

## CAPÍTULO 6

### DISCUSIÓN GENERAL

#### 6.1.- Introducción

En este capítulo se presenta una discusión general de los resultados obtenidos en esta investigación, según las observaciones y resultados que se presentan en los capítulos anteriores. En muchos casos han sido obtenidos a partir de la aplicación de las distintas metodologías y técnicas hidrogeológicas que no son concluyentes para explicar por si solas el funcionamiento del sistema, por lo que se requiere la integración de todos los resultados para una mejor interpretación.

Una de las principales limitaciones de esta investigación es debida a la falta de datos hidráulicos de las distintas formaciones volcánicas y rocas intrusivas. Esta escasez de información ha impedido establecer las características hidráulicas de las distintas unidades litológicas, lo que ha impedido establecer un contraste preciso entre el modelo conceptual obtenido a partir de la investigación hidroquímica y la hidrodinámica de las unidades hidrogeológicas definidas. Otra limitación importante en el desarrollo del estudio se debe a las características constructivas propias de los sondeos profundos, la mayoría de los cuales carece de entubación. Esta situación ha impedido obtener muestras de agua 100% representativas de cada una de las unidades hidrogeológicas que se explican a continuación, a causa de las mezclas de distintos niveles.

#### 6.2.- Recarga

La recarga ha sido uno de los parámetros más difíciles de establecer, debido tanto a la incertidumbre que presentan los métodos utilizados para el cálculo de la misma por la escasez de datos recopilados, así como por la gran cantidad de procesos que intervienen en la misma. El cálculo estimativo de la recarga se ha realizado por dos métodos: a) balance hidrometeorológico diario considerando datos de tres pluviómetros en 5 años y b) balance de cloruros en estado estacionario.

Para el cálculo del balance hidrometeorológico se han utilizado datos diarios de lluvia obtenidos entre los años 1994 y 1998. Estos pluviómetros fueron seleccionados de acuerdo a distintas altitudes y su situación se presenta en la Tabla 3.1. La estimación de la recarga a partir de este método indica que la mayor cantidad de recarga se produce en zonas altas, donde las precipitaciones son mayores. Ésta varía entre un 5 y 20% de la precipitación en las zonas altas, mientras que en las zonas bajas esta se reduce notablemente, hasta ser casi nula. No obstante, la estimación de la recarga por el método de balance de cloruros indica que la recarga es mucho más importante en las zonas más bajas y llanas del sector del Malpaís. Así en el sector del Malpaís el balance de cloruro indica que la recarga varía entre un 9 y un 17%

de la precipitación, valores muy superiores a los obtenidos por el balance hidrometeorológico. Los valores de la recarga obtenidos por estos métodos también son coherentes con los resultados obtenidos en la modelación hidrogeoquímica, en la que una muestra de agua de lluvia es concentrada por evaporación y puesta en contacto con fases minerales para reproducir la composición química de las aguas freáticas (apartado 4.5.10). Los resultados obtenidos en estas simulaciones indican que entre un 75 y un 90% de la precipitación se evapora, por lo que la recarga estaría comprendida entre un 10 y un 25% de la precipitación.

### 6.3.- Precipitación

El agua de lluvia (integrando el polvo atmosférico) es de composición clorurado sódica, lo que es característico en zonas costeras de clima árido, donde el viento bate fuertemente. La Tabla 6.1 presenta los valores medios, medianos y desviación típica de los valores porcentuales de la concentración iónica teórica de la lluvia calculada para un origen marino a partir del contenido en cloruro, respecto a la concentración real medida.

	%Na	%Mg	%K	%SO <sub>4</sub>	%Ca
Media	93.7	69.4	52.9	48.2	6.6
Mediana	91.2	69.8	49.3	51.7	5.9
Desv. Típica	14.5	33.9	21.5	26	4.2

**Tabla 6.1.-** Valores medios porcentuales de los iones en el agua de lluvia que pueden ser explicados por medio de un origen marino

Estos valores indican que la mayor parte de los contenidos de sodio se ajustan razonablemente bien a los valores esperados para un origen marino. Los resultados también indican una procedencia importante de origen marino para los iones magnesio, potasio y sulfato, aunque los valores calculados presentan una desviación típica mayor. En el caso del sulfato no se descarta que parte del mismo proceda de las actividades antrópicas realizadas en la isla y entre las que se pueden destacar el polvo desprendido de actividades agropecuarias, así como la utilización de combustibles fósiles. Por otro lado, del cálculo de la aportación de origen marino en las muestras de lluvia se desprende que la mayor parte del calcio presente en las mismas tienen un origen distinto al marino. Un posible origen del excedente de calcio presente en las muestras de lluvia se puede buscar en aportes eólicos procedentes del este y que traen consigo partículas de calcita, ya que solo el 6% tendría una procedencia marina. Las partículas de calcita son traídas por el viento desde el continente africano y han sido descritas en algunos trabajos del estudio de la calima, que es el nombre que se aplica localmente a la situación atmosférica con abundante polvo atmosférico de procedencia Sahariana (Paquet *et al.*, 1984; Meco y Pettit-Maire, 1997). En la Tabla 6.2 se presentan los valores medios y medianos de los aportes de calcio en cada uno de los pluviómetros. Los resultados indican que la situación espacial de los pluviómetros incide en mayor o menor

medida en la concentración de calcio en el agua, de tal manera que las muestras obtenidas en los pluviómetros de la vertiente oriental de la isla (Pozo Negro y Tuineje) presentan en su composición química una menor aportación de calcio de origen marino respecto a las muestras obtenidas en la vertiente occidental (Pájara).

	Pozo Negro	Tuineje	Pájara
Media	5.9	4.8	9.7
Mediana	4.8	3.1	9.2
Desv. Típica	3.6	3.8	4.3

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

Los valores de la relación  $rCl/rBr$  para el agua de lluvia (integrando el polvo atmosférico) son anormalmente altos. En las siete muestras que fueron analizadas estos valores varían entre 1000 y 5500 (Figura 4.33). El elevado valor de la relación  $rCl/rBr$  y la relativa alta clorinidad de las aguas podrían ser explicados por la incorporación de halita, quizás transportada eólicamente. Es posible que la halita se forme como consecuencia de la evaporación parcial del rocío del agua marina donde el mar bate fuertemente y el viento es intenso. No obstante, tampoco se puede descartar la incorporación de halita transportada en suspensión por el viento desde otras regiones del continente africano, aunque esta última situación no ha sido descrita en los estudios de las partículas de polvo que acarrea el viento.

