

**Caracterización hidrogeoquímica del Macizo de Betancuria, Fuerteventura,
Archipiélago de Canarias.**

TESIS PRESENTADA POR:
Christian Herrera Lameli

DIRIGIDA POR:
Dr. Emilio Custodio Gimena

Barcelona, Abril de 2001

*A la memoria de mi
Madre Joise Lameli Reyes por
su infinito cariño. Muchas
gracias mamá.*

Agradecimientos

En primer lugar deseo expresar mi profundo agradecimiento al Dr. Emilio Custodio Gimena, director de esta tesis y Catedrático de Hidrología Subterránea de la Universidad Politécnica de Cataluña, por haberme enseñado el camino de investigación en la ciencia de la hidrogeología. Por todos los consejos y sugerencias que me dio, por sus enseñanzas, por el ánimo que me entregó en momentos difíciles y sobre todo por la confianza que depositó en mi persona para realizar esta investigación. Le doy mis más sinceros agradecimientos.

El autor agradece al Excelentísimo Cabildo Insular de Fuerteventura la financiación de esta investigación. También agradece al Sr. Roberto Hernández, responsable del Consejo Insular de Aguas de Fuerteventura por todas las facilidades para poder trabajar en este organismo durante mis estancias en la Isla.

También deseo expresar mi gratitud a la Universidad Católica del Norte por haber financiado el estudio de doctorado en España. Particularmente mi agradecimiento sincero a mi amigo Mario Pereira Arredondo, quien gestionó hasta el cansancio mi partida hacia Barcelona y se preocupó del bienestar económico de mi familia durante nuestra estancia en esta ciudad. También le agradezco al Sr. Guillermo Chong Díaz la realización del contacto inicial en Barcelona para poder realizar mis estudios en la Universidad Politécnica de Cataluña.

Mi agradecimiento a Marisol Manzano por todas las sugerencias que planteó en el curso de esta investigación y especialmente durante el trabajo de investigación realizado en el Curso Internacional de Hidrología Subterránea.

Mi gratitud también al Sr. Emilio LaMoneda, Jefe de la Oficina de Proyectos en Canarias del Instituto Geológico y Mínero de España, por las distintas gestiones que realizó para la financiación del proyecto en Fuerteventura.

Mi agradecimiento especial a los señores Francisco Javier Martínez, Xavier Riera y Jordi Sánchez por haberme acompañado en las distintas campañas de campo y por haber colaborado desinteresadamente en distintas labores de esta investigación. Deseo agradecer de modo especial a Jordi Sánchez la amabilidad que ha tenido de compaginar la tesis durante mi ausencia. Muchas gracias compañeros.

También un agradecimiento sincero a mi buen amigo Javier Lambán por la amistad que me brindó desde mi llegada a Barcelona y por toda la ayuda que me dio para poder sortear distintas dificultades que se presentan en un país extranjero.

Mi gratitud también para la Sra. Pilar de la Fuente, directora del Laboratorio de Aguas del ITGE por toda su entrega en la realización de los análisis químicos, que en muchos casos no estuvieron exentos de dificultades analíticas por las características propias de las aguas. También mi reconocimiento a la Sra. Maria Fé Díaz Teijeiro, jefa del Laboratorio Isotópico del CEDEX por su labor en la realización de los análisis isotópicos, así como su buena disposición para realizar rápidamente dichos análisis.

El autor agradece al Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica de la Universidad Politécnica de Cataluña por haberme acogido en sus aulas para realizar mis estudios de doctorado. Mi agradecimiento especial a Lucila Candela y Vera Pawlowsky por haberme ayudado en el tema del análisis multivariante. También agradezco a los compañeros que trabajaron conmigo en el departamento y que muchas veces me brindaron su apoyo: Enrique Vázquez, Mónica Enrich, Xavi Sánchez Vila, Jordi Sánchez Vila, Amaranta Marcuello, Felipe Delgado, Lurdes Martínez, Jose Bolzicco, Alfredo Pérez y Agustín Medina. Un especial agradecimiento a Leonardo Almagro y Eurne Lozano por haberme brindado su amistad y animado en momentos difíciles.

También Agradezco a mis amigos Juan José Pueyo y Alberto Saez por toda la ayuda que me brindaron en la Facultad de Geología de la Universidad de Barcelona. Un especial agradecimiento a Alberto y su esposa Ana, quienes desde mi llegada a Barcelona me brindaron toda su amistad y compartieron con toda mi familia momentos inolvidables.

Mi gratitud también para mi amiga Margarida Valverde por toda la ayuda que me brindo durante la realización del Curso internacional de Hidrología Subterránea y por su buena voluntad para ayudarme a buscar distinta documentación relacionada con esta investigación.

Resumen

La Isla de Fuerteventura se sitúa en el borde oriental del Archipiélago de Canarias, a sólo 100 km del continente africano. Presenta un relieve topográfico relativamente suave respecto a las otras islas del Archipiélago, lo que unido a su proximidad a la costa del Sahara explican el carácter árido del clima imperante. La precipitación media anual en las partes más altas no supera los 200 mm y la temperatura media anual en las zonas costeras es de 20,4°C.

Los estudios hidrogeológicos en la Isla son muy escasos y en general se limitan a la realización de inventarios de captaciones de agua subterránea y a la determinación de la calidad química de las mismas. Los primeros reconocimientos hidrogeológicos corresponden a trabajos introductorios acerca de la calidad química de las aguas e inventarios de captaciones (proyectos SPA-15, 1975; MAC-21, 1982). Posteriormente el ITGE (1991) realizó un estudio hidrogeológico, enfocado principalmente al inventario de los sondeos profundos construidos masivamente en toda la Isla a partir del año 1984.

