

OTRAS PUBLICACIONES DEL AUTOR

- «Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos. Métodos, técnicas y experiencias en las Islas Canarias»
- «Avances en la investigación de los recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos»
- «Ingeniería forestal y ambiental en medios insulares»
- «Climate change and restoration of degraded land»
- «Ingeniería Geológica en terrenos volcánicos»
- «Investigación, Gestión y Técnica Forestal, en la Región de la Macaronesia»
- «Restauración de la Cubierta Vegetal y de Espacios Degradados en la Región de la Macaronesia»
- «Ensayos geotécnicos de suelos y rocas»
- «Environmental security, geological hazards and management»
- «Laboratorio virtual de mecánica de suelos y rocas»
- «Minería del agua y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos»

La presente obra aporta un compendio de conceptos, metodologías y técnicas necesarias para poder acometer un proyecto minero para la explotación de las aguas subterráneas en las islas volcánicas oceánicas. El texto presenta dos partes diferenciadas. Por un lado, se introduce en la ciencia y el conocimiento básico necesario para entender el funcionamiento de los acuíferos en las islas volcánicas, es decir, la hidrología e hidrogeología de las islas oceánicas. Continúa con la técnica y estrategias de extracción del agua subterránea y, se complementa, con un anexo donde se indican las partes fundamentales que deben comprender un proyecto minero de estas características.

El autor de la obra, Juan Carlos Santamarta Cerezal, es Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), en Ingeniería Hidráulica y Energética (ETSICCP). Ingeniero de Montes (UPM), Civil (ULPGC) e Ingeniero Técnico de Minas (UPM). Investigador afiliado al Water Resources Research Center (WRRC) de la Universidad de Hawái en EE.UU. (2013-2015), e Investigador colaborador del IUACA (Instituto Universitario del Agua y las Ciencias Ambientales) de la Universidad de Alicante. El libro ha contado con la colaboración de dos grandes profesionales y expertos del mundo del agua de Canarias; el Ingeniero de Minas, Rafael Lario Báscones y el Doctor en Geología Rayco Marrero. El prólogo ha sido escrito por el Catedrático de la Escuela de Ingenieros de Minas de Vigo, el Doctor Enrique Orche.

Esta es una obra de gran interés para académicos, ingenieros, consultores y profesionales, implicados en proyectos de abastecimiento de islas volcánicas oceánicas, o estudiantes de Ingeniería o Ciencias Geológicas que quieran iniciarse en las técnicas mineras para la búsqueda y explotación de aguas en terrenos volcánicos, así como su hidrogeología.



ULL

Universidad
de La Laguna



Tratado de Minería de Recursos Hídricos en Islas Volcánicas Oceánicas

Juan Carlos Santamarta Cerezal



Tratado de Minería de Recursos Hídricos en Islas Volcánicas Oceánicas

Juan Carlos Santamarta Cerezal



Juan Carlos Santamarta Cerezal

Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), en Ingeniería Hidráulica y Energética (ETSICCP). Ingeniero de Montes, Civil e Ingeniero Técnico de Minas por la UPM. Investigador afiliado al Water Resources Research Center (WRRC) de la Universidad de Hawái en EE.UU. (2013-2015) e Investigador colaborador del IUACA (Instituto Universitario del Agua y las Ciencias Ambientales) en la Universidad de Alicante. Ha contribuido, con más de 170 publicaciones científicas y docentes, incluyendo 12 libros técnicos, al conocimiento del agua y el medio ambiente de las islas volcánicas oceánicas, principalmente en la región de la Macaronesia. Su actividad investigadora se complementa con su gran perfil docente, donde destacan sus premios y reconocimientos a la innovación docente en las enseñanzas universitarias en 2012, 2013, 2014 y 2015, así como la dirección y organización de 56 cursos y seminarios en relación a los recursos hídricos y naturales. Director de 4 tesis doctorales. Profesor colaborador de cursos de postgrado y Máster en universidades Nacionales (Barcelona, Nebrija, UNED, UCM, UPM, Sevilla) e Internacionales como la Universidad de Azores, en Portugal y la Universidad de Florida, en EE.UU.

Su pasión, además de su familia, es el agua y los bosques. Gracias a este interés ha podido viajar por medio mundo, observando los diferentes sistemas de aprovechamiento y gestión del agua, principalmente en sistemas insulares y su relación con el medio ambiente. Siempre que puede se acerca a la ciudad que le vio crecer, León.

Tratado de Minería de Recursos Hídricos en Islas Volcánicas Oceánicas

Juan Carlos Santamarta Cerezal



Tratado de Minería de Recursos Hídricos en Islas Volcánicas Oceánicas

Juan Carlos Santamarta Cerezal



ULL | Universidad
de La Laguna

TRATADO DE MINERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS EN ISLAS VOLCÁNICAS OCEÁNICAS

©Juan Carlos Santamarta Cerezal | jcsanta@ull.es

EDITA:



Colegio Oficial de Ingenieros de Minas del Sur de España
Avda. República Argentina, 26 - 5ºE. 41011 SEVILLA
surminas@surminas.org

Con la colaboración del Vicerrectorado de Relaciones con la Sociedad.



Diseño y Maquetación: Mónica Ortiz Melchor ☎616 609 472

Depósito Legal: TF 274-2016

ISBN: 978-84-608-7621-2

208 pp. ; 24 cm

1ª Edición: Noviembre, 2016.

Como citar este libro:

SANTAMARTA J.C. (2016). *Tratado de Minería de Recursos Hídricos en Islas Volcánicas Oceánicas*. Sevilla: Colegio Oficial de Ingenieros de Minas del Sur de España.

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

A mis hijos: Enrique y Guillermo.

*«Espero que un día os sintáis tan orgullosos de vuestros padres, como
me siento de los míos, vuestros abuelos, Lucila y Fausto.»*



ÍNDICE

PRÓLOGO	11
PRÓLOGO DEL AUTOR	13
PARTE I. VULCANISMO Y RECURSOS HÍDRICOS	17
CAPÍTULO 1. VULCANISMO Y FORMACIÓN DE ISLAS VOLCÁNICAS OCEÁNICAS	19
1.1 ISLAS	19
1.2 TEORÍAS DE FORMACIÓN DE LAS ISLAS OCEÁNICAS	20
1.3 TIPOS DE VULCANISMO	25
1.4 ETAPAS DE FORMACIÓN DE UNA ISLA	29
1.5 MATERIALES VOLCÁNICOS	33
1.5.1 <i>Introducción</i>	33
1.5.2 <i>Rocas volcánicas</i>	34
1.5.3 <i>Lavas</i>	36
1.5.4 <i>Piroclastos</i>	39
1.5.5 <i>Depósitos piroclásticos</i>	40
1.5.6 <i>Diques</i>	43
CAPÍTULO 2. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL EN LAS ISLAS VOLCÁNICAS OCEÁNICAS	45
2.1 LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LAS ISLAS VOLCÁNICAS OCEÁNICAS	45
2.2 PARÁMETROS HIDROLÓGICOS DE LAS ISLAS VOLCÁNICAS OCEÁNICAS	47
2.2.1 <i>Estudio del ciclo del agua</i>	49
2.2.2 <i>Precipitación</i>	49
2.2.3 <i>Escorrentía</i>	52
2.2.4 <i>Infiltración</i>	55
2.2.5 <i>Evapotranspiración</i>	58
2.2.6 <i>Precipitación horizontal, oculta o de niebla</i>	60
2.2.7 <i>Aguas superficiales</i>	63
2.2.8 <i>El régimen torrencial</i>	64

2.2.9	Erosión hídrica	67
2.2.10	Aguas costeras	70
2.2.11	Recarga del acuífero	71

CAPÍTULO 3. EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LAS ISLAS VOLCÁNICAS OCEÁNICAS 73

3.1 INTRODUCCIÓN 73

3.2 MARCO HIDROGEOLÓGICO 74

3.3 COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DE LOS MATERIALES Y ESTRUCTURAS VOLCÁNICAS 77

3.3.1 Porosidad y permeabilidad inicial 78

3.3.2 Composición mineralógica de las rocas 78

3.3.3 Alteración hidrotermal y compactación 78

3.3.4 Fracturación secundaria 80

3.3.5 Flujos de lava o coladas 80

3.3.6 Depósitos piroclásticos 81

3.3.7 Diques geológicos 82

3.3.8 El agua en el suelo 83

3.3.9 Paleosuelos 84

3.4 TIPOS DE ACUÍFEROS INSULARES 85

3.4.1 Ambiente volcanoestructural 85

A. Macizos basálticos 85

B. Zonas dorsales o rift 86

C. Valles y depresiones 86

3.4.2 Acuíferos formados por deslizamientos gravitacionales 86

3.4.3 Acuífero basal o general 87

3.4.4 Acuíferos colgados 88

3.4.5 Acuíferos costeros 89

3.5 CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA HIDROQUÍMICA DE LAS FORMACIONES VOLCÁNICAS 89

3.5.1 Contenido catiónico 90

3.5.2 Contenido aniónico 90

3.5.3 Aporte endógeno y agresividad del agua 91

3.5.4 Problemas de calidad en el recurso 91

3.5.4.1 Salinización 92

3.5.4.2 Flúor 94

PARTE II. INGENIERÍA MINERA 97

CAPÍTULO 4. TIPOLOGÍA DE LOS APROVECHAMIENTOS; MINERÍA DEL AGUA 99

4.1 INTRODUCCIÓN 99

4.2 MINAS DE AGUA 100

4.3 GALERÍAS DE AGUA 100

4.3.1 Galerías convencionales horizontales o dike tunnel 100

4.3.2 Galerías de nacientes 102

4.3.3 Galerías en trancada o inclined shaft 102

4.3.4 Pozo galería 103

4.4 OTROS SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS EN TERRENOS VOLCÁNICOS 103

4.4.1	<i>Pozo tradicional canario</i>	103
4.4.2	<i>Sondeos</i>	105
CAPÍTULO 5. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UNA GALERÍA-MINA DE EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS		109
5.1	INTRODUCCIÓN	109
5.2	PROBLEMAS GEOTÉCNICOS USUALES EN LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS EN TERRENOS VOLCÁNICOS	113
5.2.1	<i>Introducción</i>	113
5.2.2	<i>Soluciones técnicas</i>	114
5.2.3	<i>Clasificación geotécnica de los materiales volcánicos encontrados en la traza de la mina</i>	120
	A. Tipos de materiales	121
5.3	INNOVACIONES CONSTRUCTIVAS: REGULACIÓN DE CAUDALES MEDIANTE LA RECONSTRUCCIÓN DE DIQUES GEOLÓGICOS Y SISTEMAS CONSTRUCTIVOS MEDIANTE SONDEOS DIRIGIDOS	123
5.3.1	<i>Regulación de caudales mediante la reconstrucción de diques geológicos</i>	123
	A. Planteamiento del problema	125
	B. Construcción	126
CAPÍTULO 6. EXPLOSIVOS		129
6.1	LOS EXPLOSIVOS	129
6.2	LA PERFORACIÓN POR EXPLOSIVOS	129
6.3	ESQUEMA DE TRABAJO	131
CAPÍTULO 7. SEGURIDAD EN LAS EXPLOTACIONES		133
7.1	SEGURIDAD	133
7.2	ACCESO	133
7.3	REGLAMENTO DE SEGURIDAD	133
7.4	SINGULARIDADES EN CUANTO A SEGURIDAD	136
7.4.1	<i>Coyunturales</i>	136
7.4.2	<i>Técnicas</i>	137
	A. Excavación - Construcción	137
	B. Atmósfera y ventilación	139
	C. Electrificación	141
	D. Acceso	144
7.5	ALGUNAS CONCLUSIONES	147
ANEXO A. CONTENIDOS Y CÁLCULOS TIPO DE UNA MINA/GALERÍA DE AGUA EN TERRENO VOLCÁNICO		151
A.1	INTRODUCCIÓN	153
A.1.1	<i>Proyectos de minas y galerías de agua</i>	153
A.1.2	<i>Pequeños aprovechamientos de aguas subterráneas destinados al autoconsumo</i>	155
A.1.3	<i>Obras para el mantenimiento de caudal inscrito en el Registro de Aguas</i>	155
A.2	LA MEMORIA DEL PROYECTO DE GALERÍA DE AGUA	158

A.2.1	<i>Situación y accesos</i>	159
A.2.2	<i>Geología e Hidrogeología</i>	161
A.2.3	<i>Geotecnia</i>	162
A.2.4	<i>Descripción de las obras</i>	164
A.2.5	<i>Legislación aplicable</i>	164
A.2.6	<i>Plazo de ejecución</i>	165
A.2.7	<i>Plan de obra</i>	165
A.2.8	<i>Presupuesto</i>	166
A.3	PLANOS	166
A.4	EL PLIEGO DE CONDICIONES	166
A.5	LOS PRESUPUESTOS	167
A.6	LOS ANEXOS DEL PROYECTO	169
A.6.1	<i>La organización de las obras</i>	169
A.6.2	<i>El estado de alineaciones</i>	172
A.6.3	<i>Volumen de excavación, carga y transporte</i>	173
A.6.4	<i>Cálculos de perforación y explosivos</i>	174
A.6.5	<i>Control de las vibraciones</i>	180
A.6.6	<i>La ventilación</i>	181
A.6.7	<i>Instalaciones neumáticas</i>	184
A.6.8	<i>Instalaciones</i>	185
A.6.9	<i>Documento de seguridad y salud</i>	186
A.6.10	<i>Aspectos ambientales</i>	188
	BIBLIOGRAFÍA y TRABAJOS CITADOS	193
	LISTA de TABLAS Y FIGURAS	202

PRÓLOGO

11

El agua es un bien escaso en las Islas Canarias que, por ello, es necesario gestionar con la máxima prudencia y acierto. Y esta gestión comienza por la evaluación de los potenciales recursos hídricos y su reposición natural, por la investigación de los acuíferos y mantos en ellos contenidos, y sigue por su posterior extracción, almacenamiento, uso y consumo sostenibles aprovechando hasta la última gota de tan valioso y fundamental recurso.

Las rocas que forman las islas, de naturaleza volcánica, condicionan el comportamiento del agua en lo que respecta a su escorrentía superficial, infiltración, almacenamiento subterráneo y tipología de las captaciones y conducciones, hasta el punto de que puede hablarse de una cultura canaria del agua, muy arraigada entre la población, que ha dado lugar a un patrimonio hidráulico aún no bien conocido y valorado.

La variada morfología de las islas también tiene una influencia decisiva en la cantidad de agua de lluvia que reciben. Cuanto mayor es su relieve y altitud mejores son las condiciones para la descarga pluvial, bien sea de forma directa o como lluvia horizontal.

En cualquier caso, las Islas Canarias disponen de recursos de agua, fundamentalmente subterráneos, que se almacenan especialmente en las múltiples grietas, poros y huecos que presentan los materiales volcánicos. Debido a las extracciones efectuadas en las últimas décadas, estos recursos profundos se encuentran cada vez más lejos de la superficie; por ello, conocer su ubicación exacta y el volumen de agua retenido en las fisuras no es fácil, ni tampoco lo es extraerlo de forma sostenible. Por ello, el conocimiento de las rocas profundas, la prospección hidrogeológica y la captación del recurso deben acometerse con metodologías modernas que optimicen el binomio gasto/resultado. Es bien sabido por los técnicos implicados en Hidrogeología e Hidrología que las técnicas más adecuadas son las utilizadas en la búsqueda y explotación de yacimientos minerales, en su más amplio sentido, convenientemente adaptadas al recurso agua.

Y ahí es donde encontramos al autor de este libro, Juan Carlos Santamarta. En primer lugar hay que destacar que su formación a este respecto es envidiable, pues ha cursado estudios que abordan la problemática del agua desde distintos y complementarios puntos de vista (ingeniería de montes, civil y minas). Este conocimiento pluridisciplinar, unido al hecho de ser residente en las Islas Canarias y a la fluida y frecuente relación con instituciones nacionales y extranjeras con amplia experiencia en el estudio de acuíferos fisurados vinculados a ambientes isleños, le ha permitido adquirir una gran experiencia, a pesar de su juventud, en la investigación y captación de los recursos hídricos en islas volcánicas. El fruto de esta labor profesional ha quedado plasmado en más de una decena de libros escritos, solo o en colaboración, que repasan la problemática del agua en los medios insulares, cuya lectura es imprescindible para el buen conocimiento de la misma.

En esta ocasión el autor se ha decantado por la redacción de un libro de contenido novedoso que incorpora los aspectos mineros a los proyectos de explotación de las aguas subterráneas en los acuíferos volcánicos isleños. Para ello ha dividido el texto en dos partes claramente diferenciadas: la primera, más tradicional, permite entender cómo son los acuíferos volcánicos insulares y cómo funciona el agua contenida en ellos; la segunda explica las técnicas mineras al uso en la extracción de aguas subterráneas, pues técnica minera es la construcción de galerías subterráneas y lo que ello lleva aparejado. El autor incide específicamente en los contenidos que deben contemplarse en cualquier proyecto de captación, que deben tener una importante componente minera debido al uso continuado de técnicas constructivas así conceptuadas por la legislación vigente; de esta forma se abordan aspectos tan poco tratados en los textos hidrológicos como la excavación de galerías subterráneas, el uso de explosivos, las voladuras y el tratamiento de la seguridad, especialmente en lo que respecta a la ventilación, la electrificación y los accesos.

Una cuidada y abundante bibliografía completa el texto. El hecho de que el libro sea editado por el Colegio Oficial de Ingenieros de Minas del Sur de España, avala su calidad.

Por las características indicadas, el presente libro constituye un hito en la bibliografía de la construcción de las captaciones de agua en medios volcánicos insulares, al que se incorpora, por primera vez, la componente indudablemente minera que comporta. La aplicación de los conceptos que Juan Carlos Santamarta presenta en esta obra mejorarán, sin duda, la gestión de las aguas subterráneas canarias ya que optimizará la investigación y tecnificará la construcción de las galerías de explotación incidiendo positivamente en la seguridad de las mismas.

Enrique Orche García

Dr. Ingeniero de Minas
Catedrático de Prospección e Investigación Minera
Universidad de Vigo

PRÓLOGO del AUTOR

13

La importancia del abastecimiento de agua en un terreno aislado, como son las islas volcánicas oceánicas, justifica sobradamente la realización de un estudio técnico sobre los diferentes aprovechamientos hídricos subterráneos existentes, haciendo especial intensidad en los relativos a las explotaciones mineras. Esta iniciativa, también se justifica, por la ausencia de manuales y documentos especializados relacionados con este tipo especial de minería, que es fundamentalmente, la que aprovecha los recursos hídricos en terrenos volcánicos, si bien, existen explotaciones similares en otro tipo de terrenos con diferentes características, como por ejemplo; en la Comunidad Valenciana, Cataluña y otras partes del País.

Las islas volcánicas tienen una geología singular, que condiciona notablemente, la forma de aprovechar los recursos hídricos. En general, es más compleja que en los territorios continentales. El agua en las islas volcánicas es un activo fundamental para el desarrollo económico y vital de sus habitantes. En el caso particular de Canarias, es uno de los lugares del mundo donde más conocimiento se tiene sobre sus aguas subterráneas y los recursos hídricos en general, pero obviamente hay muchas cosas todavía por hacer e investigar. El recurso hídrico en Canarias proviene principalmente de las galerías o minas de agua, salvo en las islas orientales de Fuerteventura y Lanzarote, que han desarrollado una minería única en el mundo, que se estudia y analiza, en el presente libro.

La islas Canarias tienen similitudes con lo que ocurre en otros sistemas insulares volcánicos, como por ejemplo: Madeira, Jeju (Korea del Sur), Azores, o incluso, el archipiélago de Hawái. En estas islas, el funcionamiento de su hidrología, es similar a Canarias, aunque el aprovechamiento del recurso hídrico, por unas condiciones climáticas mucho más húmedas en dichos archipiélagos, se desarrolla de una manera diferente, aunque se pueden presentar algunas estrategias comunes. Por ejemplo en Canarias, es necesario destacar que los primeros “maestros del agua”, tras la Colonización europea, fueron traídos

de Madeira, para construir acequias y otras obras de almacenamiento. No obstante, en la tecnología minera para captar aguas subterráneas, hay que buscar la relación original, en la tecnología hidráulica árabe, vía la Península Ibérica.

El presente libro, presenta dos partes diferenciadas. Por un lado se introduce en la ciencia necesaria para entender el funcionamiento de los acuíferos en las islas volcánicas, es decir la hidrología e hidrogeología de las islas. Prosigue con la técnica y estrategias de extracción del agua y, se complementa, con un anexo donde se indican las partes fundamentales que debe comprender un proyecto minero de estas características. Confío en que el libro sea de utilidad para los futuros ingenieros que se dediquen a buscar, extraer y aprovechar el agua en las islas volcánicas donde quiera que se construyan estas infraestructuras.

Quiero agradecer la colaboración en dos capítulos, del Doctor D. Rayco Marrero, gran conocedor de la hidrogeología insular y del Ingeniero de Minas, D. Rafael Lario Bascónes, con el cual he recorrido numerosas explotaciones y he conocido de primera mano muchas singularidades que desconocía. A Luis E. Hernández Gutiérrez, compañero infatigable de batallas, le agradezco su ánimo y sus aportaciones en materia geotécnica. Gracias también al Colegio Oficial de Ingenieros de Minas del Sur de España por la coedición del libro, especialmente a la Decana en las Islas Canarias, Doña Miryam Machado Alique. Aprovecho también estas líneas, para recordar a grandes maestros del agua en las islas como los Doctores D. Emilio Custodio y D. José Sáenz de Oiza, gracias a su conocimiento, dedicación y esfuerzo podemos disfrutar de un aprovechamiento del agua en los terrenos volcánicos, único en el mundo. Por supuesto, no me puedo olvidar del Catedrático D. Enrique Orche, sus consejos, su gran calidad humana y generosidad, son impagables.

Considero que el presente libro puede servir de base a futuros estudios y proyectos, en el área de los recursos hídricos de las islas volcánicas, no solo en Canarias, sino en otros sistemas insulares oceánicos donde pueda ser factible el desarrollar una ingeniería minera del recurso hídrico, de una manera sostenible, que pueda complementar a las actuales soluciones para el abastecimiento hídrico, que pasan por la desalinización de agua de mar. Por supuesto, cualquier sugerencia o crítica constructiva al texto será bienvenida.

Juan Carlos Santamarta Cerezal

Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid (ETSICCP)
Ingeniería Hidráulica y Energética
Ingeniero de Montes (UPM)
Ingeniero Técnico de Minas (UPM)
Ingeniero Civil (ULPGC)
Ingeniero en Recursos Energéticos (UJA)

PARTE I

VULCANISMO Y RECURSOS HÍDRICOS



CAPÍTULO 1: Vulcanismo y formación de islas volcánicas oceánicas

Juan Carlos Santamarta Cerezal

1.1 ISLAS

Una isla es una porción de territorio que se encuentra rodeado por agua. Este terreno puede estar en medio de un río o lago, o bien puede estar rodeado de un mar u océano. En este caso, la isla puede tener dos orígenes, continental o volcánico. Cuando existe una agrupación de islas, geográficamente o geológicamente relacionadas, se denomina archipiélago. Islas, de muy pequeño tamaño —menor de 0,5 hectáreas (ha)—, se suelen denominar islotes.

Las islas continentales, son islas que se encuentran en la plataforma continental. Se pueden formar por diversos procesos, por ejemplo: por los cambios del nivel del mar, debido a la subida de este en la última glaciación —hace 18.000 años—. Islas que se forman, en medio de los ríos, islas que se forman, por la erosión del brazo de tierra que les une al continente, islas de barrera, que se forman paralelamente a la costa, formadas por sedimentos, limo o grava, o bien, formadas por coral. Existen también, grandes islas, que son como micro continentes, que se formaron por la separación del terreno respecto al continente, un ejemplo claro es Madagascar.

Finalmente, están las islas oceánicas —las más interesantes desde el punto de vista de la minería del agua—. Son conocidas, por la denominación de islas volcánicas, atendiendo al origen de su formación: erupción de volcanes en el fondo del océano (puntos calientes o “Hot Spot”, áreas de contacto de las placas tectónicas, cerca de fosas marinas, o bien en dorsales oceánicas) que alcanzan la superficie del mar. En algunos casos, estas erupciones submarinas no llegan a emerger y formar una isla, formándose montañas submarinas (1.1).

Las islas son sistemas aislados, esto ha supuesto evolucionar como unidades ambientales diferentes con respecto a los terrenos continentales en varios aspectos; por un lado la diversidad vegetal —incluyendo endemismos— que presentan la mayoría de las islas. Este efecto es mayor, cuanto más alejada de los continentes esté la isla, todo ello es resultado de una combinación de evolución y aislamiento geográfico. El otro aspecto a considerar es que las islas tienen un ciclo de vida corto, en comparación con los terrenos continentales. Desde su origen, pasan por los siguientes estadios: (i) formación, (ii) crecimiento, (iii) desmantelamiento por grandes deslizamientos gravitacionales y procesos erosivos y, por último, (iv) desaparición bajo el mar.

También comparten características ambientales, económicas y sociales comunes tales como: (i) ecosistemas forestales singulares y especies muy sensibles a pequeñas perturba-



Figura 1.1.- La isla de Madeira, en la región de la Macaronesia.

ciones en los hábitats, (ii) singularidad botánica, (iii) alta presencia del sector primario, (iv) dependencia del turismo como industria, (v) alta dependencia energética pero posibilidad de integrar energías renovables, (vi) elevada densidad de población. Un ejemplo ilustrativo es Hawái, tiene la mayor densidad de población de los Estados Unidos. Incluso a nivel edafológico entre los suelos en las islas volcánicas hay más similitudes que diferencias.

1.2 TEORÍAS DE FORMACIÓN DE LAS ISLAS OCEÁNICAS

Los métodos cuantitativos para el estudio de los volcanes y sus productos están ganando importancia en el campo de la evolución de la vulcanología, por ejemplo; el uso de técnicas cada vez más precisas y accesibles de laboratorio para determinar la composición química de las rocas y minerales. Los vulcanólogos, han desarrollado metodologías para comprender los orígenes y la evolución del magma. Las limitaciones de temperatura y presión estimada a partir de datos químicos son mejoradas por los resultados de estudios geofísicos; en conjunto, estos esfuerzos han conducido a una mejor comprensión de las dimensiones y ubicaciones cámaras magmáticas. Al mismo tiempo, el desarrollo de la capacidad de los equipos informáticos, ha permitido que los vulcanólogos puedan cuantificar sistemáticamente las observaciones de campo que pueden ser numéricamente modeladas mediante el uso de la mecánica de fluidos.

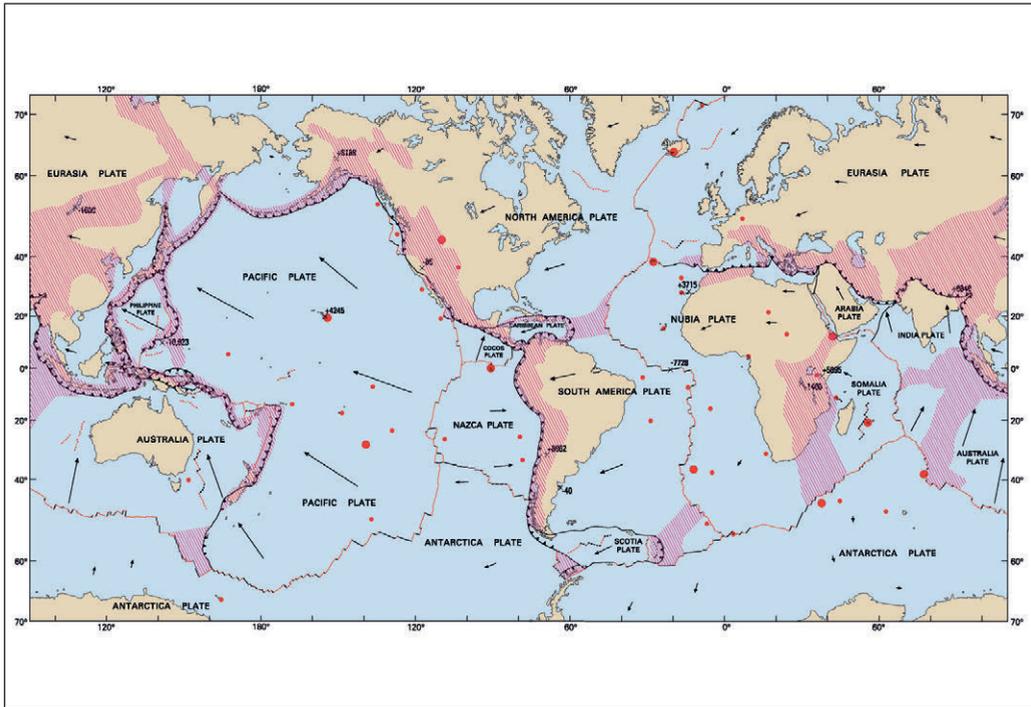


Figura 1.2.- Placas y dorsales oceánicas (USGS, U.S Geological Survey).

Una de las dimensiones, más interesantes de la vulcanología, del proceso de formación de las islas oceánicas, es el vulcanismo. El vulcanismo suele ir asociado a zonas tectónicamente activas. La corteza exterior de la Tierra está formada por una serie de placas tectónicas que se mueven sobre la superficie del planeta. En zonas, donde estas placas se juntan, a veces, se pueden formar volcanes.

Las dorsales oceánicas son unas cordilleras submarinas que se extienden a lo largo de miles de kilómetros, con unas dimensiones de 1.000 kilómetros de ancho y con unas alturas medias de 1.000 a 2.100 metros. Se generan cuando en el manto terrestre se produce un ascenso de rocas fundidas que rompen la corteza oceánica y dan lugar a la formación de una fisura. La mayoría de las erupciones volcánicas ocurren en las dorsales oceánicas. La formación de las dorsales, se explica por la dinámica interna de la tierra que provoca corrientes de convección; ascenso de material caliente desde el interior y posterior descenso tras su enfriamiento. La emisión de esos materiales en las zonas de contacto de las placas es la causa de la génesis de las dorsales oceánicas. En el Océano Atlántico se juntan la placa Norteamericana con la Eurasiática y Africana. La dorsal atlántica recorre todo el Océano de Norte a Sur.

ISLA	EDAD EN MILLONES DE AÑOS (Ma)
Fuerteventura	20,2 Ma
Gran Canaria	14,6 Ma
Tenerife	11,9 Ma
La Gomera	9,4 Ma
La Palma	1,7 Ma
El Hierro	1,1 Ma

Tabla 1.1.- Progresión de las edades de las diferentes islas del archipiélago Canario (Carracedo, 2011)

Cuando las placas tectónicas convergen, se concentran en una zona denominada zona de subducción. Una placa se coloca por debajo de una placa de avance, lo que crea una actividad submarina importante. La placa de subducción va adquiriendo cada vez más presión. El material caliente y vuelto a derretir en subducción, asciende y se filtra hacia la corteza, formando así una serie de volcanes. Estos volcanes pueden formar una cadena de islas conocidas como, “arco insular”.

La teoría del Punto Caliente o “Hot Spot”, se utiliza para explicar el desarrollo de volcanes en zonas de la corteza oceánica no activas tectónicamente, como puede ser el interior de la placa oceánica. La teoría del Punto Caliente asocia el vulcanismo con una anomalía térmica en el manto, seguido de algún tipo de fractura en la corteza inmediatamente superior, el magma ascendería por estas fracturas dando lugar al volcán submarino. Si bien el punto caliente es fijo, la corteza está en movimiento, esto puede llegar a formar una cadena de islas, como ocurre en Hawái o en las Islas Canarias. La teoría de este Punto Caliente fue sugerida inicialmente por Wilson en 1963. En Hawái, esta teoría se evidencia por que los volcanes de las islas Hawaianas son más antiguos mientras más se alejan del punto caliente. Las rocas volcánicas más antiguas están en la isla de Kauai, la isla Hawaiana más occidental y tienen aproximadamente cinco millones de años. En comparación, en la Big Island de Hawái, las rocas más antiguas tienen menos de setecientos mil años de antigüedad. Caso similar ocurre en las Canarias, donde el archipiélago se ha ido construyendo de este a oeste, con diferentes edades geológicas, según la tabla 1.1 .

SISTEMA INSULAR	PAÍS	ORIGEN CIENTÍFICAMENTE RELATIVAMENTE ACEPTADO
Canarias	España	Punto Caliente, "Hot Spot"
Hawái	EE.UU.	Punto Caliente, "Hot Spot"
Aleutianas	EE.UU. & Rusia	Subducción, "arco insular"
Vanuatu	República de Vanuatu	Punto Caliente, "Hot Spot"
Galápagos	Ecuador	Punto Caliente, "Hot Spot"
Reunión	Francia	Punto Caliente, "Hot Spot"
Islas Curiles	Rusia	Subducción, "arco insular"

Tabla 1.2.- Origen de diferentes islas volcánicas oceánicas.

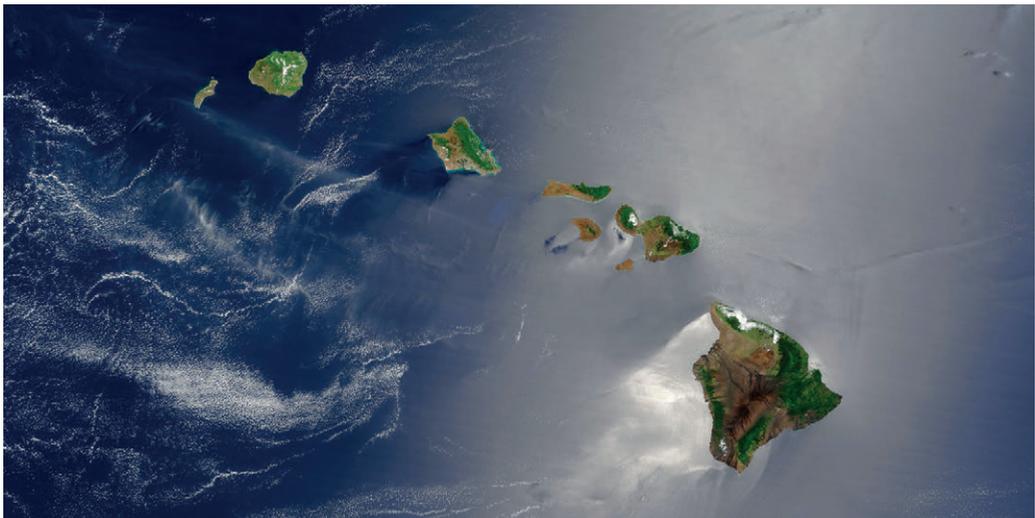


Figura 1.3.- Archipiélago de Hawái, vista desde satélite (Wikipedia).

Particularizando para el caso canario: la edad del vulcanismo disminuye de Este a Oeste, la placa continental del Atlántico se mueve muy lentamente. Las islas más antiguas son Lanzarote y Fuerteventura, de edad media son Gran Canaria, Tenerife y la Gomera, siendo las más jóvenes La Palma y el Hierro, no superando los 2 millones de años (Ma), de antigüedad.

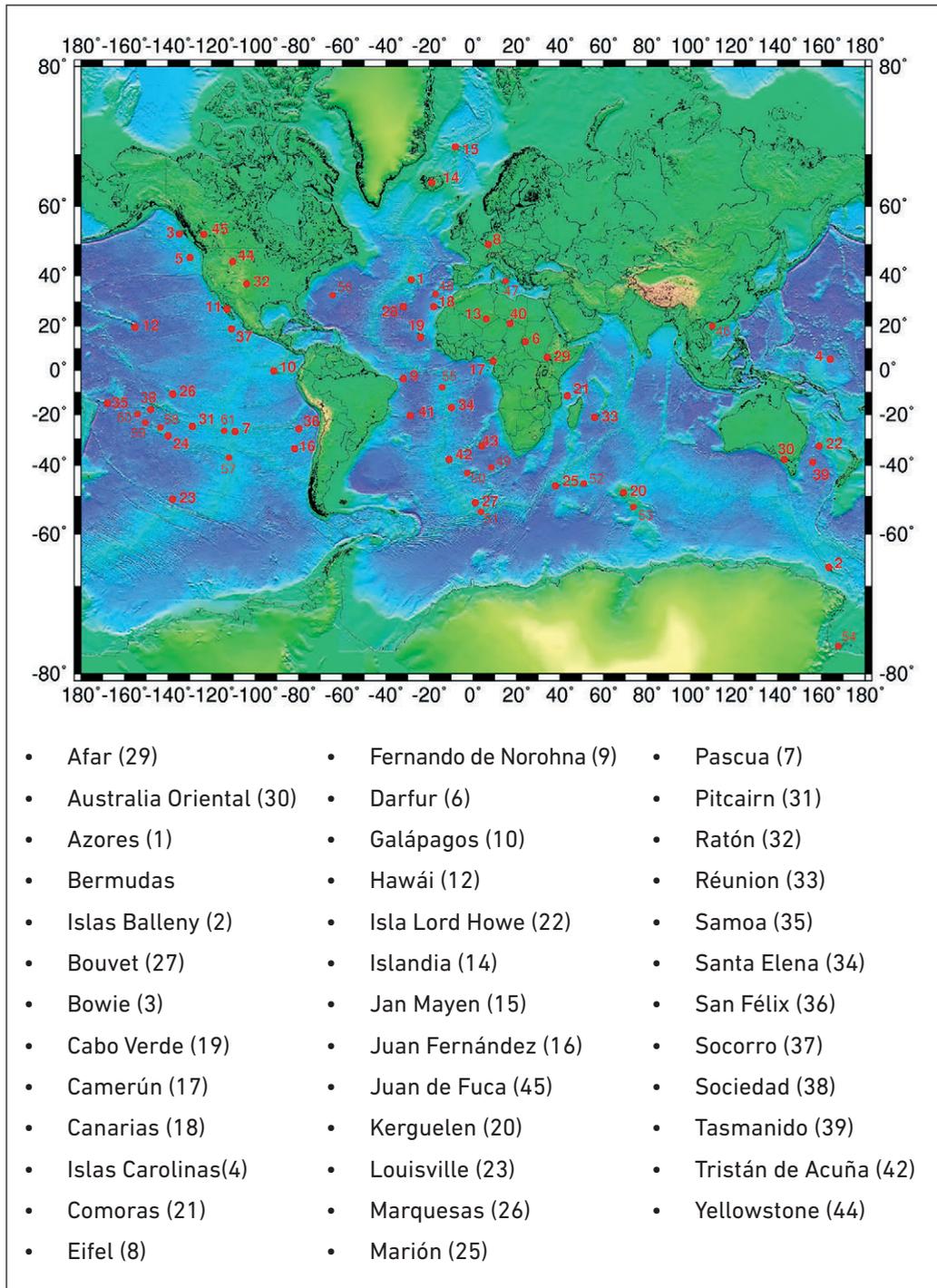


Figura 1.4.- Islas y zonas volcánicas formadas a partir de la teoría del Punto Caliente (Steinberger, 2000).

Existen otras islas, que están cerca de los continentes, en este caso, la isla, no es más que la parte emergente de un único terreno con diferentes alturas. Las zonas más bajas corresponden a terrenos más erosionados, por ser menos duros que otros materiales.

No todos los volcanes submarinos llegan a emerger y formar una isla oceánica, la mayoría se quedan en montaña submarina que no llegó a emerger a la superficie, los llamados “seamount”. Solo en el océano pacífico se han llegado a catalogar más de 10.000 montañas submarinas con esta tipología.

Los volcanes submarinos se detectan por hidrófonos submarinos, los cuales pueden detectar pequeños terremotos. La ubicación de la erupción se puede hacer mediante la triangulación de áreas con varios hidrófonos. También se monitoriza la actividad sísmica, así como cambios en la temperatura y presión.

1.3 TIPOS DE VULCANISMO

El vulcanismo es una manifestación en la superficie terrestre de los procesos magmáticos, los factores que controlan este vulcanismo se pueden resumir en cuatro: (i) la naturaleza del magma, (ii) la forma de extrusión, (iii) la cantidad de volátiles presentes en la erupción y, por último, (iv) si la erupción ocurre en medio subacuático o subaéreo. Los volcanes se pueden definir como una abertura que conecta el magma a la superficie de la tierra. Existen tres estados asociados a los volcanes:

- Volcanes extintos.
- Volcanes inactivos.
- Volcanes activos.

Los volcanes extintos no volverán a entrar en erupción de nuevo, los inactivos no han entrado en erupción en “al menos 2.000 años”, pero pueden entrar en erupción en cualquier momento. Finalmente, los volcanes activos, son considerados como amenazas inmediatas, muestran actividad sísmica y han entrado en erupción recientemente.