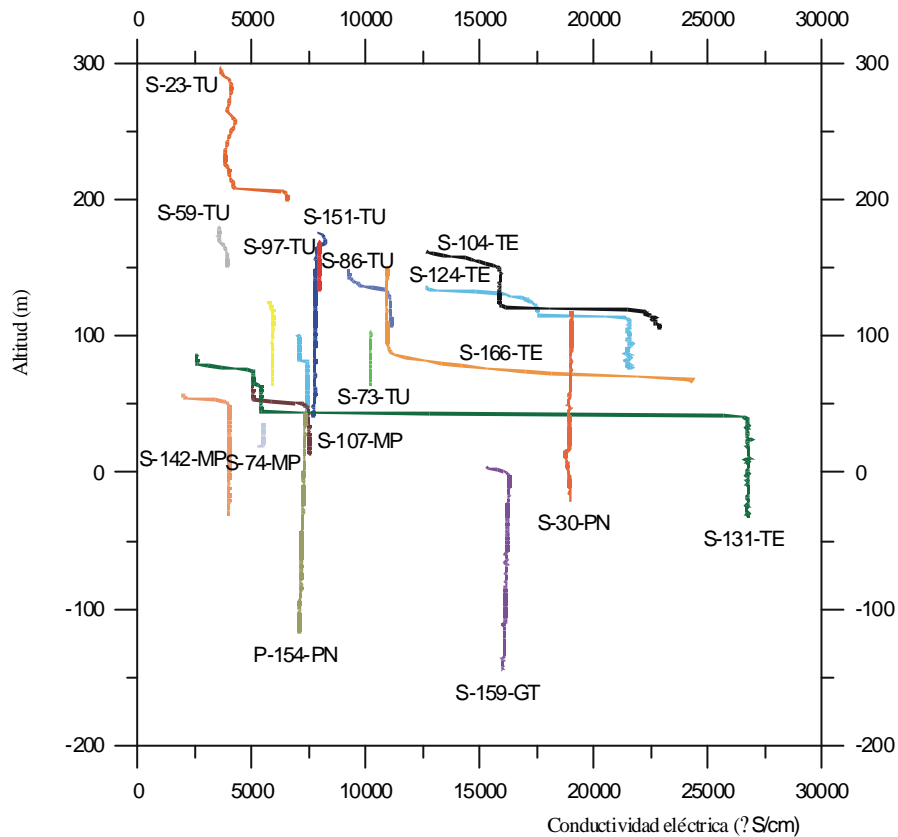
## 6.4.- Aguas subterráneas

### 6.4.1.- Dominio Occidental

A partir de la interpretación de las descripciones geológicas de los sondeos realizada en el capítulo 2, la geología del subsuelo en el Dominio Occidental puede resumirse en un núcleo de rocas intrusivas del Complejo Basal que en gran parte de la Isla se encuentra cubierto por rocas volcánicas también del Complejo Basal. En la Figura 2.6 se presenta un corte geológico W-E donde se expone la situación espacial de estas unidades geológicas.

De la realización de perfiles de conductividad eléctrica en los sondeos se ha determinado que el agua subterránea se presenta estratificada, mostrando un incremento de la salinidad con la profundidad. La falta de sondeos con una entubación y rejillas adecuados a distintas profundidades y los escasos registros litológicos que se tienen de los sondeos han impedido definir claramente una relación de los tipos de agua (de mayor y menor mineralización) con las litologías en que se encuentran presentes las mismas. No obstante, a partir de los tipos de captaciones de agua se observa que las aguas más someras obtenidas en pozos de menos de 50 m de profundidad y construidos en rocas volcánicas del Complejo Basal presentan aguas de menor mineralización respecto a muestras más profundas, obtenidas en sondeos profundos, que presentan mayor mineralización. Las aguas de mayor

mineralización en la mayoría de los casos han sido reconocidas en rocas intrusivas también del Complejo Basal. La Figura 6.1 muestra los perfiles de conductividad eléctrica realizados en el área de estudio, donde se observa que los aumentos de salinidad más importantes con la profundidad corresponden a aquellos sondeos situados en la parte central de la Isla. Específicamente los mayores aumentos de la salinidad con la profundidad se registran en el área de Tesejerague, donde las aguas menos mineralizadas de la parte superior de la columna de agua pueden tener una conductividad eléctrica de 2,5 mS/cm, mientras que las más profundas pueden llegar a alcanzar los 24 mS/cm.



**Figura 6.1.-** Perfiles de conductividad eléctrica (¿S/cm) versus altitud (m) realizados en la zona de estudio. TU=Tuineje; TE=Tesejerague; MP=Malpaís; GT=Gran Tarajal y PN=Pozo Negro.

Como se indicó en el apartado 4.5.3 del capítulo 4, las aguas de menor mineralización ubicadas en la parte superior de la columna de agua en los sondeos presentan temperaturas y gradientes de temperatura muy variables de un lugar a otro. En general los gradientes de temperatura en la parte superior de la columna de agua de los sondeos son muy bajos y quedan por debajo del gradiente térmico normal, hecho que ha sido interpretado como una mayor influencia de flujos verticales de agua en los sondeos. En algunos casos estos gradientes son menores de  $0,01 \text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$ . Por otro lado, en las aguas más profundas y de mayor mineralización, en la mayoría de los casos se observa un gradiente térmico más alto y próximo al normal, lo que indicaría que los flujos verticales tienen una menor influencia en el sondeo. Debido a que existen muy pocos registros litológicos de los sondeos, sólo en algunos

puntos de agua se ha podido establecer una relación clara entre las unidades geológicas del medio y las zonas en que se registran mayores flujos verticales de agua en los sondeos. En el área de Tuineje se puede deducir que las zonas en que existen mayores indicios de flujos verticales de agua en los sondeos se corresponden con rocas volcánicas del Complejo Basal, mientras que las zonas sin flujos verticales significativos de agua en los sondeos corresponden a rocas intrusivas también del Complejo Basal

A partir de la interpretación de los perfiles de temperatura y conductividad eléctrica realizados en los sondeos se han definido 2 unidades hidrogeológicas: la **Unidad Superior** compuesta por aguas menos salinas (conductividad eléctrica variable entre 2,5 y 5,5 mS/cm), con temperaturas que varían entre 18 y 25°C, y una **Unidad Inferior** compuesta por aguas de mayor mineralización (conductividad eléctrica variable entre 5,5 y 24 mS/cm) y temperaturas variables entre los 25 y 30°C. De esta misma interpretación también se deduce que la mayor parte de las aguas representativas de la Unidad Superior se restringen a las rocas volcánicas del Complejo Basal, mientras que las aguas más salinas se situarían preferentemente en rocas intrusivas del Complejo Basal.

Respecto a los orígenes de la salinidad en el agua subterránea de la zona se han determinado distintas fuentes, según correspondan a aguas de la Unidad Superior representativas de la recarga y aguas más profundas correspondientes a la Unidad Inferior.