El sector estudiado se sitúa en la parte central de la Isla y abarca gran parte del Macizo de Betancuria y de la Depresión Central. A partir de la distribución de las unidades geológicas e hidrogeológicas más importantes se ha dividido el área de estudio en dos dominios principales: un Dominio Occidental, constituido por rocas volcánicas e intrusivas del Complejo Basal (Cretácico Superior – Mioceno Inferior) y un Dominio Oriental, compuesto por lavas del Edificio Gran Tarajal (Mioceno) y por depósitos volcánicos (Pleistoceno-Holoceno) que conforman el Malpaís.

Se ha realizado una estimación de la recarga por medio de un balance hidrometeorológico de precipitación diaria y por medio de un balance de cloruros. Los cálculos obtenidos a partir del balance hidrometeorológico indican que la recarga varía significativamente según la situación espacial de cada punto, obteniéndose valores entre un 5 y 20% de la precipitación en las partes más altas, mientras que en las zonas más bajas ésta es casi nula. Por otro lado, el cálculo obtenido a partir del balance de cloruros indica que en ciertas zonas más bajas, donde posiblemente se registran importantes encharcamientos de aguas de tormenta, la recarga puede ser mayor, alcanzando entre un 9 y 19% de la precipitación.

En el Dominio Occidental las aguas subterráneas se caracterizan por presentar un aumento de la salinidad con la profundidad. Así se puede diferenciar una Unidad Superior, que contiene aguas de menor conductividad eléctrica (2.5-5.5 mS/cm) y temperaturas que varían entre los 18 y los 25 °C, y una Unidad Inferior, con aguas de mayor conductividad eléctrica (5.5-24 mS/cm) y temperaturas variables entre los 25 y 30 °C. Las aguas de la Unidad Superior son del tipo clorurado-sódico que en general presentan una alcalinidad moderada y bajos contenidos de sulfato y sílice. La concentración de nitrato en estas aguas es variable de un punto a otro, pero en la mayoría de los casos se sospecha una componente

antrópica asociada a usos agropecuarios. Las aguas más salinas de la Unidad Inferior son de tipo clorurado-sulfatado-sódico. Los contenidos de sílice son altos y los contenidos de nitrato están ausentes, salvo por alguna concentración menor como consecuencia de la mezcla de aguas de la Unidad Superior y Unidad Inferior dentro de los sondeos.

La elevada salinidad en las aguas de la Unidad Superior responde principalmente al efecto de la aridez climática que se registra en la Isla y localmente a efectos puntuales de retornos de riego. A partir de la modelación hidrogeoquímica realizada con el programa PHREEQC se deduce que la aridez climática tiene su efecto en una mayor concentración del agua de lluvia como consecuencia de la evaporación. En menor medida existe una aportación como consecuencia de la interacción agua-roca, que se traduce principalmente en una aportación de sodio como consecuencia de la alteración de las plagioclasas. No obstante, para las muestras más salinas de la Unidad Inferior es necesario considerar otros orígenes para la salinidad. A partir de la interpretación de la relación rCl/rBr , del estudio de los isótopos del agua (^{18}O y deuterio), de las relaciones iónicas más importantes y de la modelación hidrogeoquímica se ha deducido un origen de la salinidad debido a la mezcla con agua marina. Esta correspondería a agua marina relicta presente en las rocas intrusivas del Complejo Basal. La menor permeabilidad que presentan las unidades intrusivas explicaría la existencia de agua de origen marino por sobre el nivel del mar, como resto de momentos en que el océano estuvo relativamente más alto. Estas aguas también presentan contenidos elevados de sulfatos los cuales tienen un origen distinto, asociado a la disolución de sulfatos de origen ígneo.

Las aguas de menor mineralización reconocidas en el Dominio Oriental son representativas del agua de la recarga y también presentan una composición marcadamente clorurado-sódica, con valores de las relaciones iónicas más próximos a los valores de la precipitación. En general los valores de las relaciones iónicas de estas aguas se aproximan más a los valores del agua de lluvia que a las muestras obtenidas en la Unidad Superior, lo que se atribuye a la más rápida renovación y menor solubilidad de los materiales que componen las lavas recientes del Malpaís.

A partir de la integración del estudio de la piezometría, de la interpretación de los análisis químicos e isotópicos de las aguas, del análisis de perfiles de temperatura y conductividad eléctrica en sondeos y de la interpretación de la distribución de las unidades geológicas en el subsuelo se ha establecido un modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del acuífero. Esta hipótesis de funcionamiento del acuífero explica razonablemente bien los resultados expuestos anteriormente.

Abstract

The island of Fuerteventura is placed in the eastern limit of the Canarian Archipelago, only 100 km far from the African Continent. It has a relatively smooth topographic relief when compared to the other islands of the Archipelago. This and the closeness to the Sahara coast explain the dominantly arid climate. The average yearly precipitation at the highest areas is less than 200 mm, and the average yearly temperature near the coast is 20,4 °C.

There are very few hydrogeological studies of the Island, and generally they reduce to inventories of water wells and some analyses of groundwater. The first hydrogeological surveys are preliminary studies on water chemical quality and inventories of wells (Projects SPA-15, 1975; MAC-21, 1982). Later on the ITGE (1991) carried out a hydrogeological study, mainly directed to the survey of the deep boreholes drilled in large number in the whole island since 1984.

The study area is in the central part of the Island and comprises a large part of the Massif of Betancuria and the Central Depression. Following the distribution of the most important geological and hydrogeological Units, the study area has been divided in two main subareas: a western subarea formed by volcanic and intrusive rocks of the Basal Complex (Upper Cretaceous-Lower Miocene) and an eastern subarea formed by lavas of the Gran Tarajal Edifice (Miocene) and volcanic deposits (Pleistocene-Holocene) which form the Malpais (badlands).

Recharge has been estimated by means of a hydrometeorological balance using daily rainfall, and by balance of chlorides. The hydrometeorological balance calculations show that recharge varies significantly after the location. Results indicate recharge values of 5 to 20% of precipitation in the highlands, but it is almost nil in the lowlands. Furthermore, the results of the chloride balance shows that in some low altitude areas, where storm water seems to produce important impoundings, recharge may be greater, attaining 9 to 19% of precipitation.

