

El proceso eruptivo en la isla de El Hierro 2011: Influencia sobre los abastecimientos de aguas de consumo humano y las aguas de baño. Evolución hasta la actualidad

*The 2011 eruptive process in the island of El Hierro: Influence on the water supply for
human consumption and bathing waters. Evolution up to the present day*

*Processo eruptivo na ilha de El Hierro 2011: Influência no abastecimento de água de
consumo humano e nas águas balneares. Evolução até à atualidade*

Juan José Delgado Perera, José Antonio Bello León

Direcciones de Área de Salud de Tenerife y El Hierro. Dirección General de Salud Pública. Servicio Canario de la Salud

Cita: Delgado Perera JJ, Bello León JA. Rev. salud ambient. 2016; 16(2):145-156.

Recibido: 26 de septiembre de 2016. **Aceptado:** 31 de octubre de 2016. **Publicado:** 15 de diciembre de 2016.

Autor para correspondencia: Juan José Delgado Perera.

Correo e: juanjodp@hotmail.com

Servicio de Inspección Sanitaria y Laboratorio. Área de Salud de Tenerife. Rambla de Santa Cruz, 53. 38006 Santa Cruz de Tenerife.

Financiación: Este grupo no ha contado con ningún tipo de financiación para el desarrollo de su trabajo.

Declaración de conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses que hayan influido en la realización y la preparación de este trabajo.

Declaraciones de autoría: Todos los autores contribuyeron al diseño del estudio y la redacción del artículo. Asimismo, todos los autores aprobaron la versión final.

Presentado como comunicación cartel en el XIII Congreso Español de Salud Ambiental, celebrado en Cartagena los días 24, 25 y 26 de junio de 2015, obtuvo el 2º premio a la mejor comunicación cartel de experiencia otorgado por la Sociedad Española de Sanidad Ambiental (SESA).

Resumen

En el año 2011, una erupción submarina comienza en el mar de Las Calmas, al suroeste de la isla del Hierro, emitiendo gran cantidad de sustancias al mar que podían afectar a la seguridad en la producción de aguas de consumo humano (ACH) y a la calidad de las zonas de aguas de baño (AB). Este trabajo recoge los resultados del seguimiento de determinados parámetros en ACH y en AB próximas al foco eruptivo, así como su evolución hasta la actualidad.

Sólo en aguas de consumo se detectan las alteraciones más significativas en los niveles de cloro libre residual y el pH, si bien, no se relacionan con el proceso eruptivo sino con deficiencias en las infraestructuras que podrían no asegurar una correcta desinfección del agua destinada a consumo.

Como conclusiones, el estudio permitió afirmar que la erupción volcánica no afectó a la calidad de las zonas de aguas de baño ni a las aguas de consumo humano, si bien permitió valorar los cambios llevados a cabo para optimizar el tratamiento del agua de consumo en dicha zona hasta la actualidad.

Palabras clave: agua de consumo humano; erupción; calidad aguas de baño; optimización; tratamiento.

Abstract

In 2011 a submarine volcano erupted in the Sea of Calm, southwest from the island of El Hierro, emitting large quantities of matter into the sea that could affect the safety of water produced for human consumption (WHC) and the water quality in bathing areas (BAs). This paper presents the results of monitoring certain parameters in WHC and in BAs near the focus of eruption and its

evolution up to the present day.

The most significant changes in the levels of residual free chlorine and pH were detected in drinking water only, although they are not related to the eruptive process but to deficiencies in the infrastructure such that it might not ensure proper disinfection of drinking water.

As conclusions the study allowed us to say that the volcanic eruption did not affect the quality of water in bathing areas or the water for human consumption, and allowed us to assess the changes that occurred so as to optimize the treatment of drinking water in that area up to the present day.

Keywords: drinking water; eruption; bathing water quality; optimization; treatment.

Resumo

No ano de 2011, iniciou-se uma erupção submarina no Mar de Las Calmas, a sudoeste da Ilha de Hierro, emitindo uma grande quantidade de substâncias no mar que podiam afetar a segurança na produção de águas de consumo humano (ACH) e a qualidade das águas balneares (AB). Este trabalho versa sobre os resultados da monitorização de determinados parâmetros nas ACH e nas AB na proximidade da erupção, apresentando a sua evolução até à atualidade.

As alterações mais significativas detetadas foram nos níveis de cloro residual livre e de pH das ACH, contudo estas não se relacionam com a erupção, mas sim com deficiências nas infraestruturas que deveriam assegurar uma correta desinfeção das ACH.

Em conclusão, o estudo permitiu afirmar que a erupção vulcânica não afetou a qualidade das ACH e das AB e possibilitou avaliar as alterações ocorridas para otimizar o tratamento das ACH nessa zona até à atualidade.

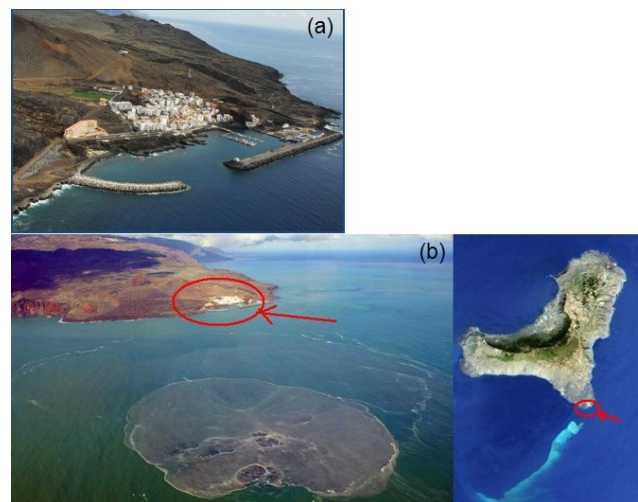
Palavras-chave: águas de consumo humano; erupção; qualidade das águas balneares; otimização; tratamento.

INTRODUCCIÓN

España tiene en las Islas Canarias la única zona volcánica con actividad en su pasado histórico, con la referencia de la erupción del volcán Teneguía de La Palma de 1971. La erupción submarina en el Mar de Las Calmas, al suroeste de la isla de El Hierro, comienza a las 04:15 h UTC del día 10 de octubre de 2011 prolongándose durante los siguientes 5 meses. El foco eruptivo se sitúa a unas 2 millas náuticas del pueblo de La Restinga con 547 habitantes en 2011 (Fuente Instituto Canario de Estadística, ISTAC) y que vive principalmente de la pesca, el buceo y el turismo. Durante este período, La Restinga sufre gran cantidad de terremotos sentidos por la población, altas concentraciones de gases en ambiente y dos evacuaciones que mantienen al pueblo desalojado unos 20 días. En el mar, por su parte, se observan gases humeantes, cambios en su coloración, burbujeo, turbidez, olor a azufre y fragmentos volcánicos que flotan en superficie y que llegan a ser detectados a unas 15 millas del foco eruptivo, al noroeste de la isla¹ (figura 1). Muchas son las referencias de erupciones como la del Monte Santa Helena (EE UU, 1980), el Pinatubo (Filipinas, 1991) o el volcán Cerro Negro (Nicaragua, 1992), así como otras más cercanas en el tiempo como las erupciones del Puyehue-Cordón Caulle (Chile, 2011) o el volcán Eyjafjallajökull (Islandia, 2010), que debido a la liberación de grandes cantidades

de cenizas y otras sustancias, además de afectar al aire ambiental, alcanzaron las masas de agua de interés en los abastecimientos poblacionales.