### Unidad Superior

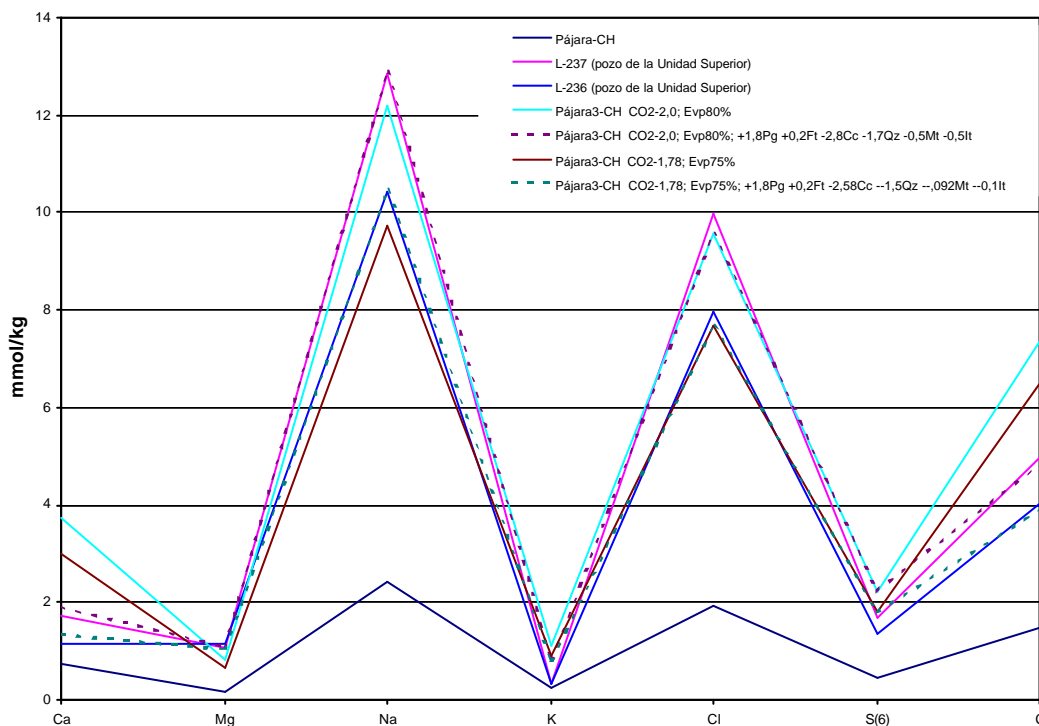
El agua subterránea de manantiales y pozos de la Unidad Superior presenta una composición clorurado-sódica y relaciones iónicas que en parte responden a la composición química del agua de lluvia. La Tabla 6.3 presenta los valores medianos de las relaciones iónicas más significativas de la precipitación y el agua de la Unidad Superior, donde se observa en general una buena correlación entre los valores obtenidos para las relaciones  $r_{Na/rCl}$  y  $r_{SO_4/rCl}$ , mientras que el valor de la relación  $r_{Na/rK}$  es mucho mayor en el agua de la Unidad Superior respecto al agua de lluvia. El mayor valor de la relación  $r_{Na/rK}$  en el agua de la Unidad Superior con respecto al agua de lluvia es atribuible a la interacción agua-roca, donde tras la alteración de los silicatos existe una sorción preferencial de K en los minerales de alteración.

	$r_{Na/rCl}$	$r_{SO_4/rCl}$	$r_{Na/rK}$
Mediana precipitación	0.9	0.18	27.7
Mediana Unidad Superior	1.09	0.13	53.6

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

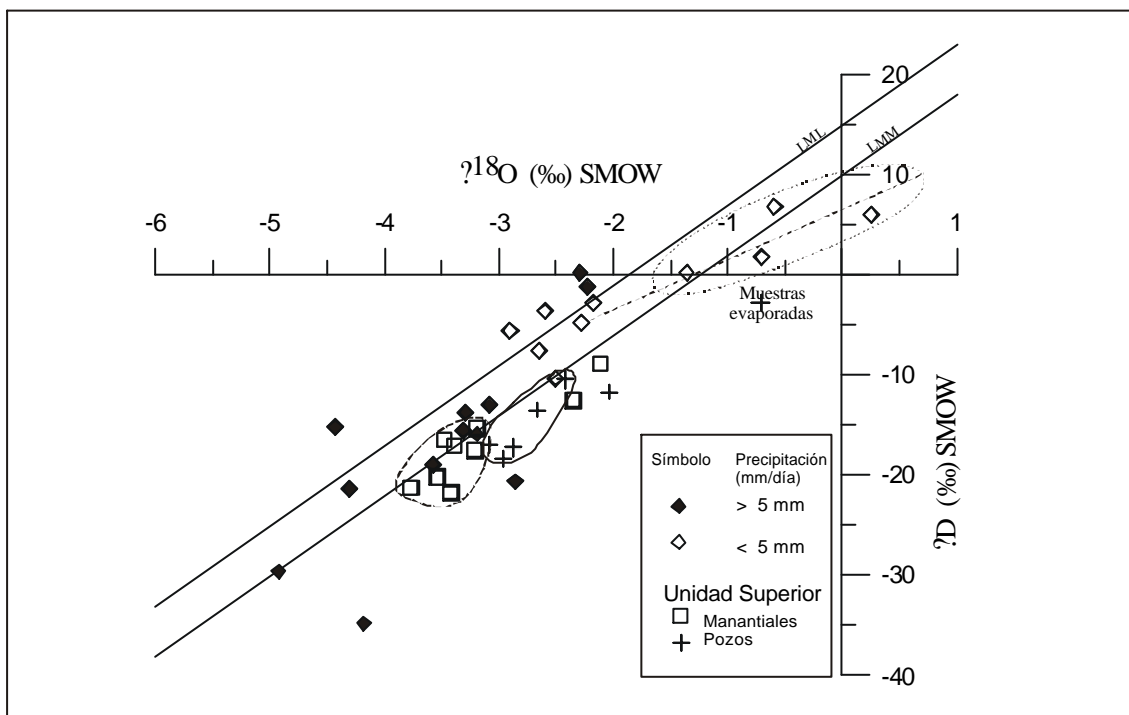
Las islas de Fuerteventura y Lanzarote han sido citadas como ejemplos clásicos de mayor mineralización de las aguas subterráneas como consecuencia de la aridez climática

(Custodio, 1990; 1992; 1997). El efecto de aridez climática tiene su origen en la mayor evaporación reinante en zonas áridas y semiáridas, lo que genera una alta evaporación y concentración de las sales del agua de la recarga. Los resultados obtenidos de la modelación hidrogeoquímica apuntan a que la mayor parte de la aportación iónica del agua de la Unidad Superior tiene su origen en la aridez climática. Efectivamente en la Figura 6.2 se presenta el resultado de la modelación de la composición química del agua de la Unidad Superior obtenida a partir de equilibrar el agua de lluvia a una presión parcial de CO<sub>2</sub> del suelo de 10<sup>-2.0</sup> y de evaporar el 82% del agua. Si bien los resultados de esta modelación en general se ajustan bien con los valores medidos de la Unidad Superior, se obtiene un mejor ajuste considerando además la meteorización de plagioclasas y la precipitación de calcita y cuarzo. Por lo tanto, es factible considerar que la mayor parte de la aportación iónica del agua de la Unidad Superior tiene su origen en los procesos de evaporación que afectan al agua de lluvia que se infiltra, aunque cabe esperar alguna aportación como consecuencia de la interacción del agua de lluvia con la roca, tanto en la zona no saturada como en la parte superior de la zona saturada. Respecto a la precipitación de calcita es probable que este proceso ocurra una vez que cae el agua de lluvia sobre el terreno, debido a que en la isla se reconocen importantes costras de caliche sobre la superficie de las rocas volcánicas y que bajo superficie penetran algunos metros a través de las fracturas de las rocas.



**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<sub>2</sub> del suelo, evaporación y reacciones con fases minerales del medio.