In the western subarea groundwaters are characterised by an increasing salinity with depth. Thus, it is possible to differentiate an Upper Unit, containing waters of lower electrical conductivity (2.5 to 5.5 mS/cm) and temperatures between 18 and 25°C, and a Lower Unit, with groundwaters with a higher electrical conductivity (5.5 to 24 mS/cm) and temperatures between 25 and 30°C. Groundwaters from the Upper Unit are of the sodium-chloride type with generally a moderate alkalinity and low sulphate and silica contents. Nitrate contents of these waters varies from point to point, but in most cases an anthropic

component is suspected, which is associated to farming activities. The more saline groundwaters of the Lower Unit are of the sodium-chloride-sulphate type, except for some one which is more diluted as a consequence of the mixture of waters from the Upper and Lower Units inside the boreholes.

The high salinity of groundwater from the Upper Unit is mainly the result of the island's climatic aridity, and locally to point effects of excess irrigation water. From the hydrochemical modelling carried out with the code PHREEQC it is deduced that climatic aridity produces an intense evaporation concentration of rainfall. To a lesser extent there is a contribution due to rock-water interaction, which corresponds mostly to plagioclase weathering. However, the more saline waters in the Lower Unit have to be explained by means of other salinity origins. From the interpretation of the r_{Cl}/r_{Br} ratio, the study of water isotopes (^{18}O and deuterium), the most important ionic ratios and chemical modelling, the salinity can be linked to the admixture with sea water. This sea water seem to be relict and it is found in the intrusive rocks of the Basal Complex. The smaller permeability of the intrusive units may explain the presence of seawater above present sea level, as remnants of moments in which the ocean was relatively at a higher elevation. These waters also present high sulphate contents. The sulphate has a different origin, which is associated to the dissolution of sulphates of igneous origin.

Groundwaters of a lower salinity found in the eastern subarea represent recharge water and also have a marked sodium-chloride composition, with ionic ratios which are closer to those of precipitation. Generally the ionic ratios of these waters are closer to those of rainfall than the samples from the Upper Unit. This is explained by the faster turnover time and low solubility of the materials of the Malpais recent lavas.

By integrating the piezometric study, the interpretation of water chemical and isotopic analyses, the analysis of temperature and electrical conductivity borehole logs, and the interpretation of underground distribution of geological units, a conceptual model of the aquifer hydrogeological functioning has been established, which explains reasonably well the results commented above.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Situación.....	2
1.4 Uso del agua y del agua subterránea en Fuerteventura.....	2
1.5 Datos básicos sobre Fuerteventura.....	5
1.6 Fisiografía del área de estudio.....	8
1.7 Investigaciones previas.....	10
1.8 Metodología general de investigación.....	10

Capítulo 2

Geología

2.1 Introducción.....	13
2.2 Investigaciones previas.....	13
2.3 Marco geológico de la isla de Fuerteventura.....	14
2.3.1 Complejo Basal.....	14
2.3.2 Fase Miocena	16
2.3.3 Fase Pliocena	16
2.3.4 Fase Pleistocena Inferior.....	18
2.3.5 Fase Pleistocena Media - Holocena	18
2.4 Geología del área de estudio.....	20
2.4.1 Complejo Basal.....	20
2.4.2 Estratovolcán de Gran Tarajal (Fase Miocena).....	26
2.4.3 Edificio Morro Valdés (Fase Pliocena Inferior).....	27
2.4.4 Rasa Marina.....	28
2.4.5 Volcanismo Reciente (Fase pleistocena media-holocena).....	28
2.4.6 Depósitos de caliche.....	29
2.4.7 Depósitos aluviales y coluviales.....	29
2.5 Geología del subsuelo.....	30
2.5.1 Complejo Basal.....	30
2.5.2 Edificio Gran Tarajal.....	31
2.5.3 Unidades sedimentarias y volcánicas del Pleistoceno-Holoceno.....	31

Capítulo 3

Marco Hidrogeológico

3.1 Introducción.....	33
3.2 Características hidrogeológicas de las formaciones volcánicas.....	33
3.3 Inventario de los puntos de agua.....	34
3.3.1 Datos recopilados.....	34

3.3.2 Datos inventariados.....	35
3.3.3 Características de los diferentes puntos de agua.....	36
3.4 Geometría del acuífero.....	37
3.5 Características hidrogeológicas de los materiales.....	40
3.6 Caracterización de la recarga.....	42
3.6.1 Balance hidrometeorológico.....	43
3.6.2 Balance de cloruros en estado estacionario.....	45
3.7 Piezometría.....	50
3.8 Modelo conceptual.....	52

Capítulo 4

Investigación Hidrogeoquímica

4.1 Introducción.....	55
4.2 Metodología.....	55
4.2.1 Sistemática de muestreo del agua de lluvia.....	55
4.2.2 Sistemática de muestreo del agua subterránea.....	57
4.2.3 Determinaciones químicas de campo.....	57
4.2.4 Determinaciones químicas en laboratorio.....	58
4.2.5 Análisis multivariante.....	59
4.3 Caracterización química de la precipitación.....	60
4.3.1 Metodología.....	60
4.3.2 Caracterización química general.....	61
4.3.3 Estudio de la aportación marina.....	66
4.3.4 Cuantificación de la aportación atmosférica.....	70
4.3.5 Análisis multivariante.....	73
4.3.6 Agua de charcos y escorrentía superficial.....	78
4.3.7 Discusión.....	79
4.4 Características generales de la química del agua en terrenos volcánicos.....	81
4.5 Caracterización química del agua subterránea.....	82
4.5.1 Datos disponibles.....	82
4.5.2 Determinación de algunas características hidroquímicas del Macizo de Betancuría a partir de los datos del proyecto MAC-21.....	83
4.5.3 Registros de conductividad eléctrica y temperatura en los sondeos.....	87
4.5.4 Caracterización de la composición iónica.....	95
4.5.5 Características generales de las aguas deducidas del Diagrama de Piper.....	105
4.5.6 Estudio de algunos parámetros químicos de interés.....	107
4.5.7 Relaciones iónicas.....	109
4.5.8 Estados de saturación.....	120
4.5.9 Diagramas de equilibrio.....	122
4.5.10 Modelación de las reacciones.....	127
4.5.11 Análisis multivariante.....	140
4.5.12 Discusión.....	146