El tipo de erupción, explosiva o no explosiva, se determina generalmente por la viscosidad y la concentración de sustancias volátiles, dentro de la lava. Las lavas basálticas generalmente tienen bajas concentraciones de gases. También, con el tipo de erupción, se determina la formación de rocas con diferentes tipos texturales; rocas volcánicas o rocas piroclásticas.

Los volcanes se clasifican en función de la forma, estructura y los materiales que lo forman. La forma que adquiere un volcán depende de la viscosidad de la lava. Una lava con



Figura 1.5.- Cono de escoria, en la isla de La Palma, erupción del Teneguía.

alta viscosidad da lugar a volcanes que presentan pendientes más pronunciadas. Volcanes con lavas de baja viscosidad genera edificios con pendientes más moderadas, pero que pueden propagarse a grandes extensiones de terreno. También la forma en la que entran en erupción es importante como criterio de clasificación. Podemos distinguir tres tipos de volcanes:

- Cinder conos o conos de escoria.
- Estratovolcanes.
- Volcanes en escudo.
- Domos de lava.

Los volcanes de escoria, son un tipo de volcán muy común, son relativamente poco peligrosos, son depósitos más o menos soldados de escorias, bombas y lapilli que se acumulan con esta forma geométrica en torno a la boca eruptiva. Alcanzan alturas de 300 a 400 metros. Son creados a partir de una sola abertura de magma, a diferencia de los estratovolcanes o los volcanes en escudo, la estructura es en forma de cono. Su proceso de formación es el siguiente: cuando la erupción ocurre, las cenizas son proyectadas al aire y van cayendo alrededor del foco emisor, formando esa forma característica de cono, ya comentada. Son de pequeñas dimensiones, porque su estructura, es demasiado débil para constituir grandes edificios.



Figura 1.6.- Estratovolcán del Teide, en Tenerife.

Los volcanes estratovolcanes, también denominados, volcanes compuestos, alcanzan alturas considerables, de 2.500 a 4.000 metros sobre el nivel del mar. Su diámetro puede oscilar entre 1 y 12 kilómetros. Su tipo de erupción es muy peligroso y explosivo, con una sucesión de coladas y materiales piroclásticos, además de gases, ceniza, lava, piedra pómez etc. Las laderas tienen importantes pendientes y pueden aparecer conos secundarios en las mismas.

Los volcanes en escudo, tienen pendientes muy suaves, donde pueden aparecer conos secundarios, están formados por la acumulación sucesiva de flujos de lava, a partir de emisiones centrales o fisurales de lavas basálticas, poco viscosas. Sus erupciones no van acompañadas de material piroclástico, esto hace que no sean muy peligrosos. Aunque no son tan elevados como los estratovolcanes, el volumen de material puede ser mucho mayor.

Los domos de lava, provienen de magmas viscosos, tales como los formados a partir de la desgasificación de riolitas o andesitas. Son de menor altura que los anteriores tipos. Generalmente, este tipo de domos de lava se sitúan en los flancos de los volcanes compuestos más grandes.

Si las erupciones son más violentas, de tipo freatomagmáticas, se generan profundos “cráteres de explosión” o maares, cuyo diámetro puede alcanzar unos 2 km, rodeados por anillos de piroclastos con laderas suaves menores que 10° ; en consecuencia estos volcanes pasan desapercibidos al observar el relieve desde tierra. Algunos están normalmente rellenos de agua, originando lagos naturales.



Figura 1.7.- Lagos endorreicos en la isla de San Miguel, en Azores.



Figura 1.8.- Cráter del volcán de San Antonio, en La Palma.

Los conos de cinder “ceniza”, se forman en erupciones estrombolianas y, de forma similar, que los de lluvia piroclástica. Son volcanes sencillos que, en su cima, tienen un cráter en forma de cuenco. Raramente ascienden más de 300 metros sobre su entorno. Los fragmentos de magma son expulsados por el volcán en pequeñas explosiones y depositados muy cerca del cráter, de manera que se va acumulando a su alrededor formando una montaña de piroclastos. Sus pendientes son más pronunciadas. Normalmente se originan a causa erupciones, a través de una sola vía de ventilación, a diferencia de los estratovolcanes o volcanes de escudo, los cuales pueden hacer erupción por diferentes fisuras.

Una vez formados los diferentes volcanes, pueden originarse diferentes procesos debido a subsidencias, colapsos y desplomes, originados por la descompresión de la cámara magmática. Estos son:

- Cráteres.
- Calderas.

Los cráteres, forman la cima de los volcanes, están originados por fenómenos de explosión y generalmente por el colapso de las paredes del centro emisor y de la cámara magmática.

Las calderas, son de mayor tamaño que las anteriores, se forman por explosión y descompresión violenta, presentan grandes fracturas circulares. Las calderas pueden ser de dos tipos: el primero, son las calderas de explosión, formadas por colapsos rápidos, son típicas en estratovolcanes; el segundo tipo lo constituyen las calderas de subsidencia, asociadas a subsidencias en volcanes en escudo y sin erupciones explosivas. Algunas



Figura 1.9.- Caldera en la isla de El Hierro.

calderas colapsadas se llenan de agua y forman lagos. Existen también otro tipo de calderas, pero provocadas por procesos volcánicos y erosivos, un claro ejemplo es la isla de La Palma en Canarias, la denominada caldera de Taburiente, donde aparecen componentes del complejo basal: lavas almohadilladas “pillow lavas”, rocas magmáticas plutónicas, diques basálticos y aglomerados.

Las islas oceánicas pueden estar compuestas de un solo volcán, o de varios volcanes, por ejemplo, Hawái “The Big Island”, isla perteneciente al archipiélago del mismo nombre, está compuesto de varios volcanes: Kilauea, Mauna Loa, Mauna Kea, Hualakai and Kohala.

1.4 ETAPAS DE FORMACIÓN DE UNA ISLA

Los puntos calientes o “Hot Spot” tienen una naturaleza diferente que los otros tipos de formación de las islas. Se trata de puntos que, sin estar necesariamente cerca de fronteras entre placas continentales, tienen mayor actividad volcánica que sus alrededores.

El proceso de formación de una isla volcánica, basándonos en la teoría del “Hot Spot”, de forma muy resumida, transcurre por los siguientes estadios: (i) anomalía en el fondo marino, (ii) ascensión del penacho de lava, (iii) erupciones submarinas, (iv) constitución del complejo basal –rocas plutónicas, lavas submarinas, sedimentos–, que forma el edificio

Archipiélago	Crecimiento		Erosión	Subsidencia	
HAWÁI	Volcán Submarino	Fase de emersión y crecimiento rápido	Erosión y volcanismo de rejuvenecimiento	Fase de atolón	Fase de guyot o seamount (monte submarino)
Archipiélago	Crecimiento		Erosión		
CANARIAS	Volcán Submarino	Fase de emersión y crecimiento rápido	Erosión y volcanismo de rejuvenecimiento	Fase de erosión y volcanismo residual	Fase de erosión

Tabla 1.3.- Ciclo de vida de las islas volcánicas (con subsidencia importante como Hawái o sin ella, como Canarias). Adaptado de (Carracedo & Tilling, 2003).

volcánico submarino, (v) series volcánicas subaéreas, –áreas emergidas de las islas–. Los edificios insulares se elevan desde los fondos marinos, sólo una parte son visibles sobre el nivel del mar (menos del 10%), (vi) en superficie; se van desarrollando series de erupciones, en ocasiones se denominan como serie I, serie II, serie III..., atendiendo a la antigüedad de las mismas. Finalmente, (vii) edificios volcánicos recientes, que pueden incluir erupciones históricas. Por lo tanto, la geología de las islas se forma mediante la sucesión de materiales y estructuras geológicas, incluyendo depósitos de piroclastos –cenizas volcánicas–. Cabe destacar que algunas islas tienen procesos volcánicos en activo, en Europa podemos destacar, Sicilia, Islandia y recientemente la Isla de El Hierro (2011), en Canarias.

Todas las islas volcánicas oceánicas, pasan, durante su formación, por unas etapas similares a lo largo de su historia y que se reflejan en una serie de grandes unidades volcanoestratigráficas; si bien, el desarrollo de cada una de ellas se produce en tiempos diferentes en las distintas islas. Estas unidades son dos:

- Complejo Basal; los edificios insulares se elevan desde los fondos marinos, por lo que solo una pequeña parte de ellos es visible sobre el nivel del mar, como se comentó. Una parte de este complejo basal puede aparecer en superficie, se considera impermeable, son terrenos interesantes para planificar embalses, como así ha ocurrido en La Gomera (Vallehermoso), en Canarias.

- Series volcánicas subaéreas, esta estructura, cuanto más antigua más impermeable y, por lo tanto, más compactada se encuentra por el peso de las capas superiores, se suelen nombrar por series (I, II, III...).

La primera formación que se construye es el volcán submarino, el magma bajo presión asciende, creando cámaras magmáticas dentro o por debajo de la corteza. Las grietas en las rocas de la corteza oceánica proporcionan una salida para la intensa presión, y tiene lugar la erupción. Vapor de agua, humo, gases, cenizas, rocas y lava son lanzados a la atmósfera. Las rocas acumuladas en la cámara magmática, se enfrían lentamente, forman las rocas plutónicas como la sienita, gabro y las carbonatitas, estas últimas tienen un contenido superior al 50 % de carbonatos primarios. Cuando las rocas fundidas contactan con el agua, se solidifican muy rápidamente. El enfriamiento rápido del magma o lava hace que se formen rocas con muchos cristales pequeños o granos finos. La base de la isla o complejo basal está formado por este tipo de rocas (plutónicas y volcánicas), las cuales se mezclan con sedimentos marinos. Todo el complejo está atravesado por numerosos diques. El complejo basal posee los materiales más antiguos de la isla, puede aflorar en superficie, de ahí, que se pueda observar en La Palma, Gomera y Fuerteventura.

Una vez que las erupciones alcanzan el nivel de superficie del mar aparece el vulcanismo subaéreo, en el cual hay grandes emisiones de material mientras que la isla se edifica sobre el edificio submarino. Esta fase se denomina etapa de construcción en escudo y tarda en asentarse, en algunos casos, varios millones de años. Pueden generarse estructuras o dorsales por donde se van alineando los volcanes en escudo (si hay varios). En ocasiones se forman estratovolcanes con magmas más viscosos y erupciones más explosivas dando lugar a volcanes con grandes alturas como el Teide en Tenerife (3.718 metros). Las islas pueden ser formadas con un estratovolcán en forma circular, como el caso de La Gomera, en la islas Canarias.

Tras esta fase, aparece un periodo de relativa calma, en el cual se dan importantes fenómenos de erosión. La precipitación va horadando la isla mediante numerosos barrancos de manera radial, estos barrancos inicialmente son profundos y en forma de “V”, principalmente, cuando son jóvenes. Cuando va pasando el tiempo se van ensanchando hasta describir una forma en “U”. Algunos autores denominan esta etapa como discordancia erosiva.

En las islas volcánicas, puede existir una etapa posterior, denominada de rejuvenecimiento. En esta etapa, existen nuevas erupciones, más explosivas, con una diversificación de los materiales emitidos, como por ejemplo las fonolitas y traquitas de naturaleza sálica. No se sabe a ciencia cierta por qué ocurre esta nueva fase de erupciones, la explicación más popular sugiere que la litosfera hace como una especie de “rebote” tras haber estado oprimida, esta despresurización puede conducir a la fusión y generación de magma.



Figura 1.10.- Restingolitas, productos volcánicos expulsados en la primera fase de la última erupción en la isla de El Hierro.

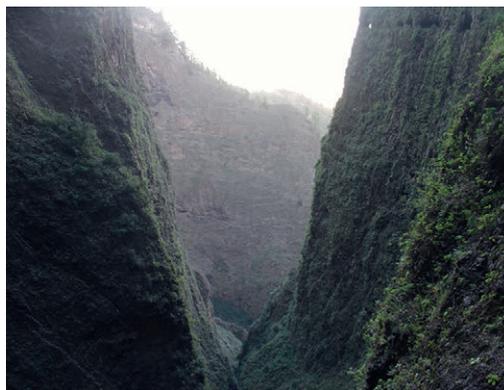


Figura 1.11.- Barrancos en V, en la isla de Tenerife. (Foto cortesía Francisco Puerta).



Figura 1.12.- Barrancos en la caldera de Taburiente, los procesos erosivos y la carga sólida presente es evidente.

El último estadio de las islas es la desaparición bajo el mar a causa de los diferentes procesos de erosión. En el caso de las islas del Pacífico se forman atolones o islas de coral, antes de esta desaparición. Los atolones son arrecifes de coral que crecen en forma circular, en la mayoría de los casos, rodeando una laguna formada por el antiguo volcán. También en caso del archipiélago hay que destacar el fenómeno de la subsidencia, sobre todo en zonas cercanas al Punto Caliente, dado que en ese punto es donde está debilitada la litosfera por los procesos térmicos allí acontecidos. Estudios realizados por Moore en 1987, indican una subsidencia de unos 2,5 mm por año.

A modo de ejemplo, las islas Canarias se encuentran en las siguientes fases: Lanzarote y Fuerteventura están en la fase de erosión y con una reciente actividad volcánica, en el caso de Lanzarote. Gran Canaria y Tenerife están en fase de post escudo con vulcanismo rejuvenecido. La Gomera, donde ha finalizado la fase de escudo, se encuentra en la fase de erosión, es posible que esta isla no pase por la fase de rejuvenecimiento por vulcanismo activo, dado que hace del orden de 2-3 Ma, que no ocurren erupciones, lo que daría pie a presuponer que las fisuras volcánicas por donde podría ascender el magma están selladas. Finalmente, Hierro y La Palma, se encuentran en el Punto Caliente y por lo tanto se considera que están en la fase de construcción del escudo.

1.5 MATERIALES VOLCÁNICOS

1.5.1 Introducción

Existen varios tipos de volcanes en función de la acidez de la lava y la tipología de las explosiones, aunque por ejemplo en Canarias se dan todos los tipos de materiales volcánicos (Hernández-Gutiérrez, 2011) de ahí que sean tan importantes para la comunidad científica.

Inicialmente debemos distinguir entre magma y lava. El magma se utiliza para definir la roca fundida que no ha aflorado en superficie y el término lava se utiliza para referirse a la roca fundida, cuando alcanza la superficie de la tierra. Cuando los magmas alcanzan la superficie de la Tierra y se enfrían y solidifican en condiciones subaéreas o subacuáticas, las rocas que resultan se denominan extrusivas o volcánicas. La diferenciación del magma del que proceden las rocas volcánicas produce que su composición química pueda variar gradualmente en su ascenso hacia la superficie, dando lugar a diferentes rocas volcánicas en función de los diferentes puntos de fusión de los compuestos químicos fundidos que lo componen y de su velocidad de enfriamiento. Los productos que arrojan los volcanes son muy variados y se pueden clasificar según los diferentes estados físicos en que se encuentren en: gaseosos, líquidos, viscosos y sólidos.

Las estructuras de enfriamiento pueden formar: las diaclasas (juntas o fracturas) sin desplazamiento. Se forman durante el enfriamiento del magma, como el material caliente



Figura 1.13.- Lava volcánica.



Figura 1.14.- Diaclasado en el enfriamiento del basalto.

ocupa más espacio que la misma cantidad de materia fría, al enfriarse el magma, se producen fracturas por la diferencia de volumen que se produce. Por otro lado se producen columnas basálticas. La formación de estas columnas se produce porque la lava basáltica, al enfriarse, se solidifica, pero disminuyendo su volumen, de modo que se fracciona en forma de prismas. El tamaño de las columnas viene determinado por la velocidad de enfriamiento, siendo las más grandes producto de tiempos de enfriamiento más largos. Ambas formaciones, diaclasas y columnas, indican flujo subaéreo.

1.5.2 Rocas volcánicas

Las rocas volcánicas se originan cuando el magma se enfría en la superficie terrestre en condiciones de temperatura y presiones bajas. Cuando los volcanes entran en erupción, el material primario emitido es el basalto fundido, que fluye en forma de lava viscosa. El color de la lava depende de la temperatura del flujo, su composición química e impurezas. Ese material va acompañado de gases, principalmente CO_2 y vapor de agua. En grandes cantidades forma nubes blancas, cuando está sobrecalentado y lleva consigo partículas de roca caliente, constituyen los piroclastos.

Las rocas volcánicas tienen una serie de características importantes para su identificación. Su textura puede ser vesicular, con huecos o burbujas los cuales se moldearon por los gases emitidos durante la erupción. La textura vesicular se presenta sobre todo en las partes superiores de la colada. Textura amigdaloides, cuando esos huecos se rellenan mediante minerales secundarios.

DENOMINACIÓN	CARACTERÍSTICAS
Basalto	Roca volcánica lávica. Carácter básico. Una de las rocas más abundantes de la corteza terrestre. Sus minerales esenciales son el olivino y la plagioclasa. Pobre en Silicio (Si) y rica en Hierro (Fe). Colores oscuros. Básicas o máficas (hierro y magnesio).
Andesita	Su composición mineral comprende generalmente plagioclasas y varios otros minerales ferromagnésicos como piroxeno, biotita y hornblenda. Textura fanerítica, con pequeños granos que en ocasiones se pueden apreciar. Tras el basalto es la roca volcánica más abundante. Colores grisáceos.
Dacita	Textura fina, con alto contenido en hierro. Composición entre la andesita y la riolita.
Riolita	Ácida. Su composición química es la del granito. Rica en Si y pobre en Fe. Silíceas o félsicas. Estructura afanítica (cristales pequeños difíciles de apreciar a simple vista). Colores claros.
Pumita	Acumulación de cenizas volcánicas en una nube ardiente. Roca con densidad muy baja y gran porosidad. Formadas por sílice y aluminio principalmente. Se forma a partir de magmas muy ácidos, y por lo tanto muy viscosos. Rica en vacuolas, como consecuencia de la liberación de gases. Color de gris claro a amarillo.
Traquita	Compuesta fundamentalmente por feldespato alcalino. Su estructura es porfídica pero rara vez vítrea. Sin cuarzo, sin feldespatoideos. El equivalente plutónico de la traquita es la sienita.
Fonolita	Fuertemente alcalina, de acidez intermedia, que contiene esencialmente feldespatos alcalinos y feldespatoideos.
Obsidiana	Vidrio volcánico. Textura vítrea, sin granos. Está constituida por una pasta uniforme que no presenta cristales. Elevado porcentaje de sílice y silicatos aluminicos. Color negro o verde oscuro.

Tabla 1.4.- Algunas características de las rocas volcánicas.

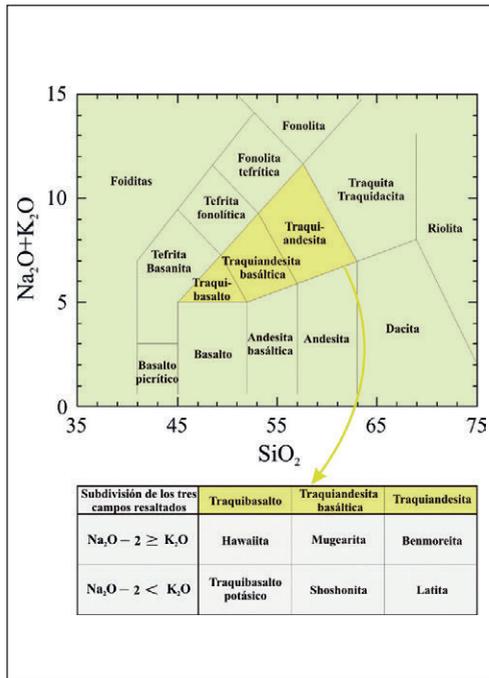


Figura 1.15.- Rocas volcánicas, diagrama TAS (Departamento de Petrología y Geoquímica de la Facultad de Ciencias Geológicas de la UCM, 2013).

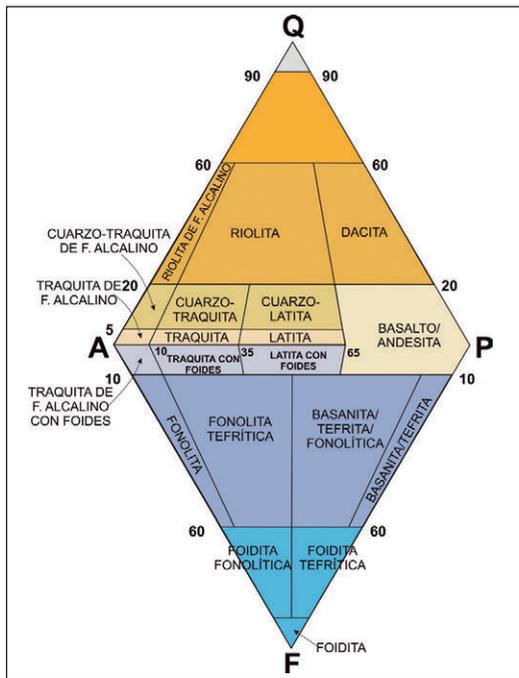


Figura 1.16.- Rocas volcánicas, diagrama QAPF (Departamento de Petrología y Geoquímica de la Facultad de Ciencias Geológicas de la UCM, 2013).

Para las rocas volcánicas se utiliza el diagrama TAS (Total Alkalies vs Silica). En este diagrama no se utilizan términos modales (máfico, félsico, etc.) sino químicos: rocas ultrabásicas, básicas, intermedias, y ácidas, en función de la abundancia de SiO₂ en porcentajes en peso (ver figura 1.15).

El diagrama QAPF es un doble diagrama triangular utilizado para clasificar rocas ígneas en base a su composición mineralógica. El acrónimo, QAPF, corresponde a “Cuarzo (Quartz), feldespato alcalino (Alkali feldspar), Plagioclasa, Feldespatoide”, donde los porcentajes de Q, A, P y F están normalizados (ver figura 1.16).

1.5.3 Lavas

Existen dos tipos de lava, en función de la temperatura de fundición y material constituyente, las lavas ácidas, de colores claros. Se funden a temperaturas más altas y se solidifican con mayor rapidez y fluyen a cortas distancias de su origen, —andesitas, traquitas o dacitas—. Por otro lado, están las lavas básicas, de colores más oscuros; a diferencia de



Figura 1.17.- Lavas cordadas.

las ácidas, se funden a una temperatura más baja y fluyen a grandes distancias y además se solidifican lentamente al enfriarse y originan la lava acordonada —Basaltos—. Las temperaturas medidas en las coladas de lava van desde 900°C a 1.200°C. La velocidad de avance y los alcances de los flujos de lava son muy variables. El rango habitual es 5 a 1.000 metros a la hora.

El basalto es una roca ígnea, que tiene un aspecto oscuro y contiene altos niveles de hierro, magnesio y potasio. La viscosidad del basalto, cuando está fundido en forma de lava es un factor determinante, dado que influye directamente sobre la resistencia que presenta la lava a fluir. La viscosidad está condicionada por la temperatura y la presencia de gases; a mayor temperatura, menor es la viscosidad, así, un flujo de lava puede discurrir de manera rápida inicialmente, pero a medida que se aleja del foco emisor y la temperatura disminuye, su viscosidad, va en aumento. La presencia de los gases, principalmente CO₂ y vapor de agua, influyen en la viscosidad de la lava, a concentraciones elevadas la viscosidad disminuye por lo que aumenta la fluidez de la lava, cuando la cantidad de volátiles desciende, la viscosidad aumenta. Las lavas, las están formadas por las siguientes sustancias químicas: H₂O, SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Fe₂O₃, Fe₂O, MgO, CaO, Na₂O y otras sustancias, sin embargo, el promedio o porcentaje de éstas varía según los distintos tipos de lavas.

TIPO DE ROCA VOLCÁNICA	ESTRUCTURA VOLCÁNICA MÁS COMÚN
LAVAS BASÁLTICAS	Volcanes en escudo Conos cineríticos
LAVAS ANDESÍTICAS O INTERMEDIAS	Estratovolcanes
LAVAS RIOLÍTICAS	Domos

Tabla 1.5.- Tipo de lava y estructura volcánica común asociada

Hay dos tipos fundamentales de lava formadas por el basalto: las “pahoehoe”, de tipo suave y denso, pueden formar grandes áreas, formando asentamientos de superficie. A veces están modeladas en forma de pliegues, se denominan entonces lavas cordadas, en alusión al aspecto de su superficie; por otro lado están las lavas “aa”, que forman rocas individuales con tamaños que van de pocos centímetros a varios metros, con alta porosidad y muy irregulares, aunque debajo de la superficie son muy densas. En el campo es fácil su diferenciación, y más, si se tiene en cuenta una diferencia notable a nivel práctico: es muy difícil caminar por las lavas “aa” y fácil por las “pahoehoe”.

Otro tipo de lava singular, son las lavas almohadilladas o “pillow lavas”, son estructuras en forma de almohada, tubulares, bulbosas o esféricas, que se atribuyen a la extrusión de la lava bajo el agua. Su estructura interna muestra una parte externa de grano fino, con pocos cristales, dado su rápido enfriamiento y una capa interna de grano grueso con cristales grandes. Dependiendo de la profundidad a la que se forman pueden tener cantidades variables de vesículas. Son un clásico indicador geológico que muestra que esa zona una vez estuvo bajo el agua, aparecen usualmente en los complejos basales de las islas, por ejemplo; en la caldera de Taburiente, en La Palma.

La lava de bloques es otro tipo de flujo muy común en volcanes con productos más ácidos y viscosos. Estos bloques de lava, con su interior incandescente, descienden por la pendiente de un volcán en forma de pequeñas avalanchas, las cuales evolucionan ladera



Figura 1.18.- Lavas "aa".



Figura 1.19.- "Pillow lavas".

abajo, formando capas de lava similares a las de un flujo líquido. Este tipo de estructuras aparece asociada a lavas de composición traquítica o fonolítica.

En ocasiones se pueden formar los tubos de lava cuando la capa exterior de un flujo de lava se enfría y se solidifica. La lava no expuesta al aire permanece caliente y continua fluyendo. Una vez que todo el flujo cesa, todo lo que queda, se transforma en un túnel o canal sólido. Estas estructuras pueden variar mucho en tamaño.

1.5.4 Piroclastos

Los piroclastos, son materiales fragmentados emitidos por una erupción volcánica en forma sólida o fluida, —nubes de piroclastos—. Los depósitos piroclásticos, atendiendo al mecanismo de transporte y emplazamiento pueden denominarse:

1. Ash fall, depósitos piroclásticos de caída.

a. Escorias.	e. Cenizas.
b. Bombas.	f. Pómez.
c. Bloques.	g. Brechas.
d. Lapilli.	
2. Ash flow, coladas piroclásticas.

a. Ignimbritas no soldadas.	b. Ignimbritas soldadas.
-----------------------------	--------------------------
3. Surge, oleadas piroclásticas.

PROCESO VOLCÁNICO	PRODUCTO VOLCÁNICO
Flujo de lava	Colada volcánica
Caída de piroclastos	Depósitos piroclásticos
Flujo piroclástico de densidad caliente	Ignimbritas (soldadas, no soldadas)
Flujo de oleada piroclástica de densidad caliente	“Surge”

Tabla 1.6.- Procesos volcánicos y productos asociados.

El primer caso son los “ash fall”, que forman depósitos piroclásticos de caída, cubren uniformemente la topografía, la potencia del depósito disminuye al aumentar la distancia al foco emisor.

1.5.5 Depósitos piroclásticos

Los depósitos piroclásticos se clasifican, en función de las condiciones en que la columna eruptiva interacciona con la atmósfera, el grado de explosividad y la composición del magma. Según la Guía para la planificación y realización de los estudios geotécnicos para la edificación en la Comunidad Autónoma de Canarias los piroclastos también se pueden clasificar como depósitos, en ese caso se puede hablar de tres tipos:

- Depósitos plinianos.

Formados a partir de columnas eruptivas estables o columnas plinianas, en las cuales las partículas de pómez son eyectadas a elevada altitud y posteriormente arrastradas, dispersadas por el viento y depositadas posteriormente en el terreno en forma de lluvia piroclástica.

- Depósitos de ignimbritas.

Formados a partir de columnas eruptivas gravitatoriamente inestables o vulcanianas. En este caso, la columna eruptiva sufre un colapso parcial o total de la misma, generándose una nube ardiente de elevada densidad de partículas con una masa interna en la que, las



Figura 1.20.- Piroclastos en las Cañadas del Teide.

partículas de pómez y cenizas mezcladas de forma caótica, son mantenidas en suspensión por la masa de gases.

- Conos de cinder (conos de escoria).

Muy abundantes en la geografía insular de Canarias. Como se ha comentado en anteriores secciones, se forman en erupciones estrombolianas y de forma similar a los de lluvia piroclástica; los fragmentos de magma son expulsados por el volcán en pequeñas explosiones y depositados muy cerca del cráter, de manera que se va acumulando a su alrededor una montaña de piroclastos que constituye por sí misma el volcán estromboliano o cono de cinder. Al contrario que los piroclastos de las erupciones plinianas (de composición traquítica o fonolítica), éstos tienen composición basáltica y son conocidos en la terminología local como picón, jable o zahorra.

Los depósitos de piroclastos son excelentes elementos de correlación estratigráfica, son bien reconocibles y datables, por lo tanto suministran una información muy valiosa. Pueden formar las rocas piroclásticas. Cuando los depósitos piroclásticos se encuentran soldados se suelen denominar *toba*, cuando se encuentran sueltos *tefra*. Cuando los piroclastos son de composición ácida se denominan pómez y adquieren un característico color blanco, es un material rico en vesículas. Debido a su baja densidad menor de 1 g/cm^3 , flotan en el agua, cuando se trata de un depósito compacto, se denomina al conjunto *pumita*.

Por último están las brechas, se forman frecuentemente en erupciones violentas, en las primeras fases de apertura del conducto eruptivo, forman depósitos muy caóticos y mal clasificados.



Figura 1.21.- Depósitos piroclásticos en Tenerife.



Figura 1.22.- Bombas volcánicas en las Cañadas del Teide en Tenerife.

42

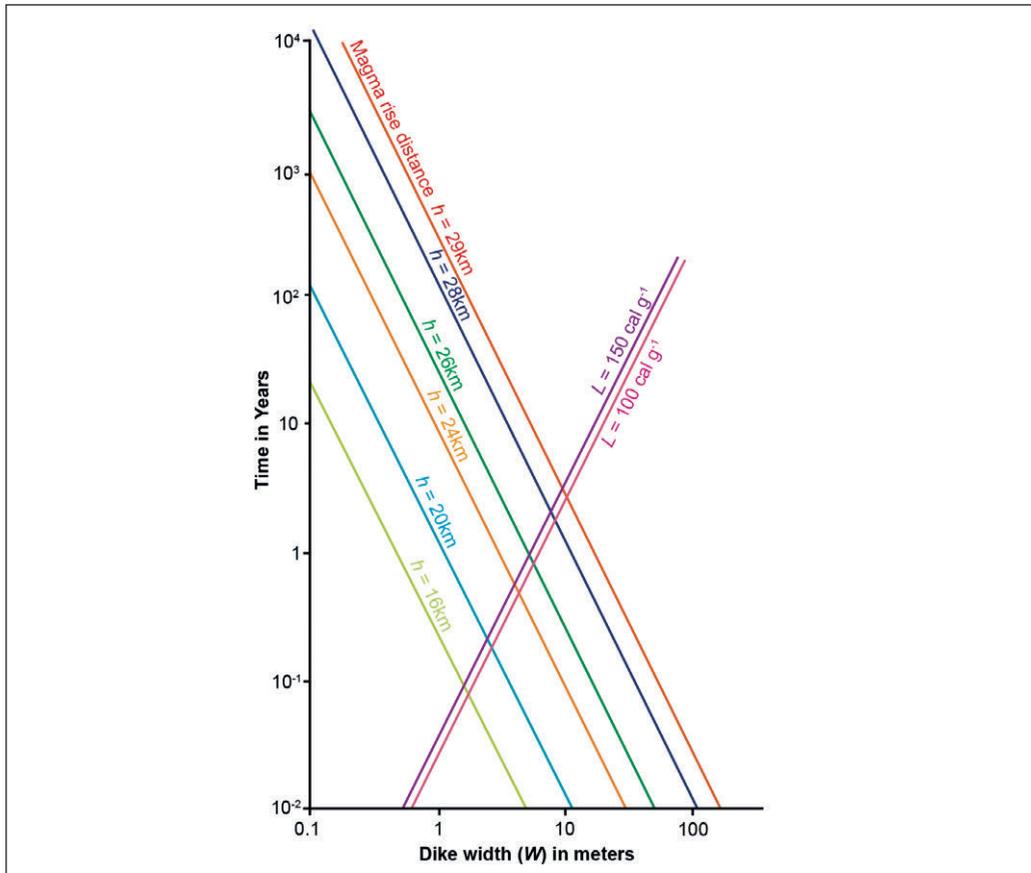


Figura 1.23.- Relación entre la altura del ascenso del magma (h) y la anchura del dique (w), así como el tiempo de cristalización con respecto a w y el calor latente de cristalización (L) (Szekely & Reitan, 1971).



Figura 1.24.- Dique geológico.



Figura 1.25.- Dique geológico y depósitos piroclásticos.

1.5.6 Diques

Los diques volcánicos son flujos de magma ascendente, más o menos verticales, que atraviesan formaciones más antiguas. Se forman a partir de la intrusión de rocas fundidas en fracturas de tensión formadas bajo la acción del campo de esfuerzos regional, asistidas, en este caso, por la alta presión del fluido volcánico. En el interior de un edificio volcánico es típico que esté atravesado por cientos de diques de diferentes tamaños, concentrándose en la zona central de la erupción, generalmente donde existe una mayor debilidad estructural dentro del edificio volcánico. Los anchos de estas paredes verticales son variables, y según Szekely & Reitan (1971), dependen de la distancia vertical hasta la fuente de magma.

A medida que el magma asciende, la temperatura del conjunto disminuye. La reducción de la temperatura hace aumentar la viscosidad del magma. Este aumento hace que se vaya obstruyendo la vía por donde ascendía el magma, con ello se reduce la fuerza y velocidad de ascensión del magma, aumenta el proceso de cristalización del conjunto.

Hay unos parámetros aproximados, en la formación de los diques que se pueden asumir, estos son:

1. La difusividad térmica¹ del magma, $4 \times 10^{-3} \text{cm}^2 \text{seg}^{-1}$.
2. La difusividad térmica de la roca circundante, $6 \times 10^{-3} \text{cm}^2 \text{seg}^{-1}$.
3. Temperatura inicial del magma, a la cual todavía es líquido $1.200 \text{ }^\circ\text{C}$.
4. Temperatura en la cual el dique se cristaliza $1.000 \text{ }^\circ\text{C}$.
5. Temperatura inicial de la roca circundante $600 \text{ }^\circ\text{C}$.

1. La difusividad térmica mide la velocidad a la que la temperatura cambia dentro de un material. Dicho de otra forma, es la tasa de cambio con que un material aumenta de temperatura, al ser puesto en contacto con una fuente de calor.

DENOMINACIÓN	TAMAÑO	FORMA
BOMBAS	Mayor de 64 cm	<ul style="list-style-type: none"> • Forma redondeada. • Total o parcialmente fundido durante su formación y transporte. • Grietas de contracción.
BLOQUE	Mayor de 64 cm	<ul style="list-style-type: none"> • Angulosa o subangulosa. • Estado sólido durante su formación y transporte.
LAPILLI	Entre 64 y 2 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Formas variadas. • Negro inicialmente, cambia a rojo por procesos de oxidación. • Si forma depósito compacto se denomina <i>toba</i>.
CENIZA	Menor de 2 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Grano, polvo. • Cuando forma depósitos de denomina cinerita o toba cinerítica.

Tabla 1.7.- Denominación de los piroclastos en función del tamaño y forma.

Los diques suelen meteorizarse más lentamente que las rocas circundantes. Cuando afloran, como consecuencia de la erosión, tienen el aspecto de una pared. En las islas volcánicas, la posición, dimensiones y estado de fracturación de los diques es un factor fundamental a tener en cuenta a la hora de estudiar su hidrogeología, tal y como se verá en las próximas secciones.

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). Dependier 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 sistema 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-Monteih, 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 (Nanzyo 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 ⁻¹)	DENOMINACIÓN	TIPO DE SUELO
>500	Extremadamente rápida	<ul style="list-style-type: none"> • Andisoles no vítricos
250-500	Muy rápida	<ul style="list-style-type: none"> • Andisoles vítricos • Entisoles (granulometría gruesa)
125 a 250	Rápida	<ul style="list-style-type: none"> • Inceptisoles • Entisoles (granulometría media)
60 a 125	Moderadamente rápida	<ul style="list-style-type: none"> • Entisoles (granulometría fina) • Alfisoles
20-60	Moderada	<ul style="list-style-type: none"> • Aridisoles • Vertisoles

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 $0,05 \text{ g}/\text{m}^3$, a muy densas, con una densidad de $3 \text{ g}/\text{m}^3$ (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 cm², 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 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 km².
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 m³, 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.

CAPÍTULO 3. El agua subterránea en las islas volcánicas oceánicas

Juan Carlos Santamarta Cerezal | Rayco Marrero Díaz

3.1 INTRODUCCIÓN

El origen, la geología y el proceso de formación de las islas volcánicas oceánicas, condicionan notablemente el aprovechamiento, uso y efectos, tanto positivos y negativos, de los recursos hídricos en el medio insular.

La importancia hidrogeológica de las formaciones volcánicas depende de sus características geológicas, así como, de su relevancia como almacén de agua dulce para asentamientos humanos. Las principales formaciones volcánicas desde el punto de vista hidrogeológico son: lavas de diferente composición (sean vacuolares, brechificadas y/o escoriáceas –frecuentemente las escorias están diferenciadas a techo y muro–), piroclastos (cenizas, lapillis y bombas), ignimbritas en sentido amplio (tanto soldadas como no –tobáceas–) y diques (estructuras bastante lineales, tanto subverticales como subhorizontales).

La bibliografía sobre hidrogeología de rocas y terrenos volcánicos es escasa aunque cada vez más frecuente. Como literatura clásica incluida en capítulos específicos se destaca, por orden cronológico: Davis y De Wiest (1966), Williams y Soroos (1973); Freeze y Cherry (1979), Custodio y Llamas (1983), FCIHS (2009), entre otras. Otras publicaciones específicas relevantes por su interés son Custodio (1978, 1983, 1985, 1986, 1989b, 2004 y 2007), Takasaki y Mink (1985); Falkland y Custodio (1991), Shade (1997); Ginguierich y Oki (2000 y 2011); Lau y Mink (2006), Cruz (2011); Santamarta y otros (2014); SIHTV (1974), Singhal y Gupta (2010), y Veeger (1991).

Para poder acometer una obra hidráulica en una isla volcánica es fundamental conocer la geología y el proceso de formación de la isla, ya que esta última, condiciona notablemente los diferentes aprovechamientos de los recursos hídricos que se pueden llevar a cabo.

Las características hidrogeológicas de los materiales que forman los acuíferos en islas volcánicas son extremadamente diversas como consecuencia del elevado grado de heterogeneidad y anisotropía que presentan tanto a microescala como a macroescala. La heterogeneidad y anisotropía hidrogeológica de las islas volcánicas están asociadas a la diversidad de génesis, litologías, evolución, edades, etc., de los materiales que las conforman y, que a su vez, están condicionados por otra serie de factores como su espesor o el grado de compactación, fracturación y alteración que presentan, entre otros (e.g. Falkland y Custodio,

1991; Custodio, 2004). Esta compleja situación, unida a que las aguas subterráneas en las islas volcánicas suelen ser un recurso estratégico, escaso y vulnerable a las alteraciones climáticas y a sus consecuencias (e.g. intrusión salina debido a la subida del nivel del mar) (IPCC, 2007), hacen del conocimiento hidrogeológico en estas regiones una herramienta fundamental para optimizar la gestión y el uso responsable de sus recursos hídricos.

En el presente capítulo se presentan los diferentes aspectos relacionados con la hidrogeología en islas volcánicas oceánicas, con especial atención al conocimiento adquirido en numerosos estudios en las Islas Canarias durante los últimos 40 años (e.g. Cabrera et al., 2011). Así, se empieza por comentar los diferentes factores que condicionan y/o modifican las características hidrogeológicas de los terrenos en islas volcánicas, seguido de una descripción de los tipos y características de acuíferos insulares.

74

3.2 MARCO HIDROGEOLÓGICO

De una forma simplificada, se podría decir que los edificios volcánicos insulares están compuestos, en su fase submarina, por acumulaciones de hialoclastitas o brechas y lavas almohadilladas intercaladas por sedimentos marinos, y por alternancias de coladas de lava y depósitos piroclásticos procedentes de sucesivas erupciones en su fase subaérea, y todos estos, se encuentran intruídos por diques y sills concentrados en las zonas de mayor actividad volcánica (e.g. Carracedo, 2011). Esta compleja configuración geológica, confiere una enorme diversidad al comportamiento hidrogeológico de los edificios volcánicos insulares a diferentes escalas de observación.