Si bien los resultados obtenidos con la modelación hidrogeoquímica indican que la mayor parte de la aportación iónica del agua proviene de los efectos de la evaporación del agua de lluvia que se infiltra, los valores isotópicos de la relación  $^{18}\text{O}/^2\text{H}$  de las muestras de la Unidad Superior revelan que éstas no han sido afectadas de modo significativo por evaporación. La Figura 6.3 presenta el gráfico  $^{18}\text{O}/^2\text{H}$  de las muestras de la Unidad Superior y de las muestras de precipitación, con indicación de la cantidad de precipitación caída. Se observa que los valores isotópicos de las muestras de la Unidad Superior están más próximos a la composición isotópica de las muestras de lluvia de mayor intensidad respecto a las precipitaciones de menor intensidad. Esta observación indica que sólo los eventos de lluvia de mayor intensidad son los que recargan el acuífero. De esta observación también se puede establecer que la mayor parte de salinidad que incorpora el agua de recarga procede de la deposición seca acumulada sobre el terreno y que es incorporada por el agua de eventos de lluvia más importantes. Dentro de esta deposición seca acumulada se incluyen tanto las sales de aguas de lluvia de menor intensidad que se evaporan en la superficie del suelo sin llegar a infiltrarse, como la aportación del polvo atmosférico arrastrado por el viento.



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

En las partes altas del Macizo de Betancuria el agua se infiltra por circulación preferentemente vertical a través del escaso suelo desarrollado, o directamente a través de las fracturas presentes en las rocas. En su descenso por la zona no saturada puede encontrarse con niveles poco permeables, que dan origen a pequeños acuíferos colgados como los observados en el sector de Betancuria, y que descargan en pequeños manantiales o rezumes. Las aguas de

manantiales presentan una composición clorurado-sódica y relaciones iónicas que responden a la composición química del agua de lluvia. La representación de  $^{18}\text{O}/^2\text{H}$  de las muestras de manantiales indica también que estas muestras presentan una composición isotópica próxima a la obtenida en muestras de precipitación. No obstante, como se observa en la Figura 5.5, los valores de  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$  de estas muestras son más ligeros respecto a las muestras de pozos y sondeos someros de la Unidad Superior. Los valores más ligeros se atribuyen a la altitud más alta de recarga ya que los manantiales en general se sitúan a cotas superiores a los 400 ms.n.m.. El agua de la recarga desciende hasta alcanzar el nivel de saturación reconocido en las rocas volcánicas del Complejo Basal. Desde este punto el agua busca la descarga hacia el mar y cambia el flujo de vertical a aproximadamente horizontal.

Los contenidos de carbono inorgánico disuelto total (CIDT) en el agua subterránea indican que las aguas de la Unidad Superior presentan mayores contenidos de CIDT respecto a las aguas de la Unidad Inferior. Los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  medidos en el  $\text{CO}_2$  del suelo se ajustan razonablemente bien a los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  obtenidos en las aguas de la Unidad Superior, lo que hace suponer que la mayoría del carbono disuelto proviene del  $\text{CO}_2$  de origen biogénico. En las muestras de la Unidad Superior se observa que los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  se hacen más ligeros a medida que aumenta la concentración de bicarbonato disuelto en el agua (Figura 5.17). Esta tendencia también coincide con un aumento de presión parcial de  $\text{CO}_2$  y una cierta tendencia a disminuir del pH a medida que los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  se hacen más ligeros (Figura 5.17). Estas observaciones hacen suponer distintas variaciones de la aportación de  $\text{CO}_2$  de origen biogénico a las aguas subterráneas, de manera que a medida que aumenta la aportación de  $\text{CO}_2$  de origen biogénico aumenta el contenido de bicarbonato disuelto en el agua y aumenta la presión parcial de  $\text{CO}_2$  en el suelo.

Los altos contenidos de nitrato reconocidos en algunas muestras de la Unidad Superior indican una componente antrópica en la composición química del agua subterránea. Los contenidos más elevados de nitrato fueron obtenidos en muestras de pozos situados en barrancos, donde existe o existió una actividad agrícola de cierta importancia. En algunos pozos situados en barrancos se han medido hasta  $204 \text{ mg L}^{-1}$  de nitrato.

### Unidad Inferior

La menor mineralización reconocida en las aguas de la Unidad Superior tendría su origen en la baja solubilidad de los materiales que atraviesan. A diferencia de la Unidad Superior, en la Unidad Inferior se ha deducido la presencia de fases minerales de mayor solubilidad que inciden en una elevada concentración de sulfato. La mediana de la relación  $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$  en el agua de la Unidad Inferior es de 0,54, valor muy superior al valor mediano del agua de lluvia (0,18) y del agua de mar (0,11). Los contenidos de sulfato en el agua de la Unidad Inferior son muy elevados y varían entre 24 y  $58 \text{ meq L}^{-1}$ . La elevada concentración de sulfato se puede explicar por una aportación de origen litológico, posiblemente asociada a la disolución de sulfatos, que ha sido descrita por Demény *et al.* (1999) en las rocas intrusivas



del Complejo Basal. Los valores isotópicos de  $\delta^{34}\text{S}$  obtenidos en muestras de esta Unidad indican una estrecha relación entre los valores de  $\delta^{34}\text{S}$  de sulfato de minerales asociados a carbonatitas y los obtenidos en el agua. Sin embargo, en aquellas muestras con mayor concentración de cloruro se observa una mayor aportación de sulfato de origen marino. La Figura 5.20 presenta la relación entre  $\delta^{34}\text{S}$  y  $r\text{Cl}$ , donde se ha trazado la línea de mezcla de sulfato de origen litológico determinado por Demény *et al.* (1999) y el valor de  $\delta^{34}\text{S}$  del sulfato y el contenido de cloruro del agua de mar. Se observa que el aumento en el contenido de cloruro conlleva valores más pesados de  $\delta^{34}\text{S}$ . En las muestras de la Unidad Superior los valores de  $\delta^{34}\text{S}$  están próximos al valor marino, por lo que se deduce su aportación a partir del aerosol marino.

Una de las mayores dificultades a la hora de explicar el origen de la salinidad de las aguas de la Unidad Inferior surge como consecuencia del aumento significativo de los contenidos de ión cloruro al pasar de las aguas de la Unidad Superior a la Unidad Inferior. Dado el carácter conservativo de este ion, no se espera un aumento en profundidad del mismo, dado que son muy pocas las rocas ígneas que pueden aportar cantidades significativas de cloruro al agua. Dentro de las posibilidades que cabe esperar para un aumento de los contenidos de cloruro de estas aguas se pueden mencionar:

- a) Retornos de riego
- b) Aportación de los tipos litológicos o por disolución de halita
- c) Aridez climática
- d) Mezcla con agua marina moderna debido a la intrusión marina
- e) Mezcla con agua marina relictas

Debido a que en las aguas de la Unidad Inferior se encuentran exentas de nitrato, la hipótesis de aumento de los contenidos de cloruro como consecuencia de una contaminación por retornos de riego es poco probable, salvo que se hayan reducido en un medio anóxico, pero hay pocas evidencias de que así sea y no hay presencia de ión amonio. Este hecho hace presumir que los aportes de nitrato tienen lugar solo en el techo de acuífero y, por lo tanto, que aún no ha llegado agua de la Unidad Superior con altos contenidos de nitrato hacia los niveles más profundos del acuífero, salvo por la interconexión creada por los sondeos.