Capítulo 5

Isótopos Ambientales

5.1 Introducción.....	151
5.2 Estudio del ^{18}O , ^2H y tritio.....	152
5.2.1 Datos isotópicos (^{18}O - ^2H -tritio) de la precipitación.....	152
5.2.2 Datos isotópicos (^{18}O - ^2H -tritio) del agua subterránea.....	153
5.2.3 Estudio isotópico de la precipitación.....	154
5.2.4 Estudio de la relación $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ del agua subterránea.....	160
5.2.5 Estudio de la relación entre los contenidos isotópicos y la salinidad.....	168
5.2.6 Tritio.....	169
5.2.7 Discusión.....	173
5.2.8 Conclusiones.....	174
5.3 Estudio de los isótopos de ^{13}C y ^{14}C	175
5.3.1 Generalidades.....	175
5.3.2 Introducción teórica.....	176
5.3.3 Muestreo del CO_2 del suelo.....	178
5.3.4 Caracterización del $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ del suelo.....	178
5.3.5 Presentación de datos de ^{13}C y ^{14}C del agua subterránea	180
5.3.6 Caracterización del $\delta^{13}\text{C}_{\text{CIDT}}$ del agua subterránea.....	181
5.3.7 Caracterización del $\delta^{14}\text{C}$ del agua subterránea.....	186
5.3.8 Conclusiones.....	188
5.4 Estudio del $\delta^{34}\text{S}$ y de $\delta^{18}\text{O}$ del sulfato disuelto.....	189
5.4.1 Generalidades.....	189
5.4.2 Presentación de datos.....	189
5.4.3 Estudio de los datos de $\delta^{34}\text{S}$ en el sulfato disuelto.....	190
5.4.4 Estudio de la relación $\delta^{34}\text{S}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ del sulfato disuelto.....	194
5.4.5 Conclusiones.....	194

Capítulo 6

Discusión General

6.1 Introducción.....	197
6.2 Recarga.....	197
6.3 Precipitación.....	198
6.4 Aguas subterráneas.....	199
6.4.1 Dominio Occidental.....	199
6.4.2 Dominio Oriental.....	211
6.5 Síntesis general.....	214

Capítulo 7

Conclusiones.....	215
-------------------	-----

Bibliografía.....	219
-------------------	-----

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1 Situación de la isla de Fuerteventura y límites del área de estudio. Los contornos muestran la elevación en m.

Figura 1.2 Mapa de isoyetas medias anuales de la isla de Fuerteventura elaborado a partir de datos pluviométrico correspondientes al período 1954-1972 (modificado de SPA-15, 1973).

Figura 1.3 Distribución de las principales unidades fisiográficas del área de estudio.

Figura 2.1 Extensión superficial de los materiales del Complejo Basal en la isla de Fuerteventura (tomado de IGME, en prensa).

Figura 2.2 Extensión superficial de los edificios volcánicos miocenos en la isla de Fuerteventura (tomado de IGME, en prensa).

Figura 2.3 Extensión superficial de los afloramientos volcánicos del Plioceno - Pleistoceno Inferior en la isla de Fuerteventura (tomado de IGME, en prensa).

Figura 2.4 Extensión superficial de los materiales volcánicos del Pleistoceno Superior – Holoceno en la isla de Fuerteventura (tomado de IGME, en prensa).

Figura 2.5 Mapa geológico del área de estudio (modificado de IGME, en prensa).

Figura 2.6 Corte geológico general W-E del área de estudio. Ver situación geológica en la Figura 2.5.

Figura 2.7 Columna estratigráfica general de los materiales sedimentarios y volcánicos del Complejo Basal (tomada de Fuster et al., 1980).

Figura 2.8 Corte geológico esquemático del edificio Gran Tarajal (tomado de Ancochea *et al.*, 1991). 1. Complejo Basal.-2. Serie I Inferior.-3. Serie I Intermedia.-4. Serie I Superior.-5 Serie I Tardía.-6. Diques.

Figura 2.9 Corte geológico B-B' de la zona de Tuineje. Ver situación geológica en la Figura 2.5.

Figura 2.10 Corte geológico C-C' del sector del Malpaís. Ver situación geológica en la Figura 2.5.

Figura 2.11 Corte geológico dirección E-W del sector de Malpaís en Pozo Negro. Ver situación geológica en la Figura 2.5.

Figura 3.1 Corte hidrogeológico esquemático W-E del área de estudio. Escala vertical exagerada.

Figura 3.2 Corte hidrogeológico esquemático del sector del Malpaís. Escala vertical exagerada.

Figura 3.3 Curvas características de recarga versus reserva útil para cada uno de los pluviómetros analizados (valores medios anuales).

Figura 4.1 Situación de las tomas de muestras de agua de lluvia en la isla de Fuerteventura y límites del área de estudio. Los contornos muestran la elevación en metros.

Figura 4.2 Diagrama logarítmico vertical con todas las muestras de precipitación.

Figura 4.3 Representación en columnas logarítmicas verticales de las muestras de agua de lluvia de los puntos de Morro de Velosa, Pozo Negro, Pájara y Tuineje.

Figura 4.4 Representación de diagramas logarítmicos verticales de la composición química del agua de lluvia de: (a) Puerto del Rosario (incluye sólo deposición húmeda) y Pozo Negro (incluye deposición húmeda y deposición seca durante 65 días en el vaso tomamuestras) y (b) Puerto del Rosario (incluye sólo deposición húmeda) y de Tuineje (deposición húmeda y deposición seca acumulada durante distinto número de días en el vaso tomamuestra).

