

# El contenido en tritio de las aguas subterráneas de la Isla de Pascua, Chile, como una herramienta para calcular la recarga al acuífero volcánico

C. Herrera<sup>(1)</sup>, M. Pincheira<sup>(1)</sup>, E. Custodio<sup>(2)</sup>, L. Araguás<sup>(3)</sup> y G. Velasco<sup>(4)</sup>

(1) Universidad Católica del Norte, Antofagasta (Chile).  
E-mail: cherrera@ucn.cl

(2) Departamento de Ingeniería del Terreno, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña, C/ Gran Capitán, s/n. Ed. D2. 08034 Barcelona (España).  
E-mail: emilio.custodio@upc.es

(3) Instituto Geológico y Minero de España, c/. Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid (España).  
E-mail: l.araguas@igme.es

(4) Agrícola y Servicios Isla de Pascua Ltda., Isla de Pascua (Chile).  
E-mail: gvelasco@entelchile.net

## RESUMEN

Se han realizado nuevos reconocimientos y muestreos en Isla de Pascua para avanzar en el conocimiento hidrogeológico de pequeñas islas volcánicas relativamente recientes. Del trabajo en curso se han seleccionado los datos de tritio en los pocos puntos de acceso al acuífero y de los goteos de tres tubos volcánicos someros para compararlos con los de la precipitación, para deducir la recarga al acuífero. Se obtiene un valor en el entorno de 300 mm/año, quizás sólo de 150 mm/año en el lado oeste. Este valor, a pesar de la notable incertidumbre asociada, es coherente con lo esperable. La metodología utilizada es aplicable en otras circunstancias.

Palabras clave: Isla de Pascua, isla volcánica, recarga, tritio

## ***Groundwater tritium content in Easter Island, Chile, as a tool to calculate the volcanic aquifer recharge***

### ABSTRACT

*New surveys and samplings have been carried out in Easter Island to advance the hydrogeological knowledge of small, relatively recent volcanic islands. From the work being done, tritium data have been selected from the scarce points of access to the aquifer, and from the dripping inside three shallow volcanic tubes, to be compared to precipitation data, in order to get the aquifer recharge. A value of about 300 mm/year is obtained, which may be reduced to 150 mm/year in the western side. The value is coherent, in spite of the high uncertainty, with what can be expected. The applied methodology is usable in other circumstances.*

*Key words: Easter Island, recharge, tritium, volcanic island*

## Introducción

Isla de Pascua se ubica en el Océano Pacífico, a 27°09'30" de latitud sur y 109°26'14" de longitud oeste, y forma parte del territorio nacional de Chile. Su nombre indígena es Rapa Nui y en la cartografía anglosajona figura como Easter Island. La Isla tiene una superficie de 166 km<sup>2</sup> y corresponde al lugar geográfico más aislado del mundo, estando a 3700 km de la costa de Chile (Figura 1).

La Isla posee un clima marítimo templado cálido, influenciado por el Anticiclón del Pacífico, con precipitaciones que alcanzan un promedio anual de 1126 mm para un período de tiempo de observaciones que comprende 7 años (Hajek y Espinoza, 1987). Los meses en que se registran las mayores precipitaciones corresponden a abril, mayo y junio (mayores a 100 mm), mientras que en el resto del año las precipitaciones son ligeramente menores y se distribuyen de forma relativamente uniforme, lo que denota el

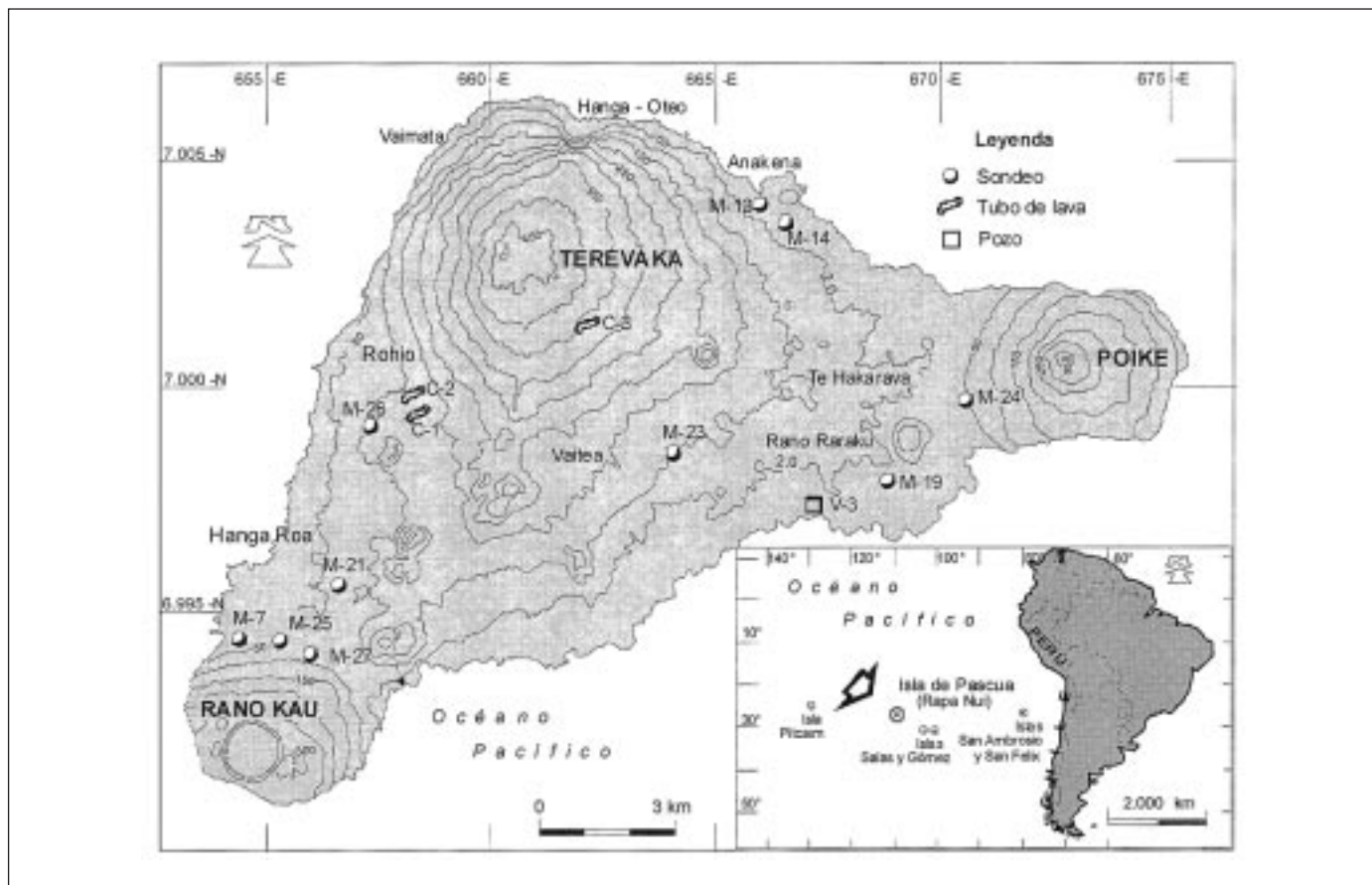


Fig. 1. Isla de Pascua, con indicación de la topografía, volcanes, sondeos y lugares de interés  
 Fig. 1. Easter Island, showing the topography, volcanoes, boreholes and sites of interest

carácter oceánico del clima. Las intensidades de las precipitaciones en Isla de Pascua presentan una amplia variación. La precipitación máxima en 24 horas de un mes, en promedio corresponde aproximadamente a un 36% del total de la lluvia mensual, en tanto que las lluvias de menor intensidad sólo alcanzan el 1%.