El marco hidrogeológico de una isla es una descripción de las propiedades, la geometría, y las estructuras de las rocas a través del cual las aguas subterráneas se mueven y se almacenan. En las islas volcánicas oceánicas, el origen volcánico y la edad geológica influyen en la permeabilidad del terreno. La porosidad de las rocas volcánicas también varía mucho según su origen y proceso de solidificación.

Los terrenos volcánicos más jóvenes tendrán por lo general, mayor permeabilidad, lo que implica mayor infiltración y recarga (si existe precipitación suficiente), por lo tanto, mayores recursos subterráneos. Este factor, condiciona la planificación hidráulica de las islas volcánicas más jóvenes hacia un aprovechamiento del recurso subterráneo mediante pozos, sondeos y galerías, aunque en este caso puede haber problemas en la calidad de los acuíferos debido a la actividad volcánica de la isla, como se ha observado en la isla de El Hierro, Canarias (edad 1,2 Ma los materiales más antiguos).

A microescala, las propiedades hidrogeológicas de las formaciones volcánicas son altamente anisótropas y heterogéneas: dependen de características como su alterabilidad en

función de su composición original (basanitas, riolitas, etc.), espesor, continuidad lateral, del grado de intensidad de diferentes procesos que han podido tener lugar desde su emisión (alteración, compactación, etc.), así como la presencia (o ausencia) de fracturas abiertas, fallas, diques, etc., que pueden llegar a modificar totalmente sus características originales (Custodio, 2007).

En algunas ocasiones, existe un apilamiento de materiales que van desde los muy compactos hasta los que presentan una porosidad que puede superar el 50%, desde los que tienen las cavidades totalmente conectadas hasta aquellos que, aun siendo muy porosos, tienen sus poros aislados unos de otros (e.g. arcillas); desde los que no presentan grietas hasta aquellos que poseen un elevado índice de cavidades debidas a la fisuración o fracturación secundaria.

Por tanto, en detalle, esta situación se refleja en una diferencia de permeabilidad de varios órdenes de magnitud entre los diversos materiales volcánicos (Tabla 3.1), desde prácticamente impermeables como las ignimbritas soldadas no fracturadas, hasta las brechas de flujos de lavas recientes no compactadas ni alteradas, que presentan una de las permeabilidades más altas conocidas (Custodio, 2007). Así, los pozos y galerías en terrenos volcánicos a veces pueden dar caudales espectaculares con pequeños descensos del nivel, pero en la misma formación y a escasa distancia pueden ser prácticamente estériles (Custodio, 1978; Custodio y Llamas, 1976).

Como condicionantes de la casuística hidrogeológica posterior debe tenerse en cuenta (La Moneda, 2001, doc. interno):

1. Que son frecuentes los procesos de reajuste en materiales jóvenes mediante deslizamientos que pueden ser de cierta entidad.
2. Que una vez depositados los materiales lávicos sobre la superficie sufren un proceso de enfriamiento relativamente rápido originándose fracturas de retracción (diaclasas) que originan discontinuidades en los cuerpos rocosos.
3. Que en las coladas de flujos piroclásticos (ignimbritas, tobas soldadas, etc.) se suele producir una emisión o segregación de gases y vapor de agua, los que pueden dar lugar a la formación de depósitos de minerales secundarios que colmatan en un grado muy variable las fisuras iniciales.
4. Que además de las diaclasas (fisuras que se producen en lavas y depósitos piroclásticos soldados por pérdida de volumen durante el enfriamiento) en los materiales volcánicos existen otros huecos: vacíos generados por las condiciones de deposición del material (tubos volcánicos, huecos de las escorias de techo y base de colada, etc.) que

Litología/Unidad	Coefficiente de almacenamiento (adimensional)	Permeabilidad (m/d)	Transmisividad (m ² /d)
Basaltos alcalinos o antiguos	0,5 a 1	0,05 a 0,5	5-20
Complejo Basal		<0,001	
Basaltos antiguos alterados hidrotermalmente		0,05-0,005	
Basaltos antiguos no alterados		0,1-1,0	
Basaltos modernos		0,75-2,0	
Basaltos recientes		50->1000	
Traquitas	0,01-0,5	0,1 a 0,5	5-10
Traquitas-fonolitas	0,01-0,5	0,1 a 0,5	5-10
Fonolitas		0,06-0,09	
Ignimbritas traquíticas		0,01	
Materiales sedimentarios	3-5	1,5 a 8	50-200
Aglomerados volcánicos		<0,002-0,45	
Piroclastos basáltico	1-2	0,2-1	10-200

Tabla 3.1.- Rangos de valores de los parámetros hidráulicos de diversos tipos de litologías y formaciones volcánicas, basados en los datos obtenidos del Proyecto SPA-15 (SPA-15, 1975) de Gran Canaria en Cabrera y Custodio (2013); (Custodio, 1985) en las Islas Canarias.

suelen estar conectados localmente, y huecos no conectados correspondientes a las vacuolas que ocupan los gases volcánicos en la masa lávica, que no están conectados.

5. Que las características estructurales y texturales iniciales de los materiales volcánicos pueden ser alteradas por procesos posteriores a su emplazamiento. Existe toda una serie de procesos que producen alteraciones, colmataciones y compactaciones que disminuyen los huecos y su conexión y, paralelamente, también existen procesos de lixiviado, descompresión y fracturación que aumentan los huecos y discontinuidades.



Figura 3.1.- Zona de contacto entre formaciones y presencia de agua en la fisura.

A macroescala, las propiedades hidrogeológicas de las formaciones volcánicas son menos anisótropas y heterogéneas: los terrenos volcánicos se comportan como un medio continuo, de relativamente alta porosidad pero de permeabilidad anisótropa en función de la orientación, la continuidad y espesor de las formaciones respecto de la dirección y sentido del flujo subterráneo (Custodio, 2004). A grandes rasgos, el nivel piezométrico en islas volcánicas, en un estado de equilibrio anterior a la explotación intensa de los recursos hídricos subterráneos, suele reflejar con bastante fidelidad la topografía insular, aunque con algunas irregularidades impuestas por la estructura geológica del subsuelo, como se verá más adelante (e.g. PHI, 1996; Join et al. 2005; Won et al., 2006).

3.3 COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DE LOS MATERIALES Y ESTRUCTURAS VOLCÁNICAS

A continuación vamos a comentar de una forma más pormenorizada algunos de los principales factores o procesos que condicionan el comportamiento hidrogeológico de los materiales volcánicos en ambas escalas de observación:



Figura 3.2.- Diferentes afloramientos de agua en coladas volcánicas fracturadas.

3.3.1 Porosidad y permeabilidad inicial

Muchos de los materiales volcánicos poseen una porosidad y permeabilidad inicial elevada, debido principalmente a la fracturación por retracción asociada al rápido enfriamiento y/o a la vesicularidad ocasionada por la liberación de gran cantidad de gases contenida en la propia roca (principalmente CO_2 y vapor de agua) (e.g. Sruoga et al., 2004). No obstante, los materiales volcánicos suelen ser fácilmente alterables, disminuyendo drásticamente su permeabilidad con el tiempo y/o tras sufrir procesos de carácter térmico, hidrotermal o hídrico. Finalmente con el paso del tiempo se genera una formación de baja permeabilidad que, no obstante, conserva una porosidad total y drenable relativamente alta en comparación con otras rocas consolidadas (Custodio, 1986).

3.3.2 Composición mineralógica de las rocas

En los ambientes volcánicos suele existir una gran variedad en la composición mineralógica de las rocas, desde basanitas hasta riolitas, favoreciendo una diversidad enorme en las características hidrogeológicas de los materiales (Tabla 3.1). Sin embargo, en general y desde un punto de vista cualitativo, se puede considerar que las lavas basálticas y los depósitos piroclásticos tienen una permeabilidad inicial superior a las lavas fonolíticas y los diques.

3.3.3 Alteración hidrotermal y compactación

De una forma general, la alteración hidrotermal asociada a la circulación de fluidos calientes o inyecciones de magma, transforma progresivamente en arcillas y limos los materiales volcánicos preexistentes, pudiendo precipitar y ocluir poros y fisuras junto a



Figura 3.3.- Alteración hidrotermal, coloquialmente conocida como los "azulejos" , en la Caldera de Las Cañadas del Teide (Tenerife).

otros minerales secundarios derivados de este proceso, modificando el aspecto de los depósitos rocosos sobre los que actúan. Por ello, las zonas alteradas hidrotermalmente presentan normalmente una intensa coloración verde-rojiza asociada a la formación de ceolitas, óxidos de hierro y sulfatos, entre otros. Son frecuentes en zonas próximas a fracturas, conductos, diques, etc., por los que circularían con facilidad gases volcánicos y/o aguas termales. La compactación, por su parte, es más intensa en aquellos materiales que tienen poca resistencia mecánica, especialmente si ya han sido debilitados previamente por la alteración hidrotermal. El resultado de estos dos procesos es una disminución de la porosidad de los materiales con el tiempo, favoreciendo las pérdidas de permeabilidad y de porosidad drenable de los mismos, aunque con diferente intensidad en función de la sensibilidad o resistencia de los materiales a cada uno de estos factores. Debido a estas condiciones, aquellos materiales que son más recientes suelen tener una permeabilidad inicial mayor que la que pueden tener materiales antiguos (Join et al., 1997; Vitteq et al., 2015).

Los procesos de alteración y erosión de los materiales volcánicos son relativamente rápidos como resultado de su metaestabilidad petroquímica y su diaclasamiento, por lo que su modelación erosiva y la generación de sedimentos con estos materiales es muy rápida cuando se dan las condiciones climáticas adecuadas (Cabrera y Custodio, 2013).



Figura 3.4.- Naciente en la isla de Tenerife.



Figura 3.5.- Buzamiento de coladas.

80

3.3.4 *Fracturación secundaria*

La fracturación secundaria, inducida por la intrusión de diques, sismicidad o la inestabilidad estructural de los depósitos, entre otros procesos, puede modificar el comportamiento hidrogeológico del sistema, normalmente incrementando la permeabilidad de un material que a priori debería ser reducida. La fracturación puede afectar a todo tipo de materiales, pero el cambio hidrogeológico está condicionado por las características reológicas de los mismos. En las lavas y diques, que son más frágiles, el cambio será muy acusado, pero en materiales más dúctiles como los depósitos piroclásticos o los paleosuelos ricos en material arcilloso, las fracturas pueden volver a cerrarse por deformación plástica de la roca encajante.

3.3.5 *Flujos de lava o coladas*

Como se ha comentado anteriormente, los dos tipos principales de flujos de lava son las pahoehoe y las "aa". Las secuencias en forma de capa, de las coladas de lavas, generan espacios vacíos, huecos, vesículas, fracturas y una gran porosidad (Figura 3.4). En este sentido las coladas "aa", son las más productivas a nivel hidrogeológico, por su gran permeabilidad, aunque en su núcleo central, más denso, la permeabilidad disminuye.

El buzamiento de los flujos de lava también condiciona la dirección y el sentido del flujo subterráneo, ya que las aguas infiltradas se van moviendo a través de las brechas de techo y/o de base de las coladas siguiendo el camino que le condiciona la gravedad o las diferentes estructuras impermeables (Figura 3.5). Por tanto, en zonas llanas, la conductividad hidráulica es mayor en los flujos paralelos a la colada y menor en la dirección perpendicular a esta.



Figura 3.6.- Afloramiento de aguas termales en la galería de la Fuente Santa en la isla de La Palma (Tenerife).



Figura 3.7.- Familia de diques geológicos en el golfo de Frontera en el Hierro.

Las lavas basálticas fluidas, que continúan circulando bajo una costra ya solidificada por la diferencia térmica con las condiciones climáticas externas (aire, agua, etc.), pueden experimentar un descenso de nivel al disminuir el caudal de emisión o ahondar su propio cauce subterráneo. Este proceso crea un vacío o cavidad en el interior de las coladas, formándose los tubos o túneles volcánicos (Araña y López, 1974) (Figura 3.6). Los tubos volcánicos, al igual que las grandes cavidades kársticas, son extremadamente permeables. Sin embargo, a diferencia de los ambientes kársticos, estos conductos no suelen estar hidráulicamente conectados, quedando generalmente secos, aunque en condiciones favorables de climas húmedos pueden canalizar el flujo y la descarga de agua subterránea (Custodio, 2007).

3.3.6 Depósitos piroclásticos

Las formaciones donde dominan los depósitos piroclásticos, que son los productos de proyección aérea de las erupciones volcánicas, son considerados menos permeables que los flujos de lava brechoides recientes, excepto para depósitos piroclásticos muy jóvenes no alterados ni compactados.

Un subgrupo importante dentro de los depósitos piroclásticos son las formaciones asociadas a las nubes ardientes, o depósitos ignimbríticos. Las ignimbritas, como se denominan comúnmente, pueden estar intensa o parcialmente soldadas si aún existía calor suficiente en el proceso de deposición, o pueden permanecer relativamente desagregadas y con abundantes partículas de material vítreo si no hubo condiciones favorables para la cohesión. En el caso particular de los depósitos ignimbríticos soldados no fracturados, éstos pueden ser materiales de extremadamente baja permeabilidad (Hinds et al., 1999),



Figura 3.8.- Diques en terrenos costeros erosionados en la isla de La Gomera.



Figura 3.9.- Dique geológico dentro de galería y nomenclatura de números romanos utilizada por el Ingeniero Carlos Soler (2004) en sus perforaciones.

82

como se ha comentado anteriormente, lo que ha llevado a ser candidatas para el almacenamiento de residuos radioactivos (e.g. Yucca Mountain, EE.UU.).

3.3.7 Diques geológicos

Los diques representan el material fundido que en su movimiento desde la cámara magmática hacia la superficie solidifica en los propios conductos o fracturas de ascenso, normalmente discordantes a la roca encajante. El enfriamiento relativamente más lento de estas rocas filonianas o subvolcánicas, permite un mayor desarrollo de la cristalización de los minerales fundidos, haciéndoles más resistentes que los materiales volcánicos, los cuales, en contacto con las condiciones climáticas de superficie (aire, agua, etc.) se enfriaron más rápidamente. De hecho, en los propios diques es frecuente observar una cierta zonificación entre el núcleo, con un mayor grado de cristalización, y los bordes, más vesiculados.

En las paredes de los barrancos de las zonas más antiguas y erosionadas de las islas volcánicas, como los complejos basales, los diques se pueden observar con mayor facilidad formando muros de espesor variable (1-10 m) que suelen agruparse en familias o enjambres con orientaciones similares.

La intensidad de la fracturas que presente, la estructura, ubicación y orientación respecto al flujo de agua subterránea de estas redes de diques, son características fundamentales para entender la geometría de los acuíferos insulares, dado que constituyen elementos hidrogeológicos fuertemente anisótropos (Babiker y Gudmundsson, 2004). La disposición genético-estructural de los diques condiciona los sistemas de flujo regional y los

gradientes piezométricos, pudiendo actuar como pantallas represando el agua subterránea o facilitando y redirigiendo el flujo subterráneo (Poncela, 2015). Los bordes de los diques suelen presentar una fracturación paralela a la dirección de emplazamiento, esto es, que en sentido paralelo al flujo subterráneo los bordes de los diques son estructuras muy permeables, favoreciendo zonas preferenciales de circulación; por el contrario, en sentido perpendicular al flujo representan barreras hidrogeológicas, dado que tienen una porosidad y permeabilidad muy baja, sobre elevando el nivel freático.

Esta configuración de los diques, los cuales suelen compartimentar formaciones más permeables, hace posible que en las zonas de las dorsales volcánicas, que son áreas de mayor actividad volcánica donde existen importantes redes de diques perpendiculares al sentido de circulación del agua subterránea cumbre hacia el mar y donde se concentra la mayor cantidad de precipitaciones, el nivel freático pueda alcanzar hasta 1.500 m sobre el nivel del mar.

Los diques, a nivel hidrogeológico, pueden actuar de dos maneras; como vías preferenciales de flujo de agua o bien como barrera al mismo dado que tienen una porosidad y permeabilidad muy baja, por lo tanto una baja conductividad hidráulica. Este comportamiento depende de la intensidad de la fracturas que presente, la estructura, ubicación y orientación respecto al flujo de agua subterránea (Babiker & Gudmundsson, 2004). Algunas familias de diques se concentran en las dorsales de las islas, que son áreas donde se produce una mayor cantidad de precipitaciones.

3.3.8 *El agua en el suelo*

Tras una erupción, en la superficie de los materiales volcánicos emitidos comienzan a tener lugar una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que, con el tiempo, dan lugar a la formación de suelos, siendo el clima un factor dominante. Los suelos más comunes en terrenos volcánicos son los clasificados como andosoles (del japonés an do, suelo oscuro, y del latín sol, suelo), los cuales se desarrollan preferencialmente donde el material parental son cenizas y otros materiales volcánicos ricos en vidrio como pómez, escorias, etc. (Shoji et al., 1993). El vidrio volcánico, con un tamaño de partículas inferior a 2 mm de diámetro, al descomponerse genera partículas con tamaños inferiores a 0,08 mm (arcillas y limos). Estas partículas son denominadas alofanos e imogolitas, las cuales son responsables de algunas propiedades singulares que caracterizan el comportamiento de estos suelos (Wesley, 1998).

Los andosoles suelen tener altos valores en contenido de materia orgánica (~20%) que les da su característico color oscuro, además de una gran capacidad de retención de agua a causa de la comentada elevada porosidad inicial de los materiales volcánicos, presentando buena resistencia a la erosión hídrica (FAO, 2001). Estas condiciones, unidas a la meteorización química asociada a la humedad y los gases atmosféricos (e.g. O₂, CO₂) de



Figura 3.10.- Paleosuelo o almagre en el Hierro.



Figura 3.11.- Paleosuelo o almagre en el interior de una galería.

84

las rocas volcánicas, favorecen la liberación de grandes cantidades de elementos cruciales para la vida procedentes de los minerales que formaban las rocas, resultando en suelos extremadamente fértiles.

3.3.9 *Paleosuelos*

Los paleosuelos en general, son suelos fósiles, restos de un suelo antiguo que ha quedado cubierto por otros depósitos. En los terrenos volcánicos, es frecuente que estos suelos hayan sido enterrados por depósitos piroclásticos o coladas de lavas procedentes de erupciones posteriores. En este último caso, los flujos de lava calientan el suelo a una temperatura elevada, que puede llegar hasta los 1.000 o 1.200°C, formando un característico color rojizo como consecuencia de la cocción de la arcilla y de la materia orgánica presente en el suelo. En Canarias, este tipo de paleosuelos se denominan comúnmente almagres y tienen espesores muy variables, desde pocos centímetros a varios decímetros (Figuras 3.10 y 3.11). En pendientes pronunciadas, estos suelos tienen poco desarrollo, siendo mayor en superficies llanas. De una forma cualitativa, la presencia del almagre entre materiales volcánicos suelen indicar que se produjo un tiempo suficientemente prolongado entre las erupciones que emitieron dichos materiales como para permitir el desarrollo de un suelo, cuyo espesor es función directa del tiempo inter eruptivo en esa zona.

Su relación con el agua es fundamental, dado que debido al contenido en arcillas y a su elevado grado de compactación y alteración respecto de las rocas circundantes, forman capas sub-horizontales de muy baja permeabilidad que pueden dar lugar a acuíferos colgados y provocar nacientes cuando son intersectados por la superficie topográfica.

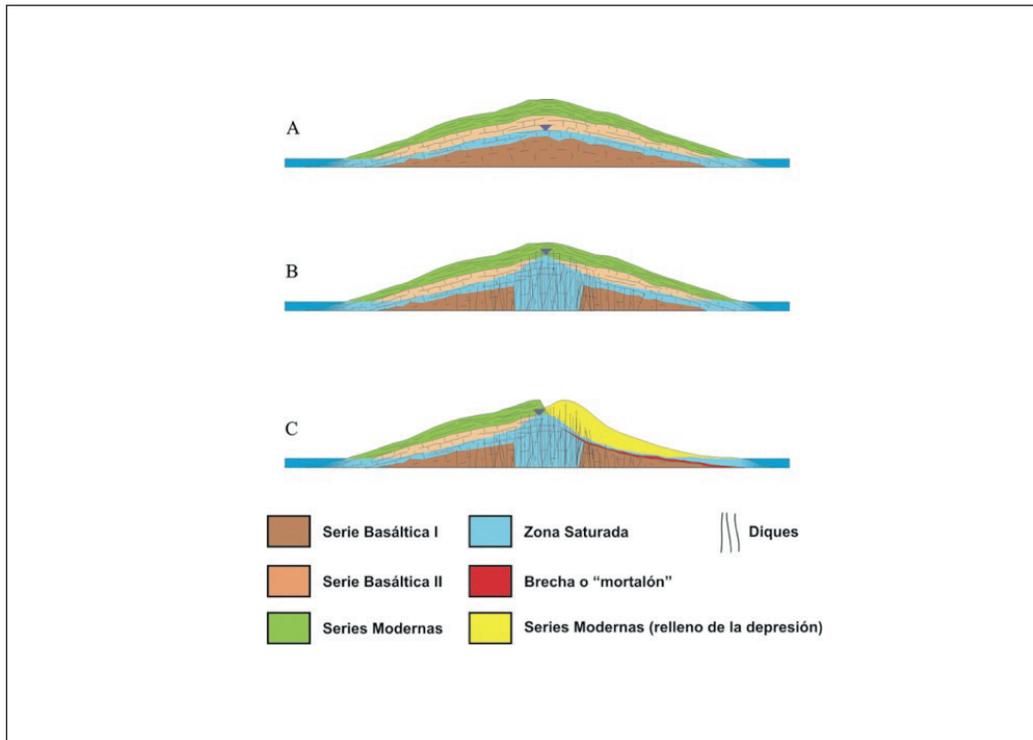


Figura 3.12.- Cortes hidrogeológicos ideales de tres ambientes volcano-estructurales presentes en Tenerife (modificado de Navarro y Farrujia, 1989; de Marrero, 2010). En B y C se puede advertir la sobreelevación del nivel freático en el núcleo de la dorsal debido a que es la zona de mayor intrusión de diques.

3.4 TIPOS DE ACUÍFEROS INSULARES

3.4.1 Ambiente volcanoestructural

En general los factores anteriormente nombrados son los que condicionan las características hidrogeológicas de los materiales volcánicos. Sin embargo, desde un punto de vista más amplio, el ambiente volcano estructural en el que estén esos materiales es el que al final controlará el funcionamiento del acuífero. En islas volcánicas como Tenerife, La Palma o El Hierro, se puede hablar de al menos tres ambientes volcano estructurales claramente diferenciados (Figura 3.12):

A. Macizos basálticos

En estos ambientes, que suelen estar constituidos por los materiales más antiguos, la permeabilidad ya de por sí reducida, disminuye con la profundidad debido al mayor grado de compactación y alteración que han ido sufriendo con el tiempo.

B. Zonas de dorsales o rift

Las dorsales son zonas elevadas del territorio insular, asociadas por tanto a una mayor precipitación, y que están caracterizadas por una fuerte intrusión de diques que inducen una fracturación secundaria importante, aumentando la porosidad drenable y una alta permeabilidad vertical. Estas características hidrogeológicas permiten la mayor infiltración y, la existencia de diques permiten la acumulación de aguas subterráneas y la sobreelevación del nivel freático. Dentro de este ambiente volcánico estructural se pueden identificar dos zonas: el núcleo, donde las características antes mencionadas son más patentes y en el que el flujo paralelo a la fracturación o longitudinal predomina sobre el flujo transversal, y los márgenes, donde la intrusión de diques y la fracturación y microfracturación asociada es mucho menor permitiendo un mayor flujo en sentido, desde la cumbre hacia el mar.

C. Valles y depresiones

Normalmente los valles y depresiones suelen estar rellenos de materiales volcánicos y/o sedimentarios más jóvenes y de mayor permeabilidad que los que constituyen la base, que puede estar formada por brechas relacionadas con deslizamientos gravitacionales (e.g. Navarro y Coello, 1989) u otro material de muy baja permeabilidad. En la cabecera de estos ambientes suelen existir diques paralelos a la misma que dificultan el flujo de agua subterránea en sentido cumbre-mar.

3.4.2 Acuíferos formados por deslizamientos gravitacionales

Los deslizamientos o “debris avalanche”, también influyen en la formación de los acuíferos insulares. Estos grandes movimientos de terreno pueden ocurrir por inestabilidades en los edificios insulares formados y por otros condicionantes ambientales, y cuando ocurren, las consecuencias para el acuífero son inmediatas: crean un depósito caótico de avalancha, de baja permeabilidad, formado por conglomerados y arcilla. Denominado por el geólogo canario Telesforo Bravo, como “fanglomerado”, en el argot minero canario se denomina mortalón, al parecer, por su similitud con la forma de una mortadela (matriz de arcilla más piedras). Ejemplos en Canarias son conocidos, entre otros, el del Valle de La Orotava, Icod y Güimar (Tenerife) o El Golfo (Hierro) (Figura 3.13).

A gran escala hay variaciones verticales de permeabilidad, debido a la sucesión de depósitos y coladas de procesos eruptivos diferentes que dan lugar a un modelo en capas superpuestas, de manera que la permeabilidad disminuye con el aumento de la profundidad, como norma general. Las variaciones horizontales de este parámetro son más acusadas que en la vertical, sobre todo en el ámbito de las zonas de dorsales o rifts, a causa de la presencia de diques y fracturas secundarias.



Figura 3.13.- Deslizamiento de El Golfo en la isla de El Hierro.

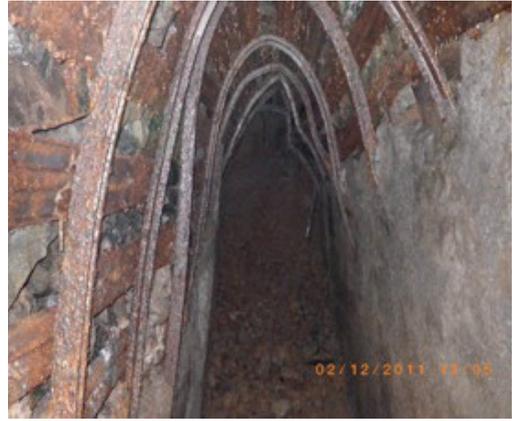


Figura 3.14.- Galería de agua que ha alcanzado el "mortalón" o depósitos de avalancha. (foto cortesía de Rafael Fenoll).

A nivel de explotación del recurso hídrico, las minas de agua o galerías al llegar a la zona de los depósitos de avalancha, se dificulta enormemente el avance. Puede ser necesario su estabilización mediante la instalación de entibado metálico o bloques de hormigón. Una vez instalado el sostenimiento, se percibe en algunas galerías una reducción muy importante de sección debido al empuje del terreno (Figura 3.14), que obliga a ejecutar frecuentes labores de mantenimiento.

3.4.3 Acuífero basal o general

Cuando se produce la precipitación, parte del agua se infiltra en el terreno, una porción de esa lluvia se incorporará a las plantas, humedecerá el suelo, otra se evaporará y finalmente una parte seguirá un recorrido vertical hacia la zona saturada. Si el agua no se encuentra con ningún nivel impermeable, ésta discurre lentamente a través de las capas superiores del subsuelo de mayor permeabilidad hasta que se encuentra con materiales de menor permeabilidad que frena su movimiento, constituyéndose una zona saturada. En estas formaciones, que suelen estar constituidos por los materiales más antiguos y profundos, intensamente intruídos por diques, la permeabilidad ya de por sí reducida, disminuye con la profundidad debido al mayor grado de compactación y alteración que han ido sufriendo con el tiempo (Custodio, 2007).

Las reservas hídricas subterráneas de las islas volcánicas oceánicas en general se encuentran formando parte de esta zona saturada general, que se conoce como acuífero basal. Se ha identificado en numerosos islas volcánicas oceánicas, como en la isla Reunión, relacionado con la formación volcánica más antigua, y se corresponde con la superficie freática



Figura 3.15.- Naciente en Tenerife. (Foto cortesía Francisco Puerta).

identificada en las zonas costeras (Join et al., 1997). Por debajo, de estas formaciones, las reservas hídricas se consideran despreciables.

La presencia de esta masa de agua y su flotabilidad sobre las aguas marinas, a causa de la diferencia de densidad entre el agua salada y el agua dulce, depende del volumen de agua infiltrado y la conductividad hidráulica de los materiales (Falkland y Custodio, 1991).

3.4.4 *Acuíferos colgados*

Los acuíferos colgados, también conocidos como acuíferos suspendidos, son el resultado de la retención de una fracción de agua por encima del nivel piezométrico del acuífero basal o general de la isla, en la zona no saturada. El agua fluye por coladas entre niveles piroclásticos alterados y paleosuelos, pudiendo seguir varias líneas de flujo. Si en ese movimiento alcanza uno de estos niveles piroclásticos de mayor espesor, el agua aflora dando lugar a nacientes (Figura 3.15). Por tanto, la presencia de estos acuíferos se evidencia en los patrones de distribución lateral y vertical de los nacientes, así como por las características hidrogeológicas de los pozos y galerías que los interceptan, con caudales muy irregulares. Las propiedades hidráulicas de estos acuíferos dependen de las características del medio rocoso que los confiere: espesor, continuidad, paleorelieve, grados de fracturación, estado de alteración, etc.

3.4.5 Acuíferos costeros

Este tipo de acuífero, a diferencia del basal, no se origina sobre las formaciones profundas y de baja permeabilidad del interior de las islas, como el complejo basal, si no que se mantiene en un equilibrio dinámico flotando sobre el agua marina, más densa, que ha penetrado en el interior de la isla.

Los aspectos de las relaciones agua dulce-agua salada en las regiones costeras de los terrenos volcánicos responden a la estructura y composición de los materiales que los conforman, según las características enumeradas anteriormente. Así, en islas volcánicas, es usual que los procesos de intrusión marina se frenen si el complejo basal está situado en la zona costera. Sin embargo, cuando en la costa se sitúan materiales volcánicos más jóvenes (y normalmente, más permeables), a veces interestratificados con formaciones sedimentarias, la explotación de los acuíferos costeros puede producir conos salinos y desplazamientos laterales de la cuña de agua marina (Custodio, 2010). De los tres tipos de acuíferos descritos anteriormente, este es el más vulnerable, debido a la intrusión marina. También, debido a la mayor densidad poblacional en las zonas costeras, es el más explotado.

3.5 CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA HIDROQUÍMICA DE LAS FORMACIONES VOLCÁNICAS

Los solutos disueltos presentes en las aguas subterráneas pueden tener diversos orígenes: los aportados por las precipitaciones y la lixiviación de la deposición seca procedente del spray marino y el polvo atmosférico, las reacciones orgánicas en el suelo, la meteorización del medio poroso, los aportes externos de la actividad humana, etc. (e.g. Apello y Postma, 1994; Drever, 1997). No obstante, mientras la composición hidroquímica de las aguas en el suelo y cercanas a la superficie del terreno es principalmente función del clima y de la lluvia, cuando éstas se filtran en el subsuelo y percolan a través de la zona no saturada hacia el acuífero, otros factores cobran cada vez mayor influencia en las características hidroquímicas finales del agua subterránea.

En los acuíferos volcánicos, las características hidroquímicas del agua subterránea una vez infiltrada en el subsuelo están fuertemente condicionadas por la composición mineralógica, el tipo de textura y de su alterabilidad, grado de fragmentación, etc. de la formación geológica que contiene el recurso o incluso la presencia, en zonas volcánicamente activas, de gases endógenos (principalmente CO₂) que normalmente confieren una mayor agresividad al agua (Custodio, 1978; Sigurdur y Eugster, 1987).

3.5.1 Contenido catiónico

En las rocas volcánicas, la solubilidad de la fracción catiónica mineral suele ser mucho mayor que la de la fracción aniónica; por tanto, el contenido en cationes de las aguas subterráneas está normalmente más relacionado con la composición de las rocas del medio poroso por las que circulan. La adquisición por parte del agua subterránea de las diversas sustancias presentes en el medio poroso depende, en gran medida, de la composición química y mineralógica de las rocas del sistema acuífero ya que la constitución de éstas, ácida, básica o intermedia, repercutirá en el aporte de cationes diferentes. Así, las rocas básicas suelen aportar sales a las aguas subterráneas más rápidamente que las rocas ácidas (Custodio, 1978), dado que la meteorización es menos intensa en estas últimas que están formadas por minerales menos alterables que los de las primeras en el contexto termodinámico próximo a la superficie.

Las aguas que circulan por basaltos y traquitas reciben un mayor aporte de Mg^{2+} que de Ca^{2+} a diferencia de lo que ocurre en el resto de tipo de rocas volcánicas, mientras que aquellas que lo han hecho por rocas alcalinas suelen tener un contenido importante de Na^+ (Soler y Lozano, 1985). El proceso de disolución irreversible de las plagioclasas sódicas, como la sanidina $((Na,K)AlSi_3O_8)$ o la albita $(NaAlSi_3O_8)$, las cuales son muy abundantes en rocas ácidas, también aporta una gran cantidad de iones alcalinos a las aguas subterráneas. Otro de los procesos que pueden explicar el origen de las aguas subterráneas con altos contenidos en Ca^{2+} , Mg^{2+} y en sílice disuelta (H_4SiO_4) es la hidrólisis del piroxeno (i.e. diópsido: $CaMgSi_2O_6$) y el olivino ($Mg_aFe_bSiO_4$) presentes en el basalto, cuando son atacados por las aguas ricas en CO_2 disuelto por las que circulan.

En cuanto a la textura, según un estudio llevado a cabo por Sigurdur y Eugster (1987) en Islandia, las rocas basálticas que presentan una textura cristalina se disuelven un orden de magnitud más lentamente que los vidrios basálticos. El grado de fragmentación o el estado de división de la roca, entendiéndose como tal la mayor o menor superficie de reacción en función de la porosidad, fracturación secundaria, etc., también puede jugar un papel importante en la composición química de las aguas. En algunas zonas sísmicamente activas se han relacionado los cambios bruscos de la composición físico-química de las aguas con la creación de nuevas superficies de reacción y planos de rotura en las rocas del medio poroso como consecuencia de sismos relativamente lejanos pero de considerable magnitud ($M_w \geq 5$) (Skelton et al., 2008).

3.5.2 Contenido aniónico

Respecto al contenido aniónico de las aguas subterráneas, en climas húmedos o semihúmedos, donde la recarga suele ser alta, el anión dominante es el HCO_3^- (y el CO_3^{2-} si el pH llega a ser alto) procedente de la lluvia y sobre todo del suelo, mientras que en climas áridos

y semiáridos, donde la recarga es menor pero más mineralizada, los aniones dominantes suelen ser el Cl^- y/o el SO_4^{2-} procedentes del lixiviado de la deposición seca y del agua de lluvia en equilibrio con los cationes y que, por tanto, no aportan agresividad al agua (Custodio, 1978, 1986).

En cambio, en terrenos volcánicos donde existe un aporte de CO_2 endógeno, los aniones más abundantes en las aguas suelen ser el $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, independientemente del clima. La oxidación de la pirita (FeS_2) con el oxígeno del agua de infiltración y difundido desde la atmósfera en ciertas rocas submarinas y otras rocas volcánicas ácidas como las traquitas, puede contribuir significativamente con ión sulfato (SO_4^{2-}) al agua subterránea. El aporte de hidrogeniones a las aguas como resultado de la oxidación de la pirita también genera acidez y favorece la hidrólisis de los silicatos, sumándose al efecto del CO_2 disuelto (Custodio, 1978; Veeger, 1991).

3.5.3 Aporte endógeno y agresividad del agua

En los ambientes volcánicos, la mayoría de los minerales presentes en las rocas, formadas casi totalmente por silicatos, presentan una solubilidad reducida. Sin embargo, estos minerales son fácilmente hidrolizables cuando existen iones de hidrógeno disueltos en el agua y el pH se mantiene relativamente bajo. Estas condiciones se cumplen cuando existe una cantidad elevada de CO_2 disuelto en el agua subterránea que circula a través de las rocas, aumentando su agresividad química y favoreciendo los procesos de interacción agua-roca. Esta interacción genera una serie de reacciones que producen sales de bicarbonato solubles, sílice coloidal, cationes alcalinos y alcalinotérreos, entre otros, aumentando finalmente la salinidad del agua (Drever, 1997).

Este CO_2 disuelto en terrenos volcánicos procede a menudo de emanaciones endógenas en áreas de volcanismo activo o residual (Valentín et al., 1990; Federico et al., 2002; Marrero et al., 2008), pero también el gas ocluido en los poros cerrados de las rocas puede contener importantes cantidades de CO_2 , el cual se disuelve lentamente por difusión en el agua subterránea durante el proceso de alteración de la roca (Custodio, 1986, 1988).

3.5.4 Problemas de calidad en el recurso

La calidad físico-química de las aguas subterráneas en islas volcánicas oceánicas, suele estar muy influenciada por la formación geológica que contiene el recurso hídrico, la actividad volcánica y el tiempo de residencia en el acuífero. En este caso, se puede hacer una analogía con las características geotécnicas, las cuales pueden variar de una zona a otra cercana, debido a la anisotropía y heterogeneidad del macizo. En el caso del agua ocurre prácticamente lo mismo, el agua captada de una galería con respecto a la más cercana puede variar notablemente en cantidad y calidad, incluso puede haber una zona de

la captación, que se vea afectada por actividad volcánica residual o la presencia de gases endógenos profundos (en general de desgasificación de magmas en profundidad), principalmente el CO_2 , el cual acelera mucho la alteración de las rocas volcánicas.

En las islas volcánicas, las aguas subterráneas suelen representar un recurso hídrico estratégico debido a sus condiciones singulares (aislamiento, limitado almacenamiento, sobrepoblación, etc.). Sin embargo, la calidad de estas aguas subterráneas no siempre cumple los requisitos necesarios para su aprovechamiento, (BOE, 2003; Morán, 2011) debido a diversos problemas naturales y/o antropogénicos que actúan simultáneamente sobre el sistema hidrológico. En el caso particular de las Islas Canarias, es posible enumerar, como procesos naturales potenciales que afecten la calidad de aguas subterráneas, la actividad volcánica y la climatología, mientras que la actividad agrícola y la sobreexplotación de los acuíferos pueden ser las actividades antropogénicas principales.

92

3.5.4.1 Salinización

Los procesos de salinización del agua subterránea en acuíferos volcánicos insulares pueden estar asociados a varios orígenes (Ritcher y Kreidler, 1993). El más frecuente es la intrusión marina, que se traduce en un avance tierra adentro de la interfase agua dulce/agua salada como consecuencia, normalmente, de la explotación de los acuíferos costeros (Custodio y Llamas, 1976, 1983). La intrusión marina aumenta considerablemente la mineralización de las aguas subterráneas, especialmente relacionadas con elevadas concentraciones de Cl^- y Na^+ , dado que la halita (NaCl) es un constituyente principal de agua de mar, pero también de ión boro (B), entre otros.

Sin embargo, es importante destacar que, en algunas situaciones, las concentraciones relativamente elevadas de Cl^- y Na^+ no son una evidencia concluyente de la intrusión de agua de mar en los acuíferos volcánicos costeros, ya que pueden confundirse o superponerse a los producidos por otros procesos, como la incorporación del aerosol marino presente en la atmósfera, a las fuentes locales de cloruros, incluyendo sistemas sépticos o estiércol animal, o a tasas muy importantes de bombeo que extraen aguas profundas mineralizadas.

El origen de estas aguas mineralizadas en los acuíferos volcánicos costeros, puede ser muy variado: aguas marinas antiguas atrapadas en el interior de las formaciones geológicas, como en el caso del Macizo de Betancuria, en la isla de Fuerteventura (Herrera, 2001) o en varias zonas costeras de la costa atlántica norteamericana (Sanford et al., 2013); aguas subterráneas aisladas en las zonas más profundas de un acuífero desde su formación y con un elevado tiempo de residencia (Dion y Sumioka, 1984); aguas subterráneas que, debido a la naturaleza volcánica del medio, adquieren características físico-químicas similares a las relacionadas con la mezcla de agua de mar. En este últi-



Figura 3.16.- Limpieza de canal debido a la precipitación de carbonatos.

mo caso, en la isla de La Palma, existen estudios que indican que la salinización de las aguas que se explotan a lo largo del barranco de Las Angustias y Tenisca, en la costa centro-occidental de la isla, no se debe a un proceso de intrusión marina (Pérez et al., 1994, 1995; Pérez, 2008) y sí a la fuerte interacción agua-roca favorecida por un aporte de CO_2 endógeno. Sin embargo, en el Plan Hidrológico de La Palma se interpreta dicha mineralización como un efecto de la intrusión marina ocasionada por la sobreexplotación de los pozos costeros de la zona. Por tanto, para desarrollar acciones correctoras que permitan disminuir el grado de salinización en los acuíferos volcánicos costeros, queda patente que es necesario la realización de estudios e investigaciones que permitan definir el origen u orígenes de la salinización y su cuantificación.