Figura 4.5 Histogramas de las concentraciones de cloruro, sodio, magnesio, potasio, calcio, sulfato, SiO_2 (mg L^{-1}) y pH. $r = \text{meq L}^{-1}$. $N =$ numero de datos.

Figura 4.6 Histogramas del logaritmo natural de las concentraciones de cloruro, sodio, magnesio, potasio, calcio, sulfato, SiO_2 (mg L^{-1}) y pH. $r = \text{meq L}^{-1}$. $N =$ numero de datos.

Figura 4.7 Representación de la aportación anual de cloruro, sodio, sulfato, calcio y bicarbonato ($\text{g año}^{-1} \text{ m}^{-2}$) para cada una de las muestras de precipitación.

Figura 4.8 Diagramas de bigotes de: a) concentraciones iónicas de la precipitación (meqL^{-1}) y b) logaritmo de las concentraciones iónicas de la precipitación.

Figura 4.9 Dendograma obtenido a partir del logaritmo de las concentraciones (meq L^{-1}) de agua de lluvia.

Figura 4.10 Representación sobre dos factores en espacio factorial rotado del análisis de componentes principales de las variables de la precipitación.

Figura 4.11 Dendograma de casos de la precipitación obtenido a partir de la matriz de la distancia euclidiana.

Figura 4.12 Dendograma de casos de la precipitación obtenido a partir de la matriz de correlaciones.

Figura 4.13 Diagrama logarítmico vertical de las muestras de charcos y escorrentía recuperadas en la precipitación del 12/03/99.

Figura 4.14 Histograma de la concentración cloruro (a) y sodio (b) de las muestras de manantiales y pozos del Macizo de Betancuria obtenidos en el proyecto MAC-21. $N =$ número de datos.

Figura 4.15 Histograma de la concentración de sulfato (a) y relación rCa/rSO_4 (b) de las muestras de manantiales y pozos del Macizo de Betancuria obtenidos en el proyecto MAC-21. ($r = \text{meq L}^{-1}$). N = número de datos.

Figura 4.16 Perfil de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y conductividad eléctrica (mS cm^{-1}) del sondeo S-23-TU localizado en el Macizo de Betancuria.

Figura 4.17 Representación de todos los perfiles de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) del área de estudio según: (a) la altitud (m) respecto al nivel del mar y (b) la profundidad (m) bajo el terreno. TU=Tuineje, TE=Tesejerague, MP=Malpaís, GT=Gran Tarajal, PN=Pozo Negro.

Figura 4.18 Variación horizontal de los perfiles de temperatura considerando como referencia el perfil P-5-F-J (S-159-GT). TU=Tuineje, TE=Tesejerague, MP=Malpaís, GT=Gran Tarajal, PN=Pozo Negro.

Figura 4.19 Corte con representación a escala de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) del agua en el área de Tuineje-Tesejerague-Gran Tarajal.

Figura 4.20 Corte con representación a escala de la conductividad eléctrica (mS/cm) del agua en el área de Tesejerague-Valle de Gran Tarajal.

Figura 4.21 Corte con representación a escala de la de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) del agua en el área de Tesejerague-Valle de Gran Tarajal. Línea segmentada indica temperatura inferida del terreno en la zona no-saturada.

Figura 4.22 Representación de los diagramas de Stiff modificados de las muestras más representativas de la Unidad Superior.

Figura 4.23 Representación de los diagramas de Stiff modificados de las muestras más representativas de la Unidad Inferior.

Figura 4.24 Diagramas de bigotes de las muestras de la Unidad Superior ($r=\text{meq L}^{-1}$).

Figura 4.25 Diagramas de bigotes de: (a) muestras de la Unidad Inferior en Tuineje obtenidas por el ITGE y (b) muestras de la Unidad Inferior en Tuineje obtenidas en esta investigación. $r = \text{meq L}^{-1}$.

Figura 4.26 Diagramas logarítmicos verticales de los sondeos profundos de Tuineje S-91-TU (a) y del sondeo profundo de Tesejerague S-104-TE (b).

Figura 4.27 Representación en el diagrama de Piper de las muestras de agua de precipitación, escorrentía, manantiales, pozos y sondeos profundos del Macizo de Betancuria.

Figura 4.28 Representación de las relaciones: (a) rCl versus rNa y rNa/rCl versus rCl y (b) rNa/rK versus rCl para las muestras de precipitación, manantiales y pozos de la Unidad Superior, sondeos profundos de la Unidad Inferior y pozos y sondeos poco profundos del Malpaís.

Figura 4.29 Representación de las relaciones: (a) rSO_4 versus rCl y (b) rSO_4/rCl versus rCl para las muestras de precipitación, manantiales y pozos de la Unidad Superior, y sondeos profundos de la Unidad Inferior.

Figura 4.30 Representación de las relaciones: (a) rMg versus rCl y rMg/rCl versus rCl y (b) rCa versus rSO_4 para las muestras de precipitación, manantiales y pozos de la Unidad Superior, sondeos profundos de la Unidad Inferior y pozos y sondeos poco profundos del Malpaís.

Figura 4.31 Representación de las relaciones: (a) $rCl/r(HCO_3 + rCO_3)$ y (b) rSr vs rCa para las muestras de precipitación, manantiales y pozos de la Unidad Superior, sondeos profundos de la Unidad Inferior y pozos y sondeos poco profundos del Malpaís.

Figura 4.32 Representación de las relaciones: (a) Cl/F (razón molar) versus rCl y (b) Cl/B (razón molar) versus rCl para las muestras de la precipitación, manantiales y pozos de la Unidad Superior y sondeos profundos de la Unidad Inferior.

Figura 4.33 Representación de la relación rCl/rBr versus rCl para las muestras de la precipitación, manantiales y pozos de la Unidad Superior y sondeos profundos de la Unidad Inferior.

Figura 4.34 Relación entre los índices de saturación en calcita, dolomita, yeso y la concentración de sulfato ($mg L^{-1}$) para los puntos más representativos de la Unidad Superior, Unidad Inferior y Malpaís.

