanueva, A., Román-Figueroa, C., Uribe, J. M., & Paneque, M. (2020). Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics, 54*, 4309–4330. https://doi.org/10.1007/s00382-020-05231-4

Bechtel, B. (2016). The climate of the Canary Islands by annual cycle parameters. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 41, 243–250. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B8-243-2016

Carrillo, J., Hernández-Barrera, S., Expósito, F. J., Díaz, J. P., González, A., & Pérez, J. C. (2023). The uneven impact of climate change on drought with

elevation in the Canary Islands. Npj Climate and Atmospheric Science, 6(1). https://doi.org/10.1038/s41612-023-00358-7

Cruz-Pérez, N., Santamarta, J.C., García-Gil, A., Rodríguez-Martín, J., Miralles-Wilhelm, F., Alemán, A., ... & Aldaya, M. (2022). Water footprint of the water cycle of gran canaria and tenerife (Canary Islands, spain). Water, 14(6), 934. https://doi.org/10.3390/w14060934

Dorta Antequera, P., López Díez, A., & Díaz Pacheco, J. S. (2018). El calentamiento global en el Atlántico Norte Suroriental. El caso de Canarias. Estado de la cuestión y perspectivas de futuro. Cuadernos Geográficos, 57(2), 27–52. https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v57i2.5934

Duong, S. (2023). Precipitation Projection in Cambodia Using Statistically Downscaled CMIP6 Models. *Climate*. doi:10.3390/cli11120245

Expósito, F. J., González, A., Pérez, J. C., Díaz, J. P., & Taima, D. (2015). High-resolution future projections of temperature and precipitation in the Canary Islands. Journal of Climate, 28(19), 7846–7856. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0030.1

Fan, J., Rosenfeld, D., Yang, Y., Zhao, C., Leung, L., & Li, Z. (2015). Substantial contribution of anthropogenic air pollution to catastrophic floods in southwest china. Geophysical Research Letters, 42(14), 6066-6075. https://doi.org/10.1002/2015gl064479

Frauendorf, T. C., MacKenzie, R. A., Tingley, R. W., Infante, D. M., & El-Sabaawi, R. W. (2020). Using a space-for-time substitution approach to predict the effects of climate change on nutrient cycling in tropical island stream ecosystems. *Limnology and Oceanography, 65*, 3114–3127. https://doi.org/10.1002/lno.11577

Jackson, A., White, O., Carine, M., & Chapman, M. (2023). The role of geography, ecology, and hybridization in the evolutionary history of canary island descurainia. American Journal of Botany, 110(5). https://doi.org/10.1002/ajb2.16162

Kreienkamp, F., Lorenz, P., & Geiger, T. (2020). Statistically Downscaled CMIP6 Projections Show Stronger Warming for Germany. *Atmosphere*. doi:10.3390/atmos11111245

López Díez, A., Dorta Antequera, P., Febles Ramírez, M., & Díaz Pacheco, J. (2016). Los procesos de adaptación al cambio climático en espacios insulares: el caso de Canarias. *X Congreso Internacional AEC: Clima, Sociedad, Riesgos y Ordenación Del Territorio*, 535–544. doi:10.14198/xcongresoaecalicante2016-50

Marrero, R., Alcalá, F., Pérez, N., López, D., Melián, G., Padrón, E., ... & Padilla, G. (2015). Aquifer recharge estimation through atmospheric chloride mass

balance at las cañadas caldera, tenerife, Canary Islands, spain. Water, 7(5), 2451-2471. https://doi.org/10.3390/w7052451

Naranjo, G., Cruz-Fuentes, T., Cabrera, M., & Custódio, E. (2015). Estimating natural recharge by means of chloride mass balance in a volcanic aquifer: northeastern gran canaria (Canary Islands, Spain). Water, 7(6), 2555-2574. https://doi.org/10.3390/w7062555

Nhemachena, C., Nhamo, L., Matchaya, G., Nhemachena, C. R., Muchara, B., Karuaihe, S., & Mpandeli, S. (2020). Climate Change Impacts on Water and Agriculture Sectors in Southern Africa: Threats and Opportunities for Sustainable Development. *Water*. doi:10.3390/w12102673

Olmo, M. E., Balmaceda-Huarte, R., & Bettolli, M. L. (2021). *Multi-Model Ensemble of Statistically Downscaled GCMs Over Southeastern South America: Historical Evaluation and Future Projections of Daily Precipitation with Focus on Extremes*. doi:10.21203/rs.3.rs-942877/v1

Ostermöller, J.; Lorenz, P.; Fröhlich, K.; Kreienkamp, F.; Früh, B. (2021). Downscaling and Evaluation of Seasonal Climate Data for the European Power Sector. *Atmosphere*, 12, 304. https://doi.org/ 10.3390/atmos12030304

Ramseyer, C. A., & Miller, P. W. (2023). Atmospheric Flash Drought in the Caribbean. *Journal of Hydrometeorology, 24*(12), 2177–2189. https://doi.org/10.1175/JHM-D-22-0226.1

Ribes, A., Boé, J., Qasmi, S., Dubuisson, B., Douville, H., and Terray, L. (2022). An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint, *Earth Syst. Dynam*, 13, 1397–1415, https://doi.org/10.5194/esd-13-1397-2022

Ruan, S., Yang, E.-H., & Unluer, C. (2021). Production of Reactive Magnesia From Desalination Reject Brine and Its Use as a Binder. *Journal of Co2 Utilization*. doi:10.1016/j.jcou.2020.101383

Sánchez-Benítez, A., García-Herrera, R., & Vicente-Serrano, S. (2016). Revisiting precipitation variability, trends and drivers in the Canary Islands. International Journal of Climatology, 37(9), 3565-3576. https://doi.org/10.1002/joc.4937

Serrano-Notivoli, R., Vide, J., Saz, M., Aladrén, L., Beguería, S., Sarricolea, P., ... & Luís, M. (2017). Spatio-temporal variability of daily precipitation concentration in spain based on a high-resolution gridded data set. International Journal of Climatology, 38(S1). https://doi.org/10.1002/joc.5387

Santamarta Cerezal, J. C., & Goulart Fontes, J. C. (2013). Estudios de los recursos hídricos de la Macaronesia. La Isla Terceira en Azores. In J. C. Santamarta Cerezal (Ed.), *Avances en la investigación de los recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos. Reunión científica nacional sobre el estudio de los recursos hídricos en islas volcánicas*. (pp. 12–26).

Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Paradinas Blázquez, C., Prado López, C., & Galiano Sánchez, L. (2025). Local climate change scenarios in the Canary Islands, adapted to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [Web platform]. Climate Research Foundation, Meteogrid, University of La Laguna. ARSINOE Project https://doi.org/10.25145/o.canarias.sicma.2025

Sosa-Guillén, P., González, A., Pérez, J. C., Expósito, F. J., & Díaz, J. P. (2024). Bioclimatic indicators dataset for the orographically complex Canary Islands archipelago. *Scientific Data*, 11(1323). doi:10.1038/s41597-024-04134-x

Suárez, P., Marzol, M., & Parreño, J. (2017). Precipitation trends and a daily precipitation concentration index for the mid-eastern atlantic (canary islands, spain). Cuadernos De Investigación Geográfica, 43(1), 255-268. https://doi.org/10.18172/cig.3095

Tabari, H., Troch, R. D., Giot, O., Hamdi, R., Termonia, P., Saeed, S., ... Willems, P. (2016). Local Impact Analysis of Climate Change on Precipitation Extremes: Are High-Resolution Climate Models Needed for Realistic Simulations? *Hydrology and Earth System Sciences*. doi:10.5194/hess-20-3843-2016

Taylor, S., & Kumar, L. (2016). Review paper Global Climate Change Impacts on Pacific Islands Terrestrial Biodiversity: a review. *Tropical Conservation Science, 9*(1), 203–223. https://doi.org/10.1177/194008291600900111

Tung, C.-P. (2001). CLIMATE CHANGE IMPACTS ON WATER RESOURCES OF THE TSENGWEN CREEK WATERSHED IN TAIWAN[1]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*. doi:10.1111/j.1752-1688.2001.tb05483.x

Weiser, F., Sauer, A., Gettueva, D., Field, R., Irl, S., Vetaas, O., ... & Beierkuhnlein, C. (2021). Impacts of forest fire on understory species diversity in canary pine ecosystems on the island of la palma. Forests, 12(12), 1638. https://doi.org/10.3390/f12121638

Wilcox, R. R. (2017). *Understanding and applying basic statistical methods using R* (1st ed.). Wiley.

Xu, Zehao, Hu, H., & Zhao, P. (2019). Feasibility of Reverse Osmosis Desalination Brine as Artificial "Dead Sea" Pool Water. *Oalib*. doi:10.4236/oalib.1105424

Yandri, P., Kusumartono, F. X. H., Rianto, N., & Putri, I. A. P. (2020). Understanding the Implementation of Small-Scale Water and Other Infrastructure Developments in Small Islands in Indonesia: A Rapid Survey in Bintan and Mandeh Islands. *Forum Geografi*. doi:10.23917/forgeo.v34i2.922

Capítulo 6
Proyecciones del aumento de la aridez en las Islas Canarias

Juan Carlos Santamarta Cerezal
Noelia Cruz Pérez
Susana Clavijo Núñez

1. Introducción: El índice de aridez como herramienta clave para anticipar la evolución climática en las Islas Canarias

La aridez es una condición climática estructural definida por la desproporción entre la oferta de agua (precipitación) y la demanda atmosférica (evapotranspiración potencial). A diferencia de fenómenos puntuales como las sequías, que representan anomalías temporales, la aridez describe un estado climático permanente o de larga duración. Para su cuantificación, se utilizan índices como el Índice de Aridez de UNEP (IA), que se calcula como la razón entre la precipitación anual y la evapotranspiración potencial. Valores inferiores a 1 reflejan condiciones áridas, y cuanto más próximos a 0, mayor es la severidad.

En las Islas Canarias, la aplicación del índice de aridez resulta especialmente relevante por la singularidad climática del archipiélago, caracterizado por la fuerte variabilidad altitudinal, la influencia oceánica y la dependencia de los alisios. Diversos estudios basados en los escenarios climáticos del CMIP6 han proyectado un descenso sostenido de las precipitaciones junto con un aumento progresivo de la evapotranspiración potencial, lo que intensificará la aridez en todo el archipiélago. Esta tendencia ya se observa desde la segunda mitad del siglo XX, con un deterioro progresivo del balance entre aportes y pérdidas hídricas (Sánchez-Benítez et al., 2016; Carrillo et al., 2023). Algunos trabajos han estimado valores del índice de aridez que superan 1,5 en determinadas zonas, lo que indica condiciones de sequedad extrema en un contexto de cambio climático cada vez más marcado (Carrillo et al., 2023).

Las proyecciones de aridez elaboradas con datos de alta resolución disponibles en la plataforma SICMA-Canarias (Santamarta et al., 2025) permiten identificar con precisión espacial las zonas más vulnerables. Mientras las islas occidentales experimentan una progresiva pérdida de humedad relativa, con descensos acusados del índice especialmente en cumbres y vertientes húmedas, las islas orientales,

ya en condiciones de aridez estructural, verán agravada su situación hasta alcanzar valores próximos a 0,05 en los escenarios más desfavorables.

Este aumento de la aridez tiene implicaciones directas sobre la disponibilidad de recursos hídricos, la viabilidad agrícola, la recarga de acuíferos y la conservación de ecosistemas sensibles. En contextos insulares, donde los márgenes de resiliencia son estrechos, la pérdida de humedad atmosférica y edáfica acelera la degradación del capital natural. Las proyecciones indican, además, que el incremento de la aridez será más acusado en zonas de elevada altitud, alterando también los gradientes climáticos verticales y comprometiendo funciones ecológicas esenciales.

La singular configuración geográfica del archipiélago, caracterizado por una baja altitud relativa en el este, influencia continental africana y marcada diferenciación orográfica, agrava esta situación; especialmente en islas como Fuerteventura y Lanzarote, que ya parten de condiciones áridas estructurales (García-Rodríguez & García-Rodríguez, 2016).

Este cambio climático no solo compromete las precipitaciones, sino también la capacidad de recarga de los acuíferos, principal fuente de agua potable en las islas. La prolongación de los periodos secos y el incremento de la evapotranspiración dificultan la infiltración efectiva y reducen la sostenibilidad del recurso subterráneo (Custodio et al., 2016; Stanic et al., 2024). Los acuíferos de menor tamaño, frecuentes en islas pequeñas o zonas costeras, presentan además una mayor vulnerabilidad frente a las sequías, con una limitada capacidad de recuperación hidrológica tras eventos extremos (Stanic et al., 2024).

La variabilidad espacial entre las islas occidentales y orientales es especialmente significativa. Mientras las primeras reciben mayores aportes por efecto orográfico, las segundas muestran condiciones climáticas más secas y, por tanto, un riesgo creciente de escasez para el uso agrícola (Carrillo et al., 2023; García-Rodríguez & García-Rodríguez, 2016). Esta diferenciación obliga a repensar las estrategias hídricas desde una lógica insular, no homogénea.

Desde el punto de vista agrícola, los efectos del aumento de la aridez son ya evidentes. La viabilidad de determinados cultivos, especialmente los más dependientes del riego, se ve comprometida, y con ello la estabilidad económica de muchas zonas rurales. Las prácticas tradicionales de captación y almacenamiento de agua, esenciales en entornos áridos, deben adaptarse a una disponibilidad cada vez más limitada (Santamarta et al., 2022). La literatura especializada aboga por medidas innovadoras, como el uso de variedades más resistentes a la sequía, el rediseño de los sistemas de riego y la integración de prácticas agronómicas sostenibles adaptadas al nuevo contexto climático (Santamarta et al., 2023; Santamarta et al., 2022).

El aumento proyectado de la aridez en el archipiélago canario obliga a desarrollar estrategias integradas de planificación hídrica que respondan tanto a la pérdi-

da de precipitación como al deterioro de los sistemas de recarga y a la fragilidad del modelo agroproductivo. La coordinación entre hidrólogos, ingenieros agrónomos y responsables de la política pública será esencial para diseñar respuestas adaptadas a la especificidad de cada isla, con el objetivo último de garantizar la resiliencia hídrica y ecológica de este territorio insular especialmente vulnerable.

La integración del índice de aridez en los instrumentos de planificación territorial y gestión del agua permitirá anticipar escenarios de estrés climático, priorizar medidas de adaptación específicas por isla y reducir la dependencia de soluciones reactivas. Frente a este reto, el enfoque debe ser preventivo, localmente ajustado y científicamente fundamentado.

2. Tendencias del índice de aridez en el Archipiélago Canario

A continuación, se presentan los resultados de las proyecciones de evolución de la aridez para las Islas Canarias. Cabe señalar que las diferentes capas de datos utilizadas están disponibles en la plataforma de acceso público SICMA-Canarias (Santamarta et al., 2025). Respecto a los resultados obtenidos, valores del índice de aridez (IA) inferiores a 1 indican condiciones de aridez, representando la relación entre precipitación y evapotranspiración. A medida que el valor se aproxima a 0, las condiciones son cada vez más áridas, y los valores que se alejan de 1 reflejan ambientes progresivamente más húmedos.

La Tabla 6.1 presenta los resultados medios de aridez para cada isla, revelando un descenso constante del índice de aridez con respecto a los valores de referencia históricos a medida que avanza el siglo XXI.

Tabla 6.1. Resultados medios del índice de aridez por isla en el Archipiélago Canario

	Histórico	Proyección del índice de aridez			
	1985-2014	Escenarios	2021-2050	2041-2070	2071-2100
La Palma	0.39	SSP2-4.5	0.35	0.33	0.31
		SSP5-8.5	0.34	0.31	0.25
El Hierro	0.18	SSP2-4.5	0.17	0.16	0.16
		SSP5-8.5	0.16	0.15	0.13
La Gomera	0.52	SSP2-4.5	0.45	0.40	0.38
		SSP5-8.5	0.42	0.35	0.27
Tenerife	0.35	SSP2-4.5	0.31	0.29	0.27
		SSP5-8.5	0.30	0.26	0.21
Gran Canaria	0.35	SSP2-4.5	0.29	0.25	0.24
		SSP5-8.5	0.27	0.23	0.17

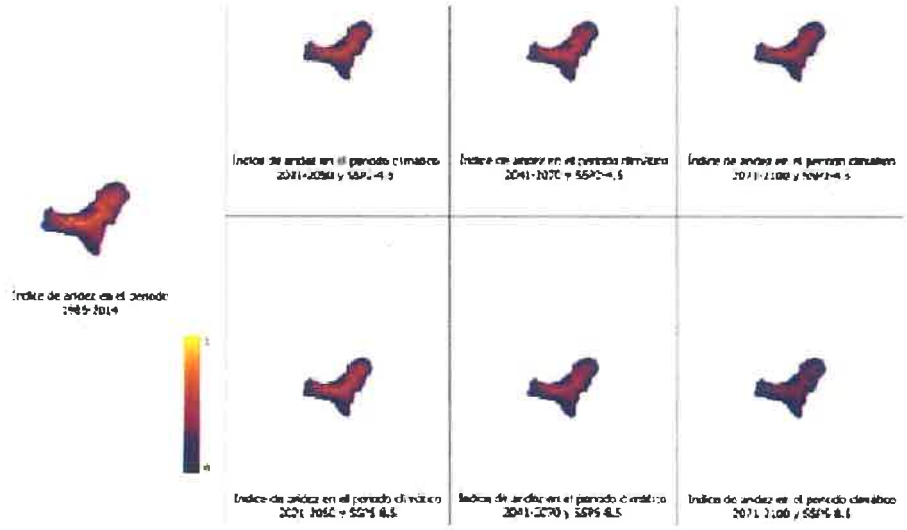
Tabla 6.1. Resultados medios del índice de aridez por isla en el Archipiélago Canario

	Histórico	Proyección del índice de aridez			
	1985-2014	Escenarios	2021-2050	2041-2070	2071-2100
Fuerteventura	0.10	SSP2-4.5	0.10	0.09	0.08
		SSP5-8.5	0.09	0.08	0.06
Lanzarote	0.10	SSP2-4.5	0.09	0.08	0.08
		SSP5-8.5	0.08	0.07	0.05

Fuente: elaboración propia (2025)

En la isla de La Palma, los resultados del índice de aridez oscilan entre 0 y 2. La zona más húmeda de la isla se encuentra en el sur de la isla, con valores cercanos a 1. A medio plazo se esperan reducciones del IA, con especial incidencia en las zonas más húmedas. Los resultados a largo plazo muestran reducciones del índice en todas las cumbres de la isla y también en la costa oriental, disminuyendo de -0,3 a -0,6 el valor del índice.

Los resultados del IA oscilan entre 0 y casi 1 para El Hierro (Figura 6.1). Los resultados históricos muestran como las zonas más secas se localizan en la costa, con valores inferiores a 0,5, mientras que las zonas más húmedas se localizan en las cumbres de las zonas centro-norte, con valores cercanos a 1. Los resultados a largo plazo muestran reducciones del índice con descensos en torno a -0,2 a -0,4.



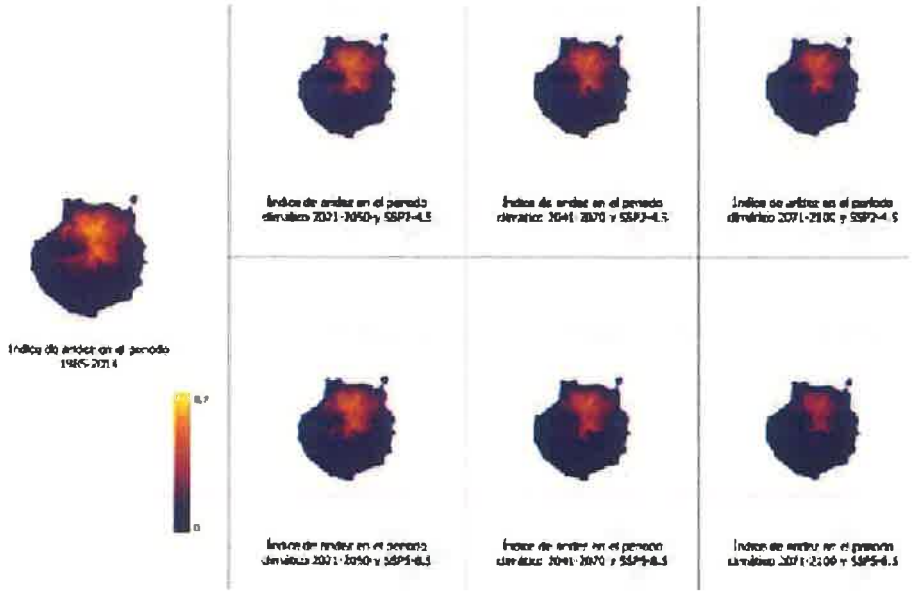
Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 6.1. Resultados anuales de las proyecciones climáticas en la variable índice de aridez para cuatro periodos y dos escenarios en El Hierro

La Gomera presenta resultados del IA que oscilan entre 0 y valores cercanos a 1. Los resultados históricos sitúan las zonas más áridas, con valores inferiores a 0,5, en zonas costeras y medianías del sur. Las zonas relativamente húmedas se sitúan en los valles y cumbres del norte, con valores próximos a 1. A finales de siglo, se esperan reducciones de la IA desde -0,1 hasta -0,3 en las zonas más «húmedas».

Los resultados del IA oscilan entre 0 y casi 1 para Tenerife. Los valores históricos sitúan a las zonas costeras y del sur como las más húmedas, con valores inferiores a 0,5. Los valles y cumbres del norte son zonas relativamente húmedas, con sólo algunas cumbres que superan 1. A largo plazo, se esperan reducciones de la IA en toda la isla, con descensos en torno a -0,1 hasta -0,4 en las zonas del norte.

En Gran Canaria los resultados del IA oscilan entre 0 y casi 0,8 (Figura 6.2). Los valores inferiores a 0,5 cubren la mayor parte de la isla. Sólo las montañas del centro-norte son zonas relativamente húmedas. A finales de siglo se esperan reducciones del índice en toda la isla, en torno a -0,2 a -0,4 en las zonas septentrionales.



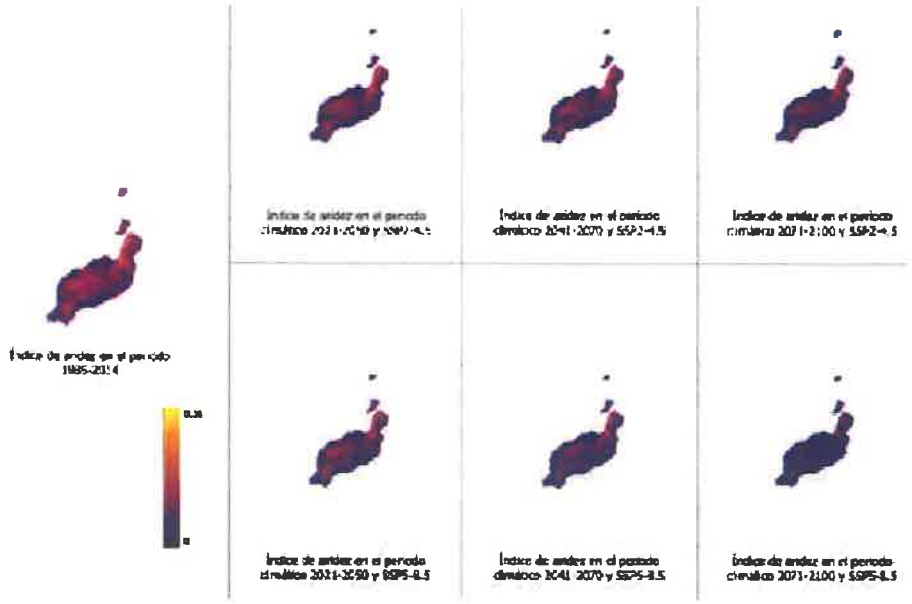
Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 6.2. Resultados anuales de las proyecciones climáticas en la variable índice de aridez para cuatro periodos y dos escenarios en Gran Canaria.

Los resultados del IA oscilan entre 0 y casi 0,5 para Fuerteventura y Lobos. Las zonas montañosas muestran los valores más altos o relativamente más húme-

dos. A largo plazo, se esperan pequeñas reducciones del índice, en torno a -0,1 hasta -0,2.

Por último, el IA oscilan entre 0 y casi 0,5 para Lanzarote y el Archipiélago Chinijo (Figura 6.3). Los acantilados de Famara presentan los valores más altos o relativamente húmedos. A finales de siglo se esperan pequeñas reducciones del índice, en torno a -0,1 hasta -0,2.



Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 6.3. Resultados anuales de las proyecciones climáticas en la variable índice de aridez para cuatro periodos y dos escenarios en Lanzarote

A través de estos resultados, se observa cómo las islas occidentales, como La Palma, muestran mayores descensos en el índice de aridez, ya que son islas mayoritariamente húmedas. Se esperan descensos menores en las islas orientales, puesto que ya presentan índices de aridez elevados.

Esta tendencia es especialmente preocupante en regiones como el Archipiélago Canarios, donde las islas pequeñas y aisladas en zonas subtropicales y tropicales son muy vulnerables a los efectos del aumento de la aridez. El aumento de las temperaturas, la fluctuación de los regímenes de precipitaciones y los limitados recursos de agua dulce agravan estos problemas, haciendo que estas islas sean especialmente susceptibles al cambio climático. Los resultados indican que la aridez seguirá intensificándose a lo largo del siglo, lo que subraya aún más la acuciante necesidad de implementar estrategias adaptativas para mitigar sus efectos.

Los resultados concuerdan con informes anteriores que indican un aumento de la aridez de la mayoría de los ecosistemas insulares como consecuencia de la reducción de las precipitaciones y el aumento de las tasas de evaporación (Yang et al., 2016). Esto es particularmente evidente en las islas del Mediterráneo, donde las proyecciones predicen una disminución significativa de las precipitaciones anuales, acompañada de un aumento de las temperaturas, especialmente en las cumbres de las islas y por encima de las capas de nubes (Re et al., 2020). Las islas se enfrentan a retos únicos en comparación con el continente, debido en gran medida a su aislamiento geográfico y a la escasez de recursos naturales.

Estos resultados también coinciden con estudios previos realizados en las Islas Canarias, donde se espera que la aridez aumente a medida que avance el siglo, debido a un aumento de la temperatura y una disminución de las precipitaciones (Carrillo et al., 2023; Hernández- Barrera et al., 2022). Del mismo modo, estos estudios también esperan cambios menos severos en las islas orientales, que se caracterizan por una mayor aridez y escasez de precipitaciones. Sin embargo, existe cierta diferencia en la identificación de las islas con mayores cambios, ya que los resultados obtenidos proyectan mayores cambios en las islas occidentales, mientras que estos estudios predicen mayores cambios en las vertientes sureste de las dos islas centrales, Tenerife y Gran Canaria (Carrillo et al., 2023). Además, cabe destacar que otros estudios también han analizado la relación entre el aumento de la aridez con la altitud, mostrando que los cambios son más pronunciados a mayor altitud (Carrillo et al., 2023; Hernández- Barrera et al., 2022).

El aumento general de la aridez, relacionada con la reducción de los recursos hídricos, plantea riesgos para la productividad agrícola, especialmente para los cultivos dependientes del regadío (Vrontisi et al., 2022). En el caso de las Islas Canarias, la producción de cultivos más dependientes del agua, como el plátano, es cada vez menos viable debido a la disminución de la disponibilidad de agua (Cruz-Pérez et al., 2023). Este descenso de la productividad agrícola puede conducir a la inseguridad alimentaria y a una mayor dependencia de las importaciones, lo que no es sostenible a largo plazo (Vrontisi et al., 2022). A pesar de esta tendencia generalmente pesimista de aumento de la aridez, existen en la literatura propuestas de varias medidas de mitigación y adaptación, incluidas o estrechamente vinculadas a muchas economías insulares.

La recogida de agua de lluvia y el uso de prácticas de riego eficientes son los enfoques más comúnmente recomendados para mejorar la gestión de los recursos hídricos (Koskei, 2019). El desarrollo de metodologías agrícolas sostenibles resistentes a los impactos inducidos por el clima, incluido el cultivo de variedades resistentes a la sequía, también podría ayudar a mitigar los efectos de la escasez de agua (Cruz-Pérez et al., 2023). Combinar el conocimiento indígena

con enfoques modernos de gestión de la tierra es crucial para reforzar la resiliencia de los entornos insulares (Nyasha, 2023). La viabilidad de estos métodos varía en función de las condiciones locales y los recursos disponibles. Aunque la recogida de agua de lluvia puede ser beneficiosa, factores socioeconómicos como la financiación o las infraestructuras insuficientes pueden obstaculizar su aplicación (Koskei, 2019). Del mismo modo, la transición a una agricultura sostenible puede requerir una inversión significativa en educación y apoyo a los agricultores (Cruz-Pérez et al., 2023). De este modo, abordar el reto de la aridez en las regiones insulares requiere un enfoque integral que combine avances tecnológicos, prácticas de gestión integradas y un enfoque en el contexto y los recursos locales.

3. Referencias bibliográficas

Carrillo, J., Hernández-Barrera, S., Expósito, F. J., Díaz, J. P., González, A., & Pérez, J. C. (2023). The uneven impact of climate change on drought with elevation in the Canary Islands. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1). https://doi.org/10.1038/s41612-023-00358-7

Cruz-Pérez, N., Santamarta, J.C., & Alvarez-Acosta, C. (2023). Water footprint of representative agricultural crops on volcanic islands: the case of the Canary Islands. Renewable Agriculture and Food Systems, 38. https://doi.org/10.1017/s1742170523000303

Custodio, E., Cabrera, M., Poncela, R., Puga, L., Skupien, E., & Villar, A. (2016). Groundwater intensive exploitation and mining in gran canaria and tenerife, Canary Islands, spain: hydrogeological, environmental, economic and social aspects. The Science of the Total Environment, 557-558, 425-437. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.038

García-Rodríguez, J. and García-Rodríguez, F. (2016). Human heritage and sustainable development on arid islands: the case of the eastern Canary Islands. Island Studies Journal, 11(1), 113-130. https://doi.org/10.24043/isj.337

Koskei, E. (2019). Constraints to use of rainwater harvesting technologies as an adaptation strategy to climate change in baringo county, kenya. The International Journal of Humanities & Social Studies, 7(7). https://doi.org/10.24940/theijhss/2019/v7/i7/hs1907-029

Nyasha, R. (2023). Opportunities, perceptions and challenges in production and use of traditional grains in semi-arid masvingo district, zimbabwe. African Journal of Agricultural Research, 19(8), 849-856. https://doi.org/10.5897/ajar2023.16439

Re, D., Tordoni, E., Pascalis, F., Negrin-Perez, Z., Fernández-Palacios, J., Arévalo, J., ... & Bacaro, G. (2020). Invasive fountain grass (pennisetum setaceum (forssk.) chiov.) increases its potential area of distribution in tenerife island under future climatic scenarios. Plant Ecology, 221(10), 867-882. https://doi.org/10.1007/s11258-020-01046-9

Sánchez-Benítez, A., García-Herrera, R., & Vicente-Serrano, S. (2016). Revisiting precipitation variability, trends and drivers in the Canary Islands. International Journal of Climatology, 37(9), 3565-3576. https://doi.org/10.1002/joc.4937

Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Paradinas Blázquez, C., Prado López, C., & Galiano Sánchez, L. (2025). Local climate change scenarios in the Canary Islands, adapted to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [Web platform]. Climate Research Foundation, Meteogrid, University of La Laguna. ARSINOE Project https://doi.org/10.25145/o.canarias.sicma.2025

Santamarta, J., Gutiérrez, L., Lario-Báscones, R., Rodríguez-Martín, J., & Cruz-Pérez, N. (2023). Geotechnical aspects of drilling and excavation of volcanic terrain for groundwater exploitation. Rem - International Engineering Journal, 76(2), 203-210. https://doi.org/10.1590/0370-44672021760027

Santamarta, J., Molina, A., Moreno, F., Rodríguez-Martín, J., & Cruz-Pérez, N. (2022). Water harvesting strategies for agriculture in the canary islands. Human Ecology Review, 27(2), 131-144. https://doi.org/10.22459/her.27.02.2022.07

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

Vrontisi, Z., Charalampidis, I., Lehr, U., Meyer, M., Paroussos, L., Lutz, C., ... & León, C. (2022). Macroeconomic impacts of climate change on the blue economy sectors of southern european islands. Climatic Change, 170(3-4). https://doi.org/10.1007/s10584-022-03310-5

Yang, Y., Guan, H., Batelaan, O., McVicar, T., Long, D., Piao, S., ... & Simmons, C. (2016). Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems. Scientific Reports, 6(1). https://doi.org/10.1038/srep23284

Capítulo 7
Respuesta hidrológica de las Islas Canarias al cambio climático

Juan Carlos Santamarta Cerezal
Noelia Cruz Pérez
Susana Clavijo Núñez

1. Introducción: El balance hídrico y su evolución en las Islas Canarias ante el cambio climático

El balance hídrico es una herramienta básica para cuantificar la disponibilidad neta de agua en un sistema natural o antropizado. Se define como la diferencia entre los aportes (fundamentalmente la precipitación) y las pérdidas de agua (principalmente evapotranspiración, escorrentía superficial y percolación profunda). Desde una perspectiva hidrológica, el balance hídrico permite evaluar si una región se comporta como fuente, sumidero o sistema equilibrado de agua a lo largo del tiempo. Su cálculo puede realizarse a distintas escalas (diaria, mensual o anual) y es especialmente útil en zonas donde el recurso hídrico es limitado o sufre presiones externas crecientes, como ocurre en los archipiélagos oceánicos.

En islas volcánicas, como las Canarias, el balance hídrico no solo depende del régimen de precipitaciones, sino también de factores geomorfológicos, edáficos y bioclimáticos que modulan la infiltración, la retención en el suelo y la recarga de acuíferos. La abrupta orografía, la heterogeneidad climática altitudinal y la marcada estacionalidad de las lluvias complican su estimación, y exigen modelos espaciales de alta resolución para reflejar las variaciones locales. A esto se suma el creciente protagonismo de la evapotranspiración, impulsada por el aumento de las temperaturas medias y la disminución de la humedad relativa, lo que convierte a este parámetro en la principal vía de pérdida de agua en el balance regional.

En el caso del archipiélago canario, los registros históricos muestran una reducción progresiva de la precipitación desde mediados del siglo XX, una tendencia que ha sido documentada mediante series de datos extensas (Sánchez-Benítez et al., 2016). Este descenso resulta especialmente preocupante si se considera la alta dependencia del agua de lluvia para la recarga de acuíferos y el mantenimiento de ecosistemas sensibles, ambos particularmente vulnerables a las alteraciones climáticas.

Las proyecciones climáticas más recientes, desarrolladas mediante modelos CMIP6 y adaptadas a escala local en la plataforma SICMA-Canarias (Santamarta et al. 2025), muestran una tendencia generalizada a la disminución del balance hídrico a lo largo del siglo XXI. Esta reducción es más acusada en los escenarios de altas emisiones (SSP5-8.5), y se manifiesta incluso en las zonas de mayor altitud de las islas occidentales, tradicionalmente consideradas como reservorios hídricos. En el caso de las islas orientales, el déficit es estructural: Fuerteventura y Lanzarote presentan ya actualmente un balance hídrico próximo a cero, y las proyecciones no ofrecen un horizonte de reversión sin intervención externa masiva.

Las proyecciones climáticas derivadas del proyecto CMIP6 indican un aumento significativo de la temperatura media en las próximas décadas, incluso en los escenarios intermedios. Este incremento térmico provocará una intensificación de la evapotranspiración, lo que comprometerá aún más la disponibilidad neta de agua, sobre todo en periodos de baja pluviometría. Estudios recientes confirman que este aumento de la evapotranspiración, vinculado directamente al calentamiento global, acentúa el estrés hídrico y obliga a reconsiderar los actuales modelos de gestión del agua en territorios insulares (Lozano-Parra & Martín, 2024).

Además, los cambios proyectados en los ciclos diarios de precipitación influenciados tanto por la topografía local como por forzamientos climáticos de gran escala, pueden dar lugar a una mayor irregularidad hidrológica, alternando episodios de sequía y lluvias intensas que complican aún más la planificación del recurso (Wang & Sobel, 2017; Love et al., 2011).