La disolución (parcial o total) en el agua subterránea de minerales evaporíticos presentes en las formaciones geológicas por las que circula, también puede ser una fuente muy importante de salinización de los acuíferos, aunque poco frecuente en terrenos volcánicos.

3.5.4.2 Flúor

El flúor, o más correctamente el ión fluoruro (F) en las aguas, suele estar en concentraciones minoritarias, con valores inferiores a 0,5 mg/L (Drever, 1997). No obstante, en las aguas subterráneas de los terrenos volcánicos es frecuente observar concentraciones superiores a los 2 mg/L de flúor. El Real Decreto 140/2003 (BOE, 2003), indica que el nivel máximo de flúor en el agua de abasto o riego debe ser de 1,5 mg/L, mientras que los niveles óptimos estimados por la Organización Mundial de la Salud (OMS, www.who.int/es/) están entre 0,5 y 1 mg/L.

El origen de estas concentraciones anómalas de flúor suele estar asociado a dos procesos: la disolución parcial de rocas volcánicas ácidas alcalinas (Custodio, 1986), cuyo contenido en Ca es menor que en rocas básicas y que permite la disolución de minerales fluorurados, tales como la fluorita (CaF_2) o el fluoroapatito ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$), y/o por la adición de haluros volátiles (e.g. HF, NH_4F , SiF_4 , etc.) procedentes de la desgasificación parcial del magma en zonas volcánicamente activas (D'Alessandro, 2006).

La sobreexplotación del acuífero puede generar los siguientes efectos: (i) en zonas altas, extraer aguas más antiguas y/o profundas cargadas de sales y flúor; (ii) acelerar el descenso del nivel freático; (iii) en zonas costeras, la aparición de la intrusión marina.



PARTE II

INGENIERÍA MINERA



CAPÍTULO 4. Tipología de los aprovechamientos. Minería del agua

Juan Carlos Santamarta Cerezal

4.1 INTRODUCCIÓN

La presente sección del libro, se centra en los recursos subterráneos, principalmente los obtenidos mediante galerías o minas de agua dulce. Estos términos se usarán indistintamente aunque, en algunas islas, esta denominación presenta matices. También se hablarán de los sondeos y pozos, aunque su construcción es idéntica a cualquier otro lugar del mundo, salvo los pozos canarios. Los sistemas constructivos de estas infraestructuras se ven notablemente influenciados por los factores geológicos de un terreno volcánico y por supuesto, su heterogeneidad, ya comentada en secciones anteriores.

Las galerías, los túneles subterráneos o minas de captación de agua son un método ancestral muy extendido y utilizado. Desde muy antiguo, estos sistemas de aprovechamiento del agua se conocen en zonas tan distantes como China, Persia (antiguo Irán), España y Latinoamérica. Las citas más antiguas posiblemente sean las de Qaná, Jericó, Jerusalén, Marrakech y la isla de Sicilia.

Los antecedentes históricos a esta tipología de obras, se encuentran en el siglo VIII antes de J.C., los “quanats”, canales subterráneos artificiales que transportan el agua a grandes distancias. Esta explotación de las aguas, generalmente surgidas del drenaje de los acuíferos, se utilizó en Persia, Egipto, India, Grecia y por todo el Magreb en forma de “foggaras” con sus característicos pozos de ventilación.

Como se ha comentado en secciones anteriores, un concepto fundamental, para entender el aprovechamiento del acuífero por galerías o minas, a unas cotas tan elevadas sobre el nivel del mar, es que el acuífero de las vertientes está sobre elevado debido a los diques basálticos. Los diques forman verdaderos enjambres y celdas donde el agua se almacena. Estos diques basálticos, crean un escalonamiento del acuífero, con elevados gradientes hidráulicos, que hace que sea un sistema dinámico. La mayor concentración de diques se establece en las dorsales de las islas. Estas zonas, suelen ser la de mayor pluviometría de las islas, tanto lluvia vertical como horizontal (precipitación oculta por alisios). Son zonas donde más elevado está el acuífero, aunque actualmente y, por la sobreexplotación del recurso hídrico, está en descenso continuo en algunas zonas de las islas. Esto supone, que muchas galerías se tengan que reperforar o bien, abandonar la explotación, al quedar esta por encima del nivel freático.

4.2 MINAS DE AGUA

En la isla de Gran Canaria también existen las galerías de agua, pero en este caso existe también una tipología, denominada mina asociada a barranco. Según el investigador y Cronista Oficial de La Aldea Francisco Suárez, este sistema se generalizó, a partir de principios del siglo XVI y sobre todo después del siglo XVIII. El sistema consiste en la búsqueda de las aguas subálveas de los barrancos, a través de unas zanjas que seccionaban los cauces de los barrancos, lo que pudiera tener relación con las eres de los aborígenes y que recibió la denominación de minas. A principios del siglo XIX se experimentó en zonas de en Tenerife aunque no tuvo éxito salvo, probablemente, algunas obras similares trazadas en el barranco de Santos que han desaparecido; no debiendo confundir la denominación de mina que hacen en algunos lugares de esta isla a las galerías excavadas en la roca, como lo hacen en zonas de Güímar (Suárez, 2015). Bien es verdad que a mediados del siglo XIX cuando comienzan a perforarse las zonas montañosas con galerías en busca de acuíferos colgados esta se denominan en un principio como minas de agua (Suárez, 2015).

Las primeras minas de agua estuvieron vinculadas a los antiguos heredamientos o en su caso las posteriores al siglo XVIII crearon sus propias heredades (Suárez, 2015). Su estrategia de construcción consiste en abrir una zanjas longitudinal o transversalmente al cauce del barranco, reforzadas con muros de piedras, techadas con lajas y recubiertas luego con el material del mismo. Las aguas captadas a lo largo de la mina continúan por efecto de la gravedad, a lo largo de acequia, hacia un pequeño estanque regulador. Las minas pueden tener centenares de metros de longitud, con unas medidas que permitan el paso para su limpieza, que consideramos de unos 0,5 a 0,8 metros de ancho por 0,8 a 1,75 m de profundidad. A lo largo de su recorrido subterráneo disponen, a tramos, de unas aberturas o respiraderos hacia la superficie para facilitar las labores de limpieza dentro de las mismas; son unas lumbreras de ventilación o registros que se denominan campanas, debido a que los operarios que trabajaban en las labores de limpieza de las minas solían emplear unas campanillas para comunicarse. Las campanas pueden ser de poca altura o profundas cuando las minas discurren por barrancos de potentes paquetes de cascajos, arenas y sedimentos y requieren escaleras de caracol para bajar a las mismas (Suárez, 2015).

4.3 GALERÍAS DE AGUA

4.3.1 Galerías convencionales horizontales o dike tunnel

En general, las minas o galerías de agua son perforaciones o túneles con una sola boca, denominada bocamina en el argot minero, y una sección media de 1,5 x 2 m o incluso menor, aunque las realizadas por la Administración son de dimensiones sensiblemente mayores; sólo en las islas Canarias hay 2.000 perforadas. Los trabajos de perforación se realizaban antiguamente con medios mecánicos, aunque el uso de explosivos se generali-



Figura 4.1.- Sección del pozo-galería Los Padrones, en El Hierro.



Figura 4.2.- Galería de naciente, en el monte de Las Mercedes en La Laguna, Tenerife.

zó a mediados del siglo XX. Se disponen mediante una perforación ligeramente inclinada, por lo que, no hace falta bombear el agua para su aprovechamiento. La galería tiene como finalidad alcanzar el acuífero y extraer el agua. Normalmente, cuando se llega a la zona saturada, se produce un alumbramiento abundante, las denominadas aguas de reserva (más cargadas de sales, con mayor tiempo de residencia en el acuífero). Posteriormente, los caudales tienden a estabilizarse mediante las aguas renovables o de recarga (más jóvenes). Las longitudes que se alcanzan oscilan desde los 1,5 Km a los 7 Km, el coste por metro lineal supera los 2.000 € por metro perforado (Santamarta, 2009). La producción de las galerías oscila entre unos pocos litros por segundo y los dos centenares. Por ejemplo el pozo galería de Los Padrones en la isla de El Hierro (Soler, 2004) obtiene un caudal de aproximadamente 80 L/s, con lo que, prácticamente podría satisfacer la mayor parte de las demandas hídricas de la isla. La disminución de los caudales y el retraimiento del nivel del acuífero no afectan por igual a las diferentes zonas, aunque tiende a generalizarse.

Las galerías forman auténticos laboratorios de exploración de la hidrogeología insular y forman parte del patrimonio geológico y minero, del archipiélago. Con más de 3.000 km de galerías construidos, proporcionalmente, se ha perforado más que en toda la zona de la minería del carbón de Asturias y León.

La primera galería o mina de agua conocida en Canarias data del año 1897 (Brito W, 1995) fue la conocida como Roque Negro y Los Catalanes en el macizo de Anaga, en el Norte de Tenerife. En otras partes del mundo las galerías de agua reciben otros nombres como por ejemplo dike tunnel (Hawái, EE.UU.) o collection tunnel en (Jeju island, Korea del Sur).

Prácticamente, la mayoría de galerías que hay en Canarias, son de titularidad privada, esto, unido a unos antecedentes históricos singulares en la propiedad del recurso hídrico, ha condicionado la organización del mercado del agua en las islas. Actualmente la Administración Pública, desde hace unos años, ha emprendido la ejecución de galerías y minas de titularidad pública con éxito desigual (cabe mencionar el éxito del citado pozo Los Padrones, en El Hierro). Las últimas galería perforadas, como por ejemplo la de Ipalán en la Gomera, la sección transversal tiene forma de medio punto con una anchura útil de 3 a 4 m, paramentos rectos de 1,80 a 2,50 m de altura, cerrada en su parte superior mediante una bóveda de unos de 2 m de radio.

Las galerías de la iniciativa privada son de dimensiones notablemente inferiores y angostas, y se siguen reperforando con estas medidas debido principalmente al control de costes, ya que no hay relación entre una mayor productividad y una mayor sección.

También se ha confirmado una progresiva pérdida de calidad en las aguas de las galerías, lo que se denomina una minería del agua fósil. La extracción a gran profundidad, en zonas volcánicas activas, trae consigo un importante incremento en sales disueltas incluyendo también valores elevados de flúor que en algunas explotaciones han llegado a alcanzar los 10 mg/L, siendo el máximo permitido por ley 1,5 mg/L.

4.3.2 *Galerías de nacientes*

En el caso de las islas Canarias, existía un desconocimiento del acuífero insular, simplemente por observación, se notaba que existían unos nacientes en las vertientes, —procedentes de acuíferos colgados—, por donde brotaba el agua, con unos caudales que para aquella época eran insuficientes. La iniciativa privada emprendió la tarea de excavar esos manantiales, con la esperanza de alcanzar caudales mayores lo que dio lugar a otra modalidad de mina, aquella que aprovecha antiguos nacientes en la ladera, vinculados a acuíferos colgados. Por este motivo, tienen poca longitud, de 10 a 100 metros, en comparación con las otras galerías convencionales. La idea principal era aumentar los caudales de los nacientes. Muchas de estas minas de nacientes, han acabado siendo minas o galería de agua, en algunos casos con más de 6 kilómetros de longitud. Ejemplos de las minas de nacientes se pueden encontrar en el monte de Las Mercedes en Tenerife; con muchas de estas minas se abastece, en parte, a la ciudad de la Laguna de 150.000 habitantes.

4.3.3 *Galerías en trancada o inclined shaft*

Otro tipo son las galerías, son las denominadas “en trancada”, denominadas inclined shaft en Hawái (EE.UU.). Se trata de una mina que parte de la costa, con una inclinación hasta que alcanza el nivel freático. Una vez allí, se ejecutan varios ramales para aprovechar la mayor cantidad de recurso hídrico procedente de la descarga del acuífero.

La isla con más galerías “en trancada” es la de El Hierro. Como ejemplos: la galería del Mar de las Calmas, Los Jables, Parador, Tacorón con más de 2.000 m, aunque la que más caudal tiene es la de Ícota, con 70.000 m³ de agua al año, esta última capta a una cota de 7,6 m sobre el nivel del mar. Abastece de agua para el consumo a las localidades de La Restinga, Taibique, Las Casas, Isora y San Andrés. La galería de El Parador surte de agua al Parador de Turismo y la galería de Tacorón se utiliza para regadío.

Se puede considerar también como obras de aprovechamiento subterráneo: los pozos convencionales, sondeos y pozos tradicionales canarios, unos 6.000 en todo el archipiélago Canario. Estos últimos tienen como característica disponer de un gran diámetro que puede llegar a los 3 metros. Su profundidad también tiene unas dimensiones nada usuales, que en algunos casos pueden llegar a 700 metros (Vilaflor, Tenerife). La profundidad de los pozos implica unos sistemas de bombeo en serie importantes, con un gran consumo energético y problemas con los gases volcánicos en cotas profundas que afectan a la seguridad del personal encargado de su mantenimiento.

4.3.4 Pozo galería

El pozo galería, como indica su denominación en un pozo, generalmente en la zona de costa y una galería que parte del fondo de la captación vertical, generalmente cuando esta llega al nivel freático.

En ocasiones, en estas captaciones, en lugar de galerías en el fondo, se perforan sondeos o catas, con el fin de ahorrar costes y por la rapidez de ejecución. Es posible, también, que en vez de una sola galería se construyan varias con el fin de aumentar las posibilidades de drenaje.

4.4 OTROS SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS EN TERRENOS VOLCÁNICOS

4.4.1 Pozo tradicional canario

Como ya se ha introducido anteriormente, son obras de perforación excavadas a mano, con un diámetro mínimo de 1,5 m. Su profundidad normalmente es de unas pocas decenas de metros (20 ó 30), aunque, en ocasiones, se han llegado a alcanzar varios centenares. Si bien el diámetro mínimo, tal y como se ha comentado es de 1,5 m, espacio imprescindible para el trabajo de una persona, está mayoritariamente extendido el diámetro de 3,5 m con máximos de hasta 6,5 m. Es necesario prever espacio para la instalación y mantenimiento de las tuberías de impulsión, de considerables dimensiones así como del cableado de alimentación de las bombas.



Figura 4.3.- Acceso a un pozo-galería.



Figura 4.4.- Pozo tradicional canario. (Foto cortesía de Rafael Lario).

104

También requieren de una bomba de achique, para que el agua pueda ser extraída, una vez alcanzado el nivel que permita la continuación de los trabajos. Se suelen colocar unas vigas de hormigón o acero para sujetar el pórtico del cabrestante o “winche”.

Normalmente, y sobre todo, en terrenos sueltos como son los piroclastos, es necesario revestir la obra, con objeto de evitar el derrumbe de las paredes, para ello se utiliza piedra revestida, bloque de material volcánico, cemento o anillos de hormigón prefabricados, colocados a medida que avanza la perforación. Este punto es fundamental para garantizar la seguridad de los operarios, ya que de no ser así, una pequeña piedra a 400 m de altura de caída podría perforar un casco. Es necesario incluir una instalación eléctrica con posibilidades de ampliación.

Como norma general, los pozos disponen de unas instalaciones auxiliares como por ejemplo dos cabrestantes o “winches” para el transporte de materiales y operarios respectivamente. En su operación y mantenimiento, los pozos, si son de poca profundidad (20-30 m), se puede disponer de una escalera tipo caracol e iluminar toda la caña del pozo. Algunos pozos son peligrosos, en el sentido de tener gases nocivos, CO₂ principalmente, por lo que se tendrá que disponer de un sistema de ventilación forzada así como de dispositivos de detección de gases.

El pozo con más caudal de las islas, se sitúa en Tenerife, es el denominado El Salto con un caudal de 200 L/s. Aunque lo normal son caudales menores, se recuerda por ejemplo, caudales de galerías como la del trasvase de La Palma (Soler, 2004), con 120 L/s. a cada lado de la vertiente, El Hierro (Los Padrones) con 80 L/s, galería Vergara en Tenerife con 160 L/s.



Figura 4.5.- Caña del pozo revestida.

Los problemas de estas instalaciones son de dos tipos: por un lado su ubicación geográfica, la mayoría están en costa, era evidente que ahí a menor cota sería más fácil interceptar la descarga del acuífero, esto ha hecho que muchos estén afectados de intrusión marina y estén sobreexplotados. La otra cuestión es la energética, esta extracción necesita de grandes cantidades de energía, por lo que se crea un binomio agua-energía.

Por último, es interesante comentar que muchos pozos canarios, en su base disponen de galerías en profundidad, formando auténticos laberintos, con esto se consigue mayor superficie de captación, se podrían asemejar a los pozos en estrella de la isla de Malta, en el Mediterráneo.

4.4.2 Sondeos

Los sondeos son actualmente, la tipología de obra hidráulica más utilizada, por su rapidez de ejecución y sencillez de instalación. En la presente sección se comentan las singularidades que presentan en terrenos volcánicos con respecto a los terrenos continentales.

Un sondeo es una perforación excavada por medios mecánicos, preferentemente vertical, de diámetro inferior a 1,5 m, aunque los más usuales se encuentran entre los 150 y los



Figura 4.6.- Entubado de un sondeo.

700 mm. Presentan la ventaja de que pueden alcanzar grandes profundidades y tienen un coste normalmente inferior a cualquier otro tipo de captaciones.

Esto requiere:

1. Elemento de rotura del terreno.
2. Motor de accionamiento.
3. Sistema de eliminación de detritus.
4. Sistema de mantenimiento de las paredes de la obra.

Los sistemas más comunes utilizados en perforación son:

- Percusión.
- Rotación.
- Rotopercusión.

La percusión, basa su técnica en la fracturación y trituración de la roca por la acción de golpeo de un instrumento pesado. La rotación, se centra en la acción de arrancar partí-



Figura 4.7.- Diferentes coronas para la ejecución del sondeo.

culas por medio de un elemento cortante sometido a una fuerza giratoria y que provoca una rotura de la roca por compresión. La roto percusión, se basa en la combinación de las dos técnicas anteriores, y es aquella a la que al efecto de golpeo se superpone una acción de giro del útil de perforación.

El sistema de perforación generalmente utilizado para la ejecución de sondeos en terrenos volcánicos es el de roto percusión. El varillaje utilizado es de 6 m. En un terreno volcánico hay dos tipos de maniobras; la primera, cuando se está desarrollando el sondeo, para terrenos relativamente sueltos como los comentados; aluviales, piroclastos, conglomerados etc.... y otra, para el terreno masivo o basáltico, es aquí donde realmente sufre la máquina y descienden notablemente los rendimientos. Se hace necesario ir recolectando las muestras de las formaciones atravesadas para el reconocimiento del terreno. Como valores de referencia para este tipo de sondeo y este tipo de material, es recomendable, usar un momento en la cabeza del sondeo, de 50 kg por m. Para una máquina de un solo compresor, es conveniente incluir 12 bares de presión. Por último es conveniente hablar de rendimientos, aunque, realmente, el rendimiento lo va a condicionar la experiencia del operario, que en este campo es fundamental. Como dato orientativo, se facilita el siguiente valor de 8 a 10 m/d con una jornada de 8 h, aunque

se reitera que depende de bastantes factores y el más limitante el tipo de formación a atravesar y la destreza del operario.

Los costes para la realización de un sondeo en un terreno volcánico difieren notablemente de los costes en terrenos continentales, esto se puede deber, en una primera estancia, a que el terreno volcánico presenta mayor dificultad para ejecutar el mismo, debido a la heterogeneidad del terreno y a la dureza que presentan los basaltos, en caso de atravesar este tipo de formación. También influye que hay menos competencia entre las empresas dedicadas a los sondeos.

Se puede determinar que en Madrid, un coste de sondeo medio puede ser del orden de 250 €/m (2009), para un terreno detrítico, como norma general, es obvio que la dificultad en este caso es mucho menor que en un terreno volcánico, así como los rendimientos. En el caso volcánico, se ha calculado mediante la observación y ejecución de varios sondeos a lo largo de las islas. En este coste calculado, no se incluye el conjunto de inversiones que incluye una perforación tipo (p. ej.: equipamientos posteriores: tubería de revestimiento, de elevación, grupo bomba-motor, etc.). En general el coste es algo que dependerá de cada instalación, con enorme influencia de diámetros y profundidades, sólo el coste de perforación, contemplando cualquier tipo de terreno, mediante tecnología de roto percusión, podría estar más próximo de los 300-400 € por ml (metro lineal) en 2009. En cualquier caso, la profundidad tiene una enorme incidencia, porque el coste de instalación y desmantelamiento de la maquinaria de perforación, puede estar incluido en el precio del ml para grandes profundidades; sin embargo, puede ser una partida única al margen del coste por ml para sondeos poco profundos y no de menos de 2.000-3.000 € (2009) por sondeo.

En otro orden de cosas, los pozos profundos admiten abordar el proyecto a precio cerrado, pues el menor margen del contratista por cambios en el terreno (entiéndase menor productividad de la máquina) puede ser más fácilmente asumido. En otro tipo de sondeos, aquellos de 50 m o menos de profundidad, donde haya indicios de terrenos de difícil perforación (masivos), será muy difícil obtener un precio cerrado, contratándose por administración y por tanto, con un precio resultante que dependerá de cada caso y cuyo promedio, es difícil de estimar por no tener documentación objetiva al respecto.

CAPÍTULO 5. Descripción y Construcción de una Galería-Mina de Explotación de Aguas Subterráneas

Juan Carlos Santamarta Cerezal

5.1 INTRODUCCIÓN

Aunque en los terrenos continentales, actualmente, se dispone de maquinarias avanzadas de excavación y sistemas del control del terreno que permite enfrentarse a todo tipo de material y roca (Cebrián C, 2005), en el caso de los terrenos volcánicos la evolución tecnológica no ha sido tan desarrollada. Esto es debido a que los terrenos volcánicos, presentan un terreno muy heterogéneo, anisótropo y difícil de parametrizar.

El terreno que conforman las Islas Canarias, es bastante variado en cuanto a su composición, lo que provoca numerosos problemas a la hora de ejecutar una perforación. Esta variedad, en cuanto a su dureza, hace muy difícil la utilización de medios mecánicos como microtuneladoras, siendo las perforaciones ejecutadas con medios más tradicionales utilizados en la minería convencional. Además hay que destacar que las minas de agua dulce en Canarias no tienen boca de salida por lo que si se utilizase esta tipología de maquinaria debería desmontarse y salir por la bocamina de nuevo (Soler, 2004).

Inicialmente, las galerías o minas, eran construidas por medios manuales y con animales, como los burros, para el transporte de herramientas y utensilios; en zonas con presencia de material masivo volcánico, como el basalto era necesario el uso de explosivos muy rudimentarios, incluso a veces, fabricados por los propios operarios. Los rendimientos en estos casos dependían de la destreza del cabuquero, que era el encargado de los explosivos. Los avances analizados eran del orden de 1 a 3 m/d. Los escombros resultantes eran cargados en vagonetas y éstos eran llevados a la superficie mediante fuerza animal o, empujados por los operarios (con pendiente de la traza de la galería a favor).

Tanto la explotación, como la dirección de obra y los planes de voladuras, deben ser ejecutados y realizados por un técnico competente, en este caso particular, los Ingenieros Superiores o Técnicos de Minas, ya que este tipo de instalaciones se rigen por la Ley de Minas. Evidentemente en los estudios hidrogeológicos y de demandas, caben otras cualificaciones y equipos multidisciplinarios.

Siguiendo con las técnicas de perforación y avance, complementariamente a los explosivos, se utilizan también en la perforación los martillos neumáticos y, en muy contadas



110

Figura 5.1.- Martillo percutor con empujador hidráulico. (Foto cortesía de Rafael Lario).

Figura 5.2.- Tramo de galería en construcción por parte de la Administración.

ocasiones mini-excavadoras en las galerías que por sus dimensiones, permiten la entrada de maquinaria y su maniobrabilidad. El uso de esta maquinaria tiene evidentes ventajas en cuanto a productividad y confort en el trabajo, sobre todo en la zona saturada de la perforación, con presencia de agua. Sin embargo, presentan el inconveniente de la producción de gases de escape (monóxido de carbono, CO), que no es posible evacuar a menos que la galería cuente con un sistema de ventilación forzada, hecho que no siempre ocurre. Por ello, habitualmente la única máquina con motor de explosión que entra en la galería es la locomotora, siendo las minipalpas de carga accionadas mediante sistema neumático.

La mina se suele construir con una alineación recta, aunque en determinadas ocasiones y debido a los materiales que van apareciendo y su orientación (almagres, buzamiento coladas, piroclastos...), puede haber cambios de rumbo, incluso ramales en determinados momentos de la excavación. Algunos ramales, en explotaciones más modernas, se utilizan para la circulación de la maquinaria. Estos cambios de orientación pueden ser debidos también a los resultados de exploración hidrogeológica. Se perfora un sondeo horizontal en el frente de la mina que informa de los materiales que se van a encontrar en secciones posteriores. También la distribución de los diques, suministran información, en conjunto con las humedades que vayan apareciendo en el trazado. Influye notablemente la experiencia de la dirección de obra en la búsqueda del recurso, sobre todo si es apoyada con un buen geólogo y el correspondiente estudio hidrogeológico.

Al inicio de la perforación, los primeros metros perforados (200-1.000) suelen discurrir en seco, es decir, en zona no saturada. El ambiente de trabajo se vuelve pulverulento. En seco, salvo que haya materiales muy duros tipo basalto o basalto “pelo perro” (el más duro



Figura 5.3.- Dique geológico en la traza de la galería.



Figura 5.4.- Agua de repisa.

según los operarios entendidos en la materia), los rendimientos son elevados y, aunque se podrían usar maquinaria de gomas, es conveniente, ir instalando desde el principio raíles, ya que, cuando se alcance la zona saturada, la maquinaria de gomas resbalaría y haría más dificultosa la ejecución de los trabajos, retrasando los mismos.

Al cabo de unos cientos de metros, la traza de la mina penetra en el acuífero, la denominada zona saturada. Este cambio no es inmediato, sino gradual, comenzando por la aparición de unas humedades en la base de la traza de la mina. Posteriormente, asciende por los laterales, —la denominada agua de repisa— en el argot minero insular, hasta finalizar por los hastiales.

El agua puede aparecer de golpe, tras la ruptura de un dique de cierta magnitud(1-5 m), por lo que es necesario, siempre, proceder a la perforación con extrema cautela al llegar a un dique. Normalmente el agua alumbrada en los frentes de galería suele hacerlo a través de los barrenos perforados para llevar a cabo la voladura; una vez alumbrada el agua, se puede tener una idea de la magnitud de la columna de agua mediante la instalación de un manómetro.

Las fuentes de agua, pueden aparecer en diversas partes de la sección, por fisuras o grietas, con cierta presión. Incluso puede llegar a caer agua en forma de lluvia de filtración en todo el tramo de la sección, por lo que las condiciones de trabajo, pueden empeorar considerablemente (humedad y temperatura). Este recurso hídrico, que suele ser de reserva (agua más cargada de sales), puede remitir en cantidad, ya que se está drenando la zona del acuífero más antigua, hasta llegar a los caudales estabilizados que vendrían dados



Figura 5.5.- Evacuación de caudales durante la ejecución de la galería.

como un porcentaje de la recarga. Es necesario tener cuidado con estas vías preferenciales de agua, ya que pueden provocar corrimientos y movimientos del material y caídas de prismas basálticos, generando problemas de estabilidad de la sección de la mina o incluso, en la seguridad de los trabajadores.

La mina, debe llevar una pendiente descendiente del 1.5 al 2% en toda su longitud, esto va a favorecer el aprovechamiento del agua, que fluye por gravedad. En la infraestructura de tipo pozo-galería, hay dos opciones, la primera es: que no haga falta bombear el agua, porque se trate de un pozo artesiano —tenemos una diferencia de cota importante con respecto al recurso que drenamos, esta diferencia de cota puede ser gracias a los diques—, o bien, que sea necesario incluir en la instalación un sistema de bombeo, con costes energéticos, que incrementarían el precio total del agua final. Los operarios, para gestionar la pendiente de la galería utilizan tornillos en el arco de la sección con hilos, método rudimentario pero eficaz.

Al alcanzar la zona saturada, o bien, al comenzar a atravesar diques es posible que en la explotación se deba comenzar a trabajar con cantidades importantes de agua. Este líquido puede alcanzar temperaturas de unos 15-20 °C, llegando en algunos casos a superar

los 35 °C, esto provoca un ambiente de trabajo pésimo para los operarios, por lo que, se debe evacuar rápidamente. La evacuación se realiza mediante bombeo o bien por el canal que se ha ido realizando en la zapatera derecha del frente de la mina. Este recurso no es posible utilizarlo para abastecimiento, debido a que tiene restos de explosivos y materiales sueltos, en algunos casos de granulometría muy fina cuya decantación no es posible a corto plazo. Su posible uso en agricultura llevaría un estudio previo ambiental y de calidad, por si hubiera presencia de contaminantes perjudiciales. La solución menos eficiente con respecto estas aguas iniciales es verterlas a un barranco próximo, para lo cual también sería necesario disponer del permiso correspondiente. Las altas temperaturas también son un problema para los operarios, en algunas zonas son muy elevadas; se han dado casos de trabajar con agua a temperaturas cercanas a 50 °C en el frente de la galería, como en el caso de la galería de Lomo Colorado en la isla de Tenerife; de ahí que, algunas veces, se pueda hablar de minería de aguas termales. Otro ejemplo es la galería de La Fuente Santa en la isla de La Palma cuyas aguas están oficialmente declaradas como termales y minero-medicinales, la obra, de compleja ejecución y elevado coste, se encuentra actualmente en proceso administrativo para su explotación como balneario.

5.2 PROBLEMAS GEOTÉCNICOS USUALES EN LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS EN TERRENOS VOLCÁNICOS

5.2.1 Introducción

Los aspectos geotécnicos, son una de las cuestiones más complicadas a la hora de diseñar o ejecutar un proyecto subterráneo en un terreno volcánico.

Los materiales volcánicos son extremadamente heterogéneos, discontinuos y difíciles de predecir a diferencia, en general, de las formaciones continentales no volcánicas, más continuas, predecibles y competentes en general en la mayoría de los casos. La configuración habitual del terreno en ambientes volcánicos insulares consiste en la acumulación de distintas sucesiones de emisiones lávicas producto de erupciones efusivas, en su gran mayoría de carácter fisural, que configuran un paisaje dominado en su mayoría por lavas y depósitos piroclásticos. Dependiendo de la tasa efusiva, de la explosividad de la erupción y de las características reológicas de los materiales emitidos, éstos se pueden distribuir espacialmente de forma más o menos caótica y desordenada, lo que les confiere el carácter heterogéneo mencionado.

Canarias supone un ejemplo mundial a nivel constructivo de estas instalaciones mineras. La ingeniería geológica y geotécnica aplicada a las obras subterráneas, es una disciplina que en los últimos años ha tenido un gran desarrollo en las islas. A la hora de acometer o diseñar una obra subterránea en un medio insular, la singularidad geológica del Ar-

chipiélago Canario, de naturaleza volcánica, su lejanía y su pequeña superficie respecto al territorio continental, hace que, en la mayoría de las ocasiones, no se recojan todos los aspectos referidos a las propiedades del terreno en las instrucciones y códigos que se dictan a escala nacional, quedando ciertas lagunas interpretativas que debe sortear el profesional canario, muchas veces sin éxito.

Como se ha comentado en otras secciones, en Canarias han acontecido la mayoría de los procesos volcánicos que se pueden dar, pudiéndose encontrar un amplio espectro de materiales y estructuras volcánicas. Por este motivo, cualquier estudio o investigación, que en el ámbito de la geotecnia se realice en Canarias, es fácilmente extrapolable a cualquier otra región insular volcánica del mundo.

114

Es evidente que es necesario conocer el comportamiento del terreno por donde van atravesando las perforaciones de las galerías, no obstante esta auscultación, en las obras en terrenos continentales es más exhaustiva y completa que en terrenos volcánicos. Como se ha comentado los terrenos continentales presentan más homogeneidad en los terrenos que atraviesan las perforaciones, cosa que no se cumple en un terreno volcánico, debido a su heterogeneidad. Se puede atravesar en una sola perforación todos los litotipos volcánicos existentes.

Las propiedades morfológicas y litológicas de los terrenos volcánicos de Canarias son muy conocidas por los numerosos estudios geológicos que se han realizado en las islas, que han dado como fruto, una extensa bibliografía y una cartografía geológica de detalle en todo su territorio. Esto contrasta de manera significativa con una literatura muy escasa en lo que se refiere a propiedades geotécnicas.

5.2.2 Soluciones técnicas

La obtención de la información geológica de las obras subterráneas a ejecutar se hace verdaderamente complicada, porque en muchas ocasiones, se tendría que recurrir a sondeos verticales de gran profundidad (más de 500 m). Una solución habitual para la evaluación de agua en la traza del túnel, generalmente en obras hidráulicas subterráneas, es la perforación de un sondeo horizontal. Este sondeo se ejecuta en el frente de la excavación, de unos 50 m de longitud, principalmente para detectar flujos de agua o bien alturas de las láminas de agua sobrelevadas por diques, tras el frente de excavación. Con estas actuaciones se evitan problemas de inundación y se garantiza la seguridad de los operarios e instalaciones.

También se pueden estimar las propiedades del terreno y conocer los materiales geológicos que se van a atravesar consultando bibliografía de trabajos realizados en materiales y obras similares. Respecto a las características geotécnicas del terreno que se va a excavar,

PROBLEMA DE SOSTENIMIENTO DE LA GALERÍA	SOLUCIÓN TÉCNICA
Escorias de colada volcánica	<ul style="list-style-type: none"> • Cercha metálica • Redondos de acero • Piedras a trasdós > 45 cm
Material de cono volcánico	<ul style="list-style-type: none"> • Para avanzar con la perforación es necesario estabilizar el frente mediante lechadas de cemento
Emboquillado de galería en piedemonte	<ul style="list-style-type: none"> • Chapado metálico y perfiles • Hormigón armado tipo dovelas
Piroclastos en cono volcánico	<ul style="list-style-type: none"> • Cercha metálica • Lechada de cemento con bulones • Gunitado • Redondos de acero
Presencia de pumitas, materiales plásticos	<ul style="list-style-type: none"> • Tubería en sifón recubierta del material plástico • Revestido de la perforación mediante dovelas (solución antieconómica)
Materiales de cámara freatomagmática	<ul style="list-style-type: none"> • Forrar perforación con bloques y hormigonar, si se dejan sólo los bloques colapsa por empujes del material plástico
Materiales en lajas	<ul style="list-style-type: none"> • Chapas metálicas • Cerchas
Prismas de retracción	<ul style="list-style-type: none"> • Difícil solución • Determinar los inestables y actuar sobre ellos

Tabla 5.1.- Sistemas de sostenimiento de galerías en función del problema geotécnico.

generalmente el terreno masivo, no presenta problemas de estabilidad. En la parte granular (escorias y piroclastos) se suele producir una sección más redondeada, siendo necesario en ocasiones recurrir a sistemas de sostenimiento (cerchas, gunitado), con la función de armar el terreno en estos tramos.



Figura 5.6.- Máquina para la ejecución de sondeos.



Figura 5.7.- Sección de la Galería de la Fuente Santa.

116

Con estos condicionantes, se puede plantear la construcción del túnel a sección completa, dependiendo de las dimensiones de la perforación u obra subterránea en cuestión, considerándose algunos tramos autoestables. En el caso de aparecer fisuras, y por tanto cuñas inestables, en frentes con roca por efecto de la descompresión tras la excavación, siempre se recomienda una capa de sellado con gunita $e = 5 - 10$ cm y bulones colocados de forma que “cosan” a modo de aguja las fracturas y diaclasas.

En el caso de que alguna de estas premisas no se cumplan podemos recurrir a los diferentes tipos de sostenimiento disponibles para este tipo de infraestructuras. En el caso continental, en general, los sostenimientos de los túneles son fundamentales para evitar el colapso de la infraestructura, en el caso volcánico las zonas masivas de las coladas, en general, son auto portantes y como se ha comentado solamente en pocos casos hay que recurrir al revestimiento, salvo en los comentados anteriormente.

Como caso general, los problemas en la ejecución suelen aparecer cuando la perforación comienza a atravesar materiales más sueltos, como las escorias, prismas basálticos o piroclastos, que en algunos casos pueden comportarse como un fluido. Por ejemplo; al atravesar conos volcánicos jóvenes, como fue el caso de la perforación de La Fuente Santa, en La Palma (Soler, 2004), anteriormente comentada.

Esto genera problemas de estabilidad, a lo largo de la traza de la mina, que se suele solucionar con diversas técnicas —que elevan el coste de la explotación considerablemente—, como el gunitado, bulonado o bien incluyendo el uso de chapas metálicas (a veces con rocas a trasdós). En este último caso, es necesario ser consciente de que los materiales van cediendo y ejercen una presión sobre las planchas que hace que se estrechen las secciones.



Figura 5.8.- Inyectado en la traza de la galería.

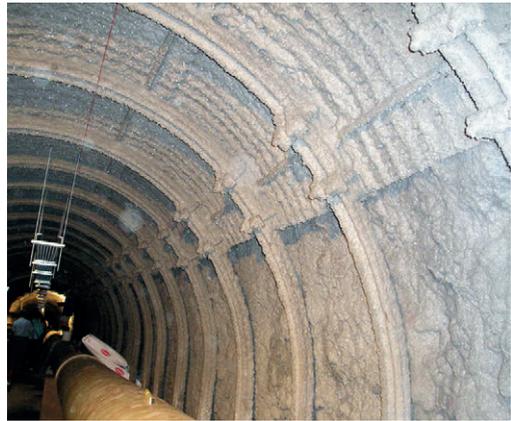


Figura 5.9.- Gunitado en la sección de la mina.

117



Figura 5.10.- Refuerzo de la sección de la galería mediante bloques.

Esta incidencia es habitual, en el Valle de la Orotava (Tenerife) en Canarias, se incrementa también por el efecto de los depósitos de avalancha en dicha zona.

También, existen problemas importantes al atravesar materiales plásticos, tipo pumitas, que al tomar contacto con el agua pueden funcionar como arcillas expansivas creando serios problemas a la estabilidad de la perforación. Este caso significativo ocurrió en la infraestructura denominada Trasvasur, una galería de trasvase en la isla de Gran Canaria, en el cual la mina atravesaba formaciones de pumitas que iban abombando la galería.



118

Figura 5.11.- Traza de una galería en la zona de depósitos de avalancha (Cortesía de Rafael Fenoll).

Figura 5.12.- Sección colapsada en la traza de la galería.

Otro elemento geológico que condiciona la perforación y, que hay que tener en cuenta, son los deslizamientos históricos en la zona de la construcción de la galería. Estos deslizamientos, generan una línea de rotura donde se concentran materiales sueltos como rocas, bolos, con una matriz que, al acabar el deslizamiento y con el paso del tiempo, forman una capa impermeable que algunos autores denominan mortalón o bien fanglomerado. Este mortalón o debris avalanche tiene unas consecuencias hidrogeológicas importantes, la primera es que reorganiza la distribución del acuífero. Crea una capa impermeable, y a nivel de ejecución de las minas, al alcanzarse esta capa, la sección se vuelve muy inestable y es muy compleja su ejecución. Cuando se alcanza esta formación se suele abandonar la explotación si no es productiva.

En el caso de utilizar revestimientos en el túnel se deben controlar los siguientes parámetros técnicos:

1. Presión ejercida por el terreno sobre el revestimiento.
2. Tensión en el revestimiento.
3. Deformaciones del revestimiento.
4. Desplazamiento de las juntas.
5. Presiones intersticiales en el terreno.

CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO	SOSTENIMIENTO		
	COMPONENTES		
	HORMIGÓN	BULONES	CERCHAS
<p>Compacto de masivo de lava o con alguna intercalación ocasional de escorias y piroclastos, de reducido espesor.</p> <p>RMR > 70 y Q > 13 macizo rocoso de "buena calidad"</p>	<p>Proyectado con fibra* e= 10 cm</p>	<p>Tipo swellex de 10 tn y 4 m 1,51 x 2,0 m t</p>	---
<p>Compacto de masivo de lava con alguna intercalación de escorias o piroclastos de espesor métrico, pero que no afecta a la clave ni a la solera.</p> <p>RMR entre 60 a 70 y Q entre 5 a 13 macizo rocoso de "mediana calidad"</p>	<p>Proyectado con fibra* e= 15 cm</p>	<p>Tipo swellex de 10 tn y 4 m 1,01 x 2,0 m t</p>	---
<p>El mismo macizo rocoso pero con la intercalación métrica de escorias o piroclastos situada a nivel de la clave; o bien, siempre que se observen condiciones de bloques delimitados por planos de discontinuidad, en bóvedas u hombreras.</p>	<p>Proyectado con fibra* e= 20 cm</p>	<p>Tipo swellex de 10 tn y 4 m 1,01 x 2,0 m t</p>	1 th-29 / 1,0 m con tresillones
<p>El mismo macizo rocoso pero con la intercalación métrica de escorias o piroclastos situada a nivel de la solera</p>	<p>Proyectado con fibra* e= 15 cm</p>	<p>Tipo swellex de 10 tn y 4 m 1,01 x 2,0 m t</p>	---
<p>Depósitos masivos de escorias y piroclastos o con alguna intercalación ocasional de compacto de masivo de lava</p> <p>RMR ≈ 60 y Q ≈ 5 macizo rocoso de "mediana calidad"</p>	<p>Proyectado con fibra* e= 20 cm</p>	<p>Tipo swellex de 10 tn y 4 m 1,01 x 2,0 m t</p>	1 heb-160 / 1,0 m con tresillones
Q: Índice Q de Barton			
*En el hormigón proyectado, la proporción recomendable de fibra es de 45 kg/m ³ .			