La evapotranspiración potencial es del orden de 850 a 950 mm/a (Pincheira, 2003) y es superada por la precipitación entre Abril y Septiembre, y es similar en el resto de meses. Esto supone una recarga a los acuíferos de por lo menos de 200 a 300 mm/a en buena parte de la superficie insular. Donde hay suelo apenas se produce déficit hídrico.

La vegetación de Isla de Pascua es bastante monótona, en parte debido al pobre desarrollo de sus suelos. Los matorrales y pastizales son los que mejor definen el paisaje de la Isla. Las especies arbóreas se desarrollan en las partes de mayor altitud y en los cráteres. Se han inventariado en la isla 135 especies vegetales, de las cuales se considera que el 40% son indígenas o naturalizadas (Hajek y Espinoza, 1987).

No obstante, la vegetación de la Isla ha sufrido numerosas modificaciones en el transcurso del tiempo debido a la sobreexplotación de algunas especies por parte de los antiguos habitantes y por la introducción de otras por los primeros colonizadores.

Entre los años 1963 y 1967 el Departamento de Recursos Hidráulicos de CORFO (Corporación de Fomento a la Producción) construyó un total de 26 sondeos con profundidades variables entre 7 y 102 m. La mayoría de estos sondeos se ubican en las cercanías de Hanga Roa, la capital, y son utilizados para el abastecimiento público de la ciudad.

Los reconocimientos hidrogeológicos son muy escasos y en la gran mayoría corresponden a informes inéditos realizados por empresas consultoras. El primer estudio que trata sobre la hidrogeología de isla de Pascua fue elaborado por Hauser (1986) y en el se desarrollan aspectos relacionados al abastecimiento de agua para la isla a partir de la construcción de una red de galerías para drenar el agua de la laguna existente en el cráter del volcán Rano Kau. El estudio más extensivo de la hidrogeología de la Isla fue

desarrollado por Alamos y Peralta (1992) y en el se tratan distintos temas hidrogeológicos relacionados a la calidad de las aguas, y la obtención de los parámetros hidráulicos del acuífero, y se presenta un modelo de simulación de flujo estacionario. Recientemente la Universidad Católica del Norte (UCN, Chile), con el apoyo del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), ha realizado nuevos estudios y muestreos, en parte recogidos en Pincheira (2003).

Debido a las limitaciones de acceso al acuífero insular como consecuencia del reducido número de pozos en la Isla, se ha considerado la aplicación de técnicas isotópicas como una herramienta útil para poder plantear hipótesis fundadas sobre el funcionamiento hidrogeológico del acuífero. En este sentido el estudio de los contenidos de tritio de las aguas subterráneas es interesante para evaluar el tiempo medio de residencia del agua en el acuífero, aprovechando que el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) mantiene en Isla de Pascua una estación de muestreo mensual del agua de lluvia para la determinación tritio, que es una de las más antiguas existentes en el Pacífico Sur, junto con la estación de las islas Cook ubicadas más al occidente. Por esta razón se ha procedido a realizar un muestreo sistemático del agua de los tubos de lava y de los sondeos con el objetivo de evaluar el tiempo medio de residencia del agua en el acuífero. Durante la campaña de muestreo de mayo de 2002 se obtuvieron 14 muestras para el análisis de tritio de las aguas subterráneas, que comprenden muestras de sondeos, pozos, tubos de lava y la laguna del volcán Rano Kau. Todas las muestras fueron analizadas en los laboratorios del CEDEX en Madrid, dentro de un convenio de colaboración entre la Universidad Católica del Norte y el IGME.

Para el cálculo del tiempo medio de residencia de las aguas subterráneas se ha utilizado el código MULTIS (Ritchter *et al.*, 1992), que fue desarrollado para la interpretación de datos isotópicos ambientales en estudios hidrogeológicos. Se basa en la utilización y combinación de distintos modelos de mezcla y dispersión de fluidos en los acuíferos, a partir de una función de entrada de tritio basada en datos mensuales o anuales. Dicho código considera al sistema acuífero como un medio homogéneo, donde no existen fenómenos de retraso, e hidrodinámicamente en estado estacionario. Se determinan parámetros hidráulicos agregados (lumped parameter) representativos del medio. Los tres modelos básicos que se consideran son: el modelo exponencial (ME), el modelo lineal (ML) y el modelo de flujo pistón (MP) que combinados en serie o en paralelo producen más de 30 otros modelos diferentes. Este código permite dos formas de trabajo: problema directo y problema

inverso. El problema directo permite obtener diferentes funciones de salida teórica, a partir de la función de entrada utilizada, para un modelo de flujo determinado al que se le asignan parámetros hidráulicos específicos; el problema inverso permite obtener, para un determinado conjunto de datos isotópicos, cuales son los parámetros hidráulicos para un modelo de flujo determinado que lleva a una menor desviación entre la función de salida teórica y la real (observada).

Para la caracterización química e isotópica del agua de recarga se obtuvieron muestras de agua en los goteos existentes en el techo de tubos volcánicos. Estos goteos son permanentes aunque su intensidad varía estacionalmente. El techo de estas estructuras en la mayoría de los casos estaba situado entre 3 y 5 m por debajo de la superficie del suelo. Estas muestras son representativas del agua de lluvia que se infiltra en el suelo y produce recarga. En realidad el escaso suelo existente sobre los tubos volcánicos, de 30 cm a más de 70 cm de potencia, hace que los goteos sean mayoritariamente la descarga por fisuras que drenan porciones del terreno que se saturan cuando llueve. Es de esperar que el tiempo de tránsito sea corto, de meses a algunos años a causa del espesor de suelo, lo que se tratará más adelante, y que las fisuras mantengan un intercambio difusivo con el agua retenida en poros, vacuolas y microfisuras, lo que supone un retraso en el transporte del tritio, que así se acerca al de un medio poroso. No se dispone de estudios de la variación temporal de esos goteos.

Con el objetivo de evaluar la composición química e isotópica del agua de lluvia fueron instalados dos tomamuestras de agua de lluvia, en los cuales se recogió la precipitación acumulada mensual. Un tomamuestra fue instalado en la hacienda de Vaitea, en la parte central de la isla, y el otro en la población de Hanga Roa. En total se recuperaron 20 muestras de agua de lluvia.

En este artículo sólo se estudian los datos de tritio. Los datos químicos y de otros contenidos isotópicos ambientales serán objeto de otros trabajos posteriores, y en parte están elaborados en el trabajo de Pincheira (2003).

### Contexto geológico

La geología de Isla de Pascua está restringida a la actividad volcánica desarrollada en tres edificios principales, que de más viejo a más nuevo corresponden a: los volcanes Poike, Rano Kau y Terevaka (Figura 2).

