

REDES DE CONTROL QUÍMICO DE LAS MASAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN TENERIFE. VALORACIÓN DE RESULTADOS

I. Farrujia ^{1*}, J. Fernández ¹, E. Skupien ² y R. Poncela ²

Consejo Insular de Aguas de Tenerife. C/ Leoncio Rodríguez nº7. 38003 – Santa Cruz de Tenerife
Consultores. Avda. Principal de Añaza, nº 25, Blq. C, 3º B. 38109 – Santa Cruz de Tenerife

Resumen: Se exponen los criterios usados para definir la red de control químico para el seguimiento del estado de las masas de agua subterráneas en Tenerife, y los resultados analíticos obtenidos en dos campañas de caracterización de las mismas. En ellas se determinaron, no sólo los parámetros que fija la DMA, sino que se aprovechó la oportunidad del Proyecto AQUAMAC para realizar una caracterización más amplia, que incluye: parámetros básicos, isótopos, RD 140/2003, compuestos orgánicos volátiles, pesticidas organoclorados, carbamatos y glifosatos.

Abstrac: The text develops the criteria used to define the net of chemical control to establish the state of the bodies of groundwater in Tenerife and the analytical results obtained during two campaigns to characterize the water. The results showed the parameters that the DMA, demands as well as the project AQUAMAC was carried out to describe a wider characterization which includes basic parameters, isotopes, RD 14/2003, volatil organic compounds, organic chloride pesticides, carbamates and glifosates.

Palabras claves: masas de agua subterránea, red de control químico, contaminación
Keywords: body of groundwater, net of chemical control, polution.

1. INTRODUCCIÓN

La Directiva 2000/60/CE, conocida como Directiva Marco de Aguas (DMA), ha supuesto una reforma profunda y sustancial de la legislación europea en materia de aguas. Esta norma establece un marco comunitario para la protección de las aguas superficiales continentales, de transición, costeras y subterráneas, para prevenir o reducir su contaminación, promover su uso sostenible, proteger el medio ambiente, mejorar el estado de los ecosistemas acuáticos y atenuar los efectos de las inundaciones y las sequías. Todo ello con el objetivo de conseguir en 2015 un buen estado ecológico y un uso sostenible de las aguas. Para ello se establecen en la propia norma unos plazos de implementación precisos.

La DMA establece en su artículo 2 algunos nuevos conceptos, de los que destacamos:

- **Masa de agua subterránea.** *“Un volumen claramente diferenciado de aguas subterráneas en un acuífero o acuíferos”*
- **Demarcación hidrográfica.** *“La zona marina y terrestre compuesta por una o varias cuencas hidrográficas vecinas y las aguas subterráneas y costeras asociadas, ..., como principal unidad a efectos de la gestión de las cuencas hidrográficas”.*

La Ley de Aguas de Canarias (L 12/1990) aún no ha sido adaptada a las determinaciones de la DMA, y no se han especificado (art.3.1 de la DMA) los ámbitos de las demarcaciones hidrográficas en Canarias. No obstante, en la legislación vigente está implícito que cada isla del Archipiélago sea una demarcación hidrográfica y así se ha consensuado oficiosamente entre la Administración Autónoma y las Insulares

Dado que los plazos establecidos por la DMA estaban próximos a su vencimiento, el Gobierno de Canarias, en colaboración con los respectivos Consejos Insulares de Aguas, asumió dar cumplimiento a lo dispuesto en el art. 5 de la DMA; es decir: caracterizar la demarcación hidrográfica, estudiar el impacto ambiental de las actividades humanas y realizar un análisis económico de los usos del agua. Los dos primeros requerimientos fueron cumplimentados, para las islas occidentales, a través del documento *“Actividades requeridas para el cumplimiento de la Directiva Marco de Aguas en las islas de Tenerife, La Palma, La Gomera y El Hierro”* (DGA, marzo

2005); y el tercero con el “Análisis económico y recuperación de costes según la Directiva Marco de Aguas” (DGA, diciembre 2006), particularizado para cada isla.

El art. 8 de la DMA señala que los Estados miembros velarán por el establecimiento de programas de seguimiento con el objeto de obtener una visión coherente y completa del estado de las aguas en la demarcación hidrográfica. En el caso de las masas de aguas subterráneas, los programas de seguimiento deben atender al estado químico y cuantitativo. Los programas de seguimiento del estado químico se articulan en control de vigilancia y control operativo, y el seguimiento del estado cuantitativo se enuncia como control de niveles; si bien este último, para el caso de Tenerife, tiene variaciones importantes.

En esta línea el Consejo Insular de Aguas de Tenerife acometió directamente la realización del trabajo “Criterios de diseño y definición de la red de control representativa de las masas de aguas subterráneas en Tenerife” (CIATFE, 2007), cuyo objetivo ha sido definir los criterios para la implementación de una red de control, seleccionar los puntos para el seguimiento del estado químico y realizar dos campañas de muestreo. Este informe viene a sintetizar los resultados de este trabajo.

2. MASAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

En cumplimiento del art. 5 de la DMA se identificaron en Tenerife, con carácter provisional, cuatro masas de aguas subterráneas (Tabla 1).

Masa de agua	Nombre	Superf. km ²	Extrac. hm ³	Riesgo				
				Químico			Cuantitativo	Riesgo Global Seguro
				Puntual	Difuso	Intrusión	Extracción	
TF001	Masa Compleja de Medianías y Costa N-NE	1.292	120				X	X
TF002	Masa de Las Cañadas-Valle Icod La Guancha y Dorsal NO	274	21				X	X
TF003	Masa Costera Vertiente Sur	441	31				X	X
TF004	Masa Costera del Valle de La Orotava	25	14		X		X	X

Tabla 1.- Propuesta de masas de agua subterránea y situación de riesgo (Art. 5 de la DMA. DGA. 2005).

En el caso de Tenerife, las masas de aguas subterráneas se obtuvieron agregando los sectores hidrogeológicos (Figura 1) establecidos en el Plan Hidrológico de Tenerife (Decreto 319/1996). La única salvedad corresponde a la Masa Costera del Valle de La Orotava cuya delimitación, ligeramente diferente a la de los sectores hidrogeológicos (sectores 521 y 601), obedece a su declaración como masa de agua afectada por la contaminación de nitratos de origen agrario (Decreto 49/2000).

3. SEGUIMIENTO DEL ESTADO QUIMICO. REDES DE CONTROL

Los programas de **seguimiento del estado químico** se articulan en control de vigilancia y control operativo.