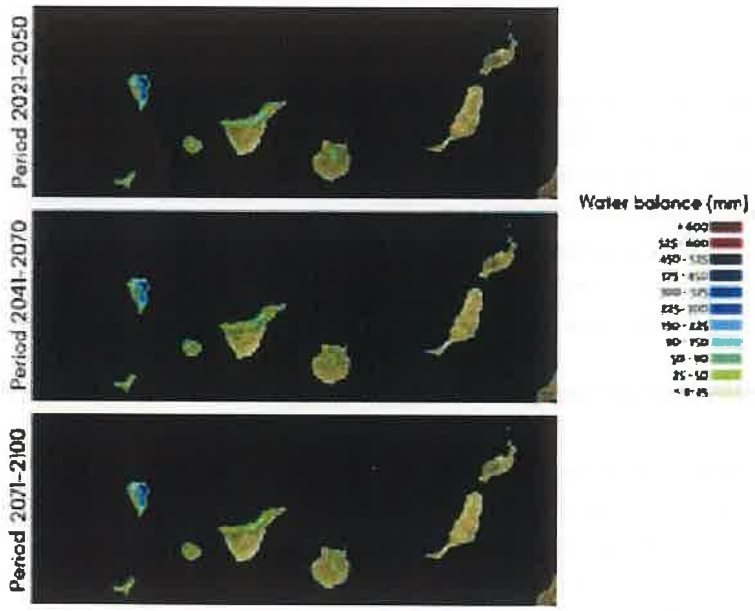
La modelización hidrológica de alta resolución, con escalas espaciales de hasta 100x100 metros, permite detectar con mayor precisión estos cambios a nivel local. Este tipo de simulaciones, aplicadas ya en Canarias, revelan escenarios en los que las condiciones más secas impiden la recarga efectiva de los acuíferos, poniendo en riesgo la seguridad hídrica de muchas poblaciones (Li et al., 2024; Trancoso et al., 2024). Lejos de tratarse de una mera cuestión de disponibilidad, estas transformaciones implican una redefinición completa de las estrategias de gestión, donde deben integrarse medidas como la captación de agua de lluvia, la protección de las zonas de recarga del acuífero y un uso más sostenible del agua subterránea (Kourtis et al., 2019; Kura et al., 2013).

El deterioro del balance hídrico tiene implicaciones directas sobre la sostenibilidad de los sistemas de abastecimiento, la viabilidad de la agricultura de secano, la recarga de los acuíferos y la conservación de los ecosistemas higrófilos. Asimismo, condiciona la planificación territorial, la localización de infraestructuras hidráulicas y la evaluación del riesgo asociado al cambio climático. Frente a este escenario, se hace imprescindible integrar el balance hídrico en los instrumentos de gestión adaptativa, combinando datos meteorológicos, sensores remotos, mo-

delización climática y validación local. Solo así será posible anticipar los efectos de una progresiva reducción de la disponibilidad de agua y diseñar respuestas diferenciadas para cada isla.

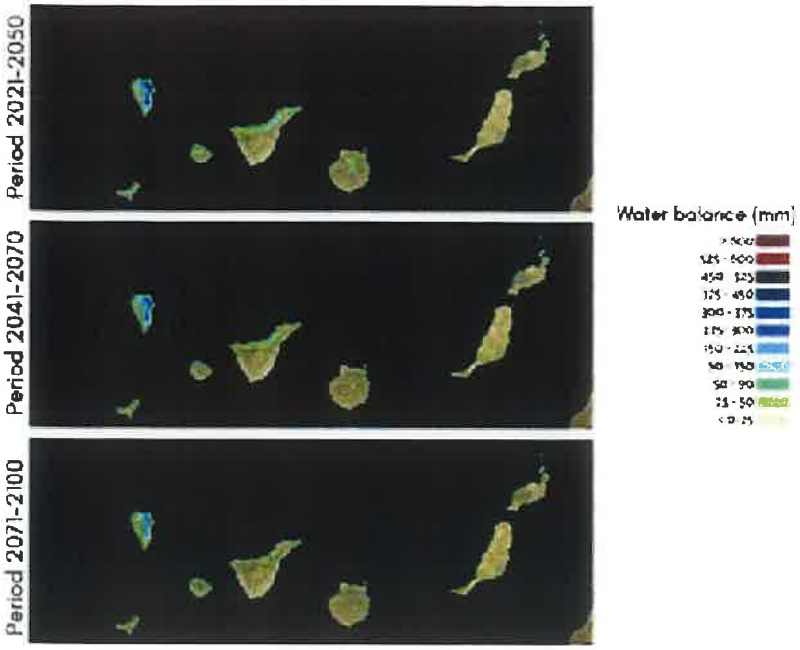
2. Proyección del balance hídrico en las Islas Canarias durante el siglo XXI

La metodología propuesta ha permitido analizar la evolución de los recursos hídricos en las Islas Canarias, que deben ser protegidos y estudiados. Utilizando las diferentes capas de datos disponibles en la plataforma de acceso público SICMA-Canarias (Santamarta et al., 2025), se representa en la Figura 7.1 y Figura 7.2 el balance hídrico en Canarias. En ellas se especifican los resultados del balance hídrico a lo largo de tres horizontes temporales futuros, utilizando la mediana de los modelos, para el escenario climático intermedio (SSP2-4.5) y el escenario más desfavorable (SSP5-8.5) propuestos por el Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. De este modo, se presenta un estudio regional que muestra las diferencias en la evolución del balance hídrico en cada isla con una alta resolución espacial (100 m x 100 m).



Fuente: SICMA-Canarias (2025)

Figura 7.1. Evolución del balance hídrico en tres periodos de tiempo para el escenario SSP2-4.5



Fuente: SICMA-Canarias (2025)

Figura 7.2. Evolución del balance hídrico en tres periodos de tiempo para el escenario SSP5-8.5

A continuación, se presentan los resultados obtenidos sobre el balance hídrico en cada una de las islas del Archipiélago Canario.

En el caso de La Palma, los datos históricos revelan que sólo las zonas húmedas, en particular las regiones oriental, septentrional y nororiental, mantienen una cantidad significativa de agua a lo largo del año. A corto y medio plazo, se prevé un ligero aumento de la disponibilidad de agua en el noreste de la isla. Sin embargo, las predicciones a largo plazo indican una disminución del agua disponible debido a un aumento de la evapotranspiración (ETo), mientras que las precipitaciones se mantienen estables o disminuyen.

El balance hídrico anual en El Hierro muestra que sólo quedan cantidades moderadas de agua disponible a lo largo de los acantilados del centro de la isla, aproximadamente 200 mm, con cantidades menores en la meseta noreste, que apenas alcanzan los 100 mm. Las proyecciones futuras sugieren una reducción del balance hídrico de entre el 50% y el 75%, con un descenso de hasta -150 mm en la región central.

En La Gomera, el balance hídrico anual indica pequeñas cantidades de agua disponible en las tierras altas centrales y en las regiones de altitud media, como el Parque Nacional de Garajonay, situado en el centro de la isla. Debido a la nubo-

sidad persistente durante la mayor parte del año, esta zona mantiene una media de unos 100 mm. Las previsiones futuras apuntan a una reducción parcial o casi total del balance hídrico.

El análisis de los datos históricos y anuales de Tenerife pone de manifiesto que sólo las zonas del norte de la isla presentan pequeñas cantidades de agua disponible, con valores máximos en torno a los 200 mm en un parque natural situado en el norte. Las predicciones futuras estiman reducciones de aproximadamente el 50% en el balance hídrico, lo que se traduce en descensos de 50 a 100 mm.

En el caso de Gran Canaria, el balance hídrico anual revela que sólo quedan pequeñas cantidades de agua en las regiones montañosas del norte y centro de la isla, con apenas 100 mm. Las proyecciones futuras estiman un agotamiento casi total de las reservas hídricas de la isla.

Para las islas más orientales, Fuerteventura y Lanzarote, el balance hídrico anual es nulo, lo que significa que ninguna precipitación significativa permite disponer de agua en ningún momento del año. La tendencia general de estas islas, caracterizada por el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones, no hará sino agravar el estrés hídrico en Fuerteventura y Lanzarote.

Aunque cada isla presenta características y patrones hídricos distintos, la tendencia general apunta a un balance hídrico decreciente, que empeorará a medida que avance el siglo debido al aumento de la evapotranspiración y a unos niveles de precipitación estables o decrecientes. Además, es importante señalar que el balance hídrico en las zonas costeras de las siete islas analizadas es actualmente nulo, lo que indica que estas regiones se enfrentarán a un estrés hídrico aún mayor a largo plazo.

La precipitación desempeña un papel fundamental en el ciclo hidrológico como fuente primaria de agua para los ecosistemas terrestres (Eekhout et al., 2018). Los cambios en los patrones de precipitación afectan directamente a la disponibilidad de agua, la recarga de las aguas subterráneas y la dinámica de las aguas superficiales, todo lo cual es crucial para mantener el equilibrio hídrico general (Eekhout et al., 2018). Los modelos climáticos del CMIP6 y el Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático indican una tendencia mundial a la disminución de las precipitaciones, en particular en las regiones áridas y semiáridas, pero también en los climas tropicales y templados.

El alcance de la disminución de las precipitaciones varía según las regiones, y se espera que algunas zonas experimenten reducciones significativamente mayores que otras (Benítez et al., 2016). Estos cambios tendrán profundas repercusiones en los ciclos hidrológicos regionales, intensificando el estrés hídrico, aumentando las tasas de evaporación y haciendo que las sequías sean más frecuentes (Eekhout

et al., 2018; Djaman et al., 2016). Además, la disminución de las reservas de nieve en las montañas, la alteración de los caudales de los ríos y los cambios en los regímenes de precipitaciones agravan aún más los desequilibrios hidrológicos (Eekhout et al., 2018; Myhre et al., 2018). La disminución de las precipitaciones aumentará las presiones sociales y económicas, lo que requerirá estrategias coordinadas para apoyar tanto a las comunidades como a los ecosistemas (Djaman et al., 2016; Sharma et al., 2018; Rodríguez-Urrego et al., 2022; Schmitz et al., 2017).

Esa disminución general de las precipitaciones, unida a un aumento de la temperatura y de la radiación solar, provocará un aumento de la evapotranspiración, que alcanzará valores graves a finales de siglo. Leta et al. (2018) destacan el importante impacto de la evapotranspiración en el balance hídrico de islas volcánicas como Hawái. Los resultados obtenidos en la presente investigación, que muestran una tendencia de aumento de la evapotranspiración y disminución de la precipitación en las Islas Canarias, coinciden con dicha investigación, así como con otros estudios anteriores. Aunque la precipitación sigue siendo un parámetro difícil de proyectar debido a su variabilidad y a la complejidad de los procesos atmosféricos implicados, diferentes estudios apuntan a una disminución de las precipitaciones en Canarias (Benítez et al., 2016; Carrillo et al., 2023). Adinolf et al. (2025) establecen una disminución en la frecuencia y precipitación media en Tenerife y Fuerteventura, siendo más difícil de predecir en Tenerife dada su compleja orografía. Además de la disminución de las precipitaciones en las diferentes islas, también se prevé una menor humedad del suelo (Sosa-Guillén et al., 2024), lo que influirá en la disponibilidad del recurso.

En referencia a la evapotranspiración, los resultados también coinciden con otros estudios que prevén un aumento futuro de este indicador, mayor en el escenario climático más desfavorable SSP5 (Carrillo et al., 2023). Esta tendencia se explica principalmente por el aumento previsto de la temperatura y la disminución de la humedad.

Dados los ya escasos recursos hídricos de la región, el aumento de las temperaturas y el incremento de las tasas de evaporación presentan retos adicionales (Cruz-Pérez et al., 2023). La demanda combinada de expansión urbana, agricultura y turismo, sobrecarga aún más los suministros de agua (Dorta Antequera et al., 2021). La reducción de las precipitaciones afecta a la recarga de las aguas subterráneas, a los caudales de los arroyos y a la estabilidad a largo plazo de los recursos hídricos.

En respuesta a estas presiones, las autoridades locales han implementado la desalinización, la reutilización de aguas residuales y la recogida de agua de lluvia para mitigar la escasez (Cruz-Pérez et al., 2022; León et al., 2021; Peñate et al., 2011; Velázquez-Medina, 2023). Estas estrategias diversifican las fuentes de agua

y mejoran la eficiencia, pero se requieren medidas adicionales. El uso de energías renovables en la desalinización podría reducir la dependencia de los combustibles fósiles, mientras que la colaboración con otras regiones insulares podría ofrecer otras soluciones adaptativas. Aprovechando la innovación tecnológica, las intervenciones políticas y la participación comunitaria, las Islas Canarias pueden mejorar la resiliencia al estrés hídrico inducido por el clima y salvaguardar la sostenibilidad a largo plazo (Cruz-Pérez et al., 2023).

3. Referencias bibliográficas

Adinolfi, M., Loprieno, L. L., Demory, M.-E., Zeman, C., & Schär, C. (2025). Km-scale climate simulations over Madeira and Canary Islands under present and future conditions: a model intercomparison study. *Climate Dynamics*, 63–89. https://doi.org/10.1007/s00382-024-07563-x

Benítez, A. S., García-Herrera, R., & Vicente-Serrano, S. M. (2016). Revisiting Precipitation Variability, Trends and Drivers in the Canary Islands. *International Journal of Climatology*. https://doi.org/10.1002/joc.4937

Carrillo, J., Hernández-Barrera, S., Expósito, F. J., Díaz, J. P., González, A., & Pérez, J. C. (2023). The uneven impact of climate change on drought with elevation in the Canary Islands. *Climate and Atmospheric Science*, *6*(31). https://doi.org/10.1038/s41612-023-00358-7

Cruz-Pérez, N., Santamarta Cerezal, J. C., & Alvarez-Acosta, C. (2023). Water Footprint of Representative Agricultural Crops on Volcanic Islands: The Case of the Canary Islands. *Renewable Agriculture and Food Systems*. https://doi.org/10.1017/s1742170523000303

Cruz-Pérez, N., Santamarta Cerezal, 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*. https://doi.org/10.1007/s40899-022-00706-0

Djaman, K., Baldé, A. B., Rudnick, D. R., Ndiaye, O., & Irmak, S. (2016). Long-term Trend Analysis in Climate Variables and Agricultural Adaptation Strategies to Climate Change in the Senegal River Basin. *International Journal of Climatology*. https://doi.org/10.1002/joc.4885

Dorta Antequera, P. J., Pacheco, J. D., Díez, A. L., & Herrera, C. B. (2021). Tourism, Transport and Climate Change: The Carbon Footprint of International Air Traffic on Islands. *Sustainability*. https://doi.org/10.3390/su13041795

Eekhout, J., Hunink, J. E., Terink, W., & Vente, J. de. (2018). Why Increased Extreme Precipitation Under Climate Change Negatively Affects Water Security. *Hydrology and Earth System Sciences*. https://doi.org/10.5194/hess-22-5935-2018

Kourtis, I., Kotsifakis, K., Feloni, E., & Baltas, E. (2019). Sustainable water resources management in small greek islands under changing climate. Water, 11(8), 1694. https://doi.org/10.3390/w11081694

Kura, N., Ramli, M., Sulaiman, W., Ibrahim, S., Aris, A., & Mustapha, A. (2013). Evaluation of factors influencing the groundwater chemistry in a small tropical island of malaysia. International Journal of Environmental Research and Public Health, 10(5), 1861-1881. https://doi.org/10.3390/ijerph10051861

León, F., Martín, A. R., & Pérez Báez, S. O. (2021). Study of the Ecological Footprint and Carbon Footprint in a Reverse Osmosis Sea Water Desalination Plant. *Membranes*. https://doi.org/10.3390/membranes11060377

Leta, O. T., El-Kadi, A. I., & Dulai, H. (2018). Impact of climate change on daily streamflow and its extreme values in Pacific Island watersheds. *Sustainability (Switzerland), 10*(2057). https://doi.org/10.3390/su10062057

Li, H., Mu, H., Jian, S., & Li, X. (2024). Assessment of rainfall and temperature trends in the yellow river basin, china from 2023 to 2100. Water, 16(10), 1441. https://doi.org/10.3390/w16101441

Love, B., Matthews, A., & Lister, G. (2011). The diurnal cycle of precipitation over the maritime continent in a high-resolution atmospheric model. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137(657), 934-947. https://doi.org/10.1002/qj.809

Lozano-Parra, J. and Martín, J. (2024). Exploring the impact of climate change on water resources for vegetation covers in extremadura (spain). Water, 16(10), 1418. https://doi.org/10.3390/w16101418

Myhre, G., Samset, B. H., Hodnebrog, Ø., Andrews, T., Boucher, O., Faluvegi, G., ... Voulgarakis, A. (2018). Sensible Heat Has Significantly Affected the Global Hydrological Cycle Over the Historical Period. Nature Communications. https://doi.org/10.1038/s41467-018-04307-4

Peñate, B., Castellano, F., Bello, A., & García-Rodríguez, L. (2011). Assessment of a Stand-Alone Gradual Capacity Reverse Osmosis Desalination Plant to Adapt to Wind Power Availability: A Case Study. *Energy*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.04.005

Rodríguez-Urrego, D., Cañadillas-Ramallo, D., González-Díaz, B., & Guerrero-Lemus, R. (2022). Analysis of the Water-Energy Nexus Applied to an Insular System: Case Study of Tenerife. Sustainability. https://doi.org/10.3390/su14031653

Sánchez-Benítez, A., García-Herrera, R., & Vicente-Serrano, S. (2016). Revisiting precipitation variability, trends and drivers in the Canary Islands. International Journal of Climatology, 37(9), 3565-3576. https://doi.org/10.1002/joc.4937

Santamarta, J. C., Cruz-Pérez, N., Paradinas Blázquez, C., Prado López, C., & Galiano Sánchez, L. (2025). Local climate change scenarios in the Canary Islands, adapted to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [Web platform]. Climate Research Foundation, Meteogrid, University of La Laguna. ARSINOE Project https://doi.org/10.25145/o.canarias.sicma.2025

Schmitz, M. F., Arnaiz-Schmitz, C., Herrero-Jáuregui, C., Díaz, P., G. Matos, D. G., & Pineda, F. D. (2017). People and Nature in the Fuerteventura Biosphere Reserve (Canary Islands): Socio-Ecological Relationships Under Climate Change. Environmental Conservation. https://doi.org/10.1017/s0376892917000169

Sharma, A., Wasko, C., & Lettenmaier, D. P. (2018). If Precipitation Extremes Are Increasing, Why Aren't Floods? In *Water Resources Research* (Vol. 54, pp. 8545–8551). Blackwell Publishing Ltd. https://doi.org/10.1029/2018WR023749

Sosa-Guillén, P., González, A., Pérez, J. C., Expósito, F. J., & Díaz, J. P. (2024). Bioclimatic indicators dataset for the orographically complex Canary Islands archipelago. *Scientific Data* , *11*(1323). https://doi.org/10.1038/s41597-024-04134-x

Trancoso, R., Syktus, J., Allan, R., Croke, J., Hoegh-Guldberg, O., & Chadwick, R. (2024). Significantly wetter or drier future conditions for one to two thirds of the world's population. Nature Communications, 15(1). https://doi.org/10.1038/s41467-023-44513-3

Velázquez-Medina, S. (2023). Integration of a Geothermal Plant in a System With High Renewable Energy Penetration for Desalination Plant Self-Consumption. Journal of Marine Science and Engineering. https://doi.org/10.3390/jmse11020353

Wang, S. and Sobel, A. (2017). Factors controlling rain on small tropical islands: diurnal cycle, large-scale wind speed, and topography. Journal of the Atmospheric Sciences, 74(11), 3515-3532. https://doi.org/10.1175/jas-d-16-0344.1

Capítulo 8
Aumento de la sequía en las Islas Canarias

Joselin Sarai Rodríguez-Alcántara
Noelia Cruz-Pérez
Susana Clavijo Núñez
Juan Carlos Santamarta Cerezal

1. Introducción: El índice de sequía y su relevancia en las Islas Canarias

La sequía es un fenómeno hidrometeorológico complejo, caracterizado por una disminución persistente e inusual de la disponibilidad de agua respecto a las condiciones climáticas normales de una región. A diferencia de otros eventos extremos, su aparición es gradual, su delimitación incierta y sus impactos multisectoriales, afectando desde los ecosistemas hasta la economía. En zonas áridas o semiáridas, como las Islas Canarias, estos efectos pueden acentuarse y adquirir un carácter estructural.

La evaluación de los recursos hídricos en islas volcánicas oceánicas, en particular en el caso del archipiélago canario, exige una comprensión detallada de las tendencias recientes en la severidad de las sequías, condicionadas por un escenario climático cada vez más alterado. Entre los indicadores más robustos para este análisis se encuentra el índice SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index), que integra datos de precipitación y temperatura, permitiendo una medida más representativa del estrés hídrico. A diferencia del SPI (Standardized Precipitation Index), que solo considera el déficit de lluvias, el SPEI incorpora la evapotranspiración potencial, lo que lo convierte en una herramienta especialmente adecuada para captar la sensibilidad del balance hídrico frente al calentamiento global (Ma et al., 2015; Kim & Rhee, 2016; Kolekar et al., 2018).

Esta sensibilidad es particularmente crítica en las Islas Canarias, donde la variabilidad climática, tanto intra como interinsular, es elevada, y donde los contrastes entre islas occidentales y orientales condicionan respuestas divergentes frente a los episodios de sequía. Factores como la altitud y la cobertura vegetal desempeñan un papel decisivo en esta diferenciación. Las zonas de mayor altitud, con influencia orográfica sobre las precipitaciones, suelen mostrar una menor severidad de la se-

quía, mientras que las áreas más bajas, especialmente en las islas orientales, presentan condiciones más áridas debido a una menor precipitación y a la escasa vegetación (Hoffmann et al., 2020). Esta disparidad se acentúa conforme se agrava el cambio climático, como confirman estudios recientes sobre la propagación de la sequía en los sistemas atmosféricos e hidrológicos (Brunner & Chartier-Rescan, 2024).

Las implicaciones de estas tendencias para la planificación de los recursos hídricos son profundas. Las políticas de gestión del agua deben partir del reconocimiento de un escenario futuro en el que las sequías serán más frecuentes, más severas y más prolongadas, especialmente si se confirma el aumento sostenido de temperaturas y la modificación del régimen pluviométrico (Wang et al., 2016; Oh et al., 2022; Saengrattanayon et al., 2019). Incorporar el SPEI en los marcos de planificación permitiría mejorar la capacidad predictiva, facilitando el diseño de estrategias adaptativas más eficaces, ajustadas a los diferentes pisos altitudinales y coberturas del suelo. Esto resulta clave tanto para el abastecimiento urbano como para la agricultura de secano, que ya opera en condiciones de alta vulnerabilidad (Abatan et al., 2017; Liu et al., 2017).

En síntesis, el análisis de las sequías mediante el índice SPEI en el contexto de las Islas Canarias proporciona información clave sobre las interacciones entre clima, relieve y vegetación en la disponibilidad del recurso hídrico. El reto no es solo cuantificar la sequía, sino integrar sus patrones espaciales y temporales en una gestión que, si no quiere quedarse atrás, debe ser sensible al territorio, científicamente informada y climáticamente adaptativa.

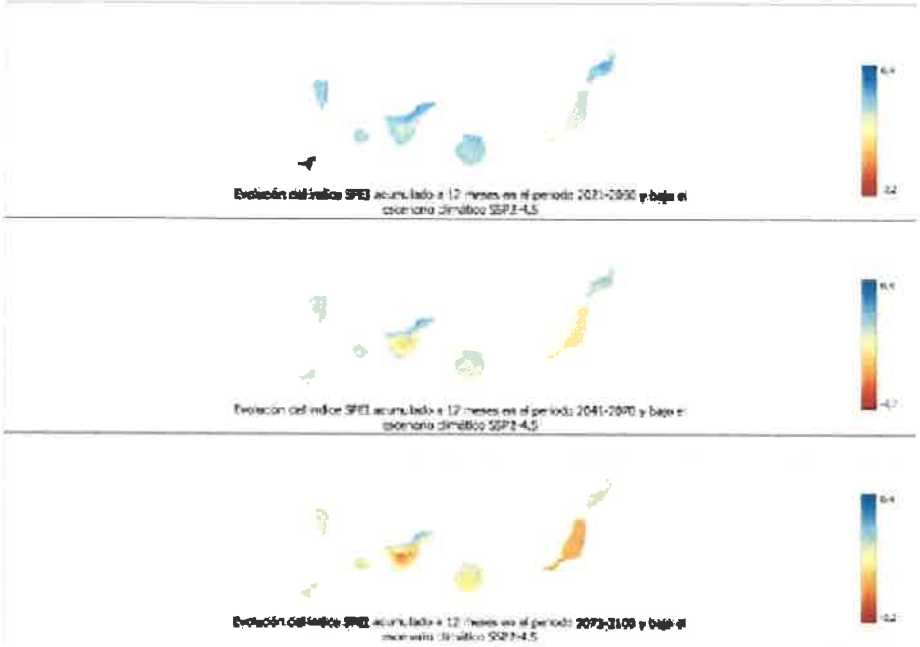
2. Tendencias del índice SPEI en el Archipiélago Canario

El índice SPEI se calculó directamente en cada estación meteorológica utilizada en el análisis y, posteriormente, se interpoló para abarcar cada una de las islas. Se han generado gráficos de caja basados en los datos de todas las estaciones meteorológicas disponibles, a diferencia de cada punto de la cuadrícula espacial interpolada. La interpretación de los resultados se centra principalmente en las variaciones de los valores medios. Sin embargo, es importante reconocer que, debido a la compleja geografía y diversidad climática de la isla, estos cambios de la mediana no pueden extrapolarse uniformemente a todo el territorio. Se ha demostrado que las variaciones locales dan lugar a efectos atenuados o amplificados. Por consiguiente, la dispersión observada en los gráficos de caja es especialmente significativa.

El valor histórico de referencia del SPEI se fija en cero debido a la formulación del índice, que permite detectar desviaciones hacia la sequía (valores nega-

tivos) o el exceso de agua (valores positivos). A diferencia de otros índices, el SPEI es singularmente sensible a los efectos del calentamiento global debido a que incorpora la temperatura en su cálculo. Esta característica lo convierte en un indicador ideal para analizar los impactos del cambio climático en el balance hídrico.

Los resultados revelan una distinción en la progresión del índice SPEI en las dos regiones diferenciadas, a saber, las islas occidentales (que comprenden La Palma, El Hierro, La Gomera y Tenerife) y las islas orientales (que comprenden Gran Canaria, Fuerteventura y Lanzarote). Estas observaciones ponen de manifiesto los distintos grados de sensibilidad al cambio climático y la creciente intensidad de las condiciones de sequía, tal y como se recoge en la Figura 8.1.



Fuente: elaboración propia (2025)

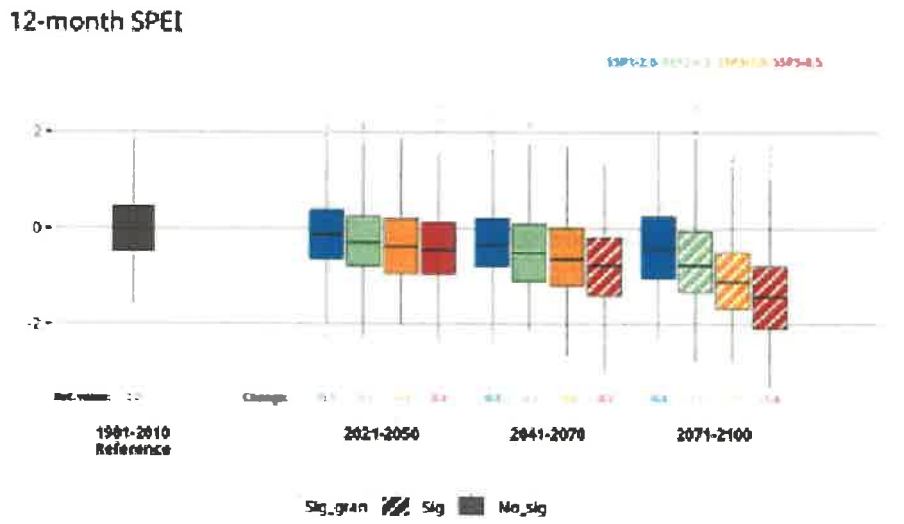
Figura 8.1. Evolución del SPEI en distintos periodos temporales bajo el escenario climático SSP2-4.5

2.1. Islas occidentales

Las islas occidentales, que se distinguen por su marcada variabilidad topográfica, están sometidas a una influencia más pronunciada de los vientos alisios. Esto se traduce en unas condiciones climáticas más húmedas, especialmente evidentes

en sus vertientes septentrionales. A pesar del descenso previsto del SPEI, que se espera que la evolución sea más moderada en las islas occidentales que en las orientales. Los descensos oscilan entre -0,7 y -1,5 en el escenario más extremo (SSP5-8,5), siendo más pronunciados hacia finales de siglo y en los valores agregados de 12 meses. Sin embargo, estas islas presentan cierto grado de resiliencia climática debido a su mayor capacidad de retención de agua, a la existencia de bosques nubosos y a la presencia de ecosistemas forestales que contribuyen a la recarga natural del acuífero.

En la isla de La Palma se prevé una disminución progresiva y significativa del SPEI a lo largo del siglo XXI. Este fenómeno puede atribuirse a un aumento de la temperatura que no se ve compensado por un aumento correspondiente de las precipitaciones, que permanecen estables o presentan un ligero descenso. Las proyecciones indican un rango de descensos en el SPEI de 3 meses, de -0,7 (SSP2-4,5) a -1,3 (SSP5-8,5), y un rango similar en el SPEI de 12 meses, lo que sugiere un aumento en la frecuencia y severidad de las sequías (Figura 8.2).

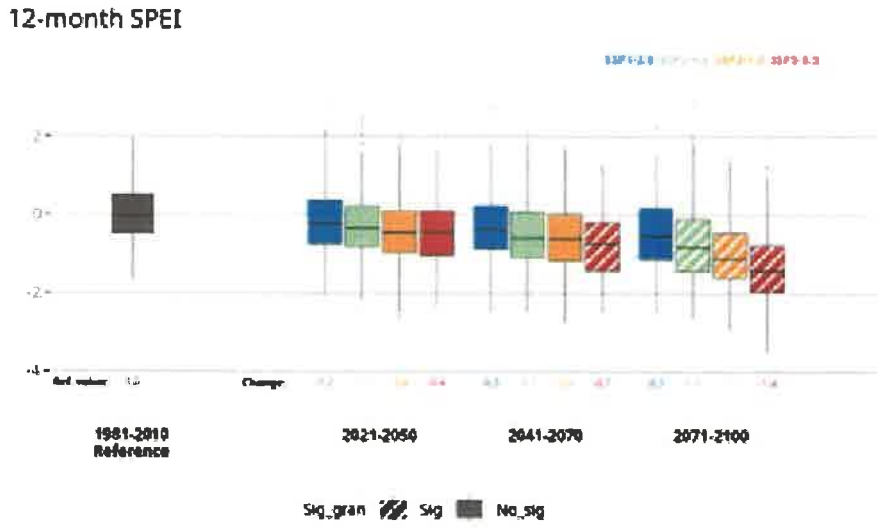


Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 8.2. Evolución del indicador SPEI acumulado a 12 meses en la isla de La Palma, bajo todos los modelos CMIP6 considerados

En El Hierro, la evolución del índice muestra una tendencia comparable, aunque con una magnitud ligeramente superior. El SPEI a 3 meses muestra descensos significativos, indicando una mayor variabilidad estacional de la sequía. Este fe-

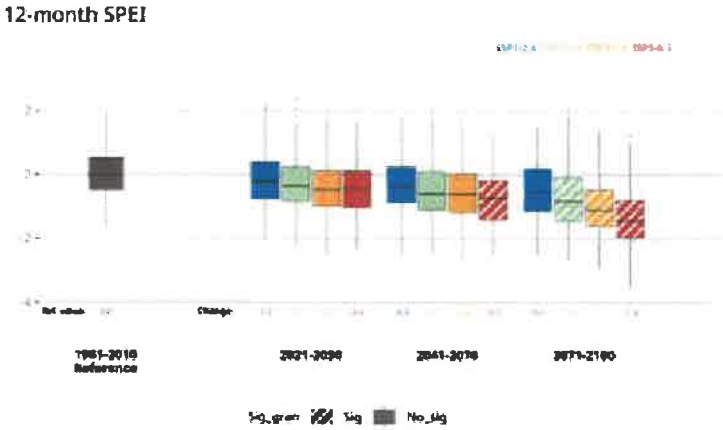
nómeno es particularmente evidente en el SPEI a 12 meses, donde las proyecciones indican valores que llegan hasta -1,4 en el escenario más pesimista (Figura 8.3). Esta tendencia sugiere un periodo prolongado de condiciones secas, que tendrá importantes impactos sobre los recursos de aguas subterráneas y la recarga de acuíferos.



Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 8.3. Evolución del indicador SPEI acumulado a 12 meses en la isla de El Hierro, bajo todos los modelos CMIP6 considerados

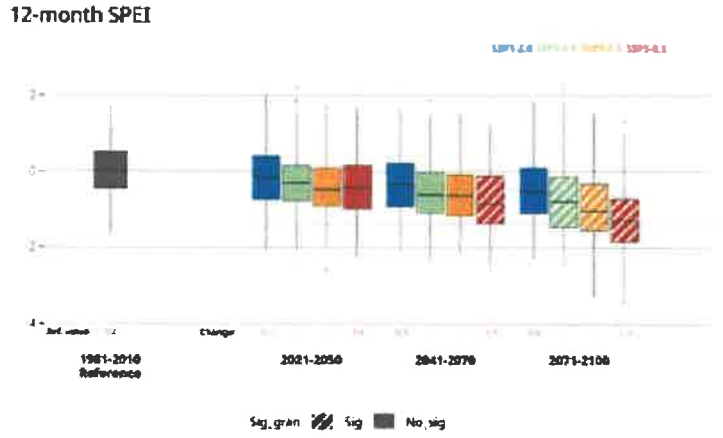
En el caso de la isla de La Gomera, las proyecciones indican una escalada de la aridez relativa. El SPEI a 3 meses muestra una tendencia decreciente, lo que pone de relieve una mayor variabilidad a corto plazo. Al mismo tiempo, el SPEI a 12 meses disminuye hasta -1,5 en el escenario SSP5-8.5 (Figura 8.4), lo que denota una tendencia a la desecación más arraigada a largo plazo. Esta isla, con su fuerte dependencia de las precipitaciones orográficas y de los sistemas naturales de captación de agua (por ejemplo, los bosques de laurisilva), puede enfrentarse a retos adicionales para mantener estos ecosistemas y garantizar la disponibilidad de agua para el consumo humano y agrícola.



Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 8.4. Evolución del indicador SPEI acumulado a 12 meses en la isla de La Gomera, bajo todos los modelos CMIP6 considerados

Tenerife, la isla más grande y poblada del archipiélago, también muestra una tendencia negativa perceptible en el índice SPEI. El indicador a 3 meses muestra una tendencia muy análoga, lo que sugiere una escalada de la variabilidad de la sequía a corto plazo. Las proyecciones indican que el SPEI a 12 meses podría alcanzar -1,3 en el escenario SSP5-8,5 (Figura 8.5), lo que apunta a una tendencia persistente a la sequía a largo plazo. Estas condiciones pueden afectar gravemente a la agricultura, que depende de un régimen pluviométrico estacional, así como a los sistemas de abastecimiento que ya muestran signos de estrés.