La aportación de cloruros al agua como consecuencia de la alteración de rocas ígneas en general no es un fenómeno común, debido a las bajas concentraciones de cloruro que presentan estas rocas en su composición. No obstante, investigaciones realizadas en rocas ultramáficas afectadas por serpentinización indicarían mayores concentraciones de cloruro en estas rocas (Rucklidge y Patterson, 1977). Este dato resulta importante debido a que una parte importante de las rocas ultramáficas presentes en la isla se presentan afectadas por serpentinización, pero que sin embargo resulta difícil de probar debido a la falta de determinaciones de cloruro en estas rocas. Estudios recientes realizados por Kent *et al.* (1999)

en la isla de Loihi, en Hawaii, indican cantidades algo mayores de cloruro en rocas volcánicas de origen submarino, pero sin llegar a establecer claramente si esta mayor concentración de cloruro se debe a fases minerales ricas en cloro o a salmueras de origen marino presente en estas rocas. En todo caso si se considerase un aumento en los contenidos de cloruros en las aguas como consecuencia de aportes de las rocas ígneas, éste incidiría en un aumento del valor de la relación  $r_{Cl}/r_{Br}$ , hecho que no se observa a la luz de los valores obtenidos. Finalmente es necesario mencionar que en estudios posteriores sería conveniente analizar los contenidos de cloruros de las rocas volcánicas e intrusivas del Complejo Basal para poder aclarar la posibilidad de aportes de este ion al agua subterránea.

La alta concentración de cloruro en las aguas de la Unidad Inferior puede ser el resultado de la disolución de halita. Esta posibilidad cobra mayor fuerza si se considera que el aumento en los contenidos de cloruro viene acompañado por un aumento significativo de los contenidos de sodio, en una proporción aproximadamente equivalente (Figura 4.28(a)). Sin embargo, los valores de la relación  $r_{Cl}/r_{Br}$  obtenidos para estas muestras hacen poco probable esta situación. Efectivamente los valores de la relación  $r_{Cl}/r_{Br}$  de estas muestras se sitúan en torno o algo por encima del valor del agua de mar (640-800), quedando muy por debajo de los altos valores que se esperan para esta relación en el caso de disolución de halita (Custodio y Herrera, 2000).

Un aumento en los contenidos de cloruro como consecuencia de la aridez climática parece difícil de probar debido a que las aguas de la Unidad Superior, que representan la recarga actual al sistema, no presentan contenidos de cloruros tan altos con respecto a las aguas de la Unidad Inferior. Tampoco se puede descartar que en períodos antiguos y de mayor aridez se haya producido una mayor evaporación del agua de la recarga que hubiese originado una concentración de la misma. No obstante, esta situación no concuerda con los resultados obtenidos de distintos estudios paleoclimáticos realizados en la isla y que en términos generales hablan de períodos antiguos más húmedos, pero nunca más áridos a los de la actualidad (Paquet *et al.*, 1984; Meco y Pettit-Maire, 1997; Zazo *et al.*, 1997). En todo caso si efectivamente hubo una mayor aridez climática en el pasado, esta resulta difícil de correlacionar con los eventos de recarga que eventualmente se produjeron.

La hipótesis de mezcla de agua de origen meteórico con agua marina moderna debido a intrusión marina también resulta difícil de probar debido a que el agua de mayor mineralización de la Unidad Inferior es reconocida en algunos casos hasta 150 m sobre el nivel del mar. Por otro lado, las aguas de mayor mineralización que se tratan se sitúan en la parte central de la isla, lejos de las zonas costeras con posibles efectos de intrusión marina. No obstante, no se descarta que este fenómeno sea el responsable de una mayor mineralización del agua de pozos situados muy próximos a la costa en el sector de Gran Tarajal.

De estos antecedentes se desprende que la hipótesis de mezcla de agua meteórica con agua de mar antigua atrapada en las unidades intrusivas de menor permeabilidad puede ser

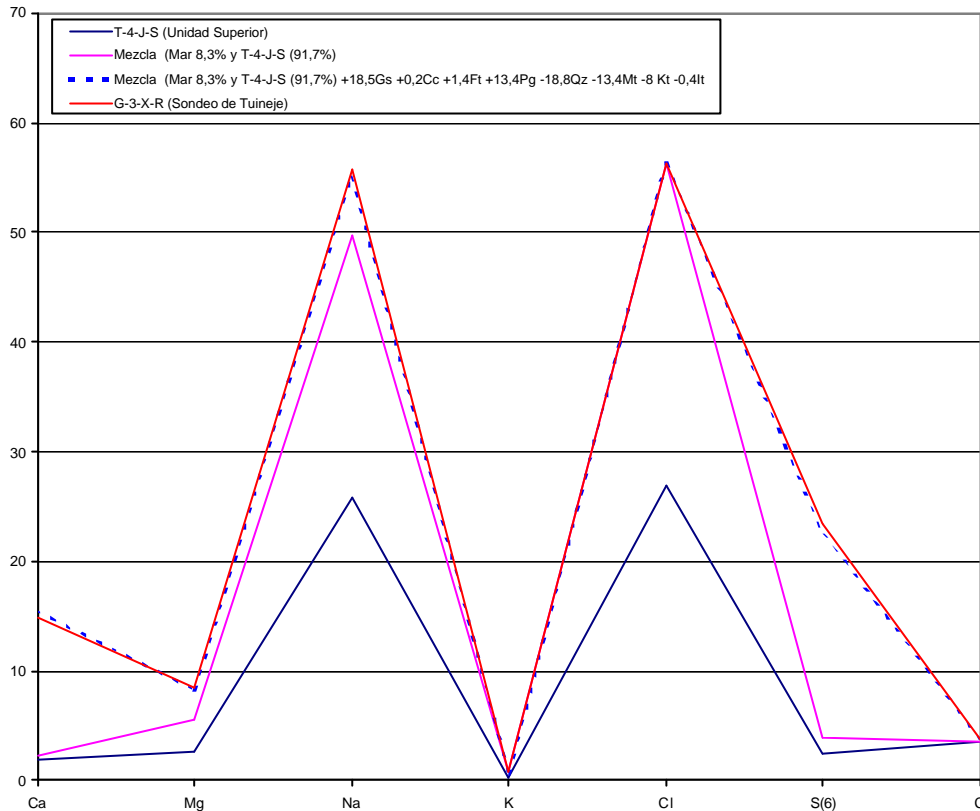
bastante acertada. En las siguientes líneas se explican con más detalle algunas de las características que apoyan esta idea.

El agua de la Unidad Inferior presenta una composición química clorurada-sódica-sulfatada. Como se indica en el apartado 4.5.7 del Capítulo 4, el estudio de las relaciones iónicas  $r_{Na/rCl}$ ,  $r_{Cl/(rHCO_3+CO_3)}$ ,  $r_{Mg/rCl}$ ,  $Cl/F$  y  $Cl/B$  pone de manifiesto que al aumentar el grado de mineralización de las aguas subterráneas, el valor de dichas relaciones se aproxima al valor teórico del agua de mar. Si bien en las aguas de la Unidad Superior los valores de estas relaciones iónicas también se aproximan al valor de la relación del agua de mar, producto de la aportación del aerosol marino, existe una importante dispersión de los datos. En cambio en la Unidad Inferior los valores de estas relaciones presentan una dispersión menor en torno al valor de la relación marina. También se observa que a medida que aumenta la concentración de cloruro en el agua el valor de la relación  $r_{Cl/(rHCO_3+CO_3)}$  aumenta bruscamente hasta aproximarse al valor de la relación del agua de mar. Un aumento brusco del valor de esta relación es indicativo de contaminación con agua de mar, aunque no es indicio de garantía. Por otro lado el estudio de la relación  $r_{Cl/rBr}$  indica que estas muestras presentan valores entre el marino y alrededor de 800, pero el conjunto tiende a acercarse al valor marino a medida que aumenta la salinidad.