El **control de vigilancia** tiene como objeto obtener una visión general del estado de las masas de agua. Por ello, se aplica tanto a las que están en riesgo como a las que previsiblemente no lo están. La DMA establece unos parámetros mínimos a medir en este control (oxígeno, pH, conductividad eléctrica, nitrato y amonio), a los que deben añadirse, si procede, aquellos contaminantes por los que se hayan declarado las masas en riesgo en el análisis

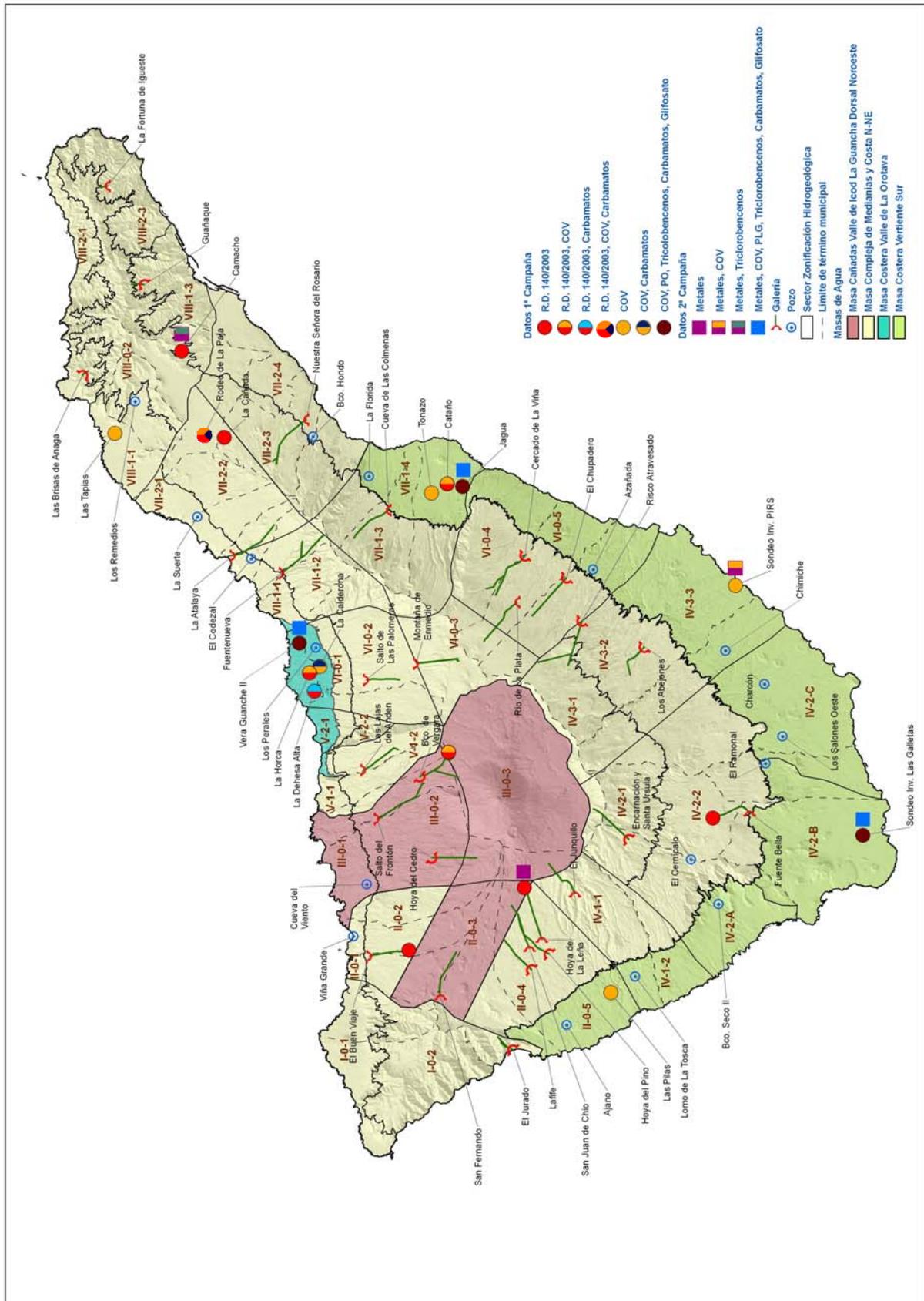


Figura 1. Sectores hidrogeológicos y masas de aguas subterráneas. Red de control químico.

previo y/o los que en función de las presiones identificadas se supongan puedan encontrarse en las masas de aguas subterráneas. La función del control de vigilancia será confirmar o descartar la existencia de riesgo en todas las masas de agua y de los contaminantes que, según las presiones existentes, pudieran contener.

El **control operativo** se centra en las masas de agua en riesgo, debiendo ayudar a mejorar la caracterización de ese riesgo y permitir el seguimiento de los programas de medidas. Además, debe detectar la presencia de tendencias en los contaminantes. Los contaminantes que deben evaluarse están íntimamente relacionados con las presiones que provocan el riesgo de no cumplir con los objetivos de la DMA.

En el caso de Tenerife, la captación de aguas subterráneas representa el 84 % de los recursos totales disponibles (186 hm³ en 2005). Supone, por tanto, la principal fuente de suministro para satisfacer los consumos. Esta particularidad ha determinado que desde hace décadas, la Administración Hidráulica se esfuerce por caracterizar el quimismo y evolución de los aprovechamientos. Este control se ha realizado, básicamente, usando como puntos de seguimiento las captaciones de agua subterránea (Tabla 2).

AÑO 2005		Número			Longitud (km)			Caudal	
		Secas	Con agua	Total	Lp	Lr	Lt	L/s	hm ³
GALERÍAS	Convencionales	158	333	491	1.386	194	1.580	3.676	115,9
	Nacientes	263	92	355	63	12	75	182	5,7
	Socavón	196	0	196	45	1	46	0	0,0
	Pozos	3	7	10	5	1	6	39	1,2
	TOTAL	620	432	1.052	1.499	208	1.707	3.897	122,9
POZOS	Convencionales	165	118	283	44	24	68	1.276	40,2
	Sondeo	58	50	108	36		36	727	22,9
	TOTAL	223	168	391	80	24	104	2.003	63,2
TOTAL		843	600	1.443	1.577	232	1.809	5.900	186

Tabla 2. Inventario de obras de captación de aguas subterráneas.

Esta caracterización y control del estado químico y cuantitativo de las aguas subterráneas se efectúa tanto a través de campañas realizadas por la Administración Hidráulica (desde 1995 el Consejo Insular de Aguas de Tenerife) como a partir de la información aportada por los titulares de los aprovechamientos.

Sin embargo, para facilitar la coordinación y ejecución de los programas de seguimiento requeridos por la DMA, se hace necesario definir redes de control que permitan obtener una visión representativa del conjunto y establecer tendencias, a través de un número limitado de puntos.

