

## CAPÍTULO 2: Hidrología superficial en las islas volcánicas oceánicas

Juan Carlos Santamarta Cerezal

### 2.1 LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LAS ISLAS VOLCÁNICAS OCEÁNICAS

Los recursos hídricos, se deben gestionar de una manera especial y, conjuntamente, atendiendo a las singularidades que presentan los sistemas insulares volcánicos. Esto implica que en ocasiones las estrategias y metodologías utilizadas en terrenos continentales no tienen que ser válidas para espacios limitados, constituidos por diferentes materiales heterogéneos, como son las islas oceánicas volcánicas .

El agua, en las islas oceánicas, es un recurso crítico. En general, las islas oceánicas obtienen sus recursos hídricos mediante explotaciones subterráneas, tales como pozos, sondeos, galerías de drenaje o minas de agua. Existen sistemas insulares, que por la escasa aportación de precipitaciones, — entre 100 y 250 mm/año —, no tienen la suficiente recarga de sus acuíferos, como para satisfacer la demanda del recurso. En estas situaciones se tiene que recurrir a la producción industrial de agua, mediante plantas desalinizadoras. Esto implica una dependencia energética para la producción de agua y un consumo elevado de recursos económicos, que algunos estados insulares no pueden asumir. En las islas Canarias, las islas orientales, —Gran Canaria, Fuerteventura y Lanzarote —, destinan entre un 13 % y un 18 %, de la energía producida, para la desalinización de agua de mar. Este impacto energético, es menor en las islas occidentales, no obstante, El Hierro consume un 10 % para ese cometido y Tenerife un 5 %. Hay que asumir que, la producción energética en las islas oceánicas, por ejemplo en Canarias, implica unos costes, cuatro veces superior, en comparación, con los costes del continente (península Ibérica) donde el coste ronda los 50 € MWh (Megavatio-hora) (2014). Dependiendo exclusivamente de la producción de recurso hídrico por este medio, puede ser a la larga insostenible, por lo que, es necesario investigar en nuevas fuentes energéticas, donde sea posible, o bien, sistemas de desalinización por energías renovables —geotermia, solar, eólica—, en las islas Canarias (aproximadamente un 10 %) y Hawái (10 %), ya existen experiencias en este sentido.

Las aguas subterráneas también descargan sus recursos, en manantiales (nacientes) y en las costas, formando el llamado acuífero costero, sensible a las mareas y a la intrusión marina. La única forma que tienen los acuíferos insulares de recargarse es mediante la precipitación, esta, se puede ver potenciada por los vientos alisios o trade winds, que están cargados de humedad y descargan una precipitación denominada horizontal o de niebla, en las islas que tienen unas características adecuadas para su intercepción.

La agricultura, como norma general, es la actividad más demandante de agua en las islas oceánicas. Un ejemplo ilustrativo es Hawái donde existen cultivos singulares como el



46

Figura 2.1.- Mar de nubes en la isla de Gomera.



Figura 2.2.- Campos de cultivo de piña tropical en la isla de Oahu, Hawái.

café, aguacate, la piña tropical y la caña de azúcar, este último cultivo, con la característica añadida de ser un gran demandante de recurso hídrico. En las islas Canarias la agricultura es el gran consumidor de agua en La Palma, La Gomera, Tenerife y El Hierro, con porcentajes que, en algunas ocasiones, superan el 80 % de la demanda total del recurso. El turismo supone también una demanda importante de agua, a la hora se su planificación en las islas, se supone un consumo de 500 L por habitante y día.

Es posible afirmar que las islas oceánicas presentan unos patrones comunes con respecto a los recursos hídricos, con ciertas particularidades, debido entre otros motivos a: (i) la edad geológica, (ii) tipología de la isla volcánica, (iii) altitud media y orografía, (iv) tipo de vegetación (v) localización geográfica, (vi) materiales volcánicos constituyentes, (vii) precipitaciones medias.



Figura 2.3.- Deslizamiento de ladera en la isla de Fuerteventura.



Figura 2.4.- Deslizamiento debido a lluvias torrenciales en la isla de El Hierro.

Este origen común hace que se puedan plantear soluciones similares a problemas compartidos por las islas, principalmente la garantía del abastecimiento de aguas, el control de la erosión y la conservación de suelos, así como la seguridad ante grandes avenidas y deslizamientos.

El problema de la escasez del agua y los problemas derivados de una mala gestión del recurso involucran entre otros aspectos: (i) las grandes avenidas, (ii) pérdida de suelos, (iii) nula ordenación de cuencas, (iv) avance de la desertización y, (v) el escaso conocimiento de las singularidades del medio volcánico. Todo ello pueden llegar a colapsar el desarrollo sostenible y eficiente de las islas, por ello, es necesario un proceso de transferencia de tecnología y conocimiento entre las diferentes administraciones con responsabilidad en materia de aguas de las islas y, por supuesto, una cooperación internacional entre institutos de investigación relacionados con el agua.

## 2.2 PARÁMETROS HIDROLÓGICOS DE LAS ISLAS VOLCÁNICAS OCEÁNICAS

Para estudiar los recursos hídricos de las islas volcánicas es necesario comprender los procesos y estructuras geológicas implicadas en el ciclo hidrológico, una característica que condiciona el agua en las islas es la permeabilidad inicial de los terrenos volcánicos jóvenes. Este hecho conduce a que existan islas, consideradas jóvenes, con una escurriencia muy reducida en comparación con islas de mayor edad; un ejemplo ilustrativo es la isla de El Hierro, en Canarias, que con una edad aproximada de un millón de años, carece de grandes barrancos –vías preferentes de evacuación de las aguas de lluvia en las islas–, lo que indica que gran parte de la precipitación se infiltra en el terreno.



Figura 2.5.- Suelo volcánico formado sobre colada basáltica.



Figura 2.6.- Lago y masa forestal en la isla de Terceira, Azores.

48

Conforme las islas aumentan de edad, los materiales se hacen más impermeables, como norma general. También este incremento de edad hace que las islas tengan una menor altitud y extensión pero un mayor número de órdenes de suelos con mayor evolución que las islas jóvenes (Ibáñez y Efland, 2011). Por otro lado hay que destacar la heterogeneidad de los materiales en las diferentes formaciones volcánicas a diferencia de los terrenos sedimentarios, más homogéneos y estratificados.

La característica común que tienen los terrenos de las islas volcánicas es la heterogeneidad de los mismos. La primera consecuencia que se deriva de esta peculiaridad la constituye el hecho de que resulta complejo evaluar y estimar los parámetros hidrológicos, tales como la escorrentía, la infiltración y la evapotranspiración, a diferencia de los terrenos continentales, en general, más estudiados y controlados.

La escorrentía, en un terreno volcánico depende principalmente de la precipitación; naturaleza y cantidad, así como del tipo del suelo y pendiente. A nivel geológico, se da la circunstancia que en islas muy jóvenes a escala geológica, la escorrentía es muy reducida, casi testimonial, y cuando existe, transcurre por los barrancos volcánicos, desarrollando unos efectos erosivos importantes. En las islas Canarias es difícil la regionalización de estos parámetros, debido por un lado, a la heterogeneidad en suelos, así como a la existencia de microclimas, dándose en algunas islas notables diferencias entre las precipitaciones cara barlovento con respecto a las de sotavento, principalmente por la existencia de los vientos alisios, cargados de humedad.