El valor medio de la relación  $r_{Na/rCl}$  en el agua de la Unidad Inferior es de 0,96, siendo ligeramente superior al valor medio de esta relación para el agua marina (0,86). Este valor ligeramente superior al valor de la relación para el agua marina puede obedecer al aporte de sodio de los feldespatos, tal como se deduce de los resultados obtenidos de la modelación hidrogeoquímica y que se presentan en el apartado 4.5.10. Por ejemplo en la Figura 6.4 presenta el resultado de la modelación de agua de la Unidad Inferior de Tuineje obtenida a partir de la mezcla de agua representativa de la Unidad Superior (91,7%) con agua de mar (8,3%) y la posterior disolución de yeso, plagioclasa, calcita y forsterita, y la precipitación de sílice, montmorillonita cálcica, illita y caolinita. A partir de la mezcla de agua de la Unidad Superior y agua de mar se obtiene un agua de mezcla con una composición química coherente con la composición del agua de la Unidad Inferior.

Por otro lado el estudio de los isótopos de  $^{18}O$  y  $^2H$  de las aguas de la Unidad Inferior indican una gran probabilidad de que se trate de una mezcla de agua meteórica con una composición similar a la de la Unidad Superior y agua de mar. En las Figuras 5.8 y 5.9 se presentan las gráficas de  $^{18}O$  y  $^2H$  de las muestras de la Unidad Inferior, donde se indica además la concentración de cloruro de cada una de las muestras. En esta figura se observa en general un aumento en los contenidos de cloruro a medida que la composición isotópica de  $^{18}O$  y  $^2H$  se aproxima al valor de la composición isotópica considerada para el agua de mar. Si bien es posible que este cambio en la composición isotópica de las aguas de la Unidad Inferior y el aumento de los contenidos de cloruro se pueda deber a un fraccionamiento isotópico por evaporación, esta situación resulta poco probable ya que la composición isotópica de las aguas de la Unidad Superior que son representativas de la recarga no parecen mostrar un

fraccionamiento por evaporación significativo. Por otro lado las muestras de los sondeos profundos de Tuineje parecen partir de un agua meteórica original distinta a la de los sondeos profundos de Tesejerague, lo que incide en que la pendiente de ambas rectas de mezcla con agua de mar sean distintas. Respecto a los valores más pesados  $\delta^{18}\text{O}$  en las muestras de Tesejerague, tampoco se puede descartar un efecto de paleotermalismo que pudiese haber afectado a las aguas meteóricas de este sector antes de la mezcla con agua de origen marino.



**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.

Si bien solo se cuenta con resultados confiables de  $^{14}\text{C}$  de dos muestras de agua subterránea, se pueden establecer algunas características de interés. En primer lugar hay que mencionar que la muestra de agua subterránea obtenida para la Unidad Inferior resultó más antigua que la muestra obtenida de la Unidad Superior (Tabla 5.8). No obstante, las diferencias de edad obtenidas para ambas unidades hidrogeológicas son de solo 600 años, por lo que pueden ser consideradas como contemporáneas. Esto hace suponer que el  $^{14}\text{C}$  presente en las aguas de la Unidad Inferior efectivamente proviene de agua de la Unidad Superior. Esta pequeña diferencia de edad obtenida para ambas muestras de agua deja mucha incertidumbre respecto al origen de las aguas de la Unidad Inferior. Estos antecedentes indican la posibilidad de que el flujo de agua desde la Unidad Superior hacia la Unidad Inferior sea relativamente rápido. No obstante, estos resultados deben ser tomados con mucha precaución debido a que existe una posibilidad importante de mezclas de agua de la Unidad Superior con agua de la Unidad Inferior dentro del mismo sondeo dada la falta de entubación en los mismos. Por lo

tanto, para la obtención de resultados más fiables en esta materia resulta imprescindible la construcción de sondeos con entubación y rejillas adecuados a distintas profundidades, para la obtención de muestras más representativas de la Unidad Inferior.

A partir del conocimiento geológico actual que se tiene de la isla de Fuerteventura resulta difícil establecer un modelo conceptual claro que explique el origen del agua marina presente en las rocas intrusivas del Complejo Basal. Una posibilidad apunta a que este agua marina puede haber quedado atrapada en estas formaciones durante el ascenso de la Isla, ya que las rocas volcánicas que las sobreyacen efectivamente se originaron en un ambiente marino. Sin embargo, esta hipótesis resulta difícil de probar debido a que los datos geológicos indican que este ascenso se produjo en el Mioceno Superior, lo que a su vez implica un período de tiempo demasiado largo para que estas aguas relictas atrapadas en estas unidades no hayan sido lavadas completamente por el agua de la recarga. No obstante, como se determinó a partir del estudio de perfiles de temperatura y conductividad eléctrica, existirían flujos de agua importante en las rocas volcánicas de la Unidad Superior, mientras que en las rocas intrusivas de la Unidad Inferior estos flujos serían menores. Con estos antecedentes se puede plantear la hipótesis de que el agua de la recarga una vez que alcanza el nivel de saturación adquiere una mayor movilidad horizontal a través de las rocas volcánicas del Complejo Basal para seguir su camino de descarga hacia el mar a través de esta Unidad. De esta manera puede ocurrir que el lavado del terreno en la Unidad Inferior sea muy reducido, lo que implica que el agua marina que eventualmente quedó atrapada en la misma podría permanecer estacionaria durante largos períodos de tiempo. La lenta expulsión del agua marina de las rocas intrusivas se vería favorecida además por la aridez climática que ha gobernado durante largos períodos de tiempo en la isla de Fuerteventura y que incide en una baja tasa de recarga.

La explicación anterior no resulta del todo coherente si se considera que algunos de los sondeos profundos que explotan la Unidad Inferior tienen caudales de explotación de hasta  $5 \text{ L s}^{-1}$  (ITGE, 1990). Sin embargo, es necesario precisar que sólo algunos de los sondeos construidos en la isla producen caudales de importancia, ya la gran mayoría dan caudales muy bajos y por períodos de tiempo muy cortos. La coexistencia de puntos donde se pueden obtener caudales de cierta importancia con puntos donde los caudales son ínfimos hace suponer la existencia de un cierto control estructural en el drenaje de estas aguas. Por otro lado se desconoce el papel que desempeñan los diques que atraviesan toda esta Unidad y que eventualmente podrían jugar un papel importante en su drenaje. No se puede descartar que los diques actúen a modo de drenes de descarga de las aguas presentes en las rocas intrusivas, de tal manera que al ser extraída el agua desde los diques por medio de los sondeos de explotación esta produzca la generación de un flujo desde las rocas intrusivas hacia los diques a través de toda la superficie de contacto de ambas unidades. Considerando que la extensión de los diques puede ser de hasta varios kilómetros, no resultaría extraña la obtención de caudales de cierta importancia en estos sondeos. Por otro lado esta idea también explicaría

que el lavado del agua marina presente en las rocas intrusivas se estaría produciendo como consecuencia de la explotación actual que se hace a los diques. De todos modos es necesario precisar que esta idea entra en un campo netamente especulativo ya que no existen datos detallados de la geología de los sondeos que dan caudales de cierta importancia. La Figura 3.1 presenta un corte hidrogeológico esquemático W-E donde se representa esta situación. Nótese en esta figura que en el margen occidental de las islas las rocas intrusivas aparecen expuestas en superficie. Sin embargo, en este sector no existen sondeos profundos y son escasos los pozos que explotan agua de esta Unidad, por lo que no se puede extraer información precisa acerca del papel de estas rocas intrusivas en esta parte de la Isla.