Tabla 5.2.- Sistemas de sostenimiento de galerías en función de la clasificación del macizo rocoso.

GRUPO	DESCRIPCIÓN	
T-1	Terrenos favorables: Aquellos con poca variabilidad, y en los que la práctica habitual en la zona es de cimentación directa mediante elementos aislados.	
T-2	Terrenos intermedios: Los que presentan variabilidad, o que en la zona no siempre se recurre a la misma solución de cimentación, o en los que se puede suponer que tienen rellenos antrópicos de cierta relevancia, aunque probablemente no superen los 3,0 m.	
T-3	Terrenos desfavorables: Los que no pueden clasificarse en ninguno de los tipos anteriores. De forma especial se considerarán en este grupo los siguientes terrenos:	
	<ul style="list-style-type: none"> • Suelos expansivos • Suelos colapsables • Suelos blandos o sueltos • Terrenos kársticos en yesos o calizas • Terrenos variables en cuanto a composición y estado • Rellenos antrópicos con espesores superiores a 3 m 	<ul style="list-style-type: none"> • Terrenos en zonas susceptibles de sufrir deslizamientos • Rocas volcánicas en coladas delgadas o con cavidades • Terrenos con desnivel superior a 15° • Suelos residuales • Terrenos de marismas

Tabla 5.3.- Grupos de terreno según el CTE.

5.2.3 Clasificación geotécnica de los materiales volcánicos encontrados en la traza de la mina.

Dado que en las Islas Canarias, tanto la litología como la edad de las formaciones rocosas condicionan de manera directa o indirecta el comportamiento geotécnico de los materiales que pueden ir apareciendo en la explotación, se ha procedido a dividir las diferentes superficies territoriales de cada una de las siete islas, en base a la combinación de dichos



Figura 5.13.- Depósitos coluviales en la traza de la galería.

criterios litológicos y geocronológicos, en diez unidades geotécnicas. Estas presentan, en su conjunto, una homogeneidad suficiente para su delimitación cartográfica, para su asimilación a los grupos de terrenos contemplados en el CTE.

A. Tipos de materiales

Siguiendo la metodología de Hernández-Gutiérrez (2015), a partir del amplio espectro de materiales volcánicos presentes en las Islas Canarias, se pueden definir dos grandes grupos en base a la existencia o no de una muy importante componente cohesiva de su resistencia.

- Materiales masivos o compactos. Este grupo incluye las coladas lávicas de todos los tipos y composiciones descritos y las ignimbritas con todas las variedades texturales posibles.
- Materiales fragmentarios o sueltos. Incluye los depósitos plinianos (“ash fall” o lluvia piroclástica) y los conos de cinder.

UNIDAD	SUBUNIDAD	TERRENO CTE
Unidad I: Complejos basales		T3
Unidad II: Coladas y macizos sálicos		T1
Unidad III: Macizos basálticos alterados		T3
Unidad IV: Coladas basálticas sanas	IVa: Coladas "aa" poco escoriáceas	T1
	IVb: Coladas "pahoehoe" y "aa" muy escoriáceas	T3
Unidad V: Materiales piroclásticos	Va: Ignimbritas y tobas	T2
	Vb: Depósitos piroclásticos sueltos o débilmente cementados	T3
Unidad VI: Materiales brechoides		T2
Unidad VII: Depósitos aluviales y coluviales		T3
Unidad VIII: Suelos arenosos		T3
Unidad IX: Suelos arcillosos y/o limosos		T3
Unidad X: Rellenos antrópicos		T3

Tabla 5.4.- Relación de las unidades geotécnicas de los terrenos volcánicos con respecto al CTE (Hernández-Gutiérrez, 2015).

Por lo tanto se diferencian hasta diez tipos distintos de rocas o de grupos de rocas volcánicas (litotipos), que presentan propiedades geotécnicas particulares similares. Hernández-Gutiérrez (2015), propone una clasificación simplificada de las rocas volcánicas canarias, en diez litotipos diferentes, con objeto de facilitar a los profesionales de la ingeniería y de la arquitectura, con conocimientos limitados de geología y de geotecnia, un medio para asignar un nombre a una roca y encuadrarla dentro de un grupo con propie-

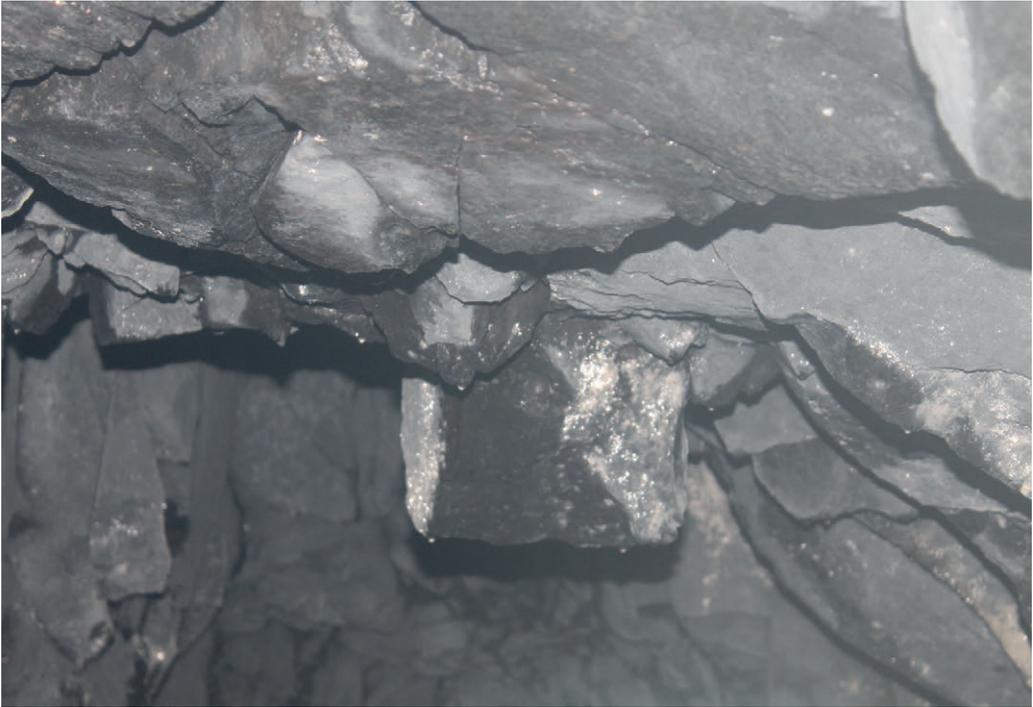


Figura 5.14.- Problema de caída de prismas basálticos en la sección de la galería.

dades geotécnicas similares. Para el caso de estudio de las galerías son interesantes los 6 primeros, dado que son los que nos vamos a encontrar en la traza de la galería en la mayoría de las ocasiones. Esto puede facilitar notablemente la adopción de soluciones técnicas para los problemas geotécnicos encontrados en las secciones de las galerías. También puede ajustar más las cantidades de explosivos necesarias para la perforación de la mina y, por último, la caracterización de la porosidad y parámetros relacionados con la permeabilidad de las rocas, pueden mejorar el conocimiento del funcionamiento de los acuíferos atravesados.

5.3 INNOVACIONES CONSTRUCTIVAS: REGULACIÓN DE CAUDALES MEDIANTE LA RECONSTRUCCIÓN DE DIQUES GEOLÓGICOS Y SISTEMAS CONSTRUCTIVOS MEDIANTE SONDEOS DIRIGIDOS

5.3.1 Regulación de caudales mediante la reconstrucción de diques geológicos.

El mayor problema que presentan las minas de agua es la poca capacidad de regulación que tienen. Una vez alcanzada por la perforación, la zona productiva o saturada, el caudal sale sin control o regulación alguna. La galería ha atravesado una serie de diques —en mayor número, conforme se avanza hacia las dorsales—. Estos caudales, inicialmente



Figura 5.15.- Sondeos verticales en la traza de la galería de Ipalán en La Gomera.

son muy elevados, aunque se van estabilizando con el tiempo. Por ejemplo, en la galería de Ipalán en la isla de La Gomera comenzó a drenar caudales rondando los 80 L/s y actualmente se obtienen del orden de 5 a 10 L/s, aunque se confía en obtener mayor rendimiento de la mina, con la construcción de numerosos sondeos verticales a lo largo de la traza para llegar a un caudal razonable, en relación al coste de la explotación. Esta solución es técnicamente contraria al concepto de excavación de una galería, que persigue el alumbramiento de agua sin coste de bombeo alguno.

Con el paso de los años y descenso del nivel del acuífero alumbrado tras un dique, se suele seguir reprofundizando la galería en lugar de perforar sondeos verticales ya que, en la inmensa mayoría de los casos, la ubicación de las galerías hace imposible y antieconómica su electrificación. En muy contadas ocasiones se encuentran sondeos verticales en el interior de las galerías de agua, en cualquier caso, la perforación de sondeos verticales en el interior de una galería sin que esta haya llegado a ser productiva en su frente podría considerarse como no deseable.

En las islas, por las lluvias, hay épocas del año que no es necesario tanta extracción de agua, por lo que se desequilibra la oferta con la demanda, por este motivo, se comenzó

con la ingeniería de diques mediante la ejecución de cierres de hormigón armado en las propias minas, utilizando para ello los diques geológicos con unas ciertas características de impermeabilidad y geométricas. Lo que se busca con esta técnica, es almacenar el agua en el propio macizo y regular el aprovechamiento.

El primer ingeniero que tuvo la idea de realizar estos cierres en España fue el Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos, Clemente Sáenz García, Catedrático de Geología de la Universidad Politécnica de Madrid de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos Canales y Puertos, aplicándolos en un acuífero en Soria, en la conexión de dos formaciones diferentes. Era básicamente un contacto hidroestratigráfico de distinta permeabilidad: margas-calizas. El Doctor Ingeniero Sainz de Oiza (responsable técnico del SPA15), también los nombró para el caso Canario. Telesforo Bravo valoró esta opción en las galerías de la Caldera de Taburiente en la isla de La Palma. Este sistema ha sido profusamente utilizados en otras zonas del mundo como por ejemplo; Perú, utilizando una falla como dique, en islas de Japón, incluso, en islas más cercanas, como Sicilia. En Canarias este método, se ha aplicado con éxito en el Pozo de Los Padrones en la isla de El Hierro (Tenerife) (Soler, 2004), reconstruyendo tres diques volcánicos usándolos posteriormente como pequeños embalses subterráneos y regulando la explotación a demanda. Existe otra experiencia de éxito en la isla de La Palma (Tenerife). Esta innovación es muy interesante y ha sido un gran avance para la gestión y optimización de las minas del agua, ya que, permite compartimentar el acuífero e ir drenando aguas de recarga a demanda, contribuyendo a la sostenibilidad de la explotación además como otra ventaja, se tiene que el agua está almacenada dentro del macizo, por lo que se evitan problemas sanitarios.

A. Planteamiento del problema

La perforación subterránea, una vez que penetra en la zona saturada, va drenando inicialmente las aguas de reserva, con una salinidad mayor dado su mayor tiempo de residencia en el acuífero. Posteriormente, los caudales se estabilizan, entonces es cuando se encauzan mediante una tubería o canal. La longitud de la perforación, como media, en las islas occidentales son entre 1.500 y 3.500 m, si bien actualmente en el Hierro las longitudes son sensiblemente menores. La isla de Tenerife dispone de algunas galerías de más de 7.000 m de longitud.

El problema que se plantea es el siguiente: una vez perforados los diques que almacenan el agua subterránea, no es posible regular los caudales alumbrados, dado que salen en continuo. El mercado del agua subterránea, en diferentes épocas del año no pueden asumir toda la oferta de agua captada. La única posibilidad es reconstruir los diques mediante hormigón armado y regular los caudales mediante una serie de conducciones.



Figura 5.16.- Piezómetro en la traza de la galería.

B. Construcción

La primera acción a tomar en la ejecución de los cierres, es seleccionar los diques a cerrar o reconstruir. Estos se van numerando, conforme se van atravesando en la perforación. En ese momento, se puede hacer una selección inicial de los diques viables para su reconstrucción, atendiendo a: anchura, calidad del material constituyente (ausencia de fisuras por la aplicación de explosivos), así como, la localización del dique dentro del acuífero. Hay que tener en cuenta que al aplicar explosivo en la perforación de la galería, la propagación de la onda expansiva del explosivo ha podido dañar y fisurar más volumen del dique, no sólo en la sección observable, si no en más extensión de la formación geológica. Es por esto, que tener precaución con las posibles filtraciones.

Una vez seleccionados los diques, y, habiendo diseñado el esquema de funcionamiento de la explotación, se excava un sobre ancho en la sección de un metro. Posteriormente, se incluye el armado y los bulones, que constituyen el esqueleto de esta estructura artificial solidaria con la formación natural del basalto del propio dique geológico, incluyendo inyecciones de cemento. El montaje del armado, debe dejar paso a las conducciones de



Figura 5.17.- Cierre de hormigón en la galería de Iplán, en la Gomera.



Figura 5.18.- Cierre en la galería de Los Padrones en El Hierro.

fundición que serán las encargadas de drenar y regular el agua de una zona a otra y extraerla de la mina. También hay que dejar paso al tubo de ventilación para continuar con la perforación de la explotación.

Se pueden reconstruir varios diques en una sola explotación. El número de construcciones se establece en la capacidad de recarga del acuífero, características geológicas de la zona de influencia y de las estructuras geológicas (diques) que estén disponibles. La instalación de manómetros, para medir la presión ejercida por el agua en las diferentes estancias, es fundamental para gestionar el recurso, dado que nos suministra información de las diferentes cotas de agua, tras el dique reconstruido, así como la capacidad de recuperación tras su drenaje.

El sellado del dique se comienza una vez finalizado el armado. Se procede al hormigonado mediante bomba. La experiencia y los proyectos realizados (Soler, 2014), teniendo en cuenta en ambiente en el que se va a quedar la estructura, indican que con un HA-30 es suficiente. Para la compuerta de acceso a través del dique reconstruido, se deben dejar dimensiones suficientes para la explotación de la galería. Hay que tener muy en cuenta, rematar bien el sellado del dique para evitar la posibilidad de aparición de grietas, ya que podría arruinar la explotación por filtraciones. La zona más conflictiva, en este sentido, es la citada compuerta, por lo que conviene incluir unos neoprenos y comprobar la estanqueidad de la instalación, así como, asegurar que el fabricante de la puerta, certifique técnicamente que la estructura aguante presiones de unos 70-100 mca (metros de columna de agua).

Otra ventaja en este tipo de explotación, es el almacenamiento del agua en el propio acuífero por lo que está al margen de cualquier tipo de contaminación y a disposición de las demandas de recurso hídrico que se necesite. La puerta del cierre, como se ha comentado, debe soportar las elevadas presiones que ejerce el agua a trasdós. En casos que han sido estudiados, se han llegado a alcanzar 72 mca, como es el caso de la galería de los Padrones en la isla de El Hierro. Esta compuerta es de acero y hecha a medida, aunque en la última galería donde se ha incluido esta infraestructura, en La Gomera, la puerta se ha realizado mediante perfiles IPE y placas metálicas, debido a que el tamaño de la sección era es de grandes dimensiones.

CAPÍTULO 6. Explosivos

Juan Carlos Santamarta Cerezal

6.1 LOS EXPLOSIVOS

Un explosivo es una sustancia que se oxida casi instantáneamente, liberando una gran cantidad de energía. Casi todos los explosivos contienen compuestos de nitrógeno. El poder calorífico de los explosivos es inferior al del carbón, y muchos de ellos arden sin riesgos. Los explosivos industriales no explotan por sí mismos sino que requieren iniciadores/detonadores. Los explosivos se definen por la potencia, densidad, velocidad de detonación (en m/s), calor de explosión, humos....

En las galerías, se prohíbe el empleo de explosivos, detonadores y artificios de toda clase, necesarios para provocar la explosión, que no hayan sido homologados. En dicha homologación constará el ámbito de su uso.

En relación al uso de explosivos sólo estarán capacitados para el manejo y uso de explosivos las personas especialmente designadas por la Dirección Facultativa. Estos operarios deberán superar un examen de aptitud ante la autoridad competente.

6.2 LA PERFORACIÓN POR EXPLOSIVOS

Debido a las características y dureza de algunos materiales volcánicos que se atraviesan al ejecutar la mina, se hace necesario utilizar los explosivos como sistema de avance. El uso de explosivos depende del tipo de terreno que se vaya a atravesar, en el caso de los terrenos volcánicos, se han descrito los diferentes materiales que conforman las islas, donde destaca, por su dureza las coladas de basalto. Por lo tanto, si la roca a excavar posee una resistencia alta, es aconsejable su excavación mediante perforación y voladura. En el caso de los terrenos volcánicos, al ser terrenos muy heterogéneos, es normal que los avances tras la pega sean muy irregulares.

Un elemento fundamental para la seguridad de los operarios, en la ejecución de la mina de agua, debido a la presencia de gases volcánicos y los gases de explosión de la perforación, es la ventilación de la explotación. En los terrenos volcánicos se da el fenómeno de ventilación por difusión natural, que permite la eliminación de los gases a través de las corrientes de aire que atraviesan los materiales más porosos. Este fenómeno no es inmediato, por lo que es necesario un período de espera considerable entre voladuras, a veces de dos o tres días. La alternativa, o en casos en los que el terreno no permite la ventilación



Figura 6.1.- Detonadores para uso en galerías de agua.

natural por difusión, es instalar sistemas de ventilación forzada similares a los usados en las minas del Norte de España, mediante el uso de ventiladores radiales con sistemas de inversión y tubería rígida, que permite tanto un esquema soplante como aspirante. El uso de ventiladores axiales y tubería flexible sólo es utilizable durante el avance para pequeñas longitudes, nunca como instalación permanente, ya que su rendimiento y problemas de mantenimiento (roturas, fugas, defectos de acoplamiento etc.), así como la imposibilidad de ser usados en régimen aspirante o en largas longitudes los hacen prácticamente inútiles en las galerías tradicionales.

Cuando se comenzaron a usarse los explosivos, como método de perforación, tenían la ventaja de un avance más rápido, pero también más peligroso. La excavación de una galería de agua, profunda, requiere gran cantidad de voladuras lo que unido a las angostas dimensiones del lugar (1,5 por 1,8 m) vuelve el trabajo minero muy difícil e inseguro. La perforación de galerías se puede considerar de primera categoría, y se establece, basándose en esta clasificación, el tipo y características de los explosivos a emplear y el plan de voladura. En el Artículo 24 del Capítulo IV del “Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera” se indican las condiciones que debe cumplir una labor subterránea para



Figura 6.2.- Frente tras la pega de explosivos.



Figura 6.3.- Caja fuerte para el almacenaje de los explosivos.

su clasificación dentro de cada una de las cuatro categorías existentes. En un terreno volcánico, es obvio, que a priori, no sea previsible que en estas perforaciones aparezcan indicios de grisú ni de otros gases inflamables.

6.3 ESQUEMA DE TRABAJO

Después de determinar el explosivo a usar, el tipo de equipamiento a emplear y las características de la roca, se pueden usar diversos métodos para el cálculo de la posición de los barrenos que van a ocupar en la sección de ese mismo túnel.

El esquema de la perforación sería, de una manera simplificada, como sigue, distinguiendo tres zonas en la sección de la voladura:

- Centro del frente, con el fin de crear un hueco justo en el medio (cuele y contra cuele).
- Arco superior, para desprender la roca y que caiga hacia la parte central del frente (contorno y destroza).
- Cargas de base, para separar los escombros de la pared y facilitar la carga posterior de las vagonetas (zapateras).

Para la voladura, la sección teórica del túnel se divide en zonas, en las que las exigencias, tanto de densidad de perforación, como de carga específica de explosivo y secuencia de encendido son distintas. Estas zonas son:

- Cuele.
- Contra cuele.
- Destroza.

- Zapateras.
- Contorno.

El ciclo de trabajo se divide en los siguientes apartados:

1. Replanteo en el frente del esquema de tiro.
 - a. El replanteo de los taladros en el frente se realiza de la siguiente manera:
 - Eje de replanteo, con láser.
 - Materialmente, con pintura.
 - Informáticamente, en jumbos mecanizados, en función de las dimensiones de la galería.
2. Perforación de los barrenos.
3. Carga de los taladros con explosivo de los barrenos.
4. Conexión de los detonadores.
5. Evacuación de personal.
6. Señalización.
7. Voladura y ventilación.
8. Verificación de posibles fallos de los explosivos.
9. Retirada del escombros y saneo del frente de la galería.
10. Preparación de una nueva voladura.

Para optimizar estas operaciones se intenta mejorar el proceso, mediante los recursos disponibles. La optimización pasa por el control y reducción de los tiempos de ejecución que implican las operaciones del ciclo de trabajo.

El empleo de explosivos siempre se realizará de acuerdo con lo establecido en el Capítulo X, del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera. De los diferentes esquemas de voladuras que habitualmente se emplean en los frentes de obras subterráneas, se suele optar por el de barrenos paralelos, puesto que con la maquinaria adecuada, se obtienen avances y rendimientos aceptables. Se usa como explosivo básico la dinamita gelatinosa, debido a su alta potencia y buena resistencia al agua. Si las cantidades de agua son considerables, es posible recurrir a tipología de explosivos como los hidrogeles o emulsiones. Los detonadores utilizados, cada vez en mayor desuso, son los eléctricos.

Dado que la roca volcánica, en muchas situaciones presenta demasiadas fisuras y grietas, por ejemplo, en las escorias de la colada, los rendimientos en los explosivos utilizados en el frente de la mina son inferiores que en un terreno homogéneo, como se puede encontrar en un terreno continental, no volcánico. Esta situación unida a lo comentado anteriormente, hace que los avances, sean menores y muchas veces, haya que repasar manualmente las secciones del contorno y las zapateras, con equipos de aire comprimido.

CAPÍTULO 7. Seguridad en las Explotaciones

Juan Carlos Santamarta Cerezal | Rafael Lario Báscones

7.1 SEGURIDAD

El principal problema al que se enfrenta la actividad minera en el interior de las instalaciones hidráulicas subterráneas en Canarias es el de la seguridad, que está condicionada por tres factores principalmente:

- La atmósfera potencialmente tóxica, con presencia importante de CO₂ en algunas instalaciones.
- La ausencia de comunicación con el exterior.
- Estabilidad de las excavaciones.

Para limitar los riesgos relacionados con la toxicidad de la atmósfera y la estabilidad de las excavaciones es necesario que las obras que cuenten con sistemas de ventilación y que estén correctamente mantenidas en cuanto a estabilidad. Afortunadamente, tales instalaciones existen, cuentan con personal técnico cualificado y se llevan a cabo en ellas inspecciones y controles oficiales. Es imprescindible contar con la colaboración de los órganos gubernamentales inspectores en materia de Seguridad Minera para que certifiquen si una determinada instalación es segura o no y por tanto apta para la actividad minera. Asimismo es imprescindible la supervisión de los protocolos de seguridad de las personas que entren en estas instalaciones. La ausencia de comunicaciones es el punto más problemático.

7.2 ACCESO

Otro problema práctico es la dificultad de acceso a muchas de las obras, principalmente las galerías. La inmensa mayoría están situadas en zonas abruptas de la isla a las que sólo se puede acceder en vehículos 4x4 o tras una larga caminata a pie. La adaptación de los caminos de acceso es muy difícil en los casos en los que la obra se encuentre en un Espacio Natural Protegido, en donde no está permitido realizar nuevos caminos.

7.3 REGLAMENTO DE SEGURIDAD

“El presente reglamento básico establece las reglas generales mínimas de seguridad a que se sujetarán las explotaciones de minas, canteras, salinas marítimas, aguas



Figura 7.1.- Tubería flexible de ventilación.

subterráneas, recursos geotérmicos, depósitos subterráneos naturales o artificiales, sondeos, excavaciones a cielo abierto o subterráneas, siempre que en cualquiera de los trabajos citados se requiera la aplicación de técnica minera o el uso de explosivos, y los establecimientos de beneficios de recursos geológicos en general, en los que se apliquen técnicas mineras.”

Así reza el artículo primero del vigente Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera (RGNBSM), aprobado por el Real Decreto 863/1985, de 2 de abril. Tal y como se puede comprobar, las explotaciones de aguas subterráneas, siempre que en los trabajos asociados a ellas se requiera la aplicación de técnica minera está sujetos a la normativa de seguridad minera. Ahora bien, ¿qué se entiende por técnica minera?, no hay definición de técnica minera en la legislación estatal salvo la que se ofrece en el Reglamento General para el Régimen de la Minería de 1978 y que, estrictamente hablando sólo se aplicaría al ámbito de aplicación de la Ley de Minas de 1974 cuando los trabajos tienen la finalidad de investigación y aprovechamiento de recursos minerales (art. 1.4 del Reglamento).

Dicha definición engloba los siguientes casos:

- Todos los que se ejecuten mediante labores subterráneas, cualquiera que sea su importancia.
- Los que requieran el uso de explosivos, aunque sean labores superficiales.
- Los que realizándose a roza abierta y sin empleo de explosivos requieran formación de cortas, tajos o bancos de más de tres metros de altura.
- Los que, hallándose o no comprendidos en los casos anteriores, requieran el empleo de cualquier clase de maquinaria para investigación, extracción, preparación para concentración, depuración o clasificación.
- Todos los que se realicen en las salinas marítimas y lacustres, y en relación con aguas minerales, termales y recursos geotérmicos”.

Así pues, nos encontramos con una definición amplísima (uso de cualquier maquinaria, obras subterráneas de cualquier importancia) y al mismo tiempo restringida al ámbito de aplicación de la Ley de Minas. Las posteriores transposiciones de Directivas Europeas en materia de Prevención de Riesgos Laborales no han contribuido a clarificar esta cuestión ya que siempre se han referido a industrias extractivas en general. El término “técnica minera” sigue en el limbo legal.

Estamos, por tanto, frente a una posible incongruencia o, mejor dicho, inconsistencia normativa ya que en el artículo primero del RGNBSM se habla de explotaciones de aguas subterráneas (en general, no restringidas al caso de las minerales y termales) en las que se aplique técnica minera, pero sin embargo, la definición legal de técnica minera se aplica dentro del ámbito de aplicación de la Ley de Minas, que en materia de aguas sólo afecta, en cuanto a investigación y explotación, a las aguas minerales y termales.

Por si ello fuera poco, la Instrucción Técnica Complementaria ITC 06.0.07 “Seguridad en la prospección y explotación de aguas subterránea”, indica expresamente que la seguridad de los trabajos y de la maquinaria empleada en cualquier prospección o aprovechamiento de las aguas subterráneas debe ser supervisada por la Autoridad Minera competente, con aprobación previa del correspondiente proyecto.

El motivo de esta introducción no es otro que intentar enmarcar la problemática que en materia de seguridad plantean las explotaciones de aguas subterráneas de las islas Canarias.

7.4 SINGULARIDADES EN CUANTO A SEGURIDAD

7.4.1 Coyunturales

Antes de entrar en mayores detalles técnicos es importante llamar la atención sobre la influencia que el régimen de explotación de las aguas subterráneas en Canarias tiene sobre la aplicación a las mismas del RGNBSM. Por decirlo de forma simple y resumida: el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera está mayoritariamente redactado suponiendo que la explotación de un determinado recurso equivale a la presencia permanente de personal en las labores. La explotación de las aguas subterráneas no encaja en esa idea. Si bien es cierto que el Reglamento, tal y como se ha comentado, indica expresamente que engloba este tipo de obras, no sólo durante la prospección sino durante la explotación, lo cierto es que muchas de las prescripciones en él contenidas son de muy difícil, por no decir imposible aplicación.

Para empezar, la temporalidad de los trabajos hace inviable que una comunidad de aguas mantenga personal propio para el mantenimiento de las obras, salvo una comunidad de aguas en la isla de Tenerife, el resto (cientos de ellas), subcontratan los trabajos a cuadrillas especializadas. ¿Y qué trabajos son esos?, mayoritariamente corresponden a mantenimiento correctivo ya que el mantenimiento predictivo brilla por su ausencia: labores de limpieza de los canales que transcurren por las galerías, de restauración del entibado en las zonas problemáticas, de saneo de techo y hastiales de los que se han desprendido rocas que han roto o atascado el canal así como los de reparación del sistema de aire comprimido y, en caso de estar instalado, del de ventilación forzada; en definitiva, obras principalmente destinadas a garantizar que el agua siga fluyendo. En los pozos, por analogía, los trabajos tienen que ver con el mantenimiento del sistema de bombeo.

Históricamente se ha implantado un paradigma en el mundo de la explotación de aguas subterráneas canarias según el cual sólo es necesaria la intervención de la Autoridad Minera y, por tanto de los técnicos, durante las obras de avance y perforación, obviando que la limpieza de un canal en una galería a 3.000 m de la bocamina, en una obra lineal en fondo de saco, o la sustitución de una bomba en un pozo a 200 m de profundidad desde una cuba descolgada mediante un cable de acero son trabajos muy peligrosos que deben realizarse con una serie de garantías técnicas y legales muy estrictas. Se puede afirmar que las comunidades de aguas han tendido a descargar la responsabilidad de la seguridad de sus instalaciones en el Director Facultativo y en el contratista durante las fases de excavación y, en muchos casos han prescindido del primero a la hora de efectuar “pequeños” trabajos de mantenimiento en el interior. El problema principal reside en que, una vez terminados esos trabajos no ha quedado nadie responsable al cargo de la seguridad de las instalaciones, produciéndose situaciones de alto riesgo al dejar desatendidos los sistemas que impiden el acceso al interior de las mismas.

Como se puede apreciar, otro de los condicionantes principales lo constituye la economía, el régimen comunitario de explotación de estas obras implica un enorme esfuerzo económico por parte de muchos particulares, algunos con escasos recursos económicos, que mes tras mes abonan sus cuotas a la espera que, por fin, se encuentre agua, cosa que muy bien puede no ocurrir en años de excavación, y en algunos casos, nunca, por añadidura el coste del explosivo en Canarias, aunque cueste crearlo es de media diez veces superior al de la Península, lo que influye en el hecho de que avanzar un sólo metro de galería con una sección de 2x2 m roce los 2.200 €; en el caso de los pozos, además, los costes de elevación son bastante elevados. Ello implica que se tienda a ahorrar en mantenimiento predictivo y en seguridad.

Así pues nos encontramos con dos cuestiones coyunturales principales que influyen sobre la seguridad de estas instalaciones:

- Falta de cultura de prevención de riesgos laborales en las comunidades de aguas.
- Temporalidad de los trabajos.
- Ausencia de personal durante la fase de explotación.
- Ahorro en seguridad y mantenimiento preventivo.

7.4.2 Técnicas

A. Excavación – Construcción

Nos vamos a centrar en este apartado en el caso de las galerías de agua ya que son las únicas obras que en las que se siguen realizando trabajos de avance. Desde hace más de una década no se realiza ninguna reperforación de pozos a sección completa habiendo sido sustituido este tipo de trabajos, y en muy contadas ocasiones, por la perforación de sondeos verticales en el fondo. Los costes de bombeo y la salinización de los acuíferos costeros, donde mayoritariamente se encuentran situados los pozos, han ocasionado que se abandonen muchos de ellos.

De igual forma no se han emboquillado nuevas galerías desde principios de los años 90, salvo dos casos comentados (Gomera y Hierro), llevándose desde entonces a cabo únicamente trabajos de avance, bien a sección completa, bien mediante sondeos horizontales debido al elevado precio del explosivo.

El trabajo de avance con explosivos es muy rudimentario, la perforación, a sección de diámetro 2 m, se realiza mediante martillo con empujador neumático, el explosivo utilizado ha sido siempre gelatinoso debido no sólo a las condiciones de humedad sino a las características geomecánica del basalto, la carga del material volado se lleva a cabo



Figura 7.2.- Archetado de la sección de una galería.

mediante una mini pala neumática que bascula hacia atrás sobre las vagonetas, artesanales y fabricadas a medida para las dimensiones de las galerías y el transporte se realiza mediante una pequeña locomotora diésel, también de fabricación local. Ocasionalmente es necesario entibar (archetar, en argot minero canario) algunas zonas, mediante perfiles metálicos unidos por tresillones con colocación de chapas intermedias, aunque lo más habitual es que no sea necesario. La mecanización de los trabajos de avance a esta escala y en las localizaciones de las galerías es muy difícil debido principalmente a la heterogeneidad del terreno y a la ausencia de electrificación.

Se trabaja habitualmente a un turno, por motivos que serán explicados en el epígrafe de ventilación realizándose primero la carga del material volado el día anterior y posteriormente la perforación y voladura. El número de personas que trabajan en estas labores rara vez excede de cuatro: un encargado de la maquinaria exterior (motor diésel, compresor, sistema de ventilación en su caso), un maquinista de locomotora, un picador-barretero y un peón. El explosivo se almacena en mini polvorines en el interior de la galería ya que la escasa cantidad utilizada haría inviable y aún más costoso el reparto diario. A este respecto es necesario indicar que las exigencias de la reglamentación en el suministro y alma-



Figura 7.3.- Convoy de vagonetas y espacio disponible de paso en la sección de la galería.



Figura 7.4.- Comprobación del funcionamiento de la ventilación.

cenamiento de explosivos son una de las principales causas de la subida de los precios del explosivo en Canarias e inciden directamente en la actividad de las obras hidráulicas, en las que es prácticamente la única herramienta posible. La posible prohibición del uso de mini polvorines en el futuro implicaría la desaparición de este tipo de trabajos.

Los mayores condicionantes derivados exclusivamente de este sistema de trabajo tienen que ver directamente con las dimensiones de la excavación, y la dureza del trabajo del picador-artillero (cabuquero, en argot minero canario). Es un trabajo casi artesanal con nula mecanización por motivos de costes, rentabilidad y volumen de trabajo. Las dimensiones de las galerías sólo tienen el gálibo reglamentario en las zonas perforadas desde la entrada en vigor del RGNBSM, siendo muy habitual que los primeros cientos, o incluso miles de metros, las dimensiones sean muy reducidas. A este respecto es necesario hacer una reflexión sobre las implicaciones de los gálibos, que constituye un claro ejemplo de la adecuación de algunas normas al entorno: en una mina de interior con cientos de trabajadores es imprescindible que un convoy de vagones no impida el paso de las cuadrillas en caso de evacuación. Si la vagoneta ocupa la totalidad del ancho de la galería, y el convoy está formado por 15 o 20 vagonetas, resultaría una trampa mortal y un obstáculo insalvable para decenas de mineros. En una galería de agua canaria rara es la ocasión en la que en su interior se encuentren más de dos personas y los convoyes superen las 8 mini vagonetas, por el contrario, el ancho ajustado de la galería, en muchos casos ha impedido vuelques de vagonetas y locomotora.

B. Atmósfera y ventilación

Este es uno de los condicionantes de seguridad más característicos de las obras canarias, no sólo en galerías sino también en pozos. Aquí no estamos hablando de “campos de ex-

plotación” por utilizar la expresión que figura en el RGNBSM, aquí no hay una entrada de aire por una bocamina y una salida de aire por una chimenea. Las galerías y los pozos canarios son todos ellos fondos de saco. El mayor de ellos, por ejemplo, la galería “San José” de Güímar, en Tenerife, de más de 6.500 m de longitud, no cuenta con ventilación forzada, y sin embargo, en el frente de trabajo las condiciones atmosféricas son reglamentarias. Por el contrario, en galerías de una tercera parte de su longitud nos encontramos con zonas en las que la concentración de CO_2 supera muy ampliamente los límites reglamentarios, llegándose a haber medido puntos de surgencia con una concentración del 90%.

Nos encontramos así con dos fenómenos naturales asociados comúnmente a los terrenos volcánicos: la presencia de gases mefíticos, principalmente CO_2 y la existencia de la ventilación por difusión a través del terreno poroso. Otras de las características ambientales que se pueden encontrar en las galerías canarias son una elevada humedad relativa (hasta un 99%) y altas temperaturas.

El fenómeno de la ventilación por difusión se da en la mayoría de las galerías y es función directa de las características del terreno, de las condiciones atmosféricas y de las filtraciones de gases mefíticos que se den en el interior de temperatura provocan un flujo del aire hasta que se equilibran las condiciones del interior con las del exterior.

A lo largo del día, se producen una variación en la temperatura y presión atmosféricas, el máximo de temperatura se da en torno a las 14 horas solares y el mínimo alrededor de las 6 horas. Cuando la temperatura exterior es superior a la del interior de la galería, el aire tiende a salir de ella facilitando el ascenso de los gases mefíticos como el CO_2 . Al contrario, cuando el aire de la galería es más caliente que en el exterior, el aire penetra en el subsuelo bajando la concentración de los gases. Por este motivo, los turnos de trabajo suelen empezar a las 5 de la mañana no siendo habitual que un minero permanezca en el interior de la galería más allá de las 13 h, igualmente, los periodos de invierno-primavera suelen ser los elegidos para trabajar en el interior; de hecho, hay galerías en las que, a pesar de los sistemas de ventilación forzada, es imposible, ni siquiera entrar de inspección en los meses más calurosos.

La exigencia de un sistema de ventilación forzada para los fondos de saco de gran longitud, exigida por el Reglamento, se soluciona mediante una autorización especial de la Autoridad Minera, si se constata la presencia del fenómeno de ventilación por difusión. No obstante, las exigencias al respecto de la seguridad son estrictas en el sentido de que los trabajadores deben portar permanentemente detectores individuales de O_2 y CO_2 así como auto rescatadores con la autonomía suficiente para alcanzar la bocamina.

Además de los gases de origen natural en el entorno volcánico, en las galerías se presentan gases altamente tóxicos de origen antrópico, principalmente los producidos por las

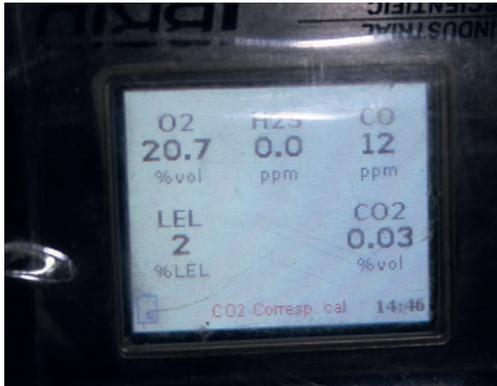


Figura 7.5.- Detector personal de gases dentro de la galería.



Figura 7.6.- Instalaciones de ventilación y de aire comprimido en una galería.

voladuras y por la combustión de la locomotora diésel. Es por este motivo por el que no es posible dar más que una sola pega al día, siendo necesario en algunas ocasiones esperar más de una jornada para la total difusión de los gases.

En aquellas galerías en las que no existe ventilación por difusión o en las que ésta no es suficiente, es necesaria la instalación de sistemas de ventilación forzada, predominantemente aspirante aunque en ocasiones se cuenta con sistemas mecánicos para invertir el flujo de aire. Se utilizan ventiladores centrífugos acoplados a motores diésel y tuberías rígidas de entre 500 y 600 mm de diámetro. Tradicionalmente se han venido usando, de manera no ortodoxa, los sistemas de aire comprimido para aportar oxígeno a la galería antes de empezar a trabajar tras un periodo de inactividad lo que, combinado con la ventilación forzada dota a algunas instalaciones de una suerte de ventilación mixta soplante-aspirante.