Figura 4.35 Diagrama de estabilidad del feldespato sódico (a) y del feldespato potásico (b) para las muestras de la Unidad Superior, Unidad Inferior y del Malpaís.

Figura 4.36 Diagrama de estabilidad del feldespato cálcico (a) y de la clorita (b) para las muestras de la Unidad Superior, Unidad Inferior y del Malpaís.

Figura 4.37 Representación de las presiones parciales de CO_2 calculadas con WATEQF frente a la profundidad de la toma de las aguas de la Unidad Superior, Unidad Inferior y el Malpaís.

Figura 4.38 Representación de las muestras de precipitación Pájara-4 (7/01/99) y de la muestra de escorrentía Pájara-CH.

Figura 4.39 Representación de la muestra de precipitación Tuineje-6 (26/03/99) y de la muestra de escorrentía Morro de Velosa-ES.

Figura 4.40 Representación de la muestra de escorrentía Pájara-CH y de los pozos de la Unidad Superior L-236 y L-237 medidos y calculados por equilibrio con el CO_2 del suelo y evaporación.

Figura 4.41 Representación de la muestra de escorrentía Pájara-CH y de los pozos de la Unidad Superior L-236 y L-237 medidos y calculados por medio de equilibrio con el CO_2 del suelo y evaporación y reacción con fases minerales del medio.

Figura 4.42 Representación de las muestras de precipitación Pájara-4 y de los pozos de la Unidad Superior L-236 y L-237 medidos y calculados por equilibrio con el CO₂ del suelo y evaporación y reacción con fases minerales del medio.

Figura 4.43 Representación de las muestras de escorrentía Malpaís-Mirador-CH y de las muestras J-2-X-R y Z-9-X-R correspondientes a los sondeos someros S-133-MP y S-165-MP respectivamente.

Figura 4.44 Representación de las muestras de manantial MBET-1, T-4-J-S y de la muestra G-3-X-R del sondeo profundo de Tuineje S-85-TU.

Figura 4.45 Representación de las muestras de manantial MBET-1 y de la muestra E-3-X-R del sondeo profundo de Tesejague S-121-TU.

Figura 4.46 Representación de las muestras de manantial M-BET-1 y las muestra N-3-X-R del sondeo profundo de Tesejague S-105-TE.

Figura 4.47 Representación de las muestras T4-J-S y de la muestra C-4-J-S del sondeo profundo de Tesejague S-105-TE.

Figura 4.48 Dendograma de variables de la Unidad Superior; $r = \text{meq L}^{-1}$.

Figura 4.49 Gráfico de las componente principales en espacio factorial rotado de las variables de la Unidad Superior.

Figura 4.50 Dendogramas de variables para las campañas de: (a) 1989/90 y (b) 1998/99.

Figura 4.51 Representación sobre dos factores en espacio factorial rotado del análisis de componentes principales de las variables para las campañas de: (a) 1989/90 y (b) 1998/99.

Figura 4.52 Representación del dendograma de variables para el análisis cluster de variables en muestras de la Unidad Inferior en los sondeos profundos de Tuineje (1999/2000) considerando los iones mayoritarios, boro, flúor y estroncio.

Figura 4.53 Representación de componentes principales de variables de las muestras de la Unidad Inferior en los sondeos profundos de Tuineje (1999/2000) considerando iones mayoritarios, boro, flúor y estroncio.

Figura 5.1 Situación de los puntos de agua con determinación isotópica de ¹⁸O, ²H y tritio del área de estudio.

Figura 5.2 Relación entre el valor de ¹⁸O y la altura de agua de las precipitaciones diarias de Fuerteventura.

Figura 5.3 Relación ¹⁸O/D correspondiente a la precipitación en la isla de Fuerteventura durante el período 1998/99. LMM = Línea meteórica mundial; LML = Línea meteórica local.

Figura 5.4 Relación del valor de ¹⁸O de la precipitación con la altitud de las muestras.

Figura 5.5 Composición isotópica ($^{18}\text{O}/^2\text{H}$) correspondiente a la precipitación y aguas subterráneas del área de estudio. LMM = Línea meteórica mundial; LML = Línea meteórica local.

Figura 5.6 Composición isotópica ($^{18}\text{O}/^2\text{H}$) correspondiente a la precipitación y aguas subterráneas de la Unidad Superior. LMM = Línea meteórica mundial; LML = Línea meteórica local.

Figura 5.7 Composición isotópica ($^{18}\text{O}/^2\text{H}$) correspondiente a la precipitación y aguas subterráneas de la Unidad Inferior. LMM = Línea meteórica mundial; LML = Línea meteórica local.

Figura 5.8 Composición isotópica ($^{18}\text{O}/^2\text{H}$) correspondiente a la precipitación de aguas subterráneas de los sondeos profundos de Tuineje. El número indica concentración de cloruro (meq L^{-1}). LMM = Línea meteórica mundial; LML = Línea meteórica local; LM = Línea de mezcla.

Figura 5.9 Composición isotópica ($^{18}\text{O}/^2\text{H}$) correspondiente a la precipitación de aguas subterráneas de los sondeos profundos de Tesejrague. El número indica concentración de cloruro (meq L^{-1}). LMM = Línea meteórica mundial; LML = Línea meteórica local; LM = Línea de mezcla.

Figura 5.10 Relación $^{18}\text{O}/\text{D}$ correspondiente a la precipitación y aguas subterráneas del Malpaís. LMM = Línea meteórica mundial; LML = Línea meteórica local.

Figura 5.11 Relación $^{18}\text{O}/\text{D}$ correspondiente a la precipitación y aguas subterráneas del Malpaís. El número indica concentración de cloruro (meq L^{-1}) del agua. LMM = Línea meteórica mundial; LML = Línea meteórica local.

Figura 5.12 Representación de la relación $\delta^{18}\text{O}$ versus CL (mg L^{-1}) para las muestras de la precipitación y aguas subterráneas del área de estudio.