Por ser la interfase entre la atmósfera y el material geológico, el suelo juega un papel fundamental en el ciclo hidrológico pues la infiltración se produce a través de él. La na-

turaliza volcánica de las Islas Canarias contribuye, entre otros factores, a la formación de suelos con propiedades muy peculiares en cuanto a su mineralogía, que se traducen en un comportamiento característico y diferenciado ante la infiltración. Su conocimiento es por tanto fundamental para la planificación de un recurso tan escaso en la isla como el agua. La evapotranspiración es uno de los parámetros que mayor incertidumbre suele presentar en el balance hídrico, especialmente en la zona de cumbres que es el área principal donde se produce la recarga natural de los sistemas acuíferos volcánicos, y en donde se desarrollan también diferentes tipos de suelos forestales, especialmente en islas de acusado relieve.

Dado que en estas zonas no es frecuente que existan estaciones meteorológicas completas, se hace difícil implementar el método de Penman-Monteith, universalmente aceptado hoy día; no obstante, y de acuerdo con la metodología de la FAO, la utilización del método de Hargreaves está proporcionando buenos resultados, por ejemplo, en el archipiélago Canario, en comparación con la todavía utilizada fórmula de Thornthwaite, a pesar de que no se recomienda su utilización para estudios rigurosos.

### 2.2.1 *Estudio del ciclo del agua*

El agua se encuentra en constante movimiento. Los océanos constituyen la principal reserva de agua existente, la evaporación de estas superficies es elevada mucho mayor (hasta 6 veces), que la evaporación de las plantas y las masas de aguas continentales. El ciclo del agua es un fenómeno planetario por el que el agua de los océanos se evapora creando la condensación en nubes, que caen en forma de lluvia. Los componentes fundamentales son la precipitación, escorrentía, infiltración y la evapotranspiración.

Actualmente han mejorado notablemente, las herramientas para investigar el ciclo integral del agua, principalmente el estudio de los recursos hídricos superficiales, mediante técnicas SIG (Sistemas de Información Geográfica) y, en el caso del estudio de los recursos hídricos subterráneos, la tecnología y los métodos de análisis hidrológico han avanzado. Por ejemplo, los modelos de flujo de agua subterránea dependientes de la densidad, del transporte de solutos y tridimensionales ya están disponibles para aumentar las capacidades para la simulación de los sistemas de agua salada y agua dulce en los acuíferos y, los métodos para el cálculo de la recarga de las aguas subterráneas han mejorado. No obstante, la incertidumbre en este último caso sigue siendo muy elevada en su aplicación a terrenos volcánicos.

### 2.2.2 *Precipitación*

Los recursos hídricos en las islas de la Macaronesia provienen de dos fuentes. Por un lado las precipitaciones, condicionadas por la localización y altitud de las islas y, por otro



Figura 2.7.- Captación de la precipitación de niebla u horizontal por hojas aciculares.

lado, la humedad de los vientos alisios que es aprovechada por las formaciones boscosas mediante la denominada precipitación oculta, horizontal o de niebla, que puede llegar a suponer según el autor consultado de 1,5 a 3 veces la precipitación convencional (Santamarta y Seijas, 2009). Otros autores como Regalado y Ritter (2010) indican que la lluvia tiene efecto sobre grandes superficies en la isla, mientras que la precipitación de niebla sólo se da en zonas óptimas para que el efecto tenga lugar, adicionalmente el efecto en el balance del agua del suelo es mucho mayor con la intensidad de lluvia que con el goteo continuo que genera la precipitación de niebla.

La precipitación en las islas oceánicas, como norma general, se concentra en las zonas elevadas de las islas, principalmente en las dorsales. Aquí se concentran el mayor número de diques geológicos, por lo tanto, es en esta parte de la isla es donde se sobre eleva el acuífero insular. En estas zonas se concentran los aprovechamientos hidráulicos subterráneos, por ello, es necesario que la cubierta vegetal que está en superficie esté conservada y protegida ya que influye directamente con la calidad y cantidad del agua que inicialmente se infiltra y posteriormente recarga el acuífero (Santamarta, 2009).

ISLA	ARCHIPIÉLAGO	PRECIPITACIÓN MEDIA EN mm
TENERIFE	Canarias (España)	425
LA PALMA	Canarias (España)	740
LANZAROTE	Canarias (España)	112
REUNIÓN	Reunión (Francia)	5.109
KAUAI	Hawái (EE.UU.)	1.062
OAHU	Hawái (EE.UU.)	956
TERCEIRA	Azores (Portugal)	1.315
SAL	Cabo Verde	47
SANTIAGO	Cabo Verde	300
MADEIRA	Madeira (Portugal)	1.899
FIJI	Fiji	2.500
GUAM	Guam (EE.UU.)	2.180

Tabla 2.1.- Precipitaciones medias en diferentes sistemas insulares volcánicos.

Con respecto a la tabla 2.1, hay que aclarar que para su confección se han tomado en cuenta precipitaciones en las zonas costeras, que suelen ser reducidas comparadas con las precipitaciones medidas en zonas montañosas, como las dorsales de las islas. Las diferencias pueden llegar a más de 500 mm al año, sin considerar el efecto de la precipitación horizontal. Hay casos muy singulares, como por ejemplo en Kauai (Hawái), está el considerado como lugar más húmedo del planeta con una precipitación media de 11.500 mm/año. En la zona montañosa de las islas Fiji, se han registrado precipitaciones anuales del orden de 6.000 mm/año.

Existen casos de estudio a nivel mundial que pueden ilustrar los problemas actuales que presentan las islas oceánicas con respecto a sus recursos hídricos, parte de las soluciones se encuentran en una gestión forestal sostenible. Algunas islas volcánicas de Latinoamérica, como la Isla de El Tigre, en Honduras, presentan graves problemas de abastecimiento de aguas, debido sobre todo a la intrusión marina en sus pozos costeros y a la gran deforestación que han soportado los últimos años. Esta situación afecta directamente a los recursos hídricos ya que contribuye a una disminución cada vez más rápida de suelo fértil y a un incremento de escorrentía.

Una práctica habitual para evitar esta degradación es crear perímetros de protección en zonas forestales que afecten directamente a los acuíferos insulares. Ejemplos mundiales los presenta Hawái o Jeju, donde está vetada la urbanización en zonas centrales de la isla. En la Isla de Tenerife, parte de la zona de afección del acuífero de Las Cañadas –el más importante de la isla en calidad y cantidad– está cubierto por la corona forestal, restaurada en los años 40 del siglo XX por los Ingenieros de Montes: Ortuño, los hermanos Oramas, Peraza y Galeán.

### 2.2.3 Escorrentía

Salvo archipiélagos muy concretos, por ejemplo Hawái (EE.UU.), las islas volcánicas no suelen tener ríos salvo pequeños cursos y, sobre todo, corrientes estacionales después de precipitaciones importantes. Esto supone que sólo un porcentaje pequeño de los recursos hídricos superficiales son utilizados, principalmente en agricultura (Santamarta y Rodríguez-Martín, 2012). En algunos casos, estas aguas son mezcladas con aguas subterráneas, de peor calidad –con alto contenido en sales– para la mejora de las características finales del recurso. Puede parecer, que islas volcánicas con grandes pluviometrías como por ejemplo la isla de Terceira en las Azores con 1.300 mm de media al año o la isla de Jeju en Corea del Sur con una precipitación de 1.975 mm al año, pudieran tener ríos durante todo el año, cosa que no ocurre debido a la permeabilidad de los terrenos (Jong-Ho et al., 2005).