El volcán Poike es el edificio volcánico más anti-

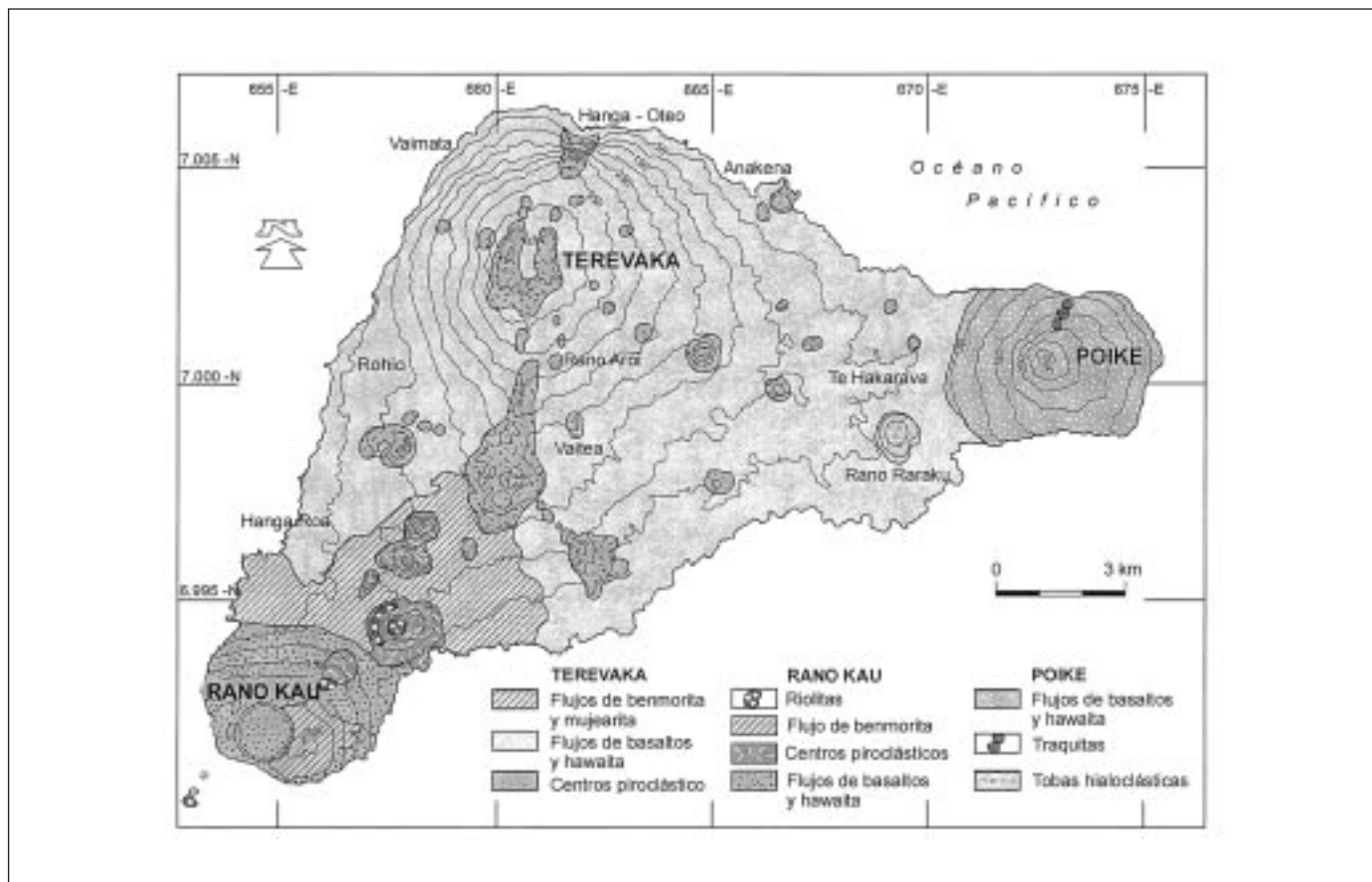


Fig. 2. Simplificación de la geología de Isla de Pascua, con las tres unidades volcánicas principales  
 Fig. 2. Simplified geology of Easter Island with the three main volcanic units

guo y se irguió a partir de dos episodios efusivos principales, con edades K/Ar que oscilan entre 2,5 y 0,9 millones de años (Clark y Dymond, 1977). Otras fuentes amplían este rango a edades de 3 millones de años a menos de 300.000 años (Baker y otros, 1974). Poike corresponde a un estratovolcán constituido por la superposición de múltiples flujos de lavas, principalmente basaltos y hawaítas, cuyas texturas varían de afanítica en su base a porfídica en la cima. En el acantilado norte del volcán se pueden observar claramente alrededor de 50 coladas de lava cuya potencia varía entre 1 y 5 metros. La mayor parte de estos flujos son del tipo "aa", con niveles escoriáceos, tanto en su techo como en su base, y que alternan con flujos tipo pahoe-hoe. Este cono está afectado por una fisura hacia su ladera norte, que dio paso a la eyección de tres domos de composición traquítica. Otra fisura paralela en la ladera suroeste de Poike produjo una erupción subacuática que forma el cono de tobas hialoclásticas conocidas como el Volcán Rano Raraku (González-Ferran, 1987).

El volcán Rano Kau es relativamente contemporá-

neo al Poike y se caracteriza por presentar un cráter principal de 1,5 km de diámetro, el cual está ocupado por una laguna que alcanza unos 6 m de profundidad (Hauser, 1986). Las distintas dataciones efectuadas a los flujos de lava dan edades que oscilan entre 2,56 millones de años y 180.000 años. El volcán Rano Kau, está también formado por una sucesión de flujos de lavas basálticas, que gradan de hawaítas a benmoritas. Estas últimas representan una fase final caracterizada por erupciones más félsicas, principalmente en el costado este de la gran caldera central que se formó luego de las últimas erupciones. Una fisura con dirección noreste-suroeste caracteriza una serie de centros eruptivos parásitos que incluyen un domo de composición traquítica a riolítica con obsidiana en la superficie, de unos 200 m de altitud, y tres pequeños islotes de composición riolítica ubicados al suroeste de Rano Kau.

El volcán Terevaka es el que alcanza una mayor extensión en toda la Isla y es el más reciente. Está constituido mayoritariamente por flujos laminares de lava basáltica, hawaítica, y en menor proporción



benmorítica. En él se encuentran alrededor de 104 centros eruptivos en forma de cráteres, conos o domos. Las coladas más antiguas afloran en la vertiente norte y corresponden a basaltos afaníticos. La edad absoluta obtenida para algunos flujos es de 360.000 años, aunque no se descartan coladas más antiguas. Se estima que su última actividad eruptiva ocurrió hace unos 10.000 a 12.000 años, y corresponde a la colada de lava de Hiva-Hiva en el sector de Rohio (González-Ferran, 1987). A diferencia de los volcanes Poike y Rano-Kau, el volcán Terevaka no presenta un cráter principal, ya que los flujos de lava que construyeron este edificio volcánico son producto de múltiples erupciones controladas por dos sistemas de fracturas que presentan rumbos aproximados NNE-SSO y ONO-ESE, y cuyas sucesiones de lavas y conos piroclásticos estructuraron el cuerpo principal de la isla, englobando a los volcanes Poike y Rano Kau que hasta entonces permanecían como "islas" independientes.

### **Piezometría**

Se dispone de las medidas de niveles estáticos realizadas por Alamos y Peralta (1992), complementadas con datos obtenidos en los reconocimientos de mayo de 2002, cuando no se pudieron medir los niveles estáticos en todos los sondeos debido a que algunos de ellos tenían bombas sumergibles instaladas. Sin embargo, esto no plantea una mayor dificultad interpretativa debido a que no se observa ninguna variación significativa de los niveles de agua medidos en ambos períodos de tiempo. La mayoría de los datos corresponden a niveles medidos en sondeos profundos construidos en la década de 1960, que penetran en el terreno entre 17 y 102 m, y en algunos casos a pozos de menor profundidad situados en el borde costero. Tanto los sondeos como los pozos penetran solo de 0,5 a 2 m bajo el nivel freático.