Figura 1. Pueblo de La Restinga (a) y situación del volcán submarino (b)



El comienzo de la erupción submarina en la isla planteó, por parte de la Dirección General de Salud Pública, la necesidad de estudiar las consecuencias de

la erupción tanto sobre las zonas de aguas de baño (AB) como las zonas de abastecimiento de aguas de consumo humano (ACH) afectadas, emitiéndose por ello un Plan de Actuación Preventivo el 13 de octubre de 2011, con el fin último de proteger la salud de las personas.

Pocos son los estudios en salud pública realizados en el marco de erupciones volcánicas, siempre sobre tierra, como los realizados por Malilay et ál.² o Weniger et ál.³ que realizan sendos estudios epidemiológicos donde se relacionan los efectos de las erupciones con aumentos en el número de casos de diarrea aguda, debido, entre otras circunstancias, a la deposición de cenizas sobre aguas destinadas a la producción de aguas de consumo.

La finalidad de este trabajo fue el estudio de las consecuencias en salud pública de la erupción submarina tanto en ACH como en AB, y su evolución posterior en caso de detectar alteraciones de interés⁴.

En ACH, la zona de abastecimiento que pudiera verse afectada por el fenómeno eruptivo es la del municipio del Pinar (1804 habitantes en 2011, Fuente ISTAC), cuyo origen del agua es la Estación Desaladora de Agua Marina (EDAM) de La Restinga situada precisamente en el núcleo de La Restinga a nivel del mar. En el año 2011, la planta trata el agua del mar por ósmosis inversa, remineralizándola posteriormente por carbonato sódico soluble (lechada de cal) sin adición de CO₂. El agua tratada en la EDAM es bombeada a 100 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) donde desde el depósito de cabecera Restinga I es conducida a los de distribución Restinga II, que abastece al núcleo poblacional del mismo nombre y al depósito de Las Casas (955 m.s.n.m.) que distribuye a la población de Las Casas (386 habitantes, Fuente ISTAC). Posteriormente, el agua es distribuida al núcleo poblacional de Taibique (837 habitantes, ISTAC), tras someterse a los correspondientes tratamientos con desinfectante, tal y como se puede observar en el esquema recogido como figura 2.

En AB, por su parte, se busca extender el estudio a toda la isla, hasta por 10 zonas de baño, debido al alcance de los fragmentos volcánicos que podían afectar a gran parte de la costa insular por la influencia de los vientos y mareas (figura 3).

Figura 2. Zona de Abastecimiento El Pinar

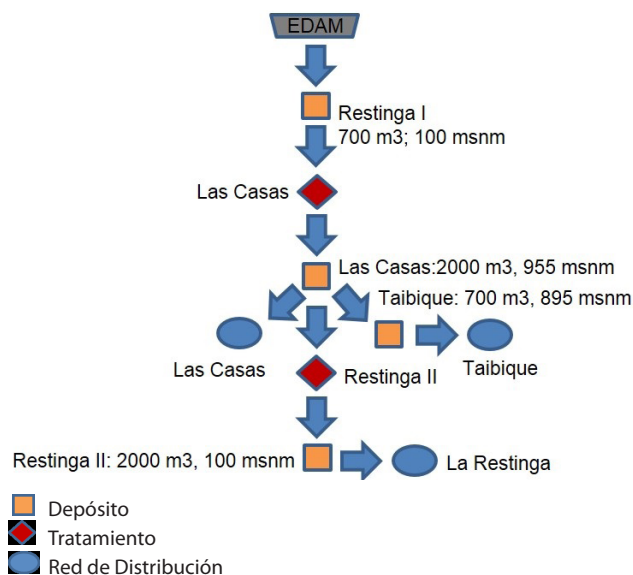


Figura 3. Zonas de aguas de baño controladas en período eruptivo. [*] Tacorón: Cerrada por desprendimientos provocados por los movimientos sísmicos. 1) La Restinga; 2) Faro Orchilla; 3) El Verodal; 4) Arenas Blancas; 5) La Maceta; 6) Charco Manso; 7) El Tamaduste; 8) La Caleta; 9) Puerto Estaca-Unelco y 10) Las Playas- Parador Turismo



MATERIAL Y MÉTODOS

En ACH, tras una valoración inicial de las instalaciones del sistema de abastecimiento existente, con el fin de detectar deficiencias que pudieran afectar a la calidad del agua de consumo, se planificaron determinaciones de una serie de parámetros que pudieran verse afectados por el fenómeno eruptivo como los caracteres organolépticos, fisicoquímicos, microbiológicos o la composición en metales, otras especies químicas de interés y la presencia de radiactividad. Se programaron valoraciones *in situ* de temperatura (Testo 106-T1), desinfectante libre residual (Cloro, CLR, Hanna HI96701), pH (Mettler Toledo, SevenGoTM) y olor cualitativo con una frecuencia de 2 veces por semana, así como valoraciones semanales en el Laboratorio Salud Pública de El Hierro (en fase de acreditación UNE-EN ISO 17 025) de pH (Crison pH Basic-20), Conductividad (Mettler Toledo, SevenGoTM), turbidez (turbidímetro Hanna HI93703), nitrito y amonio (colorimetría) y microbiología de *Clostridium perfringens* (Filtración membrana según Anexo IV, Real decreto 140/2003 de Aguas de Consumo); Enterococos (UNE-EN ISO 7899-2:2001); Coliformes/*E.coli* en 100 ml (UNE-EN ISO 9308-1:2001) y Aerobios a 22 °C por mL por siembra en masa (UNE-EN ISO 6222:1999). Algunos estudios publicados que realizan seguimiento de parámetros en el transcurso de una erupción volcánica corroboran el objetivo de este trabajo. Rodríguez-Espinosa et ál.⁵, en muestras de suelos y cenizas tras la erupción del volcán Popocatepeti (México, 2012) o Cuoco et ál.⁶ en muestras de agua de lluvia utilizada como fuente de agua de consumo durante la erupción del volcán Nyamuragira (Japón, 2010), detectaron, alteraciones en la conductividad, pH o en las concentraciones de metales pesados, ácidos halógenos o de iones, que podían terminar afectando a las aguas de consumo.

Los puntos de muestreo para las labores de vigilancia fueron los establecidos en red de distribución de la Población de Las Casas situado en grifo exterior en carretera general Las Casas (X:206402.99; Y:3068808.01), grifo Plaza El Mentidero en el núcleo poblacional de Taibique (X: 206021.59; Y: 3067916.95) y grifo exterior botiquín farmacéutico (X: 205560.12; Y: 3060908.91) en la Población de La Restinga, y en los depósitos de interés que conforman el municipio de El Pinar (Depósitos de Las Casas, Restinga II y de entrada de Restinga I, por no disponerse de grifo a la salida del mismo) (figura 3). Se omitió del estudio el Depósito de Taibique por no considerarse de interés, ya que no se encontraba directamente asociado a ningún tratamiento y todas las infraestructuras "aguas arriba" iban a ser incluidas en el estudio.