3.1. Selección de puntos de control

Se ha definido una red de control que incluye puntos en todas las masas de agua subterránea, tratando de asegurar que cada uno proporcione datos relevantes y fiables del quimismo de las aguas subterráneas; y por tanto válidos para ser usados en la evaluación del cumplimiento de los objetivos ambientales de la DMA.

Los criterios de diseño y densidad de puntos de las redes de control se han establecido teniendo en cuenta:

- El tamaño de la masa de agua.

- Las características y la complejidad geológica e hidrogeológica del sistema acuífero.
- El modelo conceptual de funcionamiento del sistema acuífero.
- La intensidad de los impactos (p.e.: uso del suelo, densidad de población, fuentes contaminantes puntuales y difusas, etc.).

Como primera aproximación para establecer la densidad de puntos de muestreo se usó el manual elaborado por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Medio Ambiente. Este manual sugiere como apropiada una densidad que comprende desde un punto por cada 25 km² en áreas con altos impactos ambientales hasta un punto por cada 100 km² en áreas con menores impactos (mínimo 20 puntos para Tenerife). Como segunda aproximación se estableció una proporcionalidad entre la superficie de cada masa de agua subterránea y el número de obras de captación con aprovechamiento (50 puntos de control). Finalmente, teniendo en cuenta el número de sectores en cada masa, las características hidrogeológicas del acuífero, la intensidad de los impactos, etc., se aumentó el número de puntos de control a 59.

Partiendo de la distribución espacial obtenida y teniendo en cuenta que la red debía contener diferentes tipologías de puntos (galerías y pozos) para caracterizar adecuadamente la composición media de la masa, se seleccionaron las captaciones a incluir (Tabla 3). En la selección de las obras se consideraron y valoraron diversos aspectos:

- Modelo geoestructural y de flujo de las aguas subterráneas. Se procuró que las obras seleccionadas permitieran establecer perfiles en la dirección de flujo.
- Representatividad de los puntos seleccionados. Se considero la localización y características del alumbramiento, preferiblemente único, así como la magnitud y persistencia del caudal aprovechado.
- Perdurabilidad del punto de control a medio y largo plazo.
- Identificación e intensidad de los peligros. Fuentes de contaminación puntual y difusa.
- Accesibilidad física y facilidad para la toma de datos.
- Titularidad de las captaciones.

Se intento establecer un punto de control en cada sector hidrogeológico. Sin embargo, existen sectores donde no se ha propuesto ningún punto de control (sectores 101, 411, 511, 521 y 522), por no existir obras de captación en explotación o, en caso de haberlas, por no cumplir los requisitos para ser incluidos en la red de control propuesta (Tabla 3). Por el contrario, en varios sectores se consideró necesario incluir más de un punto para mejorar la representatividad.

Entre los puntos seleccionados se incluyen dos sondeos de investigación. Uno de ellos perforado específicamente para poder caracterizar un área en la que no existen captaciones de agua subterráneas (actuación realizada en el AQUAMAC II), sondeo de investigación Las Galletas; y otro localizado aguas abajo de la Planta de Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos (Sondeo El PIRS).

Para cada uno de los puntos seleccionado se elaboró una ficha de datos básicos (vinculada a una base de datos Microsoft® Access 2003 compatible con las disponibles en el CIATFE) que incluye los siguientes aspectos:

- Localización: masa, sector hidrogeológico, municipio, coordenadas UTM del punto de muestreo y de la estación de muestreo, plano de situación y fotografía.
- Datos de la captación: nombre y tipo.
- Administrativos: titular, régimen jurídico del aprovechamiento, y estado de la autorización (obras autorizadas y no ejecutadas, terminadas, ...)
- Geohidrología: descripción geohidrológica del entorno del punto y en su caso de de la traza perforada por la captación.
- Aprovechamiento. Historia de los alumbramientos, localización y tipo de surgencia.
- Hidroquímicos. Datos hidroquímicos obtenidos.

MASA	SECTOR HIDROG.	NOMBRE	MUNICIPIO	TIPO OBRA	CAUDAL
					(L/s)
TF001	102	El Jurado	Santiago del Teide	GC	9,9
	201	Viña Grande	Garachico	PC	20,7
	202	Buen Viaje	El Tanque	GC	67,3
	204	Hoya del Pino	Guía de Isora	GC	38,3
	204	La Fife	Guía de Isora	GC	76,6
	421	Encarnación y Sta. Úrsula	Adeje	GC	6,7
	422	El Cernícalo	Adeje	PC	14,7
	422	Fuente Bella o Fuente del Valle	Arona	GC	64,3
	431	Risco Atravesado	Arico	GC	9,0
	432	Los Abejones	Arico	GC	8,0
	512	Las Lajas del Andén	Los Realejos	GC	5,0
	602	Salto de Las Palomeras	La Orotava	GC	14,7
	603	Montaña de Enmedio	La Orotava	GC	84,3
	603	Río de la Plata	Fasnia	GC	54,1
	604	Cercado de La Viña	Fasnia	GC	25,3
	604	El Chupadero	Arico	GC	19,9
	711	El Codezal	La Matanza	PC	14,7
	712	Fuente Nueva	Santa Ursula	GC	26,6
	713	Cueva de Las Colmenas	Arafo	GC	11,9
	721	La Suerte o Martiño	El Sauzal	PC	12,3
	722	La Atalaya	La Matanza	GC	19,6
	722	La Cañada	El Rosario	PS	88,3
	722	Rodeo de La Paja	La Laguna	PS	12,8
	723	Nuestra Sra. del Rosario	El Rosario	GC	63,2
	724	Bco. Hondo	El Rosario	PC	22,1
	802	Guañaque	S/Cruz de Tenerife	GC	22,2
	811	Las Tapias	La Laguna	PC	8,9
	811	Los Remedios	Tegueste	PS	10,0
812	Brisas de Anaga	La Laguna	GP	8,0	
821	Camacho	La Laguna	PC	36,6	
822	La Fortuna de Igueste	S/Cruz de Tenerife	GC	11,3	
TF002	203	San Fernando	Santiago del Teide	GC	42,0
	203	San Juan de Chío	Guía de Isora	GC	30,6
	301	Cueva del Viento	Icod	PS	39,3
	302	Salto del Frontón	La Guancha	GC	21,0
	303	Barranco de Vergara	La Guancha	GC	329,0
	303	El Junquillo	Guía de Isora	GC	66,5
	303	Hoya de La Leña	Guía de Isora	GC	31,8
	303	Hoya del Cedro	Icod de los Vinos	GC	104,8
TF003	205	Ajano	Guía de Isora	PC	10,0
	205	Las Pilas o Las Charquetas	Guía de Isora	PC	25,3
	412	Lomo de La Tosca	Guía de Isora	PC	25,6
	42A	Bco. Seco II	Adeje	PS	11,5
	42B	El Ramonal I	San Miguel	PS	22,8
	42B	Sondeo Las Galletas	Arona	SI	-
	42C	El Charcón	Granadilla	PC	19,8
	42C	Los Salones Oeste	Granadilla	PS	39,1
	433	Chimiche	Granadilla	PC	25,4
	433	Sondeo PIRS	Granadilla	SI	-
	605	Lomo Oliva	Arico	PS	19,4
	714	Cataño	Güímar	PC	11,1
	714	Jagua	Güímar	PC	29,2
714	La Florida	Candelaria	PC	29,6	
714	Tonazo	Güímar	PC	31,2	
TF004	601	La Calderona	La Orotava	PC	20,8
	601	La Dehesa Alta	Puerto de La Cruz	PC	25,2
	601	La Horca	Puerto de La Cruz	PC	10,4
	601	Los Perales	La Orotava	PC	11,0
	601	Vera Guanche II	Puerto de La Cruz	PC	21,0