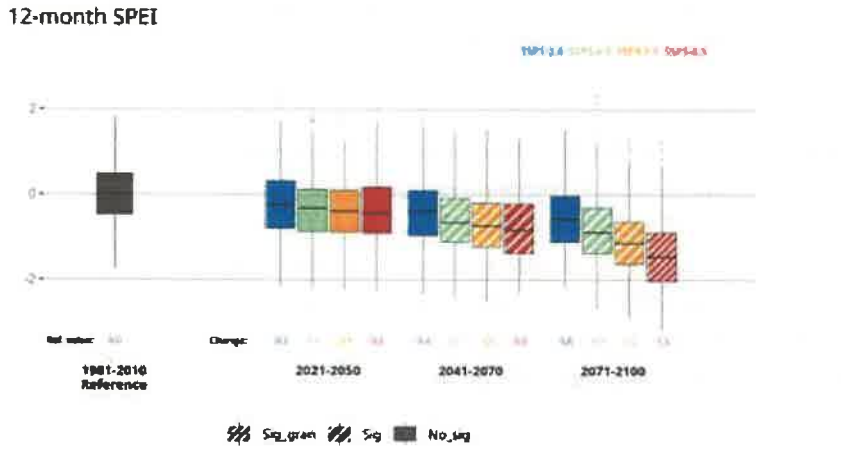
Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 8.5. Evolución del indicador SPEI acumulado a 12 meses en la isla de Tenerife, bajo todos los modelos CMIP6 considerados

2.2. Islas orientales

Las islas orientales, en particular Fuerteventura y Lanzarote, se caracterizan por una mayor vulnerabilidad debido a su baja altitud, a las escasas precipitaciones históricas y a la limitada cubierta vegetal. El impacto del cambio climático sobre el SPEI es considerablemente más grave en estas islas.

En Gran Canaria, el índice SPEI muestra valores preocupantes previstos para la escala de 3 meses, lo que indica una mayor variabilidad de la sequía a corto plazo. El SPEI a 12 meses también muestra reducciones previstas de -0,9 a -1,5 (Figura 8.6), lo que sugiere un empeoramiento de la aridez a largo plazo. Estas tendencias implican un aumento del riesgo de sequías prolongadas, especialmente en la región sureste de la isla, que es una de las zonas más secas del archipiélago.



Fuente: elaboración propia (2025)

Figura 8.6. Evolución del indicador SPEI acumulado a 12 meses en la isla de Gran Canaria, bajo todos los modelos CMIP6 considerados

Las proyecciones para Fuerteventura son especialmente preocupantes. El clima semiárido de la isla y los niveles de precipitación históricamente bajos favorecen el desarrollo de las reducciones más severas en el índice SPEI, con valores proyectados que alcanzan hasta -2,2 en el escenario SSP5-8.5 en un horizonte temporal de 12 meses (Figura 8.7). Este descenso extremo del índice, el único en todo el archipiélago que supera los -2 puntos, implica una intensificación sin precedentes de la aridez, que podría comprometer seriamente la sostenibilidad de sus ya limitados recursos hídricos. Cabe destacar que la precipitación media anual de Fuerteventura apenas supera los 100 mm, lo que convierte estas proyecciones en un reto considerable para la gestión eficaz de los recursos.

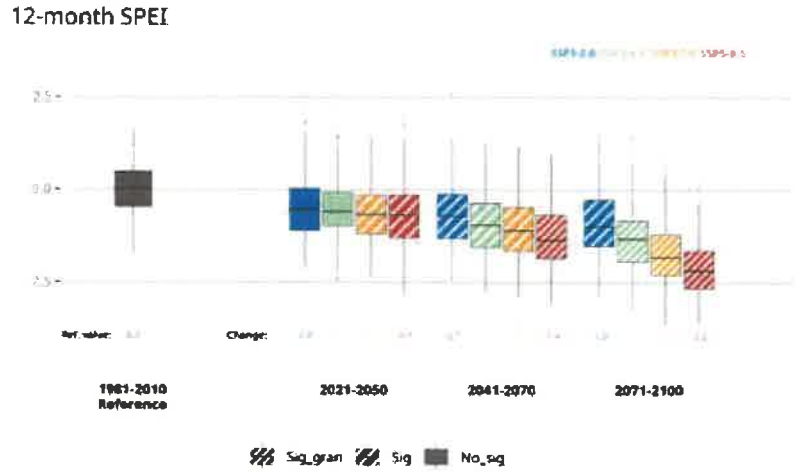


Figura 8.7. Evolución del indicador SPEI acumulado a 12 meses en la isla de Fuerteventura, bajo todos los modelos CMIP6 considerados

Lanzarote, que también se encuentra dentro de una zona de clima árido, muestra una tendencia negativa en el índice SPEI, con descensos previstos que oscilan entre -0,9 y -1,3 en el peor de los casos, tanto para la escala de 3 meses como para la de 12 meses (Figura 8.8). Aunque estos valores son menos extremos que los previstos para Fuerteventura, donde se espera que el SPEI caiga por debajo de -2,0, la tendencia sigue indicando un deterioro significativo del balance hídrico de la isla, especialmente hacia finales del siglo XXI.

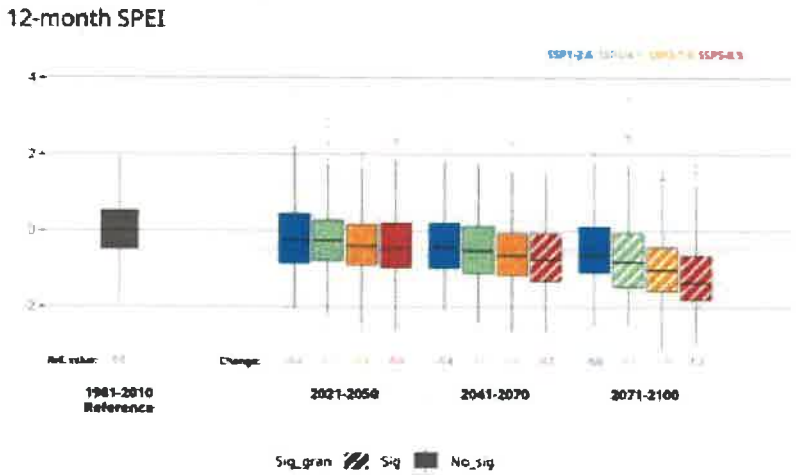


Figura 8.8. Evolución del indicador SPEI acumulado a 12 meses en la isla de Lanzarote, bajo todos los modelos CMIP6 considerados

Los resultados coinciden en líneas generales con las proyecciones climáticas para la región donde se encuentran las Islas Canarias, es decir, la región de la Macaronesia. Tal y como se ha presentado en capítulos anteriores, investigaciones previas estiman un aumento de la temperatura en estas islas para el periodo 2071-2100 entre 0,8-3,0°C por encima de la temperatura media de 1976-2005 (Cropper, 2015). Además, las proyecciones indican una reducción de la precipitación total y cambios en la distribución estacional, lo que supondrá un aumento de la frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos como las sequías (Tung, 2001; Xu et al., 2019).

Respecto a Canarias, los resultados obtenidos muestran tendencias similares a estudios previos. El aumento de la sequía previsto en este archipiélago coincide con la tendencia analizada en otros estudios de aumento generalizado de la temperatura (Cropper, 2013; Pérez et al., 2022), disminución de la precipitación (Bechtel, 2016; Carrillo et al., 2023; Expósito et al., 2015) y aumento de la evapotranspiración (Carrillo et al., 2023), con resultados más severos a medida que avanza el siglo.

Carrillo et al. (2023) concluyen un aumento significativo de la duración y severidad de la sequía para finales del siglo XXI (2070-2099) en las Islas Canarias. Estos resultados también muestran cómo los parámetros de sequía empeoran con la altitud, como indican los mayores valores negativos de SPI y SPEI, alcanzando valores de -3 para el índice SPEI acumulado de 3 meses en agosto en altitudes superiores a 2100m. Sin embargo, es destacable cómo este estudio predice cambios menos severos en las islas orientales de Lanzarote y Fuerteventura; al contrario que los resultados presentados en este capítulo. Esta diferenciación puede deberse a la resolución espacial, ya que los resultados anteriores se calcularon con una resolución del modelo de 3x3 km, frente a la presente investigación que alcanza una resolución de 100x100 m.

La respuesta diferencial entre las dos regiones insulares pone de relieve el papel fundamental de los factores geográficos y climáticos locales, como la altitud, la orientación del relieve o la presencia de vegetación natural, en la modulación de los impactos del cambio climático sobre el balance hídrico. Las islas occidentales, aunque siguen mostrando signos de perturbación ecológica, mantienen cierto grado de resistencia ecológica, lo que podría mitigar los efectos del estrés hídrico. En cambio, las islas orientales, caracterizadas por sus climas naturalmente más secos, poseen una menor capacidad de adaptación ecológica e hidrológica. Las conclusiones de este estudio son coherentes con las de otras investigaciones realizadas sobre el tema de la sequía, que demuestran el impacto del cambio climático a escala mundial y en diversas regiones insulares (Cook et al., 2020; Khalyani et al., 2016; Sipayung et al., 2019; Ziese et al., 2014).

La comparación entre las islas occidentales y orientales del archipiélago canario revela patrones contrastados de vulnerabilidad al cambio climático, con implicaciones directas para la gestión del agua y la planificación adaptativa. Esto subraya la necesidad de desarrollar estrategias de adaptación específicas para cada isla.

Las islas occidentales, caracterizadas por su topografía escarpada, una considerable cobertura vegetal y una mayor precipitación orográfica, poseen una buena capacidad de adaptación frente a las consecuencias de una mayor evapotranspiración potencial. Aunque la tendencia a una mayor aridez es evidente, estas islas poseen mecanismos inherentes que podrían ayudar a mitigar la intensidad de las sequías, como la recarga de acuíferos en zonas boscosas o la retención de humedad en suelos de gran altitud.

Por el contrario, las islas orientales, más llanas y áridas, son estructuralmente más vulnerables. En particular, Fuerteventura y Lanzarote, que ya presentan condiciones de estrés hídrico permanente, pueden ver comprometida su viabilidad en cuanto a recursos naturales si no se aplican estrategias específicas de adaptación. Se espera que aumente la necesidad de tecnologías como la desalinización y la reutilización de aguas residuales. Además, la aplicación de limitaciones estrictas al desarrollo urbano y turístico es imperativa para estas islas, dada la intensificación prevista de la sequía y la escasez estructural de agua existente. Es importante señalar que otros estudios realizados en las Islas Canarias también han abordado fenómenos adicionales que se ha observado que coinciden con los resultados obtenidos (Correa et al., 2024, 2025).

En este contexto, la diferenciación entre regiones insulares no sólo es relevante desde el punto de vista climático, sino también estratégico para la elaboración de políticas públicas. En las islas occidentales, podría darse prioridad a la conservación de los ecosistemas de alta montaña y a la mejora de la eficiencia del uso agrícola del agua. Por el contrario, en las islas orientales se requiere una apuesta decidida por tecnologías hídricas alternativas como la desalinización, así como una planificación más estricta del uso del suelo y del desarrollo urbano para evitar una presión insostenible sobre un recurso tan limitado. Es imperativo que las medidas de adaptación se diseñen a escala local, teniendo en cuenta las condiciones específicas de cada isla, con especial énfasis en aquellas con mayores niveles de riesgo.

3. Referencias bibliográficas

Abatan, A., Gutowski, W., Ammann, C., Kaatz, L., Brown, B., Buja, L., ... & Gotway, J. (2017). Multiyear droughts and pluvials over the upper colorado

river basin and associated circulations. Journal of Hydrometeorology, 18(3), 799-818. https://doi.org/10.1175/jhm-d-16-0125.1

Bechtel, B. (2016). The climate of the Canary Islands by annual cycle parameters. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 41, 243–250. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B8-243-2016

Brunner, M. and Chartier-Rescan, C. (2024). Drought spatial extent and dependence increase during drought propagation from the atmosphere to the hydrosphere. Geophysical Research Letters, 51(6). https://doi.org/10.1029/2023gl107918

Carrillo, J., Hernández-Barrera, S., Expósito, F. J., Díaz, J. P., González, A., & Pérez, J. C. (2023). The uneven impact of climate change on drought with elevation in the Canary Islands. Npj Climate and Atmospheric Science, 6(1). https://doi.org/10.1038/s41612-023-00358-7

Cook, B. I., Mankin, J. S., Marvel, K., Williams, A. P., Smerdon, J. E., & Anchukaitis, K. J. (2020). Twenty-First Century Drought Projections in the CMIP6 Forcing Scenarios. Earth's Future, 8(6). https://doi.org/10.1029/2019EF001461

Correa, J., Dorta, P., López-Díez, A., & Díaz-Pacheco, J. (2024). Analysis of tropical nights in Spain (1970–2023): Minimum temperatures as an indicator of climate change. International Journal of Climatology, 44(9), 3006–3027. https://doi.org/10.1002/joc.8510

Correa, J., López-Díez, A., Dorta, P., & Díaz-Pacheco, J. (2025). Evolution of warm nights in the Canary Islands (1950–2023): evidence for climate change in the Southeastern North Atlantic. Theoretical and Applied Climatology, 156(2), 87. https://doi.org/10.1007/s00704-024-05290-1

Cropper, T. (2013). The weather and climate of Macaronesia: Past, present and future. Weather, 68(11), 300–307. https://doi.org/10.1002/wea.2155

Cropper, T. (2015). Climate change across the Macaronesian Geographical Region, 1850-2100. University of Sheffield.

Expósito, F. J., González, A., Pérez, J. C., Díaz, J. P., & Taima, D. (2015). High-resolution future projections of temperature and precipitation in the Canary Islands. Journal of Climate, 28(19), 7846–7856. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0030.1

Hoffmann, D., Gallant, A., & Arblaster, J. (2020). Uncertainties in drought from index and data selection. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 125(18). https://doi.org/10.1029/2019jd031946

Khalyani, A. H., Gould, W. A., Harmsen, E., Terando, A., Quinones, M., & Collazo, J. A. (2016). Climate Change Implications for Tropical Islands: Interpolating and Interpreting Statistically Downscaled GCM Projections for

Management and Planning. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 55(2), 265–282. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0182.1

Kim, D. and Rhee, J. (2016). A drought index based on actual evapotranspiration from the bouchet hypothesis. Geophysical Research Letters, 43(19). https://doi.org/10.1002/2016gl070302

Kolekar, D., Vanama, V., & Rao, Y. (2018). Satellite based drought assessment over latur, india using soil moisture derived from smos. The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-5, 421-425. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-5-421-2018

Liu, S., Zhang, Y., Cheng, F., Hou, X., & Zhao, S. (2017). Response of grassland degradation to drought at different time-scales in qinghai province: spatio-temporal characteristics, correlation, and implications. Remote Sensing, 9(12), 1329. https://doi.org/10.3390/rs9121329

Ma, Y., Liu, Y., Song, H., Sun, J., Lei, Y., & Wang, Y. (2015). A standardized precipitation evapotranspiration index reconstruction in the taihe mountains using tree-ring widths for the last 283 years. Plos One, 10(7), e0133605. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133605

Oh, B., Son, J., Hwang, S., & Hur, S. (2022). Drought assessment using standardized precipitation evapotranspiration index, standardized precipitation index and soil available water content. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer, 55(4), 497-510. https://doi.org/10.7745/kjssf.2022.55.4.497

Pérez, J. C., Expósito, F. J., González, A., & Díaz, J. P. (2022). Climate projections at a convection-permitting scale of extreme temperature indices for an archipelago with a complex microclimate structure. Weather and Climate Extremes, 36(100459). https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100459

Saengrattanayon, C., Panthong, N., Phunthirawuthi, P., & Kirtsaeng, S. (2019). Analysis of standardized precipitation evapotranspiration index over chiangrai and phayao. Applied Mechanics and Materials, 891, 117-126. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.891.117

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 Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (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

Sipayung, S. B., Susanti, I., Maryadi, E., Nurlatifah, A., Siswanto, B., Nafayest, M., Putri, F. A., & Hermawan, E. (2019). Analysis of Drought Potential in Sumba Island until 2040 Caused by Climate Change. Journal of Physics: Conference Series, 1373(1), 012004. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1373/1/012004

Tung, C.-P. (2001). Climate Change Impacts on Water Resources of the Tsengwen Creek Watershed in Taiwan. Jawra Journal of the American Water Resources Association. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb05483.x

Xu, Zehao, Hu, H., & Zhao, P. (2019). Feasibility of Reverse Osmosis Desalination Brine as Artificial "Dead Sea" Pool Water. Oalib. https://doi.org/10.4236/oalib.1105424

Wang, H., Vicente-Serrano, S., Tao, F., Zhang, X., Wang, P., Zhang, C., ... & Kenawy, A. (2016). Monitoring winter wheat drought threat in northern china using multiple climate-based drought indices and soil moisture during 2000–2013. Agricultural and Forest Meteorology, 228-229, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.06.004

Ziese, M., Schneider, U., Meyer-Christoffer, A., Schamm, K., Vido, J., Finger, P., Bissolli, P., Pietzsch, S., & Becker, A. (2014). The GPCC Drought Index – a new, combined and gridded global drought index. Earth System Science Data, 6(2), 285–295. https://doi.org/10.5194/essd-6-285-2014

Capítulo 9
Transición hídrica y adaptación al cambio climático en Canarias: retos del sistema y respuestas técnicas

Juan Carlos Santamarta Cerezal

1. Introducción: más allá de la escasez, una crisis de modelo

El agua en Canarias ha sido históricamente un recurso limitado. La escasez ha acompañado al desarrollo del archipiélago, condicionando tanto la expansión agrícola como la urbanización y el crecimiento económico (Custodio, Cabrera & Jiménez-Martínez, 2020). En la actualidad, la presión sobre el sistema hídrico ha adquirido una complejidad mayor. A la disponibilidad natural limitada se suman factores que tensan el equilibrio del sistema: la sobreexplotación de acuíferos, un modelo económico intensivo en consumo, infraestructuras fragmentadas y envejecidas, marcos institucionales poco coordinados y un contexto climático que incrementa la incertidumbre estructural (ITC, 2022).

Hablar de crisis hídrica en Canarias suele reducirse a un debate sobre escasez: falta de lluvia, sobreexplotación, dependencia de fuentes costosas. Pero el verdadero problema es más profundo: no estamos solo ante una crisis de cantidad, sino ante una crisis de modelo. El sistema actual —tecnificado, fragmentado y basado en una lógica de sobreproducción— ha llegado a sus límites. Generamos más agua que nunca, pero los acuíferos siguen bajando, los costes aumentan y la inequidad persiste.

Durante décadas, la sociedad canaria ha sido capaz de responder a estas limitaciones mediante una combinación de soluciones técnicas e innovación local. La perforación de galerías en las islas de mayor relieve o la expansión de la desalinización de agua de mar en las islas orientales son ejemplos de adaptación sostenida, basados en decisiones estratégicas e inversión pública y privada.

Aun así, los márgenes de actuación se han reducido. En algunas islas, la demanda de agua se aproxima o supera la capacidad de recarga natural; la calidad del agua subterránea presenta signos de deterioro; y las pérdidas en red, derivadas de una infraestructura obsoleta, siguen representando un porcentaje significativo del volumen distribuido (Observatorio de la Sostenibilidad de Canarias, 2021).

A pesar de este contexto, ciertos enfoques de planificación siguen operando bajo supuestos de abundancia o expansión ilimitada. Se autorizan desarrollos urbanísticos en áreas sin garantía hídrica suficiente, se incrementa la oferta sin ajustar la demanda, y se posponen decisiones estructurales necesarias apelando a su complejidad técnica. Pero no se trata ya solo de un reto técnico. Es, sobre todo, una cuestión de coherencia entre el modelo territorial, la gestión del recurso y la capacidad institucional para anticiparse a escenarios más exigentes (Hernández-Mora, De Stefano & Delgado, 2017).

En este escenario, resulta especialmente preocupante la proliferación de discursos sin base científica que confunden a la opinión pública y erosionan la confianza en la gestión del agua. Algunos actores, ajenos al ámbito académico y técnico, difunden afirmaciones infundadas sobre la "abundancia" de agua en las islas, o promueven explicaciones simplistas sobre la gestión y planificación hídrica, con el único objetivo de obtener visibilidad mediática. Estos discursos —no solo carecen de fundamento en la evidencia empírica—, sino que desvían el debate hacia polémicas artificiales, alimentadas más por el ego que por un compromiso real con la sostenibilidad. Su impacto no es menor: generan ruido, polarización y resistencia social frente a medidas necesarias y técnicamente justificadas.

La situación actual no debe interpretarse como una crisis puntual, sino como el resultado de tensiones acumuladas que afectan al equilibrio ecológico, a la distribución territorial del recurso, y a la sostenibilidad económica del sistema. Estas tensiones tienen implicaciones concretas: para la viabilidad de los sistemas agrarios, para la calidad de vida en entornos urbanos y rurales, y para el coste energético de la provisión del agua.

Este capítulo parte de este diagnóstico para examinar los principales desafíos estructurales a los que se enfrenta la gestión del agua en Canarias. El propósito no es reforzar una visión alarmista, sino contribuir a una reflexión informada sobre cómo avanzar hacia una transición hídrica que combine eficacia técnica, responsabilidad pública y equidad territorial.

2. Dependencia del agua subterránea y su sobreexplotación

Canarias ha vivido de sus acuíferos durante siglos. Pero la dependencia casi absoluta del agua subterránea se ha convertido en su mayor debilidad. En algunas zonas, nivel piezométrico ha descendido. Muchas galerías han perdido más del 80 % de su caudal original, mientras la intrusión marina aumenta en pozos costeros. Aun así, el sistema sigue extrayendo como si el agua fuera inagotable. El agua subterránea constituye, aún hoy, el pilar del abastecimiento hídrico en Ca-

narias. En muchas islas —especialmente en las occidentales— representa más del 50 % del volumen total de recursos explotados (Custodio et al., 2020).

Esta dependencia estructural responde a varios factores: la escasez de escorrentía superficial, la alta capacidad de infiltración de los materiales volcánicos y la existencia de estructuras geológicas favorables al almacenamiento, como coladas permeables, diques y paleosuelos (almagres en el argot canario).

El uso intensivo y continuado del recurso ha alcanzado un punto crítico. En múltiples zonas del archipiélago, las extracciones han superado de forma sostenida la capacidad de la recarga natural— la cual está estimada o calculada con una incertidumbre importante—.

La evidencia es clara: numerosos registros piezométricos muestran descensos continuados desde hace décadas. En la isla de Tenerife, por ejemplo, se han documentado descensos en un rango de 650-700 metros (Braojos, 2023). Este agotamiento relativo ha sido particularmente severo en zonas costeras, donde la intrusión marina ha degradado la calidad del agua hasta hacer inviable su explotación o esta se hace mediante instalaciones que desalinizan el agua, incrementando el problema.

La solución a este problema es muy compleja, según el proyecto ARSINOE (Santamarta, 2021), se ha dado la circunstancia que pozos afectados de intrusión marina monitorizados en la isla de El Hierro, que han cesado su operación, no han recuperado la calidad original de sus aguas.

El deterioro no es solo cuantitativo, sino también cualitativo. En muchas captaciones se detectan concentraciones elevadas de flúor, nitratos, cloruros, sodio o carbonatos, que obligan a aplicar tratamientos correctores, mezclar caudales o, directamente, abandonar puntos de extracción (Observatorio de la Sostenibilidad de Canarias, 2021).

Algunas aguas obtenidas a gran profundidad presentan una mineralización tan elevada que su tratamiento resulta técnicamente complejo y económicamente inviable para usos habituales. Un claro ejemplo son las restricciones de consumo de agua en el municipio de La Laguna, por las elevadas concentraciones de flúor en el agua durante estos últimos años.

Además, el modelo extractivo vigente —basado en más de 5.000 captaciones dispersas entre pozos, sondeos y galerías— dificulta el control efectivo del recurso. Aunque la normativa exige la inscripción de estas infraestructuras en los registros públicos y el control de caudales y calidad, la realidad es que el seguimiento piezométrico, hidroquímico y volumétrico sigue siendo insuficiente— o no existe directamente, o no tiene control—. Persisten numerosas captaciones sin caudalímetros instalados, sin análisis actualizados y sin integración en sistemas de información hidrológica (Hernández-Mora et al., 2017).

Aunque se han logrado avances notables en desalinización, otras soluciones complementarias siguen infrautilizadas. La regeneración de aguas tiene aún un papel marginal, la recarga artificial apenas se ha desarrollado, —aunque existen iniciativas como el proyecto NATALIE en Fuerteventura— y las mejoras de eficiencia en redes de distribución han sido parciales. En este contexto, la sobreexplotación de acuíferos continúa siendo, de facto, la estrategia dominante para atender incrementos de demanda.

Un factor adicional que agrava la situación, y esto es un punto clave, es la indefinición institucional ante el proceso de reversión de la gestión del agua subterránea previsto para 2040. ¿Y qué significa esto? según la normativa vigente, a partir de esa fecha las captaciones pasarán al régimen de dominio público hidráulico, lo que exigirá que las administraciones asuman su titularidad, explotación y mantenimiento. Aun así, a día de hoy no se dispone de un censo completo y operativo de todas las infraestructuras, ni existe un marco normativo actualizado que regule de forma precisa esa transición, ni un plan económico viable que permita su gestión pública con garantías.

El reto, por tanto, no se limita a reducir la presión sobre los acuíferos. Requiere una redefinición estructural del papel del agua subterránea en el modelo hídrico insular.

3. Desigualdad en el consumo y presión del modelo turístico

Uno de los aspectos más sensibles del sistema hídrico en Canarias es la marcada asimetría en el uso del agua entre sectores económicos. Esta desigualdad no se expresa solo en términos de volumen, sino también en la distribución de responsabilidades. Mientras la agricultura afronta restricciones crecientes y el consumo doméstico tiende a estabilizarse, el sector turístico opera con dotaciones claramente superiores y escasa regulación efectiva. Esta desigualdad no es accidental: es estructural. Las islas que más turistas reciben son también las que más recursos hidráulicos importan, mientras las zonas menos rentables soportan los déficits del sistema.

El análisis realizado por Ruiz de la Rosa et al. (2019), en la que participó el autor del presente capítulo, sobre la producción y consumo de agua en Tenerife muestra que el turismo concentra una parte significativa de la demanda total en determinadas áreas del sur de la isla, con consumos medios por turista de entre 300 y 500 litros diarios, más del doble del consumo residencial habitual, que ronda los 140 litros por habitante y día. Esta diferencia no responde únicamente a un mayor número de usuarios, sino a un modelo de servicio basado en la disponibilidad constante de agua para usos recreativos y estéticos: piscinas, jardines, spas y fuentes ornamentales.



Fuente: Juan C. Santamarta (2023)

Figura 9.1. Infraestructura turística en la isla de El Hierro

El problema no es solo cuantitativo. Tiene también una dimensión simbólica y social. Mientras a la población se le solicita reducir su consumo y adoptar medidas de ahorro, muchos establecimientos turísticos mantienen infraestructuras hidráulicas que no han sido diseñadas con criterios de eficiencia y otras se están quedando obsoletas.

Tal como documenta Ruiz de la Rosa et al. (2019), en numerosos hoteles no existen sistemas de reutilización de aguas grises, ni dispositivos de control por áreas funcionales, ni se emplean especies vegetales adaptadas al clima insular. Las buenas prácticas, cuando existen, son voluntarias y ligadas a sellos de calidad ambiental no obligatorios.

La situación se agrava por la localización de buena parte de la infraestructura turística en zonas con alta dependencia de la desalinización de agua de mar, —como el sur de Gran Canaria, Fuerteventura o Lanzarote. — Esto eleva el coste energético del abastecimiento, incrementa la vulnerabilidad del sistema y amplifica la huella ecológica del modelo turístico. Sin una planificación hidrológica integrada, esta presión genera una triple tensión: sobre los acuíferos insulares, sobre las redes de distribución y sobre la percepción ciudadana de justicia en el

reparto del recurso hídrico. Esto último lleva a la ciudadanía a las protestas, como las llevadas a cabo estos últimos años en Fuerteventura, donde los vecinos observaban que los hoteles disponían de agua —posiblemente por sus propias instalaciones autónomas de desalinización— y en sus casas no llegaba. En parte por una red deficiente y obsoleta, que está diseñada y construida para abastecer a una menor población y que no se ha renovado.

Además, como señalan estudios sobre gobernanza hídrica (Hernández-Mora et al., 2017), la ausencia de límites claros en el crecimiento turístico y la aprobación de proyectos en zonas con déficit hídrico transmiten el mensaje de que el agua no constituye una restricción real, sino un obstáculo técnico que puede resolverse con suficiente inversión. Esta percepción debilita la credibilidad institucional y bloquea debates urgentes sobre el modelo de desarrollo.

En un territorio insular, con una capacidad de recarga limitada y una creciente exposición a riesgos climáticos, los límites del agua son estructurales. Si no se corrige la asimetría actual, el conflicto entre sectores —turismo, agricultura, consumo urbano— se intensificará, comprometiendo la sostenibilidad del sistema en su conjunto.

El reto no consiste solo en hacer más eficiente el uso turístico del agua. Requiere definir colectivamente qué modelo de desarrollo es compatible con la realidad hídrica del archipiélago. Y para ello se necesitan datos, participación informada y coherencia entre planificación territorial e hidrológica. No decisiones reactivas ni estrategias guiadas por intereses de corto plazo.

4. Infraestructuras obsoletas y pérdidas estructurales

El ciclo del agua en Canarias presenta una paradoja estructural difícil de ignorar: mientras se han introducido tecnologías avanzadas en las fases de captación, como la desalinización de agua de mar o la telegestión de pozos, gran parte de las infraestructuras de transporte y distribución siguen siendo frágiles, envejecidas y con bajos niveles de eficiencia operativa.

El problema no es menor ni puntual. Según datos del Instituto Tecnológico de Canarias (ITC, 2022), las pérdidas en las redes de distribución superan el 30 % del agua suministrada en varias islas, con municipios que reportan fugas de hasta el 50 % del caudal conducido. Estas pérdidas afectan tanto a redes urbanas como a sistemas de distribución agrícola. La magnitud del problema compromete la sostenibilidad del sistema, incrementa los costes operativos y reduce la disponibilidad real del recurso, especialmente en contextos de estrés hídrico.

No obstante, vamos a matizar estas cifras. Generalmente, valores de pérdidas de más del 50% ocurren en municipios pequeños y con gestión directa. Grandes núcleos poblacionales, como La Laguna o Santa Cruz de Tenerife, tienen pérdidas del 16% y el 8,9% respectivamente, por lo que, en el cómputo global, cuantitativamente, las pérdidas municipales son reducidas. Eso no quiere decir que sea una cuestión menor que haya que permitir en un archipiélago con escasez del recurso. Por otro lado, y no menos importante, hay que indicar que en las pérdidas no es el único parámetro que conforma el "agua no registrada" — se debe incluir los robos de agua, errores de medición, etc...— por lo tanto, es un concepto más amplio.

Las causas de esas pérdidas son diversas y acumulativas: redes con más de cuatro décadas de antigüedad, materiales degradados por el uso continuo y la salinidad del agua, inversiones en mantenimiento claramente insuficientes, escasez de personal técnico especializado y la casi total ausencia de sistemas de control en tiempo real. Muchas redes municipales carecen de sectorización hidráulica, no disponen de caudalímetros intermedios ni sensores de presión, lo que impide localizar fugas con precisión. Como resultado, el sistema pierde agua sin que se pueda determinar con exactitud ni dónde, ni cuándo, ni en qué volumen (Observatorio de la Sostenibilidad de Canarias, 2021).



Fuente: Juan C. Santamarta (2018)

Figura 9.2. Conducción en la isla de La Gomera

Estas deficiencias técnicas tienen implicaciones directas sobre el dimensionamiento del sistema. La necesidad de compensar las pérdidas obliga a sobredimensionar captaciones, a mantener operativas plantas desalinizadoras por encima de su necesidad real, y a consumir más energía por metro cúbico de agua útil.

Es decir, se incrementa la producción para abastecer un sistema incapaz de conservar eficientemente lo que transporta. En algunos casos obliga a entidades a comprar más agua de la que necesitan, con el fin de compensar esa agua "no registrada" que hemos comentado anteriormente.

Esta lógica —más agua, más inversión, sin eficiencia— perpetúa el deterioro. En muchos casos, los mapas de fugas no existen y los contadores son analógicos. Renovar una red de agua no da votos. Y por eso, se pospone año tras año, década tras década.

En las zonas rurales, el problema se ve agravado por la dispersión geográfica del territorio, la limitada capacidad económica de los ayuntamientos pequeños y el déficit histórico de inversión en redes agrarias. En muchas áreas, las infraestructuras agrícolas presentan aún canales abiertos, tuberías no impermeabilizadas y sistemas de riego obsoletos, alejados de los estándares de eficiencia actuales. Pese al esfuerzo de las comunidades de agua y la existencia de conocimiento local acumulado, la falta de recursos impide acometer renovaciones a la escala necesaria.

Otro aspecto clave es la fragmentación del sistema hidráulico. En muchas islas, las redes de abastecimiento urbano, riego y saneamiento operan como sistemas autónomos, sin interconexiones ni sinergias.

Esta desconexión funcional impide, por ejemplo, el uso sistemático de agua regenerada en el riego agrícola o la recarga de acuíferos con excedentes depurados. La falta de visión integral limita así el aprovechamiento eficiente del recurso disponible y retrasa la implementación de estrategias circulares.

Todo esto ocurre en un contexto donde las inversiones en infraestructuras hídricas no siempre ocupan una posición prioritaria. Mientras se destinan recursos significativos a nuevos desarrollos urbanísticos o turísticos, muchas redes hidráulicas —tanto urbanas como rurales— continúan operando en condiciones precarias.

La cuestión no es únicamente técnica; es también institucional y política: refleja la falta de planificación estructural a largo plazo y la debilidad de los mecanismos de gobernanza sectorial.

La modernización de las infraestructuras hídricas ya no puede considerarse un objetivo accesorio. Es una condición necesaria para la viabilidad del sistema. Sin redes fiables, digitalizadas, monitorizadas y bien mantenidas, cualquier estrategia de eficiencia, reutilización o ahorro se ve severamente limitada por las pérdidas estructurales.

En un territorio insular donde cada metro cúbico cuenta, dejar que el agua se pierda sin control es una renuncia innecesaria a un derecho básico y a una oportunidad de sostenibilidad. "Siempre es más barato ahorrar o no perder ese metro cúbico de agua en el transporte, que producirlo en una planta desalinizadora de agua de mar".

5. Reutilización, desalinización de agua de mar y límites de la oferta no convencional

En el contexto canario, las fuentes no convencionales —la desalinización de agua marina y la reutilización de aguas depuradas— se han convertido en pilares esenciales para garantizar el abastecimiento hídrico en muchas islas, especialmente en aquellas con escasa recarga natural o alta presión turística o agrícola. Canarias no sobrevive gracias a la lluvia, sino gracias a la tecnología. Sin embargo, su expansión presenta limitaciones estructurales cuando se analizan desde el prisma de la sostenibilidad ambiental y energética.

La desalinización representa ya más del 40 % del agua producida en Canarias y llega a cubrir la totalidad del consumo urbano en municipios como Yaiza (Lanzarote) o Pájara (Fuerteventura). Si bien ha sido determinante para viabilizar el modelo económico actual, también supone el mayor coste energético y la mayor huella de carbono de todo el sistema hídrico insular.

En efecto, según el estudio de Cruz-Pérez & Santamarta (2022), las plantas desalinizadoras presentan huellas de carbono normalizadas que oscilan entre 0,5 y 5,15 $kgCO_2eq/m^3$, dependiendo de la eficiencia del sistema, el volumen tratado y el tipo de energía contratadas. Esta diferencia se debe al consumo energético intensivo de los procesos de ósmosis inversa y al impacto ambiental asociado a la gestión de salmueras y al uso de materiales y reactivos químicos. Por tanto, el incremento de la desalinización debe ir necesariamente acompañado de mejoras en eficiencia energética, integración de fuentes renovables y planificación estratégica del mix hídrico.

Un ejemplo son las Islas Baleares, donde los autores de este libro tuvieron oportunidad de asesorar en el plan estratégico de transición energética de la Agencia Balear del Agua y Calidad Ambiental (ABAQUA), donde el principal objetivo del plan fue incrementar la eficiencia energética en las instalaciones de abastecimiento de aguas y en las plantas desalinizadoras de agua de mar, con el fin de reducir el consumo para el periodo 2022-26. El documento estableció las estrategias para que ABAQUA redujera un 24% el consumo de energía para el año 2026, lo que es equivalente a ahorrar 28 millones de kilovatios o evitar la emisión de 13

millones de toneladas de CO_2 anuales (Universidad de La Laguna, 2021; Cruz-Pérez et al. 2021).