Para la determinación en laboratorio de parámetros físico químicos se utilizaron botes de plástico de 1 L y para los microbiológicos botes de vidrio de 500 mL estériles con tiosulfato para neutralizar el desinfectante existente. Así mismo, se determinaron los valores de distintos metales presentes en la red de distribución de la Restinga, así como niveles de radiactividad, durante la crisis eruptiva y comparándolos con los obtenidos anterior y posteriormente a dicho período. Las muestras para realizar análisis de metales y radiactividad fueron recogidas y procesadas por laboratorios contratados por el Ayuntamiento de El Pinar de El Hierro y por el Consejo Insular de Aguas del Cabildo de El Hierro (Labaqua S.A., acreditado por la norma UNE-EN-ISO 17 025) siendo Canaragua Concesiones S.A.U. la empresa mediadora.

Por su parte, en aguas de baño se realizan muestreos en la zona más cercana al foco eruptivo (Zona de baño de La Restinga) así como en zonas de baño más alejadas al mismo para análisis de caracteres físico químicos como pH, turbidez, conductividad, salinidad (conductivímetro Mettler Toledo SevenGoTM) y contenido en aniones sulfatos (cromatografía iónica con determinación de conductividad) a determinar en los Laboratorios de Salud Pública de El Hierro y Tenerife (acreditado por la norma UNE-EN-ISO 17 025), así como determinaciones *in situ* en la Zona de baño de la Restinga del pH, conductividad, salinidad y temperatura realizada por los servicios de inspección. La legislación nacional para aguas de baño solamente establece la determinación de parámetros microbiológicos⁷. En nuestro caso nos interesaba conocer cambios sustanciales en determinados caracteres físico químicos del agua de mar, origen del agua de consumo en esta zona de abastecimiento, así como incluir los sulfatos que podrían aumentar sustancialmente debido al proceso eruptivo en el mar y convertirse en causante de problemas gastrointestinales en concentraciones de 1000-1200 mg/L en agua de consumo.

Se estableció una programación que constaba de una primera etapa comprendida desde finales de octubre a finales de noviembre de 2011 con frecuencia de muestreo tres veces por semana en todas las zonas de baño de la geografía insular (10 zonas de baño, figura 3) para valorar el impacto del fenómeno, mientras que posteriormente se estableció un seguimiento solamente en la zona de la restinga por ser la más cercana al foco hasta final de la crisis eruptiva.

RESULTADOS

La valoración inicial de los depósitos de agua de consumo dio como resultado deficiencias de acuerdo a la normativa estatal de aguas de consumo⁸ y el Programa

Autonómico de Vigilancia sanitaria de las Aguas de Consumo Humano⁹ en las medidas de protección, ya que carecían de vallado perimetral, cementado mínimo de 50 cm, de una caseta de cloración reglamentaria y de la señalización correspondiente a un lugar de almacenamiento de agua de consumo humano. Así mismo, tanto en el Depósito de Las Casas como el de La Restinga II, únicos puntos de cloración existentes, la inyección por sistema automático del cloro se realizaba en la tubería de recirculación y no a la entrada del agua a la instalación, lo cual puede generar "bolsas" de desinfectante y mucha variabilidad por falta de homogenización del mismo en el interior de los depósitos.

Los valores obtenidos para el cloro libre residual (CLR), pH, turbidez y conductividad en redes de distribución se muestran en la tabla 1. De igual manera los resultados obtenidos en agua de consumo para la temperatura tanto en redes como en los depósitos de distribución y los parámetros cloro libre residual (CLR), pH y turbidez a

la salida de los depósitos se recogen en la figura 4, donde se muestran igualmente los límites de estos tres últimos parámetros establecidos en normativa para asegurar una correcta desinfección en el interior de los depósitos de agua de consumo. Los indicadores nitritos y amonio mostraron valores inferiores al límite de detección a lo largo de todo el período de seguimiento ($< 0,05 \pm 13 \%$ mg/L y $< 0,10 \pm 15 \%$ mg/L, respectivamente) y los valores de conductividad no se vieron afectados por el fenómeno. Así mismo, las determinaciones de olor cualitativo al igual que el de Coliformes totales, *Escherichia coli* y *Clostridium perfringens* no mostraron contaminación alguna. Respecto a los resultados obtenidos para los aerobios a 22 °C, solamente 2 de las determinaciones (27 octubre 2011 y 9 de enero 2012) de un total de 132 realizadas en la zona de abastecimiento de interés a lo largo de todo el proceso eruptivo superaron las 100 UFC/mL (1,5 %), hechos causados por obras de mantenimiento en la red de distribución de Taibique, tal y como informó el gestor municipal (tabla 1).

Figura 4. Resultados obtenidos de temperatura en las redes de distribución y salida de depósitos (°C, 4.a, Testo), CLR en mg/L (ppm, 4.b, Hanna HI96701), pH (4.c, Mettler Toledo) y turbidez (UNF, 4.d, Hanna HI93703) a la salida de depósitos durante el período eruptivo en agua de consumo humano (ach) en puntos de interés de la zona de abastecimiento de El Pinar. Red (—) y Depósito Las Casas (●); Red Taibique (—); Red Restinga (—) y Depósitos Restinga I (●) y Restinga II (●)