Tabla 3. Puntos seleccionados para la red de control químico de vigilancia y operativa.

- Uso preferente de las aguas.
- Sistema de distribución del agua aprovechada.
- Sistema y características de los elementos de medida de caudal.

4. CAMPAÑAS DE MUESTREO

Se hicieron dos campañas de muestreo: la primera coincidiendo con una época seca, junio 2006, y la segunda en época de invierno, febrero 2007. En la primera campaña se muestrearon 57 de los 59 puntos seleccionados (faltaron Las Lajas del Anden y Brisas de Anaga), en la segunda se muestrearon los 59 puntos de la red de control y se incluyeron tres puntos adicionales para contrastar los resultados de tritio de la primera campaña (naciente Candelaria III, galería naciente La Pajarera y galería Río de La Cañada).

La DMA establece un listado mínimo de parámetros a controlar en la red de vigilancia (contenido de oxígeno, pH, conductividad eléctrica, nitrato y amonio). En el manual (DGA.MMA) se recomienda para la valoración del estado químico los parámetros siguientes:

- Concentración de oxígeno disuelto.
- Valor de pH.
- Conductividad eléctrica.
- Concentración de nitratos.
- Concentración de amonio.
- Concentración de iones mayoritarios: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} .
- Concentración de contaminantes (seleccionados según la evaluación de riesgo).

En el caso de Tenerife, dada las particularidades de sus aguas subterráneas, muy influenciadas por la actividad volcánica remanente, se estimó conveniente aumentar la relación de parámetros físico-químicos a controlar. Se propusieron, como **parámetros básicos**, los siguientes:

- √ En campo: pH, conductividad eléctrica, temperatura y oxígeno disuelto.
- √ En laboratorio:
 - Conductividad eléctrica
 - pH
 - Contenido en sílice (SiO_2)
 - Grado de alcalinidad (TA y TAC)
 - Dureza
 - Cationes: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , Fe y Mn
 - Aniones: CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , y PO_4^{3-}
 - Elementos menores: Cu, Al, Li, F, Br, Zn y B.

Además de los parámetros básicos, en cada una de las campañas de muestreo se realizaron una serie de **determinaciones complementarias** (Tablas 4,5,6), que variaron de la primera a la segunda campaña, orientadas a caracterizar posibles procesos de contaminación.

Coincidiendo con la visita efectiva al punto de control (bocamina o brocal), se muestreó el agua aprovechada para el análisis, tanto de los parámetros básicos como de las determinaciones complementarias. La única salvedad, afecta al muestreo de las aguas de galería para su análisis isotópico, en este caso la muestra se tomó en el interior de la captación. En lo que respecta a los protocolos de muestreo, en cada caso se siguió el establecido por el laboratorio correspondiente.

4.1. Primera campaña de muestreo (junio 2006).

Se determinaron en campo y laboratorio los parámetros enumerados en el apartado anterior como parámetros básicos. Además, con el objetivo de mejorar la caracterización del acuífero y de las aguas almacenadas, en especial frente a fenómenos de contaminación, en diversos puntos de los 59 inicialmente seleccionados, se hicieron análisis complementarios (Tabla 4).

Tipo de análisis	Puntos de muestreo	Determinaciones
Isótopos	11	Oxígeno-18, Deuterio y Tritio
R.D. 140/2003	10	Todas las incluidas en el RD
Compuestos Orgánicos Volátiles	12	Tabla 5
Plaguicidas organoclorados	3	Tabla 6
Triclorobencenos	3	1,2,3-Triclorobenceno; 1,2,4- Triclorobenceno; 1,3,5-Triclobenceno
Carbamatos	6	Diquat, Paraquat, Aldicarb, Carbofuran, Benfucarb y Oxamil
Glifosato	3	Glifosato

Tabla 4. Análisis complementarios

COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COV)	
1,1 - Dicloroetano	Etilbenceno
Diclorometano	m+p-Xileno
trans-1,2 Dicloroetano	o-Xileno
1,1-Dicloroetano	Estireno
cis-1,2-Dicloroetano,	Bromoformo
Cloroformo	Isopropilbenceno
1,1,1-Tricloroetano	1,1,2,2-Tetracloroetano
1,1-Dicloropropeno	Bromobenceno
Tetracloruro de carbono	1,2,3-Tricloropropano
1,2 - Dicloroetano	n-Propilbenceno
Benceno	2-Clorotolueno
Tricloroetano	1,3,5-Trimetilbenceno
1,2- Dicloropropano	4-Clorotolueno
Dibromoetano	tert-Butilbenceno
Bromodichlorometano	1,2,4- Trimetilbenceno
trans-1,3 Dicloropropeno	sec-Butilbenceno
Tolueno	1,3-Diclorobenceno
cis-1,3 Dicloropropeno	p-Isopropiltolueno
1,1,2 Tricloroetano	1,4- Diclorobenceno
1,3 - Dicloropropano	n-Butilbenceno
Tetracloroetano	1,2-Diclorobenceno
Dibromoclorometano	1,2-Dibromo-3-cloropropano
1,2-Dibromoetano	1,2-Dibromo-3-cloropropano,
Clorobenceno	Naftaleno
1,1,1,2-Tetracloroetano	1,2,3,4 Tetrametilbenceno
	1,2,3,5 Tetrametilbenceno
	1,2,4,5 Tetrametilbenceno

PLAGICIDAS ORGANOCLOARADOS
alpha-HCH
beta-HCH
gamma-HCH (lindano)
delta-HCH
Heptacloro
Aldrin
Heptaclor epóxido
Endosulfán I
Dieldrin
p,p-Dde
Endrin
Endosulfán II
p,p'-DDD
Endosulfán sulfato
p,p-DDT
metoxiclor
endrín-cetona

Tabla 5. Determinaciones incluidas en COV

Tabla 6. Determinaciones incluidas en plaguicidas organoclorados

Isótopos. Los puntos de muestreo para análisis isotópico se seleccionaron atendiendo a diversos objetivos: posibilidad de realizar perfiles isotópicos verticales a diferentes cotas dentro de las cuatro masas de agua subterránea, mejorar el conocimiento de los sistemas de flujo, aproximar tiempos de tránsito del agua subterránea y caracterizar el origen de la recarga. En la selección de los puntos se consideraron, entre otros, los criterios siguientes:

- Altitudinal.
- Orientación. Vertientes norte y sur.
- Representatividad de la muestra. En el caso de las galerías, facilidad de acceder a la zona del alumbramiento.