Las galerías de agua, que aprovechan la gravedad para la extracción, muestran huellas de carbono prácticamente nulas: entre 0,0 y 0,003 $kgCO_2eq/m^3$—hay que matizar que esto es en la bocamina, en la entrada de la explotación—. Pero esto puede dar una percepción falsa de nulo consumo energético, cuando no es así.

Muchas de las galerías, por ejemplo, en la isla de Tenerife, han quedado por debajo de la cota de los canales de distribución de agua principales. Por lo tanto, desde la bocamina a la cota de los canales hay que bombear y esto implica un consumo de energía importante. Por otro lado, existen otras galerías que están por encima de esa cota, por ejemplo, en Las Cañadas, pero con problemas de calidad de agua, a las que hay que hacerlas un postratamiento, que al igual que el caso anterior, consume, energía. En definitiva, no todo es blanco o negro, hay matices que hay que tener en cuenta en la gestión.

Los pozos se sitúan en una posición intermedia: su impacto varía considerablemente en función de la profundidad y del sistema de bombeo, con valores entre 0,2 y 13,89 $kgCO_2eq/m^3$.

La reutilización de aguas depuradas, a pesar de su potencial estratégico, continúa infrautilizada. Menos del 10 % del agua tratada se emplea en usos secundarios, como el riego agrícola, a pesar de que la normativa europea (Reglamento UE 2020/741) promueve su expansión.

La falta de redes separativas, la desconfianza del sector agrícola y la ausencia de incentivos claros limitan su implantación. Estudios como el de Cruz Pérez y Santamarta (2021) señalan que, en condiciones optimizadas, el agua regenerada puede tener una huella ecológica moderada, en torno a 2,3 $kgCO_2eq/m^3$, y ser ambientalmente más viable que continuar sobreexplotando acuíferos profundos.

Estos datos confirman que no todas las fuentes de agua son equivalentes desde el punto de vista del impacto ambiental y consumo energético. El modelo actual, centrado en ampliar la oferta sin corregir las ineficiencias del sistema ni reducir la demanda estructural, genera una huella ecológica acumulativa que compromete la neutralidad climática del archipiélago.

El problema de fondo sigue siendo el enfoque centrado en la oferta. Gran parte de la política hídrica regional ha priorizado producir más agua —ya sea desde el subsuelo o desde el mar— sin reducir suficientemente las pérdidas estructurales ni ajustar la demanda a las condiciones reales del territorio (Ruiz de la Rosa et al., 2019). Este modelo, además de costoso, es ambientalmente regresivo y socialmente ineficaz.

Tanto la desalinización como la reutilización deben entenderse como herramientas dentro de una estrategia integral de gestión hídrica, no como sustitutos ilimita-

dos del agua natural. Su eficacia depende de una gobernanza coherente, de la digitalización de redes, de la planificación territorial y del uso responsable del recurso.

La disponibilidad de agua no debería medirse solo en metros cúbicos, sino en términos de coste ambiental, energético y social. Incorporar el concepto de huella ecológica del agua —como han propuesto Cruz Pérez y Santamarta (2021)— permite visibilizar los impactos diferenciados de cada tipo de recurso y orientar las decisiones públicas hacia un uso racional y sostenible, especialmente en territorios insulares sometidos a presión climática y urbanística.

Frente a esta realidad, se impone un replanteamiento del binomio agua-energía. Tanto la desalinización como la reutilización deben formar parte de una estrategia hídrica integrada, que contemple la eficiencia, la equidad, la reducción de emisiones y la resiliencia climática como criterios centrales.

La planificación debe incorporar la huella de carbono como indicador de referencia, no solo para comparar tecnologías, sino para orientar inversiones, fijar prioridades territoriales y garantizar la sostenibilidad del sistema en su conjunto.

5. La gobernanza del agua en Canarias: desafíos estructurales y propuestas de mejora

Más allá del marco institucional formal, la gobernanza del agua en Canarias se ha construido también desde la práctica técnica acumulada por quienes han operado sobre el terreno. La experiencia de profesionales implicados en la gestión hidráulica insular —especialmente en islas como El Hierro, Gran Canaria o Tenerife— ha sido determinante para comprender las limitaciones reales del medio y diseñar soluciones viables.

Esta dimensión operativa, muchas veces ignorada en los enfoques normativos, ha permitido ajustar modelos, anticipar problemas y validar medidas que, en contextos volcánicos, no siempre responden a los esquemas continentales (Santamarta, 2010).

La gobernanza, en este sentido, no puede entenderse solo como un sistema jurídico o administrativo: es también resultado de decisiones técnicas acumuladas, de infraestructuras adaptadas a la singularidad del terreno y de aprendizajes generados en condiciones de incertidumbre estructural.

En primer lugar, se destaca la singularidad geológica e hidrológica del sistema insular, marcada por la ausencia de aguas superficiales permanentes, una alta permeabilidad y la necesidad de captar agua dulce en zonas de interfaz con el mar.

Este condicionante geológico motivó la construcción de soluciones como las galerías de agua convencionales, de nacientes o las galerías en trancada (perfora-

ción en pendiente hasta alcanzar el nivel del mar), captaciones profundas o bombeos escalonados.

Durante las décadas de los años 70 y 80, la Mancomunidad de Cabildos asumió un papel decisivo en la construcción de infraestructuras hidráulicas —sin planificación hidrológica coordinada— que sirvieron, sin embargo, como base para desarrollar un conocimiento empírico del medio —se pasó de un método de ensayo y error a la construcción con fundamento técnico y estudios previos—.

A partir de los años 80, este conocimiento comenzó a traducirse en herramientas de modelización, como el modelo MAC-21 en Tenerife, que incorporó variables geológicas clave como diques, litologías o deslizamientos, revelando procesos de sobreexplotación crónica y gran inercia hidrodinámica.

Actualmente ya contamos con herramientas más novedosas como los softwares MODFLOW o Feflow, que se están aplicado en proyectos de investigación europeos que actualmente se desarrollan en el archipiélago como ARSINOE, NATALIE o GENESIS.

En paralelo, se ha consolidado una planificación hídrica insular descentralizada con instituciones como los Consejos Insulares de Aguas, creados en 1990 sobre la base de tradiciones normativas diferenciadas que datan de principios del siglo XX (Real Orden de 1924).

Esta arquitectura institucional permitió avanzar hacia una gestión integrada del ciclo del agua, como muestra el caso del Plan de Balsas de Tenerife (1980) o la incorporación temprana de aguas regeneradas al riego a partir de 1984.

En la actualidad, el modelo hídrico canario descansa sobre una infraestructura estratégica y tecnológicamente avanzada, con desalinización de agua de mar, depuración y reutilización (regeneración de aguas) plenamente integradas. Se han incorporado tecnologías como electrodiálisis reversible[1] (EDR) y biorreactores de membrana[2] (MBR), especialmente para tratar aguas con alto contenido en flúor o sales sódicas, frecuentes en las galerías del acuífero de Las Cañadas, en la isla de Tenerife. Una instalación destacada en Canarias que cuenta con tratamiento terciario y reutiliza agua es la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Adeje-Arona, en el sur de Tenerife o la EDAR de Valle Guerra que cuenta con tratamiento terciario y destina el agua regenerada principalmente a la agricultura.

---

[1] La electrodiálisis reversible (EDR) es una técnica para desalinizar agua, especialmente útil cuando esta contiene sales disueltas en baja o media concentración, como en aguas salobres o regeneradas.

[2] Un biorreactor de membrana (MBR) es una tecnología avanzada para el tratamiento de aguas residuales que combina procesos biológicos con filtración mediante membranas.

Aun así, los retos persisten. La presión turística en cotas bajas, el desplazamiento funcional del sector agrícola, y la fragmentación del modelo de mercado de aguas privadas, exigen una reconfiguración de la gobernanza. Por ejemplo, la comarcalización hidráulica de Tenerife en ocho grandes zonas de gestión, o la creación de sistemas de mezcla y regulación según calidad del agua, ilustran soluciones recientes que aún requieren consolidación.

El conocimiento técnico acumulado corre el riesgo de perderse con el relevo generacional en las administraciones públicas, y las nuevas demandas (resiliencia climática, gestión de tormentas, digitalización) no siempre encuentran una institucionalidad ágil.

Las resistencias políticas o sociales a la reutilización del agua demuestran que la toma de decisiones aún está condicionada por factores ajenos al rigor técnico.

Actualmente la gobernanza del agua en Canarias se encuentra en una encrucijada. A medio camino entre una arquitectura legal fragmentada y una gestión condicionada por la insularidad, los desafíos que enfrenta el archipiélago obligan a una revisión crítica del modelo vigente.

La iniciativa del Libro Verde de la Gobernanza del Agua[3], impulsada por el Ministerio para la Transición Ecológica, ha servido como catalizador de ese debate, al identificar disfunciones sistémicas y generar propuestas desde el propio territorio (Maestu, 2019a; 2019b).

Uno de los ejes más recurrentes en los foros celebrados durante el año 2019 en Santa Cruz de Tenerife y Las Palmas de Gran Canaria fue la necesidad de reformar la legislación vigente. La superposición de normativas (estatales, autonómicas, ambientales, agrícolas y urbanísticas) dificulta la gestión integrada del ciclo del agua.

Se ha propuesto una estrategia de armonización legislativa, con revisión de la Ley de Aguas de Canarias, clarificación competencial y creación de mecanismos estables de coordinación normativa entre administraciones (Gobierno de Canarias & MITECO, 2019a). La propuesta apunta a una simplificación regulatoria que permita avanzar en la transición hidrológica sin los bloqueos actuales.

También se evidenció la urgencia de reformar el régimen concesional. Dado el reducido tamaño de las explotaciones y la escasez de recursos hídricos, se propuso que las concesiones se otorguen a comunidades de usuarios, como las comunidades de regantes, que han demostrado mayor eficiencia, transparencia y capacidad de gestión colectiva (Gobierno de Canarias & MITECO, 2019a). Esta medida

[3] El Libro Verde de la Gobernanza del Agua es un documento elaborado por la Comisión Europea en el año 2001, cuyo objetivo principal fue abrir un debate público sobre cómo mejorar la gobernanza del agua en la Unión Europea, en un contexto de creciente presión sobre los recursos hídricos y tras la aprobación de la Directiva Marco del Agua (DMA) en 2000.

reforzaría el modelo participativo y adaptado a la escala local, esencial en territorios insulares con elevada dispersión administrativa.

Otro aspecto crítico es el fortalecimiento institucional. En Canarias persisten déficits estructurales en las administraciones hidráulicas: escasez de personal técnico, lentitud en los procedimientos y rigidez normativa.

La creación de equipos multidisciplinares y el impulso a la administración electrónica y la gestión por objetivos fueron señalados como medidas prioritarias (Gobierno de Canarias & MITECO, 2019b).

La falta de conexión entre las competencias formalmente atribuidas y las capacidades reales de implementación sigue siendo un cuello de botella. En este sentido, se planteó la revisión de la ley de contratación pública para facilitar la colaboración con universidades y centros de conocimiento.

En materia de fiscalidad del agua, se detectó una aplicación deficiente del principio de recuperación de costes. La propuesta más desarrollada consistió en diseñar tarifas finalistas que incentiven una gestión eficiente y transparente del ciclo integral.

Se planteó también la exención fiscal para el agua de riego, considerando sus costes extraordinariamente altos en las islas (Gobierno de Canarias & MITECO, 2019a). Esta política, si bien discutida, busca aliviar la carga sobre el sector agrícola sin perder de vista los principios de equidad y sostenibilidad. Desde mi experiencia en la gestión de recursos hídricos en entornos insulares, he comprobado cómo estas exenciones pueden marcar la diferencia entre la viabilidad o el abandono de muchas explotaciones agrícolas, especialmente en medianías con costes energéticos elevados.

La financiación del sistema hídrico fue otro de los ejes de preocupación. Frente a una red de infraestructuras envejecida y con pérdidas significativas, con los matices que indicamos anteriormente, se propuso establecer líneas de subvención específicas para la modernización del sector y la mejora de la eficiencia (Gobierno de Canarias & MITECO, 2019a). En este punto, se valoró positivamente la creación de un organismo autonómico similar a SEIASA[4] que centralice las inversiones estratégicas y actúe como interlocutor ante fondos europeos.

Por último, se abordó la problemática específica de los pequeños municipios, que carecen de medios humanos y financieros para asumir con solvencia la gestión del ciclo urbano del agua. Se planteó la opción de transferir competencias a los cabildos o de crear mancomunidades funcionales, así como establecer indicadores

[4] SEIASA es la sigla de la Sociedad Mercantil Estatal de Infraestructuras Agrarias, S.A., una empresa pública del Gobierno de España adscrita al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA).

de eficiencia y sostenibilidad que permitan evaluar y redimensionar los servicios (Gobierno de Canarias & MITECO, 2019b).

Este enfoque reconoce que en el contexto canario no basta con trasladar modelos continentales: es imprescindible diseñar soluciones adaptadas a la escala local y al frágil equilibrio hídrico de cada isla.

En suma, la gobernanza del agua en Canarias requiere una transformación profunda que supere la actual dispersión normativa, refuerce la capacidad institucional, promueva mecanismos de corresponsabilidad y garantice una financiación estable y finalista. Las propuestas emanadas del Libro Verde no constituyen una hoja de ruta cerrada, pero sí delinean los contornos de un nuevo contrato hídrico entre instituciones, usuarios y territorio. Para que este proceso sea efectivo, debe sostenerse sobre la transparencia, la planificación integrada y la voluntad política de enfrentar los retos sin más dilaciones. A lo largo de mi trayectoria profesional, he constatado que, sin voluntad política real y participación activa de los usuarios, cualquier intento de cambio en la gobernanza del agua queda en papel mojado.

6. Fragmentación institucional y déficit de gobernanza

Uno de los obstáculos más persistentes para la sostenibilidad hídrica en Canarias no reside únicamente en la escasez física del recurso, sino en la fragmentación institucional del sistema de gestión.

La arquitectura administrativa del agua en el archipiélago se encuentra distribuida entre múltiples actores con competencias solapadas y capacidades técnicas y financieras desiguales. Esta configuración ha dificultado históricamente la planificación integrada, ha ralentizado la toma de decisiones y ha generado incoherencias en la aplicación de políticas públicas.

La gestión del agua en Canarias implica a una diversidad de instituciones: los Consejos Insulares de Aguas como autoridades hidrográficas de cada isla, los cabildos y ayuntamientos con competencias operativas, y otras entidades como consorcios, comunidades de usuarios, empresas concesionarias y administraciones autonómicas y estatales. Esta multiplicidad, aunque justificada por la naturaleza insular del territorio, carece de mecanismos de coordinación eficaces. Como advierten Hernández-Mora et al. (2017), una gobernanza eficaz no depende del número de actores involucrados, sino de la claridad en sus funciones, la coherencia entre escalas y la transparencia en la toma de decisiones.

En la práctica, estas condiciones no siempre se cumplen. Existen consejos insulares que no disponen de medios técnicos suficientes para elaborar o revisar sus

planes hidrológicos, municipios sin capacidad para digitalizar redes, o cabildos que desarrollan infraestructuras sin integrarlas en la planificación sectorial.

La información clave sobre captaciones, consumos, calidad del agua o balances hídricos se encuentra en muchos casos dispersa, desactualizada o no es accesible ni para otras administraciones ni para la ciudadanía (ITC, 2022; Observatorio de la Sostenibilidad de Canarias, 2021).

La falta de interoperabilidad de datos se traduce en una debilidad estructural: no existe un banco de datos unificado, ni indicadores comunes de seguimiento, ni una estrategia regional para la priorización de inversiones.

Cada isla redacta su propio plan hidrológico con enfoques metodológicos, capacidades institucionales y niveles de actualización distintos, lo que impide abordar el agua como un sistema regional. Incluso el marco de la Directiva Marco del Agua (DMA), que exige objetivos ambientales comunes, se aplica de forma desigual entre demarcaciones, dificultando el cumplimiento de los plazos y metas establecidos por la UE.

A ello se suma un problema de capacidad administrativa. No todos los consejos insulares de aguas disponen del personal técnico, jurídico y administrativo necesario para asumir sus competencias con solvencia. Algunos dependen de asistencia técnica externa, otros acumulan retrasos significativos en sus instrumentos de planificación, y la alta rotación del personal técnico genera discontinuidades que afectan directamente a la calidad y coherencia de las decisiones.

Otro elemento crítico es la desconexión entre políticas sectoriales. La gestión del agua en Canarias no está suficientemente integrada con la política agraria ni forestal, la planificación urbanística ni la conservación ambiental.

Esta falta de coordinación genera solapamientos de competencias, vacíos de responsabilidad y decisiones contradictorias, como la aprobación de nuevos desarrollos urbanos en zonas con disponibilidad hídrica limitada, sin una evaluación integrada de la demanda futura.

Por otra parte, la participación pública en los procesos de planificación sigue siendo insuficiente. Aunque la normativa —tanto europea como nacional— reconoce el derecho a la información, consulta y participación en la planificación hidrológica, en la práctica estos procesos son meramente formales.

La falta de espacios estables de interlocución con comunidades de regantes, asociaciones de consumidores, entidades ambientales o profesionales del sector limita la legitimidad de las decisiones adoptadas y dificulta la construcción de consensos duraderos (Del Moral & Hernández-Mora, 2015).

No se trata de recentralizar la gestión ni de desconocer las particularidades insulares, sino de corregir una fragmentación que no es funcional. Fortalecer la coordinación interadministrativa, profesionalizar las estructuras técnicas, estable-

cer sistemas compartidos de información, y construir una visión estratégica del ciclo del agua en Canarias son medidas urgentes y necesarias.

En ausencia de una gobernanza renovada, técnicamente solvente y socialmente inclusiva, cualquier avance tecnológico o inversión estructural seguirá teniendo un impacto limitado o insostenible.

7. Laboratorios de innovación territorial: hacia una gobernanza hídrica participativa

Los Living Labs[5] constituyen una herramienta estratégica para ensayar, de forma colaborativa, nuevas formas de gobernanza del agua en territorios complejos como las Islas Canarias.

¿Qué pasa cuando científicos, agricultores y técnicos públicos se sientan juntos a rediseñar el agua de su territorio? Eso es un Living Lab. Y en Canarias, está funcionando.

Su aplicación ha demostrado que es posible articular procesos de cocreación entre actores institucionales, científicos, empresariales y del sector primario, generando soluciones ajustadas al contexto insular y adaptadas al escenario climático emergente (Cruz-Pérez et al., 2023).

A través de metodologías participativas, los Living Labs permiten conectar el conocimiento técnico con la experiencia local, promoviendo dinámicas de deliberación horizontal donde los distintos agentes implicados —desde operadores del ciclo del agua hasta pequeños agricultores— pueden identificar barreras, proponer medidas y validar colectivamente escenarios de futuro.

Esta interacción es especialmente útil en entornos donde la gestión del agua se ve condicionada por factores como la sobreexplotación de acuíferos, la baja eficiencia en redes de distribución o la vulnerabilidad estructural de la agricultura de medianías.

Uno de los elementos más valiosos de estos procesos es su capacidad para construir diagnósticos compartidos. En muchos casos, los grupos participantes convergen en la necesidad de generar bases de datos abiertas, interoperables y multidimensionales —ambientales, agronómicas, sociales y económicas— que sirvan como soporte a una planificación hídrica más adaptativa y con mayor trazabilidad.

[5] Living labs (o "laboratorios vivientes") son entornos de innovación abierta donde usuarios reales, investigadores, empresas y administraciones colaboran para co-crear, prototipar, testear y validar soluciones en contextos reales, no en entornos de laboratorio.

Este tipo de instrumentos no solo mejora la toma de decisiones en un entorno climático incierto, sino que también refuerza la transparencia y la legitimidad institucional.



Fuente: Juan C. Santamarta (2022)

Figura 9.3. Desarrollo del Living Lab en el marco del proyecto europeo ARSINOE para la búsqueda de soluciones en el ámbito de la agricultura y el agua en Canarias

En el caso de las Islas Canarias, los Living Labs se han mostrado eficaces para incorporar enfoques de ciencia ciudadana, donde el agricultor o la agricultora se convierte en "sensor del territorio", aportando datos y observaciones que enriquecen los modelos de gestión y fortalecen el vínculo entre conocimiento técnico y práctica local. En paralelo, se fomenta una cultura de corresponsabilidad, que transita desde una visión vertical de la planificación hacia formas más abiertas, interdisciplinares y cooperativas.

Desde el punto de vista técnico, los resultados de estos espacios pueden ser especialmente relevantes para la planificación hidrológica, al integrar variables cualitativas normalmente ausentes en los modelos tradicionales.

Además, permiten testar de forma segura innovaciones tecnológicas, esquemas tarifarios, estrategias de ahorro hídrico o mecanismos de redistribución del recurso. Todo ello, con una capacidad de adaptación continua, característica esencial en territorios insulares sometidos a presiones ambientales, demográficas y turísticas.

7.1. El caso de estudio del proyecto ARSINOE

Un ejemplo representativo de esta metodología se ha desarrollado en Canarias en el marco del proyecto europeo ARSINOE (https://arsinoe-project.eu/). A través del Estudio de Caso #5, se implementó un Living Lab orientado a mejorar la gestión hídrica y la adaptación del sector primario al cambio climático.

El proceso combinó mapeo colectivo, narrativas de futuro, grupos de trabajo sectoriales y entrevistas con agentes clave, incluyendo agricultores, operadoras, administraciones públicas y representantes del sector tecnológico (ARSINOE-CS5, 2023a; ARSINOE-CS5, 2023b).

El laboratorio permitió identificar cuellos de botella técnicos y sociales —como la desigualdad en el acceso al agua o el estancamiento del relevo generacional—, y activar propuestas como el uso inteligente de aguas regeneradas, la modernización de redes, la mejora del control de calidad del agua y la aplicación de criterios de justicia ambiental en las tarifas. Una de las innovaciones destacadas fue el pilotaje de GaroeApp, una herramienta digital de asistencia al riego por mensajería instantánea.

Los resultados del caso muestran que, en territorios insulares con sistemas hídricos frágiles y fragmentación institucional, los Living Labs pueden convertirse en una arquitectura útil para integrar conocimiento, reducir incertidumbre climática y democratizar las decisiones sobre el agua.

Cuando se rompe la lógica vertical y se escucha a quienes conviven con la escasez, los Living Labs dejan de ser un experimento y se transforman en herramientas reales de gobernanza compartida.

8. Cambio climático y pérdida de recarga de acuíferos

La disponibilidad de agua en Canarias está fuertemente condicionada por la meteorología. La escasez estructural de precipitaciones ha sido históricamente compensada por una eficiente captura del agua subterránea y una red de infraestructuras hidráulicas que permitía su aprovechamiento. Pero ese equilibrio se está rompiendo. El cambio climático ha introducido una alteración progresiva —y ya medible— del régimen hidrológico de las islas.

Las tendencias observadas en los últimos treinta años muestran un descenso generalizado en las lluvias, especialmente en las islas más húmedas del oeste (Santamarta et al, 2025). A ello se suma un aumento sostenido de las temperaturas medias, que ha intensificado los procesos de evapotranspiración y reducido aún más la eficiencia de la escasa lluvia que cae. En otras palabras: llueve menos y lo que llueve, se pierde antes de infiltrarse.

Este proceso tiene una consecuencia directa: la reducción de la recarga natural de los acuíferos, que ya no reciben aportes suficientes para sostener el volumen de extracción actual.

En un sistema cerrado como el de las islas, donde no hay aportes fluviales externos ni posibilidad de trasvases, la pérdida de recarga no tiene alternativa natural. La respuesta institucional, sin embargo, ha sido insuficiente. Aunque los planes hidrológicos insulares recogen referencias al cambio climático, lo hacen de forma tangencial.

No existe aún un marco de evaluación hidrológica regional adaptado a escenarios climáticos ni un sistema unificado de seguimiento de indicadores como humedad del suelo, infiltración efectiva o evolución de la recarga.



Fuente: Juan C. Santamarta (2022)

Figura 9.4. Naciente en la isla de El Hierro

Otro punto importante es el papel de los ecosistemas forestales en la regulación hídrica, el cual sigue sin estar integrado en la planificación hidrológica.

Las masas forestales, especialmente en las islas occidentales, cumplen funciones clave: favorecen la infiltración, estabilizan los suelos, reducen la escorrentía superficial y actúan como reguladores térmicos (Santamarta, 2020). Sin embargo,

su deterioro —por incendios, abandono o presión urbanística— se traduce en una mayor erosión, menos retención de agua y mayor vulnerabilidad hidrológica.

La pérdida de los bosques de laurisilva o fayal-brezal en zonas de cumbre no es solo un problema ecológico, es también un problema hídrico. Se puede comprobar sobre el terreno cómo la regresión de estos ecosistemas impacta directamente en la recarga de acuíferos y en la capacidad de retención de humedad en las islas, afectando incluso a nacientes que antes eran permanentes.

Por lo tanto, el cambio climático representa uno de los principales factores de presión sobre la sostenibilidad hídrica futura en Canarias, no solo por su efecto sobre la disponibilidad directa del recurso, sino también por su impacto en los procesos de recarga de los acuíferos, especialmente vulnerables en contextos volcánicos insulares.

Las proyecciones elaboradas por Santamarta et al. (2025), integradas en la plataforma SICMA y adaptadas a los escenarios del VI Informe del IPCC, permiten una evaluación de estos impactos a escala regional con un alto nivel de detalle, en los diferentes capítulos de este libro se han puesto de manifiesto.

En los siguientes apartados se hace un resumen de las proyecciones que se han desarrollado en anteriores capítulos.

8.1. Aumento de temperatura y olas de calor

Todos los escenarios analizados, incluso los de estabilización intermedia (SSP2-4.5), muestran aumentos generalizados de la temperatura media, superando los +1,5 °C en todas las islas a finales de siglo. En el escenario más extremo (SSP5-8.5), los incrementos superan los +3 °C en todo el archipiélago y alcanzan hasta +4,4 °C en La Gomera. Estos aumentos son aún más acusados en las islas occidentales, como El Hierro, La Palma o Tenerife, con valores superiores a +4 °C en algunas zonas de interior.

Las islas orientales, influenciadas en mayor medida por los alisios y el efecto regulador del océano, presentan incrementos más moderados, aunque relevantes (1,9–3,5 °C en Lanzarote y Fuerteventura).

En paralelo, se prevé un incremento sustancial en la frecuencia, duración e intensidad de las olas de calor. En La Palma, por ejemplo, podrían producirse más de seis eventos anuales de unos 10 días de duración en el peor escenario, lo que implicaría más de 60 días consecutivos de estrés térmico cada año.

Esta intensificación térmica tiene implicaciones directas sobre la evapotranspiración potencial y, por tanto, sobre el balance hídrico y la recarga neta de los acuíferos.

8.2. Cambios en los patrones de precipitación

La precipitación, debido a su mayor variabilidad interanual y a la complejidad de los procesos orográficos, presenta un grado de incertidumbre más elevado. Con todo, los modelos apuntan a una disminución general de las precipitaciones anuales en casi todo el archipiélago, especialmente en los escenarios más extremos.

Las reducciones más severas se esperan en las islas orientales: Fuerteventura podría perder hasta un 30 % de sus precipitaciones, y Lanzarote entre -22 y -31 mm anuales. Gran Canaria muestra un comportamiento intermedio, con pérdidas de hasta -52 mm anuales, particularmente en el sur.

En las islas occidentales, como El Hierro, La Gomera y Tenerife, las reducciones oscilan entre -10 y -40 mm, mientras que La Palma no presenta una tendencia clara, probablemente debido a la complejidad de su relieve y a la concentración de precipitaciones en zonas muy localizadas. Aun así, incluso una estabilidad aparente en la precipitación no garantiza una recarga constante, ya que la distribución temporal y la intensidad de las lluvias tienden a concentrarse en eventos extremos menos eficientes desde el punto de vista hidrogeológico.

Por otro lado, en La Palma, al aumentar la temperatura, aumentará la evapotranspiración, por lo tanto, el balance hidrológico se verá afectado.

8.3. Escasez de lluvia y declaración de emergencia hídrica

La disponibilidad de agua en las Islas Canarias está determinada, en gran medida, por un régimen pluviométrico altamente irregular, escaso y vulnerable. A esta situación estructural, bien conocida por la literatura climatológica y los planes hidrológicos insulares, se ha sumado en los últimos años una intensificación de los fenómenos extremos: descensos abruptos en las lluvias anuales, aumento de la temperatura media y reducción de la humedad del suelo.

En 2024, el Gobierno de Canarias cuantificó un déficit de precipitaciones del 82 % respecto a los valores medios, situando a amplias zonas del archipiélago en una situación crítica (Gobierno de Canarias, 2024a).

Este contexto ha propiciado la activación de figuras legales excepcionales, como la declaración de emergencia hídrica, prevista en el artículo 107 de la Ley de Aguas de Canarias (Ley 12/1990) y desarrollada en el Reglamento de Dominio Público Hidráulico (Decreto 86/2002). Dicha figura otorga a los Consejos Insulares de Aguas competencias extraordinarias para priorizar medidas urgentes de captación, producción y distribución de agua, incluidas actuaciones como la expropiación forzosa por interés público, la tramitación de proyectos en régimen de

urgencia, o la habilitación de desalinizadoras provisionales (Consejo Insular de Aguas de Tenerife, 2024).

La declaración de emergencia hídrica ha sido aplicada por varios cabildos insulares en los últimos años. El Hierro y La Gomera lo hicieron en 2022. Lanzarote y Fuerteventura lo aprobaron a finales de 2023. Tenerife se sumó oficialmente en abril de 2024, activando un paquete de 75 medidas técnicas y administrativas orientadas a incrementar la oferta, reducir las pérdidas y ajustar la demanda a la nueva realidad hídrica.

Entre las actuaciones destacan el impulso de la desalinización descentralizada, el fomento del uso de aguas regeneradas en agricultura, la restricción de nuevas concesiones sin garantía de recursos, y la imposición de tarifas diferenciales para usos turísticos y urbanos. Como técnico e investigador en la planificación hidrológica insular, he vivido de cerca cómo estas declaraciones, lejos de ser gestos simbólicos, —han obligado a replantear prioridades históricas y acelerar decisiones que llevaban años postergadas—.

Las medidas se han estructurado por comarcas hidráulicas, atendiendo a las especificidades de cada zona. En la Isla Baja y el Valle de la Orotava se ha apostado por activar la capacidad en desalinizadoras privadas, mediante venta forzosa de agua bajo criterios sanitarios y de eficiencia.

En el noreste y el área metropolitana, se ha planificado la instalación de módulos portátiles de desalinización de agua de mar. En zonas agrícolas como el Valle de Güímar o Abona, se están impulsando redes de distribución de agua regenerada y plantas de tratamiento terciario.

La gestión de la demanda también ha sido prioritaria: se han impuesto límites máximos de consumo agrícola por hectárea, revisado los precios del agua en función de la eficiencia, y restringido nuevas altas sin aportes adicionales verificables (CIATF, 2024).

Una de las principales herramientas de seguimiento de esta política es la Mesa de la Sequía, órgano colegiado que integra a cabildos, ayuntamientos, comunidades de regantes, operadores de servicios públicos y representantes del Gobierno autonómico. Su función es analizar la evolución de la disponibilidad hídrica, evaluar el cumplimiento de las medidas adoptadas y proponer ajustes según criterios técnicos. Este modelo de gobernanza hídrica participativa ha permitido identificar cuellos de botella, coordinar actuaciones entre actores institucionales y fomentar una mayor transparencia en la gestión de un recurso cada vez más escaso.

La declaración de emergencia, al amparo de la Ley de Aguas de Canarias y su reglamento, ha permitido desplegar con agilidad medidas de carácter extraordinario. Estas van desde la reactivación de pozos y desalinizadoras hasta la racionalización de usos y la revisión de tarifas.

Sin embargo, muchas de estas actuaciones presentan un carácter provisional o paliativo, sin abordar de forma estructural los factores subyacentes: la obsolescencia de las infraestructuras, la ineficiencia en la distribución, la sobreexplotación de acuíferos y la falta de cultura hídrica en sectores estratégicos.

En Canarias, la emergencia hídrica no puede ser una rutina burocrática. Si no se transforma el modelo —infraestructuras, gobernanza, fiscalidad y cultura del agua— lo urgente seguirá desplazando a lo importante. Y el colapso será cuestión de tiempo.

La creación de órganos como la Mesa de la Sequía y el refuerzo de los instrumentos de seguimiento son pasos relevantes hacia una gobernanza más transparente e inclusiva. Aun así, su eficacia dependerá de la coherencia entre planificación y ejecución, de la estabilidad presupuestaria y, sobre todo, de la voluntad política para aplicar criterios de sostenibilidad en un contexto de creciente presión climática y demográfica.

La emergencia hídrica no es solo una situación técnica. Es una señal política, económica y social que exige una transformación del modelo de gestión, capaz de anticipar riesgos, corregir ineficiencias históricas y construir resiliencia frente a un clima cada vez más incierto.

En contextos insulares como el nuestro, declarar una emergencia hídrica solo tiene sentido si viene acompañada de una voluntad real de transformación estructural, y no como una medida reactiva más ante la escasez.

A pesar de estos avances, persisten varios interrogantes clave. ¿Se están utilizando adecuadamente los instrumentos de planificación para anticipar crisis hídricas? ¿Qué grado de resiliencia tiene el sistema actual ante una cronificación de la sequía? ¿Es suficiente la política de oferta, basada en la desalinización de agua de mar y regeneración, sin una estrategia decidida de reducción del consumo y modernización del sistema de gobernanza?

8.4. Reducción del balance hídrico y de la recarga

La combinación de temperaturas más altas, aumento de la evapotranspiración y menor o igual precipitación conlleva una reducción neta del balance hídrico, y por tanto de la recarga natural.

En las islas con mayor dependencia de la infiltración directa, como El Hierro, se proyectan reducciones de hasta un 75 % en el balance hídrico en zonas como El Golfo (hasta -150 mm anuales).

En Tenerife, las pérdidas estimadas rondan el 50 %, especialmente en medianías húmedas y sectores forestales donde hoy se concentra buena parte de la recarga difusa.

Las predicciones para las islas orientales son aún más preocupantes. En Gran Canaria se anticipa una pérdida casi total de la reserva hídrica si no se introducen medidas de adaptación, mientras que en Lanzarote y Fuerteventura se alcanza un balance hídrico nulo: las escasas lluvias no logran cubrir las pérdidas por evapotranspiración en ningún momento del año. Esta situación refuerza la dependencia estructural de estas islas de fuentes no convencionales, como la desalinización de agua de mar, con el consiguiente impacto energético y económico.

Calcular la recarga natural en islas volcánicas es un ejercicio plagado de incertidumbres. A la variabilidad pluviométrica —con series cortas y muy heterogéneas— se suman la alta evapotranspiración potencial (con valores superiores a 1.000 mm a^{-1}) y la extrema anisotropía del subsuelo, donde coladas fisuradas alternan con paleosuelos poco permeables, el predominio de procesos de flujo no saturado, dificulta estimar con precisión la fracción de la lluvia que realmente alcanza la zona saturada. La falta de redes de observación piezométrica densas y ensayos de bombeo prolongados amplifica el margen de error: un ligero sesgo en los coeficientes de infiltración puede multiplicar o dividir por dos la recarga calculada.

La incertidumbre estructural que acompaña a la estimación de la recarga en medios volcánicos insulares como El Hierro. La horquilla de valores —de 12 a 27 hm^3 a^{-1} para una precipitación media anual cercana a 100 hm^3— representa una variación relativa del orden del 130 %, atribuible no a errores instrumentales, sino a decisiones metodológicas clave: si se incluye o no la precipitación horizontal, qué método se aplica para estimar la evapotranspiración real, o si se consideran pérdidas por flujos laterales y almacenamiento intersticial.

La oscilación de los coeficientes de recarga entre 12 % y 27 % de la lluvia anual en los sucesivos Planes Hidrológicos Insulares (Gobierno de Canarias, 2002, 2015, 2018; SPA15, 1975) evidencia hasta qué punto el marco conceptual y los supuestos hidrológicos inciden directamente sobre el volumen considerado potencialmente disponible. Este caso demuestra que en territorios pequeños y con climatología orográfica, como El Hierro, la precisión en la estimación de la recarga no es un detalle técnico menor, sino un determinante estructural de la planificación hídrica.