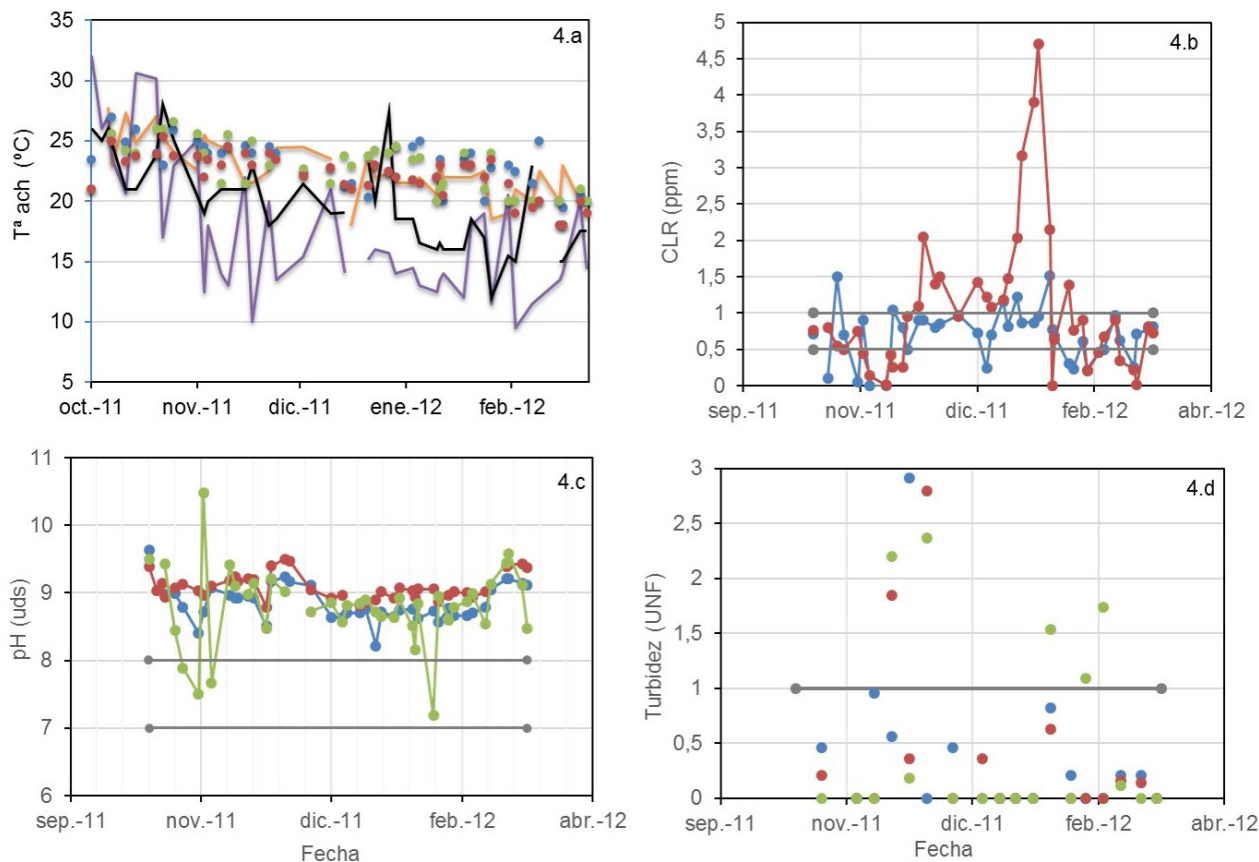


Tabla 1. Valores medios \pm desviación estándar de cloro libre residual (CLR), pH, turbidez y conductividad determinadas a lo largo del período eruptivo en los puntos de muestreo establecidos al efecto en las redes de distribución del municipio del Pinar. Los resultados de los mismos parámetros determinados a la salida de los depósitos de interés se muestran en la figura 4 tal y como se especifica, n° de muestras = n. Entre paréntesis se detallan el número de muestras que se encuentran fuera de los límites establecidos en normativa

Fecha (mes/año)	Red Distribución/Deposito	n° muestras	CLR (mg/L)	pH	n° muestras	Turbidez (UNF)	Conductividad (μ S/cm)
octubre-11	Red Casas	6	0,49 \pm 0,18	9,26 \pm 0,33 (n = 1, pH > 9,5)	3	0,96 (n = 1)	981,66 \pm 40,41
	Red Taibique	6	0,40 \pm 0,20 (n = 1, CLR < 0,2)	9,12 \pm 0,15	3	1,16 \pm 0,66	947,66 \pm 49,66
	Red Restinga	4	1,52 \pm 0,51 (n = 3, CLR > 1)	9,18 \pm 0,11	2	0,00	825 \pm 33,94
	Salida Depo Casas	4	Figura 4.b, 4.c		1-2	Figura 4.d	976 \pm 39,60
	Salida Depo Restinga II	4			1		945
	Entrada Depo Restinga I	4			1-2		1009 \pm 15,56
noviembre-11	Red Casas	10	0,92 \pm 0,24 (n = 3, CLR > 1)	9,07 \pm 0,24	4	1,15 \pm 0,73	720,75 \pm 19,97
	Red Taibique	10	0,60 \pm 0,34 (n = 1, CLR > 1; n = 1, CLR < 0,2)	9,14 \pm 0,17	4	1,57 \pm 1,25	767,75 \pm 62,03
	Red Restinga	10	0,97 \pm 0,66 (n = 4, CLR > 1; n = 1, CLR < 0,2)	9,07 \pm 0,27	4	0,19 \pm 0,15	843,5 \pm 58,36
	Salida Depo Casas	10	Figura 4.b, 4.c		4	Figura 4.d	719,75 \pm 23,08
	Salida Depo Restinga II	10			4		793,75 \pm 35,33
	Entrada Depo Restinga I	9			4		717,75 \pm 69,25
diciembre-11	Red Casas	6	0,72 \pm 0,32 (n = 1, CLR > 1)	9,20 \pm 0,34	3	0,22 \pm 0,28	820,33 \pm 81,27
	Red Taibique	5	0,60 \pm 0,34 (n = 1, CLR < 0,2)	9,18 \pm 0,28	3	0,04 \pm 0,07	816,33 \pm 80,70
	Red Restinga	6	1,46 \pm 0,46 (n = 5, CLR > 1)	8,96 \pm 0,20	3	0,05 \pm 0,09	834 \pm 57,65
	Salida Depo Casas	6	Figura 4.b, 4.c		3	Figura 4.d	815,67 \pm 94,52
	Salida Depo Restinga II	6			3		806 \pm 77,25
	Entrada Depo Restinga I	5			3		810,33 \pm 81,00
enero-12	Red Casas	10	0,84 \pm 0,39 (n = 3, CLR > 1)	8,91 \pm 0,14	5	0,33 \pm 0,32	714,6 \pm 32,71
	Red Taibique	10	0,83 \pm 0,31 (n = 4, CLR > 1)	8,97 \pm 0,09	5	1,52 \pm 2,90 (n = 1, > 5 UNF)	732,2 \pm 27,42
	Red Restinga	10	2,68 \pm 1,97 (n = 8, CLR > 1)	8,82 \pm 0,11	5	0,25 \pm 0,32	755,2 \pm 40,37
	Salida Depo Casas	10	Figura 4.b, 4.c		5	Figura 4.d	698 \pm 50,14
	Salida Depo Restinga II	10			5		737,6 \pm 41,51
	Entrada Depo Restinga I	10			5		690 \pm 42,68
febrero-12	Red Casas	9	0,84 \pm 0,39 (n = 1, CLR > 1; n = 1, CLR < 0,2)	9,04 \pm 0,22	4	0,12 \pm 0,16	787,75 \pm 53,82
	Red Taibique	8	0,50 \pm 0,33 (n = 1, CLR > 1; n = 1, CLR < 0,2)	9,08 \pm 0,21	4	0,34 \pm 0,51	803 \pm 51,14
	Red Restinga	9	0,69 \pm 0,38 (n = 2, CLR > 1; n = 1, CLR < 0,2)	8,90 \pm 0,35	4	0,22 \pm 0,44	817,25 \pm 48,73
	Salida Depo Casas	9	Figura 4.b, 4.c		4	Figura 4.d	757,5 \pm 40,87
	Salida Depo Restinga II	9			4		779,25 \pm 40,42
	Entrada Depo Restinga I	9			4		777,25 \pm 55,99
marzo-12	Red Casas	2	0,60 \pm 0,42	9,31 \pm 0,05	1	0,31	705
	Red Taibique	2	0,59 \pm 0,04	9,40 \pm 0,03	1	0,00	715
	Red Restinga	2	1,05 \pm 0,01 (n = 2, CLR > 1)	9,28 \pm 0,07	1	0,00	733
	Salida Depo Casas	2	Figura 4.b, 4.c		1	Figura 4.d	689
	Salida Depo Restinga II	2			1		705
	Entrada Depo Restinga I	2			1		655

En aguas de consumo, tal y como se muestra en la tabla 2, el estudio también incluyó una comparativa de los resultados obtenidos en metales, otras especies químicas de interés y niveles de radiactividad en puntos temporales anterior, posterior y durante el proceso

eruptivo por completar el análisis de la influencia del fenómeno sobre las aguas utilizadas para la producción de agua de consumo humano, sin observarse efectos de la erupción en los resultados obtenidos (tabla 2).