C. Electrificación

Tal y como se ha adelantado, la electrificación en las galerías es inexistente, no así en los pozos en los que es imprescindible para el bombeo. La totalidad de la maquinaria utilizada en las labores de la galería es diésel, tanto pequeños grupos electrógenos para iluminación en las casetas y vestuarios como los potentes motores asociados a los compresores y ventiladores. En las galerías canarias se pueden observar auténticas piezas de museo, como por ejemplo enormes motores, como por ejemplo Lister o Blackstone, así como los correspondientes sistemas de transmisión y los compresores. Dada la localización de las galerías, algunas en lugares de muy difícil acceso, uno no puede sino maravillarse del tesón y trabajo de aquellos peones y mecánicos que, a lomos de mulas, transportaban des-



Figura 7.7.- Motor generador de energía para la instalación.

piezada la maquinaria para montarla in situ, y de los albañiles que construían las zapatas o las casetas, por no hablar del transporte regular del combustible, del explosivo, de las vías, del material de sostenimiento etc.

La electrificación de las galerías, dado el régimen estacional de los trabajos, es un lujo que las comunidades de aguas no se pueden permitir y, hoy en día, mucho más debido a motivos medioambientales ya que muchas de las galerías se encuentran en espacios naturales protegidos.

Desde el punto de vista de la seguridad, la ausencia de electrificación tiene un efecto adicional en el uso de equipos de protección, por ejemplo, hoy en día se siguen usando lámparas de carburo de mano para la iluminación individual. Al igual que en la antigua minería del carbón, el minero canario utiliza el carburo no sólo como iluminación sino como indicador del nivel de O_2 u CO_2 en la atmósfera, aunque este sistema es altamente peligroso y sólo detecta anomalías cuando ya se han superado a la baja en el primer caso y a la alta en el segundo, los límites reglamentarios. La ausencia de atmósferas potencialmente explosivas (sólo hay una galería en todo el archipiélago clasificada como de



Figura 7.8.- Lámparas de carburo.

segunda categoría frente al riesgo de explosión) ha ocasionado que, por inercia se haya seguido utilizando este sistema pese a los avances en iluminación personal. Actualmente y gracias a la labor e insistencia de los Directores Facultativos y a las inspecciones y labor divulgativa del Servicio de Minas se están extendiendo el uso de lámparas LED y captadores multigases individuales para cada trabajador.

Tal y como se ha comentado otro efecto de la falta de electrificación en las galerías es la presencia de gases de combustión de las locomotoras, es por este motivo que se preste especial atención al mantenimiento de los filtros y el reglaje de los motores así como a la instalación de elementos reductores de emisión de gases.

Los pozos, mayoritariamente construidos en cotas bajas con las excepciones de los numerosos pozos en Gran Canaria que se encuentran perforados en cotas altas para aprovechar acuíferos de cumbre, cuentan con bombeo electrificado en alta tensión, con modernos sistemas de potencia incluyendo variadores de frecuencia y de mando automático. El mantenimiento y calidad de estos equipos es fundamental ya que la profundidad que alcanzan muchos de ellos, varios cientos de metros, incide en el alto coste del bombeo.

No obstante se pueden observar en muchos pozos los vestigios del pasado en forma de motores diésel abandonados o de antiguos cabrestantes (en Canarias se usa el anglicismo winche, pronunciado “güinche”) para transporte de personal y de carga originalmente acoplados a motores diésel, que han sido adaptados en la actualidad a motores eléctricos.

D. Acceso

El acceso a las galerías de agua en Canarias es siempre del tipo socavón, aunque en el fondo de muchos de los pozos tradicionales canarios se perforan galerías para aumentar el caudal de agua, lo cierto es que su longitud no suele rebasar los 200 m; así la obra hidráulica principal en estos casos sigue siendo el pozo, no las galerías en fondo.

144

Como ya se ha comentado el personal que suele trabajar en el interior de las galerías y pozos es muy escaso y los medios de acceso están adecuados a estas características. En las galerías, el acceso se hace a pie o mediante locomotora y vagonetas, rudimentariamente adaptadas para que vaya acomodado un trabajador en cada una. Las vagonetas se usan principalmente para el transporte del material y del escombros.

En el caso de los pozos tradicionales, el acceso de personal se lleva a cabo mayoritariamente mediante cubas suspendidas de cables de acero (sólo hay dos pozos dotados de jaulas en todo el archipiélago), rozando el límite reglamentario que establece que el acceso de personal en cubas sólo puede ser permitido en caso de obras de perforación y de mantenimiento, es decir, los dos únicos motivos por los que el personal baja a un pozo de agua tradicional canario ya que los trabajos de explotación propiamente dichos son inexistentes ya que la explotación del recurso la constituye el bombeo del agua. El mismo argumento se utiliza para justificar la ausencia de las dos salidas para los “campos de explotación subterráneos” que cita el RGNBSM. Como se puede apreciar, este tipo de obras se autorizan mediante los procedimientos y casos excepcionales previstos en el citado Reglamento.

Mención especial merece el tema de los winches (por utilizar el argot minero canario), los cables y el personal que los maneja. En los pozos tradicionalmente se han venido usando winches con transmisión por banda, con doble freno, manual y mecánico, aparentemente muy rudimentarios pero que resultan muy apropiados a la hora de efectuar maniobras de precisión a la hora de sustituir elementos de la línea de bombeo, en la actualidad, con la entrada en vigor de la normativa europea de seguridad en máquinas, se han dejado de fabricar estos winches siendo los existentes adaptados a las exigencias normativas. Los nuevos winches electrohidráulicos no gozan del aprecio de los trabajadores de los pozos ya que su complejidad mecánica hace que ante un fallo sea imposible accionar el tambor manualmente, cosa que sí es posible en los antiguos, y su mantenimiento y reparaciones



Figura 7.9.- Vista desde el fondo de un pozo canario y sus instalaciones de bombeo de aguas.

son costosos y debido a la condición insular, los repuestos pueden tardar demasiado en llegar, ocasionando graves perjuicios a la comunidad de aguas correspondiente en caso de que el bombeo sea imposible.

Los pozos suelen contar con dos winches, uno para personal y otro para material encargado de transportar los elementos necesarios para el mantenimiento. Los equipos humanos que trabajan en pozos están altamente cualificados, debiendo existir una gran compenetración entre ellos ya que, por lo general el único método de comunicación con el maquinista de extracción (denominado localmente winchista, que cuenta con el correspondiente certificado de aptitud reglamentario) lo constituye el código de señales de la campana, a la antigua usanza. Es realmente impresionante observar como mediante toques de campana, un equipo de 2 personas es capaz de dictar órdenes a un winchista para que, manipulando alternativamente uno u otro winche, puedan llevar a cabo un trabajo de sustitución de una brida de una tubería, o incluso un conjunto de bombas de impulsión, suspendidos cientos de metros mediante un cable de acero de entre 16 y 22 mm de diámetro. Los índices de siniestralidad laboral son prácticamente nulos no habiéndose registrado un sólo accidente grave en un pozo en los últimos 10 años en Canarias.

Otro de los elementos clave en los pozos, lo constituyen los cables de acero (anti giratorios) y los órganos de amarre que, aunque se usen con cubas, según el RGNBSM están sometidos a las mismas inspecciones que los cables que se usan intensivamente en la minería convencional. Si bien es cierto que toda seguridad es poca, no es menos cierto que en la mayoría de los casos los cables de los winches de los pozos tradicionales canarios podrían considerarse que están almacenados en los tambores ya que su uso dista mucho del uso intensivo de un cable de acero de una mina tradicional. Los requerimientos reglamentarios acerca de inspecciones diarias, semanales, mensuales durante la vida útil del cable son de muy difícil justificación cuando un cable apenas se utiliza unos pocos días al año y cuyos coeficientes de seguridad duplican y en ocasiones triplican los indicados en el reglamento. Los problemas que presentan los cables en los pozos canarios tienen poco que ver con su degradación por el uso, y más con su incorrecta conservación y/o montaje. Mientras que los cables utilizados para material suelen ser más proclives a sufrir daños mecánicos directos, provocados principalmente por “agarradas” al atascarse o tropezar la carga durante el izado, por el contrario los utilizados para personal apenas presentan ese tipo de defectos. En general los principales motivos de retiradas de cables en los pozos canarios son las deformaciones producidas por el incorrecto dimensionado de los órganos de amarre, roldanas o poleas, la presencia de cocas y las entallas con la consiguiente rotura de hilos e incluso cordones, producida en el tambor al montar una espira sobre otra por un incorrecto arrollamiento. Lo que, en cualquier caso se ha detectado es que el estado de los cables, que en muchos casos deberían haberse retirado del servicio por “edad” es muy bueno, están convenientemente protegidos contra la corrosión y su régimen de uso es mínimo en comparación con el continuo esfuerzo al que es sometido el cable de una mina tradicional. El plazo de retirada de un cable tras dos años de su instalación, en nuestra opinión resulta excesivo si tenemos en cuenta que en esos dos años es muy probable que el cable trabaje en ese período como mucho 300 horas siendo, además, su mantenimiento más que correcto y los coeficientes de seguridad muy altos.

Actualmente existe un decreto que distingue además entre seguridad activa y pasiva. Las medidas de seguridad activas deben estar en funcionamiento siempre que haya presencia humana controlada en el interior. “Requieren la actuación del responsable o encargado de seguridad y están dirigidas a garantizar la respirabilidad del aire y unas condiciones de polvo, temperatura y humedad acordes con las labores a realizar”. Asimismo deben aportar información a las personas del comportamiento en el interior, tanto en condiciones ordinarias como de emergencia. También es su finalidad “prevenir los accidentes y minimizar sus efectos”.

Las medidas de seguridad pasivas actúan por sí mismas a fin de “garantizar la estabilidad estructural de las instalaciones y el sistema de cierre de los accesos; mantener la señalización exterior e indicar la existencia de peligros interiores”, señala el futuro texto. En cuanto a lo que el borrador del decreto llama “vida útil” de este tipo de instalaciones,



Figura 7.10.- Galería de agua abandonada.



Figura 7.11.- Cartel obligatorio de información sobre la galería y peligros.

contempla tres fases distintas para concretar las correspondientes medidas de seguridad: “excavación”, “explotación” y “clausura”. La primera de ellas es desde el inicio de las obras de perforación hasta su finalización total o parcial y la entrada en servicio de la instalación, en todo o en parte, como obra hidráulica.

La “fase de explotación” comprende desde la recepción de la obra o de cualquiera de sus partes por el propietario para su utilización como obra hidráulica hasta la clausura. Podrán abrirse períodos de cese temporal de actividades, en cuyo transcurso la seguridad se centrará en el cierre de instalaciones y señalización exterior.

La “fase de clausura” comienza con la solicitud de cierre definitivo de las instalaciones y finaliza con la comprobación del sellado efectivo y seguro para las personas y el medio ambiente.

7.5 ALGUNAS CONCLUSIONES

Tal y como se ha visto, podría considerarse que existe un cierto vacío legal, o por lo menos una cierta dificultad de aplicación del RGNBSM al caso de las galerías y pozos canarios. Dejando aparte consideraciones técnicas, como puede ser el caso de las inspecciones de cables o la electrificación de la galería, lo cierto es que una de las mayores dificultades a la hora de aplicar la reglamentación de seguridad minera en estas instalaciones viene dada por el contradictorio significado del término “explotación”. El RGNBSM evidentemente orientado a instalaciones mineras puras, ya sea a cielo abierto o de interior, da por sentada la presencia de personal durante la explotación de las mismas, sin embargo, en el caso que nos ocupa, explotación equivale a ausencia de personal o como mucho, presencia muy esporádica para labores de mantenimiento.

Con el objetivo de llenar en parte ese vacío o desacoplamiento legal entre la normativa de seguridad y la realidad del sector, con una orientación predominante en el tema de los accesos a estas peligrosas instalaciones, el miércoles 10 de diciembre de 2008 se publicó en el Boletín Oficial de Canarias núm. 246, el Decreto 232/2008, de 25 de noviembre, por el que se regula la seguridad de las personas en las obras e instalaciones hidráulicas subterráneas de Canarias, entrando en vigor el 31 de diciembre del mismo año.

El Decreto tiene como objetivo garantizar la seguridad en las instalaciones subterráneas creadas por la industria canaria del agua tanto durante su vida útil como tras su agotamiento, estableciendo las condiciones y requerimientos básicos necesarios para tal fin y siendo de aplicación a todas las galerías, pozos, túneles-acueducto y demás obras e instalaciones subterráneas visitables construidas con uso de técnica minera, con o sin explosivos, y destinadas al alumbramiento, captación y al transporte o almacenamiento de aguas subterráneas.

En este texto normativo se delimitan claramente las fases de construcción y utilización, las cuales llevan aparejadas diferentes condiciones y requisitos de seguridad, dividiendo la vida útil de las instalaciones en las siguientes fases:

1. Fase de actividad, distinguiendo entre los períodos de excavación con presencia de personal y los de explotación, con ausencia del mismo.
2. Fase de inactividad, temporal o indefinida (abandono).
3. Fase de clausura, comienza con la iniciación del expediente de cierre definitivo de las instalaciones y finaliza con la comprobación, por parte de la Autoridad Minera, de su clausura y sellado efectivo en condiciones de total seguridad para las personas y el medio ambiente.

Las novedades en cuanto a seguridad que se establecen en el Decreto atañen principalmente a:

- La señalización exterior normalizada, desarrollada por la ITC SIH II.12.01 Señalización exterior de obras e instalaciones hidráulicas subterráneas de Canarias, se aprueba mediante la Orden de 30 de noviembre de 2009 (BOC N° 243. Lunes 14 de Diciembre de 2009).
- El control de accesos en la fase de explotación, en la que, recordemos, no hay presencia de personal fijo.
- Incidir sobre la responsabilidad del titular de la instalación.
- La creación de la figura del Encargado de Seguridad; persona específicamente encargada del cumplimiento de las normas de seguridad contenidas en el Decreto durante la fase de explotación, principalmente relacionadas con la vigilancia de la señalización y los estados de cierre de las instalaciones, siempre que no impliquen trabajos en el interior, momento en el que es el Director Facultativo el encargado de la seguridad de los mismos.



Figura 7.12.- Sistema de cierre de acceso a la galería con panel informativo.



Figura 7.13.- Extintor en la sección de la mina de agua.

Además de esto, el Decreto contempla la creación y actualización periódica de censos de instalaciones por parte de los Consejos Insulares de Aguas, con indicación del grado de peligrosidad de cada una de ellas. La elaboración y seguimiento de estos censos y los procedimientos de clausura voluntaria y forzosa contenidos en el Decreto han facilitado por ejemplo que ya no se encuentren galerías ni pozos abandonados catalogados como peligrosos o muy peligrosos en la Isla de Tenerife.

La publicación de este Decreto ha supuesto un revulsivo en el sector del agua en Canarias, produciéndose una mejora considerable en la seguridad de las instalaciones que, de otro modo, y puesto que las labores mineras habían cesado hace décadas, escapaban al control y supervisión de las medidas de cierre.

No obstante queda mucho por hacer hasta lograr una correcta adaptación reglamentaria a la realidad de las instalaciones hidráulicas subterráneas de Canarias, a través de la elaboración por parte de la Comunidad Autónoma de Canarias de las ITC's correspondientes.

Finalmente, aunque no responda completamente al epígrafe sobre desarrollo normativo, cabe hacerse una reflexión sobre las convocatorias de subvenciones que periódicamente se hacen desde la Administración Central: aun siendo uno de los conceptos de las mismas la concesión de ayudas para mejorar las condiciones de seguridad minera, sólo pueden acceder a ellas aquellas actividades amparadas por la Ley de Minas, obviando el hecho de que la Seguridad Minera abarca un campo mucho más amplio que el definido por dicha Ley. Cabe preguntarse si no resulta un agravio comparativo que sólo se estimule mediante ayudas la seguridad minera a una parte de las actividades sujetas al cumplimiento del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera.



ANEXO A



ANEXO A. Contenidos y Cálculos Tipo de una Mina/Galería de Agua en Terreno Volcánico

A.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de una galería de agua es captar agua de los acuíferos para su posterior uso. Este recurso se puede obtener del acuífero basal de la isla, o bien, de acuíferos colgados. Solamente, en la isla de Tenerife, existen 1.056 explotaciones. Para ello es necesario redactar un proyecto técnico, que deberá ser firmado por un técnico competente, en este caso un Ingeniero de Minas o bien, un Ingeniero Técnico de Minas. El uso del agua procedente de las galerías, como norma general, aunque el recurso alumbrado es de gran calidad, principalmente el recurso es usado en la agricultura.

En este tipo de proyectos de ingeniería, la Administración Minera debe tener bastante implicación, según el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera. La seguridad de los trabajos y de la maquinaria empleada en cualquier prospección o aprovechamiento de aguas subterráneas debe ser supervisada por la Autoridad Minera competente, con aprobación previa del correspondiente proyecto. También, la autoridad minera competente, velará por la conservación de los manantiales de aguas mineras o mineromedicinales y sus macizos y zonas de protección, ordenando la suspensión de cualquier labor que pueda causar daño al caudal o a la calidad de las aguas. Los titulares de las autorizaciones de explotación facilitarán la inspección del personal legalmente autorizado. Igualmente, la Autoridad Minera competente velará porque no se produzca una sobre explotación del acuífero.

A.1.1 *Proyectos de minas y galerías de agua.*

Estos proyectos mineros, son de suma importancia, solamente en la isla de Tenerife, en Canarias, los volúmenes de aguas subterráneas obtenidos por galerías y pozos en el año 2012 representan una aportación de 153,6 hectómetros cúbicos al año, de los cuales el 67% procede de las minas y el 33% restante de pozos. Este dato supone que las aguas subterráneas aportan el 82% del total de los recursos hídricos disponibles en la Isla.

Los proyectos de explotación deben venir avalados por un estudio hidrogeológico, en el cual, se cuantifiquen las posibilidades existentes para realizar un aprovechamiento de agua subterránea, de manera sostenible con un caudal de extracción estable y con calidad suficiente, para los usos previstos. La calidad del agua alumbrada viene definida por los

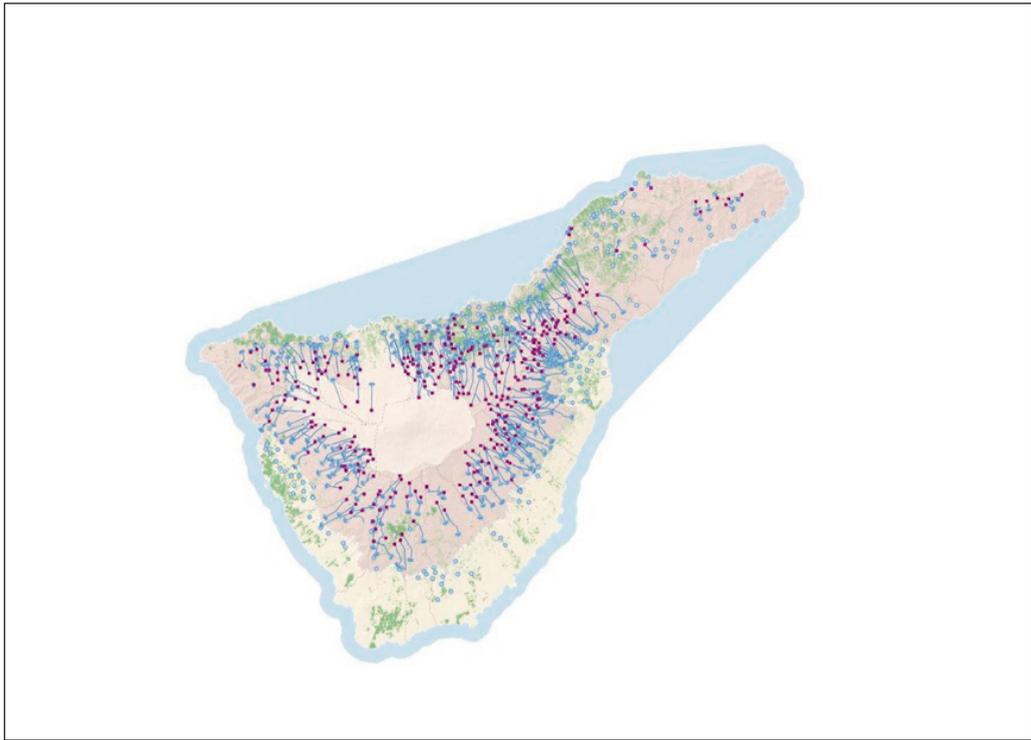


Figura A.1.- Mapa de situación y longitud de galerías en la isla de Tenerife (Consejo Insular de Aguas de Tenerife).

materiales volcánicos donde haya estado almacenada el agua y, el tiempo que ha permanecido en el interior del acuífero -tiempo de residencia-, lo cual determinará la cantidad de sales presente en el recurso. La cantidad de recurso va a ser definida por las características del acuífero, espesor, estructura, permeabilidad de los materiales, porosidad, zona donde se ubique, cantidad de diques...

El proyecto se compone de cuatro documentos:

1. Memoria y Anexos.
2. Planos.
3. Pliego de condiciones.
4. Presupuesto.

Los trabajos de profundización de pozos verticales o inclinados y el avance de galerías horizontales para captación de aguas deberán cumplir todas las prescripciones del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera (RGNBSM), para esta clase

de labores. Las autoridades mineras competentes prestarán un cuidado muy especial a la seguridad en la ventilación, circulación y el uso de explosivos.

A.1.2 *Pequeños aprovechamientos de aguas subterráneas destinados al autoconsumo.*

En el caso particular de las Islas Canarias, cuando son pequeños aprovechamientos de aguas subterráneas y se dedican al autoconsumo, —siempre que no haya otras alternativas—, es necesario la redacción de un proyecto de ingeniería por un técnico competente. En el caso de que sea necesario un sondeo, ese técnico debe ser de la rama minera, dado que necesita autorización por el Servicio de Minas de la zona, por el artículo 109 del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera, la supervisión de la obra, también debe ser realizada por un técnico de minas. En el caso particular de la isla de Tenerife, inicialmente es necesario realizar una memoria justificativa y una memoria descriptiva, los contenidos necesarios, según el Consejo Insular de Aguas de Tenerife, son los siguientes:

1. Memoria justificativa.
 - a. Necesidades.
 - Calidad.
 - Cantidad.
 - b. Justificación de la carencia de otras alternativas.
 - c. Existencia de recursos no aprovechados.
 - d. La no afección a otros aprovechamientos en un entorno de 200 m.
2. Memoria descriptiva.
 - a. Uso del agua alumbrada.
 - b. Lugar de consumo.
 - c. Obras que se proponen realizar.
 - d. Características de los elementos e instrumentos de la captación y distribución.

A esta documentación, se la debe de acompañar de: planos, croquis y esquemas explicativos de los anteriores apartados. La concesión es por cuatro años, prorrogable. El volumen anual aprovechado debe cumplir las siguientes condiciones, ser inferior a los 2.000 m³ anuales, diariamente un consumo menor de 20 m³ y no puede haber ninguna actividad económica o permuta con los recursos aprovechados.

A.1.3 *Obras para el mantenimiento de caudal inscrito en el registro de aguas.*

Este tipo de proyecto también necesita de la firma de un Ingeniero de Minas o bien un Ingeniero Técnico de Minas. Los proyectos más solicitados actualmente son los de perforación por reducción de caudales, con ellos se logra mantener los caudales alumbrados.



Figura A.2.- Tanquilla para aforo y control de caudales alumbrados.

¿Por qué se reducen los caudales de las galerías?, por el descenso del nivel freático local, debida a la sobreexplotación del acuífero basal, esto hace que algunas explotaciones queden por encima de este nivel y, en algunos casos, se deban abandonar por falta de recurso alumbrado.

En el caso de Canarias, particularmente en Tenerife, las explotaciones privadas —anteriores a la Ley 12/1990 de Aguas de Canarias—, pueden solicitar una autorización para re-perforar la galería y así, compensar los caudales mermados. Esta concesión administrativa se facilita, siempre que no se afecten a otras explotaciones o al acuífero, dentro del marco de la planificación insular. La solicitud de obras, según los requisitos del Consejo Insular de Aguas de Tenerife, debe contener los siguientes requisitos:

1. Memoria.
 - a. Localización de la explotación.
 - b. Aforo del caudal actual.
 - c. Necesidad de recuperación del caudal mermado.
 - d. Características geométricas y constructivas de la obra a realizar.

- e. Afección a otras explotaciones en un entorno de 3.000 m.
- f. Uso principal del agua.
- g. Destino territorial en el que se distribuirá el agua.
- h. Adecuación de la autorización que se solicita a la legislación vigente y al Plan Hidrológico Insular.

2. Planos.

En los proyectos de mantenimiento de caudales son muy similares a los de nueva construcción, con la salvedad que se incluyen nuevos apartados en la memoria descriptiva como:

1. Geología e Hidrogeología.
 - a. Descripción geológica de la traza que atraviesa la galería.
 - b. Hidroquímica.
 - c. Uso recursos de agua obtenidos.
 - d. Afecciones.
2. Accesos.
3. Descripción de las obras existentes.
 - a. Dependencias.
 - b. Longitud galería.
 - c. Ramales.
 - d. Sección tipo.
 - e. Singularidades en la traza; sostenimientos, anchurones y situación de ventiladores.
4. Instalaciones.
 - a. Neumáticas.
 - b. Ventilación.
 - c. Eléctricas.
 - d. Hidráulicas.
 - e. Transporte.
5. Bocamina: Cierre y señalización.
6. Vías de evacuación.

En estos tipos de proyectos es necesaria una concesión administrativa, se debe indicar el caudal de aforo en L/s. En Canarias es de uso común los aforos en “pipas” cuya cantidad ronda, dependiendo de la isla y zona considerada, entre 440 y 481 litros —provincia de

Tenerife—. En Lanzarote se toma la pipa como 500 litros. Otra unidad de caudal es, por ejemplo la azada, cuyo caudal varía entre 8 L/s (28,8 m³) y 12 L/s (43,2 m³), se recomienda por motivos obvios usar las unidades S.I en L/h y para caudales anuales, los hm³. Como ejemplo el Pozo-Galería de los Padrones, en la isla de El Hierro tiene un caudal anual aproximado de unos 75 L/s, por lo tanto produce anualmente 2,365 hm³. La demanda en la isla —de 10.000 habitantes—, es aproximadamente de 3,5 hm³ anuales, por lo que sólo esta explotación suple cerca del 67% de los consumos de la isla, de ahí que se destaque la importancia de este tipo de explotación en la islas volcánicas.

Estas obras subterráneas, se clasifican atendiendo al Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera, donde en su Artículo 24 del Capítulo IV, se indican las condiciones que debe cumplir una obra subterránea, para su clasificación dentro de una de las cuatro categorías existentes. En general en las minas de agua, no es previsible que aparezcan indicios de gases inflamables, muy raramente de CH₄. El grisú es un gas propio de las minas de carbón y no aparece en las galerías de agua de terrenos volcánicos, el grisú tiene el mismo origen que el carbón y se forma a la vez que él, por lo tanto se consideran que estas labores subterráneas están clasificadas como de primera categoría.

A.2 LA MEMORIA DEL PROYECTO DE GALERÍA DE AGUA

La memoria contiene el objeto del proyecto minero, incluyendo los antecedentes y estudios previos. Se incluyen los resultados y conclusiones definitivas (los cálculos detallados se exponen en los anexos correspondientes). La memoria se inicia con los antecedentes, en los cuales se explica la necesidad del proyecto, incluyendo una descripción del lugar donde se va a construir la mina. Se suele describir los recursos hídricos actuales de la zona de influencia de la obra, incluso un antecedente histórico del aprovechamiento de los mismos.

Posteriormente, se indica el objeto del proyecto; describiendo la obra principal y las auxiliares que, como norma general, suelen ser las conducciones y en algún caso un depósito de regulación. Este depósito, dado que las galerías se suelen construir en las partes elevadas de la isla, tiene suficiente altitud para poder abastecer a zonas o cultivos situados a menor cota, por lo tanto suele ser ventajoso su construcción. La alternativa de regulación de caudales alumbrados por las galerías, son los sistemas de cierres en el interior de la galería, aprovechando los diques geológicos encontrados a lo largo de la traza de la explotación. Si bien este sistema se ha utilizado en algunas explotaciones en el mundo, como en Sicilia o Canarias, no es un sistema del todo eficaz, debido a la excesiva idealización supuesta, en el funcionamiento del acuífero, en la explotación, así como la suposición de estanqueidad en la formación volcánica, cuestión que pocas veces se cumple, por ejemplo; como consecuencia de las voladuras, los diques se han podido fisurar.

Se incluye el peticionario de la obra, en el caso de Canarias, se da la circunstancia que el 90% de las explotaciones están en manos privadas, concretamente en comunidades de agua, las cuales solicitan a consultores o empresas los proyectos de construcción de galerías. Si bien es cierto, que la perforación de nuevas minas, desde los años 80 es residual, siendo como mucho, uno o dos los proyectos solicitados. Esto también es debido entre otros motivos a un descenso de caudales, por ejemplo en la isla de Tenerife desde el año 1973, se ha constatado una reducción de un 28%. Los motivos son: el alto coste de la ejecución de una galería donde el metro lineal se estima en unos 2.200 €/m, la incertidumbre en la obtención de agua, hay un porcentaje elevado de galerías que no han encontrado el nivel freático y, por último, los tiempos de construcción de la explotación, que pueden superar los dos años para minas de más de 3.000 m. Esto último, supone que el aprovechamiento, no puede dar una solución inmediata a una demanda urgente de recurso hídrico. En numerosas ocasiones, se están destinando recursos económicos a la construcción de plantas desalinizadoras de agua, con unos costes de construcción y tiempo de implantación menores. Esta opción a la larga, puede suponer un problema económico, dado que los costes de explotación son elevados (0,65 €/m³ – 1,00 €/m³, Santamarta 2009) y, la vida útil, no supera los 15-20 años. En estos parámetros, las galerías de agua en servicio pueden llegar a los 80 años y los costes de explotación son muy bajos, dado que en la mayoría de las ocasiones no es necesario recurrir a la energía eléctrica.

A.2.1 Situación y accesos

Se debe incluir la descripción del paraje donde se va a ejecutar la mina, así como los accesos. En el caso de Canarias, las explotaciones se proyectan en zonas de elevada altitud, debido a que el acuífero, está sobre elevado por los diques geológicos, se han estudiado casos—como por ejemplo en el Pozo de Los Padrones en el Hierro— donde se han reportado elevaciones de 16, 23 y 75 metros de altura de agua tras dique.

El hecho de tener que proyectar la bocamina en zonas elevadas de la isla implica lo siguiente:

- Dificultad de acceso de la maquinaria y operarios.
- Ausencia de líneas eléctricas para la alimentación de la obra y explotación posterior.
- En el caso de Canarias, suelen ser espacios protegidos, lo cual supone problemas ambientales.
- Problema en la retirada de basuras y desechos de la construcción.
- Problemas derivados de la extracción de escombros de la perforación, en este sentido, en Canarias, las escombreras se están utilizando para la reparación de caminos agroforestales.
- Lejanía de los centros médicos de emergencia.
- Necesidad de construir conducciones con longitudes importantes para la evacuación de caudales.



Figura A.3.- Ubicación de galería y construcción de acceso a la explotación.

Los caminos de acceso suelen tener un mínimo de 3 metros de anchura, generalmente sin asfaltar, hay que tener precaución en el diseño de los radios de curvatura para que sean de dimensiones suficientes para el acceso de la maquinaria de obra. En el caso de que estos accesos deban atravesar barrancos, habrá que hacer un estudio de las diferentes obras de paso para que no interfiera o bloquee la capacidad de desagüe del barranco. En caso de que se estime oportuno hacer el paso de barranco mediante badenes, para evitar la erosión de los mismos, se proyectan, como una losa de hormigón anclada al terreno. Dado que estos accesos discurren por espacios naturales, en algunos casos, catalogados con alguna figura de protección, se deberá buscar un equilibrio entre los desmontes y los terraplenes en la medida de lo posible y minimizar el impacto ambiental. Estos accesos en algunas zonas deberán tener muros de contención, si son de importancia deberán calcularse en el correspondiente anejo. Resumiendo, los aspectos a tener en cuenta en la construcción de los accesos a la mina serían los siguientes:

1. Trazado.
2. Sección transversal, explanada, subbase, base y rodadura.
3. Pendiente máxima.

4. Drenaje.
5. Obras de Paso.
6. Muros de contención, protección de cuneta.
7. Capacidad de carga.
8. Minimización de impactos al medioambiente.
9. Mantenimiento durante la explotación.

Para el emplazamiento de la bocamina, se establecen la cota a la que se va a situar con respecto al nivel del mar y las coordenadas U.T.M. La zona de las bocas de las galerías, se deben proyectar, para que cumplan los fines de facilitar la descarga de los materiales de excavación.

A.2.2 *Geología e hidrogeología*

Tal vez, este apartado de la memoria, sea el más importante en una explotación de aguas en terreno volcánico, debido principalmente, a que define el éxito de la galería, pues el conocimiento de la geología y el funcionamiento del acuífero en la zona de estudio, es el pilar básico del funcionamiento de la explotación, en calidad y en cantidad.

Se suele partir de una geología histórica de la isla en cuestión, donde se incluyen las transformaciones que ha experimentado la isla, desde su formación hasta el presente, describiendo la forma de la isla (estratovolcán, en escudo,...), diferentes erupciones, series de coladas, (Serie I, II, III...), materiales y edad de las formaciones más antiguas.

Se describen las formaciones presentes, tales como complejo basal, que suele estar integrado por rocas plutónicas básicas y ultra básicas, lavas, piroclastos básicos de aspecto submarino. El buzamiento de las coladas, espesor medio y, sobre todo, la presencia de diques, los cuales suelen estar relacionados con centros de emisión. Los materiales que se pueden encontrar a lo largo de la traza de la galería son de suma importancia, a la hora de plantear sostenimientos especiales en la sección, aunque generalmente, estos sostenimientos artificiales, por la propia naturaleza de los materiales volcánicos —salvo los más fluidos, no masivos—, no son necesarios.

La hidrogeología, establece la descripción del acuífero insular, —acuífero basal—, que suele ser único, en las islas volcánicas, apoyado en una formación lo suficientemente antigua y compacta para asegurar su impermeabilidad, que suele ser el complejo basal, aunque también pueden existir, series de coladas antiguas, consideradas —por la antigüedad de los materiales y la alteración de los mismos—, impermeables. En esta descripción se incluyen los diques, densidad, orientación aproximada y los diferentes paleosuelos. Es posible que aparezcan alumbramientos vinculados a paleosuelos o formaciones impermeables que hacen de depósito, son los acuíferos colgados o nacientes cuando estos se manifiestan en el terreno.

A priori, es complicado, determinar los materiales y formaciones que van a ser atravesados por la mina, debido a la heterogeneidad del terreno volcánico, no obstante, se pueden consultar numerosas fuentes y estudios, así como la inspección de galerías cercanas — sólo en Tenerife hay más de 1.500 explotaciones, como ya se ha comentado—, con el fin de determinar aproximadamente el perfil geológico e hidrogeológico de la mina que se va a perforar.

Como norma general, el alumbramiento se espera en los materiales permeables, con un aumento de la presencia de diques y a medida que la explotación se acerque al eje de la dorsal, zona donde el acuífero está más elevado y existe la mayor pluviometría de la isla. En Tenerife, por ejemplo, las galerías se suelen ubicar en altitudes entre 1.000 y 1.500 metros y suelen tener una profundidad entre 3 y 6 kilómetros.

162

Se debe hacer una estimación de los recursos alumbrados así como de la afección a captaciones próximas. En relación a los recursos hídricos conviene valorar la calidad de aguas alumbradas. Los terrenos volcánicos, al ser muy heterogéneos, almacenan agua de diferentes calidades, a este hecho, se le suma la actividad volcánica que interactúa con el agua. Esta actividad, puede incorporar CO₂ y otros gases al agua, lo cual la hace más agresiva con respecto a su interacción con los materiales que la almacenan, incorporando más sales y disminuyendo su calidad, por ejemplo la afección por flúor. En este caso (afección por flúor), se da la circunstancia que; en la isla de Tenerife se ve afectada notablemente en las captaciones del Norte de la isla, con cantidades de flúor en el agua de más de 10 mg/L (máximo consumo por persona al día según normativa 1,5 mg/L).

La obtención de aguas de gran calidad en galerías cercanas a la proyectada, no asegura éxito en la explotación, ni el alumbramiento de aguas de calidad.

A.2.3 Geotecnia

Se debe realizar un reconocimiento geológico-geotécnico, con especial interés en donde vayan a ir las infraestructuras asociadas a la explotación. En este reconocimiento se debe tener en cuenta:

1. El nivel freático.
2. Litología.
3. Estructura de las formaciones.
4. Excavabilidad de los terrenos.
5. Estabilidad de los taludes.
 - a. Principalmente donde se va hacer el emboquille de la mina.
 - b. Propuesta de acciones de corrección, en caso de inestabilidades.

- Muros.
 - Redes estáticas de protección.
 - Redes dinámicas.
- c. Comportamiento ante ángulos elevados.
- Escorias y depósitos detríticos recomendación de 50°.
 - Coladas masivas 70°-80°.

La geotecnia en los terrenos volcánicos es compleja, debido a la heterogeneidad de los materiales constituyentes de la isla. Existe muy poca literatura relativa a las características geotécnicas de los materiales volcánicos, pero es necesario tener una idea de las formaciones que atravesará la mina y su comportamiento mecánico, de cara a la necesidad de sostenimiento, o no. Al igual que, para el apartado de geología e hidrogeología, en función de la magnitud del proyecto y su complejidad, podría ser necesario un anejo especial geotécnico si la galería está planificada en una zona con un terreno relativamente complejo —por ejemplo; si atraviesa paleo cauces, conos piroclásticos, emboquilles en piedemonte etc.—. A modo de resumen, se adjunta las unidades establecidas por el Gobierno de Canarias en 2013:

1. Unidad I: COMPLEJOS BASALES.
2. Unidad II: COLADAS Y MACIZOS SÁLICOS.
3. Unidad III: MACIZOS BASÁLTICOS ALTERADOS.
4. Unidad IV: COLADAS BASÁLTICAS SANAS.
5. Unidad V: MATERIALES PIROCLÁSTICOS.
6. Unidad VI: MATERIALES BRECHOIDES.
7. Unidad VII: DEPÓSITOS ALUVIALES Y COLUVIALES.
8. Unidad VIII: SUELOS ARENOSOS.
9. Unidad IX: SUELOS ARCILLOSOS Y/O LIMOSOS.
10. Unidad X: RELLENOS ANTRÓPICOS.

Los problemas geotécnicos que pueden ocurrir en la construcción y explotación de la galería, dependiendo de la unidad geotécnica, pueden ser los siguientes:

1. Alta heterogeneidad, tanto en vertical como en horizontal.
2. Materiales muy alterados, de baja resistencia y alta deformabilidad.
3. Intercalación de niveles de suelos plásticos y expansivos.
4. Presencia de tubos volcánicos.
5. Existencia de niveles escoriáceos con parámetros geotécnicos muy desfavorables intercalados entre los materiales masivos más resistentes.
6. Hundimientos y colapsos.
7. Moderada y baja resistencia, asociada a deformabilidad moderada a alta.
8. Moderada expansividad de los niveles arcillosos.

A.2.4 Descripción de las obras

La elección del método constructivo a emplear en toda obra subterránea debe estar condicionada, en primer lugar, por las características geotécnicas del terreno a atravesar y, en segundo lugar, por la geometría y tamaño de la excavación. Se aportan las conclusiones sobre los sistemas de perforación utilizados, dimensiones de la galería en sección y en longitud, tipo de alineación, comúnmente recta, así como los resultados de los cálculos de las instalaciones. Si existiera algún ramal se indicará también con su longitud en metros.

El alzado de la galería siempre debe presentar una pendiente ascendente del 1%, constante en toda su longitud, con objeto de poder evacuar las aguas de infiltración por gravedad hacia la boca, durante su construcción y explotación. A nivel constructivo, esto se puede gestionar mediante la instalación de ganchos y tornillos en el techo para orientar la topografía en el interior de la traza.

A.2.5 Legislación aplicable

Se debe incluir la relación e documentos que afectan a la ejecución del proyecto minero, en el caso de Canarias, donde se ubica el mayor porcentaje de estas instalaciones, serían:

1. Autonómica.
 - Ley 12/1990, de 26 julio, de Aguas.
 - Las propias de los Planes Hidrológicos del Cabildo.
2. Nacional.
 - Ley 22/1973, de 21 de julio de Minas.
 - Real Decreto 230/1998, de 16 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento de explosivos.
 - Real Decreto 277/2005, de 11 de marzo, por el que se modifica el reglamento de explosivos, aprobado por el Real decreto 230/1998 de 16 de febrero.
 - Real Decreto 863/1985, de 2 de abril, por el que se aprueba el Reglamento General de normas básicas de seguridad minera.
 - RD 2018/1996 de 6 de septiembre, de Certificado de Minería de Transporte y extracción.
 - Ley 31/1995, de 8 de noviembre de Prevención de Riesgos Laborales.
 - Reglamento de los servicios de Prevención, Orden de 27 de junio de 1997.
 - RD 485/1997, de 14 de abril, DMSS relativa a la manipulación manual de cargas.
 - RD 773/1997, de 30 de mayo, DDMSS relativas a la utilización por los trabajadores de los equipos de protección individual (EPI).
 - RD 1215/1997, de 18 de julio, DDMS para la utilización de los trabaja-

dores de los equipos de trabajo.