RD 140/2003. La inclusión de estas determinaciones obedece, no al hecho de que las aguas pudieran ir destinadas al abastecimiento (muestreo en bocamina), sino a que esta norma establece un amplio abanico de sustancias, tanto naturales como artificiales, cuya determinación ayuda a caracterizar el estado de las aguas subterráneas. Además, dado que estas analíticas se realizaron en un laboratorio acreditado, se han podido contrastar y validar los resultados de algunas de las determinaciones básicas. En la selección de los puntos a muestrear se consideraron, entre otros, los criterios siguientes:

- Representatividad a nivel de masa de agua.
- Caudal aprovechado.
- Uso preferente de las aguas.

Otros contaminantes. Se incluyen en este apartado los compuestos orgánicos volátiles (COV), plaguicidas organoclorados, triclorobencenos, carbamatos, y glifosato (Tablas 4, 5 y 6). La elección de las sustancias a determinar se realizó atendiendo a:

- Normativa vigente. Especialmente la Decisión nº 2455/2001/CE, de 20 de noviembre de 2001, por la que se aprueba la lista de sustancias prioritarias y la Directiva 2006/118/CE, de 12 de diciembre de 2006, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro.
- Conocimiento de las prácticas y usos de la agricultura local.
- Trabajos de caracterización previos:
 - Estudio preliminar sobre la calidad de las aguas subterráneas del Valle de La Orotava. Dames & Moore. 1991. Cabildo de Tenerife.
 - Dinámica de los plaguicidas en el suelo. Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. 1996. T.Doc. D. Ricardo Díaz Díaz.
 - Estudio de calidad de las aguas subterráneas. Informe de las Islas Canarias. CEDEX. 1999
 - Evaluación de peligros y riesgos de contaminación de las aguas subterráneas. Proyecto AQUAMAC I. 2005.

En la selección de los puntos se consideraron, entre otro, los siguientes criterios:

- Zonas con fuertes presiones antrópicas (agrarias y urbanas)
- Proximidad a vertederos de residuos sólidos urbanos (industrias IPPC)
- Uso preferente de las aguas aprovechadas.

4.2. Segunda campaña de muestreo (febrero 2007).

Se repitieron, en todos los puntos seleccionados (59), los parámetros básicos. Tras valorar los resultados obtenidos en la primera campaña, se modificaron y redujeron las determinaciones complementarias; manteniéndose los criterios de selección de los puntos a muestrear. En la Tabla 7 se indican las determinaciones complementarias efectuadas.

Tipo de análisis	Puntos de muestreo	Determinaciones
Isótopos	11/5	Oxígeno-18, Deuterio y Tritio
Metales	6	Al, Ab, As, Br, Cd, Co, Cr, Fe, Mn, Hg, Ni, Pb, Se
Compuestos Orgánicos Volátiles	4	Tabla 5
Plaguicidas organoclorados	3	Tabla 6
Triclorobencenos	4	1,2,3-Triclorobenceno; 1,2,4- Triclorobenceno; 1,3,5-Triclobenceno
Carbamatos	4	Diquat, Paraquat, Aldicarb, Carbofuran, Benfucarb y Oxamil
Glifosato	3	Glifosato
Otros plaguicidas	3	Fenamifos, Etoprofos y Cadusafos

Tabla 7. Determinaciones complementarias de la 2ª campaña de muestreo

5. DISCUSION

Comprender la composición química local de las aguas subterráneas es necesario no sólo para el diseño de las redes de control, sino también para interpretar los datos obtenidos, clasificar el estado de las masas de agua y establecer programas de medidas.

Para valorar los resultados obtenidos en cada masa se muestra, para cada uno de los parámetros básicos indicados, el valor mínimo y máximo (**mín-máx**), la concentración promedio (**P**), la media ponderada con el caudal (**MPQ**) y cuántos puntos tienen concentraciones superiores o inferiores, en un 25 %, respecto del valor promedio.

5.1. Parámetros básicos.

5.1.1. Primera campaña de muestreo

- **Masa Compleja de Medianías y Costa N-NE (TF001).** Las aguas analizadas presentan un contenido en sales muy variado, evidenciado por la dispersión respecto del valor promedio de cada uno de los parámetros considerados (Tabla 8).

El pH de las aguas varía de neutro a ligeramente básico (entre 7,05 y 8,69) excepto en cuatro muestras: galerías Encarnación y Santa Úrsula (6,68), Fuente Bella (6,52) y Hoya de los Pinos (6,89) y el pozo El Cernícalo (6,14).

Los valores altos de conductividad eléctrica coinciden, mayoritariamente, con valores altos de bicarbonatos, poniendo en evidencia que el aumento de la salinidad en estas aguas se debe principalmente a los siguientes procesos naturales:

- Aguas con mayor periodo de residencia en el acuífero y por tanto más mineralizadas. En la Dorsal NE se está explotando, tanto por la vertiente norte como por la sur, los niveles más profundos de la zona saturada.
- Aguas afectadas por la actividad volcánica residual. En la Dorsal S y medianías de Guía de Isora el aporte de CO₂ aumenta la capacidad de disolución del agua sobre la roca.

El contenido en cloruros es bajo (P=55 mg/l), tan sólo dos muestras superan los 250 mg/l. Estas aguas provienen de pozos situados en la franja costera (Las Tapias y El Codezal). El contenido en sodio es moderado (P= 91 mg/l), tan sólo dos muestras superan los 200 mg/l (La Fife y Las Lajas del Andén). Aunque el valor promedio de nitratos es inferior a 10 mg/l, en el pozo Las Tapias, situado en la comarca agrícola del NE (Valle de Guerra-Tejina), el contenido es de 49 mg/l; evidenciando un foco de contaminación.