Tabla 2. Valores obtenidos para los distintos parámetros descritos tras análisis en laboratorio por los métodos analíticos especificados antes, durante y después del período eruptivo en la Zona de Abastecimiento de El Pinar. Puntos de muestreo red Restinga (1) y punto de muestreo salida EDAM La Restinga (2)

Parámetro	Método analítico	Máximo 140/2003	Proceso Eruptivo (Fecha)					Unidades	
			Antes	Durante		Después			
			07/04/2008 (1)	25/10/2011 (1)	22/11/2011 (2)	17/12/2013 (1)	14/10/2014 (2)		
Metales	Al	ICP-MASAS	200	26 ± 13 %	27 ± 13%	3 ± 13 %	< 10 ± 13 %	< 10 ± 12 %	µg/L
	Cd		5	< 1 ± 12 %	< 1 ± 12 %	< 1 ± 12 %	< 1 ± 12 %	< 1 ± 13 %	µg/L
	Cu		2	< 0,002 ± 12 %	< 0,002 ± 12 %	< 0,002 ± 12 %	< 0,002 ± 12 %	< 0,002 ± 14 %	mg/L
	Cr		50	< 2 ± 12 %	< 2 ± 12 %	< 2 ± 12 %	< 2 ± 12 %	< 2 ± 14 %	µg/L
	Fe		200	81 ± 12 %	40 ± 12 %	< 10 ± 12 %	< 10 ± 12 %	< 10 ± 13 %	µg/L
	Mn		50	< 2 ± 12 %	< 2 ± 12 %	< 2 ± 12 %	< 2 ± 12 %	2 ± 14 %	µg/L
	Hg		1	< 0,10 ± 12 %	< 0,20 ± 13 %	< 0,20 ± 13 %	< 0,20 ± 13 %	< 0,20 ± 15 %	µg/L
	Ni		20	< 2 ± 12 %	< 2 ± 12 %	< 2 ± 12 %	< 2 ± 12 %	< 2 ± 13 %	µg/L
	Pb		25	< 2 ± 12 %	< 2 ± 12 %	< 2 ± 12 %	< 2 ± 12 %	< 2 ± 13 %	µg/L
No metales	Se	Espectrofotometría UV-V	10	< 2 ± 12 %	< 2 ± 12 %	< 2 ± 12 %	< 2 ± 12 %	< 2 ± 14 %	µg/L
Metaloides	Sb		5	< 2 ± 13 %	< 2 ± 13 %	< 2 ± 13 %	< 2 ± 13 %	< 2 ± 12 %	µg/L
	As		10	< 2 ± 12 %	< 2 ± 12 %	< 2 ± 12 %	< 2 ± 12 %	< 2 ± 16 %	µg/L
Aniones	B	1	0,758 ± 13 %	0,970 ± 13 %	0,993 ± 13 %	0,64 ± 10 %	0,436 ± 15 %	mg/L	
	Sulfatos	Cromatografía iónica	250	8,8 ± 13,1 %	18,7 ± 13,1 %	14,3 ± 13,1 %	16,04 ± 13,1 %	5,18 ± 12 %	mg/L
Fluoruros	1,5		< 0,100 ± 12,9 %	< 0,100 ± 12,9 %	< 0,100 ± 12,9 %	< 0,100 ± 12,9 %	< 0,100 ± 14 %	mg/L	
Radiactividad	Actividad Alfa total	Contador proporcional flujo	0,1	0,077 ± 0,023		< 0,05 ± 0,021			Bq/L
	Actividad beta resto		1	0,009 ± 0,011		< 0,100 ± 0,024			Bq/L
	Actividad beta total			0,192 ± 0,011		0,233 ± 0,024			Bq/L
	Dosis indicativa total	Dosis indicativa total	0,1			< 0,1			mSv/año
	Tritio	Centelleo líquido	100			< 18 ± 29,4 %			Bq/L

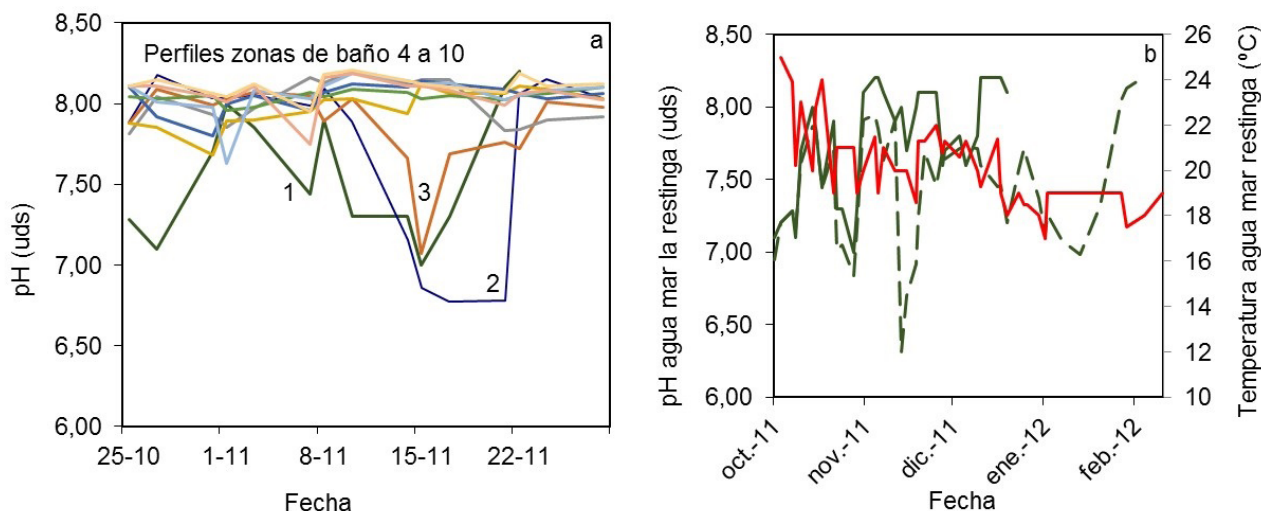
En aguas de baño, se muestran los perfiles de pH obtenidos en el primer tramo del período eruptivo en cada una de las 10 zonas de aguas de baño en estudio, así como los perfiles de pH y temperatura en la zona de baño de La Restinga, considerada la de mayor riesgo,

a lo largo del todo el proceso eruptivo (figura 5). De igual forma, en la tabla 3 se muestran los valores de conductividad, salinidad, turbidez y concentración de sulfatos determinados *in situ* o en laboratorio en cada una de las zonas de baño en estudio.