- RD 1389/1997, de 5 de septiembre, DM destinadas a proteger a los trabajadores en actividades mineras.
- Ley 54/2003, de 12 de diciembre, de reforma del marco normativo de la prevención de Riesgos Laborales.
- RD 1311/2005, de 4 de noviembre, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores frente a los riesgos derivados o que puedan derivarse de la exposición a vibraciones mecánicas.

A.2.6 Plazo de ejecución

Se debe incluir en el proyecto el plazo total de ejecución, en los anejos se debe incluir un plan de obra con las diferentes actividades del proyecto.

A.2.7 Plan de obra

El objetivo del plan de obra, es definir la programación de los trabajos proyectados, se describen los principales tajos a realizar, indicando los rendimientos. Para una galería tipo, un plan de obra ejemplo, para una galería de 3.500 m podría ser como el que sigue, (plazo de ejecución, tres años):

Actividad	1T	2T	3T	4T	5T	6T	7T	8T	9T	10T	11T	12T
Adecuación del solar y accesos a la explotación	■											
Edificios e instalaciones exteriores		■	■									
Acometida e instalaciones eléctricas	■											
Emboquille de la mina		■										
Perforación			■	■	■	■	■	■	■	■		
Conducciones de servicio											■	■
Plan de calidad	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Control ambiental	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Seguridad y salud	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

A.2.8 Presupuesto

Finalmente se incorpora el presupuesto de ejecución del proyecto y el correspondiente con los diferentes suplementos; beneficio industrial, impuestos y gastos generales.

A.3 PLANOS

Los Planos, son la representación gráfica de las soluciones adoptadas. Deben comprender, tanto los planos de conjunto como los de detalles necesarios para que pueda realizarse el trabajo sin dificultad, tanto en obra como en taller. Los planos habituales de este tipo de instalación suelen ser los siguientes:

1. Emplazamiento.
2. Situación de la bocamina.
3. Caminos de acceso.
4. Estado de alineaciones de la mina.
5. Traza en planta.
 - a. Sobre mapa geográfico.
 - b. Sobre mapa geológico.
6. Instalaciones exteriores.
7. Sección de la galería y sus elementos.
8. Esquema del cuele y de la voladura propuesto.
9. Instalaciones.
 - a. Eléctricas.
 - b. Ventilación.
 - c. Hidráulicas.
 - d. Neumáticas.

A.4 EL PLIEGO DE CONDICIONES

En esta parte se fijan; las exigencias, requisitos y condiciones que debe cumplir aquello que se ha proyectado. Es un documento de carácter contractual que servirá de base para la redacción del contrato de ejecución de las obras, y en el cual, se debe describir con detalle los trabajos objeto del proyecto, las condiciones que deben reunir los materiales y las condiciones económicas en que puedan y deban realizarse dichos trabajos. Se incluye

la normativa, reglamentos y leyes, que se deban aplicar al proyecto indicando su ámbito de aplicación, esto es:

- Local.
- Autonómica.
- Nacional.
- Internacional (Europea).

Se indican también las responsabilidades contractuales y requisitos derivados de la ejecución del proyecto. Incluyendo las condiciones referentes a los materiales y a la ejecución, medición y abono de las obras ejecutadas.

Si la obra es promovida por la Administración, es preceptiva la exigencia de clasificación a los contratistas que deseen concurrir a las obras. De acuerdo con el Real Decreto 1098/2001 de 12 de Octubre por el que se aprueba el Reglamento General de la Ley de Contratos de las Administraciones Públicas, para esta tipología de obras:

- Grupo A4, pozos y galerías.
- Subgrupo E1, abastecimiento y saneamiento.

A.5 LOS PRESUPUESTOS

El presupuesto de la galería definirá y justificará la cantidad y características de todos los elementos de integran el diseño junto con una estimación justificada de los precios de dichos elementos. Con él se hará una previsión del coste de ejecución.

Los presupuestos constarán de los siguientes apartados:

1. Mediciones.
 - a. Mediciones auxiliares.
 - b. Medición general.
2. Cuadros de precios.
 - a. Cuadro de precios nº 1.
 - b. Cuadro de precios nº 2.
3. Presupuestos Parciales.
4. Presupuesto General.
 - a. Presupuesto de Ejecución Material.
 - b. Presupuesto de Ejecución por Contrata.



Figura A.4.- Zona escoriácea en la traza de la mina con problemas de sostenimiento.



Figura A.5.- Anchurón para cambio de maquinaria y vagonetas.

168

La unidad de perforación de galería será el metro lineal de excavación en galería incluyendo la entibación provisional, agotamiento de agua, ventilación e iluminación, sostenimiento y revestimiento, rejilla para canaleta y raíl para la circulación de la maquinaria.

En el caso de la perforación, es necesario que exista un precio de avance para terreno no saturado, con unas condiciones favorables para la excavación y el avance, aunque se genera un ambiente pulverulento. Por otro lado, debe existir un precio para cuando se alcanza el terreno saturado, con unas condiciones de humedad importantes y una reducción del rendimiento, por las condiciones complejas de trabajo.

Debido a la dificultad de valorar “a priori” las zonas en la traza de la mina, con presencia de inestabilidades por materiales escoriáceos, arcillosos o conglomerados. Por experiencia se puede plantear la necesidad de sostenimiento como un 10-20% de la longitud total de la traza, incluyendo esto, en el presupuesto final como *partida alzada a justificar*.

También, para el precio de perforación, hay que tener en cuenta otras singularidades en la traza, tales como los anchurones, para los cambios de maquinaria, entronques de ramales, zonas de ventiladores etc.

La construcción de una galería de agua (media de 3,5 kilómetros), suele implicar más de 24 meses de trabajo, incluso los trabajos de reperforación suelen tener una duración elevada, por ello será necesario proponer en el proyecto una revisión de precios cada cierto tiempo.

A.6 LOS ANEXOS DEL PROYECTO

Principalmente, constan de los cálculos que justifican las soluciones planteadas en la memoria, en algunos casos conviene indicar los métodos de cálculo utilizados. Los de mayor importancia y singulares son los relativos a los explosivos, —que se suelen incluir en el anejo constructivo, junto con los sostenimientos y sistemas de perforación—, y el de ventilación.

A.6.1 *La organización de las obras*

En este apartado se explica la modalidad de la ejecución de las obras, ¿qué personal o empresa va a ejecutar el proyecto?, así como el nombramiento del Director Facultativo, que deberá ser por ley un Ingeniero de Minas o un Ingeniero Técnico de Minas. Se incluye las máquinas y herramientas que se van a utilizar en todo el proyecto constructivo, tales como:

1. Grupo motor-ventilador, para el acondicionamiento de la atmósfera en el frente de la galería.
2. Grupo motor-compresor para los equipos neumáticos.
3. Martillo perforador, percutor.
4. Vagonetas y locomotora diésel.
5. Pala neumática de arrancado de material.
6. Herramientas manuales.
7. Herramientas y accesorios para explosivos.

En algunas minas que están ejecutando en los últimos años por la Administración, las galerías tienen dimensiones de tres metros de base por tres metros de alto. Se está utilizando maquinaria tipo yumbo perforador, para la perforación de barrenas y sondeos. Para los sondeos tanto horizontales como verticales se utilizan varios modelos de perforadoras, como la tipo Zahorí pero adaptadas a las dimensiones de la galería en ejecución.

En el solar de la galería se depositan los escombros procedentes de la excavación. Se debe indicar como va a estar custodiada la explotación en fase de construcción, así como, los

aspectos de seguridad relativos a evitar personas ajenas a la obra y el cierre diario de la explotación mediante una puerta metálica. Para el emboquillamiento y la zona de ventiladores se reservan los primeros 20 metros de la explotación.

Se define también el personal que va a estar en la ejecución de la mina. Los operarios se organizan en “cuadrillas”. El número mínimo de operarios suele ser de 3, sus denominaciones son:

- Artillero.
- Maquinista.
- Barrenista.

Uno de ellos, deberá hacer las labores de vigilante de labores, el maquinista permanecerá en el exterior de la mina cuando se esté trabajando en el interior. Para la mejora de las condiciones de trabajo, dado que la mayoría de las minas carecen de instalaciones de luz artificial, es usual disponer de lámparas de trabajo alimentadas a PTS (Pequeña Tensión de Seguridad), para que no interfiera con los explosivos, también se dispone de la tradicional lámpara de carburo de acetileno que además de luz, mejora la condiciones de seguridad,—alerta de la disminución del oxígeno—, complementariamente al detector de gases, como ya se ha explicado en secciones anteriores.

Antiguamente en las islas Canarias, la jornada de trabajo comenzaba a las 6 am, los trabajos se organizaban en piñas, cada una formada por dos operarios, con herramientas muy rudimentarias, hasta las 6 pm, en turnos de 12 horas. Las operaciones eran las siguientes:

- Colocación del explosivo.
- Pega.
- Retirada de escombros.
- Limpieza del frente de la mina.

A partir de los años 50, el grupo de trabajo se redujo a uno, —con dos o tres operarios—, trabajando en un único turno de 12 horas. Se cobraba por metro lineal de galería perforado o, en algunos casos mediante jornal. Aparece la figura del cabuquero, el cual se encargaba de los explosivos y pegas. En los inicios de la minería del agua en Canarias, las condiciones eran muy penosas.

Actualmente, para aprovechar las mejores condiciones de ventilación natural en el interior de las galerías, que están directamente relacionadas con la climatología. A partir del mediodía no se suele trabajar en el interior de la galería ya que se suelen producir fenómenos de inversión de la ventilación natural, aumentando la concentración de gases nocivos en su interior, como se ha comentado en otras secciones.



Figura A.6.- Equipo electrógeno para suministro energético de la obra.



Figura A.7.- Secciones de las galerías ejecutadas por la Administración con dimensiones "sensiblemente" mayores que las ejecutadas por la iniciativa privada.



Figura A.8.- Lámparas de carburo de acetileno, ampliamente utilizadas en la actualidad en la minería del agua.

OBRAS CONSTRUÍDAS							
Alineaciones	Ángulos Absolutos	Rumbos		Distancias		Coordenadas	
		C.N.Vº	UTM	Parciales	Totales	X	Y

Tabla A.1.- Estado de alineaciones de una galería de agua.



Figura A.9.- Trazado en planta y rumbos de una galería en Tenerife.

A.6.2 El estado de las alineaciones

El estado de alineaciones lo forma el trazado en planta, partiendo de la bocamina, en este estado se incluyen las distancias totales y parciales de la mina, incluyendo los rumbos y ángulos. De los puntos singulares se facilitan las coordenadas X e Y. También, obviamente se incluyen los ramales de la explotación. En la tabla A.1 se puede ver un ejemplo con el contenido del estado de alineaciones.



Figura A.10.- Vagoneta tipo "cuna".



Figura A.11.- Railes en proceso de oxidación al estar "embebidos" en el agua de repisa de la mina.

A.6.3 Volumen de excavación, carga y transporte

En este apartado, se incluye, en base a los cálculos en el correspondiente anejo, los resultados de los volúmenes a excavar, así como los medios para transportar y evacuar los escombros. Usualmente se usan vagonetas para el transporte de escombros, aunque también se usan cintas transportadoras.

Los sistemas de transporte en las minas de agua, para el caso particular de Canarias, han tenido una importante evolución. Generalmente esta maquinaria proviene de explotaciones de la minería del Norte de España, teniéndola que adaptar a las singularidades de la minas canarias. Los primeros railes eran de madera y las vagonetas se transportaban de manera manual o bien con burros pequeños. Actualmente, y desde los años 80 del pasado siglo, se utilizan máquinas motrices de la empresa FUENDOR. Estas máquinas tienen las siguientes características (Cedrés, 2007): 2-3 toneladas, velocidad media 10 Km/h, con capacidad para arrastrar 6 vagonetas cargadas de escombros.

Un sistema de transporte tipo se compone de los siguientes elementos:

1. Vías de hierro instaladas en la solera de la galería, carga media 7 kg/m.
2. Locomotora con motor de combustión.
3. Vagonetas con capacidad mínima de 1 m³, de acero laminado, montadas sobre ruedas-llantas de ferrocarril con frenos mecánicos.

4. Vagonetas de transporte de herramientas, con plataforma de madera, denominadas “cuna”.
5. Excavadora para retirada de escombros con pala.

El transporte de los escombros una vez que se ha perforado se realiza mediante las vagonetas remolcadas por una locomotora desde el frente de mina hasta la bocamina.

Las vías de acero, se suelen oxidar en minas donde existen zonas de surgencia por el agua de repisa, en zonas no saturadas se suelen mantener un estado de conservación aceptable. En algunas ocasiones y, debido a la aparición de materiales arcillosos, el suelo de la galería se “hincha” y afecta a la circulación del convoy minero, este efecto tiene muy difícil solución.

174

A.6.4 Cálculos de perforación y explosivos

En este anexo, se incluyen los cálculos relativos a la perforación los rendimientos de la misma, donde destaca la parte relativa a los explosivos y voladuras en el interior de la mina. Las galerías de agua, al ser una obra subterránea de primera categoría, puede utilizarse cualquier tipo de disparo, sin limitación en explosivo ni detonador. Para el empleo de explosivos se debe tener en cuenta el Capítulo X del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera.

La excavación se compone de las siguientes operaciones:

- Perforación de barrenos.
- Carga de explosivo.
- Disparo de la voladura.
- Evacuación de los humos y ventilación.
- Saneamiento y fortificación en caso necesario.
- Carga y transporte del escombros.
- Replanteo de la nueva pega.

Cuando se alcanza la zona saturada, es posible que se deba utilizar los explosivos con presencia de humedad y agua, por lo que los cartuchos deberán estar encartuchados con resistencia a estos elementos. Los elementos auxiliares a tener en cuenta son los siguientes:



Figura A.12.- Perforación de barrenas para la introducción de explosivos. (Foto cortesía de Rafael Lario).

- Carga de fondo.
- Carga de columna.
- Cordón detonante.
- Detonadores eléctricos de alta insensibilidad.
- Explosor.

Cada tipo de explosivo tiene características propias definidas por sus propiedades, para el mismo tipo de explosivo las características pueden variar dependiendo del fabricante; el conocimiento de tales propiedades es un factor importante en el diseño de voladuras en las galerías. Los explosivos se guardan en el interior de las galerías, al inicio de la traza, cuando está en fase constructiva, para ello se construyen dos cajas blindadas al terreno, una para los explosivos y otra para los detonadores, la distancia entre ambas debe ser de “al menos” 1,5 metros.

En la fase constructiva, debe haber un operario responsable del almacenamiento y consumos de los explosivos, mediante las correspondientes anotaciones en un libro de registro, donde se da cuenta diariamente de los consumos y existencias.

El avance de galerías o las voladuras en túnel, es una operación más compleja que la voladura en banco, la única “cara libre”, es el frente de la galería, la roca tiene un grado de fijación muy alto, por lo que el consumo específico de explosivos es mayor.

Cuando se realiza una voladura, se produce un tapón de gases resultantes de la explosión, este tapón se compone principalmente de CO_2 , CO , H_2O , N_2 , NO , NH_3 , entre otros elementos, también se produce polvo procedente de las rocas y material perforado, la ventilación forzada hace que este tapón y el polvo se disipe más rápidamente. No es conveniente que los operarios estén sometidos a este tapón de gases, dado que hay algunos que son tóxicos, aunque sea en bajas concentraciones.

El caudal para la dilución de los gases de voladura viene dado por la siguiente expresión:

$$Q = \frac{100 \cdot a \cdot A}{0,01 \cdot t}$$

Donde Q es el caudal de aire en m^3 , t ; el tiempo de ventilación en segundos (entre una y dos horas), A ; explosivo por pega en kg , a ; en el caso de dinamita goma valdría 0,04.

La dinamita que actualmente está recomendada por la Unión Española de Explosivos y utilizada en este tipo de explotaciones, es la Riodin, dado que las rocas son de dureza media/alta y se trabaja en ambientes húmedos, las características de este explosivo son las siguientes:

- Excelente calidad de los humos.
- Alta densidad y gran resistencia al agua.
- Fácil uso.
- Alta velocidad de detonación.
- Baja emisión de gases.

	UNIDAD	VALOR
Densidad	g/cm ³	1,5
Velocidad de detonación	m/s	6.000
Calor de explosión	MJ/kg	4,54
Presión de detonación	Kbar	207
Volumen de gases	L/kg	886
Resistencia al agua		Excelente
Categoría de humos		1 ^a

Tabla A.2.- Características técnicas de la dinamita Riodin (MAXAM).

Como se ha comentado en secciones anteriores, el hecho de poder localizarse tras dique, alturas de agua de más de 100 metros de altura, implica que se debe proceder con extrema cautela a la hora de realizar las voladuras para evitar romper el dique de forma segura y conocer las presiones tras dique. El agua drenada se conduce a una zanja, revestida de hormigón, diseñada para que pueda drenar un caudal de “al menos” 500 L/s, que en la fase constructiva verterá a los barrancos o bien se podría utilizar en fincas cercana para riego, nunca para abastecimiento, dado que puede tener restos de explosivo y restos de materiales usados para la construcción de la mina (plásticos, combustibles, etc.). Posteriormente

este canal se puede entubar para la fase de explotación de la mina con caudales de diseño inferiores, según el caudal de la explotación determinado en los ensayos correspondientes. La perforación se lleva a cabo mediante un martillo neumático cuando sean materiales excavables, el arranque con explosivos tipo goma 2 ECO o Riodin en materiales más masivos, como por ejemplo las coladas basálticas masivas con diaclasado muy cerrado, con pala manual o neumática y el transporte con locomotora y vagonetas de escombros que serán depositados en la escombrera en el exterior de la explotación. La cuantificación de cuanto material será excavable y cuanto deberá ser extraído con explosivos, es de muy difícil estimación.

Las obras auxiliares son; las vías para el avance de la locomotora, la conducción de aire comprimido, la conducción de ventilación forzada y la conducción hidráulica para la canalización de las aguas alumbradas.

178

Los rendimientos de avance medios, con el fin de estimar un plan de obra razonable, se estiman en función de si la perforación es en seco, o en zona saturada, esto puede variar de seis metros (seco) y descender a cuatro metros (zona saturada) al día, en jornadas de 12 horas. Estos avances pueden variar en función de las características de la sección atravesada, por ejemplo; si es inestable, si hay que hacer un anchurón, construir una plataforma para los ventiladores etc.

Cuando aparecen materiales escoriáceos, arcillosos o conglomerados, se presenta una inestabilidad en la sección, pueden existir desprendimientos y es necesario actuar mediante la propuesta de sostenimientos o refuerzos en la sección. Los objetivos del sostenimiento son:

1. Evitar que el terreno pierda sus propiedades resistentes.
2. Evitar el desprendimiento de cuñas o zonas sueltas del terreno por el proceso de excavación.
3. Limitar las deformaciones en la cavidad creada.
4. Proporcionar seguridad a las personas e instalaciones.

Los sostenimientos habituales, donde sean necesarios, en función del problema geotécnico valorado, suelen ser:

1. Hormigón, encofrado y armado.
2. Mediante bloques macizos de hormigón.



Figura A.13.- Revestimiento con bloques de hormigón macizo.

3. Bulonado². Este sistema no se usa en galerías tradicionales debido a su pequeña sección.
 4. Mediante archetes de hormigón ciclópeo en hastiales con losas de hormigón en la clave.
 5. Mediante marcos metálicos de perfiles de acero.
 6. Inyectado de cemento.
 7. Gunitado, hormigón proyectado con un espesor mínimo de 5 cm. Este sistema no se usa en galerías tradicionales debido a su pequeña sección, que impide el uso de la maquinaria necesaria.
 8. Cercos metálicos y planchas de enfilaje con secciones perforadas (materiales arcillosos).
-
2. Los sistemas de bulonado de rocas se usan para estabilizar la masa rocosa en minas de interior y en la excavación de túneles. Los bulones de refuerzo se disponen sistemáticamente para transferir la carga de la superficie inestable o del exterior de la roca a la parte interior, mucho más fuerte, de la misma.

A.6.5 Control de las vibraciones

Desde el punto de vista de los efectos de las explosiones, hay que tener especial cuidado con las vibraciones producidas por la perforación de la galería, ya que estas, pueden afectar a las edificaciones en superficie. Este hecho ya ha sido constatado en algunas galerías en construcción, en isla de La Palma, Canarias.

Debido a la anisotropía de las rocas volcánicas, no es posible predecir el nivel de vibración. Existen diferentes tipos de ondas emitidas por la explosión; ondas “P”, longitudinales, ondas “S”, transversales, estos dos tipos de ondas se mueven en toda la masa de la roca, de tal manera que son consideradas internas, finalmente se forman ondas superficiales; ondas Raleigh, “R”, de naturaleza vertical y ondas Love de oscilación horizontal, con mayores amplitudes y longitudes de onda que las P y S.

Durante su producción las ondas mueven las partículas del medio que recorren produciendo sobre éstas velocidades, desplazamientos y aceleraciones que se pueden registrar en los aparatos destinados para este fin. Los registros de desplazamiento, velocidad y aceleración de partículas generados por las voladuras tienen tres características primordiales: la amplitud, frecuencia y la duración.

Las vibraciones dependen fundamentalmente de varias variables, que pueden ser controlables o no, estas son:

- Características de las rocas que atraviesa la mina y las situadas en su montera.
- Carga de explosivo en la pega.
- Consumo específico de explosivo.
- Tipo de explosivo.
- Tiempo de retardo.
- Geometría de la voladura.

Para el control de las vibraciones, hay que seguir la norma UNE 22-381-93, esta norma define claramente el tipo de estudio a realizar en materia de vibraciones previo a la realización de una voladura de acuerdo con las características de la misma, el macizo rocoso circundante, y la distancia de las edificaciones a proteger.

%CO ₂	SÍNTOMAS
0,02	Produce dolor de cabeza después de cuatro horas de exposición
0,04	Produce dolor de cabeza y malestar en dos horas
0,12	En media hora produce palpitaciones del corazón tendencia a perder el equilibrio en una hora y media
0,20	Produce inconsciencia en media hora

Tabla A.3.- Efectos de la reducción del aumento del CO₂.

El cálculo habitual es el siguiente:

$$Q = 924,79 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{F_e} \cdot \frac{1}{F_R} \cdot F_a \cdot D^2$$

Donde Q, es la carga máxima expresada en kilogramos, las “F”, son factores que tienen que ver con la estructura, macizo rocoso y recta, D es la distancia a la estructura en metros.

A.6.6 La ventilación

El aire de las galerías de agua, es una mezcla de gases y vapor de agua, se acerca mucho a los gases perfectos, en cuanto a sus propiedades. En los terrenos volcánicos es frecuente el registro de anomalías térmicas positivas y emanaciones de gases. Las primeras están asociadas al volcanismo reciente de las islas las emanaciones a la actividad magmática. Los gases de esta tipología están compuestos de componentes volátiles disueltos en el mismo magma, entre un 98% y un 99% son H₂O y CO₂, también pueden aparecer SO₂, H₂S, HCl, H₂ y, en menores cantidades (menos de un 0,1%) compuestos y moléculas de HF, B, Br, O₂, CO, CH₄, NH₄. El gas CO, también puede estar asociado al gas producido en la combustión del motor de la locomotora del convoy, en cantidades de hasta 0,28 m³/min, este hecho puede dar valores elevados de este gas en los medidores (en menor medida de metano, aldehídos y SO₂) y, tendrá que ser tenido en cuenta.

No es usual encontrar en las minas grandes cantidades de CH₄. La concentración de los gases en la mina puede verse alterada por causas atmosféricas exteriores, en los casos



Figura A.14.- Ventilación flexible para adecuar la atmósfera de la mina en el proceso constructivo de la misma.



Figura A.15.- Medidor personal de gases en la mina.

182

donde no haya una ventilación artificial y, en base a las características físicas del terreno. La variación de la presión atmosférica y la temperatura provocan un flujo de aire hasta que se equilibran las condiciones del interior con el exterior. Nunca se debe estar en una explotación con una concentración de O_2 menor del 19%.

Estacionalmente (invierno-verano), la temperatura también puede variar las condiciones de trabajo en el interior de la mina. En invierno el aire frío y denso diluye los gases de toda la galería. En verano, es el caso contrario, los gases, en flujo ascendente, alcanzan a la galería sin diluir.

En la perforación de galerías, es importante mantener una buena ventilación para evacuar los gases de los explosivos utilizados y los procedentes del terreno (principalmente dióxido de carbono CO_2) y, evitar accidentes por asfixia. Cuando no se contempla el diseño de un equipo de ventilación, es debido a que la galería se ventila de manera natural, por difusión, en fondo de saco. Hay que tener en cuenta que esto es habitual en algunas galerías dado el carácter poroso de algunos materiales volcánicos. En algunas galerías sin ventilación forzada se han utilizado los grifos de aire comprimido para obtener aire fresco además de reducir la temperatura ambiente de la galería.

El ambiente de la galería se ve permanentemente alterado por efectos originados por la actividad laboral —La respiración humana produce aproximadamente $47,20 \text{ m}^3/\text{s}$ de CO_2 , por operario—, y la propia naturaleza de los terrenos atravesados:

- Emanaciones gases (dióxido de carbono, metano, sulfhídrico).
- Gases procedentes de la actividad volcánica.

EFECTOS DE LA REDUCCIÓN DE OXÍGENO	
CONTENIDO DE OXÍGENO	EFECTOS
17 %	Respiración rápida y profunda. Equivale a 2.500 m.s.n.m.
15 %	Vértigo, vahído, zumbido en oídos, aceleración latidos.
13 %	Pérdida de conocimiento en exposición prolongada.
9 %	Desmayo e inconsciencia.
7 %	Peligro de muerte. Equivale a 8.800 m.s.n.m.
6 %	Movimientos convulsivos, muerte.

Tabla A.4.- Efectos de la reducción de oxígeno.

- Humos de explosivos y de máquinas.
- Respiración humana.
- Elevación del nivel de humedad, debido al vapor generado por la evaporación del agua del acuífero por la actividad volcánica.
- Polvo en suspensión, contaminación sólida.
- Ausencia de O₂, en galerías sin agua ni ventilación, debido a la ausencia de porosidad, en zonas con materiales antiguos.

En un anexo de ventilación, el primer problema que hay que afrontar, es la cantidad de aire que los ventiladores moverán dentro de la galería. Son varios los factores que se deben tomar en cuenta para lograr el caudal más conveniente. Para la determinación de la velocidad del aire se utilizan los anemómetros de hélice, son pequeños aeromotores, en los que una rueda de hélices de aluminio, cuyo número de revoluciones es proporcional a la velocidad del aire, impulsa un mecanismo indicador, el rango de velocidades que mide varía entre 0,2 a 6 m/s.

Para calcular el aire requerido se deberán considerar los siguientes aspectos:

1. Velocidad del aire.
2. Cantidad de aire para los operarios.
3. Aire necesario para diluir o remover los gases y el polvo.
4. Cantidad de aire adecuado para enfriar la galería, en caso de tener que trabajar con altas temperaturas (en el caso particular de Canarias se han llegado a temperaturas de 45 °C).

CAUDAL	FÓRMULA DE CÁLCULO	PARÁMETROS
Caudal respiración operarios m ³ /s	$Q = 0,04 \times n$	n; número de operarios
Caudal para remover los gases locomotora m ³ /s	$Q = 0,03 \times N$	N; potencia de la locomotora
Caudal necesario corregido por la altitud situada la explotación m ³ /s	$Q' = Q \times (760/P)$	Q; caudal necesario sin corrección P; presión en la altitud de la explotación en mm de Hg

184

Tabla A.5.- Cálculo de caudales de ventilación en las galerías de agua.

Con respecto al polvo hay que tener en cuenta que si este está muy concentrado del orden de 0,5 mg/m³, se debe considerar como un espacio peligroso en relación a la salud de los trabajadores. Influye notablemente el tiempo de exposición que haya tenido el trabajador.

Dependiendo del sentido de circulación del aire se distinguen tres tipos de esquemas de ventilación:

- Soplante.
- Aspirante.
- Mixta (aspirante y soplante).

Las conducciones utilizadas, suelen ser de acero galvanizado de arrollamiento helicoidal con un Diámetro nominal de 500 con 0,6 mm de espesor y flexibles cuando se está en fase constructiva.

A.6.7 Instalaciones neumáticas

El sistema de aire comprimido se suele ubicar en los hastiales, lo forma una tubería de acero galvanizado de 3" de diámetro que parte de la sala de máquinas hasta la zona donde se esté trabajando. A lo largo de la traza se diseñan numerosos grifos de aireación que, en algunas ocasiones, se utilizan para refrescar el ambiente, —es necesario recordar que en algunas galerías se llega a temperaturas del orden de 40-50 °C—. Los grifos de aireación están compuestos por collarín de acero, llave de paso y una manguera flexible. El principal



Figura A.16.- Grifo de aire comprimido a lo largo de la traza de la mina.



Figura A.17.- Grupo motor.

uso que se le da a la instalación neumática es para el accionamiento de los equipos de perforación manuales, con el fin de perfilar o avanzar en el desarrollo de la traza de la galería.

A.6.8 Instalaciones

Teniendo en cuenta los condicionantes ambientales y respetando en todo momento el entorno de la explotación, se debe diseñar y construir los siguientes elementos:

- Sala de máquinas.
- Dependencias de personal.
- Caseta-almacén.
- Tanquilla de aforo.
- Conducciones.

Los tres primeros, son los que se construyen inicialmente antes de comenzar la perforación, los dos últimos una vez concluida la obra. En la sala de máquinas se ubican los siguientes grupos, un motor-compresor y un motor-ventilador, con sendos depósitos de gasoil que no suelen superar los 1.000 L de capacidad.

Las dependencias del personal, hay que tenerlas en cuenta para posteriores trabajos de explotación, o bien, de reperfusión de la mina, los operarios, por los horarios de trabajo suelen dormir en las propias instalaciones. Esta instalación consta de un edificio de hormigón, con cocina, vestuario, comedor, aseos y dependencias. El suministro eléctrico, si no hay líneas eléctricas para suministro energético, se hace mediante un motor diesel. Esta edificación, se suele complementar con otra para el almacenamiento de herramientas y útiles de trabajo.



Figura A.18.- Edificio de dependencias exteriores de la explotación.

La instalación eléctrica tiene como función principal la alimentación de los equipos de ventilación y de aire comprimido, cuando éstos se accionen de esa manera. Aunque en muchas galerías, tanto los ventiladores como los compresores de aire se accionan directamente por un motor diésel.

Hay que tener en cuenta la seguridad de la explotación, dado que se ubican en zonas despobladas y, están sometidas a robos y actos vandálicos, se podría proponer algún sistema de video vigilancia, aunque no hay experiencias previas. Mención aparte tienen los polvorines, hay que ubicarlos en el interior de la galería, en dos cajas fuertes, una para los detonadores y otra para el explosivo. Se recuerda la obligatoriedad de que la mina, tenga una puerta metálica exterior.

A.6.9 Documento de seguridad y salud

En el proyecto es necesario identificar a la empresa promotora de las obras, el centro de trabajo, trabajadores y las actividades y procesos. Dada la naturales de las operaciones

a realizar es necesario hacer un documento de seguridad y salud cuyo contenido debe contener “al menos los siguientes epígrafes”:

1. Introducción.

2. Objeto.

2.1 Ámbito de aplicación y variaciones respecto del documento anterior.

3. Datos generales de la actividad extractiva.

3.1 Identificación de la empresa.

3.2 Identificación del centro de trabajo.

3.3 Identificación de los trabajadores, cualificación y tipos de contrato laboral.

3.4 Identificación de las contratatas, y sus trabajadores.

3.5 Descripción de las actividades e identificación de los procesos.

4. Organización de la prevención.

4.1 Política preventiva.

4.2 Empresario.

4.3 Director facultativo.

4.4 Modalidad preventiva.

4.5 Recurso preventivo.

4.6 Representantes de los trabajadores y dedicación en materia de seguridad y salud.

4.7 Responsabilidades y funciones en materia preventiva.

4.8 Consulta y participación de los trabajadores.

5. Identificación de peligros derivados de la actividad.

5.1 Identificación de los lugares de trabajo.

5.2 Identificación de los puestos de trabajo.

5.3 Peligros en los lugares y puestos de trabajo.

6. Evaluación de riesgos laborales en la empresa.

6.1 Evaluación general de riesgos en la empresa.

6.2 Evaluación de riesgos por puestos de trabajo.

7. Prevención de riesgos en la empresa.

7.1 Planificación de la acción preventiva.

7.2 Medidas de prevención y protección para las condiciones generales y lugares de trabajo.

7.3 Medidas de prevención y protección para trabajadores singulares.

En la fase de explotación de la galería, para la verificación de la seguridad minera se analizará el grado de cumplimiento de acuerdo con las siguientes normativas:

- La Ley de Prevención de Riesgos Laborales 31/1995 y sus modificaciones posteriores.
- El Real Decreto 1215/1997, que establece las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo.
- El Real Decreto 1389/1997, por el que se aprueban las disposiciones mínimas destinadas a proteger la seguridad y la salud de los trabajadores en las actividades mineras.
- El Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera:
 - a. Las Instrucciones Técnicas Complementarias.
 - b. Especificaciones Técnicas.
- Normativas Autonómicas.
- Cuanta normativa técnica específica sea de obligado cumplimiento.

Al final del estudio, de seguridad minera de cada galería y con los datos obtenidos, se elaborará un informe en el que se establecerán las medidas de mejora y/o medidas correctoras a implantar por la empresa explotadora del recurso; para una mejor implantación y seguimiento de estas medidas, se priorizarán por orden de importancia.

A.6.10 Aspectos ambientales

Para los aspectos e impactos ambientales, hay que tener en cuenta la ubicación de la explotación y aplicar la normativa existente en materia de medioambiente, a la que está sometida el emplazamiento de la galería.

En el caso de las Islas Canarias, donde están situadas la mayoría de las explotaciones de estas características, es necesario aplicar evaluación de impacto ecológico, tanto a proyectos privados como públicos, que bien por su tipología o por razón de ubicación pudieran producir impacto, quedando afectados no sólo las grandes obras sino también los pequeños proyectos. La Ley 11/1990 de 13 de Julio de Prevención del Impacto Ecológico establece las distintas categorías de Evaluación a aplicar en función de la financiación, del lugar y de la actividad a realizar.

Inicialmente en este anejo, se contemplan las características generales del entorno donde se va a construir la explotación, inicialmente las geográficas, partiendo de la descripción del municipio, paraje o zona de actuación. Seguidamente se estudia el clima, la geología y

la hidrología, esta última atendiendo especialmente a la red de drenaje como los barrancos, nacientes etc. El inventario y la calidad ecológica de la flora y la fauna, es de especial importancia cuando se van a proyectar obras con la necesidad de construir nuevos accesos y caminos, dado que, se deben hacer desbroces, desmontes, terraplenes... incluyendo los impactos en la fase constructiva, tales como ruido, polvo etc. Finalmente hay que hablar del entorno social y económico, en este destaca la población, su evolución, economía. Dentro de este último apartado hay que indicar el patrimonio histórico y arqueológico, especialmente si la explotación va a interferir con el mismo.

Después de la descripción del entorno se procede a identificar y valorar los impactos generados por la construcción de una galería, los cuales se pueden enumerar de la siguiente manera:

1. Consumo de recursos.
2. Factores físicos.
 - a. Retirada de vegetación.
 - b. Desmonte y terraplenes para la construcción de accesos.
 - c. Excavación para emboquille de la mina.
 - d. Extracción de áridos de la perforación.
 - e. Vertederos de escombros.
3. Factores climáticos.
 - a. Emisión de polvo.
 - b. Gases.
 - c. Ruidos.
 - d. Vibraciones.
4. Paisaje.
 - a. Traza de los accesos.
 - b. Edificios y dependencias auxiliares.
 - c. Conducciones hidráulicas.
5. Impacto sanitarios, biológicos y químicos.
 - a. Afección a la fauna y la flora.
 - b. Residuos sólidos.
 - c. Contaminación por hidrocarburos.
 - d. Aguas residuales y contaminadas por restos de explosivos etc.

Hay que tener especial precaución en que la explotación de la galería no afecte a caudales superficiales alumbrados por manantiales. En ese caso, se estaría obteniendo por la mina, recursos que anteriormente se obtenían por los nacientes. Esto incluso puede suponer un perjuicio grave a agricultores o ganaderos que obtenían esos recursos de manera superficial.

Finalmente, hay que destacar que el éxito en una explotación de estas características supone el aumento de recursos hídricos para la población y sus actividades económicas, tales como la agricultura y el turismo, por lo tanto supone un impacto positivo en este sentido.

IMPACTO	FASE CONSTRUCCIÓN	FASE EXPLOTACIÓN
Consumo de recursos	N	P
Retirada de vegetación	P	N
Desmante y terraplenes para la construcción de accesos	S	N
Excavación para emboquille de la mina	S	N
Extracción de áridos de la perforación	P	N
Vertederos de escombros	P	N
Emisión de polvo	N	N
Gases	N	N
Ruidos	P	N
Vibraciones	P	N
Traza de los accesos	S	S
Edificios y dependencias	S	S
Conducciones hidráulicas	S	S
Afección a la fauna y la flora	N	N
Residuos sólidos	N	N
Contaminación por hidrocarburos	N	N
Aguas residuales y contaminadas por restos de explosivos etc.	P	N

Tabla A.6.- Impactos principales del proyecto de una galería, Nada significativo (N), Poco significativo (P), Significativo (S), Muy Significativo (M).

BIBLIOGRAFÍA y TRABAJOS CITADOS

193

- APPELO C.A.J., POSTMA D. (1993). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Balkema Publishers, Netherlands, 536 pp.
- ARAÑA V., LÓPEZ J. (1974). *Dinámica y Petrología de sus productos*. Madrid: Colección Colegio Universitario. Ediciones Istmo.
- BABIKER M., GUDMUNDSSON A. (2004). *The effects of dykes and faults on groundwater flow in an arid land: The Red Sea Hills, Sudan*; J. Hydrol. 297 256–273.
- BJANARSON, B., (1993). *Groundwater on Small Oceanic Islands. Some Problems and Solutions*. Comunicação apresentada no Seminário Recursos Hídricos e o Ambiente na Região Autónoma dos Açores. Câmara Municipal de Angra do Heroísmo. 10p.
- BOE (2003). Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios para la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. (BOE Nº 45 de 21 de febrero de 2003, 7228-7245).
- D'ALESSANDRO, W. (2006). *Human fluorosis related to volcanic activity: a review*. Transactions of the Wessex Institute, <http://dx.doi.org/10.2495/ETOX060031>.
- DREVER, J.I. (1997). *The geochemistry of natural waters: Surface and groundwater environments*. Prentice-Hall Inc.
- CABRERA, M.C.; JIMÉNEZ, J. & CUSTODIO, E. (eds) (2011). *El Conocimiento de los recursos hídricos en Canarias: cuatro décadas después del Proyecto SPA-15* [The knowledge of water resources in the Canaries: four decades after Project SPA-15]. Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo Español. Las Palmas de Gran Canaria, Spain.
- CARRACEDO, J.C., (2011). *Geología de Canarias*, I. Ed. Rueda. 398 p.
- CARRACEDO, J.C., TILLING, R. (2003). *Geología y volcanología de islas volcánicas oceánicas Canarias-Hawaii*. Tenerife: Servicio de Publicaciones de la Caja General de Ahorros de Canarias nº 293.
- CAMARGO, J.A. (2003). *Fluoride toxicity to aquatic organism: a review*. Chemosphere 50(3): 251-264.