Figura 5.13 Representación entre el exceso de deuterio y la concentración de cloruro (mg L^{-1}) en la precipitación y aguas subterráneas del área de estudio.

Figura 5.14 Relación de los contenidos de tritio (UT) y cloruro (mg L^{-1}) en las muestras de agua subterránea de la Unidad Superior, Unidad Inferior y Malpaís.

Figura 5.15 Histograma de distribución de $\delta^{13}\text{C}$ (‰ vs PDB) del CO_2 del suelo. N = número de datos.

Figura 5.16 Histograma de distribución de $\delta^{13}\text{C}$ (‰ vs PDB) del agua subterránea.

Figura 5.17 Relación de: (a) $\delta^{13}\text{C}$ -bicarbonato, (b) $\delta^{13}\text{C}$ - $\log\text{PCO}_2$ y (c) $\delta^{13}\text{C}$ -pH de campo.

Figura 5.18.- Relación de ^{13}C vs ^{14}C en las aguas de la Unidad Superior y Unidad Inferior que muestra el efecto de mezcla entre carbono procedente de la disolución de calcita de las carbonatitas y carbono moderno.

Figura 5.19 Relación de $\delta^{34}\text{S}$ frente a la relación $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$ calculada para las muestras de la Unidad Superior, Unidad Inferior y Malpaís.

Figura 5.20 Relación de $\delta^{34}\text{S}$ y cloruro de las muestras de la Unidad Superior, Unidad Inferior y Malpaís.

Figura 5.21 Relación de $\delta^{34}\text{S}$ y concentración de sulfato (mg L^{-1}) de las muestras de la Unidad Superior, Unidad Inferior y Malpaís.

Figura 5.22 Relación entre $\delta^{34}\text{S}$ y $\delta^{18}\text{O}$ de las muestras de la Unidad Superior, Unidad Inferior y Malpaís.

Figura 6.1 Perfiles de conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$) versus altitud (m) realizados en la zona de estudio. TU=Tuineje; TE=Tesejerague; MP=Malpaís; GT=Gran Tarajal y PN=Pozo Negro.

Figura 6.2 Representación de la muestra de escorrentía Pájara-ch y de los pozos de la Unidad Superior medidos y calculados por medio del equilibrio con el CO_2 del suelo, evaporación y reacciones con fases minerales del medio.

Figura 6.3 Representación de la relación entre $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las muestras de la Unidad Superior y de las muestras de precipitación con indicación de la cantidad de precipitación caída.

Figura 6.4 Representación de la muestra de la Unidad Superior T-4-J-S y de la muestra del sondeo profundo G-3-X-R.

Figura 6.6 Representación de la muestra de escorrentía Malpaís-Mirador-ch y de las muestras J-2-X-R y Z-9-X-R medidas y calculadas por medio del equilibrio con el CO_2 del suelo, evaporación y reacciones con fases minerales del medio.

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1 Precipitación media mensual (mm) y precipitación media anual (mm) de los distintos pluviómetros del área de estudio.

Tabla 1.2 Temperaturas medias mensuales y temperatura media anual de las estaciones termométricas de Los Estancos y El Matorral.

Tabla 2.3.1 Correlación estratigráfica de la isla de Fuerteventura (modificado de IGME, en prensa).

Tabla 3.1 Valores estimados de la recarga considerando distintos valores de reserva útil (RU) y de valor de laminación (VL). P = precipitación media anual para el período 1994-1999 en mm y R = recarga media anual para el mismo período.

Tabla 3.2 Parámetros utilizados en el balance de cloruros y valores de la recarga obtenidos para cada punto. (1) valor mediano de cloruro de todas las muestras lluvia de cada estación; (2) valor mediano de cloruro descartando las primeras muestras de lluvia del otoño. C_P y C_R = contenido medio en cloruro en la precipitación y el agua de recarga; $?_P$, $?_R$, $?_{CP}$ y $?_{CR}$, = desviación típica de la precipitación, de la recarga, de la concentración de cloruro de la precipitación y de la concentración de cloruro de la recarga. Concentraciones en $mg L^{-1}$. (*) valor medio anual determinado a partir de la serie de 1970-1986.

Tabla 3.3 Parámetros utilizados en el balance de cloruros y valores de la recarga obtenidos para cada punto. (1) valor mediano de cloruro de todas las muestras lluvia de cada estación; (2) valor mediano de cloruro descartando las primeras muestras de lluvia del otoño. C_P , C_E y C_R = contenido mediano en cloruro en la precipitación, escorrentía y el agua de recarga. Concentraciones en $mg L^{-1}$. (*) valor medio anual determinado a partir de la serie de 1970-1986.

Tabla 3.3 Parámetros utilizados en el balance de cloruros y valores de la recarga obtenidos para cada punto. (1) valor mediano de cloruro de todas las muestras lluvia de cada estación; (2) valor mediano del cloruro descartando las primeras muestras de lluvia del otoño. A_p = aportes de cloruro ($g m^{-2} año^{-1}$); C_R = contenido medio en cloruro del agua de recarga ($meq L^{-1}$); $?_P$, $?_{AP}$ y $?_{CR}$, = desviación típica de la precipitación, de la aportación de cloruro y de la concentración de cloruro de la recarga. Concentración de la aportación en $g m^{-2} año^{-1}$ y concentración de la recarga en $meq L^{-1}$. (*) valor medio anual determinado a partir de la serie de 1970-1986. $R = 1000A_p / (35.5 * C_r)$.

Tabla 4.1 Situación y características más importantes de los puntos de muestreo del agua de lluvia.

Tabla 4.2 Media, mediana, moda, máximo, mínimo y desviación típica de las concentraciones y relaciones iónicas, independiente del punto y fecha de muestreo ($r = meq L^{-1}$).

Tabla 4.3 Percentil 25%, percentil 50% y percentil 75% de las concentraciones y relaciones iónicas, independiente del punto y fecha de muestreo ($r = meq L^{-1}$).