Tabla 3. Valores medios \pm desviación estándar de los parámetros conductividad, salinidad, turbidez y concentración de sulfatos determinados *in situ* o en laboratorio, según los casos, en cada una de las 10 zonas de baño de la geografía insular en estudio durante el período eruptivo

Fecha (mes/año)	Zona de baño	n° muestras	Conductividad	Salinidad	Turbidez	Sulfatos
			mS/cm	ppt	UNF	mg/L
octubre-11	La Restinga	4 laboratorio	46,05 \pm 2,10		1,38 \pm 0,44	2944 \pm 66,40
		4 <i>in situ</i>	50,25 \pm 0,51	36,75 \pm 0,37		
	Faro de Orchilla	3	49,1 \pm 2,51	37,1 \pm 0,10	1,32 \pm 0,76	2872,13 \pm 222,86
	El Verodal		49,13 \pm 2,46	37,07 \pm 0,11	3,12 \pm 1,81	3053,00 \pm 334,34
	Arenas Blancas		49,23 \pm 2,54	37,2 \pm 0,10	3,69 \pm 1,80	3105,31 \pm 193,21
	La Maceta		49,33 \pm 2,80	37,37 \pm 0,21	1,14 \pm 0,49	3050,95 \pm 297,68
	Charco Manso		49,40 \pm 2,17	37,23 \pm 0,06	1,22 \pm 0,56	3023,44 \pm 354,09
	Tamaduste		49,13 \pm 2,63	37,20 \pm 0,10	0,69 \pm 0,36	3166,23 \pm 204,79
	La Caleta		49,30 \pm 2,25	37,20 \pm 0,10	0,54 \pm 0,75	3080,98 \pm 515,57
	Unelco-Puerto Estaca		49,27 \pm 2,40	37,20 \pm 0,10	0,78 \pm 0,55	3007,38 \pm 451,47
Las Playas-Parador Nacional	49,13 \pm 2,37		37,13 \pm 0,11	1,04 \pm 0,56	3009,49 \pm 368,82	
noviembre-11	La Restinga		8 laboratorio	48,94 \pm 0,79	35,21 \pm 0,39	1,14 \pm 0,62
		13 <i>in situ</i>	48,94 \pm 0,79	35,31 \pm 1,58		
	Faro de Orchilla	12	49,49 \pm 1,93	37,10 \pm 0,04	1,38 \pm 1,10	2803,80 \pm 226,07
	El Verodal		50,39 \pm 3,77	37,20 \pm 0,22	3,17 \pm 1,75	2599,99 \pm 341,01
	Arenas Blancas		49,58 \pm 2,07	37,23 \pm 0,10	1,05 \pm 0,64	2740,21 \pm 484,67
	La Maceta		48,68 \pm 3,09	37,11 \pm 0,48	0,94 \pm 0,61	2898,11 \pm 371,85
	Charco Manso		49,55 \pm 2,00	37,21 \pm 0,05	1,25 \pm 0,72	2772,86 \pm 332,83
	Tamaduste		49,43 \pm 1,94	37,07 \pm 0,13	1,32 \pm 0,56	2729,50 \pm 476,89
	La Caleta		49,42 \pm 2,07	37,15 \pm 0,14	1,29 \pm 0,89	2735,77 \pm 265,91
	Unelco-Puerto Estaca		49,56 \pm 2,00	37,18 \pm 0,10	1,49 \pm 1,18	2831,91 \pm 232,38
Las Playas-Parador Nacional	49,49 \pm 1,91		37,12 \pm 0,08	1,16 \pm 0,67	2883,10 \pm 428,89	
diciembre-11	La Restinga		3 laboratorio			0,42 \pm 0,49
		12 <i>in situ</i>	49,33 \pm 2,09	36,10 \pm 1,69		
enero-12	La Restinga	12 laboratorio	48,22 \pm 2,43	35,42 \pm 1,88	0,90 \pm 0,51	2953,92 \pm 250,30
		11 <i>in situ</i>	47,03 \pm 2,64	34,28 \pm 2,11		
febrero-12	La Restinga	4 laboratorio	47,97 \pm 1,19	35,32 \pm 0,95	0,97 \pm 0,66	3375,75 \pm 256,46
		5 <i>in situ</i>	45,80 \pm 1,68	33,30 \pm 1,44		
marzo-12	La Restinga	2 laboratorio	49,25 \pm 0,07	36,10 \pm 0,14	0,81 \pm 0,12	3425 \pm 264,46
		1 <i>in situ</i>	46,00	33,40		

Figura 5. Perfiles de pH obtenidos a partir de determinaciones en laboratorio en agua de mar muestreada en las 10 zonas de baño en estudio durante el primer mes de erupción (a) y perfiles de pH obtenidos a partir de determinaciones *in situ* (---) y en laboratorio (—) en la zona de baño de La Restinga, así como perfil de valores de temperatura (—) obtenidos en dicha zona a lo largo de todo el proceso eruptivo (b)



DISCUSIÓN

La discusión la estructuraremos en dos grandes bloques: el primero de ellos basado en discutir los resultados obtenidos para las aguas de consumo y las aguas de baño a lo largo del proceso eruptivo, y el segundo bloque, consecuencia del primero, viene a valorar en función de los resultados obtenidos, las mejoras a acometer y su evolución hasta nuestros días. Durante el proceso eruptivo, en aguas de consumo las temperaturas en red de distribución fueron muy variables, en un rango de 9,5 a 32 °C a lo largo del estudio, condicionada por las temperaturas ambientales debido a que gran parte de la misma no se encuentra soterrada. Sin embargo, en depósitos el diferencial fue de solamente 9 °C, (18-27 °C) debido a que mantienen mejor las temperaturas del agua que reciben, valores que no se vieron afectados en ningún momento por el fenómeno eruptivo (figura 4.a). Los resultados obtenidos para el cloro libre residual (CLR), por su parte, mostraron falta de optimización del sistema de desinfección en los dos tratamientos existentes, Las Casas y Restinga II, tanto a salida de los depósitos (figura 4.b) como en redes de distribución (tabla 1). En los depósitos, donde se pretende mantener concentraciones entre 0,5 y 1 ppm de CLR para cumplir con las condiciones óptimas de desinfección, solamente a partir de febrero se mantiene en ese intervalo, salvo unas pocas determinaciones, destacando los excesos de desinfectante detectadas a la salida del depósito Restinga II, no solamente por el propio fallo en la

ubicación de la inyección del desinfectante, sino por la circunstancia que el agua almacenada en el depósito Restinga II ha sido sometida a dos cloraciones similares. Estos hechos obligaron a proceder a las autoridades competentes a la contratación de una empresa que se ocupara de acometer las modificaciones necesarias en ambos tratamientos, tareas que se llevaron a cabo durante la segunda quincena del mes de enero 2012. De hecho, si valoramos los cuatro primeros meses de erupción (octubre 2011-enero 2012), los valores medios \pm desviación estándar de CLR a la salida de Restinga II y Las Casas fueron de $1,37 \pm 1,08$ ppm y $0,79 \pm 0,35$ ppm (n = 28), respectivamente, valores que disminuyen notablemente si se valora el parámetro solamente a partir de la optimización del sistema de desinfección (febrero-marzo 2012), con medias de $0,55 \pm 0,31$ ppm y $0,56 \pm 0,25$ ppm (n = 11).

Por su parte, en redes de distribución, las incidencias en el nivel de desinfectante van parejas a las obtenidas a la salida de los depósitos, mejorando igualmente a partir de febrero 2012. Además de todo lo detallado anteriormente, la población de La Restinga se ve disminuida considerablemente desde el comienzo de la crisis eruptiva, acentuándose durante los dos períodos en que la situación sísmico volcánica obliga a evacuar a todo el núcleo poblacional (del 11-21 octubre y del 5 al 14 de noviembre de 2011), lo que disminuye el consumo de forma paralela. Estas circunstancias hicieron necesario el establecimiento por parte de la Dirección General de Salud Pública de

una serie de medidas preventivas que consistieron en el mantenimiento de los niveles de desinfectante libre residual en redes de distribución entre 0,5 ppm y 1 ppm durante todo el período en que el consumo de agua estuviera por debajo de lo habitual; en extremar las precauciones sobre las aguas almacenadas tanto en redes interiores como el aljibes/bidones, para reducir el riesgo de contaminación microbiológica por pérdida de la capacidad desinfectante y recomendándose, por último, dejar circular durante un mínimo de 10 minutos el agua antes de su consumo.