La gran mayoría de los sondeos y pozos se ubican en la parte sur de la Isla y por lo tanto se desconoce lo que sucede en la parte norte de la Isla. Con los escasos datos disponibles no es posible trazar una superficie piezométrica, que sería freática, aunque se puede deducir un flujo del interior hacia la costa con gradientes hidráulicos pequeños en la franja costera, entre el 0,5 y el 2‰ en las áreas con materiales volcánicos más recientes. No hay datos en el interior de la isla ni en los conos volcánicos.

Alamos y Peralta (1992) han evaluado datos de ensayos de bombeo realizados cuando se construyeron los sondeos y determinaron valores de transmisividad del acuífero variables entre los 20.000 y 40.000

m<sup>2</sup>/día. Estos valores pueden estar sobrevalorados, aunque responden a los valores esperables para lavas basálticas jóvenes que no presentan efectos importantes de alteración y colmatación de estructuras planares. Por otro lado, debido a que en superficie se han reconocido numerosos tubos de lava que pueden alcanzar varios cientos de metros de longitud, no se puede descartar que en la zona saturada se conserven partes de este tipo de estructuras volcánicas, heterogeneizando el medio, posiblemente a escala entre decamétrica y hectométrica.

Estos elevados valores de la transmisividad, que responden a permeabilidades (conductividades hidráulicas) que pueden ser superiores a 1000 m/día, son los que corresponden a formaciones volcánicas jóvenes con zonas escoriáceas en coladas de lava no alteradas. En el caso de los basaltos que rellenan la depresión de Pearl Harbour, en la Isla de Oahu (Archipiélago de Hawai) se citan transmisividades de hasta 100.000 a 500.000 m<sup>2</sup>/día en espesores que superan varias decenas de metros (Lau, 1967). Valores también muy altos se mencionan en áreas lacustres de Centro América, y en los recientes derrames costeros de la isla de Lanzarote, Archipiélago de Canarias (Custodio, 1973, 1978).

La ausencia de manantiales y de acuíferos colgados en Isla de Pascua hacen suponer la ausencia de niveles de baja permeabilidad que dificulten el flujo vertical del agua en su descenso por la zona no saturada. No obstante, en los cráteres de los volcanes Rano-Kau, Rano-Aroi, Poike y Rano Raraku existen lagunas que pueden alcanzar algunos metros de profundidad y las cuales se sitúan a varias decenas de metros por sobre el nivel de saturación insular. Ello hace suponer por un lado que estas lagunas se encuentran desconectadas hidráulicamente del nivel de saturación insular quedando colgadas sobre el mismo, quizás siendo la base formaciones lacustres hidromorfas de muy baja permeabilidad. Esta es una situación conocida en los mares de Auvernia, en el Macizo Central Francés, y en Alemania, entre otros muchos lugares, aunque no sucede en áreas volcánicas jóvenes de Canarias (por ejemplo Bandama, Montañón Negro, Caldera de los Marteles, en Gran Canaria) donde no se han formado sedimentos lacustres ricos en arcillas y materia orgánica. También cabe pensar en la presencia local de rocas volcánicas muy alteradas, quizás hidrotermalmente, de muy pequeña permeabilidad, pero este hecho no ha sido estudiado. Para la laguna mayor, la de Rano-Kau, cuyo cono forma un acantilado sobre el mar, no se aprecian salidas de agua al exterior, salvo pequeñas humedades con vegetación.

En Isla de Pascua no hay manifestaciones ni de

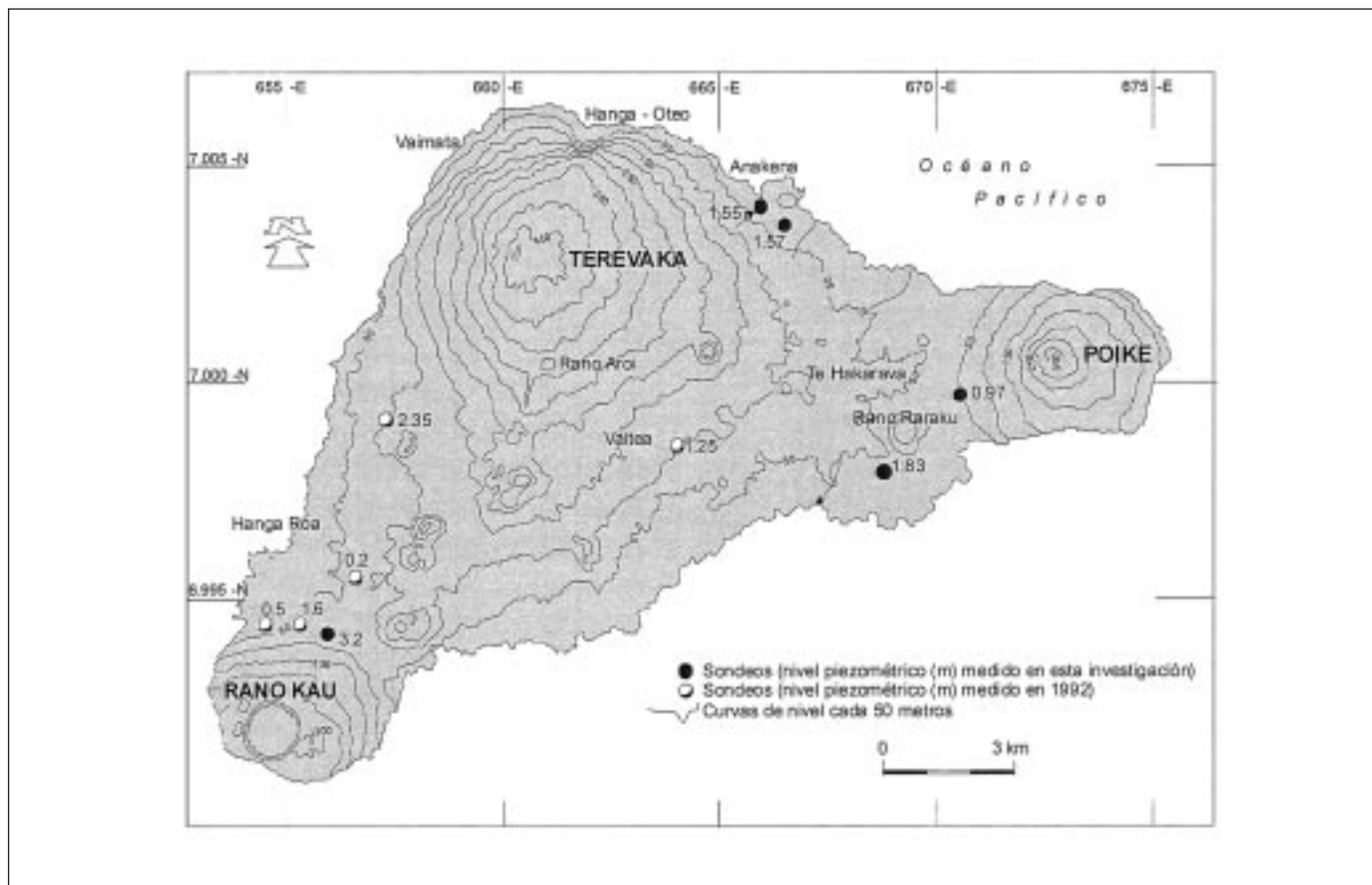


Fig. 3. Altura del nivel del agua subterránea en los pozos y sondeos  
 Fig. 3. Groundwater head elevation in openwells and boreholes

rocas muy alteradas ni de enjambres de diques, como se evidencian en Canarias (Custodio y Cabrera, 2002), y se están reconociendo en Hawái, Reunión, Madeira y Azores. Seguramente están también presentes en Isla de Pascua, o bien bajo los mantos de coladas recientes o bien como núcleo de los volcanes.