Las cuencas hidrográficas en las islas, presentan una morfología delimitada por barrancos, cuando se han dado las condiciones de precipitación y erosión importantes. A lo largo del tiempo, los barrancos son muy pronunciados en las zonas altas de las islas –mayor concentración de precipitaciones en las dorsales–, y aunque son de menor tamaño, que en los terrenos continentales, su orografía es más abrupta, sobre todo en islas jóvenes. Finalmente, a medida que los barrancos se acercan a la costa, se hacen más tendidos y anchos. Es necesario tener ciertas precauciones a la hora de abordar proyectos técnicos relacionados con la estimación de escorrentías superficiales, porque las fórmulas utilizadas para terrenos continentales tienden a sobreestimar la cantidad de escorrentía a pesar de lo explicado sobre la permeabilidad del terreno volcánico.





Figura 2.8.- Arrastre de sólidos en un curso de agua de un barranco.



Figura 2.9.- Tomadero de aguas de escorrentía en la isla de Terceira, Azores.

La transferencia de agua dentro del ciclo hidrológico está condicionada por la presencia de cobertura vegetal, con suelos más o menos desarrollados tanto por meteorización directa como por edafogénesis que, en el caso de las Islas Canarias, tiene una mayor singularidad, puesto que estos suelos forestales se desarrollan sobre materiales volcánicos de distinta naturaleza.

El cálculo del balance hidráulico, desde el punto de vista hidrológico forestal e hidrogeológico, está condicionado por la incertidumbre asociada a sus parámetros hidrológicos. En general, la precipitación suele estar relativamente acotada; la escorrentía superficial, dada su escasez y dificultad de medida por la torrencialidad de los episodios tormentosos, suele presentar una incertidumbre importante, si bien queda enmascarada por la baja cuantía de aquella. Además, la infiltración se suele estimar como diferencia de la ecuación del balance y es dependiente de la evapotranspiración, parámetro que en las zonas de recarga natural a los acuíferos del archipiélago canario no está evaluado con la suficiente precisión.

El suelo juega un papel fundamental en el ciclo hidrológico pues la infiltración se produce a través de él. Los estudios realizados en las islas muestran que la textura es el factor determinante en la infiltración de los suelos, si bien suelos tan característicos como los Andisoles presentes en las cumbres de las islas más húmedas deben sus elevados valores de infiltración a su gran desarrollo estabilidad y estructural. Por el contrario, la infiltración de los suelos menos desarrollados o degradados, como los Entisoles y los Aridisoles, es directamente dependiente de la porosidad textural que presentan, dada el escaso desarrollo estructural que presentan.

Tipo de terreno	Superficie impermeable	Escorrentía	Infiltración	Evapotranspiración
Forestal	5-0 %	10 %	50 %	40 %
Agroforestal	10-20 %	20 %	45 %	35 %
Rural	35-50 %	30 %	35 %	35 %
Urbano	75-100 %	55 %	15 %	30 %

Tabla 2.2.- Efectos del uso del terreno en los componentes del ciclo hidrológico en las islas.

El tipo de terreno influye en la capacidad de generar escorrentía. En los continentes, al igual que en las islas volcánicas, podemos hablar en general de tres tipos de terreno, (i) forestal, (ii) rural y, (iii) urbano. Cada uno de ellos modifica los patrones hidrológicos estudiados relativos a la escorrentía, infiltración y evapotranspiración.

La excesiva urbanización de las superficies de las islas, provocan que haya numerosas superficies impermeables de manera artificial, por lo que la mayoría del agua de precipitación se transforma en escorrentía. Además de la alteración en los porcentajes de los componentes hidrológicos, hay que tener en cuenta que los picos de caudal de agua son más elevados en zonas urbanizadas que en las forestales, y que tardan más en reducirse y convertirse en caudales estables.

Atendiendo a la escorrentía, en los suelos volcánicos más representativos se observan las siguientes características: los Andosoles representan una textura predominantemente franca, son suelos profundos, generalmente estratificados, con horizontes superiores oscurecidos por la materia orgánica y subhorizontes subsuperficiales pardos, —con una tonalidad de amarillo a marrón—, y rojizos; tienen una baja densidad aparente, alta porosidad y alta capacidad de retención de agua; son suelos que originan una tasa de infiltración media, originando alguna escorrentía superficial, según la clasificación hidrológica de suelos, desarrollada por el Soil Conservation Service (SCS), serían suelos tipo C. Atendiendo al tipo de ocupación del suelo, el coeficiente de escorrentía es del orden de 0,05 (Fontes et al., 2004).

Los suelos pardos se encuentran en niveles inferiores de las laderas, y su génesis se asocia con su zonalidad climática, aunque la edad y el material parental y los accidentes

geográficos, contribuyen a la diferenciación edafológica. Han estado sujetos durante más tiempo a actividades agrícolas, sobre todo cultivos, son suelos con una tasa de infiltración media, originando un escurrimiento superficial, y son clasificados como suelos tipo C. El coeficiente de escorrentía es de alrededor de 0,05 (Fontes et al., 2004).

En los Andosoles ferruginosos, aunque los materiales de base son comunes al tipo anterior, la alta precipitación y la baja evapotranspiración, asociada con drenajes pobres, dan lugar a un cambio significativo en el tipo de vegetación. Los horizontes orgánicos superiores tienen una muy alta porosidad así como una estructura esponjosa con componentes minerales secundarios. Los horizontes inferiores tienen abundantes componentes orgánicos, ligeramente alterados. El horizonte plácico, consiste en una masa muy densa y continua, no porosa, impermeable e impenetrable a las raíces (Madruga, 1995). Son suelos con baja tasa de infiltración, siendo clasificado como suelo tipo D (Fuentes y Pereira, 2003).

Los mantos de lava recientes tienen una alta tasa de infiltración, originando poca o nula escorrentía; su coeficiente de escorrentía es menor de 0,005 (Fontes et al., 2004).

#### 2.2.4 *Infiltración*

El proceso de infiltración del agua en el suelo depende tanto de las propiedades edáficas y de la lluvia, que determinan el balance aporte-entrada de agua, como de factores externos capaces de modificar dicho balance. Desde el un punto de vista de la hidrología, está ampliamente demostrado que las propiedades del suelo con mayor influencia en la infiltración son principalmente aquellas que influyen en la conformación de su espacio poroso. Propiedades edáficas como la mineralogía, la presencia de óxidos cementantes, la textura, el contenido de materia orgánica, el estado salino-sódico del suelo o la pedregosidad, son clave en el desarrollo estructural, la porosidad y consecuentemente en la respuesta hidrológica de los suelos. Por su origen, los suelos volcánicos cuentan con una mineralogía y unas propiedades muy características y diferenciadas de las del resto de tipologías de suelo que les hacen presentar un comportamiento hidrológico singular (Nanzoy et al., 1993). En general, estos suelos cuentan con minerales no cristalinos en su mineralogía (Dahlgren et al., 1993) y un contenido de materia orgánica comparativamente mayor que los suelos de su misma tipología pero de origen no volcánico (Dahlgren et al., 2004), lo que les aporta un mayor desarrollo y estabilidad estructural, porosidad e infiltración (Rodríguez et al., 2002).