Respecto a los valores de pH del agua de consumo a la salida de los depósitos se muestran perfiles (figura 4.c) por encima del intervalo recomendado (pH 7-8) lo cual va en contra del objetivo de lograr una óptima desinfección, con solamente 4 determinaciones dentro de dicho rango, que además corresponden a los obtenidos a la salida de un depósito de cabecera como el Restinga I. Por el contrario, solamente un 14,8 % de los valores de turbidez obtenidos fueron superiores a 1 UNF (figura 4.d). Muchos de estos resultados obtenidos se vieron favorecidos por la existencia de la planta de tratamiento por la que pasa el 100 % del agua bruta a tratar, la existencia de mínimas condiciones de desinfección, el origen marino del agua y la situación del cono volcánico, condicionantes muy distintos a los existentes en los estudios de erupciones anteriores, como en la del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle (Chile, 2011)¹⁰, donde el considerable aumento de la turbidez y sólidos solubles, llegó a colapsar plantas de tratamiento, provocando la necesidad de buscar filtraciones complementarias y otros orígenes de agua.

En aguas de baño los resultados obtenidos para la conductividad, salinidad y sulfatos se encontraron dentro del intervalo de referencia en agua de mar recogido en la bibliografía en las 10 zonas de aguas de baño estudiadas¹¹ (tabla 2). Respecto a la turbidez en agua de mar se obtuvieron valores muy variables desde el mínimo obtenido en la zona de baño de La Restinga en diciembre de 2011 con $0,42 \pm 0,49$ UNF o el máximo en la zona de baño de Arenas Blancas en octubre 2011 con $3,69 \pm 1,80$ UNF, destacando los valores elevados en esta última zona y en la zona de baño de El Verodal a lo largo del período de estudio, debido probablemente a las condiciones marítimas y vientos predominantes en dicha zona y descartando ninguna influencia de la erupción sobre los mismos (tabla 2).

Por el contrario, para el parámetro pH sí que se observaron diferencias entre las Zonas de baño de

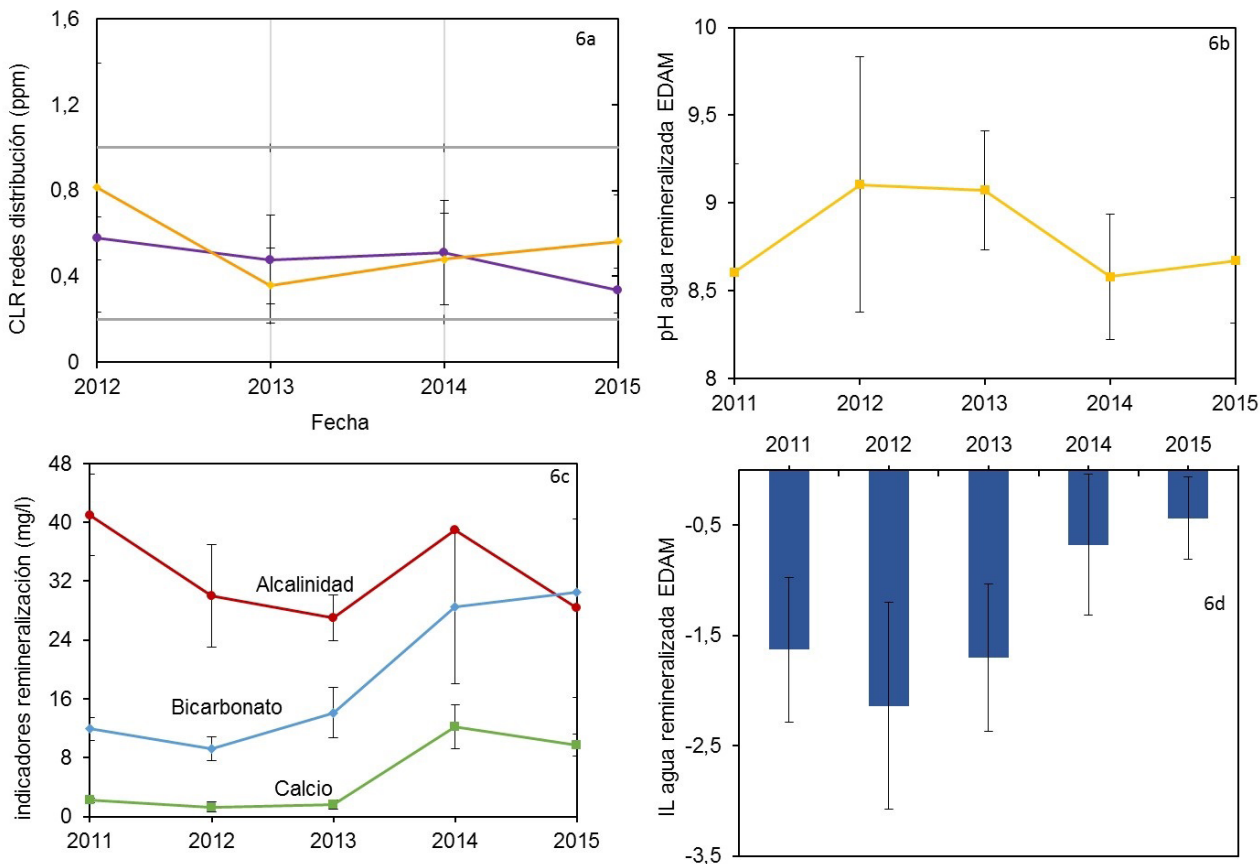
La Restinga, Faro de Orchilla y El Verodal (figura 3) en torno a 1 unidad de pH inferior a los alcanzados en el resto de aguas muestreadas (Aguas de baño numeradas del 4 al 10), que presentan todas ellas perfiles similares (figura 5.a).

Tales resultados hicieron plantearnos en un principio la posibilidad que estuviera influyendo en esta circunstancia las mareas y los vientos predominantes en la zona, pero finalmente tal variación no se relacionó con el proceso eruptivo, ya que en el histórico recogido del Programa Autonómico de Playas de Canarias, existente hasta la entrada en vigor de la nueva normativa de playas⁷ y posteriormente en el Programa Náyade se obtuvieron valores entre 6,89 - 8,80 entre el 2000 y 2010 para las mismas zonas, similares a los obtenidos durante el fenómeno.

Por su parte, el perfil del pH obtenido en la zona de baño de la Restinga durante la siguiente fase de estudio (diciembre 2011 - marzo 2012) no varía de forma clara, mientras que los valores de temperatura en la misma se situaron entre los 17 y los 25 °C.