La revisión sistemática de los barrancos en la parte occidental de Isla de Pascua sólo muestra la existencia de apilamientos de coladas de lava basáltica de 1 a 2 m de potencia. No obstante, en los barrancos del sector de Rohio se reconoció un nivel de paleosuelo de 1 m de potencia, el cual tenía una continuidad de varios cientos de metros pero que aparentemente no actuaba como un nivel de menor permeabilidad que diera lugar a la existencia de manantiales.

El principio de Badon Ghijben-Herzberg (Custodio y Llamas, 1976; Custodio y Bruggeman, 1987) predice que para un agua salada marina estática en el terreno, la supuesta interfaz busca agua dulce-agua marina en el medio saturado subterráneo debería estar a 40 veces (para las densidades comunes del agua

dulce y del agua salada) la elevación piezométrica sobre el nivel medio del mar.

El hecho de que buena parte de los sondeos y pozos de Isla de Pascua muestre un apreciable incremento de salinidad respecto a la esperable en la recarga (Pinheiro, 2003), a pesar de la pequeña penetración, hace pensar que el ancho de la zona de mezcla es grande y ocupa una parte importante del espesor permeable saturado, naturalmente o a consecuencia de las extracciones. No hay datos al respecto. Por otro lado las elevaciones freáticas pueden no estar referidas al nivel medio efectivo local del mar, y se carece de sondeos profundos hasta el agua salada para comprobarlo. Algo similar se observa en el área de El Golfo, isla de Hierro (Archipiélago de Canarias). Más hacia el interior de la franja costera de 1-3 km de ancho no hay sondeos. Es posible que pueda llegar a existir una rápida elevación piezométrica a causa de la disminución de permeabilidad al entrar en el núcleo volcánico alterado, sin agua salada debajo, pero en el estado actual del conocimiento es una mera elucubración.

## Contenido de tritio en las aguas subterráneas

El tritio es un isótopo radioactivo del hidrógeno ( $^3\text{H}$ ), que se desintegra formando  $^3\text{He}$  por emisión de partículas beta y tiene un período de semidesintegración de 12,33 años. El tritio producido en la atmósfera, ya sea de forma natural o artificial, pasa a formar parte de la molécula de agua y posteriormente es incorporado al ciclo hidrológico, donde se comporta como un trazador del agua. Las explosiones termonucleares realizadas al principio de la década de 1960 inyectaron a la atmósfera grandes cantidades de tritio, las cuales sobrepasaron con creces las concentraciones naturales.

Los contenidos de tritio reconocidos en las aguas subterráneas de Isla de Pascua, cuya incertidumbre ( $\pm\sigma$ ) está entre 0,3 y 0,4 UT (unidades de tritio), guardan directa relación con la distribución espacial de las muestras (Tabla 1). Así, las muestras que presentan mayores contenidos de tritio corresponden a las muestras obtenidas en los tubos de lava, con concentraciones superiores a  $1,2 \pm 0,4$  UT y un máximo de  $1,8 \pm 0,4$  UT. Esta situación es coherente con la localización de las muestras, si se considera que las muestras de los tubos de lava corresponden al agua de lluvia que se recarga en la superficie del suelo y que tiene que atravesar sólo algunos pocos metros de zona no saturada antes de ser descargada en el techo de los tubos. Por otro lado, en las muestras obtenidas en los sondeos profundos en general se observa que las concentraciones de tritio disminuyen a medida

que aumenta el espesor de la zona no saturada. En las muestras obtenidas en sondeos también se observa una mayor concentración de tritio para las muestras ubicadas en la parte este de la Isla (M-19, M-24 y M-23) y menor para las muestras de la parte oeste (M-25, M-26, M-21, M-7 y M-27).

## Modelación de los contenidos de tritio de las aguas subterráneas

Los datos utilizados para el estudio de los contenidos de tritio en la precipitación de Isla de Pascua fueron tomados de la base de datos GNIP/ISOHIS de la OIEA. Estos datos corresponden a la concentración promedio de tritio de las precipitaciones mensuales, salvo algunas excepciones en que corresponden al promedio trimestral. En total son 198 datos de tritio que han sido recolectados en distintos lapsos de tiempo comprendidos desde 1964 hasta el año 2000.

Para la utilización del código MULTIS en la interpretación del tiempo medio de residencia de las aguas subterráneas es necesario definir una función de entrada con datos desde 1954 a la fecha, que refleje de la forma lo más completa y representativa los contenidos de tritio en las precipitaciones. Para tal efecto, los datos disponibles, que generalmente por diversos motivos se encuentran incompletos, deben ser complementados con información de otras estaciones de la OIEA que presenten características similares, o bien, si no se dispone de información para un lugar específico, realizar correlaciones con las estaciones más cercanas, preferentemente aquellas de similar latitud y clima.

En el caso de Isla de Pascua los datos fueron completados recopilando información de la estación ubicada en las Islas Cook ( $21^{\circ}2'$  de latitud sur,  $159^{\circ}8'$  de longitud oeste), pertenecientes a Nueva Zelanda. Esta es la estación más cercana a Isla de Pascua que posee la OIEA, y presenta características similares en lo que respecta a su carácter oceánico y en cuanto a su ubicación geográfica. De esta forma la función de entrada fue construida con los contenidos de tritio de las siguientes procedencias:

1. De octubre de 1957 a febrero de 1964: Islas Cook
2. De marzo de 1964 a octubre de 1973: Isla de Pascua
3. De junio a noviembre de 1975: Isla de Pascua
4. De enero de 1978 a septiembre de 1990: Islas Cook
5. De octubre de 1990 a diciembre de 2000: Isla de Pascua

Los períodos de tiempo en los que no se tienen datos para ninguna de las dos estaciones se completaron por interpolación lineal simple. La Figura 4 pre-

Muestra	Tritio (UT)	Cota (m s.n.m.)	Espesor de la zona no saturada (m)
M-7	0,69±0,35	31	30
M-13	0,86±0,32	21	20
M-19	1,09±0,37	33	31
M-21	0,70±0,34	60	60
M-24	1,07±0,36	42	42
M-23	1,07±0,32	96	95
M-25	0,72±0,34	43	42
M-26	0,77±0,34	64	62
M-27	0,61±0,33	65	58
V-3	1,00±0,35	2	
C-1	1,24±0,36	115	
C-2	1,77±0,39	110	

M=sondeo, V=pozo abierto; C= (cueva) tubo volcánico; L=laguna

Tabla 1. Contenido de tritio (UT) para distintas muestras de agua subterráneas de Isla de Pascua