Lanzarote ofrece el ejemplo contrario: proyecciones carentes de verificación que prometen autosuficiencia subterránea. Informes internos llegaron a atribuir 13 hm^3 a^{-1} de recarga al malpaís de Timanfaya, valor incompatible con la climatología árida de la isla (100-120 mm a^{-1}) y con coeficientes de recarga efectivos que rara vez superan el 5-10 % en estos entornos; la estimación rigurosa se situaría, en el mejor escenario, en torno a 2 hm^3 a^{-1} (Gobierno de Canarias, 2021).

Sin sondeos ni ensayos prolongados que avalen la continuidad y calidad del recurso, plantear que podría cubrir el 70 % de la demanda insular —hoy resuelta

íntegramente mediante desalinización de agua de mar— resulta científicamente insostenible. Esta comparación subraya la necesidad de basar cualquier cifra de recarga en campañas y estudios científicos.

En este contexto, el proyecto REDESAC ha aportado avances significativos al aplicar técnicas basadas en trazadores naturales para la estimación de la recarga media multianual, centrando su estudio en la zona norte de la isla de Gran Canaria (Naranjo et al., 2012).

La región seleccionada para el estudio, caracterizada por una pluviometría elevada asociada a la acción de los vientos alisios y una litología dominante de materiales volcánicos recientes, representa una de las principales áreas de recarga del acuífero insular.

A través del balance de cloruros atmosféricos, un método robusto y extensamente validado en medios áridos y volcánicos (Custodio, 2010), se ha logrado una primera estimación del volumen de agua infiltrada.

El método parte del principio de conservación del ión cloruro, considerado un trazador conservativo, no reactivo y exclusivamente atmosférico en origen. Al comparar la deposición total de cloruro (vía húmeda y seca) con su concentración en el agua subterránea, es posible inferir la fracción de precipitación que se convierte en recarga efectiva. En condiciones ideales, la relación entre ambos parámetros permite estimar la recarga sin necesidad de parámetros empíricos adicionales (Alcalá & Custodio, 2007).

Los resultados obtenidos en el norte de Gran Canaria muestran una recarga media estimada del 24% respecto a la precipitación total, con valores que varían espacialmente en función de la altitud. En las zonas de medianías y alta montaña, donde se concentran las mayores precipitaciones y las condiciones edáficas son más favorables, se alcanza hasta un 47% de recarga relativa (Naranjo et al., 2012).

Esta distribución altitudinal refleja el papel dominante de los gradientes térmicos, la cobertura vegetal y la capacidad de almacenamiento del suelo en la eficiencia de la recarga.

La campaña de muestreo se llevó a cabo mediante una red de colectores de lluvia instalados entre los 300 y los 1.400 metros de altitud. Las muestras se analizaron tanto para iones mayoritarios como para isótopos estables ($\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$), lo que ha permitido afinar la caracterización del agua infiltrada y contrastar la coherencia isotópica con los valores esperados para recarga reciente.

No obstante, como es habitual en este tipo de enfoques, se han identificado diversas fuentes de incertidumbre. Entre ellas destaca la omisión parcial de la escorrentía superficial en el balance, lo cual podría sobreestimar la recarga en episodios de lluvias intensas. Según estimaciones basadas en estudios previos, este sesgo podría situarse entre un 10% y un 25%, dependiendo del régimen hidrológico de

cada subcuenca (SPA-15, 1975; Custodio, 1978). A pesar de esta limitación, el método del balance de cloruros ofrece una referencia sólida que permite corregir estimaciones anteriores basadas en modelos empíricos o relaciones pluviométricas de baja resolución.

Desde una perspectiva hidrogeológica más amplia, los resultados del proyecto REDESAC permiten consolidar una hipótesis ya planteada por diversos autores: en territorios volcánicos insulares, la recarga no es un fenómeno difuso sino altamente concentrado en áreas bien definidas, estrechamente condicionadas por la litología, la topografía y el régimen de nieblas (Custodio & Cabrera, 2008).

Esta constatación tiene implicaciones directas en la planificación hidrológica, ya que permite discriminar zonas potenciales de protección de recarga y mejorar la delimitación de masas de agua subterránea en los planes hidrológicos insulares conforme a la Directiva Marco del Agua (DMA, 2000/60/CE).

El trabajo desarrollado en Gran Canaria constituye una referencia metodológica extrapolable a otras islas volcánicas del Atlántico y del Pacífico, donde las limitaciones de datos, la escasa densidad de instrumentación y la complejidad geológica hacen necesaria la aplicación de métodos indirectos basados en marcadores naturales.

El balance de cloruros sigue siendo una herramienta esencial, especialmente si se complementa con análisis isotópicos, modelación hidrológica y estudios geoquímicos integrados.

En la isla de La Palma la recarga ha sido estimada por Poncela (2015), la síntesis de los balances hidrometeorológicos, los análisis hidrodinámicos de galerías y la señal isotópica integrados por Poncela indican que la recarga media multianual en la isla de La Palma se sitúa en torno a 220–230 mm a^{-1}, lo que equivale a ≈ 30 % de la precipitación media anual (~ 720 mm a^{-1}).

Este valor integra la variabilidad espacial derivada del gradiente altitudinal y las nieblas orográficas, y concuerda con los caudales históricos extraídos por las infraestructuras de captación.

Tuve la oportunidad de dirigir la tesis de Poncela (2015), y puedo afirmar que su trabajo supuso un avance riguroso en la cuantificación de la recarga en La Palma, al integrar métodos isotópicos, balances hidrometeorológicos y análisis hidrodinámicos en un sistema hidrogeológico insular particularmente complejo.

En el caso de Tenerife, el Plan Hidrológico Insular 2021–2027 estima una recarga natural media de aproximadamente 346 hm^3 anuales, valor derivado de la modelización de los balances hídricos de las cuatro masas de agua subterránea que componen el acuífero insular.

Esta cifra corresponde al periodo de referencia 1925–2012 y representa un promedio multidecenal que incorpora tanto la variabilidad interanual como las condiciones hidroclimáticas propias de cada zona (CIATF, 2023).

Si se toma como base la precipitación media larga registrada sobre la superficie emergida de la isla (423 $mm \cdot a^{-1}$ sobre 2.034 km^2), el volumen total de lluvia alcanzaría los 860 hm^3 anuales, por lo que la recarga calculada equivaldría aproximadamente al 40 % de esa entrada pluviométrica. No obstante, el propio Plan trabaja operativamente con una precipitación media ligeramente inferior (377 $mm \cdot a^{-1}$), lo que reduce el aporte total estimado a 767 hm^3 anuales. En ese escenario, la recarga supondría hasta un 45 % del total.

En el caso de Gran Canaria, con 419 $hm^3\ a^{-1}$ de precipitación y una infiltración natural del 20 %, la recarga efectiva se fija en $\approx 0{,}20 \cdot P$, muy por debajo del 40 % observado en Tenerife. El contraste subraya la distinta capacidad reguladora de ambos macizos y justifica la fuerte apuesta de Gran Canaria por recursos no convencionales.

Como investigador vinculado a procesos de estimación de recarga en islas volcánicas, soy consciente de que estas cifras deben interpretarse con cautela. Las incertidumbres asociadas a la heterogeneidad litológica, la presencia de conductividad hidráulica anisótropa, los episodios extremos de precipitación y la escasa densidad de observaciones directas hacen que toda modelización de la recarga sea una aproximación sujeta a revisión. Incluso pequeñas variaciones en las hipótesis de evapotranspiración o en el balance superficial pueden alterar significativamente los resultados, especialmente cuando se pretende extrapolarlos a escalas multidecenales.

8.5. Recarga artificial: posibilidades y limitaciones

Ante la disminución de la recarga natural y la sobreexplotación de los acuíferos, la recarga artificial (RA), Managed Aquifer Recharge (MAR) en inglés, se plantea como una estrategia complementaria para restaurar el balance hídrico, como se ha comentado en el capítulo 2.

Este tipo de intervención requiere una caracterización hidrogeológica precisa, control de calidad del agua infiltrada y seguimiento piezométrico e hidroquímico.

En Canarias, la RA aún es incipiente, pero existen oportunidades claras, especialmente en acuíferos costeros degradados o en zonas agrícolas con exceso estacional de agua regenerada. La viabilidad técnica debe evaluarse caso a caso mediante modelización específica y estudios piloto (RAEMIA, 2019; Pulido-Velázquez et al., 2015).

La recarga de acuíferos, natural o inducida, debe ser considerada una línea de actuación prioritaria dentro de la planificación hídrica insular. Sus beneficios incluyen:

- Recuperación de niveles piezométricos en acuíferos sobreexplotados.
- Mitigación de la intrusión marina en acuíferos costeros.
- Mejora de la calidad del agua mediante procesos de atenuación natural.
- Reducción de la dependencia de la desalinización de agua de mar en zonas rurales.
- Aumento de la resiliencia frente a sequías prolongadas.

El proyecto NATALIE

En el marco del proyecto europeo NATALIE (Nature Based Solutions for Water Management under Climate Extremes and Land Use Change), financiado por el programa Horizonte Europa, se está desarrollando una línea de trabajo centrada en la evaluación de soluciones basadas en la naturaleza (SbN) para aumentar la resiliencia hídrica de islas volcánicas.

Uno de los casos piloto más relevantes se localiza en Fuerteventura, una de las islas con menor precipitación del archipiélago y una elevada dependencia de fuentes no convencionales de agua, como la desalinización.

El componente experimental del caso de estudio en Fuerteventura se orienta a explorar la viabilidad de técnicas de recarga artificial de acuíferos mediante el uso de aguas regeneradas y la captación de escorrentías puntuales. El enfoque adoptado combina:

- Análisis hidrogeológicos detallados para identificar zonas de potencial infiltración.
- Simulaciones numéricas de infiltración y flujo subterráneo.
- Evaluación de riesgos asociados a la calidad del agua infiltrada.
- Estudios de aceptación social y gobernanza para su implementación práctica.

Desde el punto de vista de gestión, el caso de Fuerteventura aporta información crítica para responder a la pregunta clave que plantea este capítulo: ¿es viable la recarga artificial en entornos áridos, insulares y volcánicos con escasa precipitación y acuíferos de baja permeabilidad efectiva?

Las simulaciones preliminares realizadas con herramientas como MODFLOW y Soil-Water Assessment Tool (SWAT) sugieren que, incluso con tasas bajas de infiltración, la recarga artificial puede tener un efecto significativo a escala local, especialmente en acuíferos sobreexplotados con riesgo de salinización. Sin embargo, el proyecto también alerta sobre los riesgos de sobredimensionar las expectativas: la eficiencia hidráulica y la estabilidad química del sistema dependen fuertemente del diseño técnico, el control de calidad del agua y las condiciones del subsuelo.



Fuente: Juan C. Santamarta (2022)

Figura 9.5. Charca en la isla de Fuerteventura con efecto en la recarga del acuífero

El proyecto NATALIE no solo generará conocimiento científico útil para la isla de Fuerteventura, sino que funciona como laboratorio insular para evaluar el papel de la recarga como herramienta de adaptación al cambio climático en territorios con disponibilidad hídrica estructuralmente baja.

Su integración exige un marco normativo claro, inversiones en monitorización y una gobernanza colaborativa entre administraciones hidráulicas, comunidades de regantes y centros de investigación.

Recarga artificial en Gran Canaria: potencial, límites y líneas de diseño

La experiencia piloto desarrollada en el acuífero costero de Tenoya, según los estudios de Hernández-Ríos (2023) ilustra, con datos de explotación real, hasta dónde puede llegar la recarga artificial (MAR) en medios volcánicos insulares y qué cautelas exige su extensión a escala insular.

Potencial operativo. El estudio demuestra que la inyección de agua regenerada de alta calidad (MBR + desinfección) permite almacenar alrededor de 0,9–1 hm^3 a^{-1} con un único pozo ASR, estabilizar la superficie piezométrica y frenar la cuña

salina sin incurrir en sobrepresiones críticas (Hernández Ríos, Cabrera & Rodríguez, 2023).

El coste nivelado de 0,36–0,42 € m^{-3}, inferior al precio medio del agua desalinizada en la isla (0,59–0,70 € m^{-3}), posiciona la recarga como una alternativa económicamente competitiva para crear reservas estratégicas frente a sequías prolongadas.

Beneficio ambiental. La operación simultánea de inyección-extracción confiere un doble valor añadido: eleva los niveles piezométricos —con ello reduce gradientes de intrusión— y, al mismo tiempo, mejora la calidad media del acuífero al diluir salinidades iniciales de 3.500–6.000 µS cm^{-1}.

Este efecto cumple la doble finalidad de la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE) —cantidades y calidad— y se alinea con los requisitos de la normativa europea de reutilización (Reglamento (UE) 2020/741).

Condicionantes críticos.

- Colmatación del pozo: los balances de sólidos en suspensión indican tasas de ensuciamiento de 0,07 m $día^{-1}$; ciclos de inyección de 250–300 días y limpiezas hidráulicas programadas resultan suficientes para mantener la capacidad específica inicial (Hernández Ríos et al., 2023).
- Control de presión: la modelización impone un límite de ascenso hidráulico inferior a 35 m para evitar fracturación de las fonolitas; se requiere instrumentación manométrica en continuo y parada automática por sobrepresión (Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, 2021).
- Contaminantes emergentes: la normativa española aún no establece valores guía; el proyecto recomienda monitorizar trimestralmente PFAS, fármacos y pesticidas, e incluir carbón activo granulado en el tren de tratamiento cuando se detecten concentraciones superiores a 0,1 µg L^{-1}.

Escalabilidad y replicabilidad. Los resultados son extrapolables a otras cuencas del norte insular y, en general, a dominios volcánicos con transmisividades moderadas (20–100 m^2 d^{-1}) y EDAR cercanas que dispongan de caudal estable.

La clave reside en disponer de un balance hídrico positivo entre producción terciaria continua y capacidad de inyección, así como en caracterizar con precisión la anisotropía de las fracturas receptoras mediante ensayos hidráulicos y trazadores.

Limitaciones estructurales.

- Disponibilidad de agua regenerada: la mayor parte del terciario se consume en riego; cualquier ampliación de MAR deberá compatibilizarse con esa demanda agrícola.

- Marco regulador: en España la recarga con efluente depurado requiere autorización singular y declaración explícita de objetivo ambiental, lo que introduce plazos administrativos largos.
- Aceptación social: pese a los estándares sanitarios exigidos, persiste cierta reticencia al uso de agua regenerada para recarga. Los autores proponen campañas de divulgación y trazabilidad analítica pública en tiempo real para reforzar la confianza ciudadana.

La recarga de acuíferos, en su complejidad física y vulnerabilidad climática, representa un frente estratégico para la seguridad hídrica en Canarias. Aumentar su conocimiento, reducir la incertidumbre en su estimación y desarrollar mecanismos de recarga controlada son tareas imprescindibles para adaptar el modelo de gestión del agua a los desafíos del siglo XXI.

Frente al agotamiento de los sistemas acuíferos y la inercia de décadas de extracción intensiva, actuar sobre la recarga es apostar por la sostenibilidad a largo plazo.

8.6. Ecosistemas asociados a masas de agua subterránea

Las islas volcánicas canarias albergan un mosaico de ecosistemas ligados al flujo subterráneo —nacientes de medianías, nacientes costeros hiposalinos y humedales de barranco— cuya dinámica hídrica depende, en gran medida, de la recarga efectiva que penetra en los acuíferos fisurales (Santamarta, 2014).

La disminución progresiva de esa recarga, provocada por el descenso de la precipitación, la pérdida de cubierta vegetal en cotas medias y la sobreexplotación para riego y abastecimiento, está alterando la funcionalidad ecológica de estos sistemas y, con ello, una presión creciente sobre los sistemas ecológicos dependientes del agua subterránea. Las especies higrófilas —especialmente helechos, sauces y tarajales— ven limitada su distribución por la bajada del nivel freático o por el incremento de la salinidad del flujo de base, como consecuencia del avance de la intrusión marina o la explotación intensiva.

En varios trabajos de campo realizados en barrancos de La Palma, Tenerife y El Hierro, se ha observado cómo especies higrófilas antes abundantes han ido desapareciendo en zonas donde el nivel freático ha descendido visiblemente.

Estos cambios, aunque graduales, evidencian una pérdida silenciosa de funcionalidad ecológica que muchas veces pasa desapercibida en los diagnósticos técnicos.



Fuente: Juan C. Santamarta (2022)

Figura 9.6. Vegetación asociada a las aguas subterráneas

Los barrancos constituyen el principal drenaje superficial-subterráneo de las islas. En períodos húmedos, las escorrentías recargan rápidos los acuíferos coluviales; en estiaje, la base hídrica superviviente se nutre de la salida natural de agua desde el acuífero al medio exterior La investigación compilada por Santamarta (2014) revela:

- Reducción del caudal base en cauces medios de Gran Canaria y Tenerife —hasta 40 % entre 1980 y 2020— coincidente con un retroceso de ~12 % en la recarga modelada.
- Pérdida de conectividad entre pozas permanentes; especies reófilas como *Chondrostoma polylepis canariense* pierden refugio estival.
- Desecación estacional de nacientes en La Gomera y El Hierro; el número de puntos con flujo > 1 L s^{-1} se ha reducido a la mitad desde 1990.

Flora y fauna vinculadas

Helechos higrófilos (*Diplazium caudatum*, *Dryopteris guanchae*) dependen de la saturación edáfica y la niebla interceptada. La caída de la lámina freática > 1 m

limita la humedad capilar y reduce su área de ocupación en las laurisilvas del norte de Tenerife.

Invertebrados estigóbicos —*Canariphantes sp., Deuteraphorura sp.*— han quedado confinados a galerías donde el nivel piezométrico se mantiene estable; muestran sensibilidad a variaciones de 0,2–0,3 m en el espejo de agua.

Sauces canarios (*Salix canariensis*) y tarajales litorales (*Tamarix canariensis*) retroceden en barrancos costeros de Gran Canaria; la intrusión salina inducida por bombeos y descenso piezométrico (> 0,5 m a^{-1}) eleva la conductividad del flujo de base por encima de 2 mS cm^{-1}, límite de tolerancia para plántulas. También son sustituidos por otras especies como el *Salix alba* (sauce blanco).

Incorporar estas herramientas de gestión hídrica en la planificación insular incrementa la resiliencia funcional de los ecosistemas dependientes del flujo subterráneo, un requisito imprescindible para salvaguardar la biodiversidad canaria y para sostener la estabilidad hidromorfológica de los barrancos que vertebran el paisaje volcánico.

8.7. Implicaciones para la planificación hidrológica

Las proyecciones climáticas para Canarias coinciden en predecir un descenso de la precipitación media anual y un aumento de la temperatura, lo que implica una reducción neta de la recarga natural (Santamarta et al., 2025). Sin embargo, este impacto será diferencial según la isla, la altitud y la orientación orográfica.

El aumento de la irregularidad en las lluvias también puede dar lugar a eventos extremos que, si se gestionan adecuadamente, podrían contribuir a la recarga mediante infraestructuras de laminación o infiltración localizada.

En este sentido, el uso combinado de modelos climáticos regionales y modelos hidrológicos locales es fundamental para definir estrategias adaptativas eficaces (Sapriza-Azuri et al., 2015; Pulido-Velázquez et al., 2018).

Estos resultados refuerzan la necesidad de integrar el cambio climático como eje estructural de la planificación hidrológica en Canarias. La reducción de la recarga natural afectará no solo a la disponibilidad de agua subterránea, sino también a la sostenibilidad de los ecosistemas asociados (pinares, laurisilvas, acuíferos costeros), al equilibrio de los balances insulares y a la capacidad de respuesta ante sequías prolongadas.

Las políticas de adaptación deberán incluir la mejora del conocimiento hidrogeológico, la protección activa de las zonas de recarga, la restauración hidrológica de suelos forestales y la revisión de los umbrales de explotación sostenible.

La disponibilidad futura de agua en las islas no dependerá solo de cuánto llueva, sino de cómo se gestione el territorio.

La respuesta al cambio climático no puede limitarse a medidas reactivas. Es necesario integrar la variable climática como eje estructurante de la gestión del agua, no como un apéndice ambiental.

Eso implica adaptar las estrategias de captación, aumentar la resiliencia del sistema, reforzar el monitoreo y restaurar aquellos ecosistemas que mejoran la capacidad de infiltración y la calidad del agua.

El ciclo del agua está cambiando. Y si la planificación no cambia con él, el desfase entre lo que se proyecta y lo que ocurre será cada vez más costoso.

9. El horizonte 2040 y la titularidad del agua subterránea

En Canarias, a diferencia de lo que ocurre en la mayor parte del territorio peninsular, la gestión del agua subterránea ha estado tradicionalmente dominada por actores privados. Esta situación responde a un marco legal singular con raíces en el siglo XIX, cuando el desarrollo de pozos, galerías y conducciones fue impulsado por particulares, comunidades de agua, cooperativas y empresas familiares, muchas veces ligadas a la actividad agrícola. A lo largo del siglo XX, este modelo se consolidó, configurando una estructura mixta donde el agua subterránea, aunque reconocida como un bien de interés general, ha sido en la práctica gestionada y financiada por entidades privadas o mixtas (Del Moral & Giansante, 2000).

La Ley de Aguas de 1985 (Ley 29/1985, de 2 de agosto) supuso un punto de inflexión, al declarar por primera vez el dominio público de todas las aguas, superficiales y subterráneas, con el objetivo de integrar su gestión en un sistema unificado. Con ello, Canarias quedó sujeta a un régimen transitorio excepcional, reconocido posteriormente en el Texto Refundido de la Ley de Aguas de 2001 (Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio), que respetaba los derechos históricos de explotación hasta una fecha límite: el año 2040.

Este plazo fue concebido como una medida de transición para facilitar la adaptación del sistema insular al nuevo marco jurídico estatal. Aun así, a menos de dos décadas de esa fecha, no se ha articulado aún un plan institucional, técnico ni financiero que permita abordar de manera ordenada y segura el traspaso de la titularidad y la gestión de más de 5.000 captaciones activas, muchas de las cuales abastecen zonas rurales o sectores agrícolas con escasa cobertura alternativa (Santamarta, 2017).

La ausencia de planificación para esta transición es preocupante. Los planes hidrológicos insulares no contemplan censos actualizados de las infraestructuras afectadas, ni se han evaluado los costes de su eventual asunción por parte de las

administraciones públicas. Tampoco se han establecido protocolos para garantizar la continuidad del servicio, ni se ha iniciado un proceso de interlocución formal con los titulares actuales. Esta inacción genera inseguridad jurídica y operativa en un recurso esencial para el abastecimiento y la economía insular.

Las implicaciones son diversas. Muchas de las captaciones están situadas en terrenos privados, sin accesos adecuados, sin mantenimiento reciente y sin documentación técnica homologada. Su incorporación al dominio público exigirá, como mínimo, procesos de legalización, inversiones para su rehabilitación, o bien decisiones técnicas sobre su clausura definitiva. En el caso de captaciones en mal estado, será necesario aplicar criterios de seguridad hídrica y ambiental, conforme a la Directiva 2006/118/CE sobre la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro.

Otro aspecto no resuelto es la entidad gestora que asumirá la titularidad y explotación de estos recursos. ¿Serán los Consejos Insulares de Aguas quienes absorban estas competencias? ¿Se creará un ente regional específico? ¿Se permitirá la cogestión o cesión temporal a los actuales titulares bajo nuevas condiciones concesionales? La indefinición alimenta la preocupación de las comunidades de agua, algunas de las cuales operan desde hace más de un siglo sin apoyo institucional, pero con una eficiencia técnica notable en ciertos casos.

Desde un enfoque jurídico, este proceso exige garantías claras. La Administración deberá definir criterios para la clarificación registral de la titularidad, la valoración patrimonial de las infraestructuras y la protección de los derechos legítimamente adquiridos. Asimismo, se deberá elaborar un nuevo marco concesional o de colaboración público-privada que permita una transición estable, legalmente segura y financieramente viable (Almansa & Martínez de Simón, 2007).

Desde una perspectiva técnica, el reto implica dimensionar los recursos humanos y materiales necesarios para asumir la gestión de infraestructuras distribuidas, muchas de ellas obsoletas o en áreas de difícil acceso. Y desde el punto de vista social, será imprescindible un proceso de información, diálogo y negociación, que permita explicar los cambios, reducir la conflictividad y fomentar modelos de gobernanza compartida.

9.1. Las comunidades de aguas: actores clave en la transición hídrica de Canarias

En el contexto del horizonte 2040, explicado anteriormente y del cambio en la titularidad del agua subterránea, las comunidades de aguas canarias constituyen un elemento singular y estratégico.

Estas entidades —conformadas por propietarios de acciones sobre captaciones, conducciones o sistemas de distribución— han sido históricamente responsables del desarrollo, mantenimiento y gestión de buena parte de la infraestructura hidráulica subterránea del archipiélago.

Su existencia se remonta, en muchos casos, al siglo XIX, y su operativa responde a un régimen jurídico específico reconocido por la legislación civil común y la normativa autonómica aplicable en Canarias, con reconocimiento legal en la legislación estatal y jurisprudencia consolidada (Almansa & Martínez de Simón, 2007; Real Decreto Legislativo 1/2001).

A diferencia del resto del Estado, donde el dominio público hidráulico limita la iniciativa privada, en Canarias las comunidades de aguas han funcionado como operadores reales del sistema hídrico insular.

Según datos del Gobierno de Canarias (2022), más del 80 % del agua subterránea extraída sigue siendo gestionada por este tipo de entidades, especialmente en islas como La Palma, Tenerife o El Hierro. Este modelo, heredado de una economía agraria basada en el autoabastecimiento, ha sobrevivido gracias a su adaptación práctica y a una cultura hídrica comunitaria muy arraigada.



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 9.7. Heredad de Aguas de Arucas y Firgas

Estas comunidades, sin embargo, afrontan un momento de inflexión. El vencimiento del régimen transitorio en 2040 implica que sus derechos históricos de

aprovechamiento dejarán de tener validez automática, y que sus infraestructuras podrían pasar a titularidad pública.

Este escenario introduce importantes interrogantes sobre su papel futuro: ¿continuarán como entidades gestoras mediante concesiones o encomiendas? ¿Serán absorbidas por organismos públicos? ¿Podrán adaptarse al nuevo marco normativo sin perder su funcionalidad?

Además, muchas presentan debilidades estructurales: envejecimiento de sus órganos de gobierno, escasa renovación generacional, dificultades de acceso a financiación, y limitaciones técnicas para afrontar retos como la eficiencia energética, la digitalización de redes o la monitorización en continuo de la calidad del agua. A esto se suma la falta de una normativa específica y actualizada que regule su funcionamiento bajo criterios de transparencia, solvencia técnica y sostenibilidad.

Aun así, también constituyen una oportunidad. Su conocimiento del territorio, su flexibilidad operativa y su experiencia acumulada en la gestión cotidiana del recurso son activos que deberían integrarse en cualquier estrategia de transición hídrica. Hernández-Mora y De Stefano (2011) destacan que los colectivos de usuarios organizados pueden desempeñar un papel clave en la gobernanza del agua si se les dota de herramientas jurídicas adecuadas y se les reconoce como interlocutores válidos.

Cualquier proceso de transición deberá incorporar mecanismos de participación real, incluyendo modelos de cogestión, concesiones adaptadas o figuras cooperativas que reconozcan los derechos adquiridos sin comprometer el interés general.

La planificación hidrológica, en este sentido, no puede ignorar su existencia ni limitarse a prever su absorción administrativa. La experiencia balear, donde la gestión insular convive con un plan hidrológico regional, sugiere que es posible integrar estructuras locales dentro de un marco común coherente.

La situación actual exige, por tanto, claridad jurídica, voluntad política y planificación anticipada. Las comunidades de aguas no son una anomalía a corregir, sino un legado institucional que, si se adapta, puede ser parte activa del modelo hídrico canario del siglo XXI.

10. El binomio agua-energía: dependencia y vulnerabilidad

En Canarias, el agua no fluye sin energía. Cada metro cúbico desalinizado, bombeado, distribuido o depurado implica un consumo eléctrico relevante, alimentado mayoritariamente por combustibles fósiles importados.

Esta relación estructural entre agua y energía es especialmente intensa en territorios insulares como el canario, donde la escasez de recursos hídricos y la fragmentación territorial acentúan la dependencia tecnológica y energética del sistema.

La desalinización es el ejemplo paradigmático. Canarias cuenta con más de 300 plantas desalinizadoras, lo que la convierte en la región con mayor densidad de estas instalaciones a nivel mundial. Solo en Lanzarote y Fuerteventura, casi el 100% del agua de consumo humano procede de la desalación. Sin embargo, este proceso consume entre 3,5 y 4,5 kWh/m³, según la salinidad del agua y el tipo de tecnología empleada (Rodríguez Urrego et al., 2023).

Las captaciones de agua subterránea también requieren energía, especialmente cuando los bombeos se realizan desde galerías o pozos a más de 400 metros de profundidad, como ocurre en Tenerife o El Hierro. A este consumo se añade el de transporte y distribución, muy significativo en islas con grandes desniveles altitudinales y urbanización dispersa.

El resultado es un sistema vulnerable por tres razones: dependencia externa de combustibles, alta huella de carbono del ciclo integral del agua, y exposición a las oscilaciones del mercado energético. El 12,6% de toda la energía eléctrica generada en Canarias se destina al ciclo del agua (Gobierno de Canarias, 2023).



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 9.8. Sondeo en el interior de una galería en la isla de La Gomera

No obstante, en los últimos años se han impulsado iniciativas para reducir esta dependencia. Destaca el proyecto DESALRO 2.0 del Instituto Tecnológico de Canarias, que ha logrado desarrollar una planta piloto de ósmosis inversa con consumos inferiores a 2 kWh/m³, validando soluciones móviles y modulares para abastecimiento en zonas remotas (ITC, 2023).

Por otra parte, experiencias como la Central Hidroeólica de Gorona del Viento en El Hierro han demostrado la viabilidad de integrar renovables en la producción de agua. En 2018, El Hierro alcanzó un 95% de cobertura energética con fuentes renovables (Sarasúa et al., 2019).

Se están promoviendo asimismo proyectos de autoconsumo fotovoltaico para desalación, bombeo y riego en distintas islas, enmarcados en la iniciativa "Clean Energy for EU Islands".

A pesar de ello, la penetración de energías limpias en el sector hídrico sigue siendo reducida y desigual. En Tenerife, por ejemplo, solo el 7% de la energía del ciclo del agua proviene de fuentes renovables, mientras que el resto se genera en centrales térmicas convencionales (Rodríguez Urrego et al., 2023).



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 9.9. Central eléctrica térmica en la isla de El Hierro

Desde una perspectiva estratégica, es imprescindible acelerar la transición energética del agua. Esto implica:

- Electrificar con renovables, cuando sea tecnológicamente viable, las plantas desalinizadoras y depuradoras, combinadas con las actuales fuentes.
- Optimizar la eficiencia de redes y sistemas de bombeo.
- Reducir pérdidas hídricas.
- Integrar la planificación hidrológica y energética. reformular el modelo tarifario para reflejar el coste real del agua, incluido su componente energético.

En esta línea, resulta destacable la colaboración entre archipiélagos en el análisis del binomio agua-energía. Como ya se comentó, en secciones anteriores, investigadores de la Universidad de La Laguna, en colaboración con la Universitat de les Illes Balears, participaron en la elaboración del plan estratégico de transición energética de la Agencia Balear del Agua (ABAQUA). A partir de un estudio pionero sobre la huella de carbono de las infraestructuras hidráulicas, se propusieron medidas para reducir un 24% el consumo energético entre 2022 y 2026, equivalentes a evitar la emisión de 13 millones de toneladas de CO_2 anuales. El estudio comparativo reveló que las desalinizadoras de gran capacidad en Canarias presentan una menor huella de carbono que las de Baleares, mientras que estas últimas tienen redes más eficientes, con pérdidas inferiores al 10% frente a valores de hasta el 35% en Canarias (Cruz Pérez et al., 2021).

Sin energía sostenible, no habrá agua segura. Canarias necesita transformar su sistema hídrico en una plataforma de innovación climática y soberanía energética. La insularidad, lejos de ser un obstáculo, puede convertirse en ventaja si se transforman los sistemas insulares en laboratorios de innovación para el binomio agua-energía.

10.1. La producción hidroeléctrica en las islas de la macaronesia

La hidroelectricidad —especialmente en su modalidad de bombeo reversible— representa el eje más robusto para acoplar agua y energía en los archipiélagos macaronésicos. Las condiciones orográficas y, en menor medida, la disponibilidad de lámina de agua permite generar saltos útiles y, al mismo tiempo, ofrecer almacenamiento de electricidad a gran escala, indispensable para integrar eólica y fotovoltaica en redes insulares débiles (Cruz-Pérez et al., 2024).

El caso de El Hierro (Canarias) demuestra que la combinación parque eólico–bombeo puede cubrir más del 50 % de la demanda anual, mientras que el esquema subterráneo de Socorridos (Madeira) confirma que es posible minimizar el impacto ambiental del embalse inferior, preservando el entorno.

Fortalezas y oportunidades exceden a las debilidades cuando se planifica con visión de ciclo completo agua-energía. La topografía volcánica aporta desniveles superiores a 400 m sobre el nivel del mar, en Azores, Madeira y Canarias, y la pluviometría de las vertientes barlovento sostiene minicentrales que ya funcionan desde hace décadas. La misma infraestructura se puede revalorizar como "batería hidráulica" para almacenar excedentes renovables, abastecer riego de altura o alimentar, mediante tubería derivada, estaciones de desalinización costera en horas valle.

Las limitaciones son esencialmente hídricas y ambientales, no tecnológicas. La competencia por el recurso —uso potable, agrícola y caudal ecológico— restringe la potencia firme de los sistemas; además, las tendencias a precipitaciones más irregulares obligan a dimensionar el bombeo con periodos de retorno secos en mente. Los autores del estudio de Cruz-Pérez (2024) subrayan que cualquier nuevo esquema debe incluir análisis de hábitat, conectividad y caudales de mantenimiento para evitar pérdidas de biodiversidad en cauces o nacientes ligados al acuífero.

Las islas áridas (Lanzarote, Fuerteventura, buena parte de Cabo Verde) no quedan fuera del paradigma: el bombeo con agua desalinizada o de retorno urbano es viable cuando el coste energético se compensa con la flexibilidad extra que aporta al sistema eléctrico.

El estudio cita el proyecto planificado en Santiago (Cabo Verde) y los diseños de bombeo marino[6] (S-PHS) como alternativas creíbles allí donde faltan cursos de agua permanentes.

En todos los escenarios, la salmuera o el agua de rechazo deben reintegrarse con planes de vertido controlado para no comprometer los ecosistemas litorales.

La hidroelectricidad insular, bien diseñada, puede actuar como vector bidireccional: regula energía renovable intermitente y, a la vez, ofrece agua almacenada para riego, abastecimiento o recarga ambiental.

Su implantación exige gobernanza multiactor, tarifas que reconozcan el doble servicio agua-energía y monitorización ambiental permanente, pero se erige como una herramienta más para alcanzar la neutralidad de carbono sin comprometer la seguridad hídrica de los ecosistemas volcánicos.

---

[6] Los diseños de bombeo marino, conocidos técnicamente como Sea-Water Pumped Hydro Storage (S-PHS), constituyen una variante del almacenamiento por bombeo que utiliza el océano como embalse inferior. En lugar de dos depósitos terrestres a diferente cota, se construye un único embalse elevado (generalmente artificial), mientras que el mar actúa como depósito de referencia a nivel inferior.

11. Nuevos contaminantes del agua subterránea en Canarias: evidencia reciente y desafíos para la gestión

En las últimas décadas ha emergido una preocupación creciente por la presencia de sustancias no tradicionalmente incluidas en los programas de control de calidad del agua, pero que han demostrado capacidad para generar efectos adversos sobre la salud humana y los ecosistemas.

Estos compuestos, denominados contaminantes emergentes (CEs), incluyen una amplia variedad de sustancias químicas como fármacos de uso humano y veterinario, productos de cuidado personal, retardantes de llama, compuestos industriales, pesticidas de última generación y subproductos de desinfección del agua (Schwarzenbach et al., 2010).

Su carácter "emergente" no radica necesariamente en su reciente introducción al medio ambiente, sino en la creciente preocupación científica y regulatoria por sus efectos y persistencia.