El segundo bloque de esta discusión versará sobre las consecuencias de los resultados de los estudios realizados sobre las aguas de mar y aguas de consumo durante todo el proceso eruptivo. Visto que el fenómeno no influyó de forma alguna sobre ningún parámetro en estudio, resueltos los problemas existentes en los tratamientos de desinfección en los depósitos de Las Casas y La Restinga II tras las modificaciones realizadas en enero 2012 (figura 6.a, perfiles desde 2012 a 2015 para el cloro libre residual (CLR, mg/L) en las redes de distribución de Las Casas y La Restinga) y constatado que los valores obtenidos para el pH distan mucho de los deseados para lograr adecuadas eficiencias de desinfección, centramos nuestros esfuerzos en valorar el proceso de optimización de la fase de remineralización del permeado en la EDAM de La Restinga, origen del agua que abastece a todo el municipio de El Pinar. Los criterios utilizados para ello fueron la alcalinidad, el calcio, el bicarbonato y el índice de Langelier. El tratamiento por ósmosis inversa y posterior remineralización por lechada de cal (hidróxido cálcico 10-15 %), operativa hasta finales de 2012, fue sustituida por tanques de calcita en 2013, tratamiento sobre el que se comenzó a dosificar dióxido de carbono en 2015.

Figura 6. Evolución en el período 2011-2015 del CLR (Hanna HI96701) en redes de distribución asociadas a los tratamientos de desinfección en la Zona de Abastecimiento de El Pinar (Redes de distribución La Restinga (—) y Las Casas (—), 6.a); perfiles de pH (Mettler Toledo, 6.b) alcalinidad (valorador Crison), bicarbonato y calcio (ICP-masas) del agua remineralizada a la salida de la EDAM La Restinga (6.c) y valores del índice de Langelier (IL) obtenidos (6.d)



Los resultados obtenidos para los parámetros alcalinidad, bicarbonato y calcio (media \pm desviación estándar en mg/L) obtenidos a partir de agua remineralizada muestreada en EDAM para su análisis en laboratorio con frecuencia mínima trimestral ($n \geq 4$) entre los años 2011 al 2015, así como los resultados obtenidos para el pH, mostraron perfiles erráticos (figura 6.b y 6.c) que, si bien mejoran con la introducción de la calcita en 2013, la dosificación de CO_2 resulta insuficiente, alcanzando solamente en torno a la mitad de las concentraciones medias recomendados para un agua adecuadamente remineralizada (56 ± 3 , 68 ± 3 y 21 ± 2 mg/L para la alcalinidad, bicarbonato y el calcio, respectivamente¹²) y valores de pH que no descienden de las 8,5 unidades. Por último, el índice de saturación de Langelier (LSI) (figura 6.d), aun manteniendo una cierta variabilidad, muestra una considerable mejoría, alcanzando un valor medio para el año 2015 dentro del intervalo establecido en normativa⁸ (-0,5 a +0,5).

CONCLUSIONES

El estudio mostró que el proceso eruptivo no afectó a la calidad de las aguas de consumo humano del municipio de El Pinar, ni a las aguas de baño estudiadas a lo largo de toda la geografía insular, si bien, este trabajo nos permitió descubrir fallos tanto en los procesos de tratamiento de desinfección en depósitos de agua de consumo como en la remineralización en la EDAM de La Restinga. Mejorados los niveles de CLR por actuación en el diseño del tratamiento, la introducción de los tanques de calcita en 2013, sustituyendo a las lechadas de cal, mejoró la calidad del agua remineralizada, según los parámetros estudiados.

Actualmente la dosificación de CO_2 es insuficiente, y aunque los niveles de pH e índice de Langelier reflejan una mejora a lo largo de los años, el agua remineralizada continúa siendo inestable con tendencia a corrosiva

y dando lugar posteriormente a un agua distribuida a población que contiene menos de un 10 % de ácido hipocloroso (HClO) disponible como CLR, poniendo en riesgo la eficacia en el tratamiento de desinfección.

En definitiva, el trabajo que aquí recogemos es el primero que viene a describir un completo seguimiento de parámetros de interés tanto en aguas de consumo humano como en aguas de baño, con el fin de valorar posibles efectos sobre la salud de las personas, realizado a lo largo de un proceso eruptivo submarino y en el que el origen del agua abastecida a la población es marino, llevándose a cabo, así mismo, una mejora de las deficiencias detectadas durante el estudio.

AGRADECIMIENTOS

A todo el personal de la Dirección General de Salud Pública por la Dirección del Plan de actuación y su gran apoyo a los servicios de inspección; a José Rodríguez Arteaga y Pilar González Rodríguez, personal de la Dirección de Área de Salud de El Hierro, por su apoyo.

Al Laboratorio de Salud Pública de El Hierro y en especial a su Técnico, Nieves Febles Marichal. Al personal del CECOI de El Hierro y al Laboratorio de Salud Pública de Tenerife por su colaboración en la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- López Moreno C. Crónica de una erupción submarina. La crisis sismo-volcánica de El Hierro 2011-2012. Madrid: Anuario Astronómico del Observatorio de Madrid; 2013.
- Malilay J, Guido Real M, Ramírez Vanegas A, et ál. Vigilancia de la salud pública después de una erupción volcánica: lecciones aprendidas en Cerro Negro, Nicaragua, 1992. *Rev. Panam. Salud Pública* 1997; 1:213-8.
- Weniger BG, Blaser MJ, Gedrose J, et ál. An outbreak of waterborne giardiasis associated with heavy water runoff due to warm weather and volcanic ashfall. *Am. J. Public Health*. 1983; 73:868-72.
- Delgado Perera JJ, Bello León JA. El proceso eruptivo en la Isla de El Hierro 2011: Influencia sobre los abastecimientos de aguas de consumo y las aguas de baño. Evolución hasta la actualidad". *Rev. salud ambient.* 2015; 15 (Especial congreso):199.
- Rodríguez-Espinosa, PF, Jonathan MP, Morales-García SS, et ál. Metal enrichment of soils following the April 2012-2013 eruptive activity of the Popocatepetl volcano, Puebla, Mexico. *J. Hazard Mater.* 2013; 244-245:570-81. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.10.055.
- Cuoco E, Tedesco D, Poreda RJ, et ál. Impact of volcanic plume emissions on rain water chemistry during the January 2010 Nyamuragira eruptive event: implications for essential potable water resources. *Environ. Monit. Assess.* 2012; 184:4035-47. doi: 10.1007/s10661-011-2242-0.
- Real Decreto 1341/2007, de 11 de octubre, sobre gestión de la calidad de las aguas de baño. BOE nº 257, de 26 de octubre.
- Real Decreto 140/2003 de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo. BOE nº 45, de 21 de febrero.
- Programa de Vigilancia Sanitaria de Aguas de Consumo de la Comunidad Autónoma de Canarias. Resolución 1067 de la Dirección General de Salud Pública del Servicio Canario de la Salud de 27 de junio de 2008. BOC nº 224, de 7 de noviembre.
- Wilson T, Stewart C, Bickerton H, et ál. Impactos en la salud y el medio ambiente producidos por la erupción del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle del 4 de junio de 2011. Informe de un equipo de investigación multidisciplinario. GNS Science Report 2012/20. 2012.
- Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano. Informes, Estudios e Investigación. Ministerio de Sanidad y Política Social. Secretaría General Técnica. Madrid: Servicio de Publicaciones Ministerio de Sanidad y Política Social; 2009.
- Hernández Suárez M. Guía para la remineralización de las aguas desaladas. Madrid: ACUAMED y Santa Cruz de Tenerife: Fundación Centro Canario del Agua. 2ª edición, 2010. [citado 2 de diciembre de 2016] Disponible en: http://www.acuamed.es/media/publicaciones/guia_para_la_remineralizacion_de_aguas_desaladas_rev3_2.pdf.