Tabla 4.4 Concentración iónica de la lluvia (meq L^{-1}), concentración teórica de la lluvia calculada para un origen marino (meq L^{-1}) y % del ión en el agua de lluvia que puede ser explicado por un origen marino. (Mar = concentración en meq L^{-1} calculada para un origen marino. Media, mediana y desviación típica del valor porcentual del ión en el agua de lluvia que puede ser explicado por un origen marino. (*) = muestras de lluvia que no incluyen deposición seca.

Tabla 4.5 Aporte de cloruro, sodio, sulfato, calcio, bicarbonato y magnesio correspondiente a cada uno de los análisis de agua de lluvia muestreadas durante el período 1998-1999. Los aportes están en unidades de $\text{g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (d). P = precipitación acumulada e el período en mm.

Tabla 4.6 Aportación media de cloruro, sodio, sulfato, calcio, bicarbonato y magnesio correspondiente a cada una de las estaciones de muestreo. Los aportes están en $\text{g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ (a). (1) valor medio, mediano y desviación típica considerando todas las muestras de lluvia y (2) valor medio, mediano y desviación típica descartando las muestras más salinas (otoño).

Tabla 4.7 Matriz de correlaciones de entrada para el análisis de cluster de variables de la precipitación ($r = \text{meq L}^{-1}$).

Tabla 4.8 Coeficientes de estructura con la correlación entre los componentes rotados y cada una de las variables.

Tabla 4.9 Valores representativos de la concentración de los iones mayoritarios (meq L^{-1}) y SiO_2 (mg L^{-1}) de pozos muestreados en el proyecto MAC-21 en el Macizo de Betancuria ($r = \text{meq L}^{-1}$).

Tabla 4.10 Valores representativos de pH, concentraciones de los iones mayoritarios (meq L^{-1}), SiO_2 (mg L^{-1}) y relaciones iónicas de interés de las muestras de manantiales y pozos representativos de la Unidad Superior ($r = \text{meq L}^{-1}$; pH medido en campo y laboratorio).

Tabla 4.11 Valores representativos del pH, conductividad eléctrica ($?\text{S/cm}$), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), concentraciones de los iones mayoritarios (meq L^{-1}), SiO_2 (mg L^{-1}) y relaciones iónicas de interés para las muestras de los sondeos profundos de Tuineje. $r = \text{meq L}^{-1}$; (*) datos tomados en campo.

Tabla 4.12 Valores representativos de pH, conductividad eléctrica ($?\text{S/cm}$), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), concentraciones de los iones mayoritarios (meq L^{-1}), SiO_2 (mg L^{-1}) y relaciones iónicas de interés para las muestras de los sondeos profundos de Tesejague. ($r = \text{meq L}^{-1}$; (*) = datos tomados en campo).

Tabla 4.13 Índices de saturación y $\log\text{PCO}_2$ calculados con el programa WATEQ4F para los manantiales, pozos y sondeos someros de la Unidad Superior, sondeos profundos de la Unidad Inferior y pozos y sondeos someros del Malpaís.

Tabla 4.14 Valores medidos y calculados de todas las muestras consideradas para la simulación de las reacciones durante la recarga. (1) valor medido; (2) valor calculado. Concentración en mmol/kg . (*) pH de laboratorio muy alterado.

Tabla 4.15 Valores medidos y calculados de todas las muestras consideradas para calcular las reacciones a lo largo de una línea de flujo. (1) pH medido en campo; (2) muestra de manantial tomada en Betancuria.

Tabla 4.16 Coeficientes de estructura con el valor de correlación entre los componentes rotados y cada una de las variables; $r = \text{meq L}^{-1}$.

Tabla 5.1 Determinación de $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y tritio en las aguas de lluvia en Fuerteventura. Se incluyen las determinaciones de cloruro del agua de lluvia (mg L^{-1}).

Tabla 5.2 Determinación de $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y tritio (UT) en las aguas subterráneas del área de estudio. Se incluye las determinaciones de laboratorio del cloruro (mg L^{-1}).

Tabla 5.3 Gradientes altitudinales $\delta^{18}\text{O}$ obtenidos en otras islas del Archipiélago de Canarias.

Tabla 5.4 Valores de enriquecimientos isotópicos en el sistema $\text{CO}_{2(\text{g})}$, $\text{CO}_{2(\text{d})}$, HCO_3^- , CO_3^{2-} y CaCO_3 (modificado de Clark, 1987); $g = \text{CO}_2$, $a = \text{H}_2\text{CO}_3$, $b = \text{HCO}_3^-$, $c = \text{CO}_3^{2-}$.

Tabla 5.5 Ciclos fotosintéticos de la naturaleza (modificado de Gasparini, 1989).

Tabla 5.6 Resultados de determinaciones de $\delta^{13}\text{C}$ ‰ vs PDB del CO_2 del suelo y características de la vegetación y suelo de los puntos de muestreo de Gran Canaria (Gasparini, 1989) y Fuerteventura. (*) Áreas áridas con escasa vegetación.

Tabla 5.7 Cálculo de $\delta^{13}\text{C}$ ‰ vs PDB de las muestras de agua subterránea. (*) pH medido en campo.

Tabla 5.8 Determinaciones de ^{13}C y ^{14}C de las aguas subterráneas del área de estudio.

Tabla 5.9 Determinaciones de $\delta^{34}\text{S}$ ‰ vs CDT y $\delta^{18}\text{O}$ ‰ vs. SMOW en el sulfato disuelto en el agua subterránea ($r = \text{meq/l}$; S.D. = no determinado).

Tabla 6.1 Valor medio porcentual de los iones en el agua de lluvia que pueden ser explicados por medio de un origen marino.

Tabla 6.2 Valor medio porcentual de calcio que puede ser explicado por un origen marino para las distintas estaciones de muestreo.

Tabla 6.3 Valores medianos de las relaciones iónicas de interés de la precipitación y de la Unidad Superior.

Tabla 6.4 Valores medianos de la precipitación y de las aguas subterráneas del sector del Malpaís.