Por otro lado no se tienen datos precisos acerca de la evolución tectónico-magmática de la isla que indiquen ascensos y descensos bajo el nivel del mar de partes importantes o de la totalidad de la isla. Tampoco se puede dejar de lado una combinación de procesos tectónico-magmáticos que tengan como resultado el ascenso de la isla, con variaciones en el nivel relativo del mar, ya que en otras islas del Archipiélago, como es el caso de Gran Canaria, se han reconocido playas cuaternarias hasta 60 m sobre el nivel del mar (Custodio, 1978). Zazo *et al.* (1997) a partir del reconocimiento en las terrazas marinas del Penúltimo y Último Interglacial, de fallas, micropliegues y basculamientos, ha concluido que las islas Canarias orientales han sido desde el punto de vista tectónico menos estables de lo que se había supuesto. En la isla de Fuerteventura el IGME (en prensa) ha reconocido una rasa marina a más de 55 m sobre el nivel del mar en el margen occidental de toda la Isla, lo que indicaría que las formaciones volcánicas e intrusivas del Complejo Basal en tiempos geológicos relativamente próximos se habrían situado bajo el nivel del mar. Si bien no existe una concordancia entre la profundidad a la que se han encontrado este agua relictas (hasta 150 ms.n.m.) y la altitud en que se han reconocido estas terrazas, tampoco se puede descartar que terrazas más antiguas situadas a una mayor altitud hayan sido erosionadas o bien que sus registros simplemente no se hayan conservado.

Es necesario indicar que las hipótesis anteriormente expuestas se trabajan a partir de la escasa información que se tiene de la geología del subsuelo. Esto incide en que no se tenga un conocimiento cabal de la distribución de las unidades volcánicas e intrusivas en profundidad, así como de las estructuras que presentan las distintas unidades. De esta forma resulta indispensable recomendar la realización de una cartografía geológica más detallada de los sondeos que en el futuro se realicen en este sector, a fin de aclarar estos interrogantes.

#### **6.4.2.- Dominio oriental**

El Dominio Oriental queda definido principalmente por lavas del Edificio Gran Tarajal, las cuales se encuentran cubiertas por lavas más recientes correspondientes al Malpaís, y por un aluvial antiguo situado entre ambas unidades volcánicas. Sólo una parte de las lavas de Malpaís y del aluvial cubierto por las mismas se presenta saturado. En la Figura

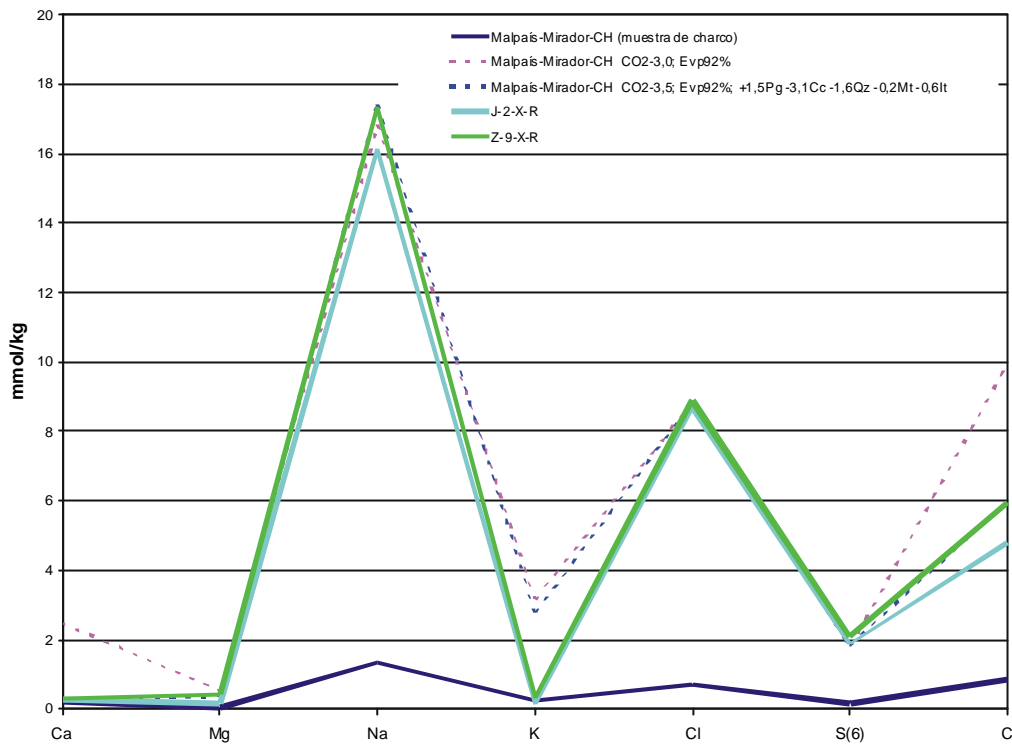
3.2 del capítulo 3 se presenta un corte hidrogeológico donde se observa lo indicado anteriormente.

Las aguas de menor mineralización reconocidas en el sector del Malpaís y que son representativas del agua de la recarga también presentan una composición marcadamente clorurado-sódica, con valores de las relaciones iónicas próximos a los de la precipitación. La Tabla 6.4 presenta los valores medianos de las relaciones iónicas más importantes de ambos grupos de aguas. En términos generales se observa que los valores de las relaciones iónicas de estas aguas se aproximan mejor a los valores del agua de lluvia respecto a las muestras obtenidas en la Unidad Superior. A diferencia de las aguas de la Unidad Superior, el valor de la relación  $rNa/rK$  está más próximo al valor mediano de la precipitación. Esta mayor semejanza con la composición química del agua de lluvia se atribuye a los materiales que componen las lavas recientes del Malpaís, que comportan una menor interacción agua-roca. Los resultados de la modelación del agua del Malpaís obtenidos a partir de equilibrar el agua de lluvia con la con un ambiente gaseoso con una presión parcial de  $CO_2$  de  $10^{-3.0}$  y  $10^{-3.5}$  atm, y de evaporar el 92% del agua de lluvia, indican que la mayor parte de la aportación iónica del agua responde al efecto de la aridez climática (Figura 6.5). Al igual que el agua de la Unidad Superior, se obtiene un mejor ajuste considerando la meteorización de plagioclasas y la precipitación de calcita y cuarzo. Se destaca en esta modelación que la presión parcial de  $CO_2$  del suelo utilizada para la reproducción del agua subterránea es muy baja y se aproxima al valor de la presión atmosférica. Estos resultados concuerdan con la interpretación realizada de los valores de  $^{13}C$  del CIDT en el agua, en la que los valores de  $\delta^{13}C$  obtenidos en muestras de agua del Malpaís están muy próximos a los valores de  $\delta^{13}C$  atmosférico (-8,0 ‰ vs. PDB).