A pesar de estas características generales, las propiedades particulares de los suelos formados en zonas volcánicas y su comportamiento hidrológico varían, como para el resto de los suelos, no solo según la naturaleza de la litología de partida sino también según otros factores como la altitud, orientación, vegetación, climatología, perturbaciones ambientales, etc. En este apartado del libro se revisa la infiltración del agua en las diferentes

INFILTRACIÓN (mm h <sup>-1</sup> )	DENOMINACIÓN	TIPO DE SUELO
>500	Extremadamente rápida	<ul style="list-style-type: none"> <li>Andisoles no vítricos</li> </ul>
250-500	Muy rápida	<ul style="list-style-type: none"> <li>Andisoles vítricos</li> <li>Entisoles (granulometría gruesa)</li> </ul>
125 a 250	Rápida	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inceptisoles</li> <li>Entisoles (granulometría media)</li> </ul>
60 a 125	Moderadamente rápida	<ul style="list-style-type: none"> <li>Entisoles (granulometría fina)</li> <li>Alfisoles</li> </ul>
20-60	Moderada	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aridisoles</li> <li>Vertisoles</li> </ul>

Tabla 2.3.- Clasificación de la infiltración de los suelos de Tenerife. Fuente: (Neris, 2011).

tipologías de suelos volcánicos presentes en las islas Canarias, las principales propiedades de estos suelos que tienen influencia en el proceso de infiltración de agua, así como las principales perturbaciones ambientales que afectan a este proceso.

La infiltración, al igual que la escorrentía, depende también del uso que se dé al terreno donde cae la precipitación, no es lo mismo disponer de un terreno forestal, rural o urbanizado.

Los estudios realizados en las islas Canarias indican la presencia de un total de 7 tipologías diferentes de suelos (Neris et al., 2013b) de acuerdo con la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999). Aunque todas comparten el material volcánico como material de partida, la elevada variedad existente en las islas en cuanto a su composición, cohesión y edad, además de las diferentes condiciones climáticas, topográficas y de vegetación presentes en las islas, permiten el desarrollo de esta diversidad de suelos que se distribuyen generalmente en secuencias altitudinales diferenciadas por la orientación (Rodríguez Paz et al., 2010). Esta variedad de tipologías de suelos se traduce en una gran diversidad en cuanto a sus propiedades y, por lo tanto, ante los procesos hidrológicos y de erosión hídrica. En este sentido, los estudios realizados por Neris (2011) evalúan la infiltración de las diversas tipologías de suelos de Tenerife (Tabla 2.3) y los clasifican según Landon (1984).

Estudios complementarios realizados en la isla de Tenerife indican que el contenido de arcilla, la estabilidad estructural y la densidad aparente son las propiedades del suelo que más influyen en la infiltración (Tejedor et al., 2013). Estos autores construyen un modelo para predecir la infiltración de los suelos de la isla a partir de estudios de esta propiedad en 108 suelos de la isla pertenecientes a 6 órdenes diferentes. Este modelo de infiltración explica el 51% de la variabilidad de esta propiedad e indica que la densidad aparente y el contenido de arcilla influyen negativamente en la infiltración, mientras que la estabilidad estructural tiene un efecto promotor de la misma. Además, los valores obtenidos muestran que el contenido de arcilla es el parámetro más influyente en el comportamiento de la infiltración, mientras que la densidad aparente es el que presenta una influencia más limitada. Los autores señalan igualmente que la influencia de estas propiedades es dependiente de la tipología de suelo. Los elevados valores de infiltración de los suelos menos desarrollados, como pueden ser los Entisoles o los Andisoles vítricos, están determinados fundamentalmente por su bajo contenido de arcilla y elevada porosidad textural, dado que por su juventud carecen de una estructura desarrollada. Por el contrario, la baja infiltración de los Aridisoles se debe a su baja estabilidad estructural y consecuentemente alta densidad aparente y baja porosidad. Los Vertisoles y los Alfisoles son los suelos en los que el contenido de arcilla presenta un mayor impacto, mientras que los Andisoles son los suelos en los que el elevado desarrollo y la estabilidad estructural influyen más su porosidad y por lo tanto en los altos valores infiltración que presentan. En el caso de los Inceptisoles, al tratarse de suelos en un estadio de evolución o regresión intermedio, las propiedades con mayor peso en la infiltración dependerán del suelo clímax al que se dirijan o del que provengan (Andisoles, Vertisoles o Alfisoles).

Existen variables ambientales capaces de modificar sustancialmente la respuesta hidrológica de los suelos volcánicos por su impacto sobre los constituyentes que les aportan sus singulares características (minerales no cristalinos y materia orgánica). Los estudios de Guerra et al. (2003), Rodríguez et al. (2004) y Neris et al. (2012) muestran como el cambio de uso del suelo, de vegetación forestal a uso agrícola, tienen un efecto notable sobre la infiltración y la erosión del suelo, que desciende un orden de magnitud en las zonas agrícolas por la disminución de la estabilidad de la estructura y la protección del suelo por la vegetación. Igualmente, Neris et al. (2012) muestran como el tipo de vegetación forestal tiene influencia sobre la infiltración. Según estos autores, los Andisoles con monteverde pueden tener hasta 4 veces más infiltración que aquellos con pinar. Neris et al. (2013c) profundizan en este extremo y señalan que la extrema repelencia al agua de las capas orgánicas superficiales del suelo en los pinares es también un factor clave en este comportamiento.

Por último, los incendios forestales han mostrado tener una gran influencia en el comportamiento hidrológico y de la erosión hídrica de los Andisoles. Los estudios realizados en la isla de Tenerife indican que el fuego tiene un impacto negativo importante en las

propiedades edáficas responsables de estos procesos como consecuencia de la oxidación y alteración de la materia orgánica del suelo y el mantillo (Neris et al., 2013a). Es el caso de: (i) la estabilidad estructural y la distribución del espacio poroso, que se ve reducida en incendios de alta severidad; (ii) la repelencia al agua, que puede ser reducida o realzada dependiendo tanto de la severidad del fuego (severidades altas redujeron la repelencia al agua de los suelos y viceversa) como de los niveles de esta propiedad antes del incendio (niveles bajos de repelencia antes del incendio tendieron a aumentar y viceversa); o (iii) la protección del suelo por la vegetación, que varió en función de la severidad del incendio y determinó la magnitud de los procesos de erosión laminar tras el incendio.

### 2.2.5 Evapotranspiración

La evapotranspiración, es la pérdida de agua a la atmósfera por la combinación de la transpiración de las plantas y la evaporación directa de las superficies de tierra y agua. Es un componente importante del ciclo hidrológico de las islas. En el área de Honolulu de Oahu, en el archipiélago de Hawái (EE.UU.), por ejemplo, la evapotranspiración real se estimó en alrededor de un 40 por ciento del total de agua que cayó sobre la superficie del suelo durante 1946-1975.

Al igual que en el caso de las precipitaciones, la evaporación está relacionada con la topografía, en algunas zonas donde la altitud es alta, existe mayor humedad y, debido al mar de nubes, se reduce la intensidad del sol, por lo tanto la evapotranspiración se puede reducir un 25 %.

La evapotranspiración es la combinación de los procesos de evaporación, el agua líquida se vaporiza y se convierte en vapor de agua que pasa a la atmósfera –y la transpiración de los vegetales –vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su evacuación hacia la atmósfera– (adaptado de FAO, 2006).

La evapotranspiración es uno de los parámetros que mayor incertidumbre suele presentar en el balance hídrico, especialmente en la zona de cumbres que es el área principal donde se produce la recarga natural de los sistema acuíferos volcánicos y en donde se desarrollan también diferentes tipos de suelos forestales, sobre todo en islas de acusado relieve.