Los CEs llegan al medio hídrico principalmente a través de descargas de aguas residuales urbanas, vertidos agrícolas, infiltración desde sistemas sépticos y lixiviados industriales, muchas veces sin ser completamente eliminados por las estaciones de tratamiento convencionales (Pal et al., 2010). Una parte de ellos, especialmente los compuestos de baja biodegradabilidad y alta movilidad, puede alcanzar las aguas subterráneas y mantenerse en estos sistemas durante largos periodos, dificultando su remediación y detección temprana (Gascó Cavero et al., 2023).

Paralelamente, los microplásticos (MPs) —partículas plásticas menores a 5 mm— se han convertido en una amenaza silenciosa para los recursos hídricos subterráneos. Tradicionalmente estudiados en ambientes marinos, hoy se reconoce su presencia en aguas dulces, suelos, y de forma incipiente, en acuíferos subterráneos (Koelmans et al., 2019).

Los MPs se clasifican en primarios (fabricados como partículas diminutas, como las microperlas de cosméticos) y secundarios (derivados de la fragmentación de plásticos mayores por acción física, química o biológica). En el entorno subterráneo, su entrada puede estar asociada a la infiltración desde suelos contaminados, pérdidas en redes de saneamiento, riego con aguas regeneradas o escorrentía urbana (Rodríguez-Alcántara et al., 2024).

La relevancia de estos contaminantes radica no solo en su toxicidad potencial, sino en su persistencia, movilidad y capacidad de interacción con otros compuestos. En el caso de los microplásticos, actúan como vectores de otros contaminantes, incluyendo metales pesados o contaminantes orgánicos que pueden adsorberse en sus superficies, lo que amplifica su efecto vectorial y su impacto ambiental (Wu et al., 2022).



Fuente: Juan C. Santamarta

Figura 9.10. Muestreo de contaminantes emergentes

La investigación científica en contextos insulares, como el canario, ha comenzado a documentar la presencia de ambos tipos de contaminantes en aguas subterráneas, poniendo en evidencia la vulnerabilidad específica de los acuíferos volcánicos frente a fuentes difusas de contaminación y a la falta de medidas específicas de monitoreo y control (Gascó Cavero et al., 2024; Rodríguez-Alcántara et al., 2024).

11.1. Emergentes y microplásticos en aguas subterráneas de islas volcánicas

En los últimos años se ha consolidado un cuerpo de evidencia científica que confirma la presencia de contaminantes emergentes (CEs) y microplásticos (MPs) en las aguas subterráneas de las islas volcánicas del archipiélago canario. Estos hallazgos representan un cambio de paradigma en la evaluación de la calidad del agua subterránea en regiones insulares, donde tradicionalmente se había considerado a estos sistemas como relativamente protegidos frente a este tipo de contaminación.

11.2. Contaminantes emergentes: distribución y origen en El Hierro y La Palma

El estudio pionero de Gasco Cavero et al. (2023) en la isla de El Hierro reveló la presencia de un amplio espectro de CEs, incluyendo filtros UV, estabilizantes industriales y compuestos farmacéuticos (PhACs), aunque sin detectar pesticidas.

En particular, se observaron altas concentraciones de compuestos como benzotriazol (BZT), salicílico (SCY), cafeína (CFF) y mefenámico (MFA), especialmente en zonas situadas en la parte baja de La Frontera, lo que apunta a una correlación entre uso urbano, agricultura intensiva y concentración de contaminantes.

Destaca también la asociación entre profundidad de captación y concentración de CEs, con valores más altos en sondeos profundos, indicando acumulación a largo plazo en acuíferos confinados.

En una ampliación posterior de esta investigación, Cavero et al. (2024) compararon los perfiles de CEs entre La Palma y El Hierro. A diferencia de El Hierro, en La Palma se detectaron pesticidas en niveles elevados, como imidacloprid y acetamiprid, superando los límites propuestos por la UE. Se detectaron también más compuestos en total y en mayor número de puntos. Este contraste se atribuye tanto a la presión agrícola como a la densidad poblacional superior en La Palma.

Ambos estudios apuntan a una vulnerabilidad de los acuíferos volcánicos frente a contaminantes de origen difuso (uso doméstico, vertidos de fosas sépticas, residuos de uso agrícola), especialmente en contextos donde las redes de saneamiento son incompletas o antiguas. Se recomienda priorizar medidas preventivas sobre estrategias reactivas, ya que la eliminación de estos compuestos a profundidades elevadas resulta inviable técnicamente y económicamente.

11.3. Microplásticos en aguas subterráneas volcánicas

El trabajo de Rodríguez-Alcántara et al. (2024) constituye el primer estudio en detectar microplásticos en aguas subterráneas de islas volcánicas oceánicas. Se identificaron seis polímeros distintos en galerías, pozos y manantiales de El Hierro y La Palma, con concentraciones entre 1 y 23 partículas por litro. Los polímeros predominantes fueron polietileno (PE) y polipropileno (PP), asociados al uso de tuberías, textiles, envases y materiales agrícolas.

Los MPs se detectaron tanto en puntos próximos a instalaciones de tratamiento de aguas residuales como en captaciones ubicadas en entornos rurales, lo que

sugiere múltiples rutas de entrada, incluyendo la lixiviación desde infraestructuras degradadas y la infiltración desde suelos contaminados.

Además de su persistencia, los MPs actúan como vectores de otros contaminantes, lo que agrava su impacto en acuíferos que, por definición, presentan largos tiempos de residencia del agua. Esto puede conducir a procesos acumulativos con riesgos a medio y largo plazo para la salud humana y la integridad de los ecosistemas, especialmente en islas que dependen casi exclusivamente del agua subterránea para abastecimiento y agricultura.

11.4. Implicaciones para la gestión de los recursos hídricos en Canarias

La identificación de estos contaminantes no regulados en aguas subterráneas plantea desafíos técnicos y normativos en el contexto insular. En primer lugar, se requiere actualizar las metodologías de control de calidad del agua incluyendo la monitorización sistemática de CEs y MPs.

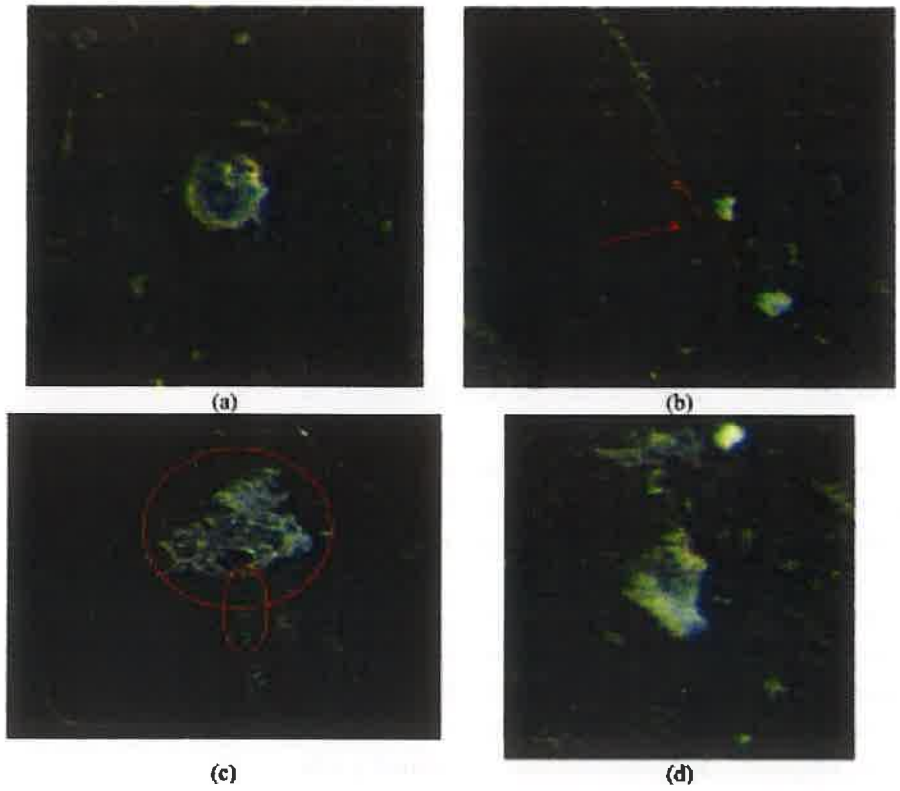
En segundo lugar, se deben reforzar las políticas de prevención, enfocadas en la mejora del saneamiento, la regulación del uso de fitosanitarios y la educación ambiental, en el caso de la agricultura el adecuado tratamiento de residuos plásticos de embalses o invernaderos. Por último, debe avanzarse en el desarrollo de normativa específica para islas, adaptada a su vulnerabilidad estructural y a la importancia estratégica de sus acuíferos.

La existencia de estudios de referencia realizados en Canarias con metodologías analíticas robustas (HPLC-MS[7]/MS, FTIR[8]) refuerza la necesidad de integrar esta problemática en la planificación hidrológica y en la evaluación de riesgos para el ciclo del agua en las islas.

---

[7] Cromatografía Líquida de Alta Resolución acoplada a Espectrometría de Masas (High Performance Liquid Chromatography – Mass Spectrometry). Se trata de una técnica analítica instrumental de gran sensibilidad y especificidad.

[8] Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (Fourier Transform Infrared Spectroscopy), una técnica instrumental utilizada para identificar compuestos químicos a partir de la absorción de radiación infrarroja por los enlaces moleculares.



Fuente: Rodríguez-Alcántara et al. (2024)

Figura 9.11. Microplásticos encontrados en las muestras de aguas subterráneas de la isla de La Palma (LP) y El Hierro (EH) ambas islas; (a) fragmento de PE en EH4; (b) fibra de PE en LP1; (c) lámina de PE y fragmento de PMMA en LP3; y (d) fragmento de PP en LP1.

12. Contaminación por nitratos en Canarias: fuentes, distribución e implicaciones sanitarias

La presencia de nitratos en aguas subterráneas y superficiales constituye una de las amenazas ambientales y sanitarias más relevantes en Canarias. Su origen está estrechamente ligado a la agricultura intensiva, la actividad ganadera y la gestión deficiente de aguas residuales.

El cultivo de plátano, especialmente en Tenerife y Gran Canaria, demanda grandes volúmenes de agua y el uso intensivo de fertilizantes nitrogenados, lo que favorece procesos de lixiviación que alcanzan los acuíferos y cursos superficiales adyacentes. Santamarta et al. (2023) subrayan que la agricultura sigue siendo el

principal consumidor de agua en la isla de Tenerife, lo que hace imprescindible implantar prácticas sostenibles para minimizar las pérdidas de nitrógeno hacia el subsuelo.

La aplicación excesiva de fertilizantes, o su uso en condiciones meteorológicas desfavorables —como lluvias intensas tras periodos secos—, incrementa el riesgo de escorrentía contaminante. Marrero et al. (2015) vinculan directamente estos pulsos de lluvia con picos de concentración de nitratos en aguas superficiales y galerías.

Estudios espaciales han evidenciado una distribución desigual de este tipo de contaminación. En Gran Canaria, diversas masas de agua subterránea superan con frecuencia el umbral de 50 mg/L establecido por la OMS para el agua potable (Ruiz-García et al., 2019).

En zonas agrícolas de Fuerteventura, la infiltración de aguas de retorno ha producido acumulaciones similares, con efectos adversos tanto sobre las reservas de agua como sobre los ecosistemas acuáticos circundantes (Nouzha et al., 2016).

Desde el punto de vista ecológico, el exceso de nitratos en cuerpos de agua contribuye a la eutrofización, un proceso que altera el equilibrio biológico reduce el oxígeno disuelto y puede llevar a la pérdida progresiva de biodiversidad acuática (Marouane et al., 2015; Ward et al., 2018).

En cuanto a los riesgos sanitarios, los más documentados incluyen la metahemoglobinemia infantil —especialmente grave en menores de seis meses—, así como posibles asociaciones con cáncer colorrectal y alteraciones tiroideas (Ward et al., 2018).

Algunas captaciones subterráneas no tratadas, utilizadas en núcleos rurales, han mostrado concentraciones superiores al límite permitido, lo que representa un riesgo para poblaciones sin acceso a redes de abastecimiento controladas.

El seguimiento sistemático de la contaminación por nitratos y la implantación de medidas correctoras en las zonas más vulnerables son condiciones necesarias para garantizar tanto la seguridad hídrica como la salud pública en el archipiélago.

Los controles oficiales confirman que varias masas de agua subterránea de Gran Canaria, Tenerife y Fuerteventura rebasan con frecuencia el umbral de 50 mg L^{-1} fijado por la OMS para consumo humano (Ruiz-García et al., 2019).

En los conos de bombeo costeros se registran picos superiores a 120 mg L^{-1}, mientras que los barrancos con escorrentía base muestran concentraciones que rondan los 30–60 mg L^{-1} durante la ausencia de lluvias.

El descenso proyectado de la precipitación y la creciente presión agrícola anticipan un empeoramiento si no se adoptan medidas correctoras.

El patrón es claramente difuso y de origen agronómico:

- En plataneras de Tenerife, los lisímetros revelan que entre el 30 % y el 45 % del nitrógeno aplicado se lixivia más allá de la zona radicular durante los inviernos lluviosos.
- Los isótopos $\delta^{15}N–NO_3$ del acuífero de La Aldea (Gran Canaria) apuntan a fertilizantes y purines, no a aguas residuales, como principal señal (Cabrera et al., 2000).
- En Fuerteventura, los invernaderos de hortaliza generan infiltraciones que elevan el nitrato a 80 mg L^{-1} en pozos someros.

En su distribución espacial existe un gradiente oeste-este:

- Islas occidentales (La Palma, El Hierro): 10–40 mg L^{-1}; focos aislados en llanuras plataneras.
- Islas centrales (Tenerife, Gran Canaria): 25–120 mg L^{-1}; máximos en litorales agrícolas y periurbanos.
- Islas orientales (Fuerteventura, Lanzarote): 30–85 mg L^{-1}; influencia de retorno de riego y baja dilución natural.

Mitigar este problema exige una estrategia integrada de gestión del agua, que articule sostenibilidad ambiental y prevención sanitaria. Entre las medidas prioritarias figuran la mejora del tratamiento terciario de las aguas residuales, el control técnico del uso de fertilizantes y la adopción de buenas prácticas en riego localizado. Rodríguez-Urrego et al. (2022) destacan, además, el papel que pueden desempeñar los Consejos Insulares de Aguas como organismos de gobernanza local, capaces de fiscalizar el cumplimiento normativo y coordinar actuaciones preventivas.

13. Algunas propuestas para la mejora de la gestión del agua en Canarias y escenarios futuros

El sistema hídrico canario afronta un momento crítico. La conjunción de factores estructurales —insularidad, irregularidad climática, dependencia de las aguas subterráneas— con las nuevas presiones impuestas por el cambio global sitúa al archipiélago ante un dilema complejo: garantizar el acceso al agua sin agotar los ecosistemas de los que depende. El equilibrio es inestable. Y la ventana de oportunidad, limitada.

Ante la creciente complejidad en la gestión del agua en Canarias, resulta necesario avanzar hacia una planificación más proactiva y coherente. No basta con

diagnosticar los problemas: urge traducir el conocimiento acumulado en medidas concretas que permitan afrontar con garantías los retos actuales y anticipar los escenarios futuros.

En este contexto, se ha considerado oportuno incluir en este apartado una serie de propuestas orientadas a reforzar la resiliencia del sistema hídrico insular, mejorar su eficiencia y sostenibilidad, y avanzar hacia una mayor equidad social y territorial.

Son recomendaciones que no solo se apoyan en el análisis técnico y en la experiencia acumulada en diversos ámbitos de la gestión del agua, sino que también se formulan con la conciencia de que deberán ser revisadas y ajustadas conforme evolucionen las condiciones climáticas, institucionales y socioeconómicas.

13.1. Gobernanza hídrica y reforma institucional

La gobernanza del agua en Canarias presenta debilidades estructurales que limitan la capacidad de respuesta ante un escenario cada vez más exigente. La fragmentación institucional, el solapamiento de competencias entre niveles administrativos y la excesiva burocracia dificultan la toma de decisiones operativas y comprometen la coherencia de la planificación hidrológica.

A esto se suma una inestabilidad institucional derivada de la rotación política y de la escasa profesionalización de algunos órganos de decisión.

Varios responsables técnicos y operadores del sector han señalado, en entrevistas recientes, la falta de continuidad en las políticas hídricas y la influencia del calendario electoral en decisiones que deberían estar guiadas por criterios técnicos y de sostenibilidad.

El actual modelo requiere una transformación orientada a simplificar la estructura institucional, clarificar las competencias, mejorar la capacidad ejecutiva y reforzar los mecanismos de evaluación y rendición de cuentas.

Medidas prioritarias:

- Aunque se mantengan los 7 planes hidrológicos, consolidar una demarcación hidrográfica única para el archipiélago, para simplificar los procesos administrativos –solo se aprobaría un PHI de toda Canarias–, con dotación presupuestaria estable y capacidad técnica suficiente para coordinar la planificación y ejecución de políticas hídricas en todo el territorio, respetando cada realidad insular y compartiendo medios, personal, datos y conocimiento.
- Crear entes insulares de gestión del agua con autonomía técnica y operativa, encargados de coordinar la gestión integral del recurso: desde la capta-

ción hasta la reutilización, incluyendo planificación, ejecución y control. Estos entes deben estar al margen del ciclo político y regirse por criterios de eficiencia, sostenibilidad y servicio público.

- Revisar y simplificar el marco normativo que regula la gestión del agua, reduciendo tiempos de tramitación en procesos críticos como concesiones, autorizaciones de vertido o actuaciones en contexto de emergencia hídrica. La actual densidad normativa actúa como un freno estructural a la modernización del sistema.
- Impulsar una Ley Canaria del Agua adaptada al siglo XXI, que recoja el cambio climático, la transición energética y la futura reversión del agua subterránea, en el año 2040.
- Reforzar la participación efectiva de los usuarios y agentes sociales en los procesos de toma de decisiones estratégicas. Es preciso institucionalizar espacios donde estén representados agricultores, comunidades de regantes, operadores, asociaciones de consumidores, municipios y colectivos ambientales, con voz real en el diseño y seguimiento de las políticas hídricas.

Una reforma institucional profunda es condición necesaria para que cualquier estrategia de transición hídrica tenga recorrido. Sin estructuras sólidas, coordinadas y técnicas, no habrá planificación eficaz ni capacidad de adaptación a los nuevos límites del sistema.

13.2. Gestión de la demanda y eficiencia en el uso del recurso

La estrategia de gestión de la demanda debe situarse en el núcleo de cualquier política hídrica moderna en Canarias.

En un contexto donde las fuentes tradicionales están al límite de su capacidad y la incorporación de nuevas ofertas —como desalinización de agua de mar o la regeneración de aguas— implica altos costes energéticos y ambientales, reducir el consumo es más eficaz que expandirlo.

Priorizar el ahorro sobre la ampliación de oferta. Las actuaciones orientadas a la contención de la demanda, como la mejora de rendimientos en redes o el uso racional en la agricultura, presentan una rentabilidad social y ecológica superior a la construcción de nuevas infraestructuras de captación (Custodio & Santamarta, 2021; RAEMIA, 2019).

Establecer estándares sectoriales de eficiencia. Resulta imprescindible definir límites técnicos realistas y vinculantes: consumo doméstico por habitante, dota-

ciones máximas en alojamientos turísticos, y eficiencias mínimas exigibles a las redes de riego.

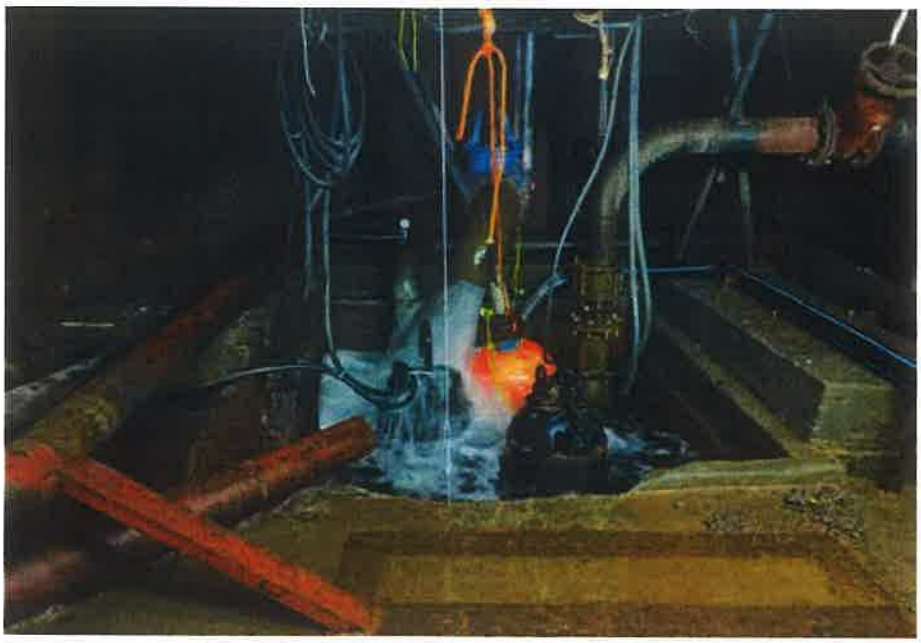
Estas métricas deben integrarse en los planes hidrológicos insulares y ser objeto de auditorías periódicas (MITECO, 2023; Dirección General del Agua, 2021).

Reformar las tarifas hídricas con criterios de equidad y sostenibilidad. Las tarifas progresivas —con bloques de penalización al derroche— permiten proteger el derecho humano al agua garantizando al mismo tiempo la sostenibilidad del sistema.

Este enfoque, alineado con los principios del uso eficiente del recurso, requiere que los precios reflejen los costes reales de producción y distribución, particularmente en contextos como el canario donde el precio medio está distorsionado por subsidios cruzados y externalidades no internalizadas.

Impulsar una cultura del agua activa y sostenida. Las campañas puntuales han mostrado escasa eficacia. Se requiere una política estructural de educación, que incorpore la gestión del agua en el currículo educativo, en los medios públicos y en la formación de profesionales del sector.

La sensibilización debe superar el formato informativo tradicional y orientarse hacia el cambio de hábitos mediante herramientas participativas y pedagógicas (Custodio et al., 1997; Boithias et al., 2014).



Fuente: Juan C. Santamarta (2023)

Figura 9.12. Instalación de sensores de conductividad, temperatura y nivel en el Pozo de Los Padrones en la isla de El Hierro

Reducir pérdidas, racionalizar consumos y cerrar el ciclo del agua son acciones imprescindibles. La inversión en digitalización y monitorización debe considerarse estratégica, no accesoria.

Propuestas operativas:

- Sensorización de redes y depósitos con tecnologías NB-IoT[9].
- Modelos predictivos de machine learning[10] para detección de fugas y escenarios extremos.
- Reutilización plena de aguas regeneradas para agricultura, zonas verdes, recarga de acuíferos y usos industriales.
- Incorporación de tecnologías inteligentes en municipios (Smart Water dentro de Smart Cities).
- Priorizar el ahorro antes que la ampliación de oferta. Es más rentable y sostenible reducir el consumo que construir nuevas infraestructuras de captación o producción.
- Establecer estándares de eficiencia sectorial: consumo máximo por habitante, dotaciones turísticas por plaza, rendimientos mínimos en redes agrícolas.
- Revisar las tarifas hídricas con criterios de progresividad y penalización del derroche, garantizando el derecho humano al agua, pero desincentivando usos innecesarios.
- Campañas sostenidas de educación y cultura hídrica, no puntuales ni meramente informativas.

Las tecnologías NB-IoT (Narrowband Internet of Things) con su gran cobertura, incluso en interiores, zonas subterráneas o áreas rurales, permite monitorizar redes hidráulicas en tiempo real, detectar fugas, controlar presiones, leer contadores a distancia o gestionar estaciones de bombeo y válvulas con alta fiabilidad. Gracias a su bajo coste, larga duración de batería y capacidad para conectar miles de sensores simultáneamente, representan una herramienta clave para la digitalización del sistema hídrico, especialmente útil en contextos insulares y dispersos como el canario.

---

[9] NB-IoT (Narrowband Internet of Things) es una tecnología que permite conectar dispositivos pequeños y simples a internet usando muy poca energía y con buena cobertura, incluso en zonas alejadas o subterráneas.

[10] Machine Learning (ML) o aprendizaje automático es una rama de la inteligencia artificial que permite a los sistemas aprender automáticamente a partir de datos sin ser programados explícitamente para cada tarea.

13.3. Sector agrícola: sostenibilidad y equidad

La agricultura sigue siendo el principal consumidor de agua en Canarias y conserva un papel clave en la estructura económica y la cohesión territorial del archipiélago. Desde una perspectiva tanto productiva como social, su importancia es indiscutible.

Ahora bien, el sector afronta retos cada vez más exigentes: la escasez estructural de recursos, la creciente variabilidad climática y la necesidad ineludible de transitar hacia modelos de uso del agua más sostenibles, eficientes y justos.

Para abordar estos retos, es esencial implementar estrategias que promuevan la eficiencia en el uso del agua, la equidad en su distribución y la sostenibilidad de las prácticas agrícolas.

A continuación, se presentan recomendaciones clave para avanzar en esta dirección:

Recomendaciones clave:

- Priorizar el uso agrícola del agua en explotaciones que apliquen buenas prácticas: Establecer criterios que favorezcan el acceso al recurso hídrico para aquellas explotaciones que demuestren la implementación de técnicas de riego eficientes, conservación del suelo y otras prácticas sostenibles.
- Implementar redes de agua regenerada específicas para riego, con tarifa diferenciada e incentivos: Desarrollar infraestructuras que permitan el uso de aguas regeneradas en la agricultura, ofreciendo tarifas competitivas y estímulos económicos para fomentar su adopción. Esta medida contribuirá a diversificar las fuentes de agua y reducir la presión sobre los recursos hídricos convencionales.
- Rediseñar los sistemas de ayudas y subvenciones, vinculando el acceso a requisitos de eficiencia hídrica: Reformar los mecanismos de apoyo financiero al sector agrícola, condicionando las ayudas a la adopción de prácticas que mejoren la eficiencia en el uso del agua. Esto incentivará la modernización de las explotaciones y la adopción de tecnologías sostenibles.
- Establecer límites de dotación por cultivo, vinculados a estudios agronómicos actualizados y climáticamente adaptados: Definir asignaciones de agua específicas para cada tipo de cultivo, basadas en investigaciones recientes que consideren las condiciones climáticas actuales y futuras. Esta medida asegurará una distribución más equitativa y eficiente del recurso hídrico.
- Fomentar el uso de plataformas climáticas de apoyo a decisiones de riego, integrando variables agroclimáticas (evapotranspiración, déficit hídrico, previsión de lluvias) con sensores de humedad en suelo y datos meteoroló-

gicos locales. Estas herramientas permiten ajustar el riego a las necesidades reales del cultivo, reducir el consumo y anticipar situaciones de estrés hídrico. En Canarias ya existen iniciativas piloto en este sentido, pero su uso aún no está generalizado.



Fuente: Juan C. Santamarta (2023)

Figura 9.13. Invernadero de plataneras en la isla de El Hierro

Estas recomendaciones buscan fortalecer la resiliencia del sector agrícola canario, promoviendo una gestión del agua más sostenible y equitativa que garantice la viabilidad a largo plazo de las actividades agrícolas en el archipiélago.

13.4. Binomio agua-energía: transición ecológica real

El ciclo del agua en Canarias es altamente dependiente del consumo energético, especialmente en procesos como la desalinización, la elevación de caudales desde galerías profundas y la distribución a través de sistemas presurizados.

Esta dependencia implica no solo un elevado coste económico, sino también una importante huella de carbono asociada, especialmente cuando el suministro eléctrico proviene de fuentes fósiles.

En un archipiélago que aspira a una transición energética acelerada, no es coherente mantener sistemas de agua intensivos en energía sin estrategias claras de mitigación y eficiencia.

Además, la volatilidad del precio de la energía sigue siendo un factor determinante que compromete la sostenibilidad económica de muchas infraestructuras hídricas. La presión recae tanto sobre operadores públicos como privados, y acaba repercutiendo de forma desigual sobre los usuarios finales.

En varias entrevistas realizadas en los proyectos de investigación que coordinamos, se ha puesto de manifiesto la fragilidad de ciertas instalaciones —en particular, plantas desalinizadoras de baja capacidad— ante incrementos imprevistos del coste energético, lo que pone en entredicho su viabilidad operativa a medio plazo si no se adoptan medidas de corrección o apoyo estructural.

Por tanto, avanzar hacia un modelo de autosuficiencia energética y de optimización del consumo en el sector hídrico no es solo una opción ambiental, sino una necesidad estratégica para garantizar la resiliencia del sistema.

Actuaciones estratégicas:

- Impulsar la autosuficiencia energética—dentro de los márgenes viables de operación— de las instalaciones de tratamiento y distribución del agua, mediante el uso de energías renovables, especialmente solar fotovoltaica y eólica, y evaluar soluciones como el bombeo hidroeléctrico reversible en contextos de altitud variable. Estas inversiones deben priorizarse en plantas desalinizadoras de agua de mar, estaciones depuradoras y redes de bombeo de alta demanda.
- Diseñar esquemas de penalización o fiscalidad ambiental para tecnologías hídricas ineficientes, especialmente aquellas con elevados consumos por metro cúbico producido o distribuido, incentivando la retirada progresiva de equipos obsoletos o sobredimensionados.
- Fomentar líneas de ayuda a la innovación en tecnologías de bajo consumo energético, incluyendo sistemas de ósmosis inversa de alta eficiencia, recuperación energética en desalinización, automatización inteligente de bombeos y uso de baterías o almacenamiento distribuido en instalaciones rurales.
- Evaluar de forma sistemática la huella energética y de carbono del ciclo integral del agua, incorporando este criterio en la planificación hidrológica y en los planes de inversión pública. Sin métricas claras, no se pueden establecer prioridades ni justificar costes adicionales vinculados a la eficiencia.
- Establecer sinergias entre las estrategias insulares de agua y energía, con mecanismos de coordinación efectiva entre las áreas responsables, de forma

que los planes de transición energética integren explícitamente las necesidades del sistema hídrico.

Una transición ecológica efectiva no puede avanzar sin una planificación integrada del binomio agua–energía, abordada con visión de largo plazo y criterios de coherencia territorial.

En los sistemas insulares, marcados por su fragilidad ecológica y recursos limitados, integrar la dimensión energética en la gestión del agua no es solo recomendable: es imprescindible. Pasar por alto esta relación significa mantener un modelo ineficiente y exponer aún más al territorio frente a futuras crisis climáticas o económicas.

13.5. Salinización y contaminación de acuíferos

El deterioro de la calidad de las aguas subterráneas en Canarias es una amenaza creciente para la seguridad hídrica del archipiélago.

Este deterioro responde, principalmente, a dos procesos paralelos: la intrusión salina en acuíferos costeros y la contaminación difusa por nitratos en áreas agrícolas, este último estudiado en un apartado anterior.

Ambos fenómenos comprometen el uso del recurso tanto para abastecimiento humano como para riego, y su reversión es técnicamente compleja, lenta y costosa.

La intrusión marina se ha intensificado en zonas costeras con acuíferos sobreexplotados y escaso control del bombeo, especialmente donde no existen sistemas de regulación de caudales ni protección frente a descensos del nivel piezométrico.

En regiones como el sureste de Gran Canaria o determinados sectores de Tenerife y Lanzarote, las concentraciones de cloruros en captaciones activas superan con frecuencia los umbrales para el consumo humano (250 mg/L según el RD 3/2023) o incluso para el riego sensible, afectando la productividad agraria.

Por otro lado, la contaminación por nitratos, derivada del uso intensivo e ineficiente de fertilizantes nitrogenados, se ha extendido en acuíferos con largos tiempos de renovación y poca capacidad de depuración natural.

En varias masas de agua subterránea, las concentraciones superan los 50 mg/L establecidos por la normativa europea (Directiva 91/676/CEE), obligando a mezclar caudales, aplicar tratamientos específicos o excluir el uso directo del agua.

Algunos técnicos entrevistados coinciden en que los controles actuales son insuficientes, tanto en frecuencia como en cobertura, y que la gestión de la calidad del agua subterránea ha quedado relegada frente a la priorización de la cantidad.

Esta situación es especialmente grave en zonas agrícolas con modelos intensivos, donde el riesgo de pérdida de recurso utilizable es alto.

Medidas prioritarias que se proponen:

- Establecer perímetros de protección hidrogeológica en acuíferos vulnerables, limitando nuevas extracciones y regulando el caudal máximo admisible en función de criterios piezométricos y de calidad.
- Implantar programas de monitorización sistemática de cloruros y nitratos, con redes de seguimiento representativas y acceso público a los datos mediante plataformas abiertas.
- Incorporar sistemas de control automático de caudales en captaciones costeras, vinculando las autorizaciones de uso a la disponibilidad real y al riesgo de intrusión.
- Fomentar buenas prácticas agrarias en zonas de recarga, incluyendo el ajuste de las dosis de fertilización a las necesidades reales del cultivo, el uso de sensores en suelo y la certificación de explotaciones como "agricultura baja en nitrógeno".
- Evaluar la viabilidad de actuaciones correctoras, como la recarga artificial con agua de buena calidad, la barrera hidráulica mediante inyección controlada o la desactivación temporal de captaciones salinizadas.
- Revisar el régimen de concesiones en función del estado químico del acuífero, introduciendo mecanismos de suspensión o revisión de derechos de uso cuando se supere el umbral de deterioro.

La calidad del agua subterránea no puede seguir quedando en un segundo plano frente a los aspectos cuantitativos. En un territorio insular como Canarias, donde apenas existen alternativas reales al uso de los acuíferos, cualquier degradación de su calidad pone en riesgo la seguridad hídrica a medio y largo plazo. Gestionar bien el agua implica asumir que cantidad y calidad son dos caras del mismo problema, y deben abordarse juntas, tanto en la planificación como en la práctica diaria.

13.6. Cultura del agua y cambio de modelo

La gestión hídrica en Canarias requiere incorporar una dimensión cultural, pedagógica y comunicativa que permita construir un nuevo contrato social del agua.

Este contrato debe basarse en la corresponsabilidad, la transparencia y la comprensión del valor estratégico del recurso hídrico en un contexto insular y vulnerable.

Diversas iniciativas en el archipiélago ya trabajan en esta dirección. El Hidrogeodía, organizado por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH), ofrece jornadas gratuitas guiadas por hidrogeólogos, abiertas a todo tipo de público, con el objetivo de explorar la relación entre el agua subterránea y la geología local, y fomentar la educación ambiental sobre los recursos hídricos, esta actividad se celebra a nivel nacional e internacional, teniendo sede también en las Islas Canarias.

La Universidad de La Laguna (ULL), a través de su Aula Cultural del Agua, desarrolla actividades educativas y de divulgación científica que analizan aspectos relativos al agua, incluida la energética, así como el conocimiento y caracterización de la hidrogeología y del terreno volcánico, convirtiendo a las Islas Canarias en un laboratorio del conocimiento y la ciencia aplicada al agua.



Fuente: Juan C. Santamarta (2023)

Figura 9.14. Celebración del Hidrogeodía (2024) en la isla de Tenerife

En el ámbito educativo, el Gobierno de Canarias promueve actividades en colegios e institutos para conmemorar el Día Mundial del Agua, ofreciendo unidades didácticas y propuestas para trabajar el tema en profundidad, con el objetivo de sensibilizar al alumnado sobre la importancia de la conservación del agua.

Acciones sugeridas:

- Desarrollar campañas permanentes de alfabetización hídrica en escuelas, medios de comunicación y administraciones públicas.
- Visibilizar los costes reales del agua, sus externalidades y su valor estratégico para la sostenibilidad del archipiélago.
- Crear narrativas adaptadas a los distintos públicos objetivo (usuarios urbanos, sector turístico, comunidades rurales) que refuercen la corresponsabilidad y reduzcan la resistencia al cambio.
- Incluir contenidos sobre el agua en los currículos educativos y en la formación técnica de agricultores y operadores del sector.

Estas acciones contribuirán a consolidar una cultura del agua que promueva una gestión más sostenible, equitativa y adaptada a las particularidades de Canarias.