	$rNa/rCl$	$rSO_4/rCl$	$rNa/rK$
Mediana precipitación	0.9	0.18	27.7
Mediana Malpaís	1.11	0.21	35.1

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

En las muestras de agua tomadas en el campo de lavas recientes del Malpaís los valores de las relaciones iónicas  $rNa/rCl$ ,  $rCl/r(HCO_3+CO_3)$ ,  $Cl/F$  y  $Cl/B$  son muy variables, pero en general también se cumple que al aumentar la salinidad del agua el valor de dichas relaciones se aproxima al valor teórico del agua de mar. La Figura 4.33 presenta el valor de la relación  $rCl/rBr$  vs.  $rCl$ , donde se observa que las muestras con menores contenidos de cloruro en general presentan valores para la relación  $rCl/rBr$  altos y próximos a los valores obtenidos para las muestras de agua de lluvia.



**Figura 6.5.-** 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<sub>2</sub> del suelo, evaporación y reacciones con fases minerales del medio.

A partir de la interpretación de la piezometría que se presenta en la Figura 9 del Anejo del capítulo 3 y del estudio de la recarga, se puede deducir que el agua subterránea reconocida en el Dominio Oriental procede de dos fuentes principales:

a) Del flujo lateral proveniente del Dominio Occidental, el cual presenta una continuidad hidráulica con las lavas del Edificio Gran Tarajal. A partir de las características hidroquímicas de las aguas reconocidas en este Dominio se interpreta que el flujo proviene principalmente de la Unidad Superior.

b) La recarga directa del agua de lluvia caída en este sector y del agua de escorrentía que se encharca en zonas más llanas. A partir de los cálculos de la recarga por métodos de balance hidrológico se espera que la recarga producida por la precipitación caída en el sector sea sólo de unos pocos milímetros anuales. No obstante, no se descarta que ésta se produzca principalmente por el agua de escorrentía procedente de las partes altas del Macizo de Betancuria, y que se encharca en las partes más bajas y llanas de este sector. El encharcamiento del agua de escorrentía se produciría cuando el agua que desciende del Macizo de Betancuria alcanza la Depresión Central, la cual presenta pendientes más bajas. Pero más importante aún para el origen de los encharcamientos resultan los obstáculos tanto naturales (lavas recientes) como artificiales (presas y gavias) que detienen la circulación del agua de escorrentía.

Uno de los sectores donde el autor ha observado importantes encharcamientos de agua después de fuertes precipitaciones corresponde a los márgenes de los campos de lavas



recientes del Malpaís. Esta unidad volcánica es relativamente nueva y ha rejuvenecido el relieve maduro de la isla, lo que ha permitido que se convierta en un importante obstáculo natural al flujo de agua de escorrentía que desciende desde los distintos barrancos, tanto del Macizo de Betancuria como de los “cuchillos” orientales.

El estudio de la composición isotópica ( $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$ ) de las aguas subterráneas del sector del Malpaís indica que éstas presentan una composición isotópica más ligera que las muestras de agua de la Unidad Superior. En general esta composición isotópica más ligera responde a los valores de las muestras de lluvia más ligeras obtenidas en el área de estudio. Como se indicó en el apartado 5.2.4 del capítulo 5, los valores isotópicos más ligeros de precipitación corresponden a muestras de lluvias de mucha intensidad y a muestras de lluvia obtenidas en las cotas más altas del Macizo de Betancuria. Para explicar el origen de la composición isotópica más ligera de las aguas presentes en el sector del Malpaís se plantean dos hipótesis:

a) que la recarga producida en las lavas del Malpaís ocurre sólo durante fuertes precipitaciones. El reducido fraccionamiento isotópico por evaporación que presentan estas muestras indica la posibilidad que esta recarga sea de tipo preferencial. Esta hipótesis es bastante factible si se considera la elevada permeabilidad que presentan las coladas de lava del Malpaís gracias al importante desarrollo de brechas, presencia de estructuras columnares y la ausencia de barrancos que permitan la escorrentía en la misma.

b) que la recarga se produce a partir del agua de escorrentía procedente de las partes más altas del Macizo de Betancuria y que se encharca en los márgenes de las lavas del Malpaís. El agua de lluvia procedente de las partes más altas del Macizo de Betancuria, que tiene una composición isotópica más ligera, escurre hacia las zonas más bajas y llanas. El encharcamiento se produce debido a que las lavas del Malpaís constituyen un obstáculo natural para la circulación del agua de escorrentía en su camino hacia el mar. La recarga en las zonas de encharcamiento se produciría por infiltración vertical del agua en los charcos, los cuales posiblemente conectarían con fracturas que permiten el flujo del agua. Tampoco se descarta que a medida que llegue agua de la escorrentía hacia los márgenes de las lavas y suba el nivel del agua de los charcos, parte de la misma se mueva según un flujo horizontal hacia el interior de las coladas de lava, para posteriormente cambiar a un flujo vertical y recargar el acuífero.

Para ambas hipótesis se supone una recarga de tipo preferencial inducida por una acumulación importante de agua en la superficie del terreno. Tampoco se descarta que el agua recargada en este sector se produzca por una combinación de los dos mecanismos de recarga indicados anteriormente.

Los contenidos de tritio medidos en las aguas del Malpaís están próximos a los contenidos de tritio medidos en las precipitaciones actuales. Si se considera que el espesor de la zona no saturada en este sector en general es superior a los 30 m, se ha de esperar que las concentraciones de tritio en el acuífero sean nulas en caso de flujo de recarga tipo pistón. Por

lo tanto, los contenidos de tritio medidos en este agua resultan coherentes con la hipótesis de una recarga preferencial debida a encharcamientos en superficie que recargan el acuífero.

### **6.5.- Síntesis final**

A partir de los resultados más importantes expuestos anteriormente, se propone un modelo para explicar el aumento de la salinidad del agua subterránea con la profundidad. En primer lugar hay que mencionar que el agua de la recarga actual es de composición clorurado-sódica y su composición química obedece principalmente al efecto de la aridez climática y en situaciones puntuales al efecto de retornos de riego. A partir de la interpretación de perfiles de temperatura y conductividad eléctrica en los sondeos se observa que el agua circula principalmente con un flujo vertical descendente, y lo hace a través de rocas volcánicas del Complejo Basal.

Una vez que el agua procedente de la Unidad Superior toma contacto con rocas intrusivas del Complejo Basal, sufre cambios importantes en la composición química, que se traducen fundamentalmente en un aumento significativo de los contenidos de cloruro, sodio y sulfato. Como se indicó anteriormente, los contenidos de sulfato corresponderían a aportes de la roca, específicamente de disolución de sulfato y no de oxidación de sulfuros. Por otro lado los aumentos en los contenidos de cloruro y sodio tendrían un origen distinto, asociado a la mezcla de agua de la Unidad Superior con aguas salinas de origen marino.