La evapotranspiración de la cobertera vegetal asentada sobre suelos volcánicos, al igual que la que se desarrolla en otro tipo de suelos, es función de los siguientes factores:

- Radiación solar (energía disponible para la vaporización del agua).
- Temperatura del aire.
- Humedad (relacionada con el déficit de saturación de la atmósfera).
- Presión atmosférica.

- Viento (velocidad y turbulencia).
- Naturaleza y estado de la superficie de evaporación (pueden influir causas antrópicas).
- Tipo de vegetación (relacionada con la fisiología vegetal).

Queda claro que los factores de tipo atmosférico son los dominantes, especialmente los relacionados con los términos aerodinámicos y de radiación, lo que requiere disponer de un importante número de parámetros, no siempre disponibles.

Según Poncela (2015), para la determinación de la evapotranspiración potencial o de referencia se han desarrollado numerosos métodos que se pueden consultar en la literatura técnica (MOPT, 1992; FAO, 2006) y que pueden ser igualmente aplicables en terrenos volcánicos aunque con restricciones importantes. Como recordatorio cabe mencionar que se han utilizado diferentes formulaciones empíricas: Thornthwaite, Blanney-Criddle, Turc, Jensen-Heise, Penman, Penman-Monteith, Hargreaves, etc., algunas de dudosa aplicabilidad general, quedando reducida a una validez local. Sin entrar en detalles, el método aceptado como estándar internacional adoptado por la FAO (2006) es el de Penman-Monteith (Monteith, 1965). Dicho método necesita de una gran cantidad de datos no siempre disponibles por lo que sus uso es limitado; si bien en Canarias, en zonas costeras y de medianías tiene una extendida utilización por la importancia de los cultivos presentes (red Agrocabildo de Tenerife, SIAR del Ministerio de Agricultura), es, sin embargo, prácticamente inexistente su uso en zona de cumbres y de medianías altas debido a la falta de datos necesarios procedentes de la red meteorológica (Poncela, 2015).

En esa situación y, para mantener el rigor en las estimaciones y acotar las incertidumbres, la FAO (2006) detalla la obtención de parámetros ausentes a partir de los que se dispone; no obstante, muchas veces solo se dispone de pluviometría y de temperaturas (y estas no siempre completas).

Por ello, a pesar de esta aparente facilidad y disponibilidad de información en zonas de interés forestal, generalmente asociadas a las zonas de medianías altas y de cumbres, con clara influencia hidrológica e hidrogeológica, se ha seguido utilizando el método de Thornthwaite (1948) por su escasa necesidad de datos directos y que, para zonas áridas y semiáridas como es el caso de la zona tropical canaria, tiende a subestimar el valor de la evapotranspiración potencial lo que, en aplicación de la ecuación del balance hídrico, lleva a sobreestimar la infiltración.

Este aspecto ya se recoge en FAO (2006) donde se propone el método de Hargreaves (Hargreaves et al., 1982, 1985) como fiable y comparable a nivel regional y que solo depende de las temperaturas máximas, mínimas y medias, así como de la radiación solar, esta última tabulada para una latitud dada.

La expresión que permite obtener la evapotranspiración de referencia en  $\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$  es (FAO, 2006):

$$ET_0 \text{ (mm / día)} = 0,0023 \cdot (t_{med} + 17,8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot R_a$$

Siendo  $R_a$ : Intensidad teórica de radiación incidente, sobre una superficie horizontal, suponiendo que no existe atmósfera ( $\text{mm}/\text{día}$ ). Tabulada FAO; “ $t_{med}$ ”: Temperatura media ( $^{\circ}\text{C}$ ) del periodo considerado;  $T_{max}$ : Temperatura máxima del periodo considerado ( $^{\circ}\text{C}$ ). En el caso de valores mensuales se toma la media de las máximas y  $T_{min}$ : Temperatura mínima del periodo considerado ( $^{\circ}\text{C}$ ). En el caso de valores mensuales se toma la media de las mínimas.

60

Conviene recordar que, en la medida de lo posible, estos resultados deben cotejarse mediante correlación y ajuste de coeficientes empíricos con el método de Penman-Monteith para las zonas de aplicación o zonas contrastadas. Para zonas boscosas se ha utilizado un coeficiente de bosque  $K_c = 1$  para el cálculo de la evapotranspiración.

### 2.2.6 Precipitación horizontal, oculta o de niebla

La lluvia horizontal, es un fenómeno natural propio de los bosques de las islas oceánicas, que se localizan a gran altitud. Es el producto del choque entre las nubes y la masa forestal, —ramas, hojas y tronco—. La humedad que transportan estas nubes, se va concentrando en las superficies vegetales, conformando gotas de agua, que por la gravedad caen al suelo, o bien, resbalan por el tronco o ramas hasta alcanzar el terreno.

En primer lugar se van a diferenciar varios conceptos que podrían llevar a equívoco. El término niebla hace referencia a una suspensión de gotas de agua muy pequeñas en la atmósfera, cerca de la superficie del suelo, que reducen la visibilidad a menos de un kilómetro de distancia. Esta niebla, en función de la visibilidad, puede clasificarse de neblina a bruma. Las nubes, en cambio, están a centenares de metros sobre el suelo, las gotas son de mayor tamaño que en el caso anterior y se convierten en lluvia horizontal cuando en su trayectoria interceptan una cadena montañosa o relieve, como es el caso de las islas occidentales de Canarias con cotas de 800 a 1.500 m.s.n.m.

La cantidad de agua que depositan estas lluvias, está basada en la densidad de las nubes. Estas pueden ser desde poco densas, con una cantidad de agua de  $0,05 \text{ g/m}^3$ , a muy densas, con una densidad de  $3 \text{ g/m}^3$  (Schemenauer y Cerecera, 1994).

Para producirse la lluvia horizontal se necesitan unos parámetros físicos y meteorológicos adecuados. De forma sintética, se puede decir que es necesario que la fuerza del viento





Figura 2.10.- Mar de nubes en el Hierro.

sea razonable, ya que si no, las gotas de agua permanecen en suspensión y no son captadas por las ramas u hojas. Además esta precipitación aumenta cuando la temperatura del aire desciende. El mar de nubes es más frecuente de marzo a agosto, en términos generales. La cota media donde se dan este tipo de precipitaciones varía en el rango de 900 a 1.600 m (Santana, 1987).

Los recursos hídricos atmosféricos, representados por la lluvia horizontal suponen una singularidad fundamental en las islas volcánicas oceánicas. Estos recursos, complementan los balances hídricos insulares, mediante la mejora de la infiltración de la lluvia en el suelo (la lluvia cae sobre suelo ya mojado), por lo tanto pueden ayudar a incrementar la recarga del acuífero de las islas de manera natural (Santamarta, 2009).

La dinámica de formación de nubes es un proceso termodinámico que depende de la presión, el volumen y la temperatura. Se puede simplificar comentando que la capacidad portante de una nube depende de la energía que posea. La medida más sencilla es la energía cinética, que queda plasmada por la velocidad del viento. Por lo tanto, al disminuir bruscamente la energía cinética no se puede sustentar todo el vapor de agua que porta la nube en saturación, y la consecuencia es la precipitación del agua vapor como agua líquida (Seijas, 1998).

Este hecho es el que fundamenta las captaciones artificiales de la precipitación horizontal. Las ubicaciones ideales se escogen en función de la altitud, orientación y la factibilidad para el desbordamiento de los alisios. La altitud debe elegirse en función de la cota normal del régimen de alisios (600-1.500 m). Lógicamente, a mayor incidencia anual, mayor posibilidad de captación.