Table 1. Tritium content (UT) for different groundwater samples of Easter Island

senta los contenidos de tritio en las precipitaciones y su distribución en el tiempo, para las estaciones de Isla de Pascua y de las Islas Cook. En ella se observa cómo los contenidos de tritio evolucionan de forma similar para estas dos estaciones. Comienzan con un rápido aumento en los contenidos de tritio, que alcanzan sus valores más elevados en la década de 1960, que llegan a superar las 100 UT y coinciden con el período de ensayos termonucleares realizados en el hemisferio norte. Posteriormente, en las décadas de 1970-1980 se produjo un descenso paulatino en los contenidos de tritio, con oscilaciones estacionales. Para este período de tiempo apenas hay datos de Isla de Pascua pero están bien documentados para las Islas Cook. De la década de 1990 en adelante se observa un leve incremento en los contenidos de tritio, presentándose 3 picos: el primero en 1991, con 13,4 UT, que se presenta tanto en Isla de Pascua como en las Islas Cook, y los otros dos en enero y julio de 1996 con 23,6 y 24,4 UT respectivamente. Estos dos últimos picos no se alcanzan a registrar para los datos de las Islas Cook que solamente llegan hasta 1994. El origen de estas anomalías en el registro no es claro ya que no se conocen todos los antecedentes de ensayos nucleares desde 1990 a 2002.

Para que la función de entrada sea representativa de las aguas subterráneas generalmente se pondera de acuerdo a las precipitaciones, o mejor aún con la recarga estimada de la zona. Con este procedimiento se asegura que los contenidos de tritio de precipitaciones de mayor cuantía, que producen mayor recar-

ga, tengan mayor peso frente a los contenidos registrados en precipitaciones de menor intensidad que se evapotranspiran en buena parte. La concentración ponderada vale:

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \psi_i}{\sum_{i=1}^n \psi_i}$$

donde  $C_i$  es la concentración de tritio en el mes  $i$  y  $\psi_i$  el coeficiente de ponderación (la pluviometría,  $P$  si no se conoce la recarga,  $R$ ) y  $n$  el período de ponderación, en general un año ( $n=12$ ).

La ponderación se efectuó según los datos de precipitación presentes en la base de datos GNIP/ISOHIS de la OIEA. Como del año 1953 a 1963 y de 1976 a 1987 no se dispone de esta información para estos períodos de tiempo se utilizaron las precipitaciones medias mensuales. La Figura 5 presenta la gráfica de los contenidos de tritio mensuales sin ponderar y la función de entrada con base anual ponderada por la pluviometría, en la que se produce una suavización de los picos.

La aplicación del Código MULTIS se ha efectuado considerando tanto el problema directo como el inverso para la función de entrada ponderada. Los modelos de flujo utilizados corresponden a los modelos básicos. Las soluciones obtenidas para cada modelo, que pueden ser más de una, proporcionan el tiempo medio de residencia (renovación) de las aguas en el acuífero, más el error expresado como la

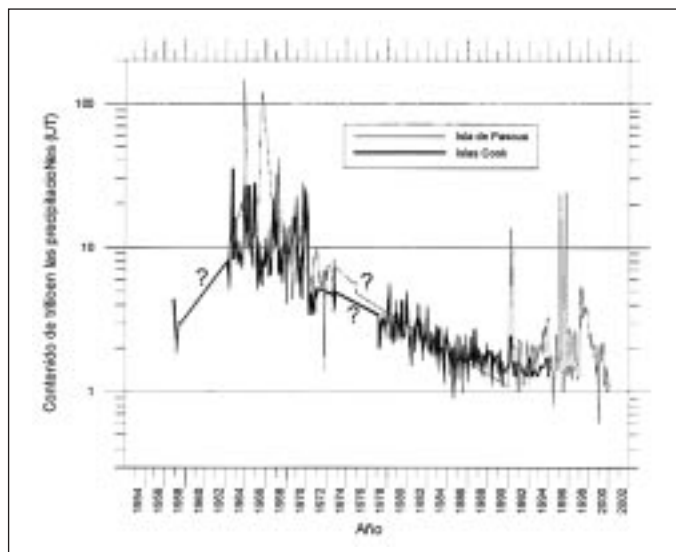


Fig. 4. Contenido en tritio en la precipitación de la Isla de Pascua y de las Islas Cook  
 Fig. 4. Tritium content in precipitation in Easter Island and in Cook Islands

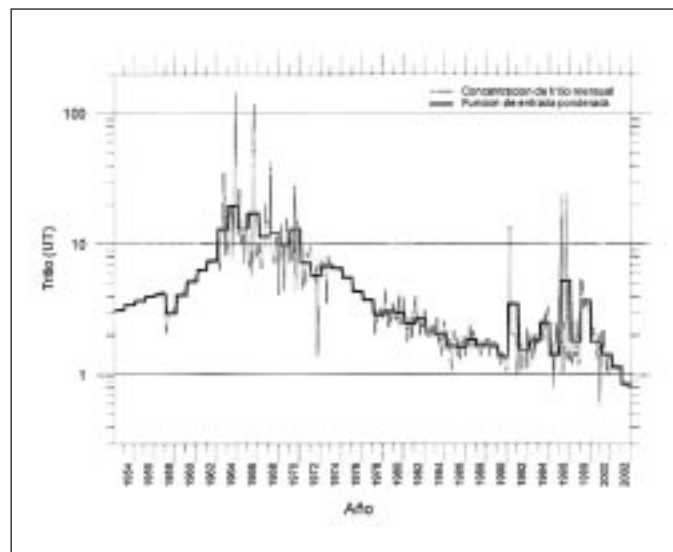


Fig. 5. Contenido en tritio mensual supuesto en la lluvia de la Isla de Pascua, y función ponderada anual de entrada  
 Fig. 5. Assumed monthly tritium content in Easter Island rainfall and weighted annual input function



desviación cuadrática media de los datos respecto a la curva de mejor ajuste (que no se tabula).

En la tabla 2 se dan los resultados de aplicación del código MULTIS a la función de entrada de tritio ponderada según la precipitación para los tres modelos básicos. Para los goteos en tubos volcánicos (muestras C) el modelo que parece más apropiado es el flujo de pistón, o bien por desplazamiento en el suelo y por flujo por fisuras con difusión a la matriz. De las dos soluciones, las de largo tiempo de renovación no tienen sentido físico. El valor  $\tau=2,0$  a  $3,0$  años se toma como representativo del espesor de terreno sobre la cavidad, que vale de 3 a 5 m.

Para los sondeos los valores mayores del tiempo de renovación se obtienen para el sector de Hanga Roca-Rohio (lado oeste). No es posible seleccionar entre el modelo de flujo de pistón (11,5 a 20,5 años mínimo; 40 años máximo y poco creíble como tal flujo de pistón) en el caso de que el muestreo sólo interese la parte superior del nivel saturado, a 40-60 m de profundidad, y el modelo exponencial en el caso de que el muestreo afecte a buena parte de la parte activa del flujo de agua dulce, e integre líneas de corriente de diversa longitud; en este caso  $\tau=50-70$  años. El pozo del sector norte es de características similares.

Para los sondeos del sector este (en realidad el cuadrante SE) tanto el modelo de flujo de pistón como el exponencial dan unos primeros valores excesivamente pequeños ( $\tau \sim 1$  año), no coherentes son las

profundidades de 20 a 60 m del nivel freático; los segundos valores, en el entorno de 25-30 años, son más razonables.

En el caso de la laguna L-2 (Rano-Kau) la primera solución de  $\tau=0$  años se ajusta razonablemente bien a lo esperable.