Nº de puntos de control: 31 (*)								
Se ha muestreado un 6% de las obras con agua, que aportan un 24 % del caudal								
Densidad media: 1 punto cada 45 km ²								
Parámetro	Unidad	Valores			Nº muestras		RD 140/2003	Nº mues. > RD140/03
		min-max	Promedio (P)	MPQ	25%< P	25%> P	Referencia	
Conduc. Eléct.	(µS/cm)	98 - 1.611	726	724	14	10	2.500	0
Sílice	mg/l	19 - 106	48	51	11	7	--	
Calcio	mg/l	0 - 87	30	31	16	10	--	
Magnesio	mg/l	0 - 93	27	26	15	9	--	
Potasio	mg/l	2 - 58	18	21	17	8	--	
Sodio	mg/l	15 - 230	91	94	14	11	200	2
Bicarbonatos	mg/l	50 - 1.175	345	389	17	11	--	0
Cloruros	mg/l	3 - 354	29	38	22	7	250	2
Sulfatos	mg/l	1,5 - 105	55	33	18	8	250	0
Nitratos	mg/l	0,1 - 49	8,6	7	14	6	50	0
Flúor	mg/l	0,1 - 0,7	0,3	0,1	9	8	1,5	0

Tabla 8. Masa TF001 – Masa Compleja de Medianías y Costa N-NE.

(*) Dado que en la primera campaña sólo se muestrearon 29 de los 31 puntos, para la elaboración de estos datos se tomaron, para los puntos no muestreados (Las Lajas del Anden y Brisas de Anaga), los análisis de la 2ª campaña.

Todas las aguas muestreadas en esta masa son de tipo bicarbonatado. Los cloruros y sulfatos se presentan en poca cantidad. En el caso de los cationes, la composición varía entre los términos sódico-magnésico-cálcico.

- **Masa de Las Cañadas – Valle de Icod-La Guancha y Dorsal NO (TF002).** En esta Masa el efecto de la actividad volcánica remanente es muy patente. El aporte de gases volcánicos hace aumentar, considerablemente, el valor del fondo de ciertos parámetros básicos (Tabla 9).

El pH de las aguas varía de neutro a ligeramente básico (entre 7,06 y 8,98), excepto en dos galerías: Barranco Vergara (6,89) y Hoya del Cedro (6,69).

La variabilidad composicional de las aguas de esta masa es reducida. Las principales perturbaciones se deben a dos galerías: Hoya del Cedro y Hoya de La Leña. Ambas captaciones alumbran agua en el interior de la depresión de Las Cañadas del Teide, la primera por el N y la segunda por el SO. Las aguas de Hoya del Cedro (7 mg/l de flúor) incrementan el valor medio de flúor y las de Hoya de La Leña los contenidos en sulfato y calcio (sulfatos 324 mg/l y calcio 166 mg/l); esta captación también presenta altas concentraciones de manganeso.

Destaca el elevado contenido en flúor de las aguas alumbradas en esta masa: en cuatro de las captaciones la concentración de este ión es superior a 1,5 mg/l. Estas obras se sitúan en la vertiente norte de Las Cañadas y en el Valle de Icod-La Guancha. Destaca también que todas las aguas muestreadas tienen contenidos en sodio superiores a 200 mg/l. El contenido en nitratos es inferior a 10 mg/l.

Todas las aguas analizadas son de tipo bicarbonatado. Los cloruros y sulfatos se presentan en poca cantidad (salvo el alto valor de sulfatos de Hoya de La Leña). En el caso de los cationes, la composición varía entre los términos sódico-magnésico-cálcico.

Nº de puntos de control: 8								
Se ha muestreado un 40% de las obras con agua, que aportan un 62 % del caudal								
Densidad media: 1 punto cada 27 km ²								
Parámetro	Unidad	Valores			Nº muestras		RD140/2003	Nº mues. > RD140/03
		min-max	Promedio (P)	MPQ	25%< P	25%> P	Referencia	
Conduc. Eléct.	(µS/cm)	1.261-2.590	1.957	2.024	1	2	2.500	2
Sílice	mg/l	42 - 73	52	47	--	2	--	
Calcio	mg/l	12 - 166	46	35	5	1	--	
Magnesio	mg/l	29 - 85	63	76	1	2	--	
Potasio	mg/l	44 - 109	86	99	2	1	--	
Sodio	mg/l	209 - 432	330	344	1	1	200	8
Bicarbonatos	mg/l	611 - 1.711	1.169	1.320	2	2	--	
Cloruros	mg/l	22 - 54	31	83	5	2	250	--
Sulfatos	mg/l	39 - 325	127	27	1	2	250	1
Nitratos	mg/l	2,2 - 8,3	5,7	5,8	2	2	50	--
Flúor	mg/l	0,7 - 7	3,0	4,6	4	3	1,5	4

Tabla 9. Masa TF002 - Masa de Las Cañadas – Valle de Icod - La Guancha y Dorsal NO

- **Masa Costera de la Vertiente Sur (TF003).** En los puntos de control de esta masa se incluyen dos sondeos de investigación, ambos sin extracción: Las Galletas y El PIRS. Por ello, sus parámetros analíticos no se han considerado en el cálculo de la media ponderada con el caudal.

Para el cálculo de los valores promedio no se han considerado los datos del sondeo El PIRS, ya que este punto, incluido para caracterizar la posible influencia de la planta de residuos sólidos urbanos de Arico, está tan próximo a la costa (325 m) que el quimismo de sus aguas, en cuanto a parámetros básicos, está muy influenciado por la cercanía del mar. Sí se han tomado en consideración los datos del sondeo Las Galletas, cuyos valores desvían significativamente el valor promedio de algunos de los parámetros básicos (conductividad eléctrica, sodio, cloruro, sulfato y flúor).

El pH de las aguas analizadas en esta masa está comprendido entre 6,13 y 8,41.

Nº de puntos de control: 15 (*)								
Se ha muestreado un 15% de las obras con agua, que aportan un 33 % del caudal								
Densidad media: 1 punto cada 29 km ²								
Parámetro	Unidad	Valores			Nº muestras		RD140/2003	Nº mues. > RD140/03
		min-max	Promedio (P)	MPQ (**)	25%< P	25%> P	Referencia	
Conduc. Eléct.	(µS/cm)	1.559 – 7.050	1.951	1.436	10	4	2.500	3
Sílice	mg/l	21 - 94	54	55	4	2	--	
Calcio	mg/l	10 - 186	59	59	6	3	--	
Magnesio	mg/l	10 - 237	61	52	9	4	--	
Potasio	mg/l	10 – 71	30	27	4	4	--	
Sodio	mg/l	61 – 1.582	273	158	11	3	200	3
Bicarbonatos	mg/l	136 - 867	388	371	5	3	--	
Cloruros	mg/l	21 – 1.775	86	59	10	3	250	4
Sulfatos	mg/l	12 - 372	386	246	6	3	250	1
Nitratos	mg/l	8,3 - 110,4	35	34,7	9	3	50	3
Flúor	mg/l	0,2 – 10,7	1,3	0,5	12	3	1,5	2

Tabla 10. Masa TF001 – Masa Costera de la vertiente sur.