En cuanto a la orientación, en principio es factible cualquiera dentro de la cota normal de los alisios, pero si se dispone de un barranco perfectamente orientado al noreste, las posibilidades de captación aumentan considerablemente. Un barranco encauza el viento cargado de humedad de manera que aumenta la velocidad del viento, su energía cinética y por lo tanto la cantidad de agua que pueda portar (Seijas, 1998).

En el caso de las Islas Canarias, la factibilidad de desbordamiento de los alisios se muestra fundamental. Al venir el viento laminado por el Océano Atlántico y encontrarse con alturas superiores a su cota de funcionamiento, provoca el estancamiento de las nubes y un aumento de la presión (más capacidad portante), pudiendo ascender por encima de su cota normal. Si las cotas del terreno son muy elevadas, las nubes “resbalarán” lateralmente, pero si no lo son, la nube desbordará de forma que la velocidad del viento aumentará espectacularmente. Es precisamente en los lugares donde existe desbordamiento con aumentos importantes de velocidad y posibilidades de obtener más recurso hídrico.

La cuantificación de estos recursos no está clara, como ya se ha comentado anteriormente, existen muchas discusiones en relación a la cantidad de agua obtenida, en relación a la precipitación convencional. Francisco Ortuño en el año 1951, en el anejo “El bosque y el agua” sobre la lluvia horizontal, estimó la cuantía de agua captada en masas forestales de pino, en el caso de la isla de Tenerife, en las Cumbres de Realejo Bajo, y en la isla de Gran Canaria, en el Pinar de Tamadaba. Para ello usó dos pluviómetros tipo Hellmann de 200 cm<sup>2</sup>, situados a 1,50 m sobre el suelo. Uno se colocó dentro de la base de influencia del pino y el otro, apartado del pie del árbol. Ortuño estableció que el aumento de la función captadora de la masa forestal es del orden de tres veces (3.038 mm frente a 955,5 mm en Tenerife, 2.723 mm frente a 864 mm en Gran Canaria). Otro estudio, del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña, en Tenerife, realizado mediante dos pluviómetros Hellmann, uno adaptado para la medición objetiva de precipitación horizontal, con una malla cilíndrica de 10 cm de diámetro y 22 cm de altura con una trama de 0,2 cm x 0,2 cm, obtuvieron los siguientes datos: la precipitación recogida por el pluviómetro normal desde el 1 de noviembre del 2009 hasta el 31 de octubre del 2010 fue de 379,3 mm. El pluviómetro de niebla recogió en ese mismo período la cantidad de 1.929,2 mm. Si a este valor se le resta el del pluviómetro estándar, se obtiene el valor de la precipitación oculta u horizontal, que asciende a 1549,9 mm, valor que cuadruplica al obtenido por precipitación convencional.



Figura 2.11.- Árbol Garoé, en la isla de El Hierro, por condensación de la precipitación horizontal, suministraba el agua a los antiguos aborígenes (Bimbaches).

No sólo la masa forestal intercepta de manera natural este tipo de precipitación, de manera artificial, mediante captadores no biológicos, tales como estructuras de mallas de captación, se pueden obtener pequeños recursos hídricos para pequeñas demandas en zonas de difícil acceso o espacios protegidos, donde sería inviable la construcción de una conducción hidráulica convencional, entre los usos de este sistema destacan, desde el punto de vista forestal: (i) los bebederos de fauna silvestre, (ii) el abastecimiento de zonas recreativas forestales, (iii) el suministro para repoblaciones, (iv) depósitos para la lucha contra incendios forestales.

### 2.2.7 Aguas superficiales

Los aprovechamientos superficiales se basan en la captación del agua que transcurre por los barrancos cuando estos son perennes –en pocas ocasiones– o bien, temporales cuando hay lluvias en cantidades importantes. Para aprovechar el agua se utilizan presas convencionales, en la cuales se embalsa el agua en el propio barranco –si las condiciones geológicas (suelo impermeable) lo permiten– o bien se utilizan métodos indirectos, como los tomaderos de barranco. Un tomadero conduce el agua desde los barrancos hacia diques, presas o balsas de aguas impermeabilizadas artificialmente. Es conveniente que las aguas

recolectadas lleguen con el menor número de sedimentos posible para no disminuir la capacidad de embalsamiento tanto de las balsas como de las presas, lo que constituye el principal problema tanto de diseño como de mantenimiento de estas instalaciones ya que las aguas torrenciales arrastran gran cantidad de detritus...

Existen numerosos sistemas de recolección de aguas en los cuales se conjugan la ingeniería forestal, la tradición histórica y estrategias singulares de terrenos semiáridos, muchas veces de origen árabe, con el fin de aumentar la disponibilidad de los recursos hídricos en los cultivos.

En las islas oceánicas, como norma general la cantidad de aguas superficiales disponibles es menor que la cantidad de agua subterránea aprovechable. No obstante, al ser las aguas superficiales menos cargadas de sales, la posibilidad de mezclarlas con aguas subterráneas de menor calidad es una ventaja importante.

### 2.2.8 *El régimen torrencial*

En relación a los regímenes torrenciales de las islas, hay ejemplos muy contundentes en las islas oceánicas y, en particular, en la comentada zona de la Macaronesia. Según Marzol (2005) las lluvias torrenciales se manifiestan de dos maneras: la primera, con periodos de precipitación cortos y violentos principalmente en Canarias y Cabo Verde y, la segunda, con periodos prolongados y desfasados en el tiempo, más frecuentes en Azores y Madeira. Como ejemplos particulares; en la Isla de Tenerife el 7 de abril de 1977 una tromba de agua ( $344,5 \text{ L/m}^2$ ) sobre el NE de Tenerife hizo que el barranco de San Juan con una cuenca de  $1,04 \text{ km}^2$  y un cauce de sólo  $2,7 \text{ km}$  de longitud con un 28% de desnivel, arrasara más de  $40.000 \text{ m}^3$  de material (Marzol et al., 2005). En la tabla 2.4 se pueden ver más casos de estudio de los efectos de estas lluvias torrenciales en diversos puntos geográficos.

Por lo tanto, la gestión de este riesgo natural es de extrema importancia desde el punto de vista técnico y de responsabilidad civil. En este caso confluye una hidrología forestal que comprende los siguientes puntos: (i) vigilar el estado de conservación de la vegetación, (ii) llevar a cabo actuaciones en cuenca (hidrotecnias) para la reducción de la erosión y conservación de suelos, (iii) prestar especial atención a cuencas que hayan sufrido incendios forestales por el transporte de cenizas, (iv) proceder a la restauración de la cubierta vegetal, (v) tomar medidas para la reducción de la escorrentía, (vi) llevar a cabo una correcta ordenación del uso y disponibilidad de las cuencas hidrográficas (vii) mantener la estabilidad de laderas y taludes y (viii) describir una hidrología urbana compatible con los requerimientos hidráulicos de la anterior con especial atención a los siguientes puntos: (i) capacidad de evacuación de caudales, (ii) encauzamientos de barrancos, (iii) mantenimiento óptimo de infraestructuras hidráulicas y, (iv) ordenación del espacio urbano en zona de influencia de los barrancos y las laderas.

Isla	Estado	Precipitación	Nº de víctimas	Posibles causas	Efectos de las lluvias	Año
Madeira	Portugal	185 mm en 24 horas	48	Construcción masiva de edificaciones e infraestructuras cerca de los barrancos. Pérdida de masa forestal en zonas elevadas de la isla.	Arrastre de materiales. Inundaciones.	2010
Tenerife (Canarias)	España	224 mm en 2 horas	8	Mala planificación urbana. Barrancos mal canalizados. Construcciones en Cauces. Nulo mantenimiento de cauces e infraestructuras hidráulicas.	Arrastre de materiales. Inundaciones. Rotura de infraestructuras. Cortes de agua y luz.	2002
Kauai	Hawái (USA)	145 mm en 24 horas	7	Falta de inspección en embalses, infraestructuras muy antiguas. Obstrucción de cauces. Desbordamiento de balsas y presas. Rotura de balsas por desbordamiento.	Arrastre de materiales. Rotura de infraestructuras. Cortes de agua y luz.	2006
Islas Mauricio	ídem	152 mm en 90 minutos	10	Problemas para evacuar la escorrentía en la zona urbana.	Inundaciones.	2013
San Miguel (Azores)	Portugal	n.d.	3	Edificaciones en zonas de influencia de laderas.	Deslizamiento de tierras.	2013

Tabla 2.4.- Efectos de las lluvias torrenciales de los últimos años en sistemas insulares en diferentes latitudes.

Uno de los efectos del régimen torrencial, son las inundaciones relámpago, este tipo de inundaciones tiene una serie de características como:

1. Cuencas hidrográficas pequeñas, como en la mayoría de las islas oceánicas, superficies inferiores a 50 km<sup>2</sup>.
2. Tiempos de concentración muy cortos, menos de 6 horas.
3. Escorrentías con gran cantidad de sólidos de arrastre.

Entre los efectos de las precipitaciones torrencales en las islas oceánicas se pueden enumerar los siguientes:

1. Daños en conducciones de agua y redes sanitarias, desplazamientos, arrastres, efectos en los elementos singulares, tales como: arquetas, válvulas...
2. Pérdida de la resistencia mecánica del suelo, rotura en carreteras, edificaciones.
3. Ascenso de los niveles freáticos, empujes sobre infraestructuras e instalaciones.
4. Erosión hídrica y arrastre de materiales y bienes.
5. Daños en embalses, presas y depósitos.
6. Problemas en redes de suministro energético.
7. Problemas en los sistemas de comunicaciones.
8. Contaminación de las aguas.
  - a. Fuentes superficiales: arrastre de sustancias tóxicas, reflujos de aguas negras.
  - b. Fuentes subterráneas: introducción de aguas de escorrentía en pozos y drenajes.
  - c. Problemas en los sistemas de depuración de aguas residuales, al incorporarse al ciclo de funcionamiento, gran cantidad de aguas grises.

Otro riesgo natural, en relación a la hidrología de las islas son las grandes avenidas, ya que en ocasiones causan estragos entre la población, llegándose a producir incluso pérdidas de vidas humanas. En el caso de la zona de la Macaronesia –Azores, Salvajes, Madeira, Canarias y Cabo Verde–, confluyen varios fenómenos meteorológicos que hacen que existan precipitaciones torrencales. Las avenidas, en la mayoría de las ocasiones, se forman en las cuencas hidrográficas forestales, en las zonas altas de las islas. Los barrancos entran muy rápidamente en carga y las velocidades que toman los caudales son importantes —en algunos episodios rondan los 10 m/s—. Finalmente estas trombas de agua deben desembocar en el mar.

En ocasiones se detecta la falta de un mantenimiento preventivo de los barrancos, mediante operaciones como: (i) valoración y prevención de avenidas mediante modelos y simulaciones informáticas, (ii) actuaciones en zonas erosionadas de las cuencas, (iii) limpieza de cauces, (iv) valoración de infraestructuras hidráulicas transversales a los cauces, tales como obras de paso, puentes, badenes de pistas o caminos agroforestales y, (v) la coordinación efectiva para la planificación, gestión y ejecución de proyectos hidrológicos

y forestales, entre las Administraciones Forestal y en materia hidráulica. Por ejemplo en el caso de las Islas Canarias, serían los llamados Consejos Insulares de Aguas.

Los efectos de las avenidas se incrementan tras grandes incendios forestales, sobre todo si no se actúa inmediatamente tras el fuego, por ejemplo, mediante la construcción de fajinas con el propio material afectado o diques de mampostería. Hay casos de éxito en este sentido en la Isla de El Hierro, en Canarias. Las avenidas generan pérdidas económicas muy importantes, sobre todo en el sector agrario y en infraestructuras aguas abajo, estas pérdidas se incrementan al ser territorios aislados y en algunos casos muy alejados del continente.

### 2.2.9 Erosión hídrica

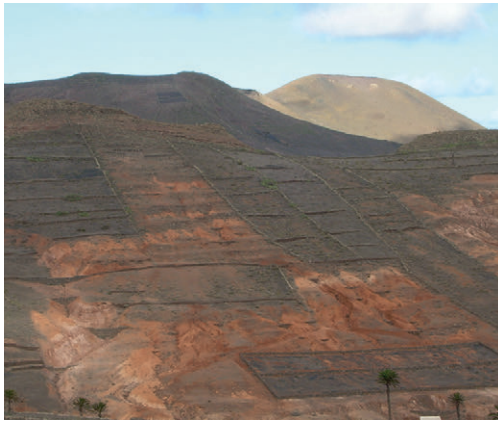
Desde el punto de vista hidrológico hay un gran problema que amenaza a las islas oceánicas: la enorme tasa de erosión anual que se genera, sobre todo en islas con poca vegetación, como por ejemplo en la Isla de Fuerteventura en Canarias, con un 60% de su territorio afectado por este fenómeno. Este proceso corresponde a la fase natural de desmantelamiento de las islas y forma parte de su ciclo vital, pero puede verse acelerado por la pérdida de cubierta vegetal y el abandono progresivo de sistemas agrícolas tradicionales, un pastoreo y urbanismo descontrolado y, finalmente, la progresiva salinización de suelos que afecta directamente a los recursos hídricos.

La erosión en las islas oceánicas depende de varios factores como:

1. Cantidad e intensidad de las lluvias, muchas de las islas oceánicas tienen un régimen torrencial de lluvias.
2. Pendiente y morfología del terreno, las islas oceánicas en sus etapas más jóvenes presentan grandes pendientes y una morfología abrupta.
3. Propiedades físicas y químicas del suelo.
4. Cobertura vegetal, es un factor fundamental, dado que los árboles sujetan y conservan el suelo, además de ser un elemento que intercepta las gotas de lluvia e, impiden que dañen el suelo, dada la energía potencial que tienen.

La pérdida del suelo se mide en toneladas de material por hectárea (t/ha), el techo mundial está en 200 t/ha, los umbrales de erosión moderada comprenden valores entre 10 y 50 t/ha. Las causas principales, además de la comentada en relación al proceso natural que tiene toda isla oceánica, se encuentran también los siguientes:

1. Crisis de la agricultura y técnicas de manejo del suelo tradicionales tales como:
  - a. Construcción y mantenimiento de bancales.
  - b. Sorribas, importación de tierras fértiles de otras partes de la isla para su instalación sobre coladas volcánicas recientes no productivas, a nivel agrícola.