- CONSEJO INSULAR DE AGUAS, CABILDO DE TENERIFE, (1996). Plan Hidrológico Insular.
- CUSTODIO, E., LLAMAS, M. R. (1976; 1983). *Hidrología Subterránea*. 2ª Edición Corregida. Volumen 1 y 2. Ed. Omega. Barcelona, 2359 pp.
- CUSTODIO, E. (1978). *Geohidrología de terrenos e islas volcánicas*. Centro de Estudios Hidrográficos e Instituto de Hidrología, 128, 303 pp., Madrid.
- CUSTODIO, E. (1985). *Low permeability volcanics in the Canary Islands (Spain)*. *Hydrogeology of Rocks of Low Permeability*. International Association of Hydrogeologists, Tucson, Arizona, 533-544.
- CUSTODIO, E. (1986). *Groundwater characteristics and problems in volcanic rock terrains. Isotope techniques in the study of hydrology of fractured and fissured rocks, Proceedings of An Advisor Group Meeting*, Agencia Internacional de la Energía Atómica, Viena.
- CUSTODIO E., HOPPE J., HOYOS-LIMÓN A., JIMÉNEZ J., PLATA A., UDLUFT P. (1987). *Aportaciones al conocimiento hidrogeológico de Tenerife utilizando isótopos ambientales*. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. Asociación Española de Hidrogeología Subterránea. Vol. XI, 263-280.
- CUSTODIO, E. (1987). *Ground water problems in coastal areas: studies and reports in hydrology*, nº 45, UNESCO, 595 pp.
- CUSTODIO E. (1988). *Hidrogeoquímica de Tenerife Island*. Revista Española de Hidrogeología. Asociación Española de Hidrogeología Subterránea, 3: 1-19
- CUSTODIO, E., JIMÉNEZ, J., ANTONIO, J., NUÑEZ, J., PUGA, L., BRAOJOS, J. (1991). Case Study No. 4: *Canary Islands. (Canary Island.) Hydrology and water resources on small island: A practical guide*. A. Falkand. UNESCO. 4, 339-355.
- CUSTODIO E., CABRERA, M.C. (2013). *Métodos de estudio hidrogeológicos e hidrogeoquímicos*, en *Hidrología y Recursos Hídricos en Islas y Terrenos Volcánicos*, (Santamarta, J.C., ed.) Colegio de Ingenieros de Montes: Madrid. 556 pp.
- CUSTODIO, E. (1995). *La gestión de los acuíferos costeros como fuente de un recurso importante y estratégico: progreso y futuro. Punto de vista del usuario*. En: Las aguas subterráneas en la Ley de aguas española: un decenio de experiencia. AIH. Madrid. 239-251.
- CUSTODIO, E. (2004). *Myths about seawater intrusion in coastal aquifers. Groundwater and saline intrusion*. 18 SWIM, Cartagena 2004. IGME. Madrid. 599-608.
- CUSTODIO, E. (2004). *Hydrogeology of volcanic rocks*, in: *Hydrogeology of Volcanic Rocks*, UNESCO, Paris, 395-425.
- CUSTODIO, E. (2007). Chapter 5 - *Groundwater in volcanic hard rocks*, in: *Groundwater in Fractured Rocks*. Selected papers from the Groundwater in Fractured rocks International Conference, Prague, 2003. Eds: Krásný, J. and Sharp, J.M. Taylor & Francis Group, London, UK. 95-108.
- CUSTODIO, E. (2010). *Coastal aquifers of Europe: an overview*. Hydrogeology Journal, 18, 269-280.
- DAHLGREN, R., SHOJI, S., & NANZYU, M., (1993). *Mineralogical characteristics of volcanic ash soils*. In S. Shoji, M. Nanzyo & R. Dahlgren (Eds.), *Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization* (pp. 288). Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V.

- DAHLGREN, R. A., SAIGUSA, M., & UGOLINI, F. C., (2004). *The nature, properties and management of volcanic soils*. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy*, Vol 82 (Vol. 82, pp. 113-182).
- DEPARTAMENTO DE PETROLOGÍA Y GEOQUÍMICA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS DE LA UCM. (2013). *Proyecto de Innovación y Mejora de la Calidad Docente (PIMCD-51)*. Consultado de <https://petroigne.wordpress.com/tiposrococos/clasificacion/rocas-volcanicas/>
- EFE (2013). *El CSIC halla en un mineral etíope la base para eliminar el flúor del agua*. Agencia EFE. Recuperado el 9 de abril: <http://www.efefuturo.com/noticia/un-mineral-etiope-tiene-la-base-para-eliminar-el-fluor-del-agua/>
- FALKLAND, A., E CUSTODIO, E., 1991. *Hydrology and water resources of small islands: a practical guide*. Ed. A. Falkland. UNESCO. 500p.
- FAO - ORGANIZACIÓN PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (2001). *Major Soils of the World*. ISRIC Wageningen, The Netherlands.
- FAO, 2006. *Evapotranspiración de cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Autores: Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. y Smith, M. Riego y Drenaje n° 56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 298 pp.
- FERNÁNDEZ-CALDAS, E. Y PÉREZ- GARCÍA, V. (1974). *Características químicas de las aguas subterráneas de las islas Canarias occidentales*. Centro de Edafología y Biología Aplicada de Tenerife (Consejo Superior de Investigaciones Científicas), Aula de Cultura de Tenerife, Santa Cruz de Tenerife: 67-71.
- FERNANDES, J.G.C., (1985). *Terceira (Açores). Estudo Geográfico*. Tese de doutoramento. Universidade dos Açores. p. 434 p.
- FLETCHER, C.H., MULLANE, R.A., AND RICHMOND, B.M., (1997). *Beach loss along armored shorelines of Oahu, Hawaiian Islands*. *Journal of Coastal Research*, v. 13, p. 209-215.
- FONTES, J.C., RODRIGUES, F.C., SANTAMARTA, J.C.,(2015). *Disponibilidad de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en la isla de Terceira*. En actas del II Workshop “Estudio, aprovechamiento y gestión del agua en terrenos e islas volcánicas”. (pp. 271-278). Las Palmas de Gran Canaria.
- FONTES, J. C. & PEREIRA, L. S. (2003). *Quantificação e simulação da erosão hídrica em solos vulcânicos. Relação com o uso do solo*. en: Ferreira, J. P. L.; Franco, A. B; Silva, R; Netto, O; Vaz, A. C.; Rodrigues, A. C. Cunha, L. V. E Leitão, T. (eds.) 6º SILUSBA: Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Praia, Cabo Verde: 399 - 411.
- FONTES, J. C., GONÇALVES, M. C. AND PEREIRA, L. S., (2004). *Andosols of Terceira, Azores: measurement and significance of soil hydraulic properties*. En: Arnalds, O. and Stahr, K. (eds.) Special Issue: Volcanic Soil Resources: Occurrence, Development and Properties. *Catena* 56: 145 - 154.
- FONTES, J. C. & PEREIRA, L. S. , (2003). *Quantificação e simulação da erosão hídrica em solos vulcânicos. Relação com o uso do solo*. en: Ferreira, J. P. L.; Franco, A. B; Silva, R; Netto,

O; Vaz, A. C.; Rodrigues, A. C. Cunha, L. V. E Leitão, T. (eds.) 6º SILUSBA: Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Praia, Cabo Verde: 399 - 411.

FONTES, J. C.; GONÇALVES, M. C. AND PEREIRA, L. S. (2004). *Andosols of Terceira, Azores: measurement and significance of soil hydraulic properties*. En: Arnalds, O. and Stahr, K. (eds.) Special Issue: Volcanic Soil Resources: Occurrence, Development and Properties. *Catena* 56: 145 - 154.

FRENCKEN, J.E. (editor) (1992). *Endemic Fluorosis in developing countries, causes, effects and possible solutions*. Publication number 91.082, NIPG-TNO, Leiden, The Netherlands.

GASPARINI A., FONTES J.C., CUSTODIO E., et al. (1990). *Example d'étude isotopique de circulations aquifères en terrain volcaniques sous climat semi-aride (Amurga, Gran Canaria)*. *Journal of Hydrology*, 114: 61-91.

GUERRA, J. A., ARBELO, C. D., ARMAS, C. M., RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, A., & MORA, J. L., (2003). *Erosión diferencial de Andosoles y Aridisoles en dos zonas climáticas de la isla de Tenerife*. *Edafología*, 10(2), 229-237.

GÓMEZ SANTOS G. (2000). *II Estudio Epidemiológico de la Salud Bucodental Infantil en Canarias*. 1998. Santa Cruz de Tenerife: Dirección General de Salud Pública, Servicio Canario de Salud, Consejería de Sanidad y Consumo.

GOBIERNO DE CANARIAS (2011). Informe Tecnoagua: *Evaluación de Tecnologías Potenciales de Reducción de la Contaminación de las Aguas de Canarias*. Universidad de La Laguna, pp. 266.

HARDISSON DE LA TORRE, A. Y REYES JORGE, J.P. (2003) *Estudio de los contenidos en ion fluoruro en dos zonas endémicas de fluorosis dental en las Islas Canarias*. *Alimentaria*, Noviembre: 43-48.

HEIDWEILLER, V. M. L. (1990). *Fluoride removal methods*. In: Proc. Symposium on Endemic Fluorosis in Developing Countries: Causes, Effects and Possible Solutions, ed: Frencken, J. E., Chapter 6, NIPG-TNO, Leiden, 51-85.

HERNÁNDEZ SUÁREZ, M. (2006). *El flúor en cifras: límites para el consumo y métodos de eliminación*. *El Manantial* 33. Fundación Centro Canario del Agua. Tenerife. 1-4.

HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ, L.E. (2015). *Caracterización geomecánica de las rocas volcánicas de las islas Canarias*. (Tesis doctoral). Universidad de La laguna. Tenerife.

HARGREAVES, G.H. , SAMANI, Z.A., (1982). *Estimating Potential Evapotranspiration*. Tech. Note. J. Irrig. Drain Eng., vol 108(3): 225-230.

HARGREAVES, G.H. Y SAMANI, Z.A. (1985). *Reference Crop Evapotranspiration from Temperature*. *Appl. Eng. Agric.*, vol 1(2): 96-99.

HERRERA, C. (2001). *Caracterización hidrogeoquímica del Macizo de Betancuria, Fuerteventura, Archipiélago de Canarias*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 225 pp.

IBÁÑEZ J.J.; EFFLAND, W.R. (2011). *Toward a Theory of Island Pedogeography: Testing the driving forces for pedological assemblages in archipelagos of different origins*, *Geomorphology*, Volume 135, Issues 3-4, 15, pp. 215-223.

- INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CANARIAS. (2013). *Proyecto Islhagua*. Recuperado de <http://www.islhagua.org/web/guest/ambito-geografico>.
- IPCC (2007). *Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, 104, Chapter: Climate change and its impacts in the near and long term under different scenarios, IPCC, Geneva, Switzerland, 43–54.
- JONG-HO, W., JI-WOOK, K., GI-WON, K., JIN-YONG, L. (2005). *Evaluation of hydrogeological characteristics in Jeju Island, Korea*. Geosciences Journal, Vol 9, nº1, pp. 33-46.
- JOIN, J.L., COUDRAY, J., LANGWORTH, K., 1997. *Using Principal Components Analysis and Na/Cl ratios to trace ground water circulation in a volcanic island, Reunion Island example*. Journal of Hydrology 190, 1 –18.
- LONDON, J. R., (1984). *Tropical Soil Manual*. Booker Agriculture. Londres: International Limited.
- LLOYD, E.F. E COLLIS, S.K., (1981). *Geothermal Prospection – Ilha Terceira, Açores*: Geological Report. Geothermal Energy New Zealand: Mitsubishi Corporation. Secretaria Regional do Comércio e Industria. 96 p.
- MARRERO, R. (2010). *Modelo Hidroquímico del Acuífero delas Cañadas del Teide, Tenerife, Islas Canarias*. Universidad Politécnica de Catalunya. Tesis doctoral.
- MARZOL, M.V., YANES, A., ROMERO, C., BRITO DE AZEVEDO, E., PRADA, S., MARTINS, A. (2005). *Los riesgos de las lluvias torrenciales de la Macaronesia (Azores, Madeira, Canarias y Cabo Verde)*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC). Serie A, nº5.
- MACHADO, F., (1959). *Submarine pits of the Azores plateau*. Bull. Volc. 21: 109-116.
- MADRUGA, J.S. (1995). *Características e génese do horizonte plácico em solos vulcânicos do arquipélago dos Açores*. Dissertação de doutoramento, Departamento de Ciências Agrárias, Universidade dos Açores, Angra do Heroísmo.
- MENDONÇA, J.L.L., (1991). *Prospeção de águas para o abastecimento da Madalena (Pico)*: obra nº 2318. Rel. Técnico Final. Sondagens e Fundações A. Cavaco. 19p.
- MENESES, J.G.A., (1993). *Hidrologia e Hidrogeologia da Ilha Terceira – Grandes Condiçōes*. Comunicação apresentada no Seminário Recursos Hídricos e o Ambiente na Região Autónoma dos Açores. Câmara Municipal de Angra do Heroísmo. 1-56.
- MENESES, J.G.A. RODRIGUES, F.C. (1993). *Recursos Hídricos numa Região Vulcânica Insular, o caso da ilha Terceira*. Anais do 2ª Congresso da Água , III: 161-174.
- MONTEITH, J.L. 1965. *Evaporation and Environment*. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology. University Press, Cambridge, (19): 205-234.
- MOPT, (1992). *Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología*. Serie Monografías de la Secretaría de Estado para las Políticas del Agua y del Medio Ambiente. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Madrid. 809 pp.
- MOORE, J.G., (1987). *Subsidence of the Hawaiian Ridge*, U.S. Geol. Surv., Prof Pap. 1350, 85-100.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION US, (2014). *Age of oceanic crust*. Recuperado de <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/crustageposter.gif>

- NASA, (2014). Image Gallery. Recuperado de <http://www.nasa.gov/multimedia/image-gallery/#.VEzWmxaQick>
- NAVARRO, J.M., FARRUJIA, I. (1989). *Zonificación hidrogeológica de Tenerife: Aspectos geológicos e hidrogeológicos*. Plan Hidrológico Insular, Cabildo de Tenerife, Vol. I, p.145.
- NELSON, S.T.; TINGEY, D.G.; SELCK B. (2013). *The denudation of ocean islands by ground and surface waters: The effects of climate, soil thickness, and water contact times on Oahu, Hawaii*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 103:276.
- NANZYU, M., SHOJI, S., & DAHLGREN, R., (1993). *Physical characteristics of volcanic ash soils*. In S. Shoji, M. Nanzyo & R. Dahlgren (Eds.), *Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization* (pp. 288). Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V.
- NERIS, J., (2011). *Capacidad de infiltración de los suelos de la isla de Tenerife: Evaluación de los factores implicados* (Vol. 29). La Laguna: Servicio de Publicaciones de la Universidad de La Laguna.
- NERIS, J., JIMÉNEZ, C., FUENTES, J., MORILLAS, G., & TEJEDOR, M., (2012). *Vegetation and land-use effects on soil properties and water infiltration of Andisols in Tenerife (Canary Islands, Spain)*. *Catena*, 98(0), 55-62. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2012.06.006>
- NERIS, J., TEJEDOR, M., FUENTES, J., & JIMÉNEZ, C., (2013^a). *Infiltration, runoff and soil loss in Andisols affected by forest fire (Canary Islands, Spain)*. *Hydrological Processes*, 27(19), 2814-2824. doi: 10.1002/hyp.9403
- NERIS, J., TEJEDOR, M., & JIMENEZ, C., (2013^b). *La infiltración en suelos volcánicos*. In J. C. Santamarta (Ed.), *Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos* (pp. 552). Tenerife, Spain: Colegio de Ingenieros de Montes.
- NERIS, J., TEJEDOR, M., RODRÍGUEZ, M., FUENTES, J., & JIMÉNEZ, C., (2013^c). *Effect of forest floor characteristics on water repellency, infiltration, runoff and soil loss in Andisols of Tenerife (Canary Islands, Spain)*. *Catena*, 108(0), 50-57. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2012.04.011>
- PÉREZ N.M., WAKITA H., NAKAI S., SANO Y., WILLIAMS S.N. (1994). *³He/⁴He isotopic ratios in volcanic-hydrothermal discharges from the Canary Islands, Spain*. *Mineralogical Magazine*, 58, 709-710.
- PÉREZ N.M., HANOR J.S., CHAN L.-H., STURCHIO N.C., MEANS J. (1995). *Sr isotope systematics for identifying sources of groundwater salinization in oceanic volcanic islands*. *Geol. Soc. Amer. Abstr.*, 27, 98.
- PONCELA R., (2015). *Hidrogeología del sistema acuífero volcánico de La Palma (islas Canarias)*. Tesis doctoral inédita. Universidad de Alicante. España.
- PONCELA, R. Y SKUPIEN, E. (en VPA, 2014). *Estudio de la situación hidrogeológica actual de las galerías: "El Altito" (T.M. de Valle Gran Rey) e "Ipalán" (T.M. de San Sebastián)*. Memoria y anexos. Viceconsejería de Pesca y Aguas. Gobierno de Canarias. 116 pp.
- REGALADO, C.M.; RITTER, A. (2010). Comment on "Fog precipitation and rainfall interception in the natural forests of Madeira Island (Portugal)". *Agr. Forest Meteorol.* 150: 133-134.

- REGALADO, C.M.; GARCÍA-SANTOS, G.; HERNÁNDEZ MORENO, J.M.; PÉREZ BUENAFUENTE, A. Y SOCORRO, A.R., (2003). *Caracterización de la zona no saturada de un bosque maduro de laurisilva en el Parque nacional de Garajonay: hidrofobicidad e implicaciones hidrológicas*, en Estudios de la Zona No Saturada del Suelo, vol VI, pp. 193-200.
- REGALADO, C.M., RITTER, A., (2010). Comment on “*Fog precipitation and rainfall interception in the natural forests of Madeira Island (Portugal)*”. *Agr. Forest Meteorol.* 150: 133-134.
- RITCHER B.C., KREITLER C.W. (1993). *Geochemical Techniques for Identifying Sources of Ground-Water Salinization*. Edited by C.M. Smoley, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, USA, 258 pp.
- RODRÍGUEZ WLADIMIRO, B. (1995). *Agricultura en Canarias*. Gran Canaria: Cabildo Insular. 129 p.
- RODRÍGUEZ PAZ, M., NERIS, J., TEJEDOR, M., & JIMENEZ, C., (2010). *Soil Temperature Regimes from Different Latitudes on a Subtropical Island (Tenerife, Spain)*. *Soil Science Society of America Journal*, 74(5), 1662-1669. doi: 10.2136/sssaj2009.0436
- RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, A., ARBELO, C. D., GUERRA, J. A., & MORA, J. L. (2002). *Erosión hídrica en Andosoles de las Islas Canarias*. *Edafología*, 9(1), 23-30.
- RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, A., GUERRA, A., ARBELO, C., MORA, J. L., GORRÍN, S. P., & ARMAS, C., 2004. *Forms of eroded soil organic carbon in Andosols of the Canary Islands (Spain)*. *Geoderma*, 121(3-4), 205-219. doi: 10.1016/j.geoderma.2003.11.009
- RODRIGUES, F.C., (1993). *Estudo Hidrogeológico da Ilha Terceira: contributo para o seu conhecimento*. Provas de Apt. Cap. Ped. Científica. Dep. Ciências Agrárias. Univ. dos Açores. p. 139.
- RODRIGUES, F.C. (2002). *Hidrogeologia da Ilha Terceira (Açores, Portugal)*. Tese de Doutoramento. Universidade dos Açores, Angra do Heroísmo. 500p.
- SANTANA PÉREZ, L.,(1987). *Precipitaciones de nieblas en Tenerife*. Simposio Internacional de Recursos hidráulicos Canarias Agua 2000. Puerto de La Cruz. Tenerife.
- SEIJAS, J. (1998): *Precipitación Horizontal en los Montes Canarios*. V Jornadas Forestales de Gran Canaria.
- SCHEMENAUER S. AND CERECEDA P. (1994). *The Role of Wind in Rainwater Catchment and Fog Collection*, In: *Water International*, 19.
- SANFORD, W.E., DOUGHTEN, M.W., COPLIN, T.B., HUNT, A.G., BULLEN, T.D. (2013). *Evidence for high salinity of Early Cretaceous sea water from the Chesapeake Bay crater*. *Nature*. 503(7475): p. 252-256. doi:10.1038/nature12714
- SANTAMARTA, J.C., RODRIGUES, F.C., QUADROS, S. (2015). *El flúor en las aguas de abastecimiento de la region de la Macaronesia: planteamiento del problema y vías de investigación abiertas*. En actas del II Workshop “*Estudio, aprovechamiento y gestión del agua en terrenos e islas volcánicas*”. (pp. 271-278). Las Palmas de Gran Canaria.
- SANTAMARTA, J.C., (2014). *Hidrología de las islas volcánicas*. *Montes: revista de ámbito forestal*, 116, 26-31.
- SANTAMARTA, J.C. et al. (2013a). *Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos*. Colegio de Ingenieros de Montes.

- SANTAMARTA, J.C.; NARANJO BORGES J. et al. (2013b). *Ingeniería forestal y ambiental en medios insulares*. Colegio de Ingenieros de Montes.
- SANTAMARTA, J.C. et al. (2012a). *Avances en la investigación de los recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos*. Colegio de Ingenieros de Montes.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C.; RODRÍGUEZ-MARTÍN, J. (2012c). *Obras hidráulicas en islas y terrenos volcánicos*. Ingeopress, 221, 26-33.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C. (2011). *Estudio y evaluación de las hidrotecnias e infraestructuras hidráulicas, para la prevención de la desertificación, en el Archipiélago Canario*. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, 32, 109-115.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C. (2009a). *Singularidades sobre la construcción, planificación y gestión de las obras y recursos hídricos subterráneos en medios volcánicos. Estudio del caso en las Islas Canarias occidentales*. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM). Universidad Politécnica de Madrid.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C.; SEIJAS, J. (2009b). *Fundamentos y tecnologías para la captación y uso del agua procedente de la lluvia horizontal en los Montes Canarios*. Revista Montes, Marzo. Madrid.
- SANTAMARTA J.C., PONCELA R., FONTES, J.C., (2014). *Surface Hydrology and Soil Conservation in Volcanic Islands; Strategies Against Climate Change*. Local and Regional Challenges of Climate Change Adaptation and Green Technologies, University of West Hungary Press, Hungary, pp. 75-79.
- SANTAMARTA J.C., LARIO-BASCONES R.J., RODRÍGUEZ-MARTÍN J., HERNÁNDEZ-GUTIÉRREZ L.E., (2014). *Introduction to Hydrology of Volcanic Islands*. IERI Procedia. ELSEVIER, 9, 135-140.
- SANTAMARTA J.C., RODRÍGUEZ-MARTÍN J., NERIS J. (2014). *Water Resources Management and Forest Engineering in Volcanic Islands*. IERI Procedia. ELSEVIER, 9, 129-134.
- SCHILLING, J.G., (1975). *Azores Mantle Blob: Rare-Earth evidence*. Earth and Planetary Science Letters, 25:103-115.
- SCHMINCKE, HANS-ULRICH E WIEBEL, M., (1972). *Chemical study of rocks from Madeira, Porto Santo and São Miguel and Terceira (Azores)*. N. Jarbuch F. Mineralogie Abhandlugen B.D., 117(3): 253-281.
- SCHILLING, J.G., (1975). *Azores Mantle Blob: Rare-Earth evidence*. Earth and Planetary Science Letters, 25:103-115.
- SCHMINCKE, HANS-ULRICH E WIEBEL, M., (1972). *Chemical study of rocks from Madeira, Porto Santo and São Miguel and Terceira (Azores)*. N. Jarbuch F. Mineralogie Abhandlugen B.D., 117(3): 253-281.
- SEARLE, R., (1980). *Tectonic pattern of the Azores spreading centre and triple junction*. Earth and Planet. Sc. Lett. 51 :415-434.
- SELF, S. E GUNN, B., (1976). *Petrology, Volume and Age Relations of alkaline and saturated Peralkaline volcanics from Terceira, Azores*. Contr. Min. Petrol., s.n., 54 (4): 293-313.
- SELF, S., (1976). *The recent volcanology of Terceira, Azores*. Jl. Geol. Soc. London. 132: 645-666.

- SELF, S., (1980). *Guide for field trip V2, Island of Terceira*. IAVCEI, International Symposium on the activity of Oceanic Volcanoes. Ponta Delgada.
- SELF, S., (1974). *Recent volcanism on Terceira, Azores*. PhD thesis. London University, Imperial College.
- SHOJI, S. et al. (1994). *Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization*. ELSEVIER. ISBN: 978-0-444-89799-2
- 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.
- SOLER LICERAS, C. (2004). *Obras y aprovechamientos hidráulicos*. Apuntes de la Asignatura. Universidad de La Laguna.
- SOLSONA, F., (1985). *Water defluoridation in the Rift Valley, Ethiopia*. UNICEF. Technical Report, Addis Ababa, 27 pp.
- STEINBERGER, B., (2000). *Plumes in a convecting mantle: Models and observations for individual hotspots*, Journal of Geophysical Research, Vol 105 (B5), pp. 11127-11152
- SZEKELY, J. & REITAN, O. H. (1971). *Dike filling by magma intrusion and by explosive entrainment of fragments*. Journal of Geophysical Research, 76(11), 2602-2609.
- SUÁREZ, F. (2015). *Minas de Agua en Gran Canaria (1501-1950)*. Cabildo de Gran Canaria. Consejo Insular de Aguas.
- SRUOGA, P. RUBINSTEIN, N., HINTERWIMMER, G. (2004). *Porosity and permeability in volcanic rocks: a case study*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. Vol 132, pp 31-43.
- TEJEDOR, M., NERIS, J., & JIMÉNEZ, C., (2013). *Soil Properties Controlling Infiltration in Volcanic Soils (Tenerife, Spain)*. Soil Sci. Soc. Am. J., 77(1), 202-212. doi: 10.2136/sssaj2012.0132
- THORNTHWAITE, C.W., 1948. *An approach toward a rational classification of climate*. Geogr. Rev., (38):55-94.
- VEEGER, A.I. (1991). *Geochemical methods for evaluating the origin and evolution of ground water in volcanic rocks*. Tesis Doctoral, University of Arizona. 241 pp.
- WESLEY, L. D. (1998). *Geotechnical characterization and behavior allophone clays*. University of Auckland, Auckland. New Zeland.
- WHO (2011). *Guidelines for drinking-water quality*. 4th edition. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data.
- WILSON, J.T., (1963). *A possible origin of the Hawaiian Islands*. Canadian Journal of Physics V. 41, p. 863-870.
- WON, J. H., LEE, J. Y., KIM, J. W., & KOH, G. W. (2006). *Groundwater occurrence on Jeju Island, Korea*. Hydrogeology Journal, 14(4), 532-547.
- WORTS, G.F., (1950). *Memorandum report on the development of an adequate ground-water supply for Lagens Air Force Base, Terceira I., Azores*. United States Department of Interior, Geological Survey Ground Water Branch.
- WORTS, G.F., (1974). *Formaciones Geológicas del Medio Atlántico, en lo que se refiere a las aguas subterráneas de la isla Terceira, Açores*. Comunicação apresentada no Simposio Internacional sobre Hidrologia de Terrenos Vulcanicos, Lanzarote.

LISTA DE TABLAS

- **TABLA 1.1.-** Progresión de las edades de las diferentes islas del archipiélago Canario (Carracedo, 2011).
..... 22
- **TABLA 1.2.-** Origen de diferentes islas volcánicas oceánicas.
..... 23
- **TABLA 1.3.-** Ciclo de vida de las islas volcánicas (con subsidencia importante como Hawái o sin ella, como Canarias) Adaptado de (Carracedo & Tilling, 2003).
..... 30
- **TABLA 1.4.-** Algunas características de las rocas volcánicas.
..... 35
- **TABLA 1.5.-** Tipo de lava y estructura volcánica común asociada.
..... 38
- **TABLA 1.6.-** Procesos volcánicos y productos asociados.
..... 40
- **TABLA 1.7.-** Denominación de los piroclastos en función del tamaño y forma.
..... 44
- **TABLA 2.1.-** Precipitaciones medias en diferentes sistemas insulares volcánicos.
..... 51
- **TABLA 2.2.-** Efectos del uso del terreno en los componentes del ciclo hidrológico en las islas.
..... 54
- **TABLA 2.3.-** Clasificación de la infiltración de los suelos de Tenerife. Fuente: (Neris, 2011).
..... 56
- **TABLA 2.4.-** Efectos de las lluvias torrenciales de los últimos años en sistemas insulares en diferentes latitudes.
..... 65
- **TABLA 3.1.-** Rangos de valores de los parámetros hidráulicos de diversos tipos de litologías y formaciones volcánicas, basados en los datos obtenidos del Proyecto SPA-15 (SPA-15, 1975) de Gran Canaria en Cabrera y Custodio (2013); (Custodio, 1985) en las Islas Canarias.
..... 76
- **TABLA 5.1.-** Sistemas de sostenimiento de galerías en función del problema geotécnico.
..... 115
- **TABLA 5.2.-** Sistemas de sostenimiento de galerías en función de la clasificación del macizo rocoso.
..... 119
- **TABLA 5.3.-** Grupos de terreno según el CTE.
..... 120
- **TABLA 5.4.-** Relación de las unidades geotécnicas de los terrenos volcánicos con respecto al CTE (Hernández-Gutiérrez, 2015).
..... 122
- **TABLA A.1.-** Estado de alineaciones de una galería de agua.
..... 172
- **TABLA A.2.-** Características técnicas de la dinamita Riodin (MAXAM).
..... 177
- **TABLA A.3.-** Efectos de la reducción del aumento del CO₂.
..... 181
- **TABLA A.4.-** Efectos de la reducción de oxígeno.
..... 183
- **TABLA A.5.-** Cálculo de caudales de ventilación en las galerías de agua.
..... 184
- **TABLA A.6.-** Impactos principales del proyecto de una galería.
..... 190

LISTA DE FIGURAS

- **FIGURA 1.1.-** La isla de Madeira, en la región de la Macaronesia. 20
- **FIGURA 1.2.-** Placas y dorsales oceánicas (USGS, U.S Geological Survey). 21
- **FIGURA 1.3.-** Archipiélago de Hawái, vista desde satélite (Wikipedia). 23
- **FIGURA 1.4.-** Islas y zonas volcánicas formadas a partir de la teoría del Punto Caliente (Steinberger, 2000). 24
- **FIGURA 1.5.-** Cono de escoria, en la isla de La Palma, erupción del Teneguía. 26
- **FIGURA 1.6.-** Estratovolcán del Teide, en Tenerife. 27
- **FIGURA 1.7.-** Lagos endorreicos en la isla de San Miguel, en Azores. 28
- **FIGURA 1.8.-** Cráter del volcán de San Antonio, en La Palma. 28
- **FIGURA 1.9.-** Caldera en la isla de El Hierro. 29
- **FIGURA 1.10.-** Restingolitas, productos volcánicos expulsados en la primera fase de la última erupción en la isla de El Hierro. 32
- **FIGURA 1.11.-** Barrancos en V, en la isla de Tenerife. (Foto cortesía Francisco Puerta). 32
- **FIGURA 1.12.-** Barrancos en la caldera de Taburiente, los procesos erosivos y la carga sólida presente es evidente. 32
- **FIGURA 1.13.-** Lava volcánica. 34
- **FIGURA 1.14.-** Diaclasado en el enfriamiento del basalto. 34
- **FIGURA 1.15.-** Rocas volcánicas, diagrama TAS (Departamento de Petrología y Geoquímica de la Facultad de Ciencias Geológicas de la UCM, 2013). 36
- **FIGURA 1.16.-** Rocas volcánicas, diagrama QAPF (Departamento de Petrología y Geoquímica de la Facultad de Ciencias Geológicas de la UCM, 2013). 36
- **FIGURA 1.17.-** Lavas cordadas. 37
- **FIGURA 1.18.-** Lavas "aa". 39
- **FIGURA 1.19.-** "Pilow lavas". 39
- **FIGURA 1.20.-** Piroclastos en las Cañadas del Teide. 41
- **FIGURA 1.21.-** Depósitos piroclásticos en Tenerife. 42
- **FIGURA 1.22.-** Bombas volcánicas en las Cañadas del Teide en Tenerife. 42
- **FIGURA 1.23.-** Relación entre la altura del ascenso del magma (h) y la anchura del dique (w), así como el tiempo de cristalización con respecto a w y el calor latente de cristalización (L) (Szekely & Reitan, 1971). 42
- **FIGURA 1.24.-** Dique geológico. 43

- **FIGURA 1.25.-** Dique geológico y depósitos piroclásticos. 43
- **FIGURA 2.1.-** Mar de nubes en la isla de Gomera. 46
- **FIGURA 2.2.-** Campos de cultivo de piña tropical en la isla de Oahu, Hawái. 46
- **FIGURA 2.3.-** Deslizamiento de ladera en la isla de Fuerteventura. 47
- **FIGURA 2.4.-** Deslizamiento debido a lluvias torrenciales en la isla de El Hierro. 47
- **FIGURA 2.5.-** Suelo volcánico formado sobre colada basáltica. 48
- **FIGURA 2.6.-** Lago y masa forestal en la isla de Terceira, Azores. 48
- **FIGURA 2.7.-** Captación de la precipitación de niebla u horizontal por hojas aciculares. 50
- **FIGURA 2.8.-** Arrastre de sólidos en un curso de agua de un barranco. 53
- **FIGURA 2.9.-** Tomadero de aguas de escorrentía en la isla de Terceira, Azores. 53
- **FIGURA 2.10.-** Mar de nubes en el Hierro. 61
- **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). 63
- **FIGURA 2.12.-** Erosión de ladera en la isla de Lanzarote. 68
- **FIGURA 2.13.-** Bancales en ladera, en la isla de La Gomera. 68
- **FIGURA 2.14.-** Sistema de aprovechamiento de agua y conservación de suelos tipo gavia en Lanzarote. 69
- **FIGURA 2.15.-** Erosión en costa, en la isla de Fuerteventura. 71
- **FIGURA 3.1.-** Zona de contacto entre formaciones y presencia de agua en la fisura. 77
- **FIGURA 3.2.-** Diferentes afloramientos de agua en coladas volcánicas fracturadas. 78
- **FIGURA 3.3.-** Alteración hidrotermal, coloquialmente conocida como los "azulejos", en la Caldera de Las Cañadas del Teide (Tenerife). 79
- **FIGURA 3.4.-** Naciente en la isla de Tenerife. 80
- **FIGURA 3.5.-** Buzamiento de coladas. 80
- **FIGURA 3.6.-** Afloramiento de aguas termales en la galería de la Fuente Santa en la isla de La Palma (Tenerife). 81
- **FIGURA 3.7.-** Familia de diques geológicos en el golfo de Frontera en el Hierro. 81
- **FIGURA 3.8.-** Diques en terrenos costeros erosionados en la isla de La Gomera. 82

- **FIGURA 3.9.-** Dique geológico dentro de galería y nomenclatura de números romanos utilizada por el Ingeniero Carlos Soler (2004) en sus perforaciones. 82
- **FIGURA 3.10.-** Paleosuelo o almagre en el Hierro. 84
- **FIGURA 3.11.-** Paleosuelo o almagre en el interior de una galería. 84
- **FIGURA 3.12.-** Cortes hidrogeológicos ideales de tres ambientes volcano-estructurales presentes en Tenerife (modificado de Navarro y Farrujia, 1989; de Marrero, 2010). En B y C se puede advertir la sobreelevación del nivel freático en el núcleo de la dorsal debido a que es la zona de mayor intrusión de diques. 85
- **FIGURA 3.13.-** Deslizamiento de El Golfo en la isla de El Hierro. 87
- **FIGURA 3.14.-** Galería de agua que ha alcanzado el "mortalón" o depósitos de avalancha. (foto cortesía de Rafael Fenoll). 87
- **FIGURA 3.15.-** Naciente en Tenerife. (Foto cortesía Francisco Puerta). 88
- **FIGURA 3.16.-** Limpieza de canal debido a la precipitación de carbonatos. 93
- **FIGURA 4.1.-** Sección del pozo-galería Los Padrones, en El Hierro. 101
- **FIGURA 4.2.-** Galería de naciente, en el monte de Las Mercedes en La Laguna, Tenerife. 101
- **FIGURA 4.3.-** Acceso a un pozo-galería. 104
- **FIGURA 4.4.-** Pozo tradicional canario. (Foto cortesía de Rafael Lario). 104
- **FIGURA 4.5.-** Caña del pozo revestida. 105
- **FIGURA 4.6.-** Entubado de un sondeo. 106
- **FIGURA 4.7.-** Diferentes coronas para la ejecución del sondeo. 107
- **FIGURA 5.1.-** Martillo percutor con empujador hidráulico. (Foto cortesía de Rafael Lario). 110
- **FIGURA 5.2.-** Tramo de galería en construcción por parte de la Administración. 110
- **FIGURA 5.3.-** Dique geológico en la traza de la galería. 111
- **FIGURA 5.4.-** Agua de repisa. 111
- **FIGURA 5.5.-** Evacuación de caudales durante la ejecución de la galería. 112
- **FIGURA 5.6.-** Máquina para la ejecución de sondeos. 116
- **FIGURA 5.7.-** Sección de la Galería de la Fuente Santa. 116
- **FIGURA 5.8.-** Inyectado en la traza de la galería. 117
- **FIGURA 5.9.-** Gunitado en la sección de la mina. 117

- **FIGURA 5.10.-** Refuerzo de la sección de la galería mediante bloques. 117
- **FIGURA 5.11.-** Traza de una galería en la zona de depósitos de avalancha (Cortesía de Rafael Fenoll). 118
- **FIGURA 5.12.-** Sección colapsada en la traza de la galería. 118
- **FIGURA 5.13.-** Depósitos coluviales en la traza de la galería. 121
- **FIGURA 5.14.-** Problema de caída de prismas basálticos en la sección de la galería. 123
- **FIGURA 5.15.-** Sondeos verticales en la traza de la galería de Ipalán en La Gomera. 124
- **FIGURA 5.16.-** Piezómetro en la traza de la galería. 126
- **FIGURA 5.17.-** Cierre de hormigón en la galería de Ipalán, en la Gomera. 127
- **FIGURA 5.18.-** Cierre en la galería de Los Padrones en El Hierro. 127
- **FIGURA 6.1.-** Detonadores para uso en galerías de agua. 130
- **FIGURA 6.2.-** Frente tras la pega de explosivos. 131
- **FIGURA 6.3.-** Caja fuerte para el almacenaje de los explosivos. 131
- **FIGURA 7.1.-** Tubería flexible de ventilación. 134
- **FIGURA 7.2.-** Archetado de la sección de una galería. 138
- **FIGURA 7.3.-** Convoy de vagonetas y espacio disponible de paso en la sección de la galería. 139
- **FIGURA 7.4.-** Comprobación del funcionamiento de la ventilación. 139
- **FIGURA 7.5.-** Detector personal de gases dentro de la galería. 141
- **FIGURA 7.6.-** Instalaciones de ventilación y de aire comprimido en una galería. 141
- **FIGURA 7.7.-** Motor generador de energía para la instalación. 142
- **FIGURA 7.8.-** Lámparas de carburo. 143
- **FIGURA 7.9.-** Vista desde el fondo de un pozo canario y sus instalaciones de bombeo de aguas. 145
- **FIGURA 7.10.-** Galería de agua abandonada. 147
- **FIGURA 7.11.-** Cartel obligatorio de información sobre la galería y peligros. 147
- **FIGURA 7.12.-** Sistema de cierre de acceso a la galería con panel informativo. 149
- **FIGURA 7.13.-** Extintor en la sección de la mina de agua. 149

- **FIGURA A.1.-** Mapa de situación y longitud de galerías en la isla de Tenerife (Consejo Insular de Aguas de Tenerife).
..... 154
- **FIGURA A.2.-** Tanquilla para aforo y control de caudales alumbrados.
..... 156
- **FIGURA A.3.-** Ubicación de galería y construcción de acceso a la explotación.
..... 160
- **FIGURA A.4.-** Zona escoriácea en la traza de la mina con problemas de sostenimiento.
..... 168
- **FIGURA A.5.-** Anchurón para cambio de maquinaria y vagonetas.
..... 168
- **FIGURA A.6.-** Equipo electrógeno para suministro energético de la obra.
..... 171
- **FIGURA A.7.-** Secciones de las galerías ejecutadas por la Administración con dimensiones “sensiblemente” mayores que las ejecutadas por la iniciativa privada.
..... 171
- **FIGURA A.8.-** Lámparas de carburo de acetileno, ampliamente utilizadas en la actualidad en la minería del agua.
..... 171
- **FIGURA A.9.-** Trazado en planta y rumbos de una galería en Tenerife.
..... 172
- **FIGURA A.10.-** Vagoneta tipo “cuna”.
..... 173
- **FIGURA A.11.-** Railes en proceso de oxidación al estar “embebidos” en el agua de repisa de la mina.
..... 173
- **FIGURA A.12.-** Perforación de barrenas para la introducción de explosivos. (Foto cortesía de Rafael Lario).
..... 175
- **FIGURA A.13.-** Revestimiento con bloques de hormigón macizo.
..... 179
- **FIGURA A.14.-** Ventilación flexible para adecuar la atmósfera de la mina en el proceso constructivo de la misma.
..... 182
- **FIGURA A.15.-** Medidor personal de gases en la mina.
..... 182
- **FIGURA A.16.-** Grifo de aire comprimido a lo largo de la traza de la mina.
..... 185
- **FIGURA A.17.-** Grupo motor.
..... 185
- **FIGURA A.18.-** Edificio de dependencias exteriores de la explotación.
..... 186