(*) Los valores min-max y promedio (P) incluyen los valores del sondeo Las Galletas.

(**) Los parámetros de los dos sondeos de investigación, que no están en explotación, no se han utilizado para calcular las medias ponderadas con el caudal.

Los elevados valores de conductividad eléctrica, cloruros y sodio (Tabla 10) ponen de manifiesto procesos de intrusión de agua de mar (pozos Ajano, Charcón, Salones Oeste y sondeo Las Galletas), especialmente importantes en el vértice sur de la isla. Los altos contenidos en nitratos, superiores a 50 mg/l, afectan principalmente al Valle de Güímar (pozos Cataño, Jagua y Tonazo). En dos puntos, por motivos diversos, el contenido en flúor supera los 1,5 mg/l (sondeo Las Galletas y pozo Cataño).

Las aguas de esta masa son de tipo bicarbonatado, salvo en captaciones afectadas por procesos de intrusión marina, donde los cloruros, e incluso los sulfatos, se presentan en cantidad considerable. En el caso de los cationes, la composición varía entre los términos sódico-magnésico-cálcico.

• **Masa Costera del Valle de La Orotava (TF004).** Los datos obtenidos, resumidos en la Tabla 11, confirman el elevado contenido en nitratos (en 4 de los 5 puntos es superior a 50 mg/l), evidenciando que persiste la contaminación por la que se declaró zona vulnerable (Decreto 49/2000). Actualmente estos valores de nitrato se relacionan tanto con la actividad urbana (vertido de aguas residuales sin depurar) como agrícola.

El pH de las aguas de la masa está comprendido entre 7,8 y 8,5. La variabilidad composicional de las aguas es reducida. Las principales perturbaciones, que afectan sobre todo al contenido en cloruros y sodio, se deben a dos pozos: La Horca y Vera Guanche II. Ambas captaciones están ligeramente afectados por un proceso de intrusión de agua de mar (cloruros < a 200 mg/l).

Nº de puntos de control: 5								
Se ha muestreado un 9 % de las obras con agua, que aportan un 22 % del caudal								
Densidad media: 1 punto cada 5 km ²								
Parámetro	Unidad	Valores			Nº muestras		RD140/2003	Nº mues. > RD140/03
		min-max	Promedio (P)	MPQ	25%< P	25%> P	Referencia	
Conduc. Eléct.	(µS/cm)	395 - 1.145	934	971	1	1	2.500	--
Sílice	mg/l	21 - 30	27	27	--	--	--	
Calcio	mg/l	11 - 47	26	28	1	1	--	
Magnesio	mg/l	11 - 35	24	26	1	1	--	
Potasio	mg/l	17 - 37	26	27	1	1	--	
Sodio	mg/l	46 - 182	125	131	1	1	200	--
Bicarbonatos	mg/l	116 - 274	194	207	1	2	--	
Cloruros	mg/l	29 - 129	81	88	3	2	250	--
Sulfatos	mg/l	28 - 116	109	106	1	1	250	--
Nitratos	mg/l	37,2 - 116,7	73,6	80,7	2	1	50	4
Flúor	mg/l	0,2 - 1,4	0,6	0,6	2	1	1,5	1

Tabla 11. Masa TF004. Masa Costera del Valle de La Orotava

Las aguas son de tipo bicarbonatado, salvo en captaciones alteradas por procesos de intrusión marina, donde los cloruros se presentan en cantidad considerable. En el caso de los cationes, la composición varía entre los términos sódico-magnésico-cálcico.

5.1.2. Segunda campaña de muestreo.

Comparando los datos obtenidos en la junio de 2006 (época seca) con los de febrero de 2007 (época húmeda), no se aprecian cambios significativos en los valores de las determinaciones realizadas; por ello, las consideraciones sobre el quimismo de las masas son válidas para ambas campañas. A modo de ejemplo, en la Figura 2 se compara la conductividad eléctrica obtenido en cada campaña.

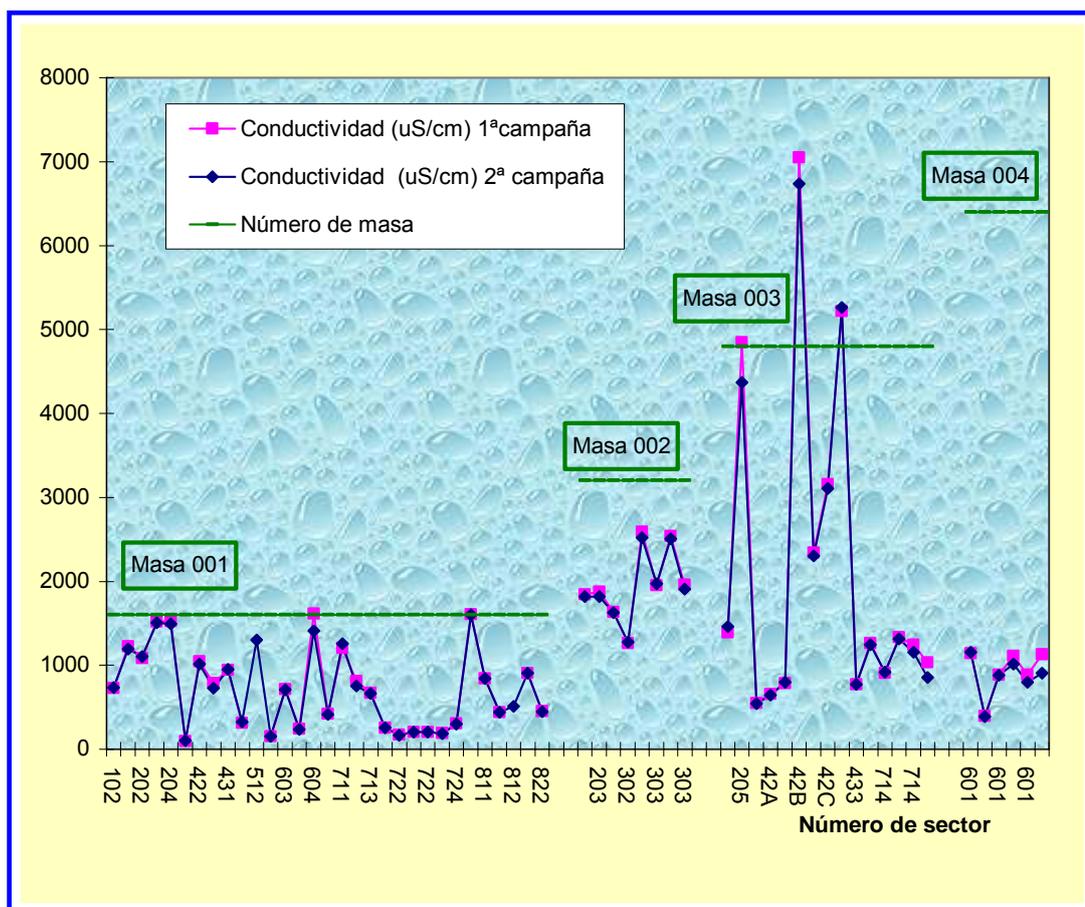


Figura 2. Comparación de los valores de conductividad entre la 1ª campaña (junio 2006) y la 2ª campaña (febrero 2007).