68 Figura 2.12.- Erosión de ladera en la isla de Lanzarote. Figura 2.13.- Bancales en ladera, en la isla de La Gomera.

- c. Aprovechamientos hídricos sostenibles, tales como:
  - i. Mareas.
  - ii. Gavias, — guadi en zonas de Israel, muros de materiales sueltos, en zonas llanas y cercanas a costa, aprovechan nutrientes de zonas elevadas de las islas—.
  - iii. Nateros, — pequeños bancales colocados transversalmente en barrancos de zonas elevadas de la isla, utilizados como suelo agrícola—.
  - iv. Cadenas, — pequeños muros colocados en zonas de ladera que retienen agua y sujetan el suelo —.
2. Sobrepastoreo, falta de ordenación en la ganadería.
3. Sobreexplotación de los recursos hídricos.
4. Presión demográfica, aumento de la urbanización de zonas rurales.
5. Pérdida de cobertura vegetal.

En las Islas Canarias se encuentran todos los materiales volcánicos del mundo, pero este hecho no quiere decir que se erosionen por igual, dado que hay diferentes tasas de meteorización debido a que la precipitación es muy variable de un punto a otro de las islas. La heterogeneidad del terreno también implica que se produzca una erosión diferencial, que entre otros procesos puede generar, en época de lluvias, notables desprendimientos y pérdida de materiales por arrastre.

La erosión en las islas volcánicas provoca a largo plazo pérdida de diversidad, principalmente la generada por la pérdida de masa forestal, un ejemplo evidente es Hawái donde se han perdido 26 especies de aves y otras 27 están en peligro de extinción.





Figura 2.14.- Sistema de aprovechamiento de agua y conservación de suelos tipo gavia en Lanzarote.

Según Nelson (2013), otro aspecto a destacar dentro del proceso de dismantelamiento y erosión de las islas oceánicas –en particular en la isla de Oahu del archipiélago de Hawái– lo constituye el fenómeno de disolución interna de los macizos montañosos que, en comparación con las tasas de erosión convencionales, provoca más pérdida de material que la propia erosión hídrica o eólica.

Existen numerosos casos de éxito en la gestión de los recursos hídricos y control de la erosión mediante una correcta ordenación y control del sector forestal en las islas volcánicas, como por ejemplo los casos de Tenerife, Gran Canaria y la Isla de Kahoolawe en Hawái. En el caso de la Islas de Tenerife y Gran Canaria, destaca la restauración de las coronas forestales en los años 40 en la primera y en los 50-60 en la segunda. Gracias a ellas actualmente se dispone de vegetación para poder aprovechar con mayor garantía los recursos hídricos, sobre todo los provenientes de los vientos alisios, así como toda la fijación de suelo que se ha consolidado con la realización de ambos proyectos, aún vigentes. El criterio de gestión forestal de los montes en estas islas es la conservación; la relación y el interés entre las masas forestales y el agua se hace patente en Tenerife por ejemplo, con la compra los Montes de la Cumbre en la Orotava en 1880 por parte de una empresa privada de aguas; en la compra ceden el terreno y el aprovechamiento forestal al Ayuntamiento, reservándose la empresa el aprovechamiento del agua del subsuelo.

El caso americano es un ejemplo de restauración integral (forestal e hidrológica) de una isla volcánica es el de la Isla de Kahoolawe, la más pequeña del archipiélago de Hawái. Durante el siglo XX, después de dar cobijo durante muchos años a poblaciones de nativos hawaianos, esta isla estuvo prácticamente abandonada al carecer de una fuente continua de agua dulce, entre otros motivos. Durante la guerra mundial se dedicó como lugar de prácticas de tiro para la armada americana, incluyendo pruebas atómicas. A partir del año 1980 comenzó su restauración, incluyendo técnicas de conservación de suelos, limpieza –incluyendo proyectiles no detonados– y desescombro, en 1993 fue declarada zona de reserva. Se están haciendo enormes esfuerzos en reforestar la isla con especies autóctonas, el agua se obtiene de una superficie que recolecta agua de lluvia obteniendo anualmente cerca de 2.000 m<sup>3</sup>, este recurso natural se complementa con otro no convencional procedente de plantas móviles de desalación de agua de mar.

70

### 2.2.10 Aguas costeras

La erosión costera, otro problema importante en las islas, está provocada por el continuo oleaje e incrementada puntualmente por los temporales. En el caso de esta tipología de erosión la solución no es fácil. En ocasiones se ha detectado que su aparición o intensidad es debido a la ocupación de terrenos próximos al mar mediante la urbanización de zonas costeras y playas. Un caso típico de estudio (Fletcher, 1997) es la zona de Waikiki, en la Isla de Oahu en Hawái, antiguamente esta zona estaba ocupada por un humedal y actualmente está completamente urbanizada, el proceso erosivo actualmente es muy importante y amenaza a las infraestructuras presentes. Como remedio provisional, se extrae arena en fondos marinos próximos y se intenta recuperar parte de las playas, el coste de esta operación es extremadamente elevado pero hay que tener en cuenta que, en general, muchas de las islas volcánicas, como Hawái, Canarias o las Islas Fiji, viven del turismo, motivo por el cual, en cierta manera, se compensa el coste. A largo plazo, además de una correcta planificación, la solución pasa por recuperar medioambientalmente las zonas costeras afectadas por esta erosión, trabajo muy complicado por ser zonas altamente turísticas, masificadas y fuente fundamental de ingresos para la economía de las islas.

En el acuífero costero, existe una relación de equilibrio natural entre el agua subterránea dulce del acuífero que descarga al mar y el agua salada de origen marino que pugna por penetrar tierra adentro (Custodio, 1995 y 2004).

Uno de los mayores problemas en los acuíferos costeros es la intrusión marina. La intrusión marina, que es un proceso dinámico, el frente de agua salada avanza tierra adentro en los periodos de menor recarga del acuífero y retrocede hacia el mar cuando la recarga es mayor. Al existir una demanda importante del recursos hídricos para la agricultura y de los núcleos urbanos costeros, el equilibrio anteriormente planteado se rompe. La consecuencia es la progresiva salinización de los pozos.



Figura 2.15.- Erosión en costa, en la isla de Fuerteventura.

Un indicador de la intrusión de agua de mar, es un aumento de la concentración de cloruro en el acuífero costero de agua dulce. El cloruro es un constituyente principal de agua de mar, es químicamente estable. Una concentración de cloruro de 100 miligramos por litro (mg/L) puede indicar intrusión de agua de mar.

### 2.2.11 Recarga del acuífero

Para obtener los recursos hídricos subterráneos es necesarios que se produzca el efecto de la infiltración y posteriormente la recarga del acuífero insular. La infiltración se define como la entrada del agua a través de la capa superficial de la corteza terrestre, es decir del suelo. La relación entre el aporte de agua (lluvia, riego, etc.) y la infiltración determina la proporción de la primera que penetra y puede moverse hacia estratos profundos, y la que queda en superficie disponible para la escorrentía. La naturaleza volcánica de las islas contribuye, entre otros factores, a la formación de algunos suelos con propiedades muy peculiares en cuanto a su mineralogía, que se traducen en un comportamiento característico ante la infiltración. Su conocimiento es por tanto fundamental para la planificación de un recurso tan escaso en la isla como el agua, como se ha comentado en secciones anteriores.

La infiltración puede variar entre el 2% de la precipitación, en ambientes semiáridos, hasta un 50% de la precipitación en islas más húmedas, lo que puede suponer hasta 500 mm/año.

Según el proyecto Islhagua (2013), en Canarias, las tasas de recarga acuífera, estimadas en porcentaje respecto a las precipitaciones descontando la evapotranspiración, escorrentía superficial y descarga subterránea al mar, varían entre el 0,1% de Lanzarote hasta el 18,3% de Tenerife, mientras que Gran Canaria es un ejemplo de situación intermedia con un 10,1% de tasa de recarga acuífera.