13.7. Ingeniería del agua en islas volcánicas: formación universitaria y transferencia

Uno de los mitos que persisten en la percepción externa sobre Canarias es que la especificidad hidrogeológica de los terrenos volcánicos no ha sido debidamente incorporada en la formación universitaria local.

Sin embargo, un análisis detallado de los planes de estudio impartidos actualmente en los grados de Ingeniería Civil y Ciencias Ambientales en las universidades del archipiélago demuestra lo contrario.

En Canarias se estudian con profundidad tanto los fundamentos de la hidrogeología insular como los sistemas de captación tradicionales, incluyendo las galerías de agua y los pozos profundos, afirmar lo contrario es falso.

En la Universidad de La Laguna (ULL), el Grado en Ciencias Ambientales incluye asignaturas como "Hidrología", donde se abordan explícitamente los sistemas de circulación subterránea, los procesos de recarga, la hidrogeoquímica de acuíferos volcánicos, la interfaz entre agua dulce y agua marina, y la captación mediante pozos y galerías.

Estas temáticas se complementan con actividades prácticas sobre el terreno, que permiten al alumnado conocer directamente los sistemas de aprovechamiento hídrico tradicionales en entornos insulares.



Fuente: Juan C. Santamarta (2022)

Figura 9.15. Formación de técnicos de Cabo Verde en materia de aguas en terrenos volcánicos durante el Campus África

Por su parte, el Grado en Ingeniería Civil contempla asignaturas como "Planificación y Gestión de Recursos Hidráulicos" y "Sistemas de Abastecimiento y Saneamiento", que desarrollan competencias en planificación hidrológica, gestión de recursos subterráneos, diseño de captaciones y control de intrusión salina.

En la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), la Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles imparte asignaturas como "Hidrología y Planificación" y "Obras e Instalaciones Hidráulicas I". Ambas incluyen contenidos específicos sobre hidrogeología de medios volcánicos, funcionamiento de acuíferos insulares, diseño de galerías de agua y sistemas de bombeo.

El aprendizaje no se limita al plano conceptual: se estudian casos reales, se evalúan modelos de explotación de acuíferos, y se analizan soluciones aplicadas en las islas orientales y occidentales. La enseñanza incorpora también las condiciones estructurales que influyen en la localización y trazado de las galerías, como diques, fracturas y gradientes hidráulicos, así como técnicas modernas de modelización numérica.

Este enfoque local no se limita a los contenidos teóricos. Canarias ha sido, en la última década y media, uno de los focos más activos de formación especializada en aguas subterráneas en terrenos volcánicos.

Desde 2010, se han celebrado más de cien cursos, seminarios y jornadas técnicas sobre hidrogeología insular, con participación de profesorado local e internacional. Algunos de estos cursos han sido posteriormente replicados y adaptados en otras regiones volcánicas, como los archipiélagos de Azores o Cabo Verde.

También en la Universidad de Barcelona, donde hasta la pandemia se organizaba regularmente un curso sobre aprovechamiento y gestión de los recursos hídricos en islas volcánicas, con colaboración canaria directa.

Estos esfuerzos formativos han contribuido a consolidar una masa crítica de profesionales —ingenieros, hidrogeólogos y gestores— con competencias específicas para enfrentar las particularidades de los sistemas acuíferos en islas oceánicas.

Más allá del impacto local, esta capacidad técnica ha facilitado la transferencia de conocimiento hacia otros territorios insulares, reforzando el papel de Canarias como referente académico y operativo en la gestión del agua en entornos volcánicos aislados.

La afirmación de que en Canarias no se enseña adecuadamente cómo se construye una galería de agua, cómo se perfora un pozo profundo o cómo se comporta un acuífero volcánico no se sostiene ante la evidencia curricular, docente y técnica acumulada en los últimos 20 años.

13.8. Regeneración, reutilización y recarga

La reutilización del agua es uno de los pilares para avanzar hacia un modelo hidrológico más circular y resiliente en Canarias.

En un territorio donde la presión sobre los acuíferos es alta y la producción de agua desalinizada implica elevados costes energéticos, las aguas regeneradas representan una fuente complementaria con alto potencial para usos no potables, especialmente en agricultura, zonas verdes y recarga artificial.

La reutilización del agua en Canarias continúa estando muy por debajo de sus posibilidades reales, tanto desde el punto de vista técnico como normativo.

Pese a que en islas como Tenerife, Lanzarote o Gran Canaria se han desarrollado redes de distribución de agua regenerada, su alcance territorial sigue siendo limitado, y una parte relevante del parque de depuración aún no dispone de tratamiento terciario operativo o consolidado.

Esta brecha tecnológica se ve agravada por una serie de reticencias persistentes —tanto sociales como administrativas— que frenan su incorporación estructural a la planificación hídrica.

Mientras no se superen estos obstáculos, la reutilización seguirá siendo una opción marginal, desaprovechando una herramienta estratégica para la adaptación al cambio climático y la mejora de la eficiencia del sistema.

A ello se suma el escaso desarrollo de prácticas de recarga artificial de acuíferos, a pesar de tratarse de una medida ampliamente reconocida para mejorar la disponibilidad de agua subterránea y proteger frente a la intrusión salina.

En Canarias, la recarga podría jugar un papel estratégico en determinadas unidades hidrogeológicas con alta vulnerabilidad y baja renovación natural, siempre que se aplique bajo control técnico riguroso.

Líneas de acción prioritarias:

- Impulsar el uso de aguas regeneradas en agricultura, parques públicos, limpieza urbana y recarga de acuíferos, asegurando la calidad microbiológica y química mediante controles sistemáticos, y garantizando la trazabilidad del recurso desde la EDAR hasta el usuario final. La normativa europea (Reglamento UE 2020/741) y el nuevo Real Decreto 47/2022 proporcionan el marco legal para ello.
- Modernizar las estaciones depuradoras existentes, incorporando tratamientos terciarios en todas las islas, más allá de los polos turísticos. La inversión pública debe priorizar aquellas EDAR con mayor potencial de reutilización y aquellas situadas en comarcas agrícolas dependientes de acuíferos sobreexplotados.
- Desarrollar proyectos piloto de recarga artificial en acuíferos vulnerables, combinando aguas regeneradas, excedentes de desalinización de agua de mar o escorrentías depuradas, y siempre precedidos de estudios hidrogeológicos detallados que evalúen la viabilidad técnica, el riesgo de contaminación y la capacidad de infiltración del medio.
- Incorporar técnicas basadas en soluciones naturales, como humedales artificiales, fitodepuración o biofiltros en entornos rurales, especialmente donde las soluciones centralizadas no sean viables. Estas tecnologías permiten mejorar la calidad del agua con bajo coste energético y alta integración paisajística.
- Establecer incentivos económicos y normativos para el uso de agua regenerada, incluyendo tarifas diferenciadas, ayudas a la conexión de redes secundarias y exenciones fiscales para comunidades de regantes que incorporen este recurso en su modelo de gestión.

En los territorios insulares, regenerar el agua no representa una alternativa de futuro, sino una necesidad estructural para sostener el equilibrio hídrico y reducir la dependencia de fuentes convencionales. La consolidación de un sistema de reutilización funcional y robusto exige mucho más que infraestructuras adecuadas: requiere afrontar barreras técnicas persistentes, superar resistencias sociales arraigadas y revisar marcos normativos aún fragmentados.

Solo mediante un enfoque integrado —capaz de vincular de forma coherente cantidad, calidad y sostenibilidad en el tiempo— será posible desplegar todo el potencial de la reutilización como eje estratégico de la gestión del agua.



Fuente: Juan C. Santamarta (2022)

Figura 9.16. Depuradora de aguas residuales de pequeño tamaño en las Islas Canarias

Para cerrar este apartado, conviene subrayar que no es posible articular una política seria de reutilización del agua en Canarias sin enfrentar, de forma explícita, el problema estructural de la depuración. La persistencia de más de un centenar de vertidos no autorizados en islas como Tenerife —muchos de ellos sin tratamiento adecuado o directamente sin tratamiento— revela un incumplimiento sostenido de la normativa y un riesgo ambiental difícilmente justificable.

Mantener esta situación implica prolongar un modelo de gestión insostenible, con consecuencias directas sobre la salud pública, los ecosistemas marinos y la habitabilidad del litoral. Avanzar hacia el cierre efectivo del ciclo del agua requiere tanto expandir la regeneración como asegurar, sin excepciones, que toda agua residual sea correctamente tratada antes de su vertido o reutilización.

13.9. Digitalización y control del ciclo del agua

La digitalización del ciclo urbano del agua constituye una de las herramientas más eficaces para mejorar el control, la eficiencia y la transparencia en la gestión del recurso, especialmente en entornos insulares con infraestructuras dispersas, redes envejecidas y pérdidas significativas.

Una de las tecnologías clave es la implantación de sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), que permiten la supervisión y el control remoto de infraestructuras hidráulicas en tiempo real, facilitando el seguimiento continuo de caudales, presiones, niveles, consumos y otras variables críticas.

Su aplicación, junto con la sectorización hidráulica, debe considerarse una inversión estratégica en municipios con rendimientos de red inferiores al 75 %, que en Canarias son numerosos.

Paralelamente, es urgente disponer de un sistema unificado de geolocalización y censado de captaciones, conducciones, vertidos y emisarios, tanto públicos como privados, que permita conocer con precisión la estructura real del sistema.

Las auditorías periódicas de eficiencia hidráulica, con carácter obligatorio, deben integrarse en los planes hidrológicos insulares y condicionarse a la recepción de fondos públicos.

También, el desarrollo de plataformas insulares de datos abiertos que integren información meteorológica, hidrológica, calidad del agua y estado de las infraestructuras permitiría mejorar la gobernanza, favorecer la participación ciudadana y fortalecer la toma de decisiones basada en evidencias.

En territorios como Canarias, donde la gestión del agua es estructuralmente compleja, la digitalización no es una opción técnica, sino un requisito de sostenibilidad.

Algunas propuestas planteadas son:

- Sectorización hidráulica y control en tiempo real de caudales, presiones, fugas y consumos mediante sistemas SCADA[11] en redes urbanas.
- Geolocalización y censado unificado de captaciones, conducciones y vertidos, incluyendo las privadas.
- Revisión sistemática de rendimientos de red, con auditorías periódicas obligatorias, especialmente en municipios con pérdidas superiores al 25 %.
- Plataformas insulares de datos abiertos que integren hidrología, meteorología, calidad y estado de las infraestructuras.

[11] Sistema SCADA: plataforma informática que permite supervisar y controlar a distancia procesos industriales (p. ej., redes de bombeo o plantas de tratamiento), registrando en tiempo real datos de sensores y actuando sobre equipos.

13.10. Inversión pública y equidad territorial

El reequilibrio territorial en la gestión del agua en Canarias exige una inversión pública planificada y sensible a las desigualdades estructurales entre municipios, comarcas e islas.

Muchas redes de distribución presentan pérdidas superiores al 40 %, especialmente en pequeños municipios con recursos limitados para afrontar su renovación.

Resulta imprescindible activar un plan de choque regional que priorice estas zonas con mayor ineficiencia hidráulica, donde la recuperación de caudales puede ser más rentable que la creación de nueva oferta.

En paralelo, conviene impulsar líneas de apoyo específicas —tanto en forma de bonificaciones como de asistencia técnica— para facilitar la implantación de pequeñas plantas desalinizadoras alimentadas por energías renovables en zonas rurales, núcleos dispersos o islas menores. En estos contextos, donde la economía de escala no justifica infraestructuras centralizadas, las soluciones descentralizadas pueden ofrecer una respuesta viable y resiliente.

Al mismo tiempo, la insularidad no debe concebirse como una limitación estructural, sino como una oportunidad para consolidar alianzas estratégicas entre archipiélagos volcánicos que comparten retos similares desde el punto de vista hidrogeológico y climático.

Canarias está en condiciones de intensificar su cooperación científica y técnica con regiones como Azores, Madeira, Cabo Verde o Hawái, promoviendo una red internacional de conocimiento aplicada a la gestión del agua en territorios especialmente vulnerables, como ya se está haciendo en los proyectos Interreg MAC (2021-2027).

A su vez, se propone la creación de un fondo público insularizado para proyectos de eficiencia agrícola, dirigido a apoyar a comunidades de regantes con escasa capacidad de inversión, evitando que el acceso al recurso dependa del poder económico del usuario.

Algunas propuestas:

- Un plan de choque para renovación de redes de distribución, priorizando los municipios con mayores pérdidas.
- Fondo público insularizado para proyectos de eficiencia agrícola, apoyando comunidades de regantes con menos capacidad económica.
- Bonificaciones y ayudas para pequeñas desalinizadoras renovables en entornos rurales o insulares de difícil acceso a las aguas subterráneas.
- Transferencia tecnológica con otros archipiélagos volcánicos (Azores, Madeira, Cabo Verde, Hawái) mediante redes de cooperación científica.

13.11. Adaptación mediante Soluciones Basadas en la Naturaleza, digitalización y gobernanza del agua

La respuesta al nuevo escenario hídrico en Canarias pasa por transitar hacia un modelo más resiliente, descentralizado y adaptado al territorio. Tres ejes emergen como vectores de transformación.

En primer lugar, las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN), como la restauración del monteverde, la reforestación de zonas de recarga o la conservación de bancales y suelos agrícolas tradicionales, permiten aumentar la infiltración, reducir la escorrentía y mejorar la calidad del agua, con intervenciones de bajo coste y alta rentabilidad ecológica. Estas medidas, sin embargo, exigen continuidad, apoyo institucional y coherencia con la planificación territorial.

En segundo lugar, la digitalización se ha consolidado como herramienta clave: la incorporación de sensores, sistemas de telegestión y modelos predictivos en redes de distribución y piezometría freática ya está siendo aplicada por algunos consejos insulares, permitiendo una gestión más eficiente, anticipación de riesgos y reducción de pérdidas.



Fuente: Juan C. Santamarta (2022)

Figura 9.17. Depósito de agua forestal que recoge el agua de lluvia en la isla de El Hierro

La reforma de la gobernanza requiere integrar de forma efectiva a todos los actores —usuarios, administraciones, operadores y ciudadanía— en los procesos de planificación y gestión del agua.

La sostenibilidad no puede entenderse como un mero cumplimiento normativo, sino como un principio operativo que guíe decisiones, coordine esfuerzos y priorice la gestión sobre la tramitación. Solo combinando estos tres enfoques —naturaleza, tecnología y gobernanza— podrá avanzarse hacia una verdadera adaptación estructural en el uso del recurso hídrico en el archipiélago.

Frente a este panorama, se están desarrollando líneas de respuesta que, si bien aún incipientes, apuntan a una transformación del modelo.

- Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN): la restauración de monteverde, la reforestación de zonas de recarga y la conservación de suelos agrícolas tradicionales permiten aumentar la infiltración, reducir la escorrentía y mejorar la calidad del agua. Son intervenciones de bajo coste y alta rentabilidad ecológica, pero requieren continuidad y apoyo institucional.
- Digitalización y control en tiempo real: el uso de sensores, telegestión y modelos predictivos facilita una gestión más eficiente del recurso, reduce pérdidas y permite anticipar situaciones de riesgo. Varios consejos insulares ya han empezado a aplicar estas herramientas en redes de distribución y control de niveles freáticos.
- Reforma de la gobernanza: la integración efectiva de todos los actores —usuarios, administraciones, operadores, ciudadanía— es imprescindible. La planificación debe ir más allá del cumplimiento normativo y orientarse hacia la sostenibilidad operativa y ecológica. Es decir, menos papeles y más gestión.

13.12. Propuestas de gestión integrada y sostenibilidad

El sistema hídrico de las Islas Canarias es fruto de una compleja interacción entre condiciones físicas extremadamente limitantes y una histórica capacidad de adaptación técnica e institucional.

El agua, más que un recurso, ha definido la ocupación del territorio, la organización agrícola y la identidad insular.

Hoy, ese equilibrio está seriamente comprometido. La fragmentación hidrogeológica —acuíferos discontinuos, materiales volcánicos heterogéneos y recarga irregular— impide la aplicación de soluciones uniformes.

El cambio climático intensifica esta fragilidad, reduciendo las lluvias, aumentando la evapotranspiración y exacerbando los eventos extremos. Las consecuen-

cias ya son visibles: descenso de niveles piezométricos, degradación de la calidad del agua y encarecimiento del suministro.

Algunas medidas propuestas:

- Potenciar el uso de aguas regeneradas, con garantías sanitarias y calidad ajustada a cada uso.
- Limitar las extracciones en acuíferos sensibles, mediante cupos, cierres progresivos o penalizaciones.
- Asegurar el acceso equitativo al agua, evitando que el precio se convierta en una barrera para los usos esenciales.
- Fomentar el autoconsumo hídrico en viviendas, fincas y empresas, recuperando técnicas tradicionales o apoyando la innovación descentralizada.
- Incorporar el cambio climático como variable de planificación estructural, no como un apéndice final de los diagnósticos técnicos.



Fuente: Juan C. Santamarta (2023)

Figura 9.18. Balsa de agua en el barranco de Las Angustias que recoge las aguas superficiales

El cambio climático actúa como multiplicador de las tensiones existentes. Menos lluvias, más evaporación, eventos extremos. A corto plazo, esto se traduce en pérdida de recarga, deterioro de acuíferos y aumento del coste del agua. A medio

plazo, compromete la seguridad hídrica de la población, la viabilidad del sector primario y la sostenibilidad del modelo turístico.

Pero también hay margen para actuar. La recuperación de técnicas tradicionales —nateros, enarenados, captación de lluvia horizontal— convive con soluciones tecnológicas avanzadas como la desalinización de agua de mar eficiente, la telegestión y la regeneración de aguas. La clave está en articular estas piezas bajo una planificación hidrológica más flexible, menos fragmentada, con visión ecosistémica y participación activa

El cambio climático no puede seguir relegado al epígrafe final de los informes técnicos. Debe asumirse como una variable estructural de la planificación hidrológica, con capacidad real para orientar la asignación de recursos, las decisiones de inversión y los escenarios de demanda.



Fuente: Juan C. Santamarta (2021)

Figura 9.19. Aljibe en la isla de El Hierro

El futuro hídrico del archipiélago no dependerá de grandes infraestructuras ni de soluciones providenciales, sino de la capacidad colectiva para integrar tecnologías avanzadas con saberes locales, enfoques ecosistémicos con gestión participativa, y un marco normativo coherente con una voluntad política sostenida.

Mantener el agua como bien común implica reconocer sus límites y gobernarla con responsabilidad, no solo técnica, sino intergeneracional.

14. Conclusión: la urgencia de actuar con ciencia, justicia y visión insular

En un contexto como el canario, donde la presión sobre los recursos se ha intensificado hasta alcanzar límites físicos, energéticos y sociales, continuar operando bajo lógicas del siglo XX ya no es viable.

La transición hídrica no es una opción teórica: es una necesidad urgente y, sobre todo, un proyecto que exige rigor técnico, liderazgo institucional y una visión de largo plazo.

La gestión del agua en Canarias se encuentra ante un umbral crítico. El problema no puede reducirse a una cuestión técnica ni interpretarse como un simple desajuste temporal entre oferta y demanda.

Lo que está en juego es la viabilidad de un modelo que, durante décadas, ha descansado sobre la explotación intensiva de los acuíferos y una red hidráulica fragmentada, adaptada más a soluciones puntuales que a una estrategia de largo recorrido.

Hoy ese modelo muestra signos claros de agotamiento estructural, intensificados por el avance del cambio climático, el deterioro progresivo de las masas de agua subterránea y la presión creciente de actividades económicas y urbanas que, en muchos casos, siguen operando de espaldas a la realidad hídrica del territorio.

La respuesta ya no puede apoyarse en medidas incrementales ni en soluciones centradas exclusivamente en la oferta. La magnitud y complejidad de los retos exigen una transformación profunda del sistema: una transición hídrica integral, planificada con base científica, legitimada socialmente y ejecutada con responsabilidad institucional.

Canarias no parte de cero. Existen conocimientos hidrogeológicos consolidados, capacidades técnicas acumuladas y experiencias exitosas —aunque puntuales— en ámbitos como la reutilización de aguas, la digitalización de redes o la recuperación de técnicas agrícolas tradicionales.

El problema no es la falta de innovación, sino la ausencia de una estructura de gobernanza que conecte estos esfuerzos, los escale y les dé coherencia territorial y temporal.

El agua ha sido, y sigue siendo, un eje estructurante del paisaje, de la economía y de la identidad insular. Pero su gestión actual refleja un desfase entre lo que sabemos y lo que hacemos. Las decisiones siguen condicionadas por inercias del

pasado, por intereses sectoriales o por una visión fragmentada que ignora los límites ecológicos del territorio.

Es necesario un cambio de paradigma que incorpore tres principios rectores:

- Ciencia: La planificación hidrológica debe sustentarse en datos actualizados, modelos predictivos y análisis coste-beneficio realistas. Las islas ya disponen de herramientas como SICMA (Santamarta et al., 2025), redes de control piezométrico e investigaciones específicas sobre vulnerabilidad y recarga de acuíferos. Ignorarlas o minimizar su valor técnico supone una irresponsabilidad institucional. Diferentes modelos hidrológicos de la isla de Tenerife, de hidrología superficial, lluvia horizontal, aguas subterráneas como: MSPAN, MHSup, MFS, que hemos comentado a largo de los capítulos.
- Visión insular: Cada isla del archipiélago presenta condiciones hidrogeológicas, climáticas y socioeconómicas propias que exigen diagnósticos y respuestas adaptadas a su realidad. No obstante, muchos de los desafíos son compartidos —desde la escasez estructural hasta la fragmentación institucional— y requieren una planificación hídrica más coordinada, capaz de superar la actual lógica de compartimentos estancos entre consejos insulares, operadores y administraciones sectoriales. Sin mecanismos eficaces de cooperación interinsular, la respuesta será parcial e ineficiente, y se perderán oportunidades clave para optimizar recursos y escalar soluciones.

Además, hay una dimensión temporal que no puede posponerse. La ventana de oportunidad para actuar con eficacia frente a los impactos del cambio climático se está cerrando. Las proyecciones apuntan a un descenso adicional de la recarga natural, un aumento de la evapotranspiración y mayor exposición a eventos extremos. No anticiparse implicará asumir costes crecientes —económicos, sociales y ecológicos— y reducir la resiliencia del archipiélago.

En este escenario, la comunidad científica ha cumplido su papel: ha diagnosticado con rigor, evaluado impactos y formulado propuestas técnicamente fundamentadas. No tiene la verdad absoluta, ni pretende tenerla, pero sí aporta datos, evidencias y marcos de análisis imprescindibles para orientar decisiones responsables en contextos complejos.

Lo que sigue faltando es voluntad política y coherencia institucional para integrar ese conocimiento en la acción pública.

A ello se suma la fragilidad del debate social, desplazado con frecuencia por simplificaciones y discursos distorsionadores: se afirma que "el agua subterránea sobra", que "la desalación es corrupta", que "los científicos no tienen ni idea", o

que "los fondos europeos de investigación se los regalan a los científicos de Canarias". Estas narrativas, además de infundadas, erosionan la confianza en las instituciones, bloquean la deliberación informada y deslegitiman cualquier intento de gobernanza compartida.

Gestionar el agua en Canarias, a partir de ahora, exige reconocer que los márgenes de maniobra se han estrechado. Ya no bastan las soluciones aparentes ni las respuestas aisladas: se requiere asumir la complejidad del problema y abordarlo con planificación adaptativa, participación cualificada y continuidad institucional. Y, sobre todo, comprender que esta transición no representa un coste evitable, sino una inversión ineludible en el futuro ambiental, económico y social del archipiélago.

Canarias fue capaz de construir, en condiciones difíciles, un modelo hidráulico singular, adaptado a la aridez, la insularidad y la fragmentación territorial. Hoy, el desafío es construir otro modelo, con el mismo nivel de ingenio, pero orientado a la sostenibilidad, la equidad y la corresponsabilidad. Seguir aplazando las decisiones estructurales no solo pone en riesgo el recurso: compromete también el pacto social que ha garantizado su gestión colectiva durante décadas.

15. Bibliografía y referencias

Alcalá, F. J., & Custodio, E. (2007). Recarga por la lluvia a los acuíferos costeros españoles mediante balance de ión cloruro en el suelo. En Tecnología de la Intrusión de Agua del Mar en Acuíferos Costeros (Vol. 1, pp. 855–869). Instituto Geológico y Minero de España. ISBN 978-84-7840-712-5.

Almansa, P., & Martínez de Simón, V. (2007). La titularidad de las aguas subterráneas en el marco del dominio público hidráulico: especial referencia al régimen transitorio. Revista de Administración Pública, (173), 201–232.

Álvarez Rey, J. M., Domínguez Gómez, M., Domínguez Pérez, J., Guzmán Álvarez, P., Martín Pulido, F., Sánchez Martel, R., & Santamaría Ortega, J. M. (2023). Gestión de los recursos hídricos en Canarias [Trabajo Fin de Máster, Universidad Internacional de La Rioja]. Máster de Formación Permanente en Problem Solving.

ARSINOE-CS5. (2023a). 1ª sesión del Living Lab en Canarias: Diagnóstico participativo sobre agricultura y cambio climático. Universidad de La Laguna.

ARSINOE-CS5. (2023b). SIA Workshop 2 Reporting. Future Narratives and Stakeholder Engagement in the Canary Islands. Universidad de La Laguna.

ARSINOE. (2023). Climate-resilient regions through systemic solutions and innovations (ARSINOE Project). https://arsinoe-project.eu/

Consejo Insular de Aguas de Tenerife. (2024). Propuesta de Resolución para la declaración de emergencia hídrica en Tenerife (Expte. 1342-AG). Boletín Oficial de Canarias, Nº 090, 8 de mayo de 2024.

Consejo Insular de Aguas de Tenerife. (2023). Plan Hidrológico Insular de Tenerife. 3er ciclo 2021-2027. CIATF.

Cruz-Pérez, N., Rodríguez-Alcántara, J. S., Koronaiou, V. L. P., Jančula, A., Rodríguez-Martín, J., García-Gil, A., Fontes, J. C., & Santamarta, J. C. (2024). SWOT Analysis of the Benefits of Hydropower Energy in Four Archipelagos. Civil Engineering Journal (Iran), 10(7), 2370-2383. https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-07-019

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

Cruz-Pérez, N., & Santamarta Cerezal, J. C. (2021). La huella ecológica del agua en las Islas Canarias (1ª ed.). Universidad de La Laguna. https://doi.org/10.25145/b.HuellaEcoCanarias.2021

Cruz-Pérez, N., Rodríguez-Alcántara, J. S., Rodríguez-Martín, J., Moujan, C., La Jeunesse, I., & Santamarta, J. C. (2023). Living labs as participatory and community learning applied to regional development. EDULEARN Proceedings, 6421–6424. https://doi.org/10.21125/EDULEARN.2023.1707

Cruz Pérez, N., Santamarta Cerezal, J. C., García, C., Rodríguez-Lozano, P., & Tirado, D. (2021). La huella de carbono en las infraestructuras hidráulicas de las Islas Baleares. Universidad de La Laguna; Universitat de les Illes Balears; Consejería de Medio Ambiente y Territorio de las Illes Balears. https://doi.org/10.25145/b.CarbonoBaleares.2021 - ISBN 978-84-09-34448-2

Custodio Gimena, E. (2019). Recarga natural a los acuíferos, metodología y soporte de la isotopía del agua: aplicación a la planificación hidrológica y conocimiento de las aguas subterráneas en España (Informe RAEMIA). Iniciativa Digital Politècnica, Universidad Politécnica de Catalunya. https://doi.org/10.5821/ebook-9788498808148

Custodio, E. (2010). Estimation of aquifer recharge by means of atmospheric chloride deposition balance. Contributions to Science, 6(1), 81–97. https://doi.org/10.2436/20.7010.01.86

Custodio, E., & Cabrera Santana, M. C. (2008). Síntesis de la hidrogeología de las Islas Canarias. Geo-Temas, (10), 785–788. Recuperado de https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7777057

Custodio, E. (1978). Geohidrología de terrenos e islas volcánicas. Publicación 128, Centro de Estudios Hidrográficos, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.

Gasco Cavero, S., et al. (2023). First emerging pollutants profile in groundwater of the volcanic active island of El Hierro (Canary Islands). Science of the Total Environment, 872, 162204. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162204

Gasco Cavero, S., et al. (2024). Comparative study of emerging pollutants of interest in the groundwater of the volcanic islands of La Palma and El Hierro (Canary Islands). Science of the Total Environment, 927, 172026. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172026

Gobierno de Canarias. (2024). Datos de déficit pluviométrico y medidas adoptadas en el marco de la Mesa del Agua. Dirección General de Aguas.

Gobierno de Canarias & Ministerio para la Transición Ecológica. (2019a). Acta del Foro de debate de Canarias – Las Palmas de Gran Canaria. Libro Verde de la Gobernanza del Agua en España. Recuperado de http://www.librogobernanzagua.es/

Gobierno de Canarias & Ministerio para la Transición Ecológica. (2019b). Acta del Foro de debate de Canarias – Santa Cruz de Tenerife. Libro Verde de la Gobernanza del Agua en España. Recuperado de http://www.librogobernanzagua.es/

Gobierno de Canarias. (2002). Plan Hidrológico Insular de El Hierro (PHI 2002). Consejería de Obras Públicas.

Gobierno de Canarias. (2015). Plan Hidrológico Insular de El Hierro 2009-2015 (1.er ciclo). Consejería de Agricultura.

Gobierno de Canarias. (2018). Plan Hidrológico Insular de El Hierro 2015-2021 (2.º ciclo). Dirección General de Aguas.

Gobierno de Canarias. (2021). Plan Hidrológico de Lanzarote 2021-2027.

Decreto 86/2002, de 2 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Dominio Público Hidráulico de Canarias.

Del Moral, L., & Hernández-Mora, N. (2015). El futuro de la gestión del agua en España: más allá de la oferta y la demanda. Fundación Nueva Cultura del Agua. https://fnca.eu/images/stories/Documentos/Documentos_de_la_Fundacion/2015_GestionAgua_MasAlyaOfertaDemanda_DelMoral_Hernandez-Mora_FNCA.pdf

Del Moral, L., & Giansante, C. (2000). Water resources and water management in Spain: The role of groundwater. European Water Management, 3(2), 34–42.

Gobierno de Canarias. (2023). Balance energético anual de Canarias. Consejería de Transición Ecológica. Recuperado de https://www.gobiernodecanarias.org/transicionecologica/energia/oecan/es/publicaciones/anuarios/

Hernández-Mora, N., De Stefano, L., & Delgado, A. (2017). Water planning and management after the EU Water Framework Directive. Water Alternatives, 10(1), 72–97. 10.1201/b13078-5

Instituto Tecnológico de Canarias (ITC). (2022). Diagnóstico sobre el ciclo del agua en Canarias. Gobierno de Canarias.

Instituto Tecnológico de Canarias (ITC). (2023). Proyecto DESALRO 2.0. Plataforma experimental de tecnología de desalación de agua de mar por ósmosis inversa de elevada eficiencia energética.

Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. BOE n.º 189, de 8 de agosto de 1985.

Ley 12/1990, de 26 de julio, de Aguas de Canarias.

Maestu, J. (2019). Libro Verde de la Gobernanza del Agua en España: Documento base para el debate. Ministerio para la Transición Ecológica. Disponible en: http://www.librogobernanzagua.es/

Martel, J., & Peñate, B. (2010). Desalación, sostenibilidad y planificación en islas. Instituto Tecnológico de Canarias.

Marouane, B., Dahchour, A., Dousset, S., & Hajjaji, S. (2015). Monitoring of nitrate and pesticide pollution in mnasra, morocco soil and groundwater. Water Environment Research, 87(6), 567-575. https://doi.org/10.2175/106143015x14212658614711

Marrero, R., Alcalá, F., Pérez, N., López, D., Melián, G., Padrón, E., ... & Padilla, G. (2015). Aquifer recharge estimation through atmospheric chloride mass balance at las cañadas caldera, tenerife, canary islands, spain. Water, 7(5), 2451-2471. https://doi.org/10.3390/w7052451

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2023). Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnicos de calidad de las aguas de consumo humano. Boletín Oficial del Estado.

Naranjo, G., Cruz-Fuentes, T., Benavides, A., Cabrera, M. C., Hernández-Quesada, P., Estévez, E., Martín, L. F., & Custodio, E. (2012). Estimación de la recarga natural en la zona noreste del acuífero insular de Gran Canaria mediante el balance de cloruros atmosféricos. En Lambán, L. J., Carceller, T., Valverde, M., & Fernández-Jaúregui, C. (Eds.), Las aguas subterráneas: desafíos de la gestión para el siglo XXI. Asociación Internacional de Hidrogeólogos - Grupo Español.

NATALIE Project. (s.f.). Nature based solutions for water management under climate extremes and land use change. https://www.natalieproject.eu/

Rodríguez-Urrego, D., Cañadillas-Ramallo, D., González-Díaz, B., & Guerrero-Lemus, R. (2022). Analysis of the water-energy nexus applied to an insular system: case study of tenerife. Sustainability, 14(3), 1653. https://doi.org/10.3390/su14031653

Observatorio de la Sostenibilidad de Canarias. (2021). Informe sobre el estado del medioambiente en Canarias. Gobierno de Canarias. Recuperado de https://datosdelanzarote.lztic.com/media/item/docs/InformedeCoyunturaAmbientaldeCanarias2021.pdf

Poncela Poncela, R. (2015). Hidrogeología del sistema acuífero volcánico de La Palma (Islas Canarias) [Tesis doctoral, Universidad de Alicante]. RUA Universidad de Alicante. https://hdl.handle.net/10045/52878

Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de mayo de 2020, relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua.

Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Aguas. BOE n.º 176, de 24 de julio de 2001.

Ríos, I. H., 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

Rodríguez-Alcántara, J. S., et al. (2024). Presence of microplastics in the groundwater of volcanic islands, El Hierro and La Palma (Canary Islands). Journal of Contaminant Hydrology, 263, 104340. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2024.104340

Rodríguez Urrego, D., Cañadillas Ramallo, D., González Díaz, B., & Guerrero Lemus, R. (2023). Análisis del binomio agua-energía en la isla de Tenerife. Universidad de La Laguna.

Rodríguez-Urrego, D., Cañadillas-Ramallo, D., González-Díaz, B., & Guerrero-Lemus, R. (2022). Analysis of the water-energy nexus applied to an insular system: case study of tenerife. Sustainability, 14(3), 1653. https://doi.org/10.3390/su14031653

Ruiz de la Rosa, C. I., García Rodríguez, J. L., Castilla Gutiérrez, C., Santamarta Cerezal, J. C., & Antonova, N. (2019). Agua y turismo en Tenerife: producción, gestión y consumo. Universidad de La Laguna. https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/18353/Agua%20yTurismo%20enTenerife.pdf?sequence=1&isAllowed=y

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 Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (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

Santamarta, J.C., Machín, N., & Cruz-Pérez, N. (2023). Irrigation efficiency in banana crops in the canary islands. The Open Agriculture Journal, 17(1). https://doi.org/10.2174/18743315-v16-e221226-2022-49

Santamarta, Juan Carlos, y Jorge Naranjo Borges. Retos de la gestión forestal y ambiental en las Islas Canarias en el siglo XXI.Madrid: Colegio de Ingenieros de Montes, 2020.

Santamarta, J. C. (2017). Minería del agua en islas y terrenos volcánicos. Análisis hidrológico en explotaciones en la zona sureste de la isla de Tenerife, islas Canarias. Universidad Politécnica de Madrid.

Santamarta, J. C. (2014). Hidrología de las islas volcánicas; singularidades y contribución de la ingeniería forestal. Revista Montes, nº 116, 26-31.

Santamarta, J. C. (2010). 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. Universidad Politécnica de Madrid.

Ruiz-García, A., Carrascosa-Chisvert, M., Mena, V., Souto, R., Rodríguez, J., & Nuez, I. (2019). Groundwater quality assessment in a volcanic mountain range (south of gran canaria island, spain). Water, 11(4), 754. https://doi.org/10.3390/w11040754

Sapriza-Azuri, G., Jódar, J., Navarro, V., Slooten, L. J., Carrera, J., & Gupta, H. V. (2015). Impacts of rainfall spatial variability on hydrogeological response. Water Resources Research, 51(2), 1300–1314. https://doi.org/10.1002/2014WR016168

Sarasúa, J. I., Martínez-Lucas, G., & Lafoz, M. (2019). Analysis of alternative frequency control schemes for increasing renewable energy penetration in El Hierro Island power system. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 113, 807–823. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.06.008

SPA-15 (1975). Estudio científico de los recursos del agua en las Islas Canarias (SPA/69/515). Ministerio de Obras Públicas - Dirección General Obras Hidráulicas/ UNESCO-PNUD.