5.2. Determinaciones complementarias

- **Isótopos.** Los datos isotópicos (oxígeno, deuterio y tritio), se emplean para mejorar la caracterización del modelo de flujo subterráneo (áreas de recarga, direcciones de flujo, edad de agua, etc).

Dado que el objeto principal del este trabajo es caracterizar el estado químico de las masas de agua subterránea, no se ha considerado procedente incluir la discusión de los datos isotópicos, debido a su complejidad y especificidad. Esta valoración está ampliamente recogida en la Memoria del trabajo realizado por el Consejo Insular de Aguas de Tenerife (2007).

- **RD 140/2003.** Esta norma incluye un gran número de determinaciones, algunas de ellas coincidentes con las consideradas en los parámetros básicos, en los COV y plaguicidas organoclorados. Sólo se comentarán, por tanto, aquellos resultados específicos no valorados en otros apartados.

Se detectó la presencia de arsénico en tres puntos de la red de control (galerías Barranco de Vergara y Fuente Bella y sondeo de Las Galletas), con valores comprendidos entre 7 y 8 µg/l (RD 140/2003, 10 µg/l).

Con respecto a la radiactividad de las aguas analizadas, indicar que de un total de diez muestras cinco superaban el límite de actividad alfa fijado en el RD 140/2003 (0,1 Bq/l). A la vista de los resultados obtenidos, se programó una campaña específica (noviembre 2006) con el objeto de caracterizar su origen. La interpretación y discusión de los datos de radioactividad obtenidos, se consideran fuera del ámbito de este trabajo; y han sido objeto de un informe específico.

En la segunda campaña de muestreo, una vez valorados los resultados de la primera y abordada la campaña de caracterización de la radiactividad, se optó por determinar únicamente metales. Como novedad frente a la 1ª campaña se detectó la presencia de boro, hierro, manganeso y selenio en el sondeo de Las Galletas y de hierro, manganeso y níquel en el sondeo del PIRS.

• **Otros contaminantes.** De acuerdo con los análisis realizados, no se ha detectado en las aguas muestreadas la presencia de COV, plaguicidas organoclorados, triclorobencenos, carbamatos y/o glifosato.

- COV. Por debajo del límite de detección (0,1 – 0,2 µg/l), salvo en el pozo Camacho.
- Plaguicidas organoclorados. Por debajo del límite de detección (<0,02 µg/l).
- Triclorobencenos. Por debajo del límite de detección (< 1,0 µg/l).
- Carbamatos. Por debajo del límite de detección (< 0,1 – 0,2 µg/l).
- Glifosatos. Por debajo del límite de detección (<0,3 µg/l).

En la segunda campaña todos los parámetros analizados estaban en concentraciones inferiores al límite de detección.

En la primera campaña en el pozo Camacho, se encontraron valores de hidrocarburos superiores a los establecidos en el RD 140/2003, que no se detectaron en la segunda (valores inferiores al límite de detección) evidenciando una posible contaminación accidental de la captación.

6. CONCLUSIONES

En las dos campañas de muestreo efectuadas se realizaron 119 determinaciones “in situ” y se tomaron 194 muestras de agua: 119 para parámetros básicos, 22 para $\delta^{18}\text{O}$ y δD , 16 para tritio, 11 para el RD 140/2003, 16 para COV, 6 para plaguicidas organoclorados, 7 para triclorobencenos, 9 para carbamatos, 6 para glifosatos y 3 para otros plaguicidas. En total se midieron 5.743 parámetros.

La red de seguimiento propuesta consta de 59 puntos, 54 para el control de vigilancia y 5 para el control operativo. Se considera necesario reforzar esta red con nuevos puntos de control mediante la ejecución de sondeos de investigación a perforar en el vértice sur (subsectores 42A, 42B y 42C), en la Isla Baja (Sector 101) y en el entorno de la Refinería de Santa Cruz (Sector 724).

Se estima que la densidad de puntos de control en la Masa Compleja de Medianías y costa N-NE (un punto cada 31 km²) es adecuada, y que la dispersión respecto de los valores promedios refleja su variabilidad composicional natural. No obstante, se propone eliminar de la red de control la galería Encarnación y Santa Ursula, dado que el quimismo de su agua, asociada a flujos de circulación muy rápida, no es representativo de la masa.

A la vista de los resultados obtenidos en la Masa Costera de la Vertiente Sur se considera necesario separar de esta masa el sector hidrogeológico 714 (Valle de Güímar), donde las aguas tienen altos contenidos en nitratos, y caracterizar mejor el resto de la masa, con el fin de valorar la conveniencia de diferenciar una nueva masa en el vértice sur (subsectores 42A, 42B y 42C), afectada por la intrusión de agua de mar.

BIBLIOGRAFÍA

CIATFE (2007). Criterios de diseño y definición de la red de control representativa de las masas de aguas subterráneas en Tenerife. Consejo Insular de Aguas de Tenerife. 109 pp+ fichas 304 pp.

DECRETO 319/1996, de 23 de diciembre, por el que se aprueba el Plan Hidrológico Insular de Tenerife (BOC nº 21, de viernes 14 de febrero de 1997, páginas 1338-1348; continuación en BOC nº 22 y 23).

DECRETO 49/2000, de 10 de abril, por el que se determinan las masas de agua afectadas por la contaminación de nitratos de origen agrario y se designan las zonas vulnerables por dicha contaminación (BOC nº 48, de miércoles 19 de abril, páginas 4712-4713).

Dirección General de Aguas. Gobierno de Canarias (2005). Actividades requeridas para el cumplimiento de la Directiva Marco de Aguas en las Islas de Tenerife, La Palma, La Gomera y El Hierro. Dirección General de Aguas-CITV-GOBCAN. 135 pp + 4 planos + fichas art. 5 + doc. apoyo.

Dirección General de Aguas. Gobierno de Canarias (2006). Análisis económico y recuperación de costes según la DMA