El código MULTIS permite la combinación en serie o en paralelo de los modelos básicos en distintas proporciones, generando numerosos modelos que pueden representar con mayor fidelidad distintas situaciones hidrogeológicas (Richter *et al.*, 1993). En consideración de que el flujo vertical del agua en la zona no saturada puede asociarse bien con el modelo de flujo de pistón, pero que una vez que el agua alcanza la zona saturada puede darse una situación equivalente a la de mezcla total (modelo exponencial) de las aguas en las captaciones, se ha procedido a realizar una combinación en serie del modelo de flujo de pistón y el modelo exponencial, y la combinación del modelo de flujo de pistón y el modelo lineal según se presenta en la Figura 6.

Los resultados obtenidos para los sondeos, según la combinación en serie de los modelos de flujo de pistón y exponencial, presentan dos rangos de soluciones (Tabla 3). En primer lugar, si se consideran porcentajes menores al 10% del modelo exponencial, las edades fluctúan entre 17 y 19 años. En segundo lugar, al aumentar el % del modelo exponencial por encima del 30%, los tiempos aumentan progresivamente de cerca de 40 años, a máximos de 70 y 95 años, para un

Muestra	U.T.	Tiempo de renovación (años) según el modelo:			Sector
		Exponencial	Lineal	Flujo de pistón	
C-1	1,24±0,36	16	1,5 ; 10	2,0 ; 26,5	
C-2	1,77±0,39	4,5	3,0	3,0 ; 11	
C-3	1,21±0,37	17	1,5 ; 10,5	2,0 ; 27	
M-13	0,86±0,32	40,5	13,5 ; 33,5	10 ; 39,5	Norte
M-19	1,09±0,37	1,0 ; 24,5	1,0 ; 25,5	1,0 ; 29,5	Este
M-21	0,70±0,34	57	42	11,5 ± 40,5	Hanga Roa
M-24	1,07±0,36	1,0 ; 25,5	26	1,0 ; 30	Este
M-23	1,07±0,32	1,0 ; 25,5	26	1,0 ; 30	Este
M-25	0,72±0,34	55	40,5	19 ; 40,5	Hanga Roa
M-26	0,77±0,34	49	13 ; 38	20,5 ; 40	Rohio
M-27	0,61±0,33	70	48	17 ; 41	Hanga Roa
M-7	0,69±0,35	59	42,5	11,5 ; 40,5	Hanga Roa
V-3	1,00±0,35	0 ; 1,0	28,5	26 ; 39,5	Este
L-2	0,95±0,35	0 ; 33,5	13,5 ; 30	24,5 ; 25	

C=cuevas (tubos) volcánicos; M=sondeos; V=pozo abierto; L=laguna

Tabla 2. Resultados de la aplicación del código MULTIS para la función de entrada ponderada por la pluviometría  
 Table 2. Results of the MULTIS code application to the precipitation weighted input function

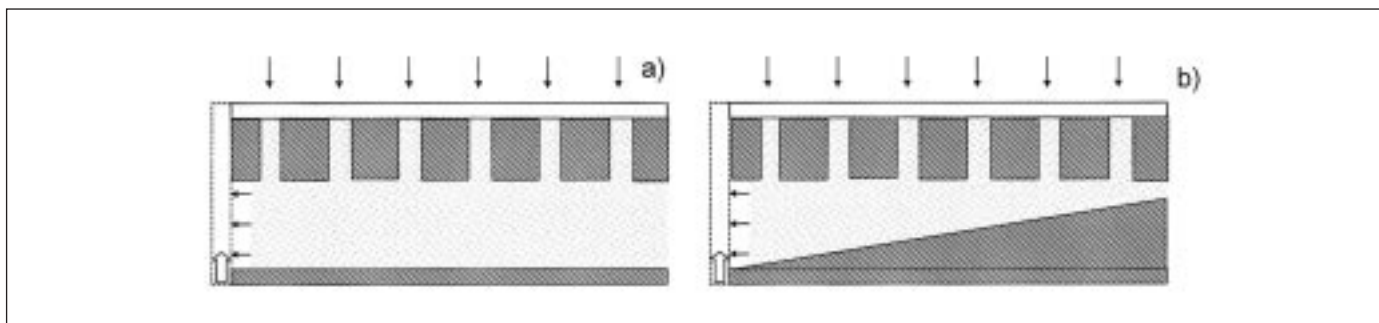


Fig. 6. Modelo conceptual de la combinación en serie de: a) modelo de flujo de pistón y modelo exponencial y b) modelo de flujo de pistón y modelo lineal

Fig. 6. Conceptual model combining in series: a) the piston flow model and the exponential model, and b) piston flow model and the lineal model

97% de contribución del modelo exponencial. En el caso de la combinación en serie de los modelos de flujo de pistón y lineal se observa que en general las edades obtenidas son algo menores, comparadas con la combinación de los modelos de pistón y exponencial (a excepción de la M-19 y V-3). Además, el porcentaje asignado al modelo de flujo de pistón es mucho más variable, presentándose algo menor cuando la edad es mas o menos coincidente con la obtenida para la combinación en serie de los modelos de pistón y exponencial.

### Discusión

La interpretación de los datos de contenido en tritio correspondientes a una única campaña de muestreo,

en un medio complejo y mal caracterizado por el momento, ofrece siempre dudas al no poderse comparar con la evolución temporal a lo largo de varios años, para ajustar mejor el modelo interpretativo y desechar las soluciones que no son razonables hidráulicamente. Para los goteos en las cuevas (túneles) volcánicos, bajo  $H=3-5$  m bajo la superficie del terreno, con un tiempo de tránsito  $\tau=2$  a 3 años y un contenido de humedad de  $\theta=0,1$  a  $0,3$  (entre bien drenado y casi saturado), se tiene una recarga probable de  $R=H\theta/\tau$ . Si se pone  $H=4\pm 1$ ;  $\tau=2,5\pm 0,5$ ;  $\theta=0,2\pm 0,1$ , donde el valor  $\pm$  es una desviación estándar ( $\sigma$ ) para una distribución aproximadamente gaussiana, es:

$$\sigma_R^2 = \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^2 \sigma_H^2 + \left(\frac{H}{\tau}\right)^2 \sigma_\theta^2 + \left(\frac{H\theta}{\tau^2}\right)^2 \sigma_\tau^2$$

Muestra	Tiempo de renovación (años) y [% del segundo componente] según el modelo:				Sector
	Flujo de pistón-[exponencial]		Flujo de pistón-[lineal]		
M-13	13 ; 38	[14 ; 86]	14 ; 37,5	[29 ; 52]	Norte
M-19	34 ; 42	[33 ; 15]	13,5 ; 40	[65 ; 18]	Este
M-21	18 ; 54	[9 ; 55]	15 ; 44,5	[11 ; 22]	Hanga Roa
M-24	0,7 ; 42,5	[8 ; 29]	0,7 ; 35	[8 ; 40]	Este
M-23	10 ; 42,5	[9 ; 29]	30 ; 35	[1 ; 40]	Este
M-25	19 ; 55	[1 ; 100]	17,5 ; 45	[15 ; 44]	Hanga Roa
M-26	19,5 ; 45	[12 ; 58]	14,5 ; 39	[2 ; 59]	Rohio
M-27	17,0 ; 70	[1 ; 97]	17 ; 46,5	[1 ; 26]	Hanga Roa
M-7	17,5 ; 55	[10 ; 55]	17,5 ; 45	[3 ; 28]	Hanga Roa
V-3	0,7 ; 30	[4 ; 38]	24,5 ; 33	[19 ; 51]	Este

M=sondeo; V=pozo abierto

Tabla 3. Resultados de la aplicación del código MULTIS a la combinación en serie de los modelos de flujo de pistón y exponencial y del modelo de flujo de pistón y lineal

Table 3. Results of MULTIS code application to the combination in series of the piston flow and exponential models and the piston flow and lineal models

Aplicando valores resulta  $\sigma_R=0,19$  m. Así  $R=320\pm 190$  mm/año, que aunque es una primera estimación aún muy burda, resulta coherente con la hidrogeología insular.