Pulido-Velázquez, D., García-Aróstegui, J. L., Molina, J.-L., & Pulido-Velázquez, M. (2014). Assessment of future groundwater recharge in semi-arid regions under climate change scenarios: Serral-Salinas aquifer, southeast Spain. Hydrological Processes, 29(6), 1300–1314. https://doi.org/10.1002/hyp.10191

Pulido-Velázquez, D., Collados-Lara, A. J., & Alcalá, F. J. (2018). Assessing impacts of future potential climate change scenarios on aquifer recharge in continental Spain. Journal of Hydrology, 567, 803–819. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.077

Ward, M., Jones, R., Brender, J., Kok, T., Weyer, P., Nolan, B., ... & Breda, S. (2018). Drinking water nitrate and human health: an updated review. Inter-

national Journal of Environmental Research and Public Health, 15(7), 1557. https://doi.org/10.3390/ijerph15071557

Unión Europea. (1991). Directiva 91/676/CEE del Consejo, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura. Diario Oficial de las Comunidades Europeas.

Universidad de La Laguna. (2021, junio 23). La ULL participa en el plan estratégico de transición energética vinculado al agua de las Islas Baleares. https://www.ull.es/portal/noticias/2021/la-ull-participa-en-el-plan-estrategico-de-transicion-energetica-vinculado-al-agua-de-las-islas-baleares/

Capítulo 10
Conclusiones

Juan Carlos Santamarta Cerezal
Noelia Cruz Pérez

Las proyecciones climáticas a lo largo del siglo XXI como consecuencia del cambio climático son alarmantes, como se recoge en el Sexto Informe de Evaluación (AR6) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Las islas son especialmente vulnerables a las crisis climáticas y económicas, y requieren una atención específica debido a su elevada demanda turística y de recursos. En este contexto, es importante conocer cómo evolucionará el clima en las regiones insulares, con el fin de desarrollar estrategias y herramientas para aumentar la resiliencia a los impactos del cambio climático.

La región de Macaronesia, que incluye las Islas Canarias, Madeira, Azores y Cabo Verde, enfrenta importantes desafíos en la gestión de los recursos hídricos debido a su geografía y clima particulares. La alta dependencia de la precipitación, la escasez de fuentes naturales de agua dulce y el aumento de la demanda, por parte de la población, la agricultura y el turismo, se ven agravados por los efectos del cambio climático. En concreto, se prevé un aumento de la temperatura, una disminución adicional de las precipitaciones y un incremento en la escasez hídrica. Para garantizar la sostenibilidad a largo plazo, se requiere la adopción de prácticas de gestión del agua más sostenibles.

Las proyecciones climáticas en las Islas Canarias también presentan un panorama complejo, pues se prevé un importante aumento de las sequías, reducción de la biodiversidad y declive económico; lo cual exige una exploración urgente y específica de la gestión de los recursos hídricos útiles y la renovación de las capacidades críticas.

A través de la metodología FICLIMA se han obtenido resultados valiosos sobre la evolución de distintas variables climáticas con una alta resolución (100m x 100m); pudiendo observar las tendencias de temperatura, precipitación o aridez a escalas muy reducidas. Alcanzar dicha resolución climática ha supuesto un importante avance en la gestión hídrica de las Islas Canarias, pues dada su orografía y particularidades climáticas, como la influencia de los vientos alisios, se manifiestan una gran variedad de gradientes incluso dentro de las propias islas.

En cuanto a los resultados relativos a la **temperatura**, se muestran aumentos significativos en las siete islas, siendo La Gomera la que experimenta los mayores incrementos, mientras que Lanzarote y Fuerteventura registran aumentos menores debido a sus características geográficas. Para todas las islas, el escenario intermedio SSP2-4.5 prevé aumentos de temperatura superiores a 1,5 °C para finales de siglo. Del mismo modo, el escenario más severo SSP5-8.5 prevé aumentos de temperatura en todas las islas superiores a 2 °C hacia el año 2100. Los aumentos pueden ser drásticos, como en el caso de La Gomera, donde el escenario SSP5-8.5 prevé incrementos de hasta 4,4ºC.

Por otro lado, los modelos climáticos proyectan una disminución de las **precipitaciones** anuales conforme avance el presente siglo, junto con una mayor variabilidad y la intensificación de fenómenos extremos, como sequías prolongadas y lluvias torrenciales. Se anticipan reducciones moderadas en las islas occidentales y descensos más severos; así como una disminución de hasta un 30% en escenarios extremos en las islas orientales, particularmente en Fuerteventura y Lanzarote. Estas tendencias exacerban las presiones sobre los recursos hídricos, especialmente en zonas con escasez preexistente.

Los resultados también predicen un aumento de la **aridez** en todas las Islas Canarias hacia el año 2100. Las islas occidentales, más húmedas, muestran una tendencia más pronunciada en el índice de aridez. La Palma es la isla con mayores reducciones del índice a finales del presente siglo, con disminuciones de -0,3 a -0,6 en el valor del índice. Las islas orientales, caracterizadas por ser más áridas en la actualidad, muestran descensos menores en el índice de aridez. Las islas de Fuerteventura y Lanzarote muestran las menores reducciones, desde -0,1 hasta -0,2.

La tendencia general observada en las proyecciones a través de la metodología FICLIMA apunta a una disminución progresiva del **balance hídrico**, agravada por el incremento de las tasas de evapotranspiración y por niveles de precipitación estables o decrecientes. El análisis también pone de relieve cómo estos cambios están influenciados por la altitud, con áreas costeras que muestran un balance hídrico prácticamente nulo. En el caso de El Hierro, se proyecta una reducción del balance hidrológico de entre el 50 % y el 75 % hacia finales de siglo. Por su parte, se prevé que Gran Canaria experimente un agotamiento casi total de sus reservas hídricas. Las islas orientales, históricamente caracterizadas por sus condiciones áridas, ya presentan un balance hidrológico extremadamente bajo, lo que hace especialmente preocupante el aumento previsto del estrés hídrico.

En cuanto a la evolución del índice SPEI, se refleja un escenario creciente de **sequía** en el conjunto del territorio insular, con una evolución temporal y espacial claramente diferenciada. Las proyecciones indican que, a medida que

avance el siglo XXI, los indicios de estrés hídrico se intensificarán, especialmente bajo escenarios de emisiones elevadas y en plazos de tiempo prolongados. Aunque el índice en su conjunto muestra una tendencia a la baja, con todas las islas exhibiendo valores negativos, es importante señalar la presencia de variaciones significativas entre las distintas regiones. En las islas occidentales, las condiciones climáticas más húmedas y una estructura ecológica más robusta, caracterizada por grandes altitudes, bosques nubosos y una mayor capacidad de retención de agua, parecen ofrecer cierta resistencia a la intensificación de la sequía. Por el contrario, las islas orientales se enfrentan a un escenario más preocupante. La baja altitud, la escasa vegetación y la aridez estructural que caracterizan a estas islas las sitúan en una posición más frágil frente a los efectos del cambio climático. En concreto, se prevé que Fuerteventura y Lanzarote experimenten una escalada de las condiciones de sequía que, en algunos casos, podrían superar los umbrales críticos para la sostenibilidad de sus recursos hídricos naturales.

Los resultados muestran la necesidad de actuar urgentemente, ya que los impactos del cambio climático influirán en el desarrollo y la disponibilidad de los recursos naturales, hídricos y energéticos de las Islas Canarias. En este sentido, se evidencia la necesidad de llevar a cabo investigaciones específicas en cada isla, dadas sus peculiares vulnerabilidades, para poner en marcha estrategias de adaptación eficaces. La mejora de los modelos de proyección climática permite una mayor comprensión en torno a la incertidumbre asociada a las tendencias ambientales y su influencia en las regiones insulares. Con ello, la gestión sostenible del agua y la preservación de los ecosistemas permitirían a estas comunidades insulares ser más resistentes frente a los retos que ofrece el cambio climático.

Uno de los principales desafíos es la reducción de la recarga de acuíferos, fundamental para el abastecimiento de agua en las islas. La disminución de precipitaciones podría afectar los procesos naturales de recarga, incrementando la extracción y, con ello, el riesgo de salinización de los acuíferos costeros. Además, la mayor frecuencia de lluvias intensas puede generar escorrentía superficial en lugar de infiltración, limitando aún más la recarga subterránea, con graves consecuencias para las áreas agrícolas dependientes del riego.

También preocupa el estado de la infraestructura hídrica, a menudo obsoleta, que podría no estar preparada para afrontar las nuevas condiciones climáticas. Por ello, se requiere un conjunto de estrategias de gestión que incluyan la modernización y expansión de infraestructuras, el fomento del uso de aguas recicladas y desalinizadas, así como prácticas sostenibles de extracción de agua subterránea. Asimismo, la incorporación de tecnologías innovadoras, como la recarga gestio-

nada de acuíferos y el monitoreo meteorológico en tiempo real, pueden contribuir significativamente a mitigar los efectos de la disminución de precipitaciones y mejorar la gestión de los recursos hídricos.

Mediante la adopción de políticas adaptativas, Canarias puede mejorar su capacidad para afrontar la escasez hídrica futura y garantizar la viabilidad a largo plazo tanto de los ecosistemas naturales, como de las actividades humanas. En este contexto, será fundamental fomentar la cooperación regional, avanzar en la investigación en previsión hidrológica e integrar principios de resiliencia climática en los marcos normativos para asegurar los recursos hídricos ante un clima cambiante.

Glosario

Acuífero insular volcánico

Sistema hidrogeológico característico de las islas oceánicas, formado por coladas basálticas superpuestas, diques y materiales piroclásticos. Presenta una alta heterogeneidad estructural y anisotropía hidráulica, lo que condiciona su capacidad de almacenamiento y transmisión del agua.

Aguas no convencionales

Conjunto de fuentes de agua que no proceden del ciclo natural directo, como la desalinización de agua de mar, la reutilización de aguas residuales tratadas o la captación de niebla. Su uso se ha generalizado en regiones con estrés hídrico estructural como Canarias.

Anomalía climática

Desviación significativa de un parámetro meteorológico respecto a su media histórica. En Canarias, las anomalías de precipitación y temperatura son utilizadas como indicadores de cambio climático.

Balance hídrico

El balance hídrico representa el equilibrio entre las aportaciones procedentes de la lluvia y/o el riego y la suma de la evapotranspiración, el caudal de los arroyos y las pérdidas en las aguas subterráneas. Su cálculo se puede aplicar a distintos periodos temporales. El balance hídrico mensual puede aproximarse de forma simplificada como la disponibilidad de agua en el suelo a través de las variables de precipitación entrante y evapotranspiración. Esta aproximación es potencial y solo depende del clima; de modo que si el suelo pierde toda su reserva, el balance hídrico toma el valor 0.

El principio del balance hídrico se utiliza en varios procesos hidrológicos, sobre todo en el proceso de riego, al contabilizar la adición y sustracción de agua con el fin de conocer el déficit hídrico del suelo para las plantas.

Captación de niebla o lluvia horizontal

Mecanismo de aporte hídrico basado en la intercepción directa de nubes orográficas por superficies vegetales o estructuras artificiales. En Canarias, su papel es

relevante en zonas de monteverde, donde contribuye significativamente al régimen hídrico local.

Ciclo integral del agua

Conjunto de fases que abarcan la captación, potabilización, distribución, uso, recogida, depuración y, en su caso, reutilización del agua. Su gestión eficiente requiere coordinación técnica, administrativa y normativa, especialmente en sistemas insulares.

Coeficiente de escorrentía

Relación entre la precipitación total y el volumen de agua que fluye superficialmente. Es un parámetro clave para estimar caudales de avenida y pérdidas por infiltración.

Contaminantes emergentes

Sustancias químicas o biológicas detectadas recientemente en medios hídricos, cuyo impacto ambiental y sanitario aún no está completamente caracterizado. Incluyen fármacos, productos de cuidado personal, microplásticos y compuestos hormonales.

Crisis hídrica estructural

Situación prolongada de desequilibrio entre la oferta y la demanda de agua, agravada por la obsolescencia de las infraestructuras, la sobreexplotación de acuíferos y la debilidad institucional.

Desalinización de agua de mar

Proceso físico-químico, principalmente mediante ósmosis inversa, que permite obtener agua dulce a partir de agua salada. Representa una fuente no convencional clave en Canarias.

Desertificación

Proceso de degradación ambiental en zonas áridas y semiáridas como consecuencia de la interacción entre la variabilidad climática y las actividades humanas. Se manifiesta por pérdida de vegetación, erosión, salinización y disminución del potencial productivo del suelo.

Downscaling estadístico (reducción de escala)

Método que permite traducir la información climática de modelos globales a escalas espaciales más pequeñas, ajustándola a características locales como la to-

pografía o la vegetación. En Canarias se ha aplicado para obtener proyecciones a resoluciones de 100x100 m, imprescindibles para la planificación hídrica insular.

Emergencia hídrica

Declaración institucional que permite activar medidas extraordinarias ante un déficit grave de recursos, como la restricción de usos, la activación de pozos de reserva o el incremento de la producción en desaladoras.

ERA5

Base de datos climática generada por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF), que proporciona reanálisis atmosféricas a alta resolución temporal y espacial. Es utilizada como referencia observacional para validar modelos climáticos y proyecciones regionales.

Escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways)

Trayectorias de desarrollo socioeconómico que se utilizan junto con los modelos climáticos (CMIP6) para proyectar distintos futuros posibles en función del nivel de emisiones de gases de efecto invernadero. Van desde SSP1-2.6 (bajo impacto climático) hasta SSP5-8.5 (alto impacto).

Estrés hídrico

Situación en la que la demanda de agua supera la disponibilidad en cantidad o calidad durante un periodo determinado. En las islas Canarias, el estrés hídrico se ha intensificado por la combinación de sobreexplotación, disminución de la recarga y efectos del cambio climático.

Evapotranspiración de referencia (ETo)

El término de evapotranspiración se refiere a la combinación de dos procesos, tanto el proceso físico de pérdida de agua por evaporación, así como el proceso de evaporación del agua absorbida por las plantas.

Para el cálculo de esta variable, se pueden emplear diversas ecuaciones, como es el caso del modelo «Penman-Monteith FAO98». En él se incluyen todos los flujos de intercambio de energía en la interfase suelo-atmósfera, incluyendo el cambio de estado del agua de líquido a vapor, ya sea directamente por evaporación en el suelo o por transpiración en las plantas.

Gestión de la demanda hídrica

Conjunto de medidas orientadas a optimizar el uso del recurso disponible antes de aumentar la oferta. Incluye campañas de concienciación, tarifas progre-

sivas, control de fugas y tecnologías eficientes en agricultura y abastecimiento urbano.

Gobernanza del agua

Sistema de normas, instituciones y procesos mediante los cuales se toman decisiones sobre el agua. Abarca tanto la gestión pública como la participación de actores sociales y privados.

Horizontes temporales climáticos

Periodos utilizados para proyectar cambios futuros en variables climáticas. Habitualmente se estructuran en: futuro próximo (2021–2050), medio (2041–2070) y lejano (2071–2100).

Huella hídrica

Indicador del volumen total de agua dulce utilizado directa o indirectamente por una actividad, producto o territorio. Incluye componente azul (agua consumida), verde (agua de lluvia incorporada) y gris (volumen necesario para diluir contaminantes).

Huella ecológica del agua

Indicador que mide el volumen total de agua dulce consumida directa e indirectamente en la producción de bienes y servicios, relacionándolo con la sostenibilidad del sistema hídrico.

Índice de aridez (IA)

El índice de aridez se emplea para caracterizar la aridez de un lugar. Junto con la temperatura media, es uno de los factores climáticos que mejor explican la distribución geográfica de comunidades ecológicas con una vegetación y fauna características. De este modo, se relaciona con la distribución de la vegetación natural y los cultivos.

Se calcula como la precipitación en un punto de estudio entre la evapotranspiración de referencia de ese mismo lugar. Se trata de un índice adimensional, con valores entre 0 y 1. Cuanto más se acerca el índice de aridez a 0, más árido es el lugar, mientras que valores superiores a 1 corresponden a una mayor humedad.

Índice de aridez proyectado

Valor estimado del índice de aridez futuro, calculado a partir de modelos climáticos y usado para anticipar tendencias en la desertificación, reducción de disponibilidad de agua o cambios en la distribución de la vegetación.

Índice de Precipitación y Evapotranspiración Estandarizado (*Standardised Precipitation and Evapotranspiration Index, SPEI*)

El Índice de Evapotranspiración de Precipitación Estandarizado (SPEI) se emplea para caracterizar la sequía meteorológica e hidrológica, proporcionando así una perspectiva global de la disponibilidad de agua.

El SPEI, propuesto por Vicente-Serrano et al. (2010), se obtiene como la diferencia entre la precipitación mensual y la evapotranspiración potencial, estimada mediante el método de Hargreaves (Hargreaves & Allen, 2003), facilitando así el seguimiento detallado de la disponibilidad de agua a través de diversas escalas temporales. Para evaluarlo, se definen distintas escalas de valores y se agrupan en tramos, tomando valores superiores a 2 en climas extremadamente húmedos y valores por debajo de -2 para climas extremadamente secos.

Índice SPI (Standardized Precipitation Index)

Indicador de sequía basado únicamente en anomalías de precipitación respecto a una media climática histórica. No considera el efecto de la temperatura, por lo que es menos sensible al cambio climático que otros índices como el SPEI.

Infraestructuras basadas en la naturaleza (NBS)

Soluciones de ingeniería ecológica que imitan o restauran procesos naturales para mejorar la gestión del agua, como humedales artificiales o reforestación de zonas de recarga.

Infraestructuras hidráulicas estratégicas

Obras que permiten el almacenamiento, distribución y regulación del recurso hídrico en territorios con limitaciones naturales. En Canarias, incluyen galerías, pozos, desaladoras, balsas de regulación y redes de distribución en alta y baja.

Interfaz urbano-rural en la gestión del agua

Zona de fricción funcional entre usos agrícolas e industriales frente a usos urbanos y turísticos. En islas con espacio limitado, esta interfaz condiciona las prioridades de asignación y la gobernanza del recurso.

Intrusión salina

Proceso de contaminación de acuíferos costeros por ascenso de agua marina debido al descenso del nivel freático. Es especialmente problemático en islas con alta demanda y sobreexplotación.

Islas oceánicas volcánicas

Territorios insulares formados por procesos magmáticos sobre la corteza oceánica. Su origen geológico determina condiciones hidrogeológicas muy específicas.

MAE (Mean Absolute Error)

Indicador estadístico que mide la media de los errores absolutos entre los valores observados y los simulados por un modelo. Se utiliza en la validación de modelos climáticos para evaluar su precisión en variables como temperatura o precipitación.

Metodología FICLIMA

Sistema de downscaling estadístico desarrollado para adaptar los escenarios CMIP6 a territorios con elevada heterogeneidad climática y orográfica. Combinas técnicas de analogía y regresión y ha sido validado con datos del reanálisis ERA5, lo que lo convierte en una herramienta operativa para la evaluación de impactos del cambio climático en regiones insulares.

Modelización hidrológica

Conjunto de técnicas matemáticas para simular el comportamiento del agua en el medio natural. Incluye desde modelos de balance hídrico hasta simulaciones de recarga o escorrentía.

Modelos climáticos regionales (RCM)

Herramientas computacionales que simulan el comportamiento del clima a escala regional. Ofrecen mayor resolución espacial que los modelos globales y permiten capturar fenómenos locales en territorios con topografía compleja como Canarias.

Modelos CMIP6

Los Modelos CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project, Phase 6*) son un conjunto de modelos climáticos globales utilizados para simular el clima actual y proyectar posibles escenarios futuros. Son la fase más reciente del del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP), un programa internacional para la intercomparación de modelos climáticos, los cuales son esenciales para el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) y otras evaluaciones climáticas internacionales y nacionales.

Plataformas climáticas regionales (como SICMA)

Sistemas de consulta en línea que integran proyecciones climáticas de alta resolución. Permiten acceder a mapas, series y datos por isla o municipio, facilitan-

do la toma de decisiones en sectores sensibles como agricultura, urbanismo o abastecimiento.

Plan Hidrológico Insular (PHI)

Instrumento de planificación estratégica que regula el uso del agua en cada isla. Incluye diagnóstico, escenarios futuros y medidas para garantizar el equilibrio hídrico.

Reanálisis climático

Proceso que integra observaciones históricas con modelos numéricos atmosféricos para generar series temporales continuas de variables meteorológicas. El reanálisis ERA5 es el más utilizado actualmente por su alta resolución espacial y temporal.

Recarga artificial de acuíferos

Técnica de gestión que consiste en infiltrar agua (normalmente tratada o excedentaria) en el subsuelo para aumentar las reservas subterráneas. En Canarias, su aplicación es aún marginal, pero se considera estratégica ante la escasez.

Recarga natural del acuífero

Proceso hidrológico mediante el cual el agua procedente de la precipitación, el deshielo o el retorno de riego se infiltra a través del suelo hasta alcanzar el nivel freático, incrementando las reservas subterráneas. En islas volcánicas como las Canarias, este proceso depende fuertemente de la porosidad de los materiales geológicos y de la intensidad y distribución de las lluvias.

Red de distribución

Sistema de canalizaciones, depósitos, válvulas y estaciones de bombeo que permite transportar el agua desde su fuente hasta los puntos de consumo.

Reducción de presión sobre aguas subterráneas

Objetivo de la gestión sostenible que busca evitar la sobreexplotación de acuíferos mediante el uso de recursos alternativos (desalinización, reutilización) o la mejora de la eficiencia en el consumo.

Regresión Geográficamente Ponderada (GWR)

Método estadístico que permite ajustar modelos en función de la ubicación espacial de los datos, incorporando variables topográficas (altitud, orientación, distancia al mar) y climáticas (nubosidad, humedad) para mejorar la representación de patrones locales.

Resiliencia hídrica

Capacidad de los sistemas de abastecimiento, naturales o artificiales, para resistir, absorber o recuperarse frente a eventos extremos (sequías, contaminación, fallos de suministro) sin comprometer su funcionalidad a largo plazo.

Resolución espacial climática

Escala mínima a la que un modelo climático representa las variables atmosféricas y superficiales. La mejora en resolución (por ejemplo, pasar de 3 km a 100 m) permite identificar dinámicas térmicas o pluviométricas a escala subinsular, clave en islas con alta variabilidad topográfica como Canarias.

Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)

Las Trayectorias socioeconómicas Compartidas (*Shared Socioeconomic Pathways*) son un conjunto de escenarios de cambio climático que se emplean para modelar diferentes posibles futuros de la sociedad y su impacto en el clima. Representan distintas formas en las que la sociedad, la economía y la demografía globales podrían evolucionar en el futuro, lo que a su vez afecta las emisiones de gases de efecto invernadero y el cambio climático.

El Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), publicado en 2021, presenta cinco posibles escenarios hacia los que podría evolucionar la sociedad. El SSP1 se trata del escenario más positivo, basado en una evolución sostenible de todos los sectores de cara al año 2100. En contraposición, el SSP5 sería el escenario más pesimista y grave, caracterizándose por un alto nivel de dependencia de combustibles fósiles.

Sistemas de información climática para la gestión del agua (como SICMA)

Plataformas digitales que integran datos observacionales y modelización climática para generar indicadores útiles para la planificación. Su resolución espacial fina y su acceso abierto los hacen herramientas clave para la adaptación local.

Tasa de reposición de acuíferos

Proporción entre la recarga efectiva anual y el volumen extraído. Cuando esta tasa es inferior a uno de forma sostenida, se produce un desequilibrio estructural que puede derivar en salinización, pérdida de caudal o agotamiento.

Uso conjunto de fuentes

Estrategia de gestión que combina diversas fuentes (aguas superficiales, subterráneas, regeneradas y desalinización de agua de mar) para aumentar la seguridad hídrica y reducir la dependencia de una sola tipología.

Validación climática multivariante

Proceso de evaluación del rendimiento de modelos climáticos mediante múltiples pruebas estadísticas (como MAE, MRE y pruebas de Kolmogorov-Smirnov), a fin de determinar la robustez de las simulaciones y su aplicabilidad.

Variabilidad interinsular

Diferencias en variables climáticas, hidrológicas o ecológicas entre islas de un mismo archipiélago. En Canarias, esta variabilidad es elevada y condiciona la planificación hidrológica, ya que cada isla presenta vulnerabilidades distintas frente al cambio climático.

Vulnerabilidad hídrica insular

Condición de fragilidad frente a alteraciones en la disponibilidad, calidad o acceso al recurso, debida a la insularidad, baja capacidad de regulación, escasa recarga natural y presiones demográficas o turísticas.

Zonas de recarga

Áreas del territorio donde las condiciones del suelo, la litología y la cobertura vegetal favorecen la infiltración de agua hacia el subsuelo. La protección de estas zonas es fundamental para garantizar la sostenibilidad de los acuíferos.

FICHAS DE LOS AUTORES



Juan Carlos Santamarta Cerezal
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 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 Profesor Titular de Universidad en la ULL.

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, 99 capítulos y 133 artículos científicos más de 100 aportaciones a congreso nacionales e internacionales, además de editar la serie "Hydrogeology" para 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. Desde el año 2010 dirige el grupo de investigación INGENIA (Ingeniería Geológica, Innovacion 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 las Naciones Unidas 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 y Administraciones Públicas, destacando en la ejecución y dirección de proyectos como: asesor científico de diferentes Consejos Insulares de Agua para el desarrollo de la planificación hidrológica del 3º ciclo en las Demarcaciones de las Islas Occidentales Canarias (2021-2022), asesor científico del Gobierno de Canarias para el desarrollo de la planificación hidrológica del 2º ciclo en las Demarcaciones de las Islas Occidentales Canarias (2015-2021), asesor científico para la realización de los muestreos

para el conocimiento del estado cuantitativo y cualitativo de las aguas subterráneas en las Demarcaciones Hidrográficas Canarias (2018), asesor científico para la planificación de los recursos hídricos subterráneos de la isla de Malabo (Guinea Ecuatorial) (2016-2017), asesor para la Agencia Balear del Agua en infraestructuras vinculadas al ciclo integral del agua de las Islas Baleares (2020-2021). Ha trabajado y coordinado trabajos de investigación en otras Confederaciones Hidrográficas como la C.H. del Duero, Islas Baleares o la 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), meciones 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 mejores profesores universitarios de España en 2023 (cuarta posición) y en 2024 (quinta posición).

Situación profesional actual y contacto

Profesor Titular 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 9 libros, 9 capítulos de libro, 38 contribuciones a congresos y 78 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

Investigadora
Universidad de La Laguna
E-mail: ncruzper@ull.edu.es



Susana Clavijo Núñez
Ingeniera Energética
Universidad de La Laguna

Breve trayectoria profesional

Investigadora de la Universidad de La Laguna (España), como parte del grupo de investigación INGENIA (Ingeniería Geológica, Innovación y Aguas). Doctora en el Programa de Arquitectura de la Universidad de Sevilla, con la tesis sobre Pobreza energética en Andalucía bajo el enfoque de la transición energética justa. Graduada en Ingeniería de la Energía y Máster en Ciudad y Arquitectura Sostenibles por la Universidad de Sevilla. También es experta en Cooperación Internacional para el Desarrollo con amplia experiencia en proyectos internacionales en Uruguay, Chile, Ecuador, Paraguay, Colombia, etc.

Su ámbito de trabajo se centra en los impactos de la crisis climática y su vinculación con recursos naturales y energéticos. Actualmente, está vinculada al proyecto *"ARSINOE: Climate resilient-religions through systemic solutions and innovations"*, financiado por la Unión Europea, cuyo objetivo se centra en plantear soluciones de adaptación al cambio climático. Es autora de 5 artículos científicos y 3 capítulos de libro, habiendo participado además como ponente en 7 congresos internacionales y multitud de foros y espacios de transferencia de conocimiento. Ha sido investigadora responsable de dos proyectos financiados por la Oficina de Cooperación al Desarrollo de la Universidad de Sevilla, uno de ellos ejecutado en la ciudad de Sevilla y otro en la ciudad de Cuenca, Ecuador.

Su trayectoria ha sido reconocida a través del Premio Andalucía Joven 2021 en la categoría de Desarrollo Sostenible, otorgado por el Instituto Andaluz de la Juventud de la Junta de Andalucía, así como por el Premio Trimestral IUACC a la mejor publicación científica en Arquitectura y Ciencias de la Construcción de la Universidad de Sevilla, gracias al artículo *"Energy poverty in Andalusia. An analysis through decentralised indicators"*.

Situación profesional actual y contacto

Investigadora
Universidad de La Laguna
E-mail: sclavijo@ull.edu.es



Joselin Sarai Rodríguez Alcántara
Ingeniera de Minas y Energía
Universidad de La Laguna

Breve trayectoria profesional

Ingeniera de Minas y Energía por la Universidad de Salamanca y Doctoranda del programa en Desarrollo Regional de la Universidad de La Laguna en el que estudia la Gestión Integral del Agua en diferentes áreas del territorio español, poniendo especial atención a territorios insulares, ya que son áreas que se verán especialmente afectadas por el cambio climático. Su objetivo es contribuir a la especialización inteligente de las regiones al identificar sus características únicas y ventajas competitivas, promoviendo una estrategia de desarrollo inclusiva para generar un conocimiento crítico que fomente un desarrollo económico y social sostenible, ayudando a la resiliencia del territorio.

Desde sus inicios en el campo de la investigación, ha colaborado en diversos proyectos a nivel autonómico, nacional e internacional, centrados en la gestión del agua y los retos asociados al cambio climático. Esta trayectoria le ha permitido integrarse en un entorno científico de excelencia y colaboración continua. Como resultado de este esfuerzo colaborativo con otras instituciones e investigadores, ha contibuido a varias publicaciones en revistas científicas que abordan aspectos críticos, tales como la calidad del agua, los riesgos asociados al cambio climático, la dimensión social y las estrategias de gestión integral frente a escenarios de creciente incertidumbre climática.

De su actividad investigadora destacar algunas publicaciones científicas relacionadas con la gestión del agua y la energía: "*Efect of tourist activity on wastewater quality in selected wastewater treatment plants in the Balearic Islands (Spain)*", publicado en la revista *Environmental Science and Pollution Research;* "*Presence of microplastics in the groundwater of volcanic islands, El Hierro and La Palma (Canary Islands)*", publicado en la revista *Journal of Contaminant Hydrology*; "*Improving Groundwater Quality Through Biosphere Reserve Management: Insights from the Anaga Reserve, Tenerife*", publicado en la revista *Environments*; "*SWOT Analysis of the Benefits of Hydropower Energy in Four Archipelagos*", publicada en la revista *Civil Engineering Journal.* Además de su participación en Congresos Internacionales como: *15th International Conference on Education and New Learning Te-*

chnologies; *2nd International Conference Water Resources Management & Sustainability: Solutions for Arid Regions*; *EGU General Assembly 2024* y *Sustain Istanbul 2024 Towards Sustainable Groundwater Use under Changing Climate.*

Situación profesional actual y contacto

Investigadora en el Grupo INGENIA (Ingeniería Geológica, Innovación y Aguas)
Universidad de La Laguna
E-mail: jrodralc@ull.edu.es



César Paradinas Blázquez
Experto en Cambio Climático y Meteorología Aplicada
Fundación para la Investigación del Clima (FIC)

Breve trayectoria profesional

Graduado en Física por la Universidad Complutense de Madrid (UCM), con estancia Erasmus en la Universidad Aristóteles de Tesalónica (AUTH), y Graduado en MBA en Industria Farmacéutica (CEU San Pablo). Máster en Meteorología y Geofísica por la Universidad Complutense de Madrid (UCM), desde donde ha centrado su carrera dedicándose al estudio del cambio climático, el análisis de eventos meteorológicos extremos y la aplicación de herramientas climáticas para la adaptación territorial.

Desde 2016 forma parte del equipo técnico de la Fundación para la Investigación del Clima (FIC), donde ha ido progresando durante más de 8 años en su labor como investigador del clima, la meteorología y el análisis de sus impactos en distintos sectores, como la agricultura, la infraestructura urbana, los incendios forestales, la gestión de recursos hídricos e incluso el sector seguros, tanto en proyectos nacionales como en múltiples esquemas internacionales.

En el transcurso de su carrera en FIC ha tenido la oportunidad de asumir responsabilidades de gestión de proyectos internacionales sobre escenarios regionales de cambio climático, sistemas de alerta temprana y riesgos climáticos en sectores como la agricultura, los recursos hídricos y el medio urbano. Algunos de los marcos de financiación liderados son Horizon Europe (ICARIA), Interreg-SUDOE (ECCLIPSE), EIT Climate-KIC (CRI-SI-ADAPT II) o H2020 (SICMA-Canarias ARSINOE). En este último proyecto se desarrolló un intenso y detallado estudio sobre la caracterización del clima actual y generación de escenarios de cambio climático a finísima resolución para el archipiélago canario.

Es coautor de diversas publicaciones científicas sobre impactos y escenarios de cambio climático en ámbitos como la hidrología, la biodiversidad, la calidad del aire o la agricultura, con 5 artículos publicados y varias aportaciones a conferencias. Además, participa habitualmente en acciones de divulgación, acompañamiento a instituciones públicas y organizaciones sociales para la planificación de la adaptación al cambio climático, y en formación técnica, impartiendo cursos de meteorología adaptada a incendios forestales para el cuerpo de bomberos del INFOCA andaluz.

Situación profesional actual y contacto

Consultor e investigador; gestor de proyectos.
Fundación para la Investigación del Clima (FIC): https://www.ficlima.org
E-mail: cesar@ficlima.org

Agua y cambio climático en las Islas Canarias

Agua y cambio climático en las Islas Canarias es una obra técnica de referencia que aborda, con rigor y precisión, los impactos hidrológicos del cambio climático en un territorio insular de alta complejidad ambiental y vulnerabilidad creciente.

A partir de modelos climáticos globales y mediante técnicas de downscaling, se ha logrado generar una simulación de alta resolución (100 m x 100 m) adaptada a la realidad de Canarias. Utilizando metodologías científicas validadas —como la plataforma SICMA-Canarias—, este volumen analiza, isla por isla, la evolución futura de las principales variables climáticas: temperatura, precipitación, evapotranspiración, aridez y balance hídrico. El lector encontrará por primera vez proyecciones climáticas detalladas por isla y horizonte temporal, contrastadas con datos observados y validadas mediante indicadores estadísticos robustos.

Además del análisis climático, la obra ofrece un diagnóstico exhaustivo del sistema hídrico canario, incluyendo las fuentes de agua disponibles, su estado cuantitativo y cualitativo, la estructura institucional de gestión y los principales usos por sectores. Se abordan de forma rigurosa los efectos del calentamiento global sobre los acuíferos volcánicos, la disminución de la recarga, la intrusión marina, la presión sobre los sistemas de desalinización de agua de mar y la creciente dependencia de tecnologías no convencionales.

El libro identifica los escenarios más críticos de escasez hídrica y pérdida de resiliencia, alertando sobre la intensificación de las sequías y los efectos diferenciados del cambio climático en cada isla. Propone estrategias de adaptación basadas en soluciones técnicas como la recarga artificial de acuíferos, el uso de aguas regeneradas, la protección y uso eficiente de las aguas subterráneas, la desalinización de agua de mar con criterios de sostenibilidad, y la modernización del ciclo del agua y su gobernanza.

Esta obra es imprescindible para profesionales de la planificación hidrológica, gestores públicos, técnicos insulares, investigadores en cambio climático y estudiantes de ingeniería o ciencias ambientales. Su enfoque aplicado, apoyado en datos de alta resolución y mapas climáticos insulares, la convierte en una herramienta útil tanto para la acción política como para la toma de decisiones en entornos vulnerables.

El futuro del agua en Canarias depende de cómo se entienda su clima. Este libro proporciona las claves para anticiparlo.

9 788409 740390