El tiempo de tránsito (renovación) hasta  $Z=50\pm 10$  m de profundidad vale:

$$T = \frac{\tau}{H} Z$$

Resulta:

$$\sigma_T^2 = \left(\frac{\tau}{H}\right)^2 \sigma_Z^2 + \left(\frac{Z}{H}\right)^2 \sigma_\tau^2 + \left(\frac{\tau Z}{H^2}\right)^2 \sigma_H^2$$

Aplicando valores resulta  $\sigma_T=12$  años. Así  $T=31\pm 12$  años, que no resulta coherente con lo que se ha deducido para los sondeos del sector oeste (Hanga Roa-Rohio) y norte, donde parece que  $T=60\pm 10$  años. Es posible que la recarga ese sector sea algo menor, del orden de la mitad de lo determinado anteriormente.

En cambio los valores obtenidos se encajan razonablemente bien con los del sector este, en cuya cabecera están los tubos volcánicos.

Para la costa sur (SSE) de la isla se puede suponer un flujo radial con centro en el volcán Terevaka. Para un sector de radio  $\rho$  y longitud  $dl$  sometido a una recarga  $R$  y con un gradiente costero  $i$  se tiene:

$$Caudal = \pi\rho^2 \frac{dl}{2\pi\rho} R = i.T.dl$$

en que  $T$  es la transmisividad del acuífero (en el espesor activo por el que fluye el agua dulce).

$$T = \rho R / (2i)$$

Para  $\rho=5$  km (hasta el sondeo M-23);  $R=320$  mm/año;  $i=0,0004$  resulta  $T=5500$  m<sup>2</sup>/día, del mismo orden de magnitud, aunque inferior a lo determinado en los sondeos. Ambas cifras no tienen porque coincidir ya que representan parámetros algo distintos, pero resultan coherentes.

## Conclusiones

La isla de Pascua es un acuífero volcánico de alta permeabilidad, por lo menos en la parte periférica no próxima a los tres conos volcánicos principales, y en concreto en lo que se refiere a las coladas más recientes del volcán Terevaka. Se desconocen las caracte-

rísticas hidrogeológicas de las áreas próximas a los conos volcánicos y áreas centrales de la isla.

La recarga es importante a lo largo del año, en especial en el verano austral, y puede valer  $320\pm 190$  mm/año en las zonas altas del volcán Tarekava y su ladera sur, y quizás sea la mitad en el lado oeste, en el entorno de Hanga Roa. Estas deducciones son inciertas y se basan en el contenido en tritio, pero se trata de una determinación independiente que encaja bien en lo que cabe esperar.

La metodología es sencilla y permite aprovechar la red de datos de tritio en la precipitación que mantiene la OIEA.

## Agradecimientos

Los muestreos y reconocimiento han sido una iniciativa apoyada por la Universidad Católica del Norte (Antofagasta, Chile), en colaboración con el Instituto Geológico y Minero de España (Madrid) en cuanto a parte del soporte analítico químico e isotópico ambiental, y con el Departamento de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Cataluña, (Barcelona, España). La gestión se ha realizado en el IGME, durante la estancia del tercer autor en dicho organismo.

## Referencias

- Alamos y Peralta. 1992. *Recursos hídricos de Isla de Pascua: Estudio del regadío de Isla de Pascua, I etapa: Estudio Hidrogeológico*. Alamos y Peralta, Ingenieros Consultores. Comisión Nacional de Riego. 1-130. (inédito).
- Baker, P.E., Buckley, F. y Holland, J.G. 1974. Petrology and geochemistry of Easter Island. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 44: 85-100.
- Clark, J. y Dymond, J. 1977. Geochronology and petrochemistry of Easter and Sala y Gomez Islands: implication for the origin of the Sala y Gomez Ridge. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2: 29-48.
- Custodio, E. 1973. Hydrology of Famara's volcanic block supply galleries (Lanzarote Island, Spain). *Atti 2° Convegno Internazionale sulle Acqua Sotterranee*. Palermo: 487-494.
- Custodio, E. 1978. *Geohidrología de terrenos e islas volcánicas*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX, Madrid, Publ. 128: 1-303.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. 1976. *Hidrología subterránea*. Ed. Omega, Barcelona, 2 Vols: 1-2350.
- Custodio, E. y Bruggeman, G.A. 1987. *Groundwater problem in coastal areas*. Studies and Reports in Hydrology. UNESCO, Paris, Publ. 45: 1-576.

- Custodio, E. y Cabrera, M.C. 2002. ¿Cómo convivir con la escasez de agua?. El caso de Canarias. *Bol. Geol. y Min.*, Madrid, 113(3): 243-258.
- González-Ferran, O. 1987. Evolución geológica de las Islas Chilenas en el Océano Pacífico. *Islas Oceánicas Chilenas: Conocimiento Científico y Necesidades de Investigaciones* (Castilla, J.C.; editor). Ediciones Universidad Católica de Chile. Chile: 37-54.
- Hajek, E. y Espinoza, G.A. 1987. Meteorología y bioclimatología de las Islas Oceánicas Chilenas. *Islas Oceánicas Chilenas: Conocimiento científico y Necesidades de Investigaciones* (Castilla, J.C.; editor). Ediciones Universidad Católica de Chile. Chile: 55-83.
- Hauser, A.Y. 1986. *Una alternativa de abastecimiento de agua para Hanga Roa, Isla de Pascua, Quinta Región, Chile*. Miscelánea N° 5. Servicio Nacional de Geología y Minería (inédito).
- IAEA/WMO 2003. *Global Network of isotopes in precipitation. The GNIP database*. Accesible at: <http://isohis.iaea.org>
- Lau, L.S. 1967. Step in optimizing the development of the basal water lens of Southern Oahu, Hawaii. *Artificial Recharge and Management of Aquifers*. Intern. Assoc. Scien. Hydrol. Pub. N° 72: 500-507.
- Pincheira, M.A. 2003. *Caracterización isotópica de las aguas subterráneas de la Isla de Pascua (Rapa Nui)*. Chile. Mem. Dep. Ciencias Geológicas. Universidad Católica del Norte. Antofagasta, Chile: 1-193+annex. (inédito).
- Ritchter, J., Szymczak, P. y Jordan, H. 1992. A computer program for the interpretation of isotope hydrogeologic data. *Tracer Hydrology. Proceeding of the 6<sup>th</sup> Int. Symp. on Water Tracing*. Karlsruhe: 461-462.
- Richter, J., Szymczak, P., Abraham, T. y Jordnan, H. 1993. Use of combinations of lumped parameters models to interpret groundwater isotopic data. *J. Contam. hydrol.*, 14, 1-13.

Recibido: junio 2004

Aceptado: